

ВИКОРИСТАННЯ НЕЧІТКИХ ПРАВИЛ ДЛЯ ПОДАННЯ ЗНАТЬ В ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМАХ НАФТОГАЗОВОЇ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

М.М. Демчина

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел.(0342) 42127,
e-mail: demchyna@i.ua

В запропонованому дослідженні проаналізовано структуру реалізації знань в формі правил для інтелектуальних інформаційних систем нафтогазової предметної області, а також інформаційних систем на основі баз даних та знань. Поряд з існуючими формами подання чітких правил, правил з невизначеністю, правил з коефіцієнтами впевненості, обґрунтовано переваги використання нечітких правил з лінгвістичними входженнями. Визначено структуру формального підходу побудови інтелектуальних систем на основі нечітких множин з реалізацією механізму логічного висновку на основі методів та засобів нечіткої логіки. Структуровано функціональність етапу фазифікації вхідних чітких даних про нафтогазові об'єкти, оцінено складність організації процедури нечіткого логічного висновку, особливостей композиційних операцій та вибір методу дефазифікації результатів роботи інтелектуальної системи для їх виведення користувачеві в чіткій формі. Основною складністю реалізації інтелектуальних систем на основі нечіткого підходу виділено завдання вилучення знань в експертів нафтогазової предметної області, що гарантовано включає в себе фактор суб'єктивних оцінок. Вирішення даної проблеми пропонується шляхом побудови засобів контролю та розподілу структурованих і неструктурованих (слабоструктурованих) даних, виділення відповідних класів чітких та нечітких даних, забезпечення автоматичних методів генерації правил з лінгвістичними входженнями, побудови засобів перевірки бази знань на повноту та несуперечливість, а також використання методів верифікації функцій належності.

Ключові слова: нафтогазовий об'єкт, інтелектуальні системи, правила, нечіткі правила, знання, логічний висновок, нечіткість, база знань, нечітка логіка.

В предложенном исследовании проанализирована структура реализации знаний в форме правил для интеллектуальных информационных систем нефтегазовой предметной области, а также информационных систем на основе баз данных и знаний. Кроме существующих форм представления четких правил, правил с неопределенностью, правил с коэффициентами уверенности, обоснованы преимущества использования нечетких правил с лингвистическими входениями. Определена структура формального подхода построения интеллектуальных систем на основе нечетких множеств с реализацией механизма логического вывода на основе методов и средств нечеткой логики. Структурирована функциональность этапа фазификации входных четких данных о нефтегазовых объектах, оценена сложность организации процедуры нечеткого логического вывода, особенностей композиционных операций и выбор метода дефазификации результатов работы интеллектуальной системы для их вывода пользователю в четкой форме. В качестве основной сложности реализации интеллектуальных систем на основе нечеткого подхода выделена задача извлечения знаний у экспертов нефтегазовой предметной области, что гарантированно включает в себя фактор субъективных оценок. Решение данной проблемы предлагается путем построения средств контроля и разделения структурированных и неструктурированных (слабо структурированных) данных, выделения соответствующих классов четких и нечетких данных, обеспечения автоматических методов генерации правил с лингвистическими входениями, построения средств проверки базы знаний на полноту и непротиворечивость, а также использования методов верификации функций принадлежности.

Ключевые слова: нефтегазовый объект, интеллектуальные системы, правила, нечеткие правила, знания, логический вывод, нечеткость, база знаний, нечеткая логика.

In the paper it is analyzed how to represent the structure of knowledge about oil and gas subject area in the form of rules for intelligent systems as well as databases or knowledge bases for information systems. The benefits of using fuzzy logic rules with linguistic entry, alongside with common approaches such as clear-cut rules, uncertainty rules, and rules with confidence factors, are reasoned. The formal approach to developing intelligent systems employing fuzzy sets and inference engine based on the methods and means of fuzzy logic is described. The fuzzification process of the input crisp data concerning oil and gas related objects is structured, difficulties of the output fuzzy inference making are defined, compositional operations features are described, choice of defuzzification method for intelligence system to present realistic and accurate output is proved. Since any knowledge is surely backed by subjective evaluations, extracting crisp knowledge from oil and gas subject area experts is defined to be the main challenge facing intelligent systems developing while employing fuzzy approach. Following ways to solve the investigated issue are offered: developing tools for structured and unstructured (poorly structured) data control and distribution; clear out sorting data into crisp and fuzzy; providing automated methods for generating linguistic rules of entry; developing tools for verifying knowledge bases as to their completeness and consistency; using the membership function verification.

Keywords: oil and gas object, intelligence system, rules, fuzzy rules, knowledge, inference, fuzzy, knowledge-base, fuzzy logic.

Основні ідеї нечіткої логіки введено в дослідженнях Л. Заде [1, 2]. Введення нових формалізмів дає змогу моделювати процес розв'язання в умовах неповної та нечіткої інформації, що особливо актуально для нафтогазової предметної області [3]. Реалізація такого підходу дає можливість моделювати наблизені міркування спеціалістів-експертів в технологічних процесах розвідки, розробки, видобування і експлуатації нафтових та газових родовищ на всіх етапах життєвого циклу. Основна ідея Л. Заде полягала у введенні функції належності елемента множині, що приймає значення в інтервалі $[0;1]$. Такий підхід дозволяє розглядати утворені множини як нечіткі (*fuzzy*), вводити операції над ними та будувати відповідні методи логічного висновку. Друга важлива ідея полягала в поданні лінгвістичних змінних із значеннями в формі нечітких множин. Таким чином, поданий формально-логічний апарат дає змогу моделювати інтелектуальну діяльність в певній предметній області на основі характеристик нечіткості та невизначеності.

Основною характеристикою застосування даного підходу є виділення предметної області з високим рівнем складності множин даних, множин цілей та множин обмежень, або де такі характеристики є недостатньо визначеними для аналізу класичними математичними засобами, що дозволяє в якості ключових понять визначати розмитість та невизначеність.

Для дослідження природи нафтогазових об'єктів, найбільш важливим є можливість введення нечітких понять та знань і можливість оперування ними у рамках сформованої процедури нечіткого висновку. Такі подання є природними для спеціаліста-експерта та більшою мірою відповідають семантиці природної мови.

Реалізація інтелектуальних систем з нечіткою логікою для нафтогазової предметної області є доцільною, оскільки, як свідчать результати дослідження [3], для неї не існує деякої простої математичної моделі, а експертні знання про нафтогазові об'єкти зручно подавати в лінгвістичній формі.

Незважаючи на те, що існує достатньо велика кількість реалізацій інтелектуальних систем на основі нечіткої логіки, дане питання містить також ряд **недостатньо досліджених** складових, а саме:

1) вихідні набори нечітких правил, що вносяться в базу знань формуються фахівцями-експертами, і тому можуть містити неповноту, суперечливість та слабоструктурованість;

2) оцінки функцій належності для множин вхідних та вихідних змінних системи є суб'єктивними (тобто вносяться експертами) і відповідно також міститимуть неточність;

3) використання лінгвістичних змінних є високофункціональним, проте з точки зору системної обробки та логічного висновку вимагає створення додаткових процедур дефазифікації.

