

УДК 681.518:622.248

DOI: 10.15587/1729-4061.2019.179401

Розробка інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень при керуванні процесом буріння свердловин в умовах ускладнень

В. М. Шавранський, Г. Н. Семенцов

Розглянуто задачу розробки методу ідентифікації ускладнень, що виникають в процесі буріння свердловин на нафту і газ, який функціонує за умов апріорної та поточної невизначеності під впливом різного роду збурень на основі методів теорії нечітких множин і нечіткої логіки.

Запропоновано методичний підхід до оцінки рівня ускладнень в процесі буріння свердловин на нафту і газ, що ґрунтується на принципах лінгвістичності параметрів процесу буріння, лінгвістичності та ієрархічності знань про ускладнення в процесі буріння свердловин.

Розроблено математичні моделі контрольованого об'єкту, які на відміну від детермінованих математичних моделей дозволяють описувати на природній мові причинно-наслідкові зв'язки між параметрами процесу буріння і можливим ускладненням. Ці моделі відображають логіку міркувань оператора з залученням нечислової і нечіткої інформації спеціаліста-експерта, що дозволяє формалізувати процедури прийняття рішень на базі Fuzzy Logic з використанням параметрів і показників процесу буріння свердловин на нафту і газ.

Запропоновано структуру системи підтримки прийняття рішень при керуванні процесом буріння свердловин в умовах ускладнень.

Представлено результати імітаційного моделювання розроблених методів моделювання ускладнень на основі методів теорії нечітких множин і нечіткої логіки. Показано їх переваги перед відомими за точністю в задачах ідентифікації оцінювання та контролю в умовах невизначеності щодо структури та параметрів об'єкта.

Виявлені реальні ускладнення, усунення яких підвищать рівень безпеки процесу буріння свердловин. Показано, що розроблені методи і моделі можуть знайти застосування для моделювання та ідентифікації широкого класу ускладнень на бурових установках, що функціонують в умовах апріорної та поточної невизначеності щодо їх структури, параметрів та геосередовища

Ключові слова: нечітка система контролю, ідентифікація нестационарних процесів, Fuzzy-моделювання, динамічний об'єкт керування (буріння), логіко-лінгвістичні правила

1. Вступ

Прийняття рішень щодо керування процесом буріння свердловин в умовах ускладнень є підзадачею загальної проблеми оптимального керування цим процесом, яка реалізується інтегрованою системою автоматизованого управління.

Буріння свердловин на нафту і газ – це надзвичайно складний технологічний процес, особливістю динаміки якого є нестационарність, нелінійність та не-

відтворюваність, а також взаємозв'язок більшості процесів з змінами, що виникають у стовбурі свердловини і навколишньому масиві гірських порід. Різноманітність геолого-технологічних умов часто призводить до виникнення непрогнозованих ускладнень і необхідності прийняття кваліфікованого рішення в обмежений проміжок часу. Найважливішим питанням підвищення якості робіт в бурінні свердловин на нафту і газ є зменшення кількості ускладнень і виключення аварій, що пов'язане із використанням сучасних методів контролю, керування і комп'ютерної техніки.

Проте цілий ряд питань, пов'язаних з контролем ускладнень в процесі буріння свердловин на нафту і газ, залишаються маловивченими і недостатньо розробленими. Це обумовлено тим, що має місце апріорна та поточна невизначеність і об'єкт функціонує під впливом зовнішніх завад, що недосяжні для вимірювань. Використання відомих методів, що ґрунтуються на детермінованих моделях, не дозволяє ефективно здійснювати контроль і керування процесом буріння свердловин на нафту і газ з метою запобігання ускладнень. Деякі ознаки ускладнень співпадають з ознаками інших ситуацій – зміни меж пластів гірських порід, зношення озброєння і опор долота, осипання і обвалювання порід у свердловині і т. д. Для керування таким об'єктом методи класичної теорії керування найчастіше виявляються неефективними, оскільки ґрунтуються, в основному, на припущенні про лінійність об'єкта.

У той же час, як показує практика, поточний контроль за розпізнаванням ускладнень і керуванням процесом буріння досить ефективно здійснює досвідчений оператор-бурильник. Для цього використовує свій досвід і професійні навички у вигляді нечітких правил. Тому для прийняття рішення за допомогою технічних засобів контролю та керування доцільно використовувати методи теорії нечітких множин і Fuzzy Logic. У зв'язку з цим є актуальною і доцільною розробка спеціалізованої архітектури інтелектуальної системи, що дозволяє ефективно підтримувати прийняття рішень бурильником при керуванні процесом буріння свердловин на нафту і газ в умовах ускладнень.

2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Одним із способів досягнення більш швидкого і більш інтелектуального будівництва свердловин в роботі [1] виділено підвищення рівня автоматизації процесу буріння. Для цього розроблено три нових технології, що спрямовані на поліпшення якості буріння. До них відносяться: програмне забезпечення для автоматизації управління, метод відстеження якості бурильних труб на основі радіочастотної ідентифікації, давачі для вимірювання параметрів бурового розчину. Під час вимірювань на платформі Statfiord C в Норвезькій зоні Північного моря зазначені технології були не тільки випробувані одночасно, але й стали основою для організації обміну даними в реальному часі і формувалися в єдину інтегровану систему автоматизації процесу буріння. Показано, що на даний час зазначені технології спрямовані на скорочення непродуктивного часу під час проведення бурових робіт. Для цього вводяться оперативні гарантії безпосередньо на буровому обладнанні, автоматизація допоміжних операцій та форму-

вання очікуваних значень параметрів для підтримки рішень з виявлення нештатних ситуацій – ускладнень.

Як основні нештатні ситуації розглядаються лише такі, як вихід за межі допустимої області осьової швидкості бурильної колони та швидкості потоку промивальної рідини. Залишились невирішеними питання, що зв'язані з розробкою інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень при керуванні бурінням свердловини в умовах ускладнень. Такими ускладненнями є зони з аномально високими пластовими тисками, звуження стовбура свердловини, газопрояви при високих пластових тисках, обвалювання стінок свердловини, втрати промивальної рідини в свердловині та ін.

Причиною цього є об'єктивні труднощі, що обумовлені надзвичайною складністю об'єкта керування. Дійсно, цей процес є нестаціонарним, випадковим і таким, що розвивається в часі за умов апріорної та поточної невизначеності щодо структури і параметрів об'єкта керування під впливом завад, недосяжних для вимірювань. Варіантом подолання відповідних труднощів може бути перехід до автономних комп'ютерно-інтегрованих технологій бурових робіт. Саме такий підхід використано в роботі [2], яка ґрунтується на роботах [3, 4]. В роботі [5] запропоновано використання моделей, побудованих на засадах штучних нейронних мереж, як одного із методів теорії нейродинаміки. Проте ця теорія знаходиться на початковому етапі розвитку і наявні результати мають локальний характер. Шлях до автоматизації процесу буріння запропоновано описувати в термінах трьох рівнів: перший – система пропонує вказівки для бурильників, другий – приймає рішення із схвалення бурильника, третій – кроки до автономної системи. Тут бурильник, який може бути поза межами бурового майданчика, втручається тільки при необхідності. Проте автоматизація процесу буріння вимагає наявності системи, яка має здатність справлятися з мінливістю і невизначеністю геосередовища безпосередньо на свердловині на основі моделей [6, 7] різносторонньої інформації від наземних та глибинних давачів в режимі on-line [8]. Ці системи повинні реагувати на такі зміни, як літологія при збереженні оптимальної продуктивності, тим самим збільшувати працездатність і ефективність [9]. Основою є використання не тільки вимірювальної інформації, але й знань місцевої геології, досвіду персоналу бурової установки та умов буріння [10]. Автоматизована система оновлює модель з використанням даних в режимі реального часу. Моделювати рішення досвідченого бурильника адаптуються до результатів недосконалих прогнозувань на засадах синергетики [11], або штучних нейронних мереж [12].

