

ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ НАФТИ І ГАЗУ

На правах рукопису

ДЕМЧИНА Микола Миколайович

УДК 681.518:662.248:004.89

СИСТЕМА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ
ПРИ ВИБОРІ ОПТИМАЛЬНИХ РЕЖИМНИХ ПАРАМЕТРІВ БУРІННЯ
НАФТОВИХ І ГАЗОВИХ СВЕРДЛОВИН

05.13.07 – автоматизація процесів керування

дисертація на здобуття наукового ступеня

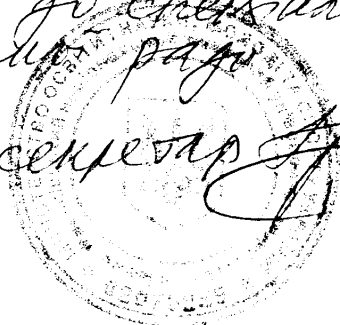
кандидата технічних наук

*Цей рукопис дисертації
ідекаційний за змістом
з іншими рукописами,
поданими до спеціального
файлу в мережі сайту
ДЗУ.052.03
Великий секретар*

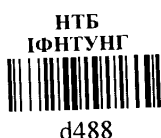
Науковий керівник:

ШЕКЕТА Василь Іванович

кандидат технічних наук, доцент



*М. Драмчук
29.05.2013*



Івано-Франківськ - 2013

d 488

ЗМІСТ

	Стор.
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ	4
ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1	
ОСОБЛИВОСТІ ІНТЕЛЕКТУАЛІЗАЦІЇ ПРОЦЕДУР ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ЩОДО ВИБОРУ ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМУ БУРІННЯ....	12
1.1. Характеристика об'єкта керування та аналіз режимних параметрів буріння нафтових і газових свердловин.....	12
1.2. Особливості застосування інтелектуальних систем в бурінні нафтових і газових свердловин і прийняття рішень на їх основі	24
1.3. Особливості оптимізації процесу буріння в реальному часі	33
1.4. Аналіз моделей прийняття рішень застосованих при виборі оптимальних значень режимних параметрів процесу буріння.....	42
1.5. Вибір та обґрунтування напрямку дослідження	49
РОЗДІЛ 2	
ФОРМАЛІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ВИДОБУВАННЯ ДАНИХ ТА ЗНАНЬ ДЛЯ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ПРИ ВИБОРІ РЕЖИМНИХ ПАРАМЕТРІВ БУРІННЯ.....	52
2.1. Структуризація процедур обробки та видобування даних про процес буріння.....	52
2.2. Побудова класифікації даних про процес буріння як основа керування механізмом прийняття рішень	60
2.3. Розширення базового способу класифікації режимів буріння на основі правил	67
2.4. Побудова абдуктивного фреймворку прийняття рішень при виборі значень режимних параметрів буріння	73
2.5. Застосування абдуктивного підходу виконання класифікації даних про режими буріння.....	81
Висновки до другого розділу	89

РОЗДІЛ 3**МОДЕЛЮВАННЯ ТА СТРУКТУРИЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ПРИ ВИБОРІ РЕЖИМНИХ ПАРАМЕТРІВ**

БУРІННЯ.....	91
3.1. Керування процесом підтримки прийняття рішень засобами інтелектуальної системи на основі нечіткої логіки	91
3.2. Реалізація формальних методів інтелектуального керування підтримкою прийняття рішень щодо вибору значень режимних параметрів на основі нечітких знань про процес буріння	96
3.3. Використання нечітких правил для подання знань в інтелектуальних системах підтримки прийняття рішень при бурінні нафтових і газових свердловин.....	107
3.4. Моделювання режимних параметрів на основі фреймово-продукційного підходу	114
3.5. Аналіз технологічних умов процесу буріння для створення модуля інтелектуальної підтримки прийняття рішень	120
Висновки до третього розділу	127

РОЗДІЛ 4**РОЗРОБКА СИСТЕМИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ПРИ ВИБОРІ ОПТИМАЛЬНИХ**

РЕЖИМНИХ ПАРАМЕТРІВ БУРІННЯ.....	129
4.1. Особливості застосування систем підтримки прийняття рішень в процесі буріння.....	129
4.2. Оцінка застосовності методів експертних систем при побудові інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень в процесі буріння.....	136
4.3. Розробка методики прийняття оптимальних рішень в процесі буріння нафтових і газових свердловин на основі функцій доцільності.....	143
4.4. Оцінка функціональності проекрованої моделі інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень в процесі буріння	155
Висновки до четвертого розділу	167

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	169
-------------------------------	------------

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	172
---	------------

ДОДАТКИ	188
----------------------	------------

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ

АСК – автоматизована система керування;

БЗ – база знань;

ЕС – експертна система;

ППР – підтримка прийняття рішень;

СППР – система інтелектуальної підтримки прийняття рішень;

СППР – система підтримки прийняття рішень;

СУБД – система управління базами даних;

ТП – технологічний процес;

ACL – концепція абдуктивного навчання (для абдуктивних фреймворків);

CSP – проблема задоволення обмежень;

WITS – специфікація для передачі даних з бурової площадки;

WITSMML – мова розмітки специфікації для передачі даних з бурової площадки;

\forall – квантор загальності «для всіх», «для будь-яких»;

\exists – квантор існування «існує»;

\in, \notin – “належить”, “не належить” відповідно;

\vee – логічна операція «АБО», диз’юнкція;

\wedge – логічна операція «І», кон’юнкція;

\cup – операція “об’єднання” множин;

\cap – операція “перетину” множин;

\Rightarrow – логічна імплікація, «слідування»;

\Leftrightarrow – логічна еквівалентність, «еквіваленція»;

\subset, \subseteq – підмножина, власна підмножина відповідно;

\supset, \supseteq – надмножина, власна надмножина відповідно;

\times – декартів добуток;

$|=$ – відношення наслідування.

ВСТУП

Актуальність теми. Автоматизовані системи керування технологічним процесом буріння нафтових і газових свердловин здійснюють реалізацію впливів на об'єкт керування в реальному часі. Однією з найбільш важливих складових даних систем є вироблення рішень з керування в умовах складності, невизначеності та нестационарності технологічного процесу буріння з точки зору забезпечення їх оптимальності та ефективності, що в свою чергу є визначальним фактором щодо часу та вартості буріння окремих свердловин, розробки родовищ та нафтогазоносних районів тощо. Основним завданням з точки зору прийняття ефективних та оптимальних рішень, опираючись на функціональність комплексних систем автоматизованого керування технологічним процесом буріння нафтових і газових свердловин з розвинутими програмно-апаратними функціями, є контроль основних показників технологічного процесу, в тому числі шляхом введення відповідних цільових функцій.

У даний час при бурінні в нафтогазопромислових районах України прийняття рішень в значній мірі здійснюється самими операторами-бурильниками в більшості випадків на інтуїтивному рівні, базуючись на власному досвіді та професійних навичках, що не завжди відповідає фактичному рівню складності, невизначеності та нечіткості, що характеризує процес буріння в цілому.

Враховуючи особливості процесу буріння нафтових і газових свердловин та необхідність прийняття ефективних і оптимальних технологічних рішень, побудова систем інтелектуальної підтримки прийняття керуючих рішень, орієнтованих на досягнення оптимальності та максимальної ефективності технологічного процесу, є актуальною науково-практичною задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Вибраний напрям досліджень є складовою частиною тематичного плану кафедри програмного забезпечення автоматизованих систем Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу (ІФНТУНГ). Тематика

роботи є частиною планових науково-дослідних робіт із розвитку нафтогазового комплексу України та базується на результатах виконання науково-дослідних тем: «Розробка теоретичних та прикладних концепцій застосування сучасних інформаційних технологій в нафтогазовій галузі» 2008-2012 рр. (затв. Науковою радою ІФНТУНГ протокол № 3/48 від 08.09.2008р.); «Синтез комп'ютерних систем та розробка програмного забезпечення для об'єктів нафтогазового комплексу» (номер державної реєстрації 0111U005890).

У вищеназваних темах НДР автор був безпосереднім виконавцем робіт щодо розробки формальних моделей інтелектуальних методів системи підтримки прийняття ефективних та оптимальних рішень в процесі буріння нафтових і газових свердловин.

Мета і задачі дослідження. Метою даної роботи є розроблення методу та системи інтелектуальної підтримки прийняття рішень при виборі оптимальних режимних параметрів буріння нафтових і газових свердловин.

Досягнення вказаної мети забезпечується в дисертаційній роботі шляхом розв'язання таких взаємопов'язаних задач:

1) аналіз особливостей інтелектуалізації процедур прийняття оптимізаційних рішень в процесі буріння нафтових і газових свердловин, аналіз застосувань експертних систем в бурінні нафтових і газових свердловин, аналіз видів та способів вибору оптимальних режимних параметрів;

2) формалізація постановки задачі моделювання інтелектуальної підтримки прийняття рішень при виборі режимних параметрів буріння на основі побудови абдуктивного фреймворку з ваговими коефіцієнтами;

3) обґрунтування та дослідження технології інтелектуальної підтримки прийняття рішень при виборі режимних параметрів буріння в формі правил в умовах невизначеності;

4) побудова формальної структури функціонування системи підтримки прийняття рішень при виборі режимних параметрів буріння, шляхом виділення множин керованих, некерованих, збурюючих та вихідних технологічних параметрів;

5) розробка формального механізму прийняття оптимальних рішень в процесі буріння нафтових і газових свердловин на основі оперування з цільовими функціями обчислення доцільностей вихідних технологічних параметрів;

6) реалізація системи інтелектуальної підтримки прийняття рішень при виборі оптимальних режимних параметрів в процесі буріння нафтових і газових свердловин;

7) розробка методики інтелектуальної підтримки прийняття рішень щодо вибору оптимальних режимних параметрів буріння на основі цільових функцій і промислова апробація результатів дослідження.

Об'єктом дослідження є нестационарний технологічний процес буріння нафтових і газових свердловин, який супроводжується необхідністю прийняття ефективних та оптимальних рішень в умовах невизначеності.

Предметом дослідження є системи інтелектуальної підтримки прийняття рішень при виборі режимних параметрів буріння нафтових і газових свердловин на основі цільових функцій обчислення доцільностей вихідних технологічних параметрів в умовах невизначеності.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених задач у роботі проведені теоретичні дослідження з використанням методів порівняльного аналізу, систематизації й узагальнення (для аналізу автоматизованих систем керування процесом буріння, структури прийняття рішень); системного підходу (для визначення сутності ефективності та оптимальності рішень); формально-логічних досліджень із використанням базового апарату на основі предикатної логіки; методів теорії множин (для моделювання функціональності складових системи); методів нечітких множин і теорії ймовірності; методів математичної статистики (для оцінки характеристик рішень, що приймаються).

Наукова новизна одержаних результатів полягає в розвитку та поглибленні методологічних підходів щодо вибору оптимальних режимних параметрів буріння нафтових і газових свердловин шляхом введення цільових функцій обчислення доцільностей вихідних технологічних параметрів та визначається наступними науковими результатами:

вперше:

– представлено формальну модель процесу інтелектуальної підтримки прийняття рішень при виборі оптимальних режимних параметрів буріння нафтових і газових свердловин, в основу якої покладено абдуктивний фреймворк знань про режими буріння, в якому виражені в формі чітких, нечітких та ймовірнісних правил розподіли значень керованих змінних технологічного процесу;

– обґрунтовано технологію інтелектуальної підтримки прийняття рішень при виборі оптимальних режимних параметрів буріння на основі знань експертів технологічного процесу, які представлені в базах знань в формі чітких, нечітких та ймовірнісних правил, що дозволяє оперувати з множинами вихідних технологічних параметрів та їх доцільностями;

– побудовано формальну оптимізаційну модель, яка зводиться до оптимізації цільових функцій, що описують множини керованих та вихідних технологічних параметрів в процесі інтелектуальної підтримки прийняття рішень при виборі оптимальних режимних параметрів буріння шляхом оптимізації значень керованих параметрів;

– створено формальний механізм оперування з цільовими функціями обчислення доцільностей вихідних технологічних параметрів як основи інтелектуальної підтримки прийняття рішень при встановленні значень керованих параметрів процесу буріння при виборі оптимальних режимних параметрів, що дозволяє поєднувати невизначеності та доцільності в процесі побудови оптимального рішення з максимальною очікуваною доцільністю;

отримали подальший розвиток методи інтелектуалізації прийняття оптимізаційних рішень та систем інтелектуальної підтримки прийняття рішень в процесі буріння, підходи до побудови комплексних критеріїв оптимізації в процесі буріння, підходи до вибору оптимальних режимних параметрів процесу буріння на основі нових способів оцінки та контролю вихідних технологічних параметрів.

Практичне значення отриманих результатів дисертаційної роботи полягає в тому, що розроблені моделі, методи та методики, а також алгоритмічне та програмне забезпечення, побудоване на їх основі, дають змогу вирішувати задачі прийняття ефективних та оптимальних рішень в процесі буріння, що відповідно підтвердило свою ефективність під час тестування отриманої системи інтелектуальної підтримки прийняття рішень на фактичних даних Охтирського та Прикарпатського УБР ПАТ «Укрнафта» періоду 2008-2011 років.

Розроблена система та рекомендації з її використання, прийняті до впровадження відділом АСУ ТП підприємства «МІКРОЛ» як прототип модуля візуалізації процесу підтримки прийняття ефективних та оптимальних технологічних рішень на основі цільових функцій у SCADA-системах (акт від 15.02.2013 р.) і ПАТ «Укрнафта» (акт від 13.03.2013 р.). Результати досліджень упроваджені в навчальний процес кафедри програмного забезпечення автоматизованих систем ІФНТУНГ (акт від 15.03.2013 р.) для студентів напряму підготовки 6.050103 – Програмна інженерія в дисципліні «Методологічні основи наукових досліджень в нафтогазовій галузі» та спеціальності 8.05010301 – Програмне забезпечення систем у дисципліні «Математичні методи аналізу алгоритмів».

Особистий внесок здобувача. Основні положення та результати дисертаційної роботи, які виносяться на захист, одержані автором особисто. У роботах, написаних у співавторстві, дисертанту належать: у роботі [1] – спосіб інтелектуалізації процедур контролю знань; [2] – ідея інтерпретації даних та знань в формі документів в інтелектуальних системах; [3] – методологія інтерпретації даних та знань про нафтогазові об'єкти; [4] – представлення структури баз даних і баз знань в інтелектуальних системах; [5] – структура моделі нафтогазової предметної області на основі фреймово-продукційного підходу; [6] – структура та опис процесів інтелектуалізації керування на основі нечітких знань про нафтогазові об'єкти; [9] – методика представлення характеристик знань в формі баз знань; [10] – методологія застосування експертних систем в області контролю знань; [11] – інтерпретація механізму

модифікації запитів до структури дистанційного навчання; [12] – опис особливостей фреймового підходу до побудови інтелектуальних методів контролю знань; [15] – методологія структуризації параметрів; [16] – методологія розподілу обмежень по фізичних параметрах технологічного процесу; [17] – визначення складових процесу інтелектуальної обробки даних про нафтогазові об'єкти та побудова їх релевантних описів; [18] – введення підходу класифікації нафтогазових об'єктів на основі шаблонів правил; [19] – представлення структури управління процесом інтерпретації нафтогазових об'єктів на основі нечітких моделей; [20] – визначення описів нечітких методів та моделей управління в інтелектуальних системах нафтогазової предметної області; [22] – опис структури інтелектуального програмного забезпечення контролю знань.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідались, обговорювались і отримали позитивну оцінку на: XVI всеукраїнській науковій конференції «Сучасні проблеми прикладної математики та інформатики СППМІ-2009» (Львів, 2009 р.); IV міжнародній науково-технічній конференції «Комп'ютерні науки та інформаційні технології CSIT-2009» (Львів, 2009 р.); VI міжнародній конференції «Теоретичні та прикладні аспекти побудови програмних систем» (Київ, 2009 р.); X міжнародній конференції «TCSET-2010» (Львів-Славське, 2010 р.); I міжнародній науково-технічній конференції «Обчислювальний інтелект (результати, проблеми, перспективи) CI-2011» (Черкаси, 2011 р.); міжнародній науково-технічній конференції «Системний аналіз та інформаційні технології SAIT-2011» (Київ, 2011 р.); III науково-практичній конференції студентів і молодих учених «Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання» (Івано-Франківськ, 2011 р.); VI міжнародній науково-технічній конференції і виставці «Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання» (Івано-Франківськ, 2011 р.); I міжнародній науковій конференції «Інформація, комунікація, суспільство ICS-2012» (Львів, 2012 р.); XII міжнародній науковій конференції ім. Т.А. Таран

«Інтелектуальний аналіз інформації ІАІ-2012» (Київ, 2012 р.); XII міжнародній науково-практичній конференції «Математичне та імітаційне моделювання систем МОДС-2012» (Чернігів-Жукин, 2012 р.); XI міжнародній конференції «Контроль і управління в складних системах КУСС-2012» (Вінниця, 2012 р.); X ювілейній міжнародній науково-практичній конференції «Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем» (Дніпропетровськ, 2012 р.).

Публікації. Основні результати дисертації викладені у 22 публікаціях: 8 статтях (із них 2 одноосібні) у фахових виданнях та 14 публікаціях (із них 3 одноосібні) у збірниках праць Міжнародних та Всеукраїнських науково-технічних і науково-методичних конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг дисертації складає 238 сторінок, із них 171 сторінка основного тексту, що включає 49 рисунків і 6 таблиць. Список використаних джерел налічує 163 найменування на 16 сторінках, 8 додатків на 51 сторінці.

РОЗДІЛ 1

ОСОБЛИВОСТІ ІНТЕЛЕКТУАЛІЗАЦІЇ ПРОЦЕДУР ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ЩОДО ВИБОРУ ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМУ БУРІННЯ

1.1. Характеристика об'єкта керування та аналіз режимних параметрів буріння нафтових і газових свердловин

Як показують дослідження в даній області [1-7], процес буріння є слабо вивченим складним стохастичним нелінійним процесом, що розвивається у часі і функціонує за умов апріорної та поточної невизначеності щодо структури і параметрів об'єкта під впливом невідомих зовнішніх збурень – фізико-механічних властивостей гірських порід (густина, пористість, об'ємна маса, міцність, пружність, пластичність, повзучість, релаксація напружень та ін.), абразивності порід, пластових тисків, температури тощо. Окрім цього, нелінійності змінюються з глибиною. Для контролю зовнішніх апріорі невідомих збурень, що належать до класу сигнальних невизначеностей і використання їх для задач управління використовуються методи хаос-динаміки, штучні нейронні мережі, теорія фракталів, теорія нечітких виведень, генетичні алгоритми тощо. Для вирішення подібних проблем, які пов'язані з аналізом великих обсягів об'єктивної і суб'єктивної інформації, сформувалася низка підходів, які об'єднані під загальною назвою «інтелектуальний аналіз даних» [8-12], одним із найважливіших напрямків якого є аналіз даних із схожих, подібних джерел, що має місце в умовах буріння на рівні нафтогазоносних районів, родовищ, свердловин та інтервалів.

На сьогоднішній день однією з найбільш актуальних задач в області роторного буріння є задача оптимізації [2, 4, 5, 13, 14], що базується на певних алгоритмах та програмах, які потребують нагромадження інформації. Такі дані представляються у формі баз даних (добре структурованих, слабо структурованих, неструктурованих), або в формі відповідних репозиторіїв та сховищ даних, які постійно оновлюються новими даними, в тому числі тими, що отримуються з віддалених давачів, що визначає особливість сучасних

рішень в даній області, зокрема можливість віддаленого керування технологічним процесом [15, 16].

Проблемам оптимізації процесу буріння нафтових і газових свердловин присвячено теоретичні та прикладні дослідження таких вітчизняних та зарубіжних вчених як Г. Н. Семенцов, М. І. Горбійчук, М. А. Мислюк, А. І. Волобуєв, В. Б. Кропивницька, А. А. Погарський, Р. М. Ейгелес, Е. А. Козловський, Г. Д. Бревдо, Н. Б. Ситніков, Ю. А. Пешалов, Ю. Ф. Алексєєв, А. І. Співак, В. А. Бражніков, В. К. Маурер (США), І. М. Галлі (США), Г. Б. Вудс (США), А. Т. Боургойн (США), Ф. С. Йоунг (США) та ін. Результати даних досліджень дозволяють розглядати процес вибору оптимальних режимних параметрів буріння як вибір кращого значення змінної з групи наборів даних, що на практиці зводиться до мінімізації або максимізації певної цільової функції. Проте, як показує промисловий досвід, зниження вартості буріння свердловин на основі застосування оптимізаційних технік можливе тільки у випадку нагромадження статистичних даних про процес буріння з попередніх свердловин із схожими техніко-економічними показниками.