Тому **метою** даної статті є побудова подання знань нафтогазової предметної області на основі нечітких правил, з метою їх подальшого використання в предметноорієнтованих інтелектуальних системах.

Реалізація логічного висновку в інтелектуальних системах на основі нечіткої логіки вимагає наявності бази знань у вигляді сукупності нечітких предикатних правил виду:

$$\left[\begin{array}{l} Pr_1 : \text{якщо } h \in H_1, \text{ тоді } b \in B_1 \\ Pr_2 : \text{якщо } h \in H_2, \text{ тоді } b \in B_2 \\ \dots \\ Pr_n : \text{якщо } h \in H_n, \text{ тоді } b \in B_n \end{array} \right. , \quad (1)$$

де: h – вхідна змінна, що є відомими значеннями даних; b – вихідна змінна, що подає значення обчислених даних. Наприклад, якщо h – низький коефіцієнт водонасичення, то b – висока нафтовіддача пласта.

При такому підході знання експерта предметної області дозволяють відображати нечіткий причинно-наслідковий зв'язок, який розглядають як нечітке відношення FR і позначають:

$$FR = H \xrightarrow{\text{fuzzy}} B, \quad (2)$$

де $\xrightarrow{\text{fuzzy}}$ – нечітка імплікація.

З точки зору базових означень [4, 5], відношення FR розглядають як нечітку підмножину прямого добутку $H \times B$, повної множини заголовків H і висновків B . Оскільки основним завданням логічного висновку є отримання нових знань, то такий результат можна розглядати як процес отримання нечіткого результату висновку B' з використанням деякого спостереження H' і деякого елемента знань $H \xrightarrow{\text{fuzzy}} B$, що можна подати у виді:

$$B' = H' \circ FR = H' \circ (H \xrightarrow{\text{fuzzy}} B), \quad (3)$$

де \circ – операція згортання.

Нечіткі правила розглядаються як базовий інструмент подання знань в нечіткій логіці. Як нечітка логіка є тільки однією з можливих формальних моделей моделювання предметних областей, так нечіткі правила є тільки одним з можливих видів правил загалом. Тому в кожній конкретній задачі, (наприклад, задачі нечіткого контролю) розглядається деяка власна інтерпретація правил з точки зору чіткості та нечіткості. Відповідно, як основну слід розглядати задачу оцінки можливих семантик нечітких правил, що, в свою чергу, вимагатиме загальнобачення проблеми інтеграції нечітких правил в загальному контексті нечіткої логіки та теорії ймовірності, що визначається відповідно сутністю нечітких правил як правил окремого виду, що повинні поєднуватися певним чином в контексті їх спільної роботи. Наприклад, в задачі ефективної побудови логічного висновку на основі нечітких правил як окремого завершеного виду нечіткого логічного висновку. В дослідженнях по даній проблемі [6, 7] виділяють ряд підвидів нечітких правил, а саме: послідовні правила, правила з визначеністю (невизначеністю), ймовірнісні правила, паралельні нечіткі правила та ін. Залежно від виду правил обирається спосіб реалізації механізму висновку, що, в свою чергу визначатиме характер застосування програмного додатку загалом.

Правила виду «якщо-тоді» дозволяють максимально природним шляхом подавати знання. Проте дійсна ефективність та потужність даного чи іншого подібного шаблону може бути оцінена тільки з точки зору відповідної семантики, яка безпосередньо включатиме структуру умов та висновків правил, що дозволить відповідно вийти на рівень таких характеристик, як визначеність, невизначеність, можливість, здійсненість. Також правила можна оцінювати з точки зору універсальності, дискретності, множини застосувань, рангу, множини винятків. Тому основна функціональність, що стосується інтерпретації подання та обробки правил, відповідно, явно або неявно зводиться до задач логічного висновку. Дослідження в даній області свідчать про формальну та прикладну важливість нечітких правил, що в кінцевому підсумку стало основою побудови механізмів наближених міркувань, що базуються на теорії нечітких множин. Крім того, важливим позитивним фактором побудови програмних застосувань на основі нечіткої логіки є те, що вони значною мірою відповідають способу мислення, притаманному людині, оскільки інтуїтивно зрозуміло, що він в значно більшій мірі базується на лінгвістичних характеристиках, аніж на числових.

Виділення класу нечітких правил базується на загальній структурі «якщо-тоді» тільки в умовах правил (антецедентах) та висновках правил (консеквентах) дозволяються нечіткі лінгвістичні входження. Тому легко можна бачити, що правило виду «якщо-тоді» в нечіткій інтерпретації набудатиме вигляду «якщо $h \in H$, тоді $b \in B$ », а $H \times B$ розглядається як деяка нечітка точка в просторі нечітких значень. Відповідно, від такого одиничного входження можна перейти до множини нечітких правил виду:

$$\text{якщо } h \in H_i, \text{ тоді } b \in B_j, \quad (4)$$

що відповідно на рівні точкової інтерпретації означатиме побудову структури нечіткого графа, що зображатиме нечітке відношення між h та b , що, в свою чергу може розглядатися як інтерпретація механізмів інтерполяції загалом. В той же час нечітке правило можна розглядати як конструкцію утворену засобами кон'юнкції насамперед з метою реалізації нечіткого Декартового добутку, що, безумовно, виходить за рамки багатозначних логічних імплікацій, які однак в поданні $H \rightarrow B$ є основою моделювання нечітких правил в контексті наближеного висновку [6, 7]. Тому поширеність такого способу моделювання залежала, в першу чергу, від можливостей реалізації операторів імплікації в середовищі застосування нечітких множин. Особливу практичну цінність продемонстрували нечіткі моделі на основі імплікацій Гюделя і Гогуена [7]. Вибір в якості моделюючої основи декартового добутку $H \times B$, або класичної імплікації $H \rightarrow B$, відповідно, також передбачатиме отримання нечітких правил різної природи та функціональності з точки зору їх практичного застосування. Тому оцінка можливої ін-

терпретації нечітких правил саме з точки зору семантики виділяється в даному класі як основний критерій їх потенційного застосування в практично орієнтованих додатках. В дослідженнях [6, 7] розглядається концепція так званих контекстозалежних правил виду «якщо $h \in H$, тоді $b \in B$ поки $h_1 \in H_1$ ». На рівні практичного застосування такий вид нечітких правил може моделюватися певним видом відношень з накладеними обмеженнями щодо логічного висновку. Заслуговує на увагу також семантичне подання нечітких правил з точки зору можливої логіки в контексті немонотонного логічного висновку, що в кінцевому підсумку дозволяє створювати ефективні фреймворки для даного класу правил.

