

УДК 658.5:681.3.068

**FUZZY-MODELING OF A LARGE DYNAMIC NONLINEAR PROCESS  
FOR CONTROL PROBLEMS**

**FUZZY-МОДЕЛЮВАННЯ БАГАТОВИМІРНОГО ДИНАМІЧНОГО НЕЛІНІЙНОГО  
ПРОЦЕСУ ДЛЯ ЗАДАЧ КЕРУВАННЯ**

**Sementsov G.N. / Семенцов Г.Н.**  
*d.t.s., prof. / д.т.н., проф.*

*ORCID: 0000-0001-8976-4557*

**Iagoyda A.I. / Лагойда А.І.**  
*k.t.s. / к.т.н.*

*ORCID: 0000-0002-0862-7786*

**Zvarych G.G. / Зварич Г.Г.**

*Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Karpat'skaya,  
15,76019*

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ,  
вул.Карпатська,15,76019*

**Анотація.** На основі холістичного підходу розроблено феноменологічну Fuzzy-модель бурової насосної установки як багатовимірного нелінійного об'єкта керування, що функціонує за умов невизначеності під впливом завод. Показано, що запропонована модель є доповненням до класичної аналітичної моделі і її впровадження дасть змогу підвищити ефективність розв'язання задач ідентифікації, оцінювання і контролю в режимі реального часу. За результатами досліджень зроблено висновок, що заснована на базі правил Мамдані-типу статична Fuzzy-модель бурової насосної установки ефективно інтерполює залежність між контрольними точками витрато-напірної характеристики бурової насосної установки, дозволяючи моделювати тиск на вході у свердловину для невідомих початкових умов і використовувати Fuzzy-модель як надлишковість на основі знань для контролю тиску на вході у свердловину.

**Ключові слова:** Fuzzy-моделювання, багатовимірний нелінійний процес, бурова насосна установка, витрато-напірна характеристика, ідентифікація, оцінювання, контроль.

**Вступ.** Fuzzy Logic (FL) була створена професором Лотфі Заде (США) у другій половині 20 століття й увійшла у 21 століття повноправною складовою автоматки. Сучасні системи автоматичного керування використовують FL як засіб підвищення їх ефективності та швидкодії. Моделі, засновані на методах FL все більше застосовуються як альтернатива або доповнення до класичних аналітичних моделей складних об'єктів керування. Це обумовлено тим, що алгоритми FL придатні для моделювання залежностей між вхідними і вихідними змінними процесів, які характеризуються такими особливостями як багатовимірність, висока динамічність та суттєва нелінійність. У таких випадках застосування FL слугує для ідентифікації, оцінювання та контролю

стану процесів. Окрім цього, застосування FL сприяло бурхливому розвитку інтелектуальних обчислювальних систем керування, в основу яких покладені нечіткі семантичні зв'язки типу *and* та *or*.

Публікація присвячена застосуванню FL для моделювання витрато-напірних характеристик бурових насосів у процесі буріння свердловини. Обраний приклад процесу характеризується високою динамічністю і сильною нелінійністю. Параметри гідравлічної системи промивання свердловини змінюються оператором поінтервально відповідно до програми, закладеної у проєкті спорудження свердловини. Традиційно ідентифікація витрато-напірних характеристик насосів, як задача отримання оптимальних у сенсі вибраного критерію оцінок векторів стану насосу, здійснюється на основі обробки паспортних даних або фактичних значень характеристик насосів. Проте, під час вирішення задачі має місце невизначеність в апіорній інформації, яка викликана так, що гідравлічна система промивання свердловини, як об'єкт керування має структуру і параметри, що розвиваються у часі. Окрім цього, сам процес промивання свердловини відбувається під впливом різного типу завад, недосяжних для вимірювань: гірничого тиску, температури, аномально високих або низьких пластових тисків, поглинання бурового розчину, обвалювання стінок свердловини та ін.

Існуючі методи моделювання та алгоритми ідентифікації витрато-напірних характеристик насосів, що мають доведену збіжність, вимагають або розширення вектору стану бурового насосу за рахунок включення у нього невідомих значень елементів матриці завад, або застосування алгоритмів стохастичної апроксимації. Останні суттєво залежать від розмірності системи або взагалі непридатні у реальних умовах буріння свердловини внаслідок великої розмірності коваріаційної матриці завад, недостатньої кількості інформації та ін. Слід відзначити, що застосування розширеного вектору стану бурового насосу в алгоритмах ідентифікації першого типу веде практично до подвоєння розмірності стану бурового насоса. Водночас алгоритми стохастичної апроксимації мають недостатню збіжність. При цьому із

збільшенням розмірності матриці завад швидкість їх збіжності значно зменшується.

Отже, на даний час актуальною науково-прикладною задачею є розроблення нового Fuzzy-методу моделювання та ідентифікації витрато-напірних характеристик бурових насосів, який був би вільним від вказаних вище недоліків.

### **Основний текст.**

*Аналіз останніх досліджень і публікацій.* Дослідження проблеми моделювання та ідентифікації витрато-напірних характеристик бурових насосів (двопоршневих двобічної дії і трипоршневих однобічної дії) приділяють увагу багато вітчизняних та іноземних науковців [1÷7 та ін.]. Особливістю роботи цих насосів є застосування підпірних відцентрових насосів, що створюють у всмоктуючих камерах бурових насосів надлишковий тиск. За рахунок цього збільшується коефіцієнт подачі і частота ходів поршнів. Використання підпірних насосів сприяє також зменшенню коливань у гідравлічній системі. Воно дуже ефективно під час перекачування бурового розчину з великим вмістом повітря і газу. До сьогодні електропривод підпірних насосів, що застосовують на бурових установках на 70% є нерегульований [2,3]. Слід відзначити, що у практиці буріння свердловин за кордоном, перехід на трипоршневі бурові насоси в основному здійснюється для бурових насосів великої потужності, що розраховані на великий тиск [4]. За кордоном бурові установки обладнуються трипоршневими буровими насосами однобічної дії. У порівнянні з двопоршневими буровими насосами двобічної дії за однакової потужності, вони мають значні переваги: зменшення ваги, габаритів у 2 рази; зменшення нерівномірності подачі у 2 рази; нерівномірність тиску зменшена у 5-6 разів; зменшення кількості змінних деталей у 1,3÷1,4 рази. Число ходів у трипоршневих бурових насосів може досягти 120÷185 ходів за хвилину, проти 60÷80 – у двопоршневих. Найбільш ефективно є застосування трипоршневих бурових насосів для буріння глибоких свердловин у складних геологічних умовах і на морі [5,67].