Водночас, у працях зазначених авторів не приділяється увага питанням створення інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень при керуванні процесом буріння свердловин в умовах ускладнень. Проте саме для адаптації до умов, що змінюються, ця система має змінювати експлуатаційні параметри, такі як навантаження на гаку, швидкість обертання колони, витрата нагнітання бурових насосів.

Отже, все це дозволяє зробити висновок, що доцільним є проведення дослідження, присвяченого розробці інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень при керуванні процесом буріння свердловин в умовах ускладнень на

засадах методів теорії нечітких множин і Fuzzy-logic [13]. Це дозволить значно розширити перспективи ефективного застосування нечітких систем реального часу для контролю та керування технологічних процесів буріння свердловин на нафту і газ, що функціонують в умовах невизначеності.

3. Ціль і задачі дослідження

Метою даної роботи є створення спеціалізованої інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень на засадах методів Fuzzy Logic для підвищення ефективності процесу керування бурінням свердловин на нафту і газ та запобігання ускладнень за рахунок отримання інформації про фактичні параметри при бурінні.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- розробити логіко-лінгвістичні Fuzzy-моделі для виявлення ускладнень, що виникають у процесі буріння свердловин на нафту і газ;
- провести імітаційне моделювання розроблених методів і моделі, а також інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень при керуванні процесом буріння в умовах ускладнень.

4. Матеріали і методи досліджень інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень при керуванні процесом буріння свердловин в умовах ускладнень

Методологія підтримки прийняття рішення (ППР) включає використання різних методів і прийомів, які можна частково або повністю формалізувати. Для досягнення поставленої мети проведені теоретичні дослідження з використанням методів теорії розмірностей при розробці інформаційної моделі ускладнень, що виникають в процесі буріння свердловин на нафту і газ. Використано методи моделювання та ідентифікації систем – для моделювання об'єкта керування на основі вхідних і вихідних даних процесу буріння свердловин в умовах ускладнень. При розробці логіко-лінгвістичних моделей прийняття рішення про можливість виникнення ускладнень застосовано методи теорії нечітких множин і нечіткої логіки методів, а також експертні оцінки при побудові функцій належності нечітких параметрів. Методи математичної статистики використано при дослідженні взаємозв'язків параметрів і показників процесу буріння свердловин на нафту і газ. Дослідження розробленої системи керування на основі експертних даних проводилось за допомогою методів комп'ютерного моделювання. Обробка результатів опитування експертів проводилася з використанням методів теорії подібності і математичної статистики.

Методи пошуку рішень з логіко-лінгвістичними моделями і методами, які базуються на знаннях фахівців-експертів, моделях людських міркувань, неklasичних логіках і накопиченому досвіді.

5. Результати досліджень інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень

5. 1. Розробка логіко-лінгвістичних Fuzzy-моделей ускладнень, що виникають у процесі буріння свердловин на нафту і газ

Інтелектуальні системи підтримки прийняття рішень (ІСППР) орієнтовані на завдання, які погано формалізуються і слабоструктуровані в різних, як правило, динамічних ситуаціях [14]. Специфікою таких завдань є:

- неможливість отримання усієї об'єктивної інформації, необхідної для вирішення завдання, і у зв'язку з цим, необхідність вимушено використовувати суб'єктивну, евристичну інформацію;

- присутність недетермінізму в процесі пошуку рішень;

- необхідність корекції і вступу додаткової інформації в процесі пошуку рішення, активна участь в ньому особи, що приймає рішення (ОПР);

- необхідність отримання рішення в умовах часових обмежень.

Перераховані чинники не дозволяють успішно використовувати для вирішення таких завдань строгі алгоритмічні методи і моделі теорії прийняття рішень [15].

Загальною функцією контролю для запобігання ускладнень при проведенні вертикальних ділянок стовбура свердловини є визначення стану об'єкта контролю і виявлення ознак ускладнень, що потребують керуючих впливів [16].

Стан бурового інструменту в кожен момент часу t з певною вірогідністю і точністю, опираючись на постановку задачі контролю і розуміння природи процесу функціонування об'єкту, можна охарактеризувати набором таких величин $Z(t) = \{n(t), h(t), V(t), p(t), P(t), M(t), Q_1(t), Q_2(t)\}$, де $n(t)$ – швидкість обертання, $h(t)$ – переміщення бурової колони, $V_M(t)$ – механічна швидкість, $p(t)$ – тиск бурового розчину на викиді насосів, $P(t)$ – осьове зусилля на долото, $M(t)$ – крутний момент або $N(t)$ потужність, що витрачається на обертання бурової колони; $Q_{вх}(t)$ – витрата бурового розчину на вході в свердловину і на виході $Q_{вих}(t)$. При переході від одного миттєвого стану до іншого значення n , V_M , P , M , $Q_{вх}$, $Q_{вих}$ змінюються, тобто вони є функціями стану і часу t .

Найважливішими впливами і параметрами контролю та керування процесу буріння свердловин на нафту і газ з метою запобігання ускладнень є:

- вхідні керувальні впливи $X(t) = \{P(t), n(t), Q_1(t)\}$, які вимірюються в реальному часі;

- збурювальні параметри $A(t) = \{T, H, P_p\}$, які для кожного інтервалу буріння свердловини задаються геолого-технологічний наряд (ГТН);

- параметри, що визначаються режимами буріння $Z(t) = \{x, y_{б.к}, y_{б.у}\}$ є некерованим збуренням;

- фізико-механічні і абразивні властивості B порід, які є прогнозовані за геолого-технологічним нарядом (ГТН), згідно стратиграфічного розрізу, але є неконтрольованими і не прогнозованими збуреннями.

Тут x – характеристики долота; $y_{б.у}$ – параметри бурової установки; $y_{б.к}$ – параметри бурової колони; T – температура в свердловині; H – сила статичного опору тертя; P_p – пластовий тиск.

Таким чином, характеристики стану об'єкта $Y_i(t)$ пов'язані з вхідними контрольованими величинами $X(t)$ і збурювальними параметрами в процесі буріння $A(t)$ і параметрами, що визначаються режимами буріння $Z(t)$.

$$Y_i(t) = F_i[X(t), A(t), B, t], i=1, \dots, n.$$

Загальна інформаційна модель “вхід-вихід” об’єкта контролю параметрів процесу буріння свердловин на нафту і газ зображена на рис. 1.

Для правильного вибору контрольованих величин визначимо клас задачі контролю та керування процесу буріння свердловин для запобігання ускладнень. У зв’язку з тим, що процес буріння свердловин на нафту і газ є нестационарним випадковим процесом, що розвивається в часі, цей варіант контролю відповідає визначенню подій в умовах апріорної невизначеності [17].

Представимо ускладнення процесу буріння свердловин однорівневою еталонною моделлю OSI, з множиною вхідних змінних x_1, x_2, \dots, x_n і однією вихідною змінною y :

$$y=f_y(x_1, x_2, \dots, x_n). \quad (1)$$

Як вхідні змінні x_i виберемо ознаки ускладнень процесу буріння свердловин, що відповідають рівню моделі OSI. Вихідна змінна y представляє собою показник міри можливості певного ускладнення в процесі буріння свердловин.

Введемо наступні основні формалізми, необхідні для побудови нечітких лінгвістичних баз знань [16].