Логічним шляхом побудови нечітких правил є розширення базової концепції правил виду «якщо $h \in H$, тоді $b \in B$ ». Суть розширення полягає в розгляді початкового правила за умови нечіткості складової B :

$$B \models \text{fuzzy} \mid H \models \text{crispy}. \quad (5)$$

Очевидно також слід розглянути випадок:

$$B \models \text{fuzzy} \mid H \models \text{fuzzy}. \quad (6)$$

В початковому правилі H і B розглядаються як деякі підмножини, а h і b є змінними, значення яких ранжуються на доменах D_1 і D_2 . Тоді введений тип правила забезпечує деякий частковий і неточний опис відношення між змінними h і b . В термінах характеристичної функції (*characteristic function*) це означатиме, що:

$$\text{якщо } chf_H(h) = 1 \text{ тоді } chf_B(b) = 1. \quad (7)$$

Розглядатимемо кортежі значень

$$\left(\overline{(d_1^1, \dots, d_1^{n_1})}, d_2 \right) \text{ для змінних } h = \overline{(h_1^1, \dots, h_1^{n_1})} \text{ і } b.$$

Можна утворювати пари сумісних і несумісних значень з (7):

$$\begin{aligned} \text{not comp.} \left\{ \begin{aligned} chf_H(\overline{(d_1^1, \dots, d_1^{n_1})}) &= 1 \\ chf_B(d_2) &= 0 \end{aligned} \right. \\ \text{comp.} \left\{ \begin{aligned} chf_H(\overline{(d_1^1, \dots, d_1^{n_1})}) &= 1 \\ chf_B(d_2) &= 1 \end{aligned} \right. \end{aligned} \quad (8)$$

Водночас ми можемо отримати також в правій частині правил значення, на які не накладаються жодні обмеження:

$$chf_H(\overline{(d_1^1, \dots, d_1^{n_1})}) = 0 \mid - [chf_B(d_2)]. \quad (9)$$

Позначимо через $Set^{comp.}$ множини пар $\left(\overline{(d_1^1, \dots, d_1^{n_1})}, d_2 \right)$, значень h та b , сумісних з початковим правилом:

$$Set^{comp.} \left\{ \begin{aligned} \left(\overline{(d_1^1, \dots, d_1^{n_1})}, d_2 \right) &\stackrel{def.}{=} InitialRule. \\ (h, b) & \end{aligned} \right. \quad (10)$$

На рівні характеристичних функцій це означатиме, що:

$$\begin{aligned} & chf_H(\overline{d_1^1, \dots, d_1^{n_1}}) \wedge chf_B(d_2) \leq \\ & \leq chf_{Set^{comp.}}(\overline{d_1^1, \dots, d_1^{n_1}}, d_2) \leq \quad (11) \\ & \leq \text{num} \left[chf_H(\overline{d_1^1, \dots, d_1^{n_1}}) \vee chf_B(d_2) \right] \end{aligned}$$

Введена операція булевої кон'юнкції може бути охарактеризована властивостями:

$$bool \wedge \left\{ \begin{array}{l} \overline{d_1^1, \dots, d_1^{n_1}} \wedge d_2 = 1, \text{ iff } \overline{d_1^1, \dots, d_1^{n_1}} = d_2 = 1 \\ \overline{d_1^1, \dots, d_1^{n_1}} \wedge d_2 = 0, \forall \overline{d_1^1, \dots, d_1^{n_1}}, d_2 \end{array} \right. \quad (12)$$

Ведена операція диз'юнкції характеризується властивостями:

$$bool \vee \left\{ \begin{array}{l} \overline{d_1^1, \dots, d_1^{n_1}} \vee d_2 = 0, \text{ iff } \overline{d_1^1, \dots, d_1^{n_1}} = d_2 = 0 \\ \overline{d_1^1, \dots, d_1^{n_1}} \vee d_2 = 1, \forall \overline{d_1^1, \dots, d_1^{n_1}}, d_2 \end{array} \right. \quad (13)$$

Належність пари значень множині $Set^{comp.}$ визначатиметься властивістю:

$$\begin{aligned} & \left(\overline{d_1^1, \dots, d_1^{n_1}}, d_2 \right) \in_{at. least} Set^{comp.} \quad | - \\ & \left| \begin{array}{l} chf_H(\overline{d_1^1, \dots, d_1^{n_1}}) = 1 \text{ i } chf_B(d_2) = 1 \\ chf_H(\overline{d_1^1, \dots, d_1^{n_1}}) \wedge chf_B(d_2) = 1 \end{array} \right. \quad (14) \end{aligned}$$

Моделювання базових правил в термінах умовних об'єктів матиме ряд переваг:

$$b \in B \quad \left| \quad h \in H \quad \stackrel{def.}{:=} \quad Rule^{cond.} \quad (15)$$

З іншого боку, належність також може визначатися співвідношенням:

$$\begin{aligned} & \left(\overline{d_1^1, \dots, d_1^{n_1}}, d_2 \right) \in_{at. least} Set^{comp.} \quad | - \\ & \left| \begin{array}{l} chf_H(\overline{d_1^1, \dots, d_1^{n_1}}) = 0 \\ chf_H(\overline{d_1^1, \dots, d_1^{n_1}}) = 1 \text{ i } chf_B(d_2) = 1 \end{array} \right. \quad | - \quad (16) \\ & | - \text{num} \left[chf_H(\overline{d_1^1, \dots, d_1^{n_1}}) \right] \vee chf_B(d_2) = 1 \end{aligned}$$

В такому випадку базове правило матиме відповідні нижні та верхні границі:

$$\begin{aligned} & \left[\begin{array}{l} Base Rule \quad \stackrel{low. bound}{=} \quad [h \in H \text{ i } b \in B] \\ Base Rule \quad \stackrel{up. bound}{=} \quad [h \in H \Rightarrow b \in B \mid [h \notin H \vee b \in B]] \end{array} \right] \quad (17) \end{aligned}$$

Введення можливісного розподілу з прив'язкою до значень b при заданих h дозволить отримати, що:

$$pd_{b|h}(\overline{d_1^1, \dots, d_1^{n_1}}, d_2) \geq chf_H(\overline{d_1^1, \dots, d_1^{n_1}}) \wedge chf_B(d_2) \quad (18)$$

На рівні семантичної інтерпретації, це означає можливість характеристики всіх значень для b в B :

$$Sm^{possb.} : \left[\text{якщо } h \in H \text{ тоді } b \stackrel{possible}{:=} \forall h_1, h_1 \in H_1 \right] \quad (19)$$

Відповідно, розподіл можливостей виду:

$$\begin{aligned} & pd_{b|h}(\overline{d_1^1, \dots, d_1^{n_1}}, d_2) \leq \\ & \leq \text{num} \left(pd_H(\overline{d_1^1, \dots, d_1^{n_1}}) \right) \vee pd_B(d_2) \end{aligned} \quad (20)$$