Згідно означень наведених в [2, 17, 18, 19] під режимом буріння розуміють певне поєднання керованих параметрів (що оцінюються суб'єктивно), які визначають швидкість та вартість проходки конкретного інтервалу гірських порід, впливають на ефективність роботи долота (його зношення), руйнування гірської породи і якими можна керувати в процесі буріння. При цьому, розглядуваний неперервний інтервал буріння (режимна пачка, пачка однакової буримості) характеризується сталими геолого-технічними умовами.

Факторами, що впливають на режим буріння є тип бурового долота, режим роботи долота та спосіб його обертання.

Під оптимальним режимом буріння розуміють таке поєднання режимних параметрів, що забезпечує найкращі показники поглиблення свердловини, найбільш високу ефективність бурового долота і задовільну якість бурових робіт в цілому при наявному обладнанні. Також оптимальний режим буріння забезпечуватиме найкращі техніко-економічні показники при заданих умовах

буріння. Визначення оптимального режиму буріння залежить від геологічних умов та характеристик обладнання.

Під раціональним режимом буріння розуміють такий режим при якому забезпечуються найкращі значення одного або кількох показників (параметрів) при заданій конфігурації обладнання.

Під форсованим режимом буріння розуміють режим, що дає збільшення швидкості буріння, шляхом збільшення швидкості обертання долота або осьового зусилля на нього, що в кінцевому підсумку сприяє зростанню механічної швидкості буріння.

Під швидкісним режимом буріння розуміють режим, що інтенсифікує руйнування породи шляхом збільшення швидкості обертання бурового долота.

Під силовим режимом буріння розуміють режим при якому інтенсифікація руйнування породи досягається внаслідок збільшення осьового зусилля на долото.

Під спеціальним режимом буріння розуміють режим, що забезпечує виконання спеціальних операцій: встановлення кута нахилу стовбура свердловини, попередження та мінімізація викривлень стовбура свердловини, відбір керну та максимізація його виходу, аварійні роботи в свердловині, проводка свердловини через поглинаючі пласти, забезпечення якості розробки продуктивних пластів і т. д.

По частоті обертання виділяють наступні режими роботи бурового долота: низькооборотне буріння, середньооборотне буріння і високооборотне буріння.

За способом буріння виділяють також режими роторного буріння, турбінного буріння і буріння з електробуром.

Режими буріння визначаються факторами, що називаються параметрами режиму буріння.

Як параметри режиму буріння [2, 20, 21] виділяють: 1) осьове зусилля на долото (G); 2) частоту обертання бурового долота (n); 3) розхід промивної рідини (Q) та параметри, що характеризують її властивості.

Вплив кожного з виділених параметрів режиму буріння на ефективність руйнування гірських порід є індивідуальним, причому вплив кожного

конкретного параметра може залежати від рівнів встановлених значень іншого або інших параметрів.

Режим роботи долота визначається наступними параметрами: 1) осьове зусилля на бурове долото; 2) частота обертання бурового долота; 3) кількість промивної рідини, що подається на вибій свердловини. На процес руйнування гірської породи впливають також склад і параметри бурових розчинів які проектуються у відповідності з геологічними умовами.

Розрахунок параметрів режиму буріння виконується для конкретної гірської породи, типу долота і способу буріння.

Застосовують наступні основні методи проектування режимів буріння [22, 23]: статистичний, аналітичний та метод перерахунку.

При статистичному методі показники відпрацювання доліт опрацьовують в контексті співставлення геологічних, технічних і технологічних умов та виділяють інтервали з однаковою буримістю. В результаті досягається основна ціль, що полягає у виявленні ефективних режимів буріння. Основним недоліком даного методу є висока ресурсна ємність і залежність від рівня освоєння родовища. Таким чином, характеристика режиму буріння в термінах «кращий», «оптимальний» є дискретною, прив'язаною до часу, умов, технологій та технік буріння. На практиці застосування методу статистичного проектування режиму буріння виконується по певних інтервалах, а також з метою порівняння результатів. Таким чином, в промислових умовах амплітуду шуканого параметру визначають деяким середнім значенням, як правило без статистичних вибірок та критеріїв оцінки достовірності.

При застосуванні аналітичного методу проектування необхідні дані розвідувального буріння, що описують фізичні властивості гірських порід, а також характеристики доліт, що будуть використовуватися. Також аналітичний метод проектування вимагає дослідження залежностей середньої механічної швидкості проходки від осьового зусилля на долото, частоти його обертання та характеристик довговічності долота. Виділені аналітичні залежності прив'язуються до інтервалів порід із схожими механічними властивостями та буримістю при визначеному типі доліт.

Метод перерахунку застосовується коли здійснюється перехід на нові типи доліт при умові, що попередній режим буріння був найбільш ефективним. Такі оцінки задаються для родовища або інтервалу. Слід також приймати до уваги, що в даному випадку рейсова швидкість буріння повинна в більшій мірі залежати від механічної швидкості буріння чим від проходки на долото.

Основна проблема при проектуванні режиму буріння полягає в тому, що фізико-механічні властивості гірських порід є надто відмінними, тому очевидно складно побудувати деякі універсальні методи проектування, що зумовлює та обґрунтовує доцільність застосування саме статистичного методу та обчислень на основі емпіричних залежностей.

Таким чином, вибір методу проектування режиму буріння слід виконувати шляхом співставлення різних умов буріння.

В більшості випадків формулювання проблеми оптимізації та вибору критеріїв оптимізації стосовно режимів буріння зводиться до проблеми покращення техніко-економічних показників буріння, шляхом вибору долота та режимів його роботи [6, 19, 24].

Прийняття рішень щодо оптимізації в даному випадку базується на знаходженні екстремумів для показників роботи долота. Показники роботи долота в загальному випадку, це проходка на долото, механічна швидкість буріння, рейсова швидкість буріння. Таким чином, для досягнення оптимальності необхідно максимізувати дані показники. У випадку використання як критерію вартості метра проходки критерій оптимізації полягатиме в його мінімізації.

Оскільки встановлюються обмеження на величини критеріїв, то необхідне їх комплексне застосування, наприклад, максимізація рейсової швидкості буріння при встановленій плановій вартості метра проходки, або мінімізація вартості метра проходки при заданій рейсовій швидкості.

Ефективність процесу буріння з механічної та економічної точок зору характеризується такими параметрами як проходка на долото за рейс, рейсова швидкість буріння, вартість метра проходки. Важливо, що дані показники ефективності розраховуються на основі відомих формул, що включають в себе

швидкість механічної проходки та експериментально встановлені залежності зношення долота з параметрами режиму буріння.

Отже, оптимізація режиму буріння полягатиме в підборі режиму згідно заданих умов, для якого параметр, що оптимізується набуває екстремуму [7].

Основна проблема полягає в тому, що при проектуванні режимно-технологічної програми буріння в багатьох випадках неможливо попередньо опрацювати кернавий матеріал геологічних розрізів, тим більше, що такі розрізи теж не є однорідними. Таким чином, необхідні методи розрахунку і оптимізації процесу буріння по всьому розрізу з відповідно мінімальною кількістю тестувань.

Для розрахунку показників ефективності процесу буріння приймається, що швидкість проходки є постійною і дорівнює початковій швидкості. Час роботи долота на вибої визначається стійкістю опори або зміною пачки гірської породи, що вимагатиме заміни долота. Таким чином, час роботи долота залежатиме від параметрів режиму буріння.

Важливо також, що при виборі оптимального варіанту режиму буріння необхідне співставлення даних по показниках буріння. Таке співставлення виконується з врахуванням способів і цілей буріння, а також типу бурового обладнання.

Одним із способів отримання закономірностей зміни часу роботи доліт від виділених параметрів режиму буріння є математична обробка промислової інформації щодо відробки бурових доліт. Важливо також, що існуючі математичні моделі процесу буріння [25-28] явно не зв'язуються обмеженнями щодо режимних параметрів. Тому для проведення процесу оптимізації необхідна наявність залежностей (в тому числі графічних) проходки на долото, рейсової швидкості та вартості метра проходки від осьового зусилля на долото та частоти його обертання, що розраховуються на основі математичних моделей, які будуються на снові емпіричних рівнянь зношення бурових доліт.

Таким чином, оптимізація бурового процесу може виконуватися для набору «долото-порода» при заданих умовах буріння.

В роботі [29] відмічається, що, якщо як оптимальний розглядати режим,

який забезпечує екстремум значення оптимізованого показника буріння, то слід вказувати також набір кількісних параметрів для даного режиму, що складно описується у випадку, наприклад, промивної рідини. Тому вважається, що гідравлічна програма буріння є надто складною для її включення в задачу оптимізації режиму буріння. Оскільки в рапорті бурового майстра фіксується більше десяти кількісних показників системи промивки. Таким чином, вирішення такої багатофакторної задачі оптимізації є надскладним завданням.

Тому на практиці визначають оптимальну комбінацію осьового зусилля на бурове долото і швидкості його обертання для заданих умов промивання. При цьому важливо, що пошук такої комбінації виконується на різних варіантах програми промивання в рамках накладених обмежень.

При виборі типу бурового долота виконується порівняння результатів їх роботи при оптимальному поєднанні осьового зусилля і швидкості обертання для кожного із них. Таким чином, вважається доцільним розглядати в рамках режиму буріння два виділені параметри як незалежні один від одного.

Важливим питанням є питання прив'язки виділених режимних параметрів (осьове зусилля та швидкість обертання бурового долота) до змінної часу. Іншими словами, чи слід динамічно підтримувати оптимальні значення даних режимних параметрів, чи встановити їх як сталі на весь часовий проміжок в якому виконується буріння, що безумовно призводитиме до відхилення режиму буріння від оптимальності в зв'язку з геологічною неоднорідністю в розрізі свердловини, яка полягає в зміні властивостей гірських порід і умов взаємодії долота з породою. Крім того, слід враховувати зношення долота та опор, що впливає на динамічну характеристику цілої системи.

Також, в просторі пошуку оптимальних значень виділених параметрів накладаються певні обмеження пов'язані з технологічними регламентами та обладнанням. Таким чином, якщо формулювати задачу динамічного підбору оптимальних значень параметрів режиму буріння, то слід виходити з припущення щодо взаємозв'язку між швидкістю проходки та інтенсивністю зношення долота з одного боку і проходкою, рейсовою швидкістю та вартістю метра проходки з іншого боку. Дану задачу можна вирішити шляхом інтеграції

всіх емпіричних рівнянь процесу буріння.

Другою важливою проблемою є прив'язка процесу буріння до визначеного способу. Зокрема при турбінному бурінні існує взаємозв'язок між осьовим зусиллям на бурове долото та швидкістю його обертання. В той же час при роторному бурінні такої залежності не існує і тому невідомо, при якій саме швидкості обертання долота слід шукати оптимальне зусилля на нього. В даному випадку задача пошуку перестає бути лінійною і вимагає неперервної зміни обох керованих режимних параметрів.

Отже, в дослідженнях [30-32] процес буріння розглядається при сталих режимних параметрах, значення яких можуть коректуватися, але швидше в порядку винятку, чим в порядку регулярності перебігу технологічного процесу. Тобто, в такому підході режим буріння встановлюється на етапі розробки проекту будівництва свердловини.

Таким чином, з формальної точки зору оптимальний режим буріння слід визначати в області можливої зміни виділених параметрів, а саме, мінімальна швидкість обертання долота обмежується характеристикою роторного приводу. Відповідно, максимальне зусилля в області роторного буріння визначається міцністю конструкції долота і стійкістю бурової установки. Нижня границя осьового зусилля на бурове долото при бурінні порід даного типу встановлюється виходячи з того, щоб процес руйнування не відбувався шляхом стирання гірської породи.

Математичні моделі процесу буріння при використанні емпіричних рівнянь, що описують зношення долота дозволяють для кожного поєднання «долото-порода» при заданих умовах буріння розрахувати залежність вартості метра проходки від режимних параметрів G та n .

Математична модель процесу буріння представляє цінність коли є можливість лабораторного дослідження керну з метою отримання механічних характеристик по розрізу гірської породи. Такі лабораторні розрахунки проводяться для ділянок розрізу протяжністю не менше середньої проходки на долото.

Проходка на долото залежить від швидкості руйнування породи і

тривалості роботи долота на вибої свердловини. Таким чином, зміна параметрів режиму буріння впливає на інтенсивність відпрацювання бурового долота, а зношення бурового долота призводить до зменшення механічної швидкості проходки [45-47].

Підсумовуючи вище сказане можна бачити, що як основні критерії оптимізації буріння [2, 4, 13, 17, 19, 21, 33, 34] виділяються: 1) мінімізація вартості одного метра проходки свердловини; 2) максимізація механічної і рейсової швидкостей. Важливість даних критеріїв визначається рівнем їх практичної застосовності, оскільки існують також критерії які теоретично можуть розглядатися як оптимізаційні, проте на існуючий рівень розвитку технологій їх практична реалізація є мало можливою. Важливо також те, що практичне застосування критеріїв оптимізації вимірюється економічним ефектом, що розраховується на метр проходки.

Процес функціонування алгоритмів та програм оптимізації зводиться до підбору свердловин із схожими експлуатаційними параметрами і генерації на цій основі попереднього плану буріння та його корекція в рамках адаптивного зв'язку з технологічним процесом, що описується даними, які отримуються з давачів. В залежності від того, чи моделі оптимізації процесу буріння дозволяють здійснювати корегуючі дії на основі зворотного зв'язку з процесом, їх поділяють на детерміновані (наперед визначені) та адаптивні. Також в ряді досліджень [17] розробляються методи прогнозування, як засіб оптимізації на основі деякої усередненої вибірки в масивах відомих даних (завершене буріння свердловини певного родовища, нафтогазоносного району і т. д.). Таким чином, можна стверджувати, що існуючі методи оптимізації базуються на нагромадженні і узагальненні даних отриманих при бурінні окремих свердловин по родовищах, районах, регіонах [35]. В дослідженні [13] основна ціль процесу оптимізації буріння визначається як виконання заданого об'єму проходки з найменшими затратами.

Метод оптимізації буріння вважається оперативним, якщо він базується на аналізі вхідної технологічної інформації і відбувається формування на її основі оптимальних впливів на перебіг технологічного процесу. Відповідно, керування

в даному випадку здійснюється на основі адаптивних алгоритмів, що є основою побудови адаптивних систем керування процесом буріння. Таким чином, основна ідея оптимізації буріння полягає в оперативному аналізі технологічної інформації і формуванні відповідних оптимальних впливів.

В загальному випадку можливості системи щодо оптимізації процесу буріння зумовлюються переліком параметрів технологічного процесу, які вона контролює.

В дослідженні [5] відмічається, що оптимізація буріння вимагає вибору саме такого режиму, для якого затрати на проходку мінімальні, при якому також задовольняються обмеження щодо безпеки праці, обмеження щодо екологічних норм, а також обмеження щодо отримання регламентної інформації про пласт і, відповідно, в кінцевому підсумку забезпечується максимальна продуктивність поточної свердловини.

Особливості процесу оптимізації також визначаються тим, що, наприклад, властивості бурового розчину можуть бути наперед регламентовані і налаштовані на попередження ускладнень та аварійних ситуацій [36, 37]. Доцільним є також зведення простору пошуку оптимальних рішень для буріння нафтових і газових свердловин до контексту зміни виключно параметрів режиму буріння, але при незмінних умовах буріння, що, наприклад, визначається густиною і властивостями бурового розчину. Автоматизовані системи керування процесом буріння, які функціонують згідно структурної схеми процесу підтримки прийняття рішень при бурінні нафтогазових свердловин (рис. 1.1) як правило виконують рішення тільки часткової оптимізаційної задачі (яка дозволяє зміну тільки певної кількості із загального переліку контрольованих технологічних параметрів процесу) по відношенню до загальної задачі оптимізації (тобто такої, що дозволяє зміну всіх контрольованих технологічних параметрів процесу) [38].

Вважається, що ефективність буріння залежить від ряду визначених та досліджених факторів, а саме: G – осьове зусилля на долото; n – частота обертання долота; Q – витрата бурового розчину; (γ, ρ) – параметри бурового

розчину; BT – тип долота; GC – геологічні умови; MPR – механічні властивості гірської породи. Таким чином, кортеж $\langle G, n, Q, \gamma, \rho, BT, GC, MPR \rangle$ представляє входження так званих керованих параметрів режиму буріння, тобто таких, що можна змінювати з пульта бурильника в процесі буріння (роботи долота на вибої), а також входження факторів (некерованих параметрів), які не можливо змінювати оперативно. Відповідно, режимом буріння вважається певне поєднання даних параметрів при якому власне і здійснюється механічне буріння.

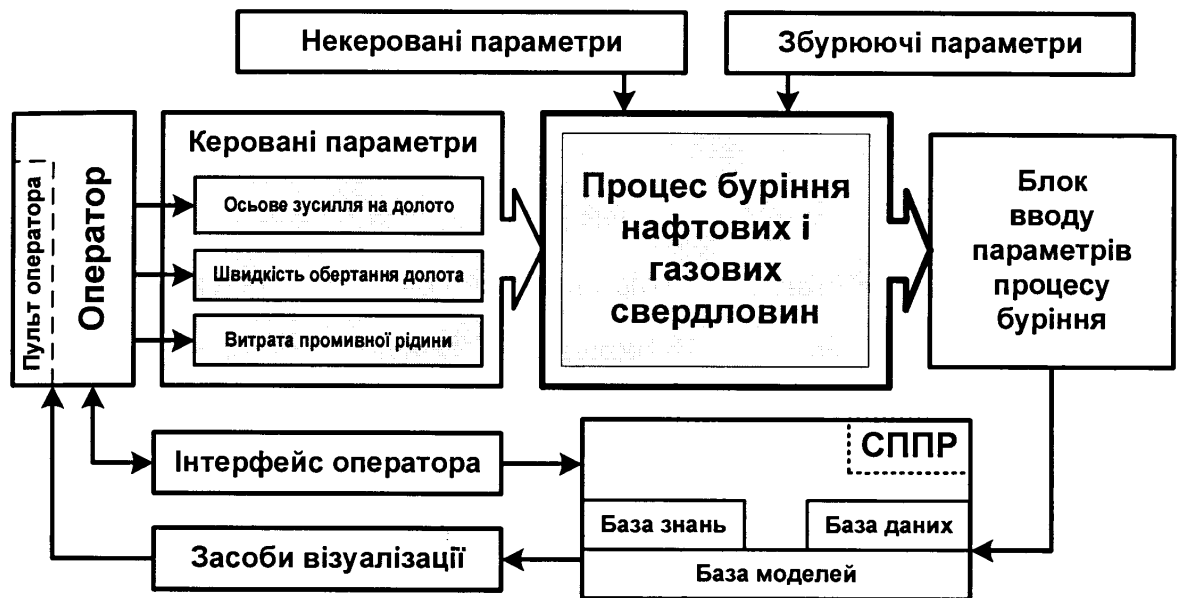


Рис. 1.1. Структурна схема процесу підтримки прийняття рішень при бурінні свердловин

Таким чином, режим буріння визначається набором параметрів, кожний з яких впливає на загальну ефективність буріння, при чому ступінь впливу кожного параметру залежить від встановлених значень інших параметрів.

Ефективність та оптимальність роботи долота на вибої можна оцінити наступними характеристиками: 1) проходка – кількість метрів пробурених долотом до повного зношення; 2) проходка за рейс – кількість метрів пробурених долотом з моменту спуску до моменту підйому з вибою; 3) середня механічна швидкість проходки – кількість метрів пробурених за одиницю часу; 4) середня рейсова швидкість – середня швидкість поглиблення свердловини; 5) собівартість метра проходки; 6) швидкість проходки – швидкість руйнування

породи долотом в кожний конкретний момент часу; 7) швидкість зношення – об'єм зношеного озброєння долота за одиницю часу [6].

Безпосереднє руйнування гірської породи на вибої здійснюється шляхом створення осьового зусилля на бурове долото. Зростання осьового зусилля призводить до зростання механічної швидкості буріння. Потужність на долоті лінійно залежить від швидкості обертання та осьового зусилля. Важливим є той факт, що форсування режиму буріння шарошечними долотами більш вигідно виконувати шляхом підвищення осьового зусилля на долото і зниження швидкості його обертання, що уповільнює зношення озброєння долота і загальний опір. Із зростанням осьового зусилля зменшується термін служби опор долота при незмінній швидкості його обертання. Механічну швидкість проходки доцільно знижувати в початковий період роботи долота на вибої для зменшення рівня його зношеності. Створення високого зусилля дозволяє отримати високі механічні швидкості буріння при достатній очистці вибою. Обмеженнями в даному процесі є міцність бурової колони і крутний момент, що передається на долото. Проте, вибір режиму буріння з граничним осьовим зусиллям вимагає також поточного техніко-економічного аналізу з врахуванням прискореного зношення опор і озброєння доліт, можливості отримання максимальної проходки на долото, зниження частоти обертання, потреби у більшій витраті бурового розчину.