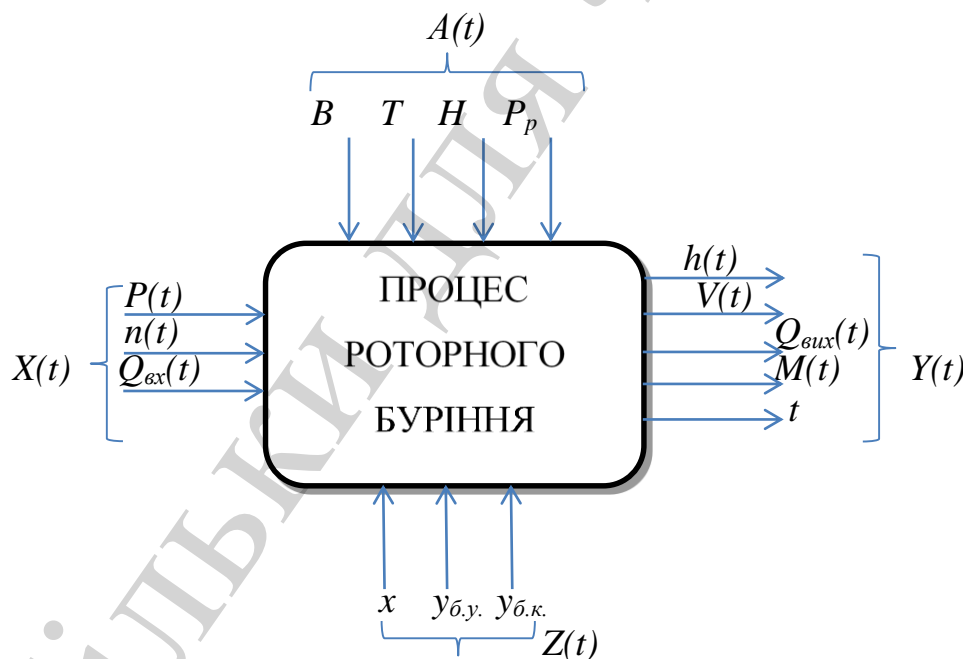


Рис. 1. Загальна інформаційна модель об’єкта контролю для запобігання ускладнень в процесі буріння свердловин на нафту і газ

Прийmemo, що змінні x_j і y можуть приймати такі значення. Область застосування значень змінних будуть:

$$U_i = [\underline{x}_i, \overline{x}_i], \quad i=1, 2, \dots, n, \quad (2)$$

$$Y = [\underline{y}, \overline{y}_i] \quad (3)$$

де \underline{x}_i і \overline{x}_i – нижнє і верхнє значення вхідних змінних процесу буріння свердловин на нафту і газ x_i ; $i=1, 2, \dots, n$; \underline{y} і \overline{y} – нижнє і верхнє значення вхідної змінної y .

Найбільш зручною для експерта формою представлення знань імплікативного вигляду є звичайна для людини – лінгвістична форма. При цьому експерт оперує нечіткими, розмитими категоріями [17].

Приймемо, що вектор $X^* = \{x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*\}$ – фіксовані значення вхідних змінних процесу буріння свердловин, тобто, показів давачів, де $x_i^* \in U_i$, $i=1, 2, \dots, n$.

Завдання прийняття рішення полягає в тому, щоб на основі вектора X^* визначити вихід $y^* \in Y$.

Необхідною умовою формального рішення такої задачі є наявність залежності (1). Для встановлення такої залежності будемо розглядати вхідні змінні процесу буріння свердловин на нафту і газ x_i , $i=1, 2, \dots, n$ і вихідну змінну y як лінгвістичні змінні [17], задані на універсальних множинах (2), (3).

Для оцінки лінгвістичних змінних x_i , $i=1, 2, \dots, n$ і y будемо використовувати якісні терми з наступних терм-множин:

A_i – терм-множина вхідної змінної процесу буріння свердловин x_i , $i=1, 2, \dots, n$;

D_j – терм-множина вихідної змінної y , тобто міра певного ускладнення;

де a_i^p – p -й лінгвістичний терм змінної x_i , $p = \overline{1, l_i}$;

d_j – j -й терм змінної y ; m – число різних рішень в даній предметній області.

Потужності терм-множин A_i , $i=1, n$, можуть бути різні

$$l_1 \neq l_2 \neq \dots \neq l_n.$$

Назва окремих термів $a_i^1, a_i^2, \dots, a_i^{l_i}$ можуть також відрізнятися один від одного для різних лінгвістичних змінних x_i , $i=1, 2, \dots, n$.

Лінгвістичні терми вхідних і вихідних змінних $a_i^p \in A_i$ і $d_j \in D$, $p = \overline{1, l_i}$, $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, m}$ $i=1, 2, \dots, n$; $j=1, 2, \dots, m$; розглядатимемо як нечіткі множини, задані на універсальній множині U_i і Y , що визначені відношеннями (2)÷(5).

Якщо x_i , $i=1, 2, \dots, n$ і y є кількісними змінними, то нечіткі множини $a_i^p \in A_i$ і $d_j \in D$ визначаються як [17, 22]:

$$a_i^p = \int_{\underline{x}_i}^{\overline{x}_i} \mu^{a_i^p}(x_i) \quad (4)$$

$$a_j = \int_{\underline{d}}^{\bar{d}} \frac{\mu^{d_j}(d_j)}{d_j}, \quad (5)$$

де $\mu^{a^p_j}(x_i)$ – функція належності значення вхідної змінної; $x_i \in [\underline{x}_i, \bar{x}_i]$ терму $a^p_i \in A$; $i=1, 2, \dots, n$; $\mu^{d_j}(d)$ – функція належності значення вихідної змінної; $y \in [\underline{y}, \bar{y}]$ терму – рішенню $a^p_i \in A$; $i=1, 2, \dots, n$. Цей етап побудови нечіткої моделі, на якій визначаються лінгвістичні оцінки змінних для формалізації функції належності, дістав назву фазифікації змінних.

Відповідно до (1) виберемо MISO – структуру (Multi Input – Single Output) [13] нечіткої бази знань. Виберемо також N експериментальних даних, що зв'язують входи і виходи об'єкта дослідження, і розподілимо їх таким чином:

$$N = k_1 + k_2 + \dots + k_m,$$

де k_j – число експериментальних даних, отриманих від експертів, які відповідають вихідному рішенню d_j , $j=1, 2, \dots, m$, m – число вихідних рішень, причому в загальному випадку $k_1 \neq k_2 \neq \dots \neq k_m$.

Припустимо, що число відібраних експериментальних даних менше повного перебору поєднань рівнів l_i зміни вхідних змінних, тобто $N < l_1 \cdot l_2 \cdot \dots \cdot l_i \cdot \dots \cdot l_n$, $i=1, 2, \dots, n$.

Пронумеруємо N експериментальних даних таким чином:

11, 12, 13, ..., $1K_1$ – номери комбінацій вхідних змінних для рішення d_1 ;

21, 22, 23, ..., $2K_2$ – номери комбінацій вхідних змінних для рішення d_2 ;

.....

$j1, j2, j3, \dots, jk_j$ – номери комбінацій вхідних змінних для рішення d_j ;

.....

$m1, m2, m3, \dots, mK_m$ – номери комбінацій вхідних змінних для рішення d_m ;

Матрицею знань, яка пов'язує вхідні змінні x_i , $i=1, 2, \dots, n$ і вихідну змінну y , назовемо таблицю (табл. 1).

Таблиця 1
Структура матриці знань щодо процесу буріння свердловини

Номера вхідних комбінацій значень	Вхідні змінні процесу буріння свердловини на нафту і газ x						Вихідна змінна y
	x_1	x_2	...	x_i	...	x_n	
11	a_1^{11}	a_2^{11}	...	a_i^{11}	...	a_n^{11}	d_1
12	a_1^{12}	a_2^{12}	...	a_i^{12}	...	a_n^{12}	d_1
...							...