виражатиме входження пар значень

$$\left(\overline{d_1^1, \dots, d_1^{n_1}}, d_2 \right), \text{ для яких: } \left\{ \begin{array}{l} \overline{d_1^1, \dots, d_1^{n_1}} \in D_1, \forall d_2 \notin D_2, \\ pd_{b|h}(\overline{d_1^1, \dots, d_1^{n_1}}, d_2) \leq 0 \end{array} \right. \quad (21)$$

Таке співвідношення визначає ступінь визначеності для належності значень:

$$\left[\begin{array}{l} \text{якщо } h \in H^1 \text{ тоді } b \in B^1 \\ \text{якщо } h \in H^2 \text{ тоді } b \in B^2 \end{array} \right] \quad (22)$$

Оцінити ефективність отриманих семантик з точки зору можливості і визначеності можна, оцінивши спосіб взаємодії висновків на прикладі хоча б двох правил:

$$\begin{aligned} & Rule^{certain} \stackrel{def.}{:=} [\text{якщо } h \in H \text{ тоді } b \in B] \\ Sm^{cert.} : \left[\begin{array}{l} \text{якщо } h \in H', H' \supset H \text{ тоді } b \in B \\ \text{або } b \notin B \quad | - \quad pd_{b|h}(\overline{d_1^1, \dots, d_1^{n_1}}, d_2) \leq 1 \end{array} \right] \quad (23) \end{aligned}$$

Даний результат можна розглядати як з точки зору кон'юнктивної, так і з точки зору імплікаційної моделі. В першому випадку отримаємо:

$$\begin{aligned} & pd_{b|h}(\overline{d_1^1, \dots, d_1^{n_1}}, d_2) \geq \\ & \geq chf_{H^1}(\overline{d_1^1, \dots, d_1^{n_1}}) \wedge chf_{B^1}(d_2) \\ & pd_{b|h}(\overline{d_1^1, \dots, d_1^{n_1}}, d_2) \geq \\ & \geq chf_{H^2}(\overline{d_1^1, \dots, d_1^{n_1}}) \wedge chf_{B^2}(d_2) \end{aligned} \quad (24)$$

Правило у форматі $Head \rightarrow Body$ можна розглядати як деякий фрагмент процесу збору інформації, а диз'юнктивні поєднання правил

виконують роль акумуляційних процедур. Відповідно в імплікаційній моделі:

$$pd_{b|h} \left(d_2, \overline{d_1^1, \dots, d_1^{n_1}} \right) \geq \left(chf_{H^1} \left(\overline{d_1^1, \dots, d_1^{n_1}} \right) \wedge chf_{B^1} (d_2) \right) \vee \left(chf_{H^2} \left(\overline{d_1^1, \dots, d_1^{n_1}} \right) \wedge chf_{B^2} (d_2) \right) \quad (25)$$

Правило введеного виду можна розглядати як вид обмеження, що обмежує множину можливих рішень:

$$Rule \stackrel{def}{:=} Constraint[SolutionSet]. \quad (26)$$

Такий спосіб інтерпретації визначає можливість значень у висновках правил.

Класичні правила форми «якщо-тоді», умова яких задається чітким виразом, а висновок подається як *fuzzy*-вираз, у випадку задоволення умови дають підстави говорити про певну можливість висновку. Згідно початкових ідей таке правило можна розглядати як правило з невизначеністю, що може бути отримане з деякого ідеального чіткого правила. А саме:

$$\text{якщо } h \in H \text{ і } h_1 \in H_1 \text{ тоді } b \in B, \quad (27)$$

де: $H \subset D_1, B \subset D_2, H_1 \subset D_3$.

В такому випадку отримаємо, що:

$$pd_{b|h} \left(d_2, \overline{d_1^1, \dots, d_1^{n_1}} \right) \leq \text{num} \left(chf_{H^1} \left(\overline{d_1^1, \dots, d_1^{n_1}} \right) \vee chf_{B^1} (d_2) \right) \wedge \text{num} \left(chf_{H^2} \left(\overline{d_1^1, \dots, d_1^{n_1}} \right) \vee chf_{B^2} (d_2) \right) \quad (28)$$

З іншого боку, така інтерпретація вказуватиме на визначеність належності значення консеквентів заданій множині.

$$pd_{b|h} \left(d_2, \overline{d_1^1, \dots, d_1^{n_1}} \right) \leq \left[\text{num} \left(chf_{H^1} \left(\overline{d_1^1, \dots, d_1^{n_1}} \right) \vee chf_{B^1} (d_2) \right) \right] \wedge \left[\text{num} \left(chf_{H^2} \left(\overline{d_1^1, \dots, d_1^{n_1}} \right) \vee chf_{B^2} (d_2) \right) \right] \quad (29)$$

Припустимо, що ми маємо деяку загальну інформацію про значення h_1 з його співвіднесенням до множини H_1 , причому таке співвіднесення може бути виражене у вигляді твердження «швидше за все (майже напевно) $h_1 \in H_1$ ». В термінах можливісного розподілу ми отримуємо наступне подання:

$$h_1 \in H_1 \stackrel{def}{:=} \text{num}(H_1) = \inf_{d_3 \notin H_1} [1 - pd_{h_1} (d_3)] = 1 - \Lambda \quad (30)$$

Таким чином, з даного співвідношення можемо бачити, що ступінь визначеності належності змінної h_1 множині H_1 можна визначити із співвідношення:

$$pd_{h_1} (d_3) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } d_3 \in H_1 \\ \Lambda < 1, & \text{якщо } d_3 \notin H_1 \end{cases} = \max(chf_{H_1} (d_3), \Lambda) \quad (31)$$

або в термінах імплікаційної моделі:

$$pd_{b|h, h_1} \left(d_2, \overline{d_1^1, \dots, d_1^{n_1}} \right), d_3 \leq \text{num} \left[\begin{matrix} chf_H \left(\overline{d_1^1, \dots, d_1^{n_1}} \right) \vee \\ \vee \text{num} \left(chf_{H_1} (d_3) \right) \vee chf_B (d_2) \end{matrix} \right] \quad (32)$$

Отриманий розподіл можливостей виражатиме можливість належності значень b множині B при визначеній належності значень h множині H , а значення Λ позначатиме як можливість того факту, що значення $b \notin B$, тобто знаходиться поза нею. Тому, якщо означити B' як нечітку множину виду:

$$chf_{B'} (d_2) = \max(chf_B (d_2), \Lambda), \quad (33)$$

то на основі введеної імплікаційної моделі матимемо подання правил виду:

$$\text{якщо } h \in H \text{ тоді } b \stackrel{Constr.}{:=} [B'], \quad (34)$$

тобто значення b задаватимуться у формі накладених обмежень.