В загальному випадку, руйнування гірської породи призводить також до руйнування озброєння самого долота, тому зміна параметрів режиму буріння впливає на інтенсивність зношення долота і як наслідок, механічної швидкості проходки, особливо на початку роботи долота на вибої, коли площа контакту з породою невелика, а тиск великий. По мірі зношення долота збільшується площа контакту, зменшується контактний тиск і зменшується швидкість зношення. Відповідно швидкість зношення зростає пропорційно осьовому зусиллю. Технологічними обмеженнями в даному процесі є границя текучості матеріалів зубців та границя витривалості матеріалу зубців. Таким чином, швидкість зношення зростає пропорційно швидкості обертання долота.

Проходка на долото залежить від механічної швидкості буріння і

довговічності долота, що залежить від параметрів режиму буріння [29]. Тому при заданій швидкості обертання долота існує тільки одне оптимальне значення осьового зусилля, що забезпечує отримання найвищої проходки для заданого долота в заданій породі. Для заданого осьового зусилля існує тільки одне оптимальне значення швидкості обертання при якому досягається найбільша проходка за рейс заданим долотом в заданій породі.

Таким чином, якщо осьове зусилля і швидкість обертання відхилятимуться від оптимальних значень, то проходка на долото буде знижуватись навіть при зростанні механічної швидкості проходки.

1.2. Особливості застосування інтелектуальних систем в бурінні нафтових і газових свердловин і прийняття рішень на їх основі

Застосування інтелектуальних систем в процесі буріння нафтових і газових свердловин [15, 40-42] дає змогу оптимізувати конструкцію свердловини з використанням критерію мінімізації коштів, мінімізації ймовірності виникнення аварійних ситуацій і підвищення кінцевого дебіту свердловини, що особливо актуально для зниження питомих витрат у виробництві енергоносіїв, що виділяється як одна з основних складових енергетичної стратегії України на період до 2030 року [39].

Даний підхід включає планування конструкції свердловини до початку буріння, модифікації, виконані в процесі буріння, а також проектування та оптимізацію параметрів, що безпосередньо впливають на ефективність буріння, таких, як властивості бурового розчину, вибір долота та інші технологічні операції.

Таким чином, застосування інтелектуальних систем при бурінні нафтових і газових свердловин дає змогу ефективно вирішувати ряд завдань: зменшення ступеня зношеності бурового долота; зменшення кількості спуско-підіймальних операцій, необхідних для заміни зношених доліт; збільшення часу експлуатації долота; підвищення механічної швидкості проходки; покращення контролю за спрямованістю стовбура свердловини; зменшення вібрацій бурової колони і

потенційного зменшення кількості та частоти відмов обладнання на вибої; зниження проявів втрати циркуляції бурового розчину і зменшення часу, необхідного для вирішення аварійних ситуацій, пов'язаних з втратою циркуляції; зменшення часу, необхідного на виконання ловильних операцій; зниження частоти прихоплення бурових труб; зменшення часу, необхідного для вирішення проблеми осипання стовбура свердловини та скручування бурової колони (див. додаток А).

Оскільки більшість операцій в технологічному процесі буріння вимагає збалансованості численних факторів один відносно одного, причому деякі з них мають змінні ступені визначеності, то це робить ефективним застосування експертних систем. Виділяють п'ять основних областей застосування експертних систем на етапі проектування свердловин і оптимізації процесу буріння нафтових і газових свердловин в цілому [41, 43, 44, 15, 42]:

1. Кріплення свердловини колоною обсадних труб складає основну частку від загальної вартості свердловини. Геологічні умови місця розташування бурової площадки визначають необхідну кількість обсадних колон, а також їх оптимальні глибини. Загалом особливості регіону буріння та способи інтерпретації окремих геологічних умов визначають план бурових робіт. З перебігом процесу буріння окремі фактори та особливості умов буріння вимагатимуть внесення змін до проекту кріплення свердловини.

Щодо визначення цілей функціонування системи, проект кріплення свердловини не може розглядатися тільки з точки зору зменшення вартості або підвищення ефективності, оскільки існує ймовірність, що оптимальним проектом кріплення для деякої заданої свердловини буде кріплення обсадною колоною більшого діаметра, ніж у стандартному випадку. Це означає, що в даному випадку повинна буритися більша за діаметром свердловина і відповідно, буде потрібна більша бурова установка, що призведе до збільшення вартості проекту кріплення свердловини. Все це підвищуватиме загальну вартість буріння свердловини, проте оптимізоване кріплення колоною обсадних труб дасть більший дебіт із свердловини, зменшить кількість свердловин, необхідних для розробки родовища і таким чином, зменшить загальну вартість

процесу розробки свердловини. Отже, кожен випадок заощадження коштів від деякого ідеалізованого проекту кріплення свердловини може бути обчислений тільки шляхом проекції збільшених обсягів видобутку в залежності від пластового резервуара.

В даному випадку виконується оцінка обсягу потенційних заощаджень з точки зору експертної системи проектування кріплення стовбура свердловини з припущенням, що на заданій свердловині кріплення обсадними колонами було виконано із завищеним запасом міцності. В такому випадку, експертна система проектування кріплення стовбура свердловини надає рекомендації щодо параметрів колони обсадних труб і робить висновок про те, що менша вага обсадної колони або інший тип кріплення не впливатиме безпеку або стійкість стовбура свердловини, що в кінцевому підсумку забезпечить економію на кожен одиницю виміру обсадної труби.

Отже, застосування експертних та інтелектуальних систем в області кріплення стовбура свердловини дозволить проектувати обсадну колону таким чином, щоб задовольнялися релевантні геологічні обмеження та специфікації, а також певні локальні технологічні регуляції.

2. У свердловинах всі обсадні колоны цементуються в напрямку до поверхні, і тому проект кріплення свердловини значною мірою визначає вимоги щодо цементування. Також потенційна область застосування для експертних та інтелектуальних систем існуватиме при проектуванні і плануванні фактичної роботи з цементування, в ході якої визначається: а) необхідна кількість цементу; б) швидкість на якій він повинен закачуватися; в) властивості, які повинен мати цемент (густина, час затвердіння, температура); г) чи повинна застосовуватись технологія поетапного цементування. Таким чином, краще визначення складу цементних розчинів може бути досягнуто шляхом більш точного прогнозування температур на вибої і умов у покладі. В більшості випадків краще виконання процедури цементування матиме своїм результатом суттєві заощадження щодо вартості життєвого циклу свердловини, шляхом запобігання або відстрочення потреби в переробках та ремонтах колони обсадних труб. Це дозволить також уникнути необхідності в повторному

цементуванні під час процесу буріння.

Отже, застосування експертних та інтелектуальних систем для проектування кріплення стовбура свердловини колоною обсадних труб безпосередньо фізично не впливатиме на значення вартості або часу виконання процедури цементування. Найбільш вірогідна область їх впливу на вартість процесу буріння полягатиме в запобіганні і мінімізації деяких аварійних ситуацій, що можуть виникнути в технологічному процесі. Крім того, більшість проблем, що виникають під час процесу цементування є механічними за своєю природою (збої в роботі насосу, протікання сальника і т.д.) і не можуть бути вирішені засобами експертних чи інтелектуальних систем для проектування процесу цементування. Якщо виникає проблема такого класу, експертна або інтелектуальна система не матиме засобів впливу на кількість часу, необхідного для її вирішення.

3. Фактори, закладені в процес проектування програм використання бурових доліт, мають на меті оптимізувати швидкість проходки на виділеній свердловині і включають: а) вибір бурового долота; б) зусилля на долото під час буріння; в) швидкість обертання долота; г) гідравлічні властивості бурового долота; д) властивості бурового розчину; е) властивості гірської породи. Таким чином, техніки оптимізації долота матимуть певну кореляцію з параметрами гірської породи, відповідно характеристики долота матимуть кореляцію з особливостями застосування долота в даному нафтогазоносному регіоні і зокрема з породою в якій безпосередньо буде буритися свердловина.

Вибір бурового долота, шляхом порівняння умов буріння на сусідніх свердловинах дасть змогу зекономити на вартості буріння нафтових і газових свердловин. Вірогідно також, що в багатьох випадках оператори технологічного процесу використовують дані про долота із сусідніх свердловин для буріння власних свердловин, що може також розглядатися як деяке обґрунтоване оптимальне значення, як вихідна точка для потенційних заощаджень при впровадженні експертної або інтелектуальної системи вибору бурового долота.

В результаті, оптимізація бурового долота дає можливість зменшити

вартість буріння, що призведе також до змін в розрахунку вартості долота, часу обертання і механічної швидкості проходки. Засобами такого аналізу набагато легше досягнути певного заданого зменшення вартості буріння шляхом фіксації незмінності розрахунку вартості долота і часу обертання та збільшення механічної швидкості в заданому діапазоні.

В кінцевому підсумку застосування експертних та інтелектуальних систем для вибору бурового долота дозволить отримати рекомендації щодо вибору оптимального типу долота для поточних геологічних умов у свердловині.

4. Буровий розчин виконує ряд задач в процесі буріння, а саме: а) охолодження бурового долота; б) змащення бурової колони; в) видалення бурового шламу; г) запобігання припливу флюїду з пласта; д) забезпечення стабільності стовбура свердловини. Склад бурового розчину формується, базуючись на вимогах, що визначаються задачами геології, характеристиками резервуару, температурою і планом бурових робіт. Технологічні параметри даного процесу включають густину, в'язкість, опір до поглинання бурового розчину і хімічний склад бурового розчину. Визначення цілей експертних та інтелектуальних системи щодо дослідження впливу бурового розчину на процес буріння полягатимуть в: а) збільшенні швидкості механічної проходки; б) зменшенні проявів втрати циркуляції; в) запобіганні руйнуванню стінок свердловини; г) зменшенні кількості прихоплень бурової колони.

Застосування експертних та інтелектуальних систем в даній області дає змогу надавати рекомендації щодо діагностики і контролю аварійних ситуацій пов'язаних з буровим розчином, обчислювати градієнти розривів пласта, обчислювати допустимі гідравлічні удари, обчислювати необхідну масу бурових розчинів, виконувати аналіз бурових розчинів і генерувати загальні та детальні рекомендації щодо їх застосування, виконувати аналіз аварійних ситуацій, пов'язаних з буровим розчином, і надавати експертні поради щодо їх усунення.

5. Компоновка низу бурової колони полягає у проектуванні нижньої частини бурової колони, що включає в себе бурове долото та обважену бурову трубу. Компоненти даного процесу включають: а) долото; б) перевідник, що

сполучає долото з буровою колоною; в) обважену бурову трубу, що використовується для створення осьового зусилля, яке подається на бурове долото; г) розширюючі долота для відкриття стовбура свердловини; д) стабілізатори для зменшення вібрацій і збільшення контролю напрямленості; е) інструменти контролю напрямленості. Вибір компоновки низу бурової колони є функцією від глибини свердловини, геометрії свердловини, геології свердловини, характеристик бурового долота та існуючих або бажаних викривлень стовбура свердловини.

Цілі експертних та інтелектуальних систем для проектування компоновки низу бурової колони повинні включати: а) збільшення швидкості механічної проходки; б) зменшення проявів відходу в сторону боковим стовбуром; в) зменшення частоти обриву колони бурових труб; г) зменшення частоти ловильних операцій.

Основним завданням експертів процесу буріння, а також відповідних експертних та інтелектуальних систем, що базуються на їх знаннях, є допомога операторам у вирішенні проблем пов'язаних з аварійними ситуаціями, що виникають у процесі буріння. Такі аварійні ситуації майже завжди є неочікуваними, оскільки раптово переривають нормальний перебіг бурових операцій і, відповідно, вимагають негайних дій щодо їх усунення. В фахових наукових дослідженнях даної проблеми [36-37] наводяться дані, що аварійні ситуації в процесі буріння збільшують вартість середньостатистичної свердловини на 15% - 20%, а в деяких випадках навіть до 100% збільшення вартості в порівнянні з ідеальною свердловиною, тобто свердловиною, при бурінні якої не виникло жодної аварійної ситуації.

Загалом застосовність експертних та інтелектуальних систем для обслуговування аварійної ситуації процесу буріння залежить від рівня складності (комплексності) аварійної ситуації та від кількості можливих альтернатив і об'єму інформації, що повинна розглядатися.

Таким чином, експертні та інтелектуальні системи можуть мати застосування до багатьох проблем, що виникають в технологічному процесі буріння, а саме таких, як втрата циркуляції, втрата контролю над

свердловиною, проблеми, пов'язані з ловильними роботами, прихоплення бурової колони, проблеми, що виникають в процесі цементування. Виконаємо аналіз даних проблем, включаючи їх причини та актуальність з метою оцінки потенційної застосовності експертних та інтелектуальних систем і оцінки ефективності використання уже існуючих систем.

В загальному випадку, втрата циркуляції є найбільш серйозною проблемою в бурінні. Дана проблема трапляється, коли тиск, що створюється буровим розчином у стовбурі свердловини є більший за пластовий тиск. При цьому буровий розчин із стовбура свердловини починає надходити в гірську породу. Крім очевидної проблеми, яка полягає у вартості втраченого бурового розчину, втрата циркуляції може призвести до прихоплення бурової колони, проблем з цементуванням і зрештою до втрати контролю над свердловиною. В багатьох випадках процес буріння зупиняється до тих пір, поки не буде розв'язана проблема пов'язана з втратою циркуляції. Зокрема, для вирішення даної проблеми застосовуються закупорюючі агенти та засоби протидії втраті циркуляції, які додаються до бурового розчину з метою шунтування зони втрати циркуляції. У випадку, якщо цей метод не спрацює, то виконується цементування. Якщо ж і цементування не є успішним, то вдаються до відходу в сторону за допомогою бокового стовбура або припинення розробки свердловини взагалі. В деяких випадках падіння рівня флюїду внаслідок втрати циркуляції буде призводити до різкого підвищення тиску в стовбурі свердловини і в такій ситуації оператор повинен знайти баланс між втратою циркуляції і фонтануванням свердловини.

Потенційні застосування експертних та інтелектуальних систем в даному випадку включають запобігання, діагностику, розміщення і тип втраченої циркуляції, вибір матеріалів для боротьби з поглинанням бурового розчину, вибір та застосування методів усунення аварійних ситуацій.

В деяких випадках експертні та інтелектуальні системи допомоги оператору при втраті циркуляції в своїй функціональності будуть перекриватися з експертними та інтелектуальними системами по бурових розчинах. Проте, система контролю втрати циркуляції все ж проектується як

вузькоспеціалізована система, спрямована вглиб, що вимагатиме значно менших затрат на розробку, чим повнофункціональна інтелектуальна система по бурових розчинах.

Таким чином, існуючі експертні та інтелектуальні системи і їх прототипи в даній області надають експертні поради щодо вирішення проблем пов'язаних із втратою циркуляції, допомагають у керуванні свердловиною та відновленні контролю над нею.

В технологічних регламентах ловильних робіт виконуються процеси видалення уламків або обладнання із свердловини у випадках, коли вони перешкоджають подальшому бурінню. Як правило, найбільш типовою ситуацією, пов'язаною з ловильними роботами, є виймання бурової труби, яка була або скручена, або прихоплена в свердловині. В інших випадках об'єктами можуть бути шарошки, опори бурового долота, частини стабілізаторів або центраторів, талевих канатів або інструментів, які впали в свердловину з поверхні.

Застосування експертних та інтелектуальних систем в даному випадку може допомогти персоналу бурової установки у виборі та оперуванні з відповідним ловильним інструментом. Зрозуміло, що інтелектуальна система даного класу не зменшить потреби у виконанні власне ловильних операцій, але може допомогти суттєво зменшити відповідний час та кошти на ловильні роботи в свердловині.

Під час буріння і спуско-підіймальних операцій частим явищем є прихоплення бурової труби у стовбурі свердловині. Це може бути спричинено диференційним тиском як, наприклад, у випадку появи зони втрати циркуляції. Причиною може бути також зношення та виробка бічних сторін стовбура свердловини, осипання або розширення гірської породи вище бурового долота тощо. Після виникнення прихоплення існує ряд процедур, які можуть бути застосовані для вивільнення бурової труби. В більшості випадків просте обертання бурової труби може її звільнити від прихоплення. В більш складних випадках вивільнення бурової труби від прихоплення досягається шляхом закачування мастильної речовини. Відповідно, в ще більш складніших випадках

необхідно залишити у свердловині прихоплену колону бурових труб. Пристрій з вибуховою речовиною поміщається над вільною точкою прихоплення колони бурових труб і після вибуху виконується відкидання прихопленої колони. Після відкидання бурова колона падає в свердловину з ловильними ясами з метою спроби послаблення прихопленої труби. Інколи може бути необхідним провести промивання стовбура свердловини з метою заміщення наповнювача, що міг спричинити прихоплення. В сценарії найгіршого випадку може бути необхідним також залишення колони бурових труб в свердловині та виконання цементування і забурювання нового стовбура.

Застосування інтелектуальних та експертних систем дозволяє запобігти появі прихоплення труб, виконувати діагностику проблеми і генерувати рекомендаційні процедури для її вирішення. Початковими цілями побудови інтелектуальних систем для нафтогазової промисловості були саме задачі запобігання, діагностики і вирішення проблем прихоплення колони бурових труб [36].

Проблеми, що можуть виникати під час цементування свердловин, включають утворення каналів у цементному розчині за обсадними трубами, забруднення цементу при бурінні або забруднення його флюїдами з гірської породи, недостатній об'єм цементу або механічні проблеми під час закачування цементу. Першим кроком до вирішення даної категорії проблем є діагностування сутності поточної проблеми. Найкращим індикатором є моніторинг повернень під час цементувальних робіт. Якщо повернення є меншими за очікувані і/або не виходять на поверхню взагалі, то слід вважати, що цемент втрачений в гірській породі, або об'єм стовбура свердловини виявився більшим ніж очікувалось. Якщо на поверхню виходить більше цементу, ніж очікувалося, то, можливо, що існують обширні канали нецементованої колони. Такі проблеми можуть бути результатом серйозних ускладнень пізніше в життєвому циклі свердловини, тому зазвичай необхідно прийняти відповідні корегуючі дії якнайшвидше. Якщо існує підозра щодо поганого цементування, то оператор може виконати акустичне вимірювання об'єму цементу поза колоною або виконати корегуюче цементне здавлювання

для заповнення проміжків та інтервалів поза колоною.

1.3. Особливості оптимізації процесу буріння в реальному часі

Однією з основних проблем розробки нафтових і газових родовищ є проблема утримання вартості буріння нафтових і газових свердловин на прийнятному рівні. Таким чином, основне завдання полягатиме і полягає в розробці методів і засобів зниження загальної вартості, підвищення загальної ефективності і зменшення ймовірності виникнення аварійних ситуацій в технологічному процесі буріння нафтових і газових свердловин. Крім того, дану проблему слід розглядати в контексті значних технологічних досягнень в області буріння, що мали місце в останні десятиліття. Технології, що застосовуються в бурінні на сьогоднішній день дозволяють отримувати безпечні для навколишнього середовища та ефективні в плані вартості розробки свердловини. Найбільш важливими серед новітніх технологій, які застосовуються в технологічному процесі буріння нафтових і газових свердловин є саме комунікаційні і комп'ютерні технології, що в найбільшій мірі дозволяють вирішувати задачі оптимізації процесу буріння. Дані технології дозволяють нагромаджувати та обробляти великі масиви даних в формі баз даних (в тому числі і віддалених) на основі яких є можливим вирішувати комплексні задачі, в тому числі оптимізаційні.

За умов, коли необхідно збільшувати обсяги буріння при обмежених фінансових та матеріальних ресурсах, важливого значення набуває проблема оптимального керування процесом буріння [2, 4, 6, 13, 17, 19]. Оптимізація параметрів процесу буріння нафтових і газових свердловин розглядається як процес вибору кращого значення змінної з групи наборів даних. На формальному рівні оптимізація означається як рішення певної проблеми при якому необхідною є мінімізація або максимізація значень певної функції на основі системного підходу. При цьому важливу роль відіграє процес диференціації.