1 K_1	$a_1^{1K_1}$	$a_2^{1K_2}$	...	$a_i^{1K_1}$	...	$a_n^{1K_1}$	d_1
...							...
J_1	a_1^{j1}	a_2^{j1}	...	a_i^{j1}	...	a_n^{j1}	d_j
J_2	a_1^{j2}	a_2^{j2}	...	a_i^{j2}	...	a_n^{j2}	d_j
...							...
jK_j	$a_1^{1K_j}$	$a_2^{1K_j}$	...	$a_i^{1K_j}$	...	$a_n^{1K_j}$	d_j
...							...
m_1	a_1^{m1}	a_2^{m1}	...	a_i^{m1}	...	a_n^{m1}	d_m
m_2	a_1^{m2}	a_2^{m2}	...	a_i^{m2}	...	a_n^{m2}	d_m
...							...
mK_m	$a_1^{mK_m}$	$a_2^{mK_m}$	...	$a_j^{mK_m}$	...	$a_n^{mK_m}$	d_m

Матриця знань визначає систему логіко-лінгвістичних висловлювань експерта типу «ЯКЩО – ТО, ІНАКШЕ», які зв'язують значення вхідних змінних a_i^{jp} , $i=1, 2, \dots, n$; з одним із можливих типів рішень d_j , $j=1, 2, \dots, m$:

ЯКЩО $(x_1 = a_1^{11}) I (x_2 = a_2^{11}) I \dots I (x_n = a_n^{11})$ АБО
 $(x_1 = a_1^{12}) I (x_2 = a_2^{12}) I \dots I (x_n = a_n^{12})$ АБО...
 ... $(x_1 = a_1^{1k_1}) I (x_2 = a_2^{1k_1}) I \dots I (x_n = a_n^{1k_1})$, ТО
 $y = d_1$, ІНАКШЕ

ЯКЩО $(x_1 = a_1^{21}) I (x_2 = a_2^{21}) I \dots I (x_n = a_n^{21})$ АБО
 $(x_1 = a_1^{22}) I (x_2 = a_2^{22}) I \dots I (x_n = a_n^{22})$ АБО...
 ... $(x_1 = a_1^{2k_1}) I (x_2 = a_2^{2k_1}) I \dots I (x_n = a_n^{2k_1})$, ТО
 $y = d_2$, ІНАКШЕ

ЯКЩО $(x_1 = a_1^{m1}) I (x_2 = a_2^{m1}) I \dots I (x_n = a_n^{m1})$ АБО
 $(x_1 = a_1^{m2}) I (x_2 = a_2^{m2}) I \dots I (x_n = a_n^{m2})$ АБО...
 ... $(x_1 = a_1^{mk_1}) I (x_2 = a_2^{mk_1}) I \dots I (x_n = a_n^{mk_1})$, ТО
 $y = d_m$,

(6)

де d_j , $j=1, 2, \dots, m$ – лінгвістична оцінка вихідної змінної y , яка визначається з терм – множини D ; a_i^{jp} – лінгвістична оцінка вхідної змінної x_i в p -му рядку j -й диз'юнкції, яка вибирається з відповідної терм-множини A_i , $p = \overline{1, k_j}$; $i=1, 2, \dots, n$; $j=1, 2, \dots, m$; k_j – кількість правил, яка визначає значення $y=d_j$.

Таку систему логічних висловлювань експерта про вплив факторів $\{x_i\}$ на значення вихідної змінної y назовемо нечіткою базою знань [18–22].

Використовуючи операції \cup (АБО) і \cap (І) систему логічних висловлювань (6) запишемо в такому вигляді:

$$\bigcup_{p=1}^{k_j} \left[\bigcup_{i=1}^n (x_i = a_i^{jp}) \right] \rightarrow y = d_j, \quad j=1, 2, \dots, m. \quad (7)$$

Для врахування різного типу універсальності експерта в адекватності правил використовуємо вагові коефіцієнти. Нечітку базу знань (7) з ваговими коефіцієнтами правил перепишемо таким чином:

$$\bigcup_{p=1}^{k_j} \left[\bigcup_{i=1}^n (x_i = a_i^{jp}) \text{ з вагою } \omega_{jp} \right] \rightarrow y = d_j, \quad j=1, 2, \dots, m, \quad (8)$$

де $\omega_{jp} \in [0,1]$ - ваговий коефіцієнт правила з номером jp .

Таку базу знань (8) називають базою знань Мамдані [15].

Використовуючи матрицю знань (табл. 1) або ізоморфну їй систему логічних висловлювань (6) або (7), побудуємо систему нечітких логічних рівнянь, які дозволяють визначати значення функцій належності різних рішень при фіксованих значеннях вхідних змінних процесу буріння свердловин на нафту і газ.

Компактно систему логічних рівнянь запишемо таким чином:

$$\mu^{d_j}(x_1, x_2, \dots, x_n) = \bigcup_{p=1}^{k_j} \left[\bigcap_{i=1}^n \mu^{a_i^{jp}}(x_i) \right], \quad j=1, 2, \dots, m. \quad (9)$$

Розглянемо математичну модель системи нечіткого логічного висновку і дефазифікацію вихідного показника.

Основою для проведення операції нечіткого логічного висновку є база знань, що містить нечіткі висловлювання і функції належності для відповідних лінгвістичних термів.

Ідея алгоритму для вирішення цього завдання полягає у використанні композиційного правила виведення Л. Заде, що встановило зв'язок між однією вхідною змінною процесу буріння свердловин на нафту і газ і однією вихідною [13, 15]. Це правило узагальнюється на систему одного виходу і n входів, що відповідає повній матриці знань (табл. 1).

Схема процесу нечіткого логічного висновку включає три етапи (рис. 2): введення нечіткості (*фазифікація*) вхідного параметра процесу буріння, нечіткий логічний вивід і приведення до чіткості (*дефазифікація*).

Розглянемо на матриці знань (табл. 1) рядок з номером j_1 . Цьому рядку відповідає наступне нечітке логічне висловлювання для певного ускладнення процесу буріння на нафту і газ:

$$\text{ЯКЩО } (x_1 = a_1^{j1}) \text{ I } (x_2 = a_2^{j1}) \text{ I } \dots \text{ I } (x_n = a_n^{j1}), \text{ ТО } d = d_j, \quad (10)$$

де $a_1^{j1} \in U_1, a_2^{j1} \in U_2, \dots, a_n^{j1} \in U_n, d_j \in W, U_i (i = \overline{1, n}) \text{ i } W$ – універсальні множини, які визначаються співвідношеннями (2) і (3).

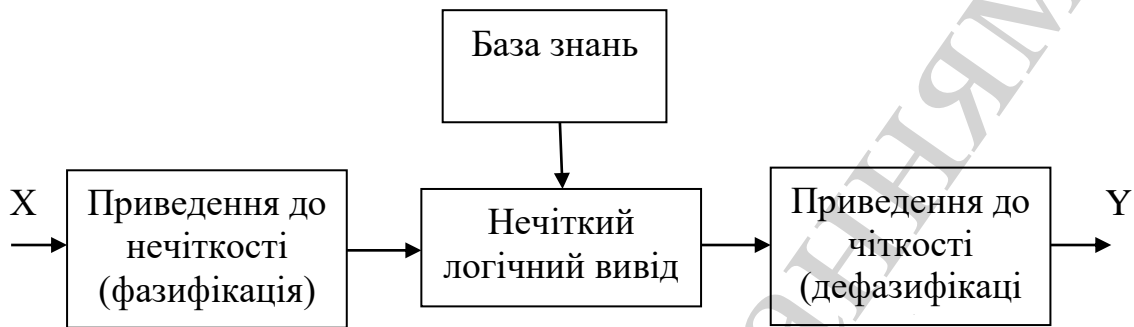


Рис. 2. Система нечіткого логічного виводу

Вираз (10) може бути представлений [22] у вигляді системи елементарних висловлювань наступного вигляду для певного (конкретного) ускладнення, що може виникнути в процесі буріння свердловини:

$$\begin{aligned} &\text{ЯКЩО } (x_1 = a_1^{j1}), \text{ ТО } d = d_j \\ &\quad \text{I} \\ &\text{ЯКЩО } (x_2 = a_2^{j1}), \text{ ТО } d = d_j \\ &\quad \text{I} \dots \dots \dots \\ &\text{ЯКЩО } (x_n = a_n^{j1}), \text{ ТО } d = d_j. \end{aligned} \quad (11)$$

Отже, як модель ускладнень процесу буріння свердловин доцільно використовувати розроблену логіко-лінгвістичну Fuzzy-модель, що здатна забезпечити підтримку прийняття рішень в реальному часі.