Застосування кон'юнкції можливісних розподілів і методу виконання їх проєкції згідно базової теорії Заде [1, 2] можна отримати такий результат в термінах наближеного висновку:

$$\sup_{d_3} \left[\min \left(pd_z (d_3), pd_{b|h, h_1} \left(d_2, \overline{d_1^1, \dots, d_1^{n_1}} \right), d_3 \right) \right] = pd_{b|h} \left(d_2, \overline{d_1^1, \dots, d_1^{n_1}} \right) \leq \max \left[\text{num} \left(chf_H \left(\overline{d_1^1, \dots, d_1^{n_1}} \right) \right), chf_B (d_2), \Lambda \right] \quad (35)$$

Таким чином, в даному випадку ідея побудови нечіткого правила полягатиме в розширенні подання чіткого правила з введеною невизначеністю у висновку, що може виражатися в формі коефіцієнтів впевненості (*Certainty Factors*) $CF = 1 - \Lambda$. А саме:

$$\left[h \rightarrow b' \right] = \max(\text{num}(h), b') = \max(\text{num}(h), b, \lambda) \quad (36)$$

якщо $x \in H$ тоді $[b \in B]: [CF = 1 - \lambda]$

Використовуючи правила з нечітким консеквентом, можемо побудувати загальний спосіб наближення правила шляхом введення невизначеності, що на рівні розподілу можливостей матиме вигляд:

$$\left[\begin{array}{l} \text{якщо } h \in H \text{ і } h_1 \in H_1 \text{ тоді } b \in B \\ \text{якщо } h \in H \text{ і } h_1 \notin H_1 \text{ тоді } b \in B^* \end{array} \right] \vdash$$

$$\vdash pd_{b|h} \left(d_2, \overline{(d_1^1, \dots, d_1^{n_1})} \right) \leq \quad (37)$$

$$\leq \max \left[\begin{array}{l} \text{num} \left(\overline{chf_H(d_1^1, \dots, d_1^{n_1})} \right), \\ \max(chf_B(d_2), \min(\Lambda, chf_{B^*}(d_2))) \end{array} \right]$$

В імплікаційній моделі базовим для розгляду є правило виду:

$$BaseRule^{impl.} = \left\{ \begin{array}{l} \text{якщо } h \in H \\ \text{тоді } Restriction(b, B') \end{array} \right\}, \quad (38)$$

з можливісним розподілом виду:

$$chf_{B'}(d_2) = \max(chf_B(d_2), \min(\Lambda, chf_{B^*}(d_2))). \quad (39)$$

На рівні множини правил матимемо:

$$RuleSet = \left\{ \begin{array}{l} \text{якщо } h \in H^i \text{ і } h_1 \in H_1^i \text{ тоді } b \in B^i \end{array} \right\}, \quad (40)$$

де: $H_1^i \subset D_3, i = 1..n$.

Згідно з оцінкою можливісного розподілу:

$$\left[\begin{array}{l} pd_{h_i}(d_3) = \Lambda_i \text{ якщо } h_i \in H_1^i \\ pd_{b|h} \left(d_2, \overline{(d_1^1, \dots, d_1^{n_1})} \right) \leq \\ \leq \max \left(\text{num} \left(\overline{chf_H(d_1^1, \dots, d_1^{n_1})} \right), chf_{B'}(d_2) \right) \\ chf_{B'}(d_2) = \max_{i=1..n} [\min(\Lambda_i, chf_{B^i}(d_2))] \end{array} \right] \quad (41)$$

Відповідно в кон'юнктивній моделі сутність отримання правила полягає в застосуванні нечітких консеквентів у процесі наближеного висновку, що на рівні розподілу можливостей матиме вигляд:

$$pd_{b|h, h_1} \left(d_2, \overline{(d_1^1, \dots, d_1^{n_1})}, d_3 \right) \geq$$

$$\bigvee_{i=1..n} \left[\begin{array}{l} chf_{H^i} \left(\overline{(d_1^1, \dots, d_1^{n_1})} \right) \wedge \\ \wedge chf_{H^i}(d_3) \wedge chf_{B^i}(d_2) \end{array} \right]$$

$$pd_{b|h} \left(d_2, \overline{(d_1^1, \dots, d_1^{n_1})} \right) \geq \quad (42)$$

$$\geq \min \left[\begin{array}{l} chf_{H'} \left(\overline{(d_1^1, \dots, d_1^{n_1})} \right), \\ chf_{B'}(d_2) \end{array} \right]$$

$$pd_{B'}(d_2) = \max_{i=1..n} [\min(\Lambda_i, chf_{B^i}(d_2))]$$

Таким чином, можна бачити, що використання правил з нечіткими консеквентами дає змогу реалізувати спосіб побудови наближеного висновку з використанням функції сумаризації.

На теоретичному рівні нечіткі множини з введеними операціями на зразок тих, що використовуються у формулі (3), дозволяють інтерпретацію форми деякої абстрактної алгебри, що є визначальним для розуміння структури логіч-

ного висновку. В даному контексті виділяють такі основні проблеми:

1. Проблема нечіткості. Розглядається на етапі введення нечіткості та фазифікації. Ступінь істинності заголовків правил визначається на основі функцій належності, що застосовуються для фактичних значень множини вхідних змінних.

2. Проблема логічного висновку. Визначається в процесі застосування обчислення значення істинності заголовків правил до їх висновків, що зрештою дає змогу отримати деякі нечіткі підмножини, які прив'язуються як значення вихідних змінних для кожного правила. При цьому для побудови правил використовуються операції «мінімуму» та «добутку». Таким чином, при логічному висновку на основі операції «мінімуму», функції належності визначаються по висоті, що відповідає обчисленому ступеню істинності заголовків правил. Відповідно, у випадку логічного висновку на основі операції «множення» виконується масштабування функції належності, шляхом обчислення ступеня істинності заголовків правил.

3. Проблема обчислення композиції. Полягає в тому, що всі нечіткі підмножини, які призначені для кожної вихідної змінної у всіх правилах, повинні бути об'єднанні з метою формування деякої визначеної нечіткої підмножини для кожної вихідної змінної (змінної висновку). Такі об'єднання утворюються на основі операції «максимуму» та «сумування». Зокрема, при композиції на основі операції «максимуму», результуюче комбіноване виведення нечіткої множини розглядається як поточковий максимум для всіх нечітких підмножин. У випадку композиції на основі операції «сумування», комбіноване виведення нечіткої множини розглядається як поточкова сума по всіх нечітких підмножинах, що були призначені для вихідної змінної правилами висновку.

4. Проблема приведення до чіткого подання (проблема дефазифікації). Полягає в перетворенні нечітких наборів висновків в деякі чіткі подання.

Таким чином, на нижньому рівні проектування системи, слід визначити множини вхідних та вихідних змінних, в тому числі нечітких.