З самого початку розвитку технологій буріння, оператори технологічного

процесу шукали шляхи та засоби зменшення вартості буріння в основному за рахунок збільшення швидкості буріння. В нафтогазовій промисловості перша свердловина пробурена на новому родовищі в загальному випадку матиме найвищу вартість. По мірі розробки родовища зростає кількість інформації про нього, що дозволяє реалізувати техніки оптимізації буріння, що в свою чергу знижує вартість кожної наступної свердловини. Вважається, що на певному етапі розробки буде досягнута точка після якої не можливо буде внести жодних суттєвих покращень в технологічний процес [31]. Основним завданням, виходячи з комплексності відношення між буровими параметрами є визначення тієї комбінації операційних технологічних умов, яка дозволяє отримувати мінімальну вартість буріння. Основним напрямком правильного планування процесу буріння є оптимізація технологічних операцій і мінімізація загальних витрат. Іншим важливим аспектом оптимізації є покращення загальної технології буріння і підвищення загальної ефективності системи. Крім того важливим фактором забезпечення безпеки докiлля є максимально можливе уникнення аварійних ситуацій.

Таким чином, причина все більшої уваги нафтогазових компаній до підвищення ефективності роботи операторів на бурових площадках зумовлюється перш за все факторами вартості та фактором максимального уникнення аварійних ситуацій. На сьогоднішній день, коли вартість вуглеводневих ресурсів досягла свого піку, зросла також відповідно і вартість бурового обладнання, витрати на оплату праці і т. д. Тому, як один з ефективних шляхів досягнення рентабельності розглядається саме шлях збільшення ефективності технологічного процесу буріння нафтових і газових свердловин. Підвищення ефективності зокрема досягається за рахунок технології кластеризації, технології напрямленого буріння, яка дозволяє буріння куща свердловин з одного розміщення, що забезпечує уникнення додаткових витрат на побудову окремих технологічних структур для кожної свердловини [33]. При встановлених оптимальних параметрах буріння найбільш важливий вплив на зниження вартості буріння матиме саме факт близького розміщення свердловин, що полягатиме в можливості ефективної

реалізації збору та обробки даних.

Основні параметри буріння, що розглядаються як такі, що мають вплив на фактор механічної швидкості проходки в той же час не є повністю зрозумілими та дослідженими і, відповідно, розглядаються як надто комплексні з точки зору побудови ефективних моделей [48]. По даній причині також не існує точної математичної моделі яка б описувала механічну швидкість проходки для роторного буріння. Тим не менше, існує ряд математичних моделей які виконують поєднання відомих можливих відношень параметрів буріння. Такі моделі створені для оптимізації параметрів буріння шляхом вибору, наприклад, найкращого значення осьового зусилля на долото і швидкості обертання бурового долота для досягнення мінімальної вартості процесу буріння [49]. Таким чином, було досягнуто значне зниження вартості буріння за рахунок створених математичних моделей.

Також необхідно мати на увазі, що властивості гірської породи, які не контролюються системою є одним з вирішальних факторів щодо оцінки ефективності буріння. Властивості бурового розчину, тип долота, хоча і є контрольованими, в більшості методик буріння не змінюються в стандартних режимах роботи долота. В той же час, гідравлічні характеристики, зусилля на долото, швидкість обертання бурового долота належать до одних з найбільш контрольованих факторів.

Основним завданням існуючих досліджень в даній області є розробка ефективних методів використання даних з бурових площадок. Основні дані, що отримуються буровим інженером є дані з установок для контролю стану і властивостей бурового розчину. Новітнє бурове обладнання має вбудовані функції імпорту даних в стандарті WITS (специфікація для передачі даних з бурової площадки) [50]. Особливість даних представлених в такому форматі є їх простота та надійність. Таким чином, формат WITS розглядається як комунікаційний формат, що використовується для передачі широкого спектру даних з бурової площадки від однієї комп'ютерної системи до іншої. Наявність такого уніфікованого формату дозволяє обмін даними в режимі on-line або в пакетному режимі на всіх етапах пошукового або промислового буріння.

Для забезпечення інтеграції інформації від різних джерел розроблено також розширення стандарту WITS під назвою WITSML (мова розмітки специфікації для передачі даних з бурової площадки). Дані стандарти дозволяють передачу даних в реальному часі, їх обробку та інтерпретацію, наприклад, з метою повернення оптимальних параметрів буріння назад в технологічний процес в реальному часі. Такі результати досягаються за рахунок новітніх комунікаційних та комп'ютерних технологій.

Історія роторного буріння налічує більше ста років. Протягом початкового періоду розвитку технологій роторного буріння було розроблено види та типи доліт для роторного буріння, види обсадних колон, техніки цементування і різноманітні типи бурових розчинів. Розвиток відбувався в напрямі збільшення потужності бурових установок, покращення якості бурових доліт, покращення ефективності цементування і побудови методик роботи з буровими розчинами. В результаті таких досліджень було визначено основні принципи роботи гідравлічної системи, суттєво покращено технологію бурових доліт, покращено технологію приготування та застосування бурових розчинів. Проте, одним з основних результатів розвитку технології буріння слід розглядати впровадження методів оптимізації. Все це призвело до впровадження автоматизованих та комп'ютеризованих систем, які здатні контролювати параметри буріння.

В дослідженні [18] наведені аналітичні оцінки поєднань зусилля на долото і швидкості обертання долота з метою виведення емпіричних математичних виразів для очікувань щодо життєвого циклу долота, а також щодо механічної швидкості проходки, як функції глибини, швидкості обертання долота і зусилля на нього. Також в даному дослідженні побудовано графові представлення і процедури для польових застосувань з метою визначення оптимальних поєднань бурових параметрів.

В дослідженні [51] використано моделі лінійної швидкості буріння і методи регресійного аналізу для вибору оптимальних параметрів буріння. На основі використання формули мінімальних витрат показано, що максимальне значення механічної швидкості буріння може співпадати з підходом

мінімальної вартості якщо ігнорувати накладені технологічні обмеження. Зокрема було розвинуто техніку оптимізації буріння в якій персонал бурової міг виконувати оптимізацію безпосередньо на буровій площадці, базуючись на розроблених графових шаблонах і рівняннях.

В дослідженні [30] представлено підходи до планування процесу буріння. Представлені методики дозволяють ідентифікувати найкращу з можливих конструкцій свердловини з точки зору її ефективності. Досліджувані оптимізаційні техніки базуються на моніторингу в реальному часі, що в кінцевому підсумку дозволяє віддалений контроль бурових параметрів. Подальшим розвитком даної технології стало впровадження центрів підтримки технологічних операцій в реальному часі. Тим не менш, отримали також розвиток новітні техніки моніторингу бурових параметрів безпосередньо на буровій площадці.

Проте, розвиток всіх даних технік та технологій базується на обробці статистичних даних, отриманих під час роторного буріння. Особливістю новітніх технологій буріння є те, що вони базуються на розвинутих засобах легкого доступу до параметрів буріння, доступних методів їх зберігання і віддаленої передачі в режимі реального часу. Технологічна реалізація такого підходу у вигляді мікроелектронних систем автоматичного збору даних з бурової площадки і їх передача на сервер відкрила нові перспективи щодо автоматизації процесу буріння і відповідних сервісних функцій контролю, що показано в роботі [52].

Використовуючи можливості новітніх комп'ютерних та комунікаційних технологій при бурінні нафтових і газових свердловин, великі масиви даних передаються з бурових площадок для їх подальшого аналізу. Важливість даної процедури зумовлюється тим, що фактичні дані є єдиним джерелом інформації для побудови рекомендацій щодо оптимізації бурових операцій.

Кожен параметр, що повинен бути отриманий з бурової площадки повинен бути таким, що має вплив на загальний досліджуваний оптимізаційний процес. При цьому, слід виходити з того, що надійність і точність даних є надважливою, що на практиці вимагає того, щоб всі давачі були точно

відкалібровані і відображали коректні вимірювані значення. Таким чином, загальний успіх оптимізації процесу буріння залежатиме від якості знятих значень параметрів буріння.

Фактори, що мають вплив на механічну швидкість проходки поділяються на два основні класи: контрольовані і зв'язані з навколишнім середовищем. Контрольованими факторами є фактори які можуть бути безпосередньо змінені, а саме такі як осьове зусилля на долото, швидкість обертання долота, гідравлічні властивості. Фактори навколишнього середовища з іншого боку не можуть бути контрольованими. Це такі фактори, як властивості гірської породи, вимоги щодо бурового розчину. Причина того, що буровий розчин розглядається як фактор середовища полягає в тому, що необхідна певна густина для того щоб досягти відповідних цілей, наприклад, таких, як отримання достатнього залишкового тиску для уникнення потрапляння флюїдів з гірської породи у стовбур свердловини. Іншим важливим фактором є ефект загальної гідравліки, що має відношення до всіх технологічних операцій процесу буріння, який в свою чергу знаходиться під впливом багатьох інших факторів, таких як літологія, тип бурового долота, тиск та температура на вибої, реологічні властивості бурового розчину та ін. Таким чином, ефективність механічної швидкості проходки залежить і є функцією як контрольованих факторів, так і факторів зовнішнього середовища. Результати досліджень показують, що механічна швидкість проходки в загальному збільшується із зменшенням значення параметра густини бурового розчину.

Іншою важливою умовою контролю механічної швидкості проходки є спосіб виведення бурового шламу. В дослідженні [34] проведено аналіз впливу способу виводу шламу на параметри буріння при бурінні горизонтальних і похилих свердловин. Середній розхід бурового розчину в затрубному просторі є домінуючим параметром щодо транспорту бурового шламу, тобто, чим вищий розхід промивної рідини, тим менший осад бурового шламу. В той же час збільшення густини бурового розчину сприяє збільшенню шламового осадку. Як показує досвід, чим менший розмір шламу, тим складніше видалити шламовий осад. Тому, зрозуміло, що турбулентний потік краще запобігає

утворенню шламового осаду.

Основними характеристиками ефективності проходки при роторному бурінні є не тільки ефективне дробіння породи на дні, але також видалення шламу з площини гірської виробки деяким безпосереднім і ефективним способом з метою забезпечення подальшого дробіння гірської породи і прогресу технологічного процесу буріння нафтових і газових свердловин в цілому. Відповідно до комплексності розуміння механізму механічної швидкості проходки в технологічних операціях буріння, на початкових етапах розвитку технологій буріння в більшій мірі застосовувались емпіричні підходи, ніж аналітичні моделі розуміння механічної швидкості проходки.

Згідно середньостатистичних даних відомо, що час витрачений на буріння свердловин до 30% складається з часу обертання бурової колони від загального часу спорудження свердловини. Таким чином, оптимізація механічної швидкості проходки розглядається як важливий фактор зменшення витрат на процес буріння.

В даному контексті важливе значення має також розгляд характеристик гірської породи в якій виконується буріння. Для отримання ефективних результатів слід виходити з припущення про те, що всі властивості гірської породи впливатимуть на механічну швидкість проходки і, таким чином, можуть розглядатися як об'єкти оптимізації.

Згідно підходу запропонованого в роботі [53] наступні припущення розглядаються як такі, що повинні задовольнятися в технологічному процесі буріння нафтових і газових свердловин:

- 1) досягнення ефективної очистки забою свердловини;
- 2) правильний вибір поєднання бурового долота та компоновки низу бурової колони відповідно до властивостей гірської породи;
- 3) інтервал гірської породи, що буриться розглядається як однорідний;
- 4) бурова установка і допоміжне обладнання повинні працювати максимально ефективно.

Оптимізація механічної швидкості проходки для технологічного процесу буріння нафтових і газових свердловин сприятиме зниженню вартості процесу

буріння, а також зменшенню кількості аварійних ситуацій. В дослідженні [19] показано, що оптимізація технологічного процесу буріння повинна бути базована на нагромадженні і статистичній обробці емпіричних даних в більшій мірі чим на роботі з неявними відношеннями.

Вважається, що процес буріння є оптимізованим, якщо наперед вибрано такий діапазон зміни параметрів буріння (змінних буріння), що дозволяє максимізувати швидкість буріння або мінімізувати вартість буріння. Вважається також, що потреба та кількість досліджень в області оптимізації процесу буріння збільшуватиметься при посиленні вимог щодо процесу буріння.

Початкові дослідження, що виконувалися в області оптимізації проходки були зосереджені на виборі оптимального параметра з точки зору максимальної ефективності гідравлічної системи. В той же час, найбільш важливим фактором, що впливає на швидкість буріння є саме правильний вибір бурового долота і даний процес може бути оптимізований тільки методом проб і помилок.

Більшість досліджень в даній області розглядають саме статичний випадок оптимізації процесу буріння, при якому бурові параметри досліджувалися поза буровою площадкою і, таким чином, йшлося про оптимізацію подальших технологічних операцій процесу буріння. З точки зору новітніх технологій, така статичність була зумовлена відсутністю можливості передачі даних в реальному часі. Можливість динамічної оптимізації забезпечується комунікаційними можливостями комп'ютерних технологій в реальному часі.

Розглядаються дві основні оптимізаційні технології: 1) використання аналітичних моделей таких як метод Галле та Вудса; 2) використання статистичних моделей, таких як множинний регресійний аналіз.

Для буріння нафтових і газових свердловин використовується ряд загальних моделей механічної швидкості буріння, наприклад, моделі Маурера [26], Галле та Вудса [27], Боургойна та Йоунга [28], М.І. Горбійчука та Г.Н. Семенцова [2].

Метод Маурера був розроблений базуючись на теоретичному рівнянні

механічної швидкості проходки для шарошкових конічних доліт як функції від зусилля на долото, кількості обертів за хвилину, діаметру долота та міцності гірської породи. Розроблене рівняння було базоване на таких спостереженнях, як кількість кратерів створених шарошкою та міцність гірської породи.

В дослідженні Галле та Вудса представлено вирішення проблеми вибору кращого осьового зусилля на долото та кількості обертів за хвилину. Представлено діаграму для вибору поєднань параметрів буріння. Показано, що застосування запропонованого методу дозволяє знизити витрати на процес буріння.

Метод Боургойна та Йоунга базується на статистичному синтезі параметрів буріння. В даному дослідженні була представлена лінійна модель проходки і засоби аналізу на основі множинної регресії над введеним рівнянням механічної швидкості проходки. Тому даний метод розглядається, як найбільш підходящий для оптимізації параметрів буріння в режимі реального часу.

Модель запропонована Боургойном та Йоунгом є однією з найбільш повних математичних моделей процесу буріння для випадку шарошкових конічних доліт. Константи нормалізації задані в загальному рівнянні для механічної швидкості проходки модифікуються як функції від властивостей даних, що використовуються як вхідний потік для циклу регресії. Дані коефіцієнти повинні давати точні прогнози для механічної швидкості проходки при застосуванні модифікованих констант нормалізації. В даному дослідженні ці коефіцієнти розглядаються як такі, що виражаються в режимі реального часу. Вони представляють відповідно ефекти, такі як міцність гірської породи, ефект щільності, перепад тиску, зусилля на долото, швидкість обертання, зношеність зубців, гідравлічна характеристика долота. Проте, граничне значення зусилля на долото і значення діаметру долота не є константами, оскільки вони можуть мати значні магнітуди зміни в залежності від характеристик гірської породи і, по даній причині, виконуються спостереження цілого тренду даних, якщо це порогове значення визначається як вхідне. Таке саме значення може бути легко отримане на основі пробного буріння. Методологія розрахунку висоти зубця є

функцією від константи абразивності в межах того самого родовища, що має відношення до часу роботи долота в режимі експлуатації.

Під час буріння нафтових і газових свердловин важливою є обробка даних отриманих в процесі буріння. Обробка даних процесу буріння полягає у переведенні даних в представлення яке може бути опрацьоване наявними апаратними, програмними та формальними засобами. Крім того окремою задачею є задача передачі даних від джерела. Важливо також, щоб значення механічної швидкості проходки обчислювалося з заданою точністю. Також важливим завданням є оцінка можливих результатів при застосуванні розробленої методики до фактичних даних.

Передача даних процесу буріння є важливим кроком в процесі оптимізації параметрів буріння нафтових і газових свердловин [54]. Після отримання, дані повинні бути передані найбільш ефективним способом на центральний комп'ютер (сервер) на якому виконуватиметься процедура розрахунку оптимальних значень параметрів буріння. Цикл оптимізації повинен включати такі кроки:

1) дані повинні бути передані в середовищі реального часу на центральний комп'ютер безпосередньо з бурової площадки;

2) центральний комп'ютер разом з інформацією, що вже існує в його базі даних повинен обробити дані і оптимізувати параметри буріння;

3) оптимізовані параметри буріння повинні бути передані назад на бурову установку для безпосереднього застосування.

З метою передачі даних в реальному часі створюється програмний макрокод, що розміщається на on-line-сервері.

1.4. Аналіз моделей прийняття рішень застосовних при виборі оптимальних значень режимних параметрів процесу буріння

В загальному випадку, задача прийняття рішення може включати ряд інтерпретацій. Проте, незалежно від контексту, якщо йдеться про ситуацію, що вимагає прийняття певних рішень, то вона розглядається як проблема

прийняття рішень [55-64]. Вважається, що проблеми прийняття рішень виникають при функціонуванні систем, яка розглядається як релевантні до даної проблеми. Особа або група осіб відповідальна за прийняття рішень називається особою (особами), що приймає рішення для даної проблеми.

В найпростішому випадку, проблема прийняття рішень вимагатиме визначення значень деякої невеликої кількості контрольованих змінних з умовою задоволення деяких простих умов. В той же час у складних випадках мова йтиме про великомасштабне застосування з надвисоким рівнем комплексності, відповідно з тисячами змінних і багатьма умовами, що повинні бути задоволені.

Відповідно, прийняття рішень завжди включатиме виконання вибору між різними можливими альтернативами. Проблеми прийняття рішень класифікуються у дві категорії з суттєво відмінними особливостями:

1) перша категорія включає всі проблеми прийняття рішення для яких множина можливих альтернатив рішення є скінченною дискретною множиною, що, як правило, складається з невеликої кількості елементів для яких кожна альтернатива є повністю відомою з повними деталями і кожна з них може бути вибрана як рішення. Оскільки всі альтернативи для рішення є повністю відомими в усіх деталях, то відповідно немає потреби у побудові математичних моделей для ідентифікації множини всіх альтернатив для рішень в даній категорії. Натомість можна виконувати пряме застосування відповідних алгоритмів для безпосереднього рішення даних проблем. Найбільш поширеним методом рішення є метод кількісної оцінки;

2) друга категорія включає всі проблеми прийняття рішень для яких кожна можлива альтернатива для рішення повинна задовольняти певні обумовленості і обмеження при яких релевантна система повинна функціонувати. Відповідно для ідентифікації множини всіх можливих альтернатив рішення необхідно побудувати математичну модель цих обумовленостей і обмежень в даній категорії.

Навіть, якщо не має обмежень, що повинні бути задоволені в проблемі прийняття рішень, якщо кількість можливих альтернатив є нескінченною або

скінченною, проте надвеликою, то стає необхідним визначення змінних рішення у проблемі (змінних проблеми прийняття рішень) і побудова відповідної цільової функції (тобто такої, що повинна бути оптимізованою), як математичної функції від змінних проблеми прийняття рішень з метою пошуку найкращої альтернативи для імплементації. Відповідно, такі проблеми прийняття рішень також належать до другої категорії.

Таким чином, важливою характеристикою другої категорії проблем прийняття рішень є те, що з метою оперування ними необхідна ідентифікація змінних рішення в проблемі і побудова математичної моделі цільової функції і/або обмежень в термінах змінних рішення.

Вважається, що початково рішення приймалися винятково засобами інтуїтивних суджень, базуючись на інтуїтивних здогадках, що були похідними від існуючого досвіду в предметній області (в деяких областях такий спосіб прийняття рішення застосовується і сьогодні, в тому числі, наприклад, при бурінні свердловин). Проте, з розвитком технологій, стало особливо актуальним перенесення процедур прийняття рішень на раціонально обґрунтовану основу. В той же час, найбільш раціональний спосіб прийняття рішення полягає у виконанні кількісного аналізу.

Зрозуміло, що початкове формулювання проблеми у більшості випадків буде неточним і невизначеним. Необхідне детальне вивчення релевантної системи і розробка точного та повного опису проблеми. В багатьох випадках початкова проблема зазнає багатьох змін в послідовних дискусіях, доки не буде узгоджена її кінцева версія стосовно всіх учасників процесу прийняття рішення. Вважається, що на систему впливають два типи факторів:

1) неконтрольовані фактори. Це фактори впливу, наприклад, такі як фактори середовища, що природнім чином представляються випадковими змінними і не піддаються контролю збоку учасників процесу прийняття рішення;

2) контрольовані вхідні потоки. Це фактори, рівень яких може бути контрольований учасниками процесу прийняття рішень і, відповідно, їх значення можуть бути встановлені на бажаних (очікуваних) рівнях. Фактори,

значеннями яких учасники процесу прийняття рішень можуть маніпулювати називаються змінними рішення проблеми. Вони можуть включати також допоміжні змінні, що є функціями змінних рішення.