Теоретичні основи керування очищенням вибою свердловини при бурінні закладені у роботах [8-12]. Доведено [9], що головним принципом керування очищенням вибою свердловини, що буриться, є роздільне керування кожним із трьох різних за своєю фізичною природою процесів очищення: очищення поверхні вибою, очищення привибійної зони й очищення озброєння долота. Різноманітні геолого-технічні умови поглиблення свердловин обумовлюють домінування одного із названих процесів у кожному конкретному випадку. Наприклад, при високих диференційних тисках переважає перший процес очищення. При незначних тисках, особливо при промиванні свердловин водою, домінуючим є другий процес очищення. При бурінні у м'яких в'язких породах на великих глибинах домінують третій процес очищення. Проте, практично не зустрічається умов буріння, при яких вплив усіх трьох процесів однаково суттєвий. Відзначимо, що незалежно від конструкції долота, очищення вибою свердловини здійснюється потоком промивальної рідини з певним тиском у гідравлічній системі.

Наукові погляди на роль бурових насосів у системах автоматизації управління бурінням свердловин представлені у працях [13,14 та ін.]. У даний час технологія буріння спрямована на скорочення непродуктивного часу під час проведення бурових робіт шляхом введення оперативних гарантій безпосередньо на буровому обладнанні. Світовий досвід створення ефективних гідравлічних промивальних систем для буріння свердловин на нафту і газ та способи їх реалізації знайшли своє відображення у працях [15,16 та ін.]. Однак процес адаптивного керування промиванням свердловин, функціонування якого засноване на автоматичній ідентифікації витрато-напірних характеристик бурових насосів, не набув належного поширення. Водночас, у працях, зазначених вище авторів, не приділяється увага питанням моделювання та автоматичної ідентифікації витратно-напірних характеристик бурових насосів та використанню їх в адаптивних системах керування. Проте, саме від цього значною мірою залежить зменшення термінів та вартості будівництва свердловин.

Аналітичний огляд робіт [1÷16], пов'язаних з проблемою моделювання та ідентифікації витратно-напірних характеристик бурових насосів, показав, що у розробках і промислових реалізаціях систем автоматичного керування промиванням свердловин досягнуто нові позитивні результати. Проте, проблеми моделювання та ідентифікації реальних витрато-напірних характеристик бурових насосів практично не досліджувалися і не отримали відповідної промислової реалізації.

Аналізування технологічних особливостей процесу промивання свердловин дозволило визначити, що АСКТП-буріння повинна вирішувати завдання моделювання та ідентифікації витратно-напірних характеристик бурових насосів у реальному часі. Необхідність створення підсистеми автоматичної ідентифікації витратно-напірних характеристик бурових насосів обумовлена відсутністю адекватного математичного опису витратно-напірних характеристик через специфічні особливості процесу промивання свердловини: апріорна та поточна невизначеність щодо параметрів і структури системи промивання свердловини (збільшення глибини, температури, гірничого тиску та ін.), нелінійність об'єкта керування, безперервність процесу промивання, наявність суттєвих шумів у вимірювальних каналах та ін.

Проведений аналіз дозволяє зробити аргументовані висновки, що задача моделювання та автоматичної ідентифікації витрато-напірних характеристик бурових насосів у реальному часі вирішується шляхом застосування методів Fuzzy-Logic й оброблення сигналів у реальному часі на основі комп'ютерно-інтегрованих технологій. Тож обрана тема наукового дослідження є актуальною на сучасному етапі реалізації стратегії світового розвитку «Industry.4.0» та розвитку сектора економіки UPSTREAM.

*Мета і завдання досліджень.* Метою роботи є підвищення ефективності автоматичного керування буровими насосами шляхом застосування нового методу та засобів моделювання та ідентифікації витратно-напірних характеристик при дотриманні встановлених обмежень незалежно від типу

приводу, який встановлюється для приведення їх у дію. Досягнення поставленої мети здійснюється вирішенням таких основних завдань:

- аналіз сучасного стану досліджень моделювання та ідентифікації витратно-напірних характеристик бурових насосів;
- встановлення зв'язків тиску бурового розчину з витратою;
- розроблення методу Fuzzy-моделювання та ідентифікації витратно-напірних характеристик бурових насосів;

*Об'єктом дослідження* є процес керування промиванням свердловини під час їх поглиблення, що здійснюється в умовах несподіваних подій за умов апріорної та поточної невизначеності та апріорі невідомих неконтрольованих збурювальних дій.

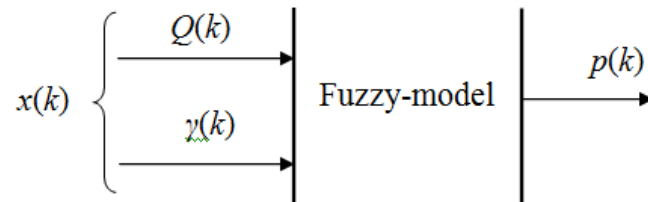
*Предметом дослідження* є моделі і методи ідентифікації витратно-напірних характеристик бурових насосів.

*Методи дослідження.* В основу досліджень покладено методи Fuzzy-Logic для створення моделі бурового насосу.

**Результати досліджень.** Складність моделюванні витратно-напірних характеристик бурових насосних установок обумовлена сильною нелінійністю процесу нагнітання бурового розчину у свердловину, швидкою зміною динаміки процесу, нечіткістю параметрів, обмеженістю діапазону вимірювань.