Означення 1. Нечіткою змінною, вважається змінна, що подається кортежем виду:

$$\langle \alpha, X, A \rangle, \quad (43)$$

де: α – ім'я нечіткої змінної; X – її область визначення; A – нечітка множина над універсумом X .

Наприклад, нечітка змінна «Високий дебіт», $\{x | 0 < x < 100\}$, $B = \{x, \mu(x)\}$ характеризує значення дебіту свердловини. Будемо вважати значення дебіту високим, якщо його значення > 50 т/добу.

Означення 2. Лінгвістичною змінною вважається змінна, що подається кортежем виду:

$$\langle \beta, T, X, G, M \rangle, \quad (44)$$

де: β – ім'я лінгвістичної змінної; T – множина її значень в формі термів; X – універсум

нечітких змінних; G – синтаксична процедура утворення нових термів; M – семантична процедура формування нечітких множин для кожного терма, заданого лінгвістичною змінною.

Наприклад, нехай ми маємо суб'єктивні оцінки експертів, що працюють над розробкою родовища вуглеводнів, щодо дебіту певної виділеної свердловини. Формалізація таких оцінок, відповідно, можлива за допомогою використання лінгвістичної змінної виду $\langle \beta, T, X, G, M \rangle$, де: β – «Дебіт свердловини»; $T = \{ \langle \text{Низький дебіт (Low)} \rangle, \langle \text{Помірний дебіт (Medium)} \rangle, \langle \text{Високий дебіт (High)} \rangle \}$; $X = [0; 40]$; G – Процедура генерації нових термів засобами логічних зв'язок та модифікаторів. В нашому випадку, наприклад, можна утворити такі терми, як «Дуже низький дебіт», «Надвисокий дебіт», тощо; M – Процедура задання на універсумі $X = [0; 40]$ значень лінгвістичної змінної, тобто термів з множини T .

Означення 3. Нечітким висловлюванням (*fuzzy statement*) вважається висловлювання виду β is α , де: β – лінгвістична змінна; α – один з можливих термів цієї змінної. Прикладом нечіткого висловлювання, може бути висловлювання виду: «Дебіт свердловини IS Низький». В даному випадку «Дебіт свердловини» – лінгвістична змінна, а «Низький» – її значення.

Означення 4. Правилем нечіткого висновку вважається продукційне правило виду «якщо-тоді», де в якості умов і висновків будуть використовуватися нечіткі висловлювання. Такі правила будемо записувати у вигляді:

$$\text{IF}(\beta_1 \text{ IS } \alpha_1) \left[\begin{array}{l} \text{AND} \\ \text{OR} \end{array} \right] (\beta_2 \text{ IS } \alpha_2) \text{ THEN}(\beta_3 \text{ IS } \alpha_3). \quad (45)$$

Подання (43) може використовуватися також у вигляді окремих складових. Кожне із нечітких висловлювань в умові правил розглядають як підумову, а кожен із висновків – як підвисновок. У випадку початкового прикладу можна використовувати правила виду:

$$\begin{aligned} &\text{IF} (\text{Водонасичення колектора IS Високе}) \\ &\quad \text{THEN} (\text{Нафтовіддача IS Низька}); \\ &\text{IF} (\text{Колектор IS Непродуктивний}) \\ &\quad \text{AND} (\text{Проникність IS Низька}) \\ &\quad \text{THEN} (\text{Водонасичення IS Високе}). \end{aligned} \quad (46)$$

Як і у випадку чітких знань, введення формалізмів нечітких знань вимагає використання ефективного методу висновку (інференції, резолюції), що дозволяло б створення ефективних процедур отримання нових знань на основі існуючих. Одним з таких ефективно діючих алгоритмів є алгоритм Мамдані [4, 5]. Функціональність даного алгоритму, що розглядається як послідовність кроків, представлена на рисунку 1.

Особливість функціонування даного алгоритму полягає в тому, що він оперує на вході та на виході кількісними значеннями, які зручно подавати числовими типами даних, що реалізуються в повнофункціональних типізованих

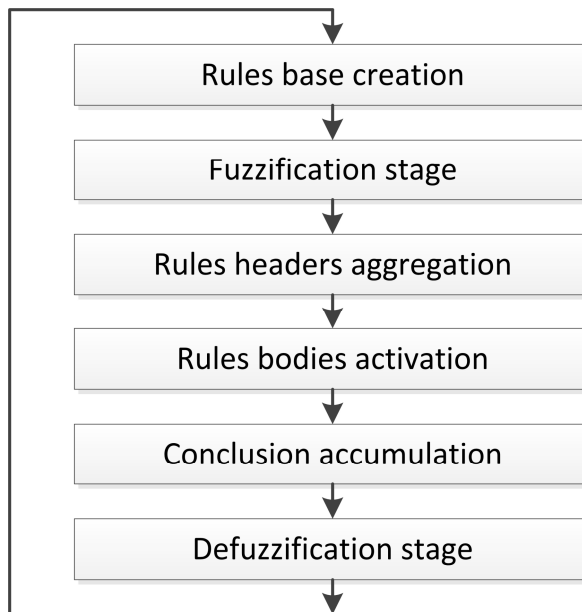


Рисунок 1 – Функціональна схема алгоритму Мамдані

мовах, наприклад C++/Java. Відповідно, уся невизначеність пов'язана з використанням нечітких множин та нечіткої логіки буде перенесена всередину конструкції. Такий підхід на сьогоднішній день є визначальним трендом при роботі з нечіткими даними, а саме – можливість оперування з числовими типами даних в контексті нечіткого середовища (*фреймворку*).

Формування бази правил (*Knowledge Base Rules*) [8, 9] є важливим етапом побудови інтелектуальної системи, оскільки на сьогоднішній день більшість таких систем є системами на основі правил (*Rules Based Systems*). В області систем на основі правил можна виділити три основних класи реалізацій:

1) інтелектуальні системи на основі множини правил в стандарті нечітких правил (*Fuzzy Rules*):

$$\begin{aligned} &R_1^{fuzzy} : \text{якщо} \langle \text{умова}^1 - lv_1^{in} \rangle \\ &\quad \text{тоді} \left[\langle \text{висновок}^1 - lv_1^{out} \rangle : CF_1 \right] \\ &\quad [i / \text{або}] \left[\langle \text{висновок}^2 - lv_2^{out} \rangle : CF_2 \right] \\ &R_2^{fuzzy} : \text{якщо} \langle \text{умова}^2 - lv_2^{in} \rangle \\ &\quad [i / \text{або}] \langle \text{умова}^3 - lv_3^{in} \rangle \\ &\quad \text{тоді} \left[\langle \text{висновок}^3 - lv_3^{out} \rangle : CF_3 \right] \\ &\dots \\ &R_n^{fuzzy} : \text{якщо} \langle \text{умова}^k - lv_k^{in} \rangle \\ &\quad \text{тоді} \left[\langle \text{висновок}^{m-1} - lv_{m-1}^{out} \rangle : CF_1 \right] \\ &\quad [i / \text{або}] \left[\langle \text{висновок}^m - lv_m^{out} \rangle : CF_m \right] \end{aligned} \quad (47)$$

де CF_i , $1 \leq i \leq n$ – вагові коефіцієнти (*Certainty Factors* – коефіцієнти впевненості), що дають змогу виражати ступінь впевненості в істинності висновку. В граничному випадку коефіцієнт впевненості приймається рівним 1 ($CF = 1$), загалом він розглядається як деяке значення з проміжку $[0; 1]$ ($CF \in [0; 1]$). Лінгвістичні змінні lv_j , де $1 \leq j \leq n$, відповідно можуть бути присутні як в умовах, так і у висновках та інтерпретуються як вхідні lv_j^{in} , та вихідні lv_j^{out} лінгвістичні значення.