Якщо в певній проблемі прийняття рішення не має неконтрольованих факторів, або якщо значення всіх випадкових змінних серед неконтрольованих факторів є точно відомими, то релевантна система залежатиме тільки від значень контрольованих змінних рішення і в даному випадку не буде невизначеності, тобто всі релевантні дані в проблемі прийняття рішень будуть відомими з визначеністю. В такому випадку проблема прийняття рішень відома як детермінована проблема прийняття рішення.

У випадку, коли можлива зміна випадкових змінних серед неконтрольованого вхідного потоку, то така проблема прийняття рішень відома як стохастична або ймовірнісна. Також, в даному випадку вихідний потік релевантної системи є невизначеним, навіть коли значення всіх змінних рішення є фіксованими, оскільки значення деяких важливих змінних будуть невідомими перед завершенням процедури прийняття рішення. Тому, така невизначеність повинна бути вбудована в саму процедуру прийняття рішення.

Для рішення стохастичної проблеми прийняття рішень потрібні знання щодо розподілу ймовірностей для всіх випадкових змінних серед неконтрольованих вхідних даних. Навіть коли проблема прийняття рішень є дуже простою, її точний аналіз з використанням таких розподілів ймовірностей може ставати надто складним. По даній причині, дуже часто стохастичні проблеми прийняття рішення аналізуються шляхом вивчення відповідних їм детермінованих апроксимацій.

Відома hedging-стратегія (стратегія ухилення) побудови детермінованої апроксимацій стохастичної проблеми прийняття рішення полягає в заміні кожної випадкової змінної деяким параметром розміщення її розподілу ймовірностей (низьке, середнє або деяке бажане відсоткове значення) плюс деякий коефіцієнт надійності для врахування невизначеності в її значенні. Все це дозволяє перетворити початкову проблему в детерміновану проблему прийняття рішень.

Модель на основі обумовленостей і обмежень для проблеми прийняття рішень в найпростіших випадках задається одним лінійним рівнянням з однією змінною рішення, що має деяке унікальне рішення. Проте, зрозуміло, що така ситуація є ідеальним випадком, а фактичні моделі для більшості проблем прийняття рішень передбачають багато рішень. Питання, що виникає в даному випадку полягає в тому, як вибрати одне з багатьох рішень моделі для імплементації. Стандартно, дана проблема зводиться до оптимізації цільової функції, яка відповідно представляє міру ефективності релевантної системи. Можна стверджувати, що більшість рішень які приймаються мають на меті оптимізацію деяких бажаних характеристик. Таким чином, модель проблеми прийняття рішень розглядається як оптимізаційна, якщо в ній присутні цільові функції, що повинні бути оптимізовані на додаток до задоволення вимог (обмежень) накладених на змінні проблеми прийняття рішення.

Таким чином, кожна цільова функція для оптимізації представляє міру ефективності функціонування релевантної системи і, відповідно, повинна бути виражена як деяка формальна математична функція від змінних проблеми прийняття рішень.

Якщо шуканими є верхні значення міри ефективності, то в даному випадку мета пошуку є досягнення максимального або найбільшого можливого значення для нього. Навпаки, якщо шуканими є нижні значення міри ефективності, то мета пошуку полягатиме в досягненні мінімального або найменшого можливого значення для нього. В загальному випадку, такі різні вимірювання ефективності розглядаються як цільові функції з точки зору отримання математичної моделі системи. Відповідно, задача оптимізації цільової функції означатиме її максимізацію або мінімізацію.

Якщо використовується тільки одна міра ефективності, то відповідна математична модель називається однокритеріальною оптимізаційною моделлю. Якщо використовується кілька мір ефективності, то модель розглядається як багатокритеріальна оптимізаційна модель в якій, таким чином, вимагається одночасна оптимізація двох або більше цільових функцій.

В той же час, в оптимізаційних моделях вимоги, що накладаються (обмеження) є похідними з відношень, що повинні мати місце серед змінних рішення i , відповідно, для різноманітних статичних або динамічних структурних елементів, що є властивими для способу функціонування системи. Кожна вимога призводить до певного обмеження, що накладається на змінні рішення, які будуть виражатися як відповідні формально-логічні та математичні рівняння або нерівності в моделі проблеми прийняття рішень. Модель також включатиме границі (нижню та/або верхню), які змінні прийняття рішень або функції від них повинні задовольняти з метою відповідності певним обмеженням, згідно яких повинна оперувати система.

Крім того, в деяких проблемах прийняття рішення на додаток до всіх перелічених вимог повинні бути присутні також інші вимоги, що зокрема специфікують той факт, що значення певних змінних рішення повинні належати певним специфікованим множинам.

Важливим фактом щодо цільової функції є те, що кожна проблема мінімізації може бути перетворена в проблему максимізації і навпаки, із збереженням системи обмежень і множини оптимальних рішень.

Основною особливістю проблем прийняття рішення є те, що вони мають змінні рішення, значення яких особа, що приймає рішення (група осіб) може контролювати, накладати на них обмеження і задавати границі, що визначається способом в який повинна функціонувати релевантна система. Таким чином, рішення для проблеми прийняття рішень специфікує числові значення для всіх змінних рішення. Здійсненням рішенням вважається рішення, що задовольняє всі обмеження, границі та інші види звужень. Для того щоб ідентифікувати здійснення рішення, або для того щоб представити множину всіх здійснених рішень потрібно побудувати математичну модель для всіх обмежень і звужень. Як правило, слід також специфікувати цільову функцію, що повинна бути мінімізована або максимізована. Тоді основне завдання полягатиме в пошуку оптимального рішення, яке, відповідно, мінімізує значення цільової функції на множині всіх здійснених рішень, що призводить до побудови оптимізаційної моделі.

На практиці, змінні рішення позначаються вектором. На змінні рішення накладаються верхні і нижні границі. Якщо такі границі рівні нескінченності, то змінна вважається не звужуваною. В загальному випадку обмеження застосовується в дискретних проблемах прийняття рішення, де для певних змінних вимагається прийняття ними значень тільки з специфікованих дискретних множин. Числовий вектор вважається здійсненим рішенням, якщо він задовольняє всі накладені обмеження. На множині всіх здійснених рішень виділяється оптимальне здійсненне рішення, яке має найменше (найбільше) значення цільової функції серед всіх здійснених рішень.

Якщо обмеження є відсутнім, то моделі розглядаються як оптимізаційні моделі на основі неперервних змінних, оскільки кожна змінна в даному випадку може приймати довільне значення всередині заданих границь при накладених обмеженнях. Якщо обмеження присутні, то такі моделі розглядаються як дискретні оптимізаційні моделі.

Таким чином, при вирішенні задачі вибору оптимальних значень режимних параметрів процесу буріння, найбільш доцільним є застосування оптимізаційних моделей, які оперують із змінними рішення (керованими змінними технологічного процесу) та формалізованими обмеженнями, які дозволятимуть описувати регламентації, що накладаються на технологічний процес.

Простір пошуку оптимальних рішень в бурінні нафтових і газових свердловин визначається сукупністю доменів зміни параметрів режиму буріння при сталих умовах буріння.

$$Sol^{Space} [Sol^{Set}] \subset Dom_{pdm}^{DM_1} = \left\{ DM_1 \cdot D_{p_1}^1, DM_1 \cdot D_{p_2}^2, \dots, DM_1 \cdot D_{p_n}^n \right\} \Big|_{DC^{Set}}^{const},$$

де: Sol^{Space} – простір рішень; Sol^{Set} – множина оптимальних рішень; $Dom_{pdm}^{DM_1}$ – домен зміни параметрів режиму буріння DM_1 ; DM_1 – виділений режим буріння; $DM_1 \cdot D_{p_i}^i$ – домен зміни параметру p_i режиму буріння DM_1 ; DC^{Set} – множина умов буріння.

Тоді задача оптимізації режиму буріння може бути записана у вигляді:

$$DM_{Task}^{Opt. def.} = \left\{ \min(\max) [DB^{Cr.}], Constr^{Set} [DM.P^{Set}] \right\},$$

де: $DB^{Cr.}$ – критерій відробки бурового долота; $DM.P^{Set}$ – множина режимних параметрів режиму DM .

1.5. Вибір та обґрунтування напрямку дослідження

Оптимізація процесу буріння починається з отримання даних процесу буріння з бурової площадки та передачі отриманих даних в оперативний центр або на центральний сервер. Відповідно, центральний сервер виконуватиме аналіз і відправку даних по зворотному зв'язку назад на бурову площадку.

Системи штучного інтелекту, область застосування яких визначалася вище, можна розглядати в порядку спадання очікуваної економії коштів. З точки зору впорядкування, основним параметром є надійність припущень, що використовуються у визначенні очікуваної економії, а також поточний статус систем штучного інтелекту у виділеній предметній області і, відповідно, дослідження необхідні для розширення такої системи до рівня промислового застосування.

Процедура пошуку оптимальних режимних параметрів під час процесу буріння має на меті оптимізацію зусилля на долото та оптимізацію швидкості обертання долота для отримання максимальної механічної швидкості проходки, а також мінімізації вартості буріння. Даний процес розглядається як специфічний по відношенню до гірської породи.

Вважається, що пошук оптимальних режимних параметрів буріння в режимі реального часу є перспективним напрямком, оскільки він дозволяє зменшити вартість процесу буріння та підвищити технічні показники бурового процесу.

Як показує виконаний огляд літературних джерел, існує багато деталізованих і ефективних досліджень в області оптимізації буріння. Більшість з яких спрямовані на зменшення вартості процесу буріння. На початкових етапах розвитку технології буріння, відповідно до тогочасного стану

комунікаційних систем, дослідження пов'язані з оптимізацією параметрів буріння стосувались обробки статистичних даних з подальшим їх аналізом.

Досягнення в сфері систем збору даних процесу буріння і особливо значні успіхи в комунікаційному сегменті сприяли розвитку технологій передачі даних з бурової площадки в реальному часі. Виходячи з таких апаратних рішень, новітні дослідження були спрямовані на обробку наявних даних процесу буріння, що дало поштовх до використання нових оптимізаційних технік процесу буріння. При чому, підходи оптимізації в основному концентрувалися або на покращенні ефективності роботи персоналу бурової установки або на параметрах, які давали найкращу ефективність у виділеному сегменті даних процесу буріння. Проте, важливим є той факт, що підходи даного виду не розглядали багато факторів, які з високою ймовірністю могли мати суттєвий вплив на загальний оптимізаційний процес для механічної швидкості проходки під час процесу буріння нафтових і газових свердловин.

Найбільш новітні дослідження в даній області зосереджуються на оптимізацію процесу буріння в реальному часі, хоча виконаний огляд показує відсутність досліджень щодо питання інтелектуальної підтримки прийняття рішень для вибору оптимальних режимних параметрів буріння.

Оскільки буріння більшості нафтогазових свердловин на території України відбувається роторним способом із використанням шарошечних доліт як породоруйнівного інструменту, то в даному дослідженні розглядається саме роторний спосіб буріння, що виконується шарошечними долотами різного типу.

В пропонованому дослідженні розробляється методика інтелектуальної підтримки прийняття рішень щодо вибору оптимальних режимних параметрів буріння. Проектована методика дозволяє поєднувати керовані параметрами буріння такі, наприклад, як осьове зусилля на долото, швидкість обертання долота і вихідні параметрами буріння, такі як механічна швидкість проходки, термін служби бурового долота, проходка на долото. На основі поєднання в одній моделі відношень між керованими і вихідними параметрами буріння інтелектуальна система дозволяє здійснювати оптимізацію по характеристиках

вартості та часу проходки, а також здійснювати пошук підстановок оптимальних параметрів для виділених режимів оптимального буріння.

Для вирішення сформульованої задачі необхідно:

- виконати аналіз особливостей інтелектуалізації процедур прийняття оптимізаційних рішень в процесі буріння нафтових і газових свердловин, аналіз застосувань експертних систем в бурінні нафтових і газових свердловин, аналіз видів та способів оптимізації режимів буріння;

- формалізувати постановку задачі моделювання інтелектуальної підтримки прийняття рішень для вибору оптимальних режимних параметрів буріння на основі побудови абдуктивного фреймворку з ваговими коефіцієнтами;

- обґрунтувати та дослідити технології інтелектуальної підтримки прийняття рішень при виборі оптимальних режимних параметрів буріння в формі правил в умовах невизначеності;

- реалізувати формальні методи інтелектуального керування процесом підтримки прийняття рішень на основі чітких та нечітких знань про процес буріння в формі правил;

- синтезувати алгоритм функціонування системи підтримки прийняття рішень для вибору оптимальних режимних параметрів буріння, шляхом виділення множин керованих, некерованих, збурюючих та вихідних технологічних параметрів;

- розробити технологію прийняття оптимальних рішень в процесі буріння нафтових і газових свердловин на основі оперування з цільовими функціями обчислення доцільностей вихідних технологічних параметрів;

- реалізувати систему інтелектуальної підтримки прийняття оптимізаційних рішень щодо вибору оптимальних режимних параметрів;

- розробити методіку інтелектуальної підтримки прийняття рішень щодо вибору оптимальних режимних параметрів буріння на основі цільових функцій.

РОЗДІЛ 2

ФОРМАЛІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ВИДОБУВАННЯ ДАНИХ ТА ЗНАНЬ ДЛЯ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ПРИ ВИБОРІ РЕЖИМНИХ ПАРАМЕТРІВ БУРІННЯ

2.1. Структуризація процедур обробки та видобування даних про процес буріння

В інтелектуальних системах використовується ряд методів представлення знань: логічний, графовий, метод вектор-функцій [41, 43, 65-71]. Логічний метод базується на використанні числення предикатів першого порядку, що може бути зокрема використаний для формування моделі предметної області «режими буріння», методів простору станів, що визначають режими буріння та евристик, як механізмів пошуку оптимальних рішень щодо вибору режимних параметрів буріння.

В основі семантичних моделей режимів буріння лежить концепція семантичних мереж, що складаються з множини релевантних об'єктів, таких як: об'єкти режиму буріння, які представляють факти, об'єкти, властивості і зв'язки між ними. По своїй суті семантична мережа для предметної області «режими буріння» буде видом орієнтованого графа (рис. 2.1):



Рис. 2.1. Граф, що описує режими буріння

В залежності від типів зв'язків, семантичні моделі режимів буріння можна поділяти на класифікуючі, функціональні і технологічні сценарії. На основі таких зв'язків можливо представляти ієрархічні структури, обчислювальні процедури та інші складні залежності, що описують вибір режиму буріння та його обґрунтування.

Початкову формалізацію знань предметної області «режими буріння» (*SDK* – *Subject Domain Knowledge's*) представимо у вигляді залежності множини задач предметної області (рис. 2.2) (*SDT* – *Subject Domain Tasks*), таких як: максимізація рейсової швидкості проходки, максимізація проходки на долото, мінімізація вартості проходки 1 метра свердловини, і доступних ресурсів предметної області (*SDR* – *Subject Domain Resources*) у вигляді множини правил (*Rules* – *Subject Domain Rules*), а саме:

$$KB^{Set} = \langle SDT^{Set}, SDR^{Set}, Rules^{Set} \rangle.$$



Рис. 2.2. Виділення структури задач обробки даних процесу буріння нафтових і газових свердловин

База знань про «режими буріння» (*KB* – *Knowledge Base*) утворюватиме структура представлення та управління наборами фактів про режими та режимні параметри, правила та процедури логічного висновку на множині визначених об'єктів. Класичне рішення задачі розробки баз знань в загальному випадку вимагає: розробки програмних структур та засобів для представлення і зберігання знань; збір та розміщення знань предметної області в базі.

В загальному випадку фреймове представлення знань про режими буріння характеризується наявністю жорсткої структури елементів знань (рис. 2.3). Окрім того, кожен такий фрейм являтиме собою проіменований контейнер із набором складових частин – теж проіменованих елементів певного виду. Такими складовими можуть виступати: числа (наприклад, значення швидкості обертання бурового долота), текстові входження, що представляють властивості об'єктів (наприклад, твердість гірської породи), умови, процедури та інші фрейми. Зв'язки між фреймами описуються фреймом спеціального виду.

Режим буріння	
Назва режиму	<i>Оптимальний, форсований, швидкісний, силовий, спеціальний</i>
Оптимальний режим	
Ціль	<i>Найкращі техніко-економічні показники при заданих умовах буріння</i>
Режимні параметри	<i>1) швидкість обертання бурового долота 2) осьове зусилля на бурове долото</i>
Форсований режим	
Ціль	<i>Збільшення швидкості буріння, шляхом збільшення швидкості обертання долота або осьового зусилля на нього</i>
Режимні параметри	<i>1) швидкість обертання бурового долота 2) осьове зусилля на бурове долото</i>
Швидкісний режим	
Ціль	<i>Інтенсифікація руйнування породи шляхом збільшення швидкості обертання бурового долота</i>
Режимні параметри	<i>1) швидкість обертання бурового долота</i>
Силовий режим	
Ціль	<i>Інтенсифікація руйнування породи шляхом збільшення осьового зусилля на долото</i>
Режимні параметри	<i>1) осьове зусилля на бурове долото</i>
Спеціальний режим	
Ціль	<i>Виконання спеціальних бурових операцій</i>
Режимні параметри	<i>1) швидкість обертання бурового долота 2) осьове зусилля на бурове долото</i>

Рис. 2.3. Приклад фрейму, що описує режими буріння

В основі логічного представлення знань про режими буріння (*LKP* – *Logical Knowledge's Presentation*) слід покласти формальну теорію, що

виражається кортежем:

$$LKP = \left\langle BS^{Set}, \left(F : bs \in BS^{Set} \rightarrow Statements^{Set} \right)^{Set}, TF, FR \right\rangle,$$

де: BS^{Set} – скінченна множина базових символів, що визначають представлення лінгвістичних змінних, таких, наприклад, як: осьове зусилля на бурове долото, швидкість обертання бурового долота, механічна швидкість проходки та ін.; F^{Set} – множина формул у вигляді синтаксичних правил, за допомогою яких з елементів BS^{Set} формуються коректні твердження щодо способу та порядку ініціалізації та верифікації введених лінгвістичних термів; TF – множина істинних формул; FR – множина відношень між формулами (правилами).

Основним твердженням у численні предикатів слід розглядати твердження, що кожне просте висловлювання містить в собі інформацію про деякий об'єкт буріння і його властивості. Відповідно базу знань про режими буріння на основі предикатів можна представити у вигляді:

$$KB = \left\langle A, SR^{Set}, TF^{Set}, IR^{Set} \right\rangle,$$

де: A – алфавіт, сукупність використовуваних символів з яких формуються лінгвістичні входження; SR^{Set} – множина синтаксичних правил; TF^{Set} – початкова множина істинних формул; IR^{Set} – множина правил висновку для побудови похідних формул.

Семантичною мережею (*Semantic Network*) вважають спосіб представлення інформації, яка базується на графовій інтерпретації. Вважається, що предметну область можна представити у вигляді семантичної мережі, якщо її модель можна звести до набору двомісних предикатів, які згідно свого означення дозволяють подання у вигляді графів, де ребрам відповідають предикати, а вершинам аргументи. Для предметної області «режими буріння» можна використати представлення семантичної мережі представлене на рис. 2.4.

Таким чином, знання, що базуються на семантичній мережі можна формально представити кортежем:

$$K^S = \left\langle VS, A^{VS}, AVS, RTS, PS[VS] \right\rangle,$$

де: K^S ($Knowledges^{set}$) – множина знань; VS ($VerticesSet$) – множина вершин

графа; A^{VS} ($Attributes^{VerticesSet}$) – множина атрибутів приписаних вершинам; $A.VS$ ($Attributes.ValuesSet$) – множини значень атрибутів; RTS ($RelationsTypesSet$) – множина типів зв'язків, введених в мережі; $PS[VS]$ ($ProjectionsSet[VerticesSet]$) – множина проєкцій для вершин по видам зв'язків.