5. 2. Імітаційне моделювання інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень в умовах ускладнень

Проведеними дослідженнями ускладнень процесу буріння вибрано ознаки розпізнавання чотирьох видів ускладнень.

Результати досліджень зведені в табл. 2.

Ознаки частково дублюються, що не є несподіванкою, оскільки одна і та ж ознака може бути інформативною для декількох ускладнень одночасно. З врахуванням цього доцільно представити вибрані ознаки у вигляді табл. 3.

Практикою буріння встановлено такі ознаки флюїдопроявів [23]:

– збільшення об'єму (рівня) бурового розчину в ємкостях циркуляційної системи;

– підвищення витрати (швидкості) бурового розчину, що виходить із свердловини при незмінній подачі бурових насосів;

– зменшення проти розрахункового об'єму бурового розчину, що доливається в свердловину при спуску бурильної колони;

– підвищення газомісту в буровому розчині;

– зростання механічної швидкості буріння;

– зміна показників властивостей бурового розчину;

– зміна тиску на бурових насосах.

Останні три ознаки можуть виникати не тільки в результаті проявів, але і за іншими побічними причинами.

Прихвати колон труб класифікуються [23] як ускладнення.

Ознаки, за якими можна визначити або уточнювати виникнення «прихватів бурового снаряда дробом» [16]:

– вільна циркуляція промивальної рідини;

– «мертве» становище аварійного снаряда, тобто якщо буровий інструмент до ускладнення знаходився на деякій відстані від вибою, то після прихвата він не рухається ні вгору, ні вниз і не обертається.

Ознаки, за якими можна визначити виникнення цих ускладнень (за винятком обвалу стінок свердловини при раптовій і повній втраті циркуляції):

– можливість руху бурового снаряда вниз, якщо перед початком ускладнення він був піднятий над вибоєм;

– наявність циркуляції промивальної рідини, яка при тривалій ліквідації ускладнення припиняється;

– якщо ліквідація ускладнення проводиться за допомогою особливого промивального снаряда, що опускається в свердловину, то він зупиняється вище перехідника.

З табл. 3 бачимо, що найбільш інформативними ознаками, які доцільно використовувати при розпізнанні більшості ускладнень, є:

– 6 – давач тиску нагнітання бурового розчину;

– 1 – давач глибини (датчик обертів валу бурової лебідки);

– 8 – давач рівня в прийомних ємностях.

Також існують ознаки, специфічні для конкретних ситуацій:

– 2 – давач крутного моменту на роторі (тільки для ускладнення «Прихват бурового інструменту»);

– 7 – давач витрати бурового розчину в нагнітальній лінії (тільки для ускладнення «Поглинання бурових і тампонажних розчинів»);

– 9 – давач густини бурового розчину (тільки для ускладнення «Газонафтопрояви»);

– 10 – давач температури бурового розчину (тільки для ускладнення «Газонафтопрояви»);

– 12 – давач навантаження на гаку (тільки для ускладнення «Прихват бурового інструменту»).

Для оцінювання і визначення функцій належності для бази правил потрібно визначити ступінь нечіткості вхідних величин, які подають інформацію з давачів для виявлення ускладнень. В табл. 3 наведено ознаки цих ускладнень, які давачі, тобто які параметри є найбільш інформативними для розробленої ІСППР.

Таблиця 2

Результати вибору ознак розпізнання для основних видів ускладнень

Ускладнення	Давачі контролю параметрів процесу буріння свердловин на нафту і газ
Поглинання бурових і тампонажних розчинів	6 – давач тиску нагнітання бурового розчину; 8 – давач рівня в прийомних ємностях; 10 – давач температури бурового розчину; 7 – давач витрати бурового розчину в нагнітальній лінії;
Газонафтопрояви	1 – давач глибини (давач обертів валу бурової лебідки); 6 – давач тиску нагнітання бурового розчину; 9 – давач густини бурового розчину; 10 – давач температури бурового розчину;
Порушення цілісності стінок свердловини	1 – давач глибини (давач обертів валу бурової лебідки); 6 – давач тиску нагнітання бурового розчину; 9 – давач густини бурового розчину; 8 – давач рівня в прийомних ємностях;
Прихват бурового інструменту	1 – давач глибини (давач обертів валу бурової лебідки); 12 – давач навантаження на гаку; 6 – давач тиску нагнітання бурового розчину; 2 – давач крутного моменту на роторі.

Таблиця 3

Ознаки, які використовуються для виявлення ускладнень

№ п/п	Ознаки (давач)	Поглинання бурових і тампонажних розчинів	Газонафтопрояви	Порушення цілісності стінок свердловини	Прихват бурового інструменту
1	1	–	+	+	+
2	6	+	+	+	+
3	8	+	–	+	–
4	9	–	+	+	–
5	10	+	+	–	–
6	12	–	–	–	+
7	7	+	–	–	–
8	2	–	–	–	+

Розроблено анкети для опитування експертів. Всього в опитуванні брало участь 7 експертів – це інженери-бурильники Прикарпатського управління бу-

рових робіт УБР, які завдяки своєму досвіду можуть виступати компетентними експертами.

Результати обробки анкетних даних (табл. 4), з врахуванням теоретичних викладок, записані і вигляді такої системи нечітких логічних правил про вплив джерел ускладнень фізичного рівня на стан процесу буріння у цілому:

- П1. Якщо x_1 «низький» і x_7 «низький» і x_4 «середній» то y «високий»;
- П2. Якщо x_1 «низький» і x_7 «низький» і x_4 «низький» то y «високий»;
- П3. Якщо x_1 «низький» і x_7 «середній» і x_4 «середній» то y «вище середнього»;
- П4. Якщо x_1 «низький» і x_7 «середній» і x_4 «низький» то y «вище середнього»;
- П5. Якщо x_1 «низький» і x_7 «високий» і x_4 «середній» то y «середній» ;
- П6. Якщо x_1 «низький» і x_7 «високий» і x_4 «низький» то y «вище середнього»;

.....

П107. Якщо x_5 «низький» і x_6 «низьке» і x_2 «нижче середнього» і x_1 «низький» то y «нижче середнього».

Вагові коефіцієнти правил П1-П107 рівні 1, оскільки при грубому налаштуванні бази знань таке значення задовольняє вимогам особи, яка приймає рішення.