2) інтелектуальні системи на основі чітких правил з можливим включенням значень типу «невизначено / *unknown*»:

$$R_1^{unknown} : \text{якщо} \left[\begin{array}{l} \text{умов}d = \\ = \{ \text{лог, числ, категор} \} \end{array} \right]^{[yes/not]} \\ \left[\begin{array}{l} [i / \text{або}] [\dots] \text{тоді} \left[\begin{array}{l} \text{висновок}^k = \\ = \{ \text{advice, assign, call} \} \end{array} \right] \end{array} \right] . (48) \\ R_n^{unknown} : \text{якщо} [unknown_умова_k] \\ [i / \text{або}] [\dots] \text{тоді} \langle RulesSubSe_умова_m \rangle$$

Використання правил в даному класі систем дозволяє також додаткову функціональність, основна ідея якої полягає в чіткому розподілі правил по доменах (*Scope*), а також задання об'єктних налаштувань для входжень правил. Загалом, додаткові особливості управління множиною правил в класі можна подати схемою:

$$\left\{ \begin{array}{l} \left[\begin{array}{l} \text{ObjectSet} \\ \text{CompareType} \\ \text{Scope} \end{array} \right] \Leftrightarrow \left[\begin{array}{l} \text{AttributesSet} \\ \text{OptionsSet} \\ \text{ValueSet} \end{array} \right] \\ \text{RulesSet.Name.Scope.Actions} \end{array} \right. . (49)$$

Таким чином, для ефективної роботи системи в кожному з трьох класів необхідно контролювати: а) загальну кількість умов в базі правил; б) загальну кількість висновків в базі правил; в) кількість вхідних лінгвістичних змінних; г) кількість вихідних лінгвістичних змінних; д) загальну кількість продукційних правил в базі знань.

3) інтелектуальні системи на основі правил з невизначеністю (коефіцієнтом впевненості в істинності):

$$\left[\begin{array}{l} R_1^{uncert} : \text{якщо} \langle \text{умова}^1 - CF_1^{con} \rangle \\ \text{тоді} \langle \text{висновок}^1 - CF_1^{cl} \rangle \\ [i / \text{або}] \langle \text{висновок}^2 - CF_2^{cl} \rangle \\ R_2^{uncert} : \text{якщо} \langle \text{умова}^2 - CF_2^{con} \rangle \\ [i / \text{або}] \langle \text{умова}^3 - CF_3^{con} \rangle \\ \text{тоді} \langle \text{висновок}^3 - CF_3^{cl} \rangle \\ \dots \\ R_n^{uncert} : \text{якщо} \langle \text{умова}^k - CF_k^{con} \rangle \\ \text{тоді} \langle \text{висновок}^{m-1} - CF_{m-1}^{cl} \rangle \\ [i / \text{або}] \langle \text{висновок}^m - CF_m^{cl} \rangle \end{array} \right] . (50)$$

На етапі фазифікації вхідних змінних, відбувається реалізація однієї з основних процедур – це перехід від чітких до нечітких даних (які, відповідно, не можуть бути подані засобами звичайної програмної типізованої мови). Структура даного процесу може бути сформульована як:

$$DefuzzyStage = \{ RulesSet, dataArray \} , (51)$$

де $dataArray = \{ d_1, d_2, \dots, d_k \}_{i=1..k}$ – масив вхідних даних, що відповідно містить значення вхідних змінних.

Згідно із співвідношенням $condition_i = \mu(d_i)$, виконується обчислення значень істинності множини умов які утворюватимуть в кінцевому підсумку множини значень:

$$ConclusionSetValues = \{ condition_i \} = \{ \mu(d_i) \} , (52)$$

де $i = 1..k$, $k \in N$.

Введення складених умов правил на основі сполучників «*i / або*» вимагатиме вирішення задачі визначення сумарного значення ступеня істинності комплексних умов для кожного з правив, що входить до системи нечіткого висновку. На формальному рівні дану задачу можна визначити наступним чином:

$$Verify(condition_i) = \left[\begin{array}{l} \min(\mu(d_i)) \\ \max(\mu(d_i)) \end{array} \right]_{i=1..k} , (53)$$

де k – кількість підумов в правилі.

На наступному кроці для кожного i -го підвисновку $conclusion_i$ слід обчислити деяку нову множини Set^{concl_i} з новою функцією належності $\mu_{concl_i}^{Set}$.

Функцію належності $\mu_{concl_i}^{Set}$ можна також обчислити співвідношенням:

$$\left[\mu_{concl_i}^{Set}(t) \right] = \min \{ Verify(conclusion_i), \mu_{concl_i}^{Set}(t) \} , (54)$$



Рисунок 2 – Блок-схема етапу фазифікації



Рисунок 3 – Блок-схема етапу агрегації

де: $[\mu_{concl_i}^{Set}(t)]$ – активована функція належності; $\mu_{concl_i}^{Set}(t)$ – функція належності терма; $Verify(conclusion_i)$ – ступінь істинності i -го підвисновку; $i = 1..m$, $m \in N$. Виконання даної послідовності кроків дасть змогу в кінцевому висновку отримати для кожного підвисновку на множині правил певну сукупність активованих нечітких множин:

$$conclusion_i \models FuzzySet_{concl_i}^{active}. \quad (55)$$

На етапі акумуляції висновків завдання полягає в отриманні сумарної нечіткої множини для кожної з вихідних змінних:

$$lv_i^{out} \models \bigcup_{j=1..k} FuzzySet_j, \quad (56)$$

де $i = 1..m$.