На практиці застосовують емпіричні та полуміричні методи математичного опису технічних гідравлічних систем промивання свердловин (ТГСПС), що ґрунтуються на експериментальних даних та знаннях спеціалістів-експертів. Головним недоліком цих методів є жорсткий зв'язок з конкретними геолого-технічними умовами буріння свердловини та неточність в емпіричних розрахунках та моделях, яку важко оцінити звичайними математичними методами.

Оскільки бурові насоси є об'єктами, що функціонують за умов апріорної та поточної невизначеності щодо параметрів і структури об'єкта гідравлічної системи, розглянемо модель витратно-напірної характеристики в базисі Fuzzy-Logic [17,18] (рис. 1).



**Рис. 1. Дискретна MI-SO-фазі-модель бурового насоса:  $Q$  – витрата бурового розчину;  $\gamma$  - питома вага бурового розчину;  $p$  – тиск на вході в свердловину;  $x(k)$  –  $n$ -вимірний вектор входів;  $Q(k)$ ,  $\gamma(k)$  – вхідні дискретні часові послідовності;  $p(k)$  – вихідна дискретна часова послідовність,  $p(1)$ ,  $p(2), \dots, p(k)$ ;  $k$ -дискретний поточний час**

Fuzzy-model бурового насоса заснована на базі знань, що синтезована на засадах досвіду експертів та результатів експериментальних досліджень. Для математичної формалізації експертної інформації застосована теорія FL. При цьому вхідні ( $Q$ ,  $\gamma$ ) і вихідні ( $p$ ) параметри моделі насоса описується за допомогою лінгвістичних змінних.

Як вхідні параметри системи нечіткого виводу розглядатимемо 2 нечіткі лінгвістичні змінні: «витрати бурового розчину» і «густина бурового розчину», а вихідний параметр – нечітка лінгвістична змінна «тиск на вході у свердловину».

Для дослідження вибрані такі діапазони зміни вхідних і вихідних параметрів насоса У8-6МА з приводом СДБО-99/49-8 потужністю 1260 кВт:

- густина бурового розчину  $\gamma \in [0,8 \div 2,55]$  г/см<sup>3</sup>;
- витрата бурового розчину в нагнітальній лінії  $Q \in [10 \div 60]$  дм<sup>3</sup>/с;
- тиск нагнітання бурового розчину у свердловину  $p \in [1 \div 25]$  МПа.

Кількість термів, яка потрібна для фазифікації досліджуваних параметрів у межах допуску, визначена за формулою [19]:

$$m_i = 2 \left( \frac{\max x_i - \min x_i}{R_i} \right) + 1, \quad (1)$$

де  $\max x_i$ ,  $\min x_i$  – максимальне і мінімальне значення контрольованих параметрів  $Q$ ,  $p$ ,  $\gamma$ ;

$R_i$  – розмах контрольованого параметру, який визначається експериментально як різниця між найбільшим і найменшим значеннями контрольованого параметру за декілька вимірів (табл. 1).

Таблиця 1

**Розмахи контрольованих параметрів і необхідна кількість термів**

Контрольований параметр		Межа допустимих значень зведеної основної похибки вимірювання фізичної величини, %		Розмах відносно середнього значення контрольованого параметру	Необхідна кількість термів
назва параметру	верхня межа вимірювання	каналу вимірювання	каналу реєстрації		
Тиск нагнітання бурового розчину, МПа	19,45	± 1,5	± 2,0	$p_{\min} = 18,$ $p_{\max} = 20,$ $R_p = 0,66$	7
Витрата бурового розчину, $\text{дм}^3/\text{с}$	29,5	± 1,5	± 2,0	$Q_{\min} = 20,$ $Q_{\max} = 40,$ $R_Q = 7,2$	7

Враховуючи середні значення розмахів  $R_p = 0,66$  МПа,  $R_Q = 7,2$   $\text{дм}^3/\text{с}$ , що були визначені експериментально, а також нормальний закон розподілу функцій контрольованих параметрів у межах їх розмахів, вибрали функції належності трикутної форми і кількість термів 7. Перевагою трикутної форми є простота обчислень значень функції належності. Недоліком є порушення неперервної похідної у точці максимуму. Ансамбль функцій належності наведено на рис. 2.

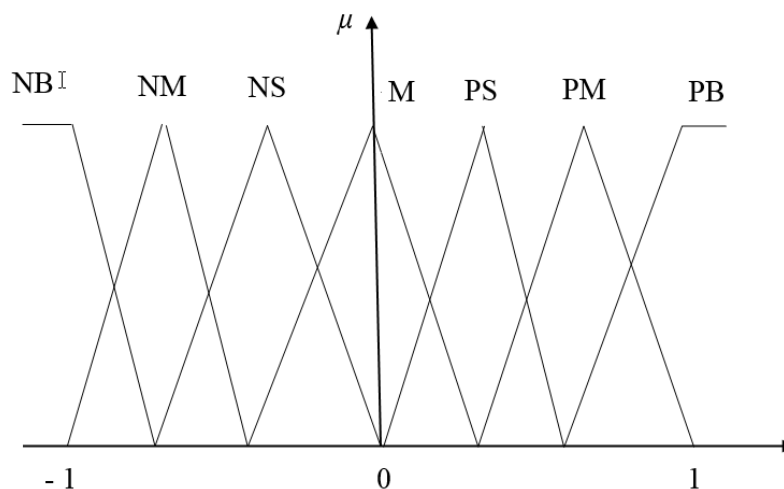


Рис. 2. Ансамбль функцій належності



В основу бази знань покладено набір вербальних висловлювань експерта. Правила регулюють взаємозв'язки даних фазифікації з даними логічної обробки і є чіткими висловлюваннями. Операції *if* (антецедент) *then* (консеквент) працюють з нечіткими даними. Тому, хоча правила і є чіткими, результат можна отримати тільки нечіткий. Набір логічних висловлювань, що були сформульовані експертами у вигляді правил Мамдані-типу, наприклад, R18: *if* ( $\gamma$  is NS) and ( $Q$  is M) then ( $p$  is PS), зведено у базу правил, що наведена у табл.2.