Таблиця 4

Вхідні і вихідна лінгвістичні змінні і їх терми для процесу буріння свердловини при ускладненнях

Позначення лінгвістичних змінних	Найменування джерела аномалій	Значення лінгвістичних термів для вхідних і вихідних змінних
x_1	Давач тиску нагнітання бурового розчину	Низька, середня, висока
x_2	Давач глибини (давач швидкості обертання валу бурової лебідки)	Низький, нижче середнього, середній, вище середнього, високий
x_3	Давач температури бурового розчину	Низька, нормальна, висока
x_4	Давач рівня в прийомних ємностях	Низький, середній, високий
x_5	Давач крутного моменту ротора	Низький, середній, високий
x_6	Давач навантаження на гаку	Низьке, середнє, високе
x_7	Давач витрати в нагнітальній лінії	Низький, середній, високий
x_8	Давач густини бурового розчину	Низька, середня, висока
y	Можливість ускладнення в процесі буріння	Низька, нижче середнього, середня, вище середнього, висока

Для програмного забезпечення ІСППР, можна використовувати будь-який персональний комп'ютер (ПК) (рис. 3) з вільною віртуальною пам'яттю не менше 256 Мбайт.

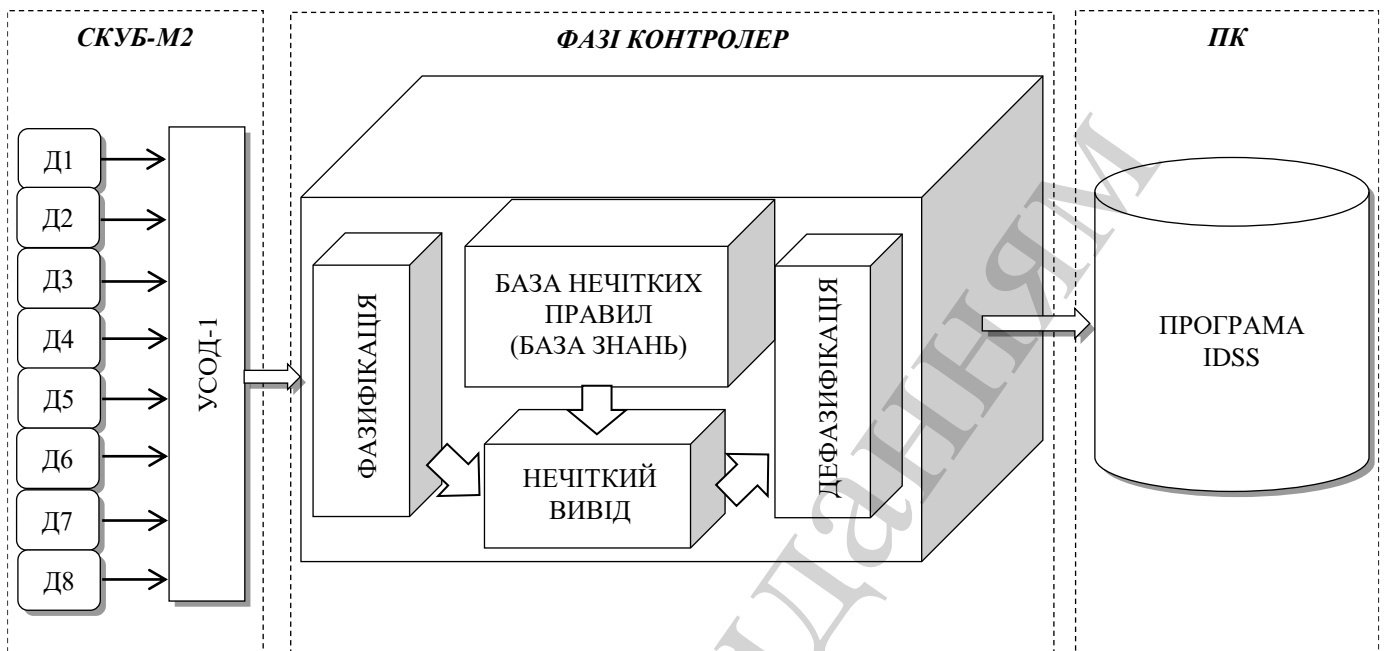


Рис. 3. Загальна схема роботи ІСППР: SKUB-M2 – система контролю та керування процесу буріння свердловин, модернізована; USOD-1 – пристрій для збору та обробки даних

Здійснено імітаційне моделювання роботи ІСППР, зокрема розглянуто методику проведення експерименту з перевірки працездатності розробленої ІСППР в програмному продукті MatLab Simulink. Випробування проводилися методом тестування. Схема моделі ІСППР в MatLab Simulink представлена на рис. 4.

Моделювання проводилось впродовж 5 днів (120 год). Результати моделювання показані на рис. 4, 5 і ці результати використаємо для налаштування нечіткої бази знань та вагових коефіцієнтів правил. Розглянемо випадок роботи моделі і бази правил в *Fuzzy Logic Controller* при якому $x_1=1$, $x_2=17$, $x_3=41$, $x_4=65$, $x_5=17$, $x_6=1750$, $x_7=0,03$, $x_8=850$, $y=46,3$ (рис. 6). Опишемо за допомогою нечіткої логіки результат роботи нечіткого контролера в MatLab Simulink. Для цього скористаємось формулами з п. 5. 1.

$$\begin{aligned} \text{ЯКЩО } \mu_1(y) &= \min\{\max 1; 1; 0\} = \min\{0\} \\ \text{АБО } \mu_2(y) &= \min\{\max 1; 1; 0\} = \min\{0\} \\ \text{АБО } \mu_3(y) &= \min\{\max 1; 1; 1\} = \min\{1\} \\ &\dots\dots\dots \\ \text{АБО } \mu_{106}(y) &= \min\{\max 0; 0; 0.5; 0\} = \min\{0\} \\ \text{АБО } \mu_{107}(y) &= \min\{\max 0; 0; 0.5; 0\} = \min\{0\}. \end{aligned}$$

Отже отримаємо такі результати

$$\mu_3(y), \mu_{67}(y), \mu_{103}(y)$$

$$\mu_3(y) = \min\{\max\{1; 1; 1\}\} = \min\{1\}$$

$$\mu_{67}(y) = \min\{\max\{1; 0.63; 1\}\} = \min\{0.63\}$$

$$\mu_{103}(y) = \min\{\max\{1; 0.63; 0.5; 1\}\} = \min\{0.5\}$$

Проводимо дефазифікацію.

$$y = \frac{\int_0^{20} 0,5dx + \int_{40}^{60} 0,63dx + \int_{60}^{80} 1dx}{0,5 + 0,63 + 1} = 46,152$$

В програмному продукті Matlab результат склав $y=46.3$.

Проведено імітаційне моделювання розробленої інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень при керуванні процесом буріння свердловин в умовах ускладнень. Проаналізувавши результати досліджень бачимо, що програма працює вірно.