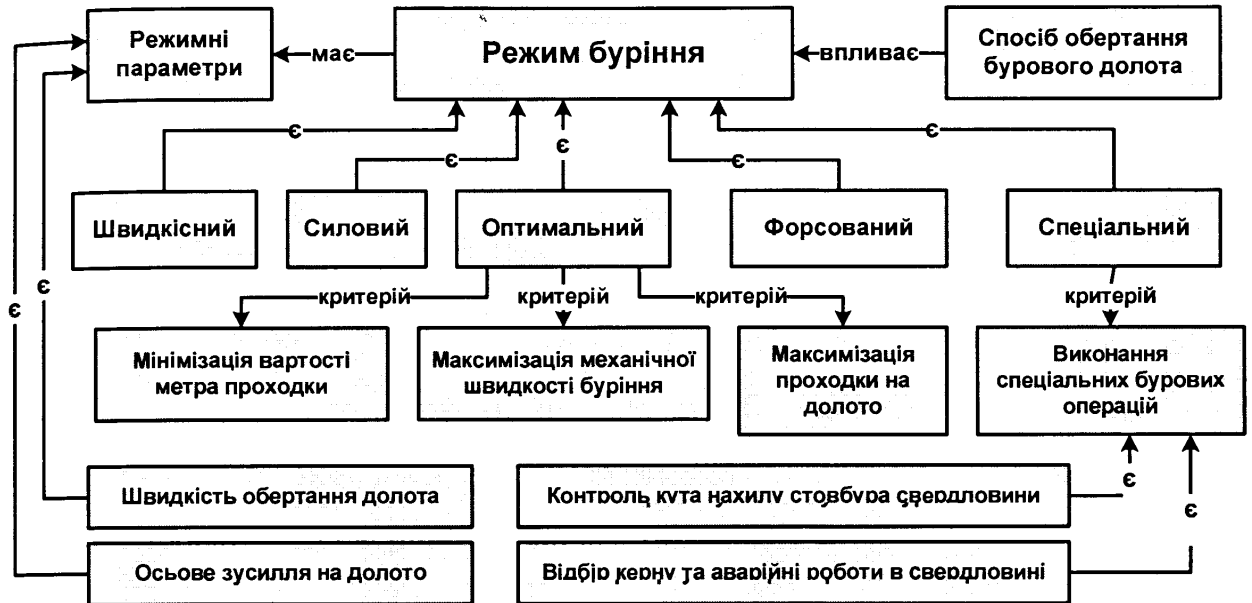


Рис.2.4. Семантична мережа, що описує режими буріння

Відповідна структуризація зв'язків задаватиметься кортежем:

$$RTS = \langle LR, SetR, HR, SemR, FR, , LR, AR, CR, QR \rangle,$$

де: LR ($LogicalRelations$) – логічні зв'язки:

$$LogicalRelations = \{ \wedge, \vee, \Rightarrow, \Leftrightarrow \};$$

$SetR$ ($SetRelations$) – множинні зв'язки:

$$SetRelations = \{ SubSets, ClassElements, ClassExamples \};$$

HR ($HierarchicalRelations$) – ієрархічні зв'язки:

$$HierarchicalRelations = \{ Inheritance, SubOrdering \};$$

$SemR$ ($SemanticRelations$) – семантичні зв'язки:

$$SemanticRelations = \{ VerticesGoals, GoalsOrdering \};$$

FR ($FunctionalRelations$) – функціональні зв'язки:

$$FunctionalRelations = \{ ObjectProperties \};$$

LR ($LinguisticRelations$) – лінгвістичні зв'язки:

$$LinguisticRelations = \{ LinguisticValues \};$$

AR (*AttributiveRelations*) – атрибутивні зв'язки:

$$AttributiveRelations = \{ AttributeValues \};$$

CR (*CasualRelations*) – казуальні зв'язки:

$$CasualRelations = \{ VerticesEvents, ImplicationsSet \};$$

QR (*QuantificationRelations*) – квантифікаційні зв'язки:

$$QuantificationRelations = QuantorSet = \{ \forall, \exists \}.$$

Продукційні правила представляються у вигляді:

$$\text{ЯКЩО } \langle Conditions^{set} \rangle \text{ ТОДІ } \langle Actions^{set} \rangle.$$

Наприклад,

$$\begin{array}{l} \text{Визначення_способу_буріння} \stackrel{def.}{=} \\ \stackrel{def.}{=} \left[\begin{array}{l} \text{ЯКЩО способ_буріння} = \text{турбінний ТОДІ} \\ \text{пошук_оптимального_зусилля_на_долото} \vee \\ \text{ЯКЩО способ_буріння} = \text{роторний ТОДІ} \\ \text{пошук} \left(\begin{array}{l} \text{оптимальне_зусилля_на_долото,} \\ \text{оптимальна_швидкість_обертання_долота} \end{array} \right) \end{array} \right] \end{array}$$

Процедура оцінювання умов здійснюється на введений множині фактів:

$$Evaluation(Condition^{Set}, Facts^{Set}).$$

Відповідно, кількість виконуваних дій залежить від кількості задоволених фактів предметної області. Побудова умови виконується як процедура інтерпретації твердження на множині фактів в процесі здійснення логічного висновку з метою задоволення визначеної цілі (рис. 2.5).

$$C \rightarrow IR(S^{Set}) \rightarrow \{ SR(F^{Set}), A^{Set}(I(D, GS)) \},$$

де: C (*Condition*) – умова; IR (*InterpretationRoutines*) – процедури інтерпретації; S^{Set} (*Statements^{Set}*) – множина тверджень; SR (*SearchRoutines*) – пошукові процедури; F^{Set} (*Facts^{set}*) – множина фактів; A^{Set} (*Actions^{Set}*) – множина дій; I (*Inferences*) – процедури логічного висновку; D (*Deducing*) – процедури дедукції; GS (*GoalSatisfaction*) – процедури задоволення цілі.

Значеннями категорійного атрибуту може виступати послідовність елементів і його загальний вигляд можна зобразити у наступній символній

формі:

$$EnumeratedAttr = \{Value_1, Value_2, \dots, Value_i\}_{i=1..n, n \in N}.$$

Наприклад, властивість «*Тип гірської породи*» можна описати за допомогою категорійного атрибуту наступним чином:

$$Тип_гірської_породи = \{м'яка, середньої_твердості, тверда, міцна\}$$



Рис. 2.5. Ієрархія цілей предметної області «Режими буріння»

Логічний атрибут у свою чергу може приймати одне з трьох значень: *True*, *False* та *Unknown* і у символічній формі може бути представленим як:

$$BooleanAttr = \{True, False, Unknown\}.$$

Наприклад, властивість «*Стан зношеності бурового долота*» можна представити у вигляді:

$$Чи_зношено_бурове_долото = \{так, ні, не_відомо\}$$

За допомогою числового атрибуту є можливим зберігання числових значень з деякого діапазону, який задається у наступній формі: початкове значення, кінцеве значення та значення по замовчуванню.

$$NumericalAttr = \{[Value_{min} .. Value_{max}], DefaultValue\}.$$

Наприклад, властивість «*Діаметр бурового долота*» за допомогою числового атрибуту представляється, як:

$$Діаметр_бурового_долота = \{[75 .. 490], 214\}$$

Типові заголовки таблиць баз даних, що описують режими буріння з яких виконуються видобування знань про процес буріння мають вигляд представлений у табл. 2.1.

Таблиця 2.1.

Типовий заголовок таблиці для видобування знань

Інтервал		Робота доліт					Режим буріння				
від	до	Проходка (м)	Час механічного буріння (год.)	Механічна швидкість проходки (м/год.)	Промивка	Час спуско-підймальних операцій	Час нарощування і зміни долота	Зусилля на долото	Тиск на стояку	Продуктивність насосів	Момент на роторі

Процес видобування знань [8-11, 65, 71-75] в базах даних має дві основних особливості: 1) ітеративність – користувач може повторювати один або більше кроків в процесі видобування, якщо результат не відповідає очікуванням; 2) інтерактивність – існує обґрунтована потреба взаємодії з користувачем з метою прийняття рішень.

Як показано на рис. 2.6 видобування знань в базах даних є багатокроковим процесом, основними компонентами якого є консолідація даних і їх підготовка, шляхом попередньої обробки, пошук шаблонів (видобування даних), оцінювання знань, уточнення знань.

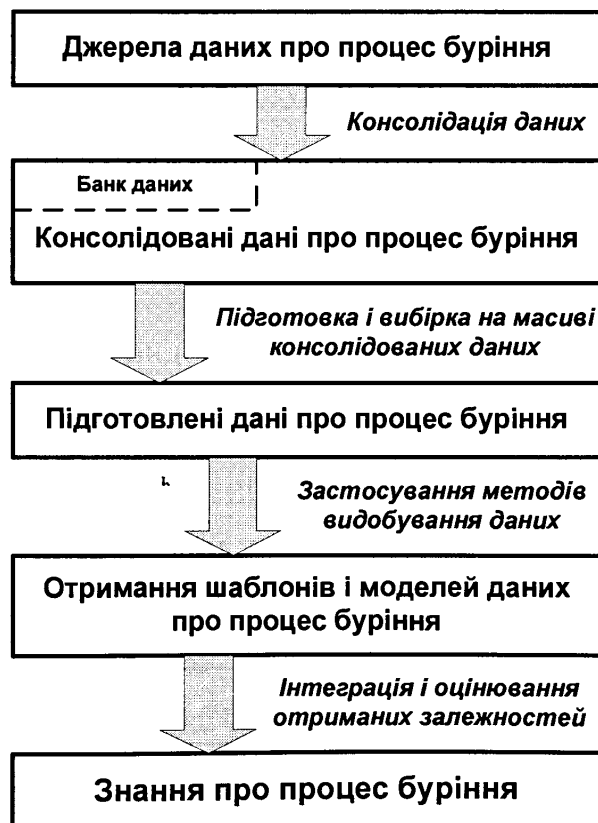


Рис. 2.6. Структура видобування знань про процес буріння

Попередня обробка даних процесу буріння є важливою в процесі видобування знань. Зокрема дані процесу буріння в більшості випадків містять спотворення, відсутність входжень (недостатня кількість атрибутів значень даних) і суперечливості.

2.2. Побудова класифікації даних про процес буріння як основа керування механізмом прийняття рішень

Метод класифікації [76-83] є однією з найбільш корисних технік у видобуванні значимих знань з баз даних. Класифікатори, наприклад, дерева рішень зазвичай видобуваються з таблиці записів (наприклад, карточок відпрацювання бурових доліт), кожна з яких представляє певний приклад. Також досить часто в реальних застосуваннях існують інші види знань, наприклад ті, якими володіють експерти буріння, які можуть бути використані у кон'юнкції із знаннями, що видобуваються з прикладів, які представляються таблицями баз даних. Прикладом такого виду знань досить часто виступають залежності серед атрибутів записів в базі даних. Для формально-логічного представлення причинних залежностей використовуються байєсівські каузальні карти.

Дамо формальне визначення проблеми видобування наборів частих входжень даних процесу буріння при видобуванні знань про режими буріння.

Множиною входжень даних процесу буріння вважатимемо скінченну множину, яку позначатимемо через *EntrySet*. Елементи *EntrySet* будемо позначати через e, e', e_1, \dots (наприклад, осьове зусилля на бурове долото, швидкість обертання бурового долота, тип гірської породи, витрата промивної рідини та ін.) та посилатися на них як на елементи входжень.

Множина елементів розглядатиметься як множина *EntrySet*. Множину елементів *EntrySet* будемо називати *i*-множиною елементів, якщо потужність $|EntrySet| = i$ де $|EntrySet|$ позначає потужність множини *EntrySet*.

Процес встановлення значень керованим параметрам процесу буріння

(таким як, осьове зусилля на бурове долото, швидкість обертання бурового долота, витрата промивної рідини) будемо розглядати як деяку транзакцію $TCPV$, що представляється відповідною множиною елементів.

В такому випадку мультимножину введених транзакцій можна розглядати як набір даних $DataSet$ процесу буріння. Для заданого набору даних процесу буріння $DataSet$, максимальну довжину транзакцій $DataSet$ будемо визначати як:

$$\max_{DataSet} \{|TCPV| \mid TCPV \in DataSet\}.$$

Тепер дамо формальне визначення проблемі видобування частих наборів даних про режими буріння. Нехай $DataSet$ є набором даних і $EntrySet$ є набором входжень (елементів). Тоді $EntrySet$ будемо вважати частим набором входжень (множиною елементів) по відношенню до $DataSet$ і з коефіцієнтом підтримки $SuppC$, де $0 < SuppC \leq 1$, якщо:

$$|\{TCPV \in DataSet \mid EntrySet \subseteq TCPV\}| \geq SuppC |DataSet|.$$

Нехай $OE_j(SuppC, DataSet)$ є множиною всіх j -наборів (множин) елементів, що є частими входженнями по відношенню до $SuppC$ та $DataSet$. Тоді шукана проблема означатиметься як задача визначення $OE_j(SuppC, DataSet)$ для кожного j , такого, що $0 < j \leq \max_{DataSet}$.

В результаті застосування методик видобування для наборів входжень даних про режими буріння на основі бази даних ПАТ Укрнафта є набори даних представлені в табл. 2.2.

Таблиця 2.2

Приклад набору частих входжень

Режим буріння			
Зусилля на долото	Тиск на стояку	Продуктивність насосів	Момент на роторі
	15	40	20
10	25	40	20
	60	48	

Системи на основі чітких та нечітких правил успішно застосовуються для вирішення задач класифікації на основі шаблонів [79, 84, 85]. По суті такі системи дозволяють утворювати відповідну платформу (фреймворк) для роботи з неповною, неструктурованою, слабоструктурованою інформацією, а також нечіткою (тобто такою, що описується лінгвістичними характеристиками) інформацією складних предметних областей та промислових застосувань. Важливо також, що традиційні програмні техніки базуються в основному на емпірично точних методах, в той час, як методики штучного інтелекту відносяться в своїй більшості до неімперативних, а саме функціональних та декларативних парадигм. Тому, як показують існуючі реалізації даного класу, саме гібридне поєднання двох даних методів дає найкращі результати в плані функціональності, та практичної застосовності.

Правила виду «**ЯКЩО-ТОДІ**» дозволяють максимально природнім шляхом представляти знання. В той же час як було показано вище в предметній області режимів буріння ми маємо справу з об'єктами та їх станами, що вимагає введення концепції релевантності, релевантних станів до поточного режиму буріння та відповідних умов задоволення накладених технологічних обмежень на керовані параметри режиму буріння. Тоді отримаємо відповідний додатковий шаблон правила виду:

ЯКЩО умова_релевантності \in істинна

ТОДІ умова_задоволення (обмеження) **ТЕЖ** \in істинною

В той же час введення нечіткого висновку [43, 68, 85-88] та виділення класу нечітких правил [89-94] можна виконувати на основі продукційних правил виду «**ЯКЩО-ТОДІ**», де умовами і висновками будуть виступати нечіткі висловлювання. Такі правила будемо записувати у вигляді:

$$\begin{aligned} \mathbf{ЯКЩО} \langle rc \in RC \rangle &\equiv \langle \text{умова релевантності} \rangle \\ \mathbf{ТОДІ} \langle sc \in SC \rangle &\equiv \langle \text{умова задоволення} \rangle \end{aligned} \quad (2.1)$$

Представлення (2.1) може використовуватися також у вигляді окремих складових. Кожне із нечітких висловлювань в умові правил розглядають як підумову, а кожен із висновків – як підвисновок.

Виділення класу нечітких правил базується на загальній структурі

«**ЯКЩО-ТОДІ**», тільки в умовах правил (антецедентах) та висновках правил (консеквентах) дозволяються нечіткі лінгвістичні входження. Тому правило виду «**ЯКЩО-ТОДІ**» в розширеній інтерпретації набуватиме вигляду «**ЯКЩО** $rc \in RC$ **ТОДІ** $sc \in SC$ », а $RC \times SC$ розглядається як деяка точка в просторі значень, в тому числі нечітких. Відповідно, від такого одиничного входження можна перейти до множини нечітких правил виду:

$$\text{ЯКЩО } rc \in RC_i \text{ ТОДІ } sc \in SC_j, i, j \in N$$

Наприклад,

ЯКЩО (Механічна_швидкість_буріння \in низька) **І** (Доцільність \in низька) **І**
 (Термін_служби_долота \in низький) **І** (Доцільність \in низька) **ТОДІ**
 (Зусилля_на_долото \in низьке) **І** (Швидкість_обертання_долота \in низька)

Таким чином, логічним шляхом побудови нечітких правил є розширення концепції початкових правил виду «**ЯКЩО** $rc \in RC$, **ТОДІ** $sc \in SC$ ». Суть розширення полягає в розгляді початкового правила при умові нечіткості складової SC :

$$SC \models \text{fuzzy} \mid RC \models \text{crispy}.$$

Очевидно, також слід розглянути випадок:

$$SC \models \text{fuzzy} \mid RC \models \text{fuzzy}.$$

В початковому правилі RC і SC розглядаються як деякі підмножини, а rc і sc є змінними, значення яких ранжуються на відповідних доменах D_1 і D_2 , що забезпечує деякий частковий опис відношення між змінними rc і sc .

В області систем на основі правил можна виділити три основних класи реалізацій:

1. Інтелектуальні системи на основі чітких правил з можливим включенням значень типу «невизначено / *unknown*»:

$$\left[\begin{array}{l} R_1^{\text{unknown}} : \text{ЯКЩО} \left[\text{умова}^1 = \{ \text{лог.}, \text{числ.}, \text{категор.} \} \right]^{[\text{yes/not}]} \\ \quad \left[\text{І / АБО} \right] \left[\dots \right] \text{ТОДІ} \left[\text{висновок}^1 = \{ \text{advice}, \text{assign}, \text{call} \} \right] \\ \dots \\ R_n^{\text{unknown}} : \text{ЯКЩО} \left[\text{unknown_умова}_k \right] \left[\text{І / АБО} \right] \left[\dots \right] \text{ТОДІ} \langle \text{RulesSubSet_умова}_m \rangle \end{array} \right.$$

2. Інтелектуальні системи на основі правил з невизначеністю (коефіцієнтом впевненості (CF) в істинності):

$$\begin{cases}
 R_1^{uncert} : \text{ЯКЩО } \langle \text{умова}^1 - CF_1^{con} \rangle \\
 \quad \text{ТОДІ } \langle \text{висновок}^1 - CF_1^{cl} \rangle [I / \text{АБО}] \langle \text{висновок}^2 - CF_2^{cl} \rangle \\
 \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots \\
 R_n^{uncert} : \text{ЯКЩО } \langle \text{умова}^{k-1} - CF_{k-1}^{con} \rangle [I / \text{АБО}] \langle \text{умова}^k - CF_k^{con} \rangle \\
 \quad \text{ТОДІ } \langle \text{висновок}^m - CF_m^{cl} \rangle
 \end{cases}$$

3. Інтелектуальні системи на основі множини правил в стандарті нечітких правил (*Fuzzy Rules*):

$$\begin{cases}
 R_1^{fuzzy} : \text{ЯКЩО } \langle \text{умова}^1 - lv_1^{in} \rangle \\
 \quad \text{ТОДІ } \left[\langle \text{висновок}^1 - lv_1^{out} \rangle : CF_1 \right] [I / \text{АБО}] \left[\langle \text{висновок}^2 - lv_2^{out} \rangle : CF_2 \right] \\
 \dots \\
 R_n^{fuzzy} : \text{ЯКЩО } \langle \text{умова}^{k-1} - lv_{k-1}^{in} \rangle [I / \text{АБО}] \langle \text{умова}^k - lv_k^{in} \rangle \\
 \quad \text{ТОДІ } \left[\langle \text{висновок}^m - lv_m^{out} \rangle : CF_m \right]
 \end{cases} ,$$

де CF_i , $1 \leq i \leq n$ – вагові коефіцієнти (*Certainty Factors* – коефіцієнти впевненості), що дозволяють виражати ступінь впевненості в істинності висновку. В граничному випадку коефіцієнт впевненості приймається рівним 1 ($CF = 1$), в загальному випадку 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.

Найпростіша задача класифікації для предметної області «режими буріння» полягає у виділенні класів $Class_j$, що відповідають режимам буріння:

$$Class^{Set} = \{Class_1, Class_2, \dots, Class_m\}_{m=1..n, n \in N}$$

певному об'єкту, що описується як точка в визначеному просторі станів:

$$X \in Space^N.$$

Таким чином, задача побудови класифікатора полягатиме в знаходженні

відображення:

$$Clf : Space^N \rightarrow Class^{Set},$$

що є оптимальним з точки зору деякого оціночного критерію $ev(Cl f)$, який визначає ефективність роботи класифікатора.

Основним елементом системи нечіткої класифікації є множина нечітких правил. Розглянемо основні типи нечітких правил, що можуть бути використані для побудови бази знань в загальному випадку:

1. Нечіткі правила з класом в консеквенті, що задаються структурою:

$$R_i : \text{ЯКЩО } [rc_1 \in RC_1^i] \wedge \dots \wedge [rc_n \in RC_n^i] \text{ ТОДІ } SC \in Class_j,$$

де: rc_1, \dots, rc_n – виділені особливості класифікаційної проблеми; RC_1^i, \dots, RC_n^i – лінгвістичні мітки, що використовуються для дискретизації доменів змінних; SC – клас $Class_j$, до якого належить шаблон.