**Таблиця 2**

**Повна база правил Мамдані-типу для бурової насосної установки**

$p$		$Q$						
		NB	NM	NS	M	PS	PM	PB
$\gamma$	NB	PS	PS	M	NS	NS	NM	NB
	NM	PM	PM	PS	M	NS	NS	NM
	NS	PB	PM	PM	PS	M	NS	NS
	M	PB	PB	PM	PM	PS	M	NS
	PS	PB	PB	PB	PM	PM	PS	M
	PM	PB	PB	PB	PB	PM	PM	PS
	PB	PB	PB	PB	PB	PB	PB	PM

Множина значень лінгвістичних параметрів складається з семи термів: M – середнє, PS – позитивне мале (вище середнього), PM – позитивне середнє (велике), PB – позитивне велике (дуже велике), NS – негативне мале (нижче середнього), NM – негативне середнє (мале), NB – негативне велике (дуже мале).

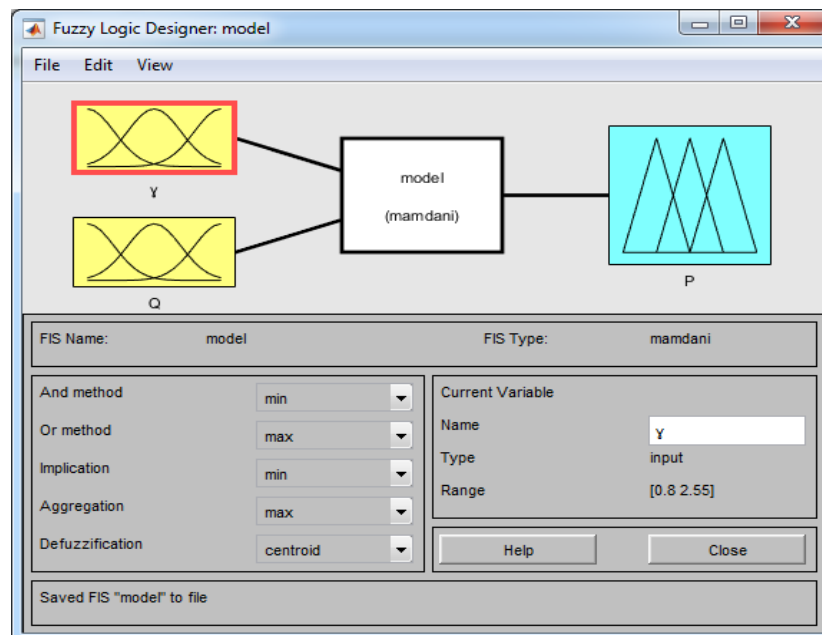
Отже, база правил Fuzzy-моделі бурової насосної установки використовує 49 локальних правил, які виражаються як кон'юнкції значень вхідних фаззі-параметрів  $Q, \gamma$ .

Для реалізації процесу нечіткого моделювання у середовищі Matlab скористаємося спеціальним пакетом розширення Fuzzy Logic Toolbox. Процес

розробки системи нечіткого виводу в інтерактивному режимі для бурової насосної установки містить такі послідовні дії:

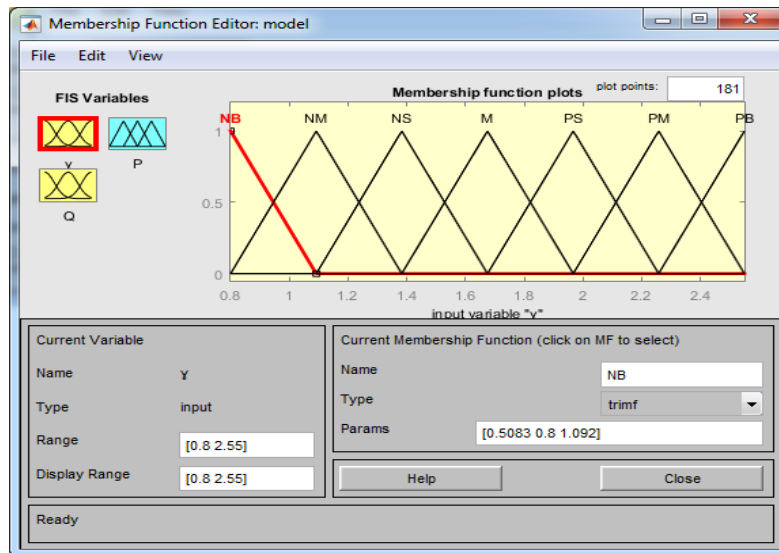
- викликати редактор системи нечіткого виводу FIS, для чого у вікні команд набрати ім'я відповідної функції fuzzy. Ця функція дає змогу задавати та редагувати на високому рівні властивості системи нечіткого виводу – число вхідних і вихідних змінних, тип системи нечіткого виводу, метод дифазифікації та ін.;

- після виконання команди fuzzy отримали графічний інтерфейс редактора Fuzzy Logic Designer: model (рис.3).