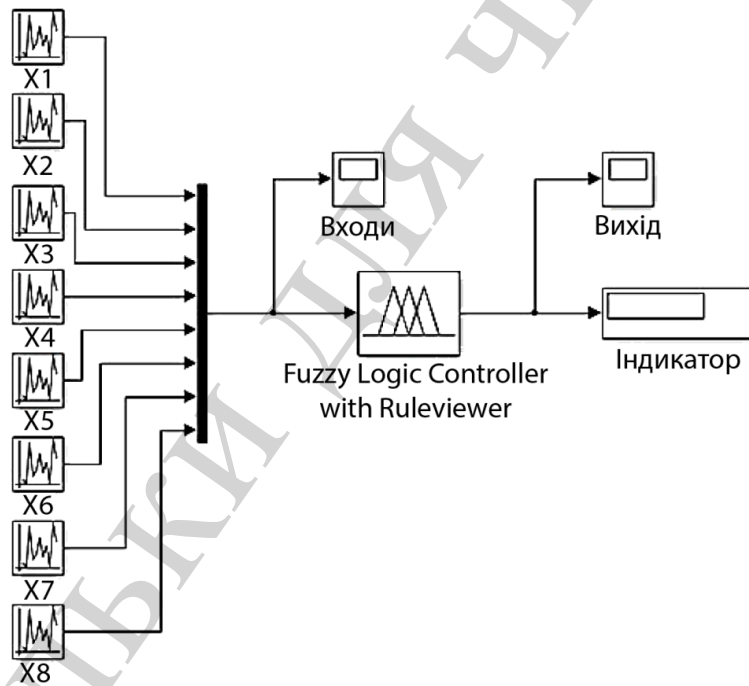


Рис. 4. Схема моделі ІСППР в MatLab Simulink

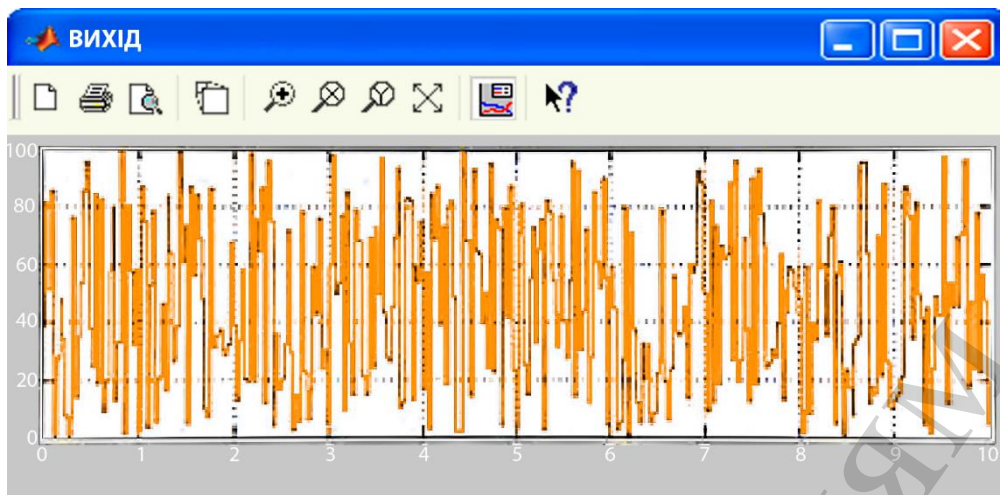


Рис. 5. Вікно результату дефазифікації в Simulink

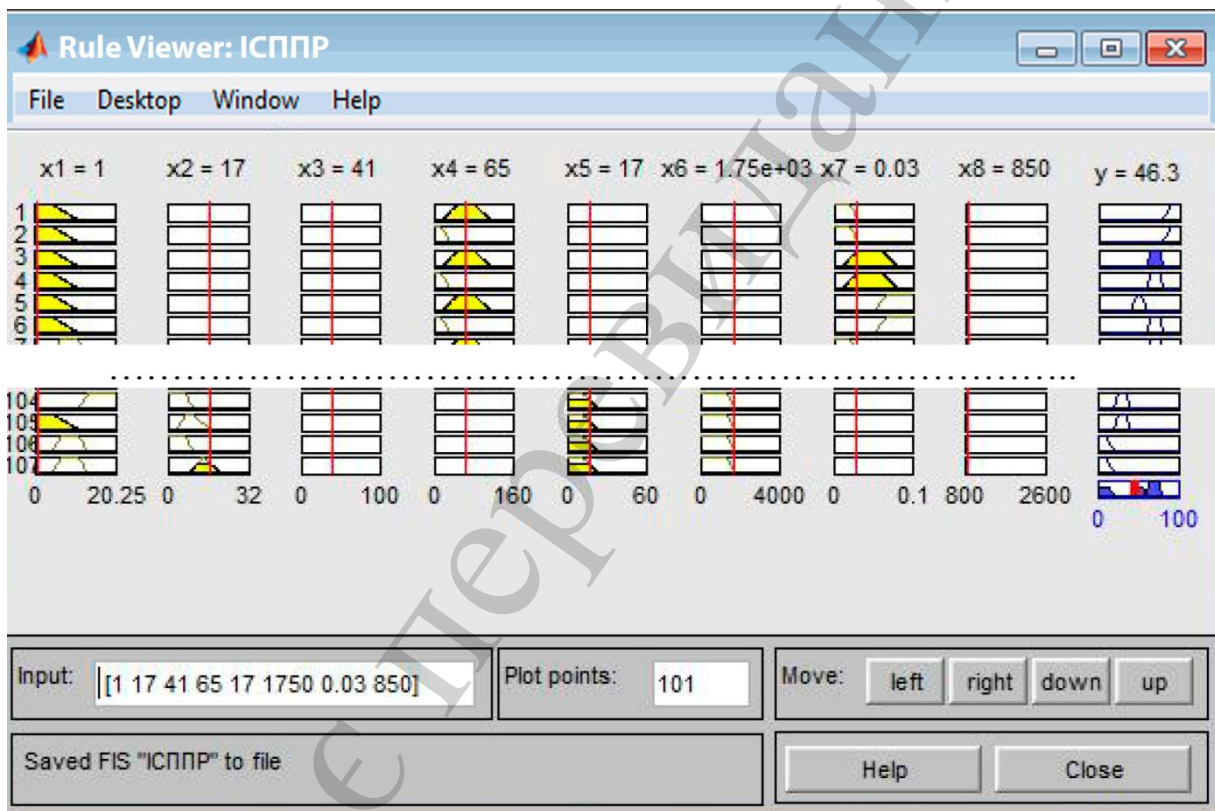


Рис. 6. Вікно роботи правил в Simulink

6. Обговорення результатів розробки інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень

Отримані матриця знань щодо процесу буріння свердловин, ознаки, що використовуються для виявлення ускладнень, вхідні та вихідні лінгвістичні змінні, а також схема моделі ІСППР в Matlab є розвитком детермінованих і стохастичних моделей різноманітних ускладнень процесу буріння свердловин на нафту і газ. Ці

моделі забезпечують виявлення в реальному часі виникаючих змін сигналів довільної природи в умовах структурної та параметричної невизначеності.

Вироблено Fuzzy-підхід щодо формування та вибору первинної інформації, який базується на застосуванні трикутних функцій належності. Уніфікація їх досягнута за рахунок того, що різні за фізичним змістом кількісні та якісні показники процесу буріння відображаються на єдину універсальну множину. Потужність цієї множини рівна числу термів і на якій задані нечіткі підмножини кожного із термів. Розроблено загальну структуру ІСППР для контролю та керування процесу буріння свердловин на нафту і газ в умовах ускладнень. Для цього виділені множини керованих, некерованих, збурюючих та вихідних технологічних параметрів. Система забезпечує підвищену точність фазифікації вхідних сигналів з функціями належності трикутної форми. Це досягається шляхом апріорного формування аналітичних залежностей для визначення точок перетину функцій належності вхідних нечітких сигналів та лінгвістичних термів.

Розроблена ІСППР може застосовуватися також при бурінні на тверді корисні копалини і воду, а також на морських бурових платформах, що значно розширює можливості практичного застосування результатів роботи.

Обмеженнями є можливість застосування результатів дослідження лише для роторного способу буріння глибоких свердловин. Для буріння гвинтовими вибійними двигунами і електробурами надглибоких свердловин розроблені Fuzzy-моделі повинні отримати подальший розвиток, як базові у формі предметно-незалежної інтелектуальної оболонки.