2. Нечіткі правила з класом і коефіцієнтом впевненості в консеквенті представляються формально структурою:

$$R_i : \text{ЯКЩО } [rc_1 \in RC_1^i] \wedge \dots \wedge [rc_n \in RC_n^i] \text{ ТОДІ } [SC_i \in Class_j] : CF_i,$$

де CF_i – коефіцієнт впевненості для класифікації в класі $Class_j$ для шаблону, що належить до нечіткого підпростору, який обмежується антецедентом. Даний коефіцієнт впевненості визначається на основі співвідношення:

$$CF_i = Space_j^k / Space^k,$$

що представляє ступінь співпадання, як ступінь сумісності між антецедентом правила і значеннями, що представляють особливості класу в шаблоні, а саме: $Space_j^k$ – сума ступенів співпадання для шаблонів класу $Class_j$, що відповідно належить до нечіткої області, що обмежується антецедентом правила; $Space^k$ – сума ступенів співпадання для всіх шаблонів, що належать до даного нечіткого простору без врахування зв'язаних класів.

3. Нечіткі правила з коефіцієнтом впевненості для всіх класів в консеквенті представляються формально структурою виду:

$$R_i : \text{ЯКЩО } [rc_1 \in RC_1^i] \wedge \dots \wedge [rc_n \in RC_n^i] \text{ ТОДІ } (CF_1^i, \dots, CF_m^i),$$

де CF_k^i , $1 \leq k \leq m$ – ступінь верифікованості для i -того правила при передбаченні класу $Class_j$ для шаблону, що належить до нечіткої області, яка представляється антецедентом правила.

Тому пошук відповідного представлення для наявних знань є основою аналізу знань, що виконується засобами нечітких правил, а також основою їх валідації [89, 95, 96]. Для вирішення даної задачі виділимо наступні види правил:

1) градаційні правила – орієнтовані на методи інтерполяції та екстраполяції висновків (консеквентів), оскільки нечіткі множини в їх умовних частинах дозволяють представляти ідею схожості і, таким чином, дане правило дозволяє представляти висловлювання виду «**ЧИМ ближче** rc до ядра RC^{Core} , **ТИМ ближче** sc до ядра SC^{Core} ».

ЧИМ більше \in *зношені_зубці*

ТИМ більш_високі_значення_осьового_зусилля

\in необхідні_для_руйнування_гірської_породи

2) можливісні правила – забезпечують спосіб отримання консеквентів з ваговими коефіцієнтами, акумуляція яких здійснюється диз'юнктивно.

ЧИМ більша \in *глибина_свердловини* **ТИМ вища** \in *твердість_гірських_порід*

3) правила з невизначеністю – є однією з концепцій дедуктивного висновку, оскільки їх консеквенти поєднуються кон'юнктивно, незважаючи на те, що містять входження з невизначеністю. Такі правила з невизначеністю в умовах дозволяють виражати типовість і визначеність при перетворенні шаблону «**ЧИМ більше** $rc \in RC$ » в шаблон «**ТИМ більш типово** $rc \in RC$ ».

Нечіткі правила виду «**ЯКЩО-ТОДИ | ДОКИ**» на формальному рівні можуть представлятися у вигляді «**ЯКЩО** $rc \in RC$ **ТОДИ** $sc \in SC$ | **ДОКИ** $rc_1 \in rc_1$ » і часто інтерпретуються як правила з винятками. Даний вид правил може отримуватися як похідний від звичайних правил в процесі їх аналізу.

2.3. Розширення базового способу класифікації режимів буріння на основі правил

Знання в домені «режими буріння» можна представити з використанням байєсових каузальних відображень [97, 98]. На основі таких представлень є можливим видобування певних правил, які розглядаються як доменні правила і, відповідно, можуть бути використані для управління деревовидним процесом пошуку рішення щодо оптимізації режимів буріння. Сутності, які включаються в побудову байєсових каузальних відображень є концепції, що виражаються атрибутами і їх значеннями. В той же час, доменні правила утворюються з тих же самих концепцій і в деяких випадках можуть розглядатися як покращення ефективності представлень, що використовуються у відображеннях. Починаючи з представлення доменних знань у формі байєсових каузальних відображень ми отримаємо можливість ідентифікації виділених правил виду:

$$RC \xrightarrow{prb} SC.$$

$$\left[\begin{array}{l} \text{Осьове_зусилля} = \text{Opt.} \\ \text{Швидкість_обертання} = \text{Opt.} \end{array} \wedge \right] \xrightarrow{0,9} \left(\begin{array}{l} \text{Найкращі_показники_} \\ \text{поглиблення_свердловини} \end{array} = \text{True} \right).$$

Це правило означає, що коли RC (умова релевантності по осьовому зусиллю та швидкості обертання долота) має місце, тоді SC (умова задоволення щодо оптимально доцільних показників поглиблення свердловини) має місце з ймовірністю prb (в нашому випадку, як показує аналіз промислових даних $prb = 0,9$). Відповідно всі досліджувані правила матимуть подібну форму. Тобто вони утворюються шляхом складання лівої частини RC , як умови релевантності, міри ймовірності prb та правої частини SC , як умови задоволення в термінах накладених обмежень. Відповідно ліва частина правила може бути:

1) елемент «значення атрибуту відношення» $RC = rc$, що посилається на деякий прямий зв'язок, в нашому випадку матимемо, наприклад, що «Осьове_зусилля_на_долото = високе». В даному випадку доменне правило розглядається як проста імплікація або просте правило;

2) більше чим один елемент «значення атрибуту відношення» $RC = rc \cup SC^1 = sc^1$, що посилається на деякий прямий зв'язок, в нашому випадку можна розглядати представлення виду: «Осьове_зусилля_на_долото = високе \cup Показники_поглиблення_свердловини = найкращі». В такому випадку доменне правило розглядається як комплексна імплікація або комплексне правило;

3) елемент «значення атрибуту відношення», що посилається на деякий непрямий зв'язок, тобто $RC = rc \parallel_{SC^1=sc^1}$, в нашому випадку матимемо, що «Осьове_зусилля_на_долото = високе $\parallel_{\text{Показники_поглиблення_свердловини = найкращі}}$ » В даному випадку доменне правило розглядається як розширена проста імплікація або розширене просте правило.

4) більше чим один елемент «значення атрибуту відношення», що посилається на комбінацію прямих і непрямих зв'язків, тобто $RC = rc \cup SC^1 = sc^1 \parallel_{SC^2=sc^2}$, в нашому випадку отримаємо представлення виду: «Осьове_зусилля_на_долото = високе \cup Показники_поглиблення_свердловини = найкращі $\parallel_{\text{Якість_бурових_робіт=задовільна}}$ » В даному випадку доменне правило розглядається як непряма комплексна імплікація або непряме комплексне правило.

Таким чином, права частина правила завжди буде складатися тільки з одного елемента. Наприклад, проста імплікація виду $RC = rc \xrightarrow{prb} SC = sc$ стверджуватиме, що коли RC є рівним rc , тоді SC є рівним sc з ймовірністю prb .

У випадку розширення простої імплікації виду $RC = rc \parallel_{SC^1=sc^1} \xrightarrow{prb} SC = sc$ матимемо, що дане правило стверджує, що є можливим для $RC = rc$ будувати певне судження щодо того, що SC є рівним sc тільки проходячи через умову, що $SC^1 = sc^1$.

Це очевидно є можливим тільки у випадку коли нічого не відомо про значення асоційоване з SC^1 . Нехай відомо, що $SC^1 = sc^1$, тоді із рівності $RC = rc$ ми не зможемо нічого вивести щодо SC^1 , оскільки SC^1 вже є відомим.

Матимемо подібну ситуацію у випадку, якщо б було відомо, що SC^1 є рівним sc^1 . Таким чином, розширені імплікації є способом зв'язування атрибутів, що не можливо зв'язати напряму. Тоді ймовірність асоційована до цих правил буде залежати від ймовірності двох виділених зв'язків і буде меншою ніж та, що асоційована до кожного зв'язку окремо.

На основі попередніх представлень ми можемо видобути комплексну імплікацію виду $RC = rc \cup CS^1 = sc^1 \xrightarrow{prb} SC = sc$. Наприклад, у нашому випадку:

«Осьове зусилля на долото = високе \cup Показники поглиблення свердловини = найкращі $\xrightarrow{0,9}$ Режим буріння = оптимальний

В даному випадку матимемо праву частину ($SC = sc$), що напряму залежить від двох інших елементів. Наведені приклади стосуються правил побудованих на основі дискретних атрибутів. Проте, та сама ситуація матиме місце для правил на неперервних атрибутах і для правил видобутих на дискретних і неперервних атрибутах одночасно.

Представлення відображення може змінюватися також в залежності від видобутих правил. Припустимо, що відомо тільки, що $RC = rc$ і розглянемо деякий виділений фрагмент. З цього фрагменту ми можемо видобути дві простих імплікації:

$$\left[\begin{array}{l} RC = rc \xrightarrow{prb_1} SC = sc \\ RC = rc \xrightarrow{prb_2} SC^1 = sc^1 \end{array} \right.$$

Осьове зусилля на долото = високе $\xrightarrow{0,7}$ Швидкість проходки = висока
Осьове зусилля на долото = високе $\xrightarrow{0,8}$ Термін служби долота = низький

Тоді з SC^1 ми можемо зробити деякий вивід, щодо $SC = sc$, і, таким чином, ми можемо видобути розширене представлення виду $RC = rc \parallel_{SC^1=sc^1} \xrightarrow{prb} SC = sc$. Дана ситуація буде аналогічна тій при якій би ми мали подвійну імплікацію з $RC = rc$ до $SC = sc$ і тоді робили висновок про те, що починаю з $RC = rc$ ймовірність того, що SC буде рівне sc буде більшою ніж та, що асоційована з ребром, що з'єднує RC та SC . Для уникнення даного

виду проблем можна розглядати відображення як деяку динамічну сутність в тому числі по відношенню до видобутих правил. Для реалізації даної задачі необхідно видалити кожне з вхідних ребер у вузлах, що були розглянуті як праві частини простих правил.

Побудовані вище твердження мають місце також для обмежених доменних правил. Незалежно від їх представлення, коли всі обмеження є верифікованими ми можемо перезаписати правила як представлення простої імплікації асоційованої до одного із обмежень. Відповідно, коли одне або більше обмежень не є верифікованими, то частина відображення, що представляє обмежене правило не буде представлена.

Основна задача полягає у використанні ймовірності вираженої правилом для зміни розподілу значень визначеного атрибуту в підмножині, що досліджується. Така підмножина має властивість, що всі значення асоційовані до атрибутів, які з'являються на шляху від кореня дерева до кореня його піддерева мають однакове значення.

Ми можемо використовувати інформацію отриману при проходженні шляху для модифікації відомих зв'язків у відображенні і відповідно в його топології.

На основі введених представлень можна видобути наступні правила:

R1. Просте правило побудоване на атрибуті SC^i :

$$RC = rc \xrightarrow{prb} SC^i = sc^i.$$

Осьове _ зусилля _ на _ долото = високе $\xrightarrow{0,6}$ *Швидкість _ походки = висока*.

R2. Комплексне правило побудоване на атрибуті SC :

$$(RC = rc \cup SC^2 = sc^2) \xrightarrow{prb} SC = sc.$$

$\left(\begin{array}{l} \text{Осьове _ зусилля _ на _ долото = високе} \cup \\ \text{Якість _ бурових _ робіт = задовільна} \end{array} \right) \xrightarrow{0,8} \text{Режим _ буріння = оптимальний}$

R3. Розширене правило побудоване на атрибуті SC^j , що проходить через SC^i :

$$(RC = rc \parallel_{SC^i=sc^i}) \xrightarrow{prb} SC^j = sc^j.$$

$$\begin{aligned} \text{Осьове_зусилля_на_долото} = \text{високе} \parallel \text{Швидкість_проходки} = \text{середня} \xrightarrow{0,7} \\ \xrightarrow{0,7} \text{Термін_служби_долота} = \text{низький} \end{aligned}$$

З іншого боку, якщо ми розглянемо відповідне дерево, то ми зможемо побачити, що пари (SC^2, sc^2) , (SC, sc) та (SC^k, sc^k) трапляються на шляху з кореня до RC . При цьому ребра з RC до SC не розглядаються, оскільки значення SC є відомим, але включаються ребра з SC^k до SC^j , оскільки ми маємо інформацію щодо атрибуту SC^k , який знаходиться в поточному шляху і ми можемо використати його для формування нового правила на атрибуті SC^j . Таким чином, видобуті правила матимуть вигляд:

R4. Просте правило побудоване на атрибуті SC^j

$$RC = rc \xrightarrow{prb} SC^j = sc^j.$$

$$\text{Осьове_зусилля_на_долото} = \text{високе} \xrightarrow{0,8} \text{Термін_служби_долота} = \text{низький}$$

R5. Непряме комплексне правило побудоване на атрибуті SC^j , що проходить через CS^i і використовує SC^k .

$$(SC^k = sc^k \cup SC^i = sc^i \parallel_{RC=rc}) \xrightarrow{prb} SC^j = sc^j.$$

$$\left(\begin{array}{l} \text{Проходка_на_долото} = \text{висока} \cup \\ \text{Швидкість_проходки} = \text{середня} \parallel \text{Осьове_зусилля_на_долото} = \text{середнє} \end{array} \right) \xrightarrow{0,7} \\ \xrightarrow{0,7} \text{Термін_служби_долота} = \text{високий}$$

Ймовірність пов'язана з простими правилами може бути інтерпретована як вид ймовірності пов'язаної з ребрами, що з'єднують вузли у відображенні. Відповідно, ймовірність пов'язана з розширеними простими правилами буде інтерпретуватися як добуток ймовірностей, асоційованих з кожним ребром. Як було показано вище, ці правила можуть бути видобуті тільки якщо не відомо нічого про стан середніх вузлів.

Тоді, починаючи з RC , нам буде відомо, що коли має місце $RC = rc$, тоді матиме місце $SC = sc$ з ймовірністю prb . Таким чином, починаючи з SC ми можемо вивести, що коли $SC = sc$, то $SC^1 = sc^1$ з ймовірністю prb_1 і, таким чином:

$$RC = rc \parallel_{SC=sc} \xrightarrow{prb \times prb_1} SC^1 = sc^1.$$

$$\begin{aligned} \text{Осьове зусилля на долото} = \text{високе} \parallel_{\text{Швидкість проходки} = \text{висока}} \xrightarrow{0,7 \times 0,8} \\ \xrightarrow{0,7 \times 0,8} \text{Термін служби долота} = \text{низький} \end{aligned}$$

Ця ідея може бути розширена до рівня правила пов'язаного з непрямым ланцюгом довжиною $l > 1$. При цьому, слід відмітити, що не залежно від l ймовірність пов'язана з розширеними правилами завжди буде обчислюватися однаковими способами. Обчислення ймовірності для комплексних імплікацій є складнішим процесом.

Нехай, потрібно визначити ймовірність того, що SC^1 є рівним sc^1 (*термін служби долота = низький*) при відомих значеннях $RC = rc$ (*осьове зусилля на долото = високе*) і $SC = sc$ (*швидкість проходки = висока*). Тоді, відповідно, потрібно розглянути дві події $P_1 = (SC^1 = sc^1 \parallel RC = rc)$ та $P_2 = (SC^1 = sc^1 \parallel SC = sc)$ і обчислення ймовірності матиме вигляд:

$$\text{Prb}(P_1 \cup P_2) = \text{Prb}(P_1) + \text{Prb}(P_2) - \text{Prb}(P_1 \cap P_2).$$

В даному прикладі введені події є умовно незалежними, тобто не має ребра, що їх з'єднує. Тоді, можна обчислити ймовірність пов'язану з перетином незалежних подій, як добуток відповідних ймовірностей. Звідки отримуємо, що:

$$\text{Prb}(P_1 \cup P_2) = \text{Prb}(P_1) + \text{Prb}(P_2) - \text{Prb}(P_1) * \text{Prb}(P_2).$$

Задача видобування асоціативних правил при заданих мінімальних порогових значеннях підтримки і впевненості може бути розбита на дві підпроблеми:

1) пошук всіх входжень (множин входжень), що мають підтримку транзакцій вищу за значення мінімальної підтримки. Відповідно, підтримка для множини входжень є кількістю транзакцій, що містять задану множину входжень. Множина входжень із значенням підтримки більшим або рівним пороговому значенню розглядається як множина частих входжень (або *обширна множина входжень*). Дана підзадача переадресується на виконання алгоритму APRIORI [12].

2) генерація всіх асоціативних правил із мінімальною підтримкою і

впевненістю з множини всіх обширних множин входжень. Дана задача переадресується на виконання прямого алгоритму, що включає наступні кроки: 1) для кожної обширної множини входжень *EntrySet* знайти всі не порожні підмножини; 2) для кожної такої підмножини *rc* з *EntrySet* вивести правило $sc \rightarrow rc$ якщо і тільки, якщо:

$$CF = \frac{SF(sc)}{SF(rc)} \geq CF^{\min} = CF^{thres},$$

де: CF – коефіцієнт впевненості; SF – коефіцієнт підтримки; CF^{\min} – мінімальне значення коефіцієнта впевненості; CF^{thres} – порогове значення коефіцієнта впевненості.

Видобування асоціативних правил використовується для вирішення задач класифікації [73, 80, 81]. В роботах [74, 75] представлено огляд асоціативних правил і алгоритмів видобування для множин частих входжень.

2.4. Побудова абдуктивного фреймворку прийняття рішень при виборі значень режимних параметрів буріння

Проектований підхід дозволяє безпосередньо виконувати обчислення значень частих наборів даних процесу буріння заданого розміру, тобто без обчислення значень проміжних наборів даних, шляхом двох проходжень через набір. Більше того, необхідна кількість пам'яті є відомою наперед і є прийнятною за умов початкової гіпотези, що заданий набір даних процесу буріння є проріджений.

Пропоноване рішення базується на підході побудови оптимізаційних запитів, запропонованому в роботі [81]. В даній роботі запропоновано простий алгоритм пошуку всіх запитів з частотою більшою чим, або рівною до заданого порогового значення tv із заданого потоку запитів (маються на увазі оптимізаційні запити). Очікувані результати базуються на методі звуження проблеми обчислення частих наборів даних до проблеми пошуку класу оптимізаційних запитів.

Побудуємо формальне означення проблеми оптимізаційних запитів для

предметної області «режими буріння». Для цього використаємо деякий скінченний алфавіт Q^{Set} . Відповідно, елементи Q^{Set} будемо позначати через q, q', q_1, \dots і посилатися на них як на запити щодо оптимізації режимних параметрів буріння. Поток запитів будемо вважати послідовності виду $qs = \langle q_1, \dots, q_n \rangle$, такі, що $q_i \in Q^{Set}$ для кожного $1 \leq i \leq n$. Довжину потоку n будемо позначати як $|qs|$, наприклад, при оптимізації режимних параметрів наступні запити утворюватимуть потік:

1) знайти значення осьового зусилля на долото при якому механічна швидкість проходки 15 м/год.;

2) знайти значення швидкості обертання бурового долота при якому проходка на долото 400 м;

3) вибрати тип бурового долота, яке буде максимально відповідати характеристикам породи в якій відбувається буріння.

Для заданого потоку qs і деякого запиту q позначимо через $Freq_{qs}(q)$ кількість входжень (частоту) q в qs .

Нехай Q^{Set} є множиною запитів, а qs є потоком запитів і tv є дійсним числом, таким, що $0 < tv \leq 1$. Тоді проблему побудови запитів щодо оптимізації режимних параметрів означимо як задачу визначення підмножини $Q^{Sub}(tv, qs)$, що визначається як:

$$Q^{Sub}(tv, qs) = \{q \in Q^{Set} \mid Freq_{qs}(q) > tv|qs|\}.$$

Якщо q належить до $Q^{Sub}(tv, qs)$, то ми можемо сказати, що q є видом оптимізаційного запиту по відношенню до Q^{Set} , qs та tv .

В даному контексті важливо відмітити, що в конкретному застосуванні проблем видобування частих наборів даних і оптимізаційних запитів, вхідна множина $DataSet$ та qs є, як правило є великою і може бути зчитаною тільки послідовно, тобто відповідно до ідентифікаторів транзакції в першому випадку і до порядку послідовності в другому.

В роботі [99] представлено простий і точний алгоритм для рішення

проблеми оптимізаційних запитів. Функціональність алгоритму наступна: для заданого потоку qs і дійсного числа tv , що називається пороговим значенням, алгоритм вимагає одного проходу через вхідний потік з метою пошуку надмножини шуканих $Q^{Sub}(tv, qs)$. Може бути також виконане друге проходження для знаходження другого значення $Q^{Sub}(tv, qs)$ із збереженням тих самих характеристик ефективності.