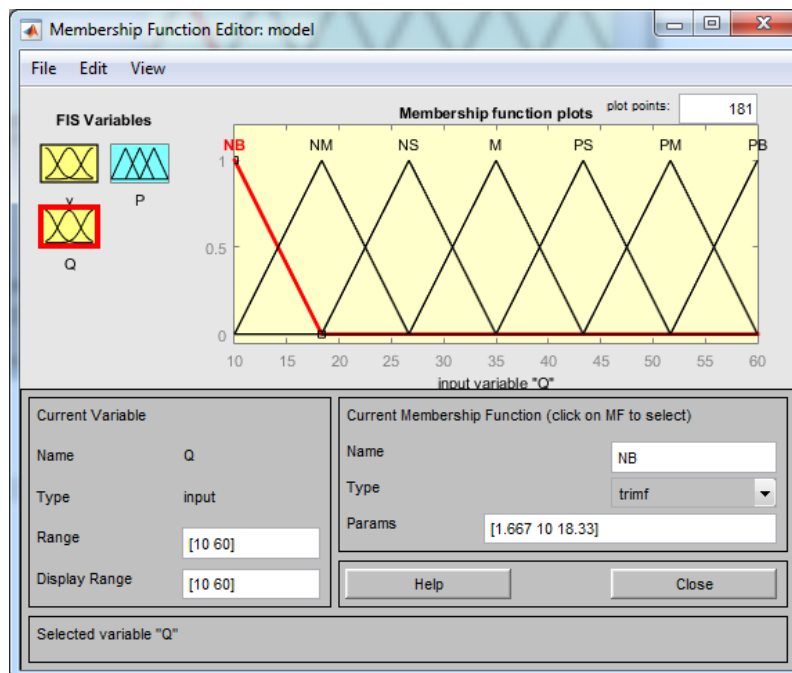
**Рис.3. Графічний інтерфейс редактора Fuzzy Logic Designer: model, що викликаний функцією fuzzy та команди меню Edit→Add Variable...>Input**

Для визначення термів вхідних і вихідних змінних нашої системи нечіткого виводу і їх функцій належності скористаємося редактором функцій належності для питомої ваги бурового розчину  $\gamma$  (рис. 4), витрати бурового розчину  $Q$  (рис.5) і тиску на вході у свердловину  $p$  (рис.6).



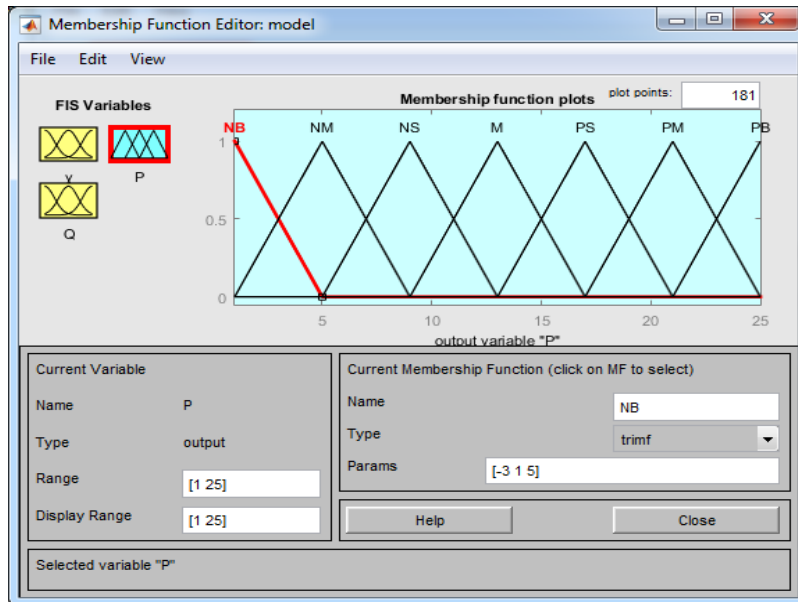
**Рис. 4. Графічний інтерфейс редактора функцій належності після завдання першої вхідної змінної «густина бурового розчину» для системи нечіткого виводу «МОДЕЛЬ»**

Для другої вхідної змінної залишаємо 7 термів.



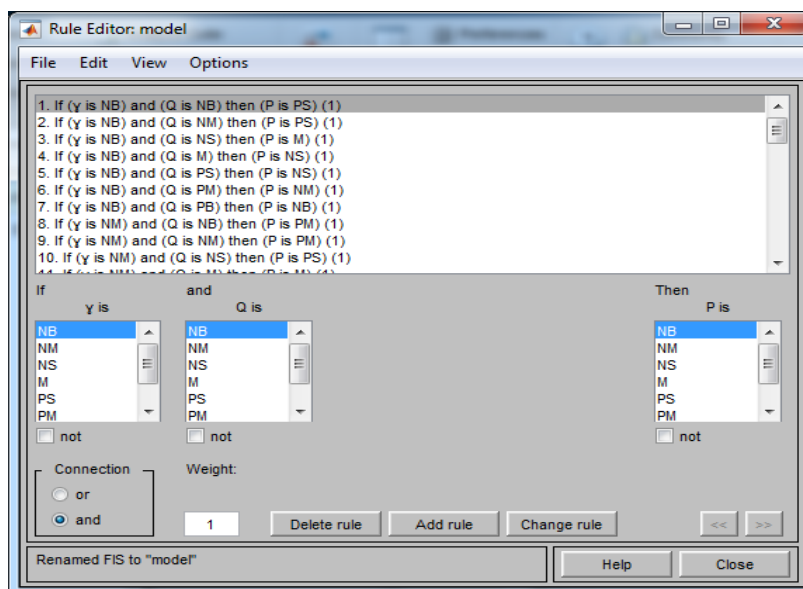
**Рис. 5. Графічний інтерфейс редактора функцій належності після завдання другої вхідної змінної «витрата бурового розчину»**

Для вхідної змінної «тиск на вході у свердловину» вибираємо також 7 термів і задаємо параметри відповідних функцій належності (рис. 6).