Недоліком даного дослідження є те, що розроблена ІСППР є комплексом апаратно-програмних засобів для автоматизованого збору, обробки та інтерпретації геологічної і технологічної інформації щодо виявлення ускладнень лише в процесі роторного буріння. Для буріння свердловин занурними двигунами (гідрравлічними та електричними) ІСППР має бути доповнена інформацією щодо їх функціонування на вибої свердловини. Окрім цього вона є складовою локальних інформаційно-вимірювальних систем контролю та управління процесом будівництва нафтових і газових свердловин на нижньому рівні управління. Для використання отриманої інформації на верхньому рівні управління нафтової компанії в ІСППР має бути передбачена передача інформації з бурового майданчика на сервер нафтогазової компанії. Ця інформація як прецедент залишається доступною для ретроспективного перегляду та аналізу ускладнень на інших бурових установках компанії.

В перспективі цей недолік може бути усунутий, а ІСППР отримає подальший розвиток шляхом використання прецедентного підходу і хмарних технологій.

Прецедентний підхід ґрунтується на використанні у системі бази прецедентів і є методом вирішення нових проблем на основі вже відомих рішень. Такий підхід сприяє аналізуванню та врахуванню усіх особливих і нештатних ситуацій (ускладнень), які у конкретний момент негативно впливають на процес поглиблення свердловини.

У хмарних технологіях використовують сервер нафтової компанії з базою прецедентів, в якій зберігаються конкретні дані про проблемні ситуації, що виникли в процесі поглиблення раніше пробурених свердловин. База правил фор-

мується із прикладних програм, що реалізують необхідні обчислення, включаючи і задачі статичної оптимізації процесу буріння свердловин.

7. Висновки

1. Розроблено Fuzzy-модель ускладнень процесу буріння свердловин на нафту і газ, яка використана в інтелектуальній системі прийняття рішень для виявлення ускладнень в реальному часі. Fuzzy-модель дозволяє визначити склад і характеристики вхідних і вихідних змінних інтелектуальної системи, нечітку базу правил, модель функції належності лінгвістичних змінних, модель системи нечіткого логічного висновку і дефазифікацію вихідного показника.

2. Проведено імітаційне моделювання ІСППР для запобігання ускладнень. Система на відміну від відомих, ґрунтується на методах теорії нечітких множин і нечіткої логіки та на неперервній інформації від давачів (осьового зусилля на долото, частоти обертання ротора, проходки, температури бурового розчину). Опитування здавачів здійснюється через (1÷3) с. Це дає можливість ефективно запобігати ускладненню в реальному часі в широкому діапазоні зміни параметрів процесу буріння, забезпечити безаварійну проводку свердловин.

Література

1. Larsen, H. F., Alfsen, T., Kvalsund, R., Iversen, F. P., Welmer, M., Hult, O., Ekrene, S. (2010). The Automated Drilling Pilot on Statfjord C. IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition. doi: <https://doi.org/10.2118/128234-ms>
2. Aldred, W., Bourque, J., Chapman, C., Downton, G., Falconer, I., Florence, F. et. al. (2012). Drilling Automation. Oilfield Review, 24 (2), 18–27.
3. Florence, F., Porche, M., Thomas, R., Fox, R. (2009). Multi-Parameter Autodrilling Capabilities Provide Drilling, Economic Benefits. SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition. doi: <https://doi.org/10.2118/119965-ms>
4. Chapman, C. D., Sanchez, J. L., De Leon Perez, R., Yu, H. (2012). Automated Closed-Loop Drilling with ROP Optimization Algorithm Significantly Reduces Drilling Time and Improves Downhole Tool Reliability. IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition. doi: <https://doi.org/10.2118/151736-ms>
5. Okpo, E. E., Dosunmu, A., Odagme, B. S. (2016). Artificial Neural Network Model for Predicting Wellbore Instability. SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition. doi: <https://doi.org/10.2118/184371-ms>
6. Cayeux, E., Daireaux, B. (2009). Early Detection of Drilling Conditions Deterioration Using Real-Time Calibration of Computer Models: Field Example from North Sea Drilling Operations. SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition. doi: <https://doi.org/10.2118/119435-ms>
7. Cayeux, E., Daireaux, B., Dvergsnes, E., Sælevik, G. (2012). Early Symptom Detection on the Basis of Real-Time Evaluation of Downhole Conditions: Principles and Results From Several North Sea Drilling Operations. SPE Drilling & Completion, 27 (04), 546–558. doi: <https://doi.org/10.2118/150422-pa>

8. Jacobs, T. (2015). Automated Drilling Technologies Showing Promise. *Journal of Petroleum Technology*, 67 (06), 50–55. doi: <https://doi.org/10.2118/0615-0050-jpt>
9. De Wardt, J. P., Innabinnett, C. E., Laing, M. L., Macpherson, J. D. (2016). System Architecture and Operations States for Drilling and Completion: The Foundation to Real Performance Measurement and Drilling System Automation. IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition.
10. Bang, J., Jegbefume, O., Ledroz, A., Thompson, J. (2015). Wellbore Tortuosity Analysed by a Novel Method May Help to Improve Drilling, Completion, and Production Operations. SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition. doi: <https://doi.org/10.2118/173103-ms>
11. Оганов, Г. С., Ширин-Заде, С. А., Парамонов, А. А. (2009). Динамический анализ процесса углубления скважин. *Вестник ассоциации буровых подрядчиков*, 1, 40–44.
12. Шавранський, М. В., Кучмистенко, О. В. (2018). Інтелектуальна система для розпізнавання об'єктів на оптичних зображеннях з використанням каскадних нейронних мереж. *Нафтогазова енергетика*, 1, 50–55. doi: [https://doi.org/10.31471/1993-9868-2018-1\(29\)-50-55](https://doi.org/10.31471/1993-9868-2018-1(29)-50-55)
13. Kluska, J. (2005). Exact Fuzzy Modeling of conventional control system. *Proceedings of 12-th East-West Fuzzy Colloquium. Zittau*, 113–125.
14. Kondratenko, Y., Sydorenko, S., Kravchenko, D. (2005). Fuzzy control systems of non-stationary plants with variable parameters. *Proceedings of 12-th East-West Fuzzy Colloquium. Zittau*, 140–152.
15. Sokolov, A., Wagenknecht, M. (2005). Choctic Mamdani Recurrent Models. *Proceedings of 12-th East-West Fuzzy Colloquium. Zittau*, 272–278.
16. Демчина, М. М. (2012). Використання нечітких правил для подання знань в інтелектуальних системах нафтогазової предметної області. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*, 1 (31), 132–141.
17. Бакуменко, Н. С., Касьян, О. В., Соколов, А. Ю. (2002). Новый подход к построению нечетких моделей динамических объектов. *Открытые информационные технологии*, 13, 98–105.
18. Bodyanskiy, Ye., Teslenko, N. (2008). General regression neuro-fuzzy network for identification of nonstationary plants. *International Journal "Information Technologies and Knowledge"*, 2 (2), 136–142. URL: <http://www.foibg.com/ijitk/ijitk-vol02/ijitk02-2-p05.pdf>
19. Kuzemin, O., Toroev, A., Klymov, I. (2008). Development of fuzzy-logic model for prediction of the avalanche-dangerous situations risk. *International Disaster Risk Conference. Davos*, 135.
20. Sokolov, A., Bakumenko, N. (2002). Linguistic approximation of dynamic object. *Proceedings of 10-th East-West Fuzzy Colloquium. Zittau*, 225–262.

21. Чигур, Л. Я., Семенов, Г. Н., Чигур, І. І., Когутяк, М. І., Когуч, Я. Р., Шавранський, М. В. (2009). Інтелектуальний пристрій на нечіткій логіці для розпізнавання образів у бурінні. Нафтогазова енергетика, 1, 75–77.
22. Штовба, С. Д. (2007). Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. М.: Горячая линия - Телеком, 288.
23. Степанов, Н. В. (1989). Моделирование и прогноз осложнений при бурении скважин. М.: Недра, 252.

Не є перевиданням