Рисунок 4 – Блок-схема етапу активації

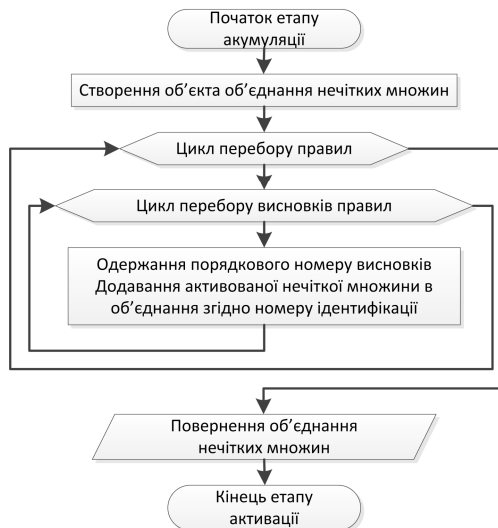


Рисунок 5 – Блок-схема етапу акумуляції

Для кожної i -тої вихідної змінної lv_i^{out} обчислюється об'єднання:

$$LV_i^{Set} = \bigcup_{set_{concl_j}} , i = 1..m_1, \quad (57)$$

де $j = 1..k_1$, $\forall j, lv_i^{out} \in conclusion_j$.

Обчислення функції належності об'єднання двох нечітких множин виконується за відповідною класичною формулою:

$$\mu^{\cup}(x) = \max\{\mu_1(x), \mu_2(x)\}. \quad (58)$$

На завершальному етапі виконується дефазифікація вхідних змінних, метою якої є отримання чітких числових значень для кожної з вихідних лінгвістичних змінних. Процедура дефазифікації для i -тої вихідної змінної lv_i^{out} та відповідно її множини LV_i^{Set} полягає у виборі методу дефазифікації для пошуку підсумкового чіткого значення. Часто застосовуваним є метод суть якого зводиться до формули:

$$CV_i = \left[\int_{\min}^{\max} x \cdot \mu_i(x) dx \right] / \left[\int_{\min}^{\max} \mu_i(x) dx \right], \quad (59)$$

де: CV_i (*crispy value, результат дефазифікації*) – відповідне чітке значення для вихідного значення lv_i^{out} ; $\mu_i(x)$ – функція належності відповідної нечіткої множини LV_i^{Set} ; min, max – обчислювані границі для універсуму нечітких змінних.

Для кола задач, пов'язаних з нафтогазовою промисловістю, в даному контексті особливий інтерес представляють автоматизовані системи, що використовують методи нечіткого керування та інтелектуальні експертні системи для нафтогазової предметної області, а також інтелектуальні системи підтримки прийняття рішень, що базуються на методах, засобах та концепціях нечітких множин і нечіткої логіки та особливо на основі нечітких правил.

Подані в пропонованому дослідженні формальні обґрунтування щодо побудови та застосування нечітких правил в інтелектуальних інформаційних системах на основі баз даних та баз знань підтверджуються великою кількістю існуючих впроваджень в нафтогазовій промисловості України, Росії та світу.

Висновок

Реалізація інтелектуальних систем на основі нечітких множин та нечіткої логіки, згідно з поданим підходом, даватиме достатню функціональність для вирішення поточних задач на основних етапах (фазифікації, нечіткого висновку, композиції та дефазифікації) з метою отримання кінцевого результату в чіткому поданні. Проте, для формулювання нечітких правил та відповідних функцій належності для нафтогазової предметної області вимагатиме залучення групи експертів, при чому результат, що базується на суб'єктивних оцінках членів таких груп буде тим кращий, чим більш достовірними будуть засоби контролю та розподілу чітких та нечітких даних, а також неструктурованих та слабо структурованих входжень. Тому найкращого результату в даній предметній області досягають реалізації систем з чітко вираженою гібридною архітектурою, яка дозволяє отримати загалом якісно новий рівень побудови засобів інтелектуальної обробки інформації, що зводиться до застосування в контексті нечіткої логіки засобів штучних нейронних мереж та методів імовірнісних та можливісних міркувань, що уможливує перехід від рівня підтримки прийняття рішень засобами інтелектуальних інформаційних систем до більш загального рівня видобування даних та знань. Реалізація традиційних інтелектуальних систем на основі чітких правил вимагає вилучення знань в експертів предметної області, що є найбільш трудомісткою процедурою, яка базується на обширних когнітивних методах та яка є суб'єктивною згідно початкового означення. Тому доцільним є переведення інтелектуальних систем даного класу та систем на основі нечіт-

кої логіки на рівень адаптивної реалізації, що, відповідно, включатиме підбір параметрів в процесі навчання на експериментальних даних, подібно до того, як це має місце у випадку класичних штучних нейронних мереж. Для цього необхідно визначити ряд додаткових задач: а) створення механізму автоматичної генерації нечітких (лінгвістичних) правил; б) створення механізму перевірки повноти та несуперечливості існуючої множини нечітких правил; в) забезпечення автоматичної корекції функції належності. Подальші дослідження даного напрямку будуть спрямовані на реалізацію формальної структури знань предметної області в загальному випадку.

Література

- 1 Заде Л. Понятие лингвистической перенной и его применение к принятию приближенных решений / Л. Заде. – М.: Мир, 1976. – 176 с.
- 2 Zadeh L. A. Fuzzy sets // Information and Control. – 1965. – 8 (3). – P. 338-353.
- 3 Юрчишин В. М. Інформаційне моделювання нафтогазових об'єктів: монографія / В. М. Юрчишин, В. І. Шекета, О. В. Юрчишин. – Івано-Франківськ: Вид-во Івано-Франківського нац. техн. ун-ту нафти і газу, 2010. – 196 с.
- 4 Круглов В. В. Интеллектуальные информационные системы: компьютерная поддержка систем нечеткой логики и нечеткого вывода / В. В. Круглов, М. И. Дли – М.: Физматлит, 2002. – 252 с.
- 5 Круглов В. В. Нечёткая логика и искусственные нейронные сети / В. В. Круглов, М. И. Дли, Р. Ю. Голунов – М.: Физматлит, 2001. – 221 с.
- 6 Benferhat S., Dubois D., Prade H. (1992) Representing default rules in possibilistic logic. Proc. of the 3rd Inter. Conf. on Principles of Knowledge Representation and Reasoning (KR'92) (B. Nebel, C. Rich, W. Swartout, eds.), Cambridge, MA, Oct. 25-29, 673-684.
- 7 Dubois D., Prade H. (1989) A typology of fuzzy "if... then..." rules. Proc. of the 3rd Inter. Fuzzy Systems Assoc. (IFSA) Congress, Seattle, WA, Aug. 6-11, 782-785.
- 8 Демчина М. М. Формальні методи інтерпретації даних та знань про нафтогазові об'єкти / М. М. Демчина, В. Р. Процюк, В. І. Шекета // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – 2011. – №1. – С. 100-108.
- 9 Демчина М. М. Моделювання нафтогазової предметної області на основі фреймово-продукційного підходу / М. М. Демчина, В. Р. Процюк, В. І. Шекета // Збірник наукових праць національного гірничого університету. – Дніпропетровськ, 2011. – №36. – Т. 1. – С. 98-105.

Стаття надійшла до редакційної колегії

15.02.12

Рекомендована до друку професором
Д.Ф. Тимківим