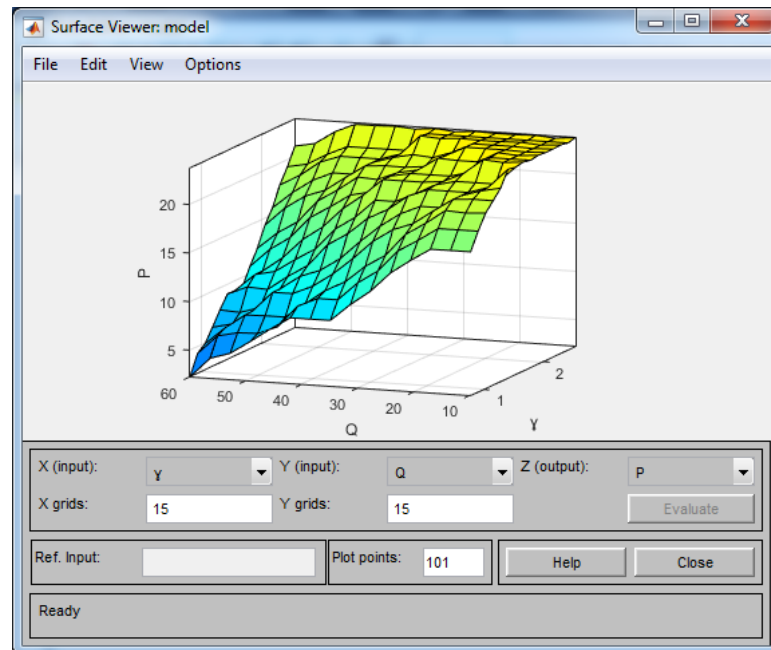
**Рис. 6. Графічний інтерфейс редактора функцій належності після завдання вихідної змінної «тиск на вході у свердловину» для системи нечіткого виводу «модель»**

Тепер задамо 49 правил для системи нечіткого виводу, що розробляється. Для цієї мети скористаємося редактором правил системи Matlab. Графічний інтерфейс редактора правил після завдання усіх 49 правил нечіткого виводу зображено на рис. 7.



**Рис. 7. Графічний інтерфейс редактора правил після завдання бази правил для системи нечіткого виводу «модель»**

Тепер виконаємо оцінку побудованої системи нечіткого виводу для задачі побудови моделі бурової насосної установки. Для загального аналізу розробленої нечіткої моделі побудуємо поверхню  $p(\gamma, Q)$  нечіткого виводу (рис. 8).



**Рис. 8. Візуальна поведінка нечіткого виводу для системи нечіткого виводу «МОДЕЛЬ»**

Дана поверхня нечіткого виводу дозволяє встановити залежність значення вихідної змінної  $p$  від значень вхідних змінних нечіткої моделі  $\gamma$  і  $Q$ . Вона є основою для програмованого контролера для реалізації відповідного алгоритму керування.

Заснована на базі правил Мамдані-типу статична Fuzzy-модель витрато-напірної характеристики бурової насосної установки дозволяє моделювати тиск на вході у свердловину для невідомих початкових умов і використовувати її для контролю тиску на вході у свердловину. Це важливо тому, що незадовільний режим подачі бурового розчину веде до того, що гідравлічний потік з неприпустимо великою енергією починає активно розмивати стінки свердловини.

Створення системи автоматичного керування бурової насосної установки дозволить усунути вказані недоліки. Задача керування витратою промивальної

рідини є підзадачею загальної проблеми оптимального керування процесом буріння нафтових і газових свердловин. В основу синтезу такої системи слід покласти залежність між гідравлічною потужністю бурового розчину на долото  $N_d$ , масою колони бурильних труб  $F_k$  і механічною швидкістю буріння  $V_m$  [20]. Наближено зв'язок між потужністю гідравлічного потоку на долоті  $N_d$  і усією потужністю гідравлічного потоку  $N_g$ , яку створює насосна установка, представлений у такому вигляді:

$$N_d = N_g - K_{gm} F_k, \quad (2)$$

де  $K_{gm}$  – коефіцієнт, що залежить від гідромеханічних властивостей бурового розчину.

Оскільки між  $N_d$  і  $V_m$  існує практично лінійна залежність [20], то з метою забезпечення квазіоптимального режиму подачі бурового розчину у свердловину слід стабілізувати різницю

$$er_{\text{ор}}(t) = N_d - K_m V_m \rightarrow 0, \quad (3)$$

де  $K_m$  – коефіцієнт зв'язку, який залежить від геометричних параметрів і механічних властивостей долота.

Оскільки величину  $N_d$  безпосередньо виміряти неможливо, то можна скористатися формулою (2) й оцінити  $N_g$  за формулою

$$N_d = K_n n_n p, \quad (4)$$

де  $K_n$  – коефіцієнт, що залежить від геометричних параметрів бурового насоса;

$n_n$  – частота обертання валу приводу бурового насоса;

$p$  – тиск бурового розчину на виході із насоса.

Отже, при відомому коефіцієнті  $K_{gm}$  (2) усі величини, від яких залежить  $N_d$ , можуть бути оцінені за допомогою відповідних давачів. Тоді

$$er_{\text{ор}}(t) = K_n n_n p(t) - K_{gm} F_k(t) - K_m V_m(t) = 0. \quad (5)$$

Закон керування має забезпечити з певною точністю виконання умов (5) і (3). Такий закон може бути реалізований ПІ-регулятором. Вхідним сигналом ПІ-регулятора є сигнал  $er_{\text{ор}}(t)$  (5). Стабілізація його  $er_{\text{ор}}(t) \equiv 0$  забезпечать близький до оптимального режим роботи системи керування буровою насосною установкою. Проте, спрощений оптимальний зв'язок (5) не враховує

у повній мірі усіх факторів, що впливають на оптимальну роботу таких систем. Тому слід додатково передбачити можливість роботи системи керування з мікропроцесором, який може більш повно вирішити задачу оптимізації.

Отже, оптимальний режим буріння досягається не тільки за рахунок оптимізації осьового зусилля на долото  $F$  та частоти обертання долота  $n$ , але й за рахунок оптимізації гідравлічної потужності на долоті  $N_d$ . При цьому процес буріння буде квазіоптимальним, якщо він відбувається при максимально допустимому навантаженні на долото  $F_{\max}$  або при  $(V_m)_{\max}$ , яка визначається гідравлічною потужністю на долоті  $N_d$  при зусиллях  $F$ , менших максимально допустимих.

Такий квазіоптимальний режим буріння можна реалізувати за допомогою адаптивної системи керування приводом бурової насосної установки і адаптивного регулятора подачі долота.

**Висновки.** Заснована на базі правил Мамдані-типу статична Fuzzy-модель бурової насосної установки інтерполює залежність між контрольними точками витрато-напірної характеристики бурової насосної установки, що дозволяє моделювати тиск на вході у свердловину для невідомих початкових умов і використовувати Fuzzy-модель як надлишковість на основі знань для вимірювання тиску.

FL може ефективно застосовуватися для синтезу Fuzzy-моделей, що описують процеси з суттєвою нелінійністю і високою динамічністю. Моделі на основі правил доцільно застосовувати як альтернативу або надлишковість до класичних аналітичних моделей для задач ідентифікації, оцінювання і контролю стану нелінійних процесів.

Література:

1. Elmgerbi A. Application of Computer Programming to Estimate Volumetric Change of an Active Drilling Fluid System Cause by Elastic Deformation of an Open, Borehole Section Wall / A. Elmgerbi, G. Thonhauser, M. Prohaska, A. Nascimento, A. Roohi // Global Journal of Computer Science and Technology, Volume 16, Issue 3, Version 1. – 2016. – P. 15-30. – Режим доступу:

<http://www.researchgate.net/publication/310604690>.

2. Суд И.И. Регулированный электропривод переменного тока буровых насосов / И.И.Суд. – М.: ВНИИОЭНГ, 1983. – 40 с.

3. Ловчев С.В. Системы электроприводов исполнительных механизмов современных буровых установок: [электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://forca.com.ua/knigi/obladnannya/sistemy-elektroprivodov-ispolnitelnyh-mehanizmov-sovremennyh-burovyh-ustanovomk-4.html>.

4. Yun W. Development construction of screw drill detection device in coal min / W. Yun. Y. K. Ping. W. J. Guo, W. Pu // Coal Mine Machinery. – 2012, Vol. 33. – No 10. – P. 140-142.

5. Thorogood I. Drilling automation: technologies, terminology and parallels with other industries / I.Thorogood, W.Aldread, F.Florence, F.Ivoisen // Paper SPE / IADC // 9884, presented at the / IADC Drilling Conference and Exhibition, Amsterdam, The Netherlands, 17-19 March, 2009. – P.1-9.

6. Yue Z.Q. Automatic monitoring of rotary-percussive drilling for ground characterization-illustrated by a case example in Hong Kong [J] / Z.Q. Yue, C.F.Lee, K.T.Law et al // Int J Rock Mech Min Sci. – No 41(4). – 2004. – P. 573-612.

7. Yang W.C. Research on performance test of screw drill / W.C.Yang, H.J.Qing, L.T.Ming // Drilling and Production. – 2010, Vol. 33. No. 1. – P. 73-75.

8. Holster I.L. Effect of Bit Hydraulic Horsepower on the Drilling Rate of a Polycrystalline Diamond Compact Bit / I.L.Holster, R.I.Kipp // I.Petroleum Technology. – №13, vol. 36. – 1984. – P. 2110-2118.

9. Гусман А. Управление очисткой забоя скважин при бурении шарошечными долотами / А.Гусман // Бурение и нефть, № 2. – 2005. – С.6-9.

10. Cayeux E. Early detection of drilling condition deterioration using real-time calibration of computer models: field example from north sea drilling operations / E.Cayeux, B. Daireaux; Paper SPE 1 19435 presented at the SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition. – Amsterdam, The Netherlands, 17-19 March. – 2009. – Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.2118/119435-MS>.

11. Livescu S. Mathematical modeling of thixotropic drilling mud and crude



oil flow in well sand pipelines / S.Livescu // Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol. 98-99. – 2012. – P. 174-184.

12. Gieen S. Full-scale Deep Well Drilling Simulation. / S. Green // Petroleum Drilling Technologies (Volume 39). – 2011, No. 3. – P. 1-5.

13. Fernander M., Ibanez D., Storey G. Significant Results on Field Trials Argentina at on Electronically Controlled Automatic Drilling System /M. Fernander D.Ibanez, G.Storey // SPE 94889 Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference, Rio de Janeiro, Brasil, 20-23 June. – 2005. – 4 p.

14. Lyons K. D. NETL Extreme Drilling Laboratory Studies High Pressure High Temperature Drilling Phenomena / K. D. Lyons, S. Honeygan, T. Mroz // Journal of Energy Resources Technology (Volume 130, Issue 4). – 2008, No. 043102. – P.1-4.

15. Proehl T. Drilling and Completion Gaps for HPHT Wells in Deep Water / 1. Proehl, F. Sabins // Deep Star Project CTR 7501. – 2006. – 1435-01-04 CT37258. - P. 5-8.

16. Jun G.X. An analysis of test equipment design for the downhole tool / G.X.Jun, Z.G.Xin, C.C.Hui // Oil Field Equipment. – 2007. – Vol. 36, No. 8. – P. 87-90.

17. Pieczynski A. Fuzzy modeling of multidimensional non-linear processes-tuning algorithms; proceedings 9<sup>th</sup> Zittau Fuzzy Colloquium 2001, 17-19 September 2001, Zittau Germany / A. Pieczynsk. – 2001. – P. 94-104.

18. Fadyeyeva I. Development of mathematical models for control of well-drilling process using fuzzy logic; proceedings 9<sup>th</sup> Zittau Fuzzy Colloquium 2001, 17-19 September 2001, Zittau Germany / I.Fadyeyeva, M. Wagenknecht. – 2001. – P. 127-139.

19. Федєєва О.В. Метод вибору кількості термів для нечіткого опису базових змінних в F-перетворенні параметрів і показників процесу буріння свердловин / О.В.Фадєєва, Г.Н.Семенцов // Вісник Хмельницького нац. ун-ту. – 2004. – № 4, ч. 1, том 1(68). – С. 30-35.

20. Лобанов В.А. Автоматизация технологических процессов /

В.А.Лобанов, А.В.Мнацаканов, Б.М.Мурадов, А.М.Шубладзе. – М.: ВНИИГазпром. – 1986. - 50 с.

**References:**

1. Elmgerbi A. Application of Computer Programming to Estimate Volumetric Change of an Active Drilling Fluid System Cause by Elastic Deformation of an Open, Borehole Section Wall / A. Elmgerbi, G. Thonhauser, M. Prohaska, A. Nascimento, A. Roohi // Global Journal of Computer Science and Technology, Volume 16, Issue 3, Version 1. – 2016. – P. 15-30. – Режим доступа: <http://www.researchgate.net/publication/310604690>.
2. Суд И.И. Регулированный электропривод переменного тока буровых насосов / И.И.Суд. – М.: ВНИИОЭНГ, 1983. – 40 с.
3. Ловчев С.В. Системы электроприводов исполнительных механизмов современных буровых установок: [электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://forca.com.ua/knigi/obladnannya/sistemy-elektroprivodov-ispolnitelnyh-mehanizmov-sovremennyh-burovyh-ustanovomk-4.html>.
4. Yun W. Development construction of screw drill detection device in coal min / W. Yun, Y. K. Ping, W. J. Guo, W. Pu // Coal Mine Machinery. – 2012, Vol. 33. – No 10. – P. 140-142.
5. Thorogood I. Drilling automation: technologies, terminology and parallels with other industries / I.Thorogood, W.Aldread, F.Florence, F.Ivoisen // Paper SPE / IADC // 9884, presented at the / IADC Drilling Conference and Exhibition, Amsterdam, The Netherlands, 17-19 March, 2009. – P.1-9.
6. Yue Z.Q. Automatic monitoring of rotary-percussive drilling for ground characterization-illustrated by a case example in Hong Kong [J] / Z.Q. Yue, C.F.Lee, K.T.Law et al // Int J Rock Mech Min Sci. – No 41(4). – 2004. – P. 573-612.
7. Yang W.C. Research on performance test of screw drill / W.C.Yang, H.J.Qing, L.T.Ming // Drilling and Production. – 2010, Vol. 33. No. 1. – P. 73-75.
8. Holster I.L. Effect of Bit Hydraulic Horsepower on the Drilling Rate of a Polycrystalline Diamond Compact Bit / I.L.Holster, R.I.Kipp // I.Petroleum Technology. – №13, vol. 36. – 1984. – P. 2110-2118.
9. Гусман А. Управление очисткой забоя скважин при бурении шарошечными долотами / А.Гусман // Бурение и нефть, № 2. – 2005. – С.6-9.
10. Cayeux E. Early detection of drilling condition deterioration using real-time calibration of computer models: field example from north sea drilling operations / E.Cayeux, B. Daireaux; Paper SPE 1 19435 presented at the SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition. – Amsterdam, The Netherlands, 17-19 March. – 2009. – Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.2118/119435-MS>.
11. Livescu S. Mathematical modeling of thixotropic drilling mud and crude oil flow in well sand pipelines / S.Livescu // Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol. 98-99. – 2012. – P. 174-184.
12. Gieen S. Full-scale Deep Well Drilling Simulation. / S. Green // Petroleum Drilling Technologies (Volume 39). – 2011, No. 3. – P. 1-5.
13. Fernander M., Ibanez D., Storey G. Significant Results on Field Trials Argentina at on Electronically Controlled Automatic Drilling System /M. Fernander D.Ibanez, G.Storey // SPE 94889 Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference, Rio de Janeiro, Brasil, 20-23 June. – 2005. – 4 p.
14. Lyons K. D. NETL Extreme Drilling Laboratory Studies High Pressure High Temperature Drilling Phenomena / K. D. Lyons, S. Honeygan, T. Mroz // Journal of Energy Resources Technology (Volume 130, Issue 4). – 2008, No. 043102. – P.1-4.
15. Proehl T. Drilling and Completion Gaps for HPHT Wells in Deep Water / I. Proehl, F. Sabins // Deep Star Project CTR 7501. – 2006. – 1435-01-04 CT37258. - P. 5-8.
16. Jun G.X. An analysis of test equipment design for the downhole tool / G.X.Jun, Z.G.Xin, C.C.Hui // Oil Field Equipment. – 2007. – Vol. 36, No. 8. – P. 87-90.
17. Pieczynski A. Fuzzy modeling of multidimensional non-linear processes-tuning

algorithms; proceedings 9th Zittau Fuzzy Colloquium 2001, 17-19 September 2001, Zittau Germany / A. Pieczynsk. – 2001. – P. 94-104.

18. Fadyeyeva I. Development of mathematical models for control of well-drilling process using fuzzy logic; proceedings 9th Zittau Fuzzy Colloquium 2001, 17-19 September 2001, Zittau Germany / I.Fadyeyeva, M. Wagenknecht. – 2001. – P. 127-139.

19. Федєєва О.В. Метод вибору кількості термів для нечіткого опису базових змінних в F-перетворені параметрів і показників процесу буріння свердловин / О.В.Фадєєва, Г.Н.Семенцов // Вісник Хмельницького нац. ун-ту. – 2004. – № 4, ч. 1, том 1(68). – С. 30-35.

20. Лобанов В.А. Автоматизация технологических процессов / В.А.Лобанов, А.В.Мнацаканов, Б.М.Мурадов, А.М.Шубладзе. – М.: ВНИИГазпром. – 1986. - 50 с.

**Abstract.** *Based on a holistic approach, we have developed a phenomenological Fuzzy model of a drilling rig as a multidimensional nonlinear control object that operates under uncertainty under the influence of noise. It is shown that the proposed model is a complement to the classic analytical model and its implementation will increase the efficiency of solving the problems of identification, evaluation and control in real time. The study concludes that based on the Mamdani-type rules, the static Fuzzy drilling rig model effectively interpolates the relationship between the drilling pump control points of the drilling rig, allowing simulated inlet well pressure for unknown Fuzzy wells to unknown start-ups. model as knowledge-based redundancy to control wellhead pressure.*

**Keywords:** *Fuzzy-modeling, multidimensional nonlinear process, drilling pump installation, flow- pressure characteristic, identification, estimation, control*

Статья отправлена: 09.10.2019 р.

© Семенцов Г.Н., Лагойда А.І., Зварич Г.Г.