Перетворення проблеми видобування частих входжень набору даних в проблему оптимізаційних запитів полягатиме у прив'язці до кожного i -набору елементів певного запиту і подальшої побудови відповідного підходящого потоку запитів $qs_{DataSet}$, починаючи із заданого набору даних $DataSet$, таким чином, що проблема визначення $OE_i(SuppC, DataSet)$ перетворюється в проблему визначення $Q^{Sub}(tv, qs_{DataSet})$, де tv є функцією від $\max_{DataSet}$ та i . Після того, як означено таке перетворення, можна використати довільний існуючий алгоритм для проблеми оптимізаційних запитів з метою рішення вихідної проблеми видобування частих входжень наборів даних. Зокрема можна використати алгоритми які утримують кількість проходжень через набір даних настільки малим наскільки це можливо.

Для заданої скінченної множини Set і натурального числа n позначимо через Set^n множину всіх підмножин $Set_1 \subseteq Set$ таких, що $|Set_1| = n$. Крім того, для двох заданих послідовностей $seq = \langle e_1, \dots, e_n \rangle$ та $seq' = \langle e'_1, \dots, e'_{n_2} \rangle$ позначимо через $seq :: seq'$ послідовність $\langle e_1, \dots, e_n, e'_1, \dots, e'_{n_2} \rangle$. Для цього визначимо перетворення, яке для заданої проблеми видобування частих входжень наборів даних буде відповідну проблему оптимізаційних запитів.

Оскільки виконання запиту на оптимізацію режимних параметрів зводиться до встановлення відповідних значень керованим параметрам, таким як осьове зусилля на бурове долото та швидкість обертання бурового долота, то можна відповідно виконати перетворення проблеми видобування частих входжень наборів значень керованих параметрів в проблему запитів оптимізації

режимів буріння.

Нехай $EntrySet$ є набором елементів, а $DataSet$ є набором даних і i є натуральним числом, таким, що $i \leq \max_{DataSet}$. Тоді:

1) алфавіт $[Q^{Sub}]^{EntrySet}$ визначається як множина $EntrySet^i$, причому кожна множина в $EntrySet^i$ є символом в алфавіті;

2) для кожної $TCPV \in DataSet$, потік асоційований з $TCPV$ є послідовністю $seq_{TCPV} = \langle EntrySet_1, \dots, EntrySet_{n_{TCPV}} \rangle$, такою, що $\{EntrySet_1, \dots, EntrySet_{n_{TCPV}}\} = TCPV^i$ і кожне $EntrySet_j \in TCPV^i$ трапляється в seq_{TCPV} точно один раз;

3) якщо $DataSet = \{TCPV_1, \dots, TCPV_n\}$, тоді потік $seq_{DataSet}$ асоційований з $DataSet$ є послідовністю:

$$seq = seq_{TCPV_1} :: seq_{TCPV_2} :: \dots :: seq_{TCPV_n}$$

Слід відмітити, що в приведеному означенні не означається потік асоційований з транзакціями. Подібним чином, можна говорити про потік асоційований з набором даних $DataSet$. Дійсно для заданої транзакції $TCPV_i$ існує багато способів побудови потоку seq_{TCPV_i} , що відповідає йому і, відповідно, може існувати багато способів побудови $seq_{DataSet}$. Тому, фактично, вибір $seq_{DataSet}$ є не релевантним з точки зору коректності такого перетворення.

Дослідження абдукції виконується в контексті логічного програмування [100, 105].

Фреймворк абдуктивного логічного програмування означається у вигляді триплета $\langle LP, BS, LF^{Con} \rangle$, що складається з логічної програми LP , множини базових виводимих атомів BS і множини логічних формул LF^{Con} , що називаються обмеженнями цілісності. Атоми в BS є можливими абдуктивними гіпотезами, які можуть розглядатися як припущення з метою пояснення заданих спостережень в контексті LP , при умові, що ці припущення є консистентними (несуперечливими) з обмеженнями цілісності в LF^{Con} . В багатьох випадках

зручно визначати BS як множину виводимих предикатних символів з деяким планованим значенням, таким, що кожен базовий атом, чий предикатний символ є в BS є можливою гіпотезою.

Для початково заданого абдуктивного фреймворку загальне визначення абдуктивних пояснень можна ввести наступним чином.

Нехай $\langle LP, BS, LF^{Con} \rangle$ є абдуктивним фреймворком і нехай G є ціллю, що в контексті визначення режимів буріння може прийняти такі значення як: максимізація механічної швидкості проходки, максимізація проходки на долото, мінімізація вартості метра проходки і т. д. Тоді під абдуктивним поясненням для G будемо розуміти множину $\Delta \subseteq BS$ базових виводимих атомів, таких, що: 1) $LP \cup \Delta \models G$; 2) $LP \cup \Delta \cup LF^{Con}$ є консистентним (несуперечливим).

Нехай $\langle LP, BS^1, LF^{Con} \rangle$ є абдуктивним фреймворком, Δ_0 є множина виводимих входжень і G є ціллю. Вважають, що Δ є абдуктивним поясненням для G при заданому Δ_0 якщо $\Delta' \subset \Delta$ є абдуктивним поясненням для G .

При цьому слід відмітити, що таке формулювання імплікує, що задана множина виводимих входжень Δ' , Δ_0 повинна бути консистентною (несуперечливою) із заданими обмеженнями цілісності LF^{Con} . В деяких випадках інтерес для дослідження представляє обчислення мінімальності абдуктивних пояснень.

Зокрема при дослідженні режимів буріння мінімальними абдуктивними поясненнями для цілі «максимальна механічна швидкість проходки» будуть оптимізація зусилля на бурове долото та оптимізація швидкості обертання бурового долота, при цьому максимальне зусилля на бурове долото обмежується міцністю конструкції долота і стійкістю бурової установки, що утворюють обмеження цілісності.

Нехай $\langle LP, BS^1, LF^{Con} \rangle$ є абдуктивним фреймворком, Δ_0 є множиною виводимих входжень і G є ціллю. Вважається, що Δ є Δ_0 -мінімальним поясненням для G якщо Δ є поясненням для G при заданому Δ_0 і для жодної

власної підмножини Δ' для Δ ($\Delta' \subset \Delta$) є поясненням для G при заданому Δ_0 .

В рамках такого фреймворку можна визначити абдуктивний кортеж у вигляді пари $\langle HS, Hyp^{Set} \rangle$, де HS є множиною тверджень Хорна. Змінні в HS є неявно універсально квантифікованими. Нехай HS' є множиною базових інстанціацій елементів з HS , а Hyp^{Set} є множиною атомів, що називаються очікуваними або можливими гіпотезами. Нехай $[Hyp^{Set}]'$ є множиною базових інстанціацій елементів Hyp^{Set} . Тоді слід висунути наступні припущення стосовно базової теорії:

1) не існує правил в HS' заголовки яких уніфікуються з деяким членом в Hyp^{Set} ;

2) якщо HS' є множиною базових інстанціацій елементів HS то є можливим присвоєння натуральних числових значень до кожного базового атома такого, що для кожного правила в HS' , атоми в тілі правила є строго меншими, ніж атоми в заголовках;

3) для кожного значення rc , що не передбачалося спочатку, якщо rc є істинним, тоді принаймні одне з тіл SC_i , таке, що $rc \leftarrow SC_i$ повинно бути істинним. Крім того, можна стверджувати, що правила в HS' мають місце для кожного атома, що представляється як базовий (тобто такий, що не є гіпотезою);

4) тіла правил в HS' для кожного атома є взаємовиключними.

На формальному рівні фреймворк абдукції з ваговими коефіцієнтами є способом представлення знань з домену предметної області, що моделюються кортежем:

$$AF^{CF} = \langle Hyp^{Set}, Rule^{Set}, f, G \rangle,$$

де: Hyp^{Set} – множина гіпотез або пропозиційних тверджень; $Rule^{Set}$ –

множина правил виду:

$$(hyp_1 \wedge hyp_2 \wedge \dots \wedge hyp_n) \rightarrow hyp_{n+1},$$

де: $hyp_1, \dots, hyp_{n+1} \in Hyp^{Set}$; f – відповідна функція,
 $f: Hyp^{Set} \rightarrow [Rule^{Set}]^+$, де $f(hyp)$ розглядається як вагове значення
 очікуваності гіпотези $hyp \in HypSet$; $G \in HypSet$ – множина цілей або
 підтверджень.

В нашому випадку матимемо:

$$(hyp_1 \wedge hyp_2 \wedge hyp_3 \wedge hyp_4 \wedge hyp_5) \rightarrow hyp_6$$

де: hyp_1 – раціональний режим буріння; hyp_2 – форсований режим буріння;
 hyp_3 – швидкісний режим буріння; hyp_4 – силовий режим буріння; hyp_5 –
 спеціальний режим буріння; hyp_6 – оптимальний режим буріння.

$$Rule^{Set} = \{rule_1, rule_2, rule_3, rule_4, rule_5, rule_6\}$$

де:

$rule_1$: **ЯКЩО** значення_одного_або_декількох_показників_режиму_буріння \in
 оптимальним **І** конфігурація_обладнання \in стала **ТОДІ** режим_буріння \in hyp_1 ;

$rule_2$: **ЯКЩО** значення_механічної_швидкості_буріння \in максимальним **ТОДІ**
 режим_буріння \in hyp_2 ;

$rule_3$: **ЯКЩО** збільшення_механічної_швидкості_буріння \in
 результатом_збільшення_швидкості_обертання_бурового_долота **ТОДІ**
 режим_буріння \in hyp_3 ;

$rule_4$: **ЯКЩО** збільшення_механічної_швидкості_буріння \in
 результатом_збільшення_осьового_зусилля_на_бурове_долото **ТОДІ** режим_буріння
 \in hyp_4 ;

$rule_5$: **ЯКЩО** основною_метою \in виконання_спеціальних_бурових_операцій
ТОДІ режим_буріння \in hyp_5 ;

$rule_6$: **ЯКЩО** основною_метою \in досягнення_найкращих_техніко-
 економічних_показників_буріння **ТОДІ** режим_буріння \in hyp_6 .

Типові зразки структуризованих фактів і правил даного виду наведено в
 додатках (див. додаток Б).

Таким чином, кінцеве завдання полягає в пошуку доведення з найменшим

ваговим коефіцієнтом для заданого підтвердження, де вага доведення обчислюється як сума ваг усіх гіпотез, що повинні припускатися з метою завершення доведення. Відповідно, гіпотеза може бути перетворена в істинну двома способами: 1) вона може припускатися як істинна, шляхом оцінки ваги її припущення; 2) шляхом доведення.

При цьому слід відмітити, що якщо гіпотеза проявляється як наслідок правила $rule_i$, тоді вона може бути доведена без визначення ваги, як така, що є істинною шляхом перетворення всіх антецедентів у $rule_i$ в істинні, через припущення або доведення. Якщо відповідна гіпотеза не проявляється як консеквент для жодного правила, тоді вона не може бути доведена і вона може бути встановлена як істинна тільки шляхом припущення. Якщо вага гіпотези є достатньо великою, тоді вона не може бути встановлена шляхом припущення і вона може бути тільки доведена. Для цього множина гіпотез $HypSet$ розділяється на дві множини Hyp_1^{Set} та Hyp_2^{Set} . Перша множина містить гіпотези, що не можуть бути доведені, тобто такі, що ніколи не проявляються в правих частинах правила. Друга множина містить всі інші гіпотези.

В загальному випадку в абдуктивних міркуваннях множина $[Hyp^{Set}]'$ розглядається як множина здійснених рішень для проблеми доведення з найменшою вагою, якщо відповідно вона є підмножиною для Hyp_1^{Set} , що є достатнім для доведення множини цілей G . Відповідно, оптимальним рішенням для проблеми доведення з найменшою вагою є здійснене рішення, що мінімізує задану загальну вагу, тобто суму ваг всіх гіпотез $[Hyp^{Set}]'$.

В роботі [105] розглядається застосування в якому система на вході отримує деякий абдуктивний фреймворк $AF = \langle LP, BS, LF \rangle$, як спосіб представлення знань і дві множини базових атомів, як приклади. Розвинута в даному дослідженні концепція ACL дозволяє знаходити абдуктивну теорію $AF' = \langle LP', BS, LF' \rangle$ з $LP' \supset LP$ та $LF' \supset LF$ такі, що $AF' \models_{BS} E^+$ та, $AF' \not\models_{BS} E^-$, де E^+ відповідає за кон'юнкцію всіх позитивних прикладів (що

позначаються знаком «+»); відповідно E^- відповідає за диз'юнкцію всіх негативних прикладів (що позначаються знаком «-»).

2.5. Застосування абдуктивного підходу виконання класифікації даних про режими буріння

Основне завдання полягає в тому, щоб показати як класифікаційна задача вибору режиму буріння може бути перетворена безпосередньо в абдуктивну проблему, шляхом застосування дерев рішень. Для вирішення даної задачі необхідно ввести формальні означення, які описують процес класифікації на основі дерев рішень і дозволяють виконувати трансформацію дерев рішень у відповідну абдуктивну логічну програму.

Для заданого дерева рішень T і множини шляхів $path^{set}$ позначимо через $Attr(path^{set})$ множину наборів $\{tcp_1^j = v_1^j, \dots, tcp_n^j = v_n^j\}$, де кожне tcp_i^j не є листовим вузлом в T і кожне v_i^j є значенням атрибуту, що позначає вітку яка виходить з tcp_i^j . Означимо також через $Class(path^{set})$ множину класів, що позначатиме листи вузлів для $path^{set}$ (табл. 2.3).

Визначимо концепцію класифікації прикладів засобами дерев рішень у випадку відсутньої інформації. Для цього слід переписати звичайне означення класифікації, як приклад окремого випадку, в якому не має відсутньої інформації.

Нехай Sol^T є деревом рішень, e^{tcp} – екземпляр, що визначається набором керованих параметрів процесу буріння і c – клас. Вважатимемо, що можна стверджувати той факт, що екземпляр e^{tcp} може бути класифікований як c , засобами Sol^T через Ext , що позначається через $Sol^T \xrightarrow{c, Ext} e^{tcp}$, якщо існує шлях $path^{set}$ в Sol^T з листовим вузлом $Class(path^{set}) = c$ такий, що $e^{tcp} \cup Attr(path^{set})$ є відповідним екземпляром (прикладом) і

$$Ext = \frac{Attr(path^{set})}{e^{tcp}}.$$

Таблиця 2.3

Приклад класифікації режимних параметрів процесу буріння

Режимний параметр		Діапазон значень режимного параметру			
tcp_1	Осьове зусилля на бурове долото, кН	5 – 50	50 – 150	150 – 300	300 – 450
tcp_2	Швидкість обертання бурового долота, об/хв	10 – 50	50 – 100	100 – 150	150 – 200
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
tcp_n	Витрата промивної рідини, кг/м ³	1200 – 1250	1250 – 1300	1300 – 1350	1350 – 1400

Якщо $Sol^T \xrightarrow{c, \{ \}} e^{tcp}$, то говорять, що екземпляр (приклад) e^{tcp} класифікується як c засобами Sol^T , що представляється як $Sol^T \xrightarrow{c} e^{tcp}$.

Слід також відмітити, що в представленні $Sol^T \xrightarrow{c, Ext} e^{tcp}$ умова того, що $e^{tcp} \cup Attr(path^{set})$ повинно бути екземпляром гарантує, відповідно, що значення атрибуту для e^{tcp} є сумісними з множиною тестів представлених через $path^{set}$. Іншими словами, якщо для деякого атрибуту tcp_i , $tcp_i = v_i \in e^{tcp}$ та $tcp_i = v'_i \in Attr(path^{set})$, тоді $v_i = v'_i$. Крім того, Ext представлятиме розширення до рівня прикладу e^{tcp} , яке є необхідним для виконання його класифікації як c з вибраного шляху.

Розглянемо спосіб перетворення дерева рішень у абдуктиву логічну програму, що дозволяє визначати залежність витрат на буріння від вихідних параметрів (механічна швидкість проходки, термін служби бурового долота). Нехай Sol^T – дерево рішень і $path^{set}$ – множина шляхів в Sol^T , таких, що шлях $path^i$ відповідатиме залежності витрат на буріння від механічної швидкості проходки (рис. 2.7), а шлях $path^h$ відповідатиме залежності витрат на буріння від терміну служби бурового долота (рис. 2.8).

Тоді множина правил $Rule_{path^i}^{set}$, асоційованих з $path^i$ буде твердженням Хорна виду $c^i \leftarrow tcp_1^i(v_1^i), \dots, tcp_n^i(v_n^i)$, таке, що: 1) $Class(path^{set}) = c^i$; 2) $Attr(path^{set}) = \{tcp_1^i = v_1^i, \dots, tcp_n^i = v_n^i\}$.

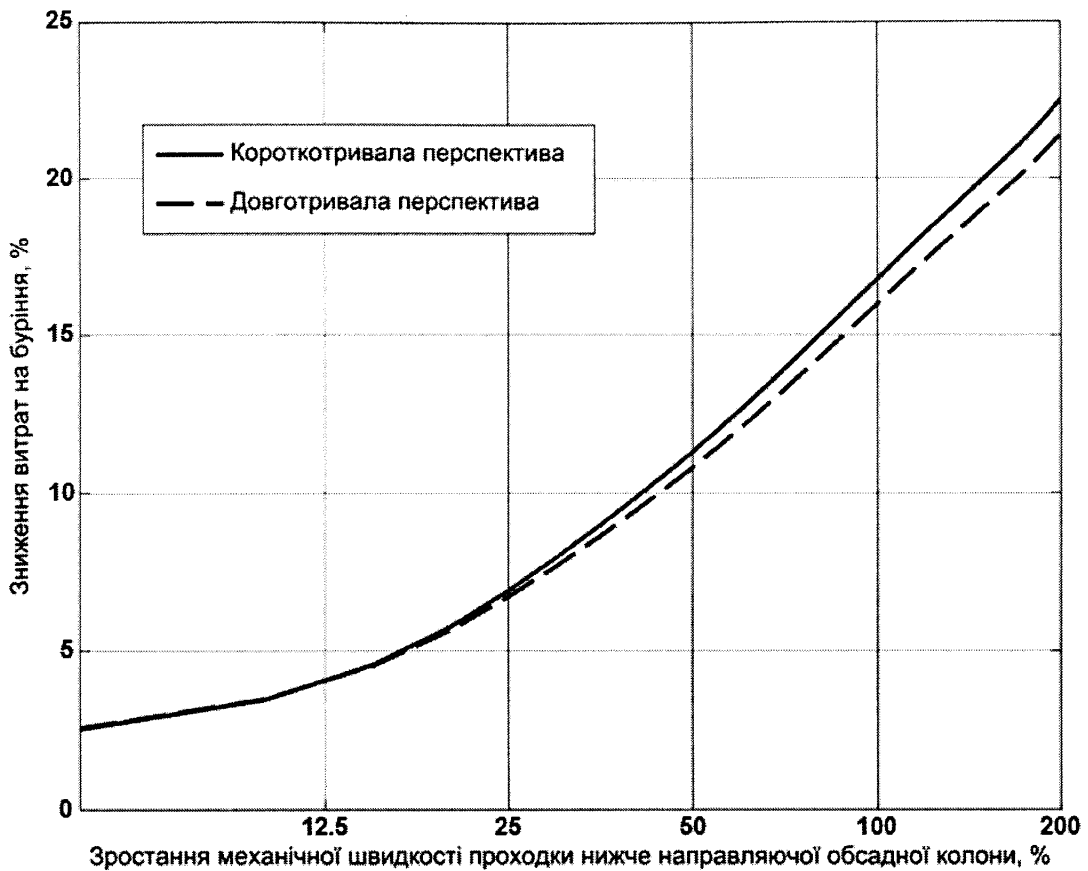


Рис. 2.7. Залежність витрат на буріння від механічної швидкості проходки.

Відповідно, множина правил $Rule_{path^{i_2}}^{set}$, асоційованих з $path^{i_2}$ буде твердженням Хорна виду $c^{i_2} \leftarrow tcp_1^{i_2}(v_1^{i_2}), \dots, tcp_n^{i_2}(v_n^{i_2})$, таке, що:
 1) $Class(path^{set}) = c^{i_2}$; 2) $Attr(path^{set}) = \{tcp_1^{i_2} = v_1^{i_2}, \dots, tcp_n^{i_2} = v_n^{i_2}\}$.

Слід відмітити, що імена атрибутів розглядаються як унарні предикатні символи i , що пара атрибут/значення $tcp_i = v_i$ відображається в атом $tcp_i(v_i)$. Більше того, при заданому v_i та шляху $path$, $Attr(path)$ слід розглядати як екземпляр (приклад). Програма LP_{Sol^T} на основі тверджень Хорна, асоційована з деревом рішень Sol^T є множиною правил виду:

$$LP_{Sol^T} = \{Rule_{path}^{Set} \mid path\},$$

де $path$ є шляхом в Sol^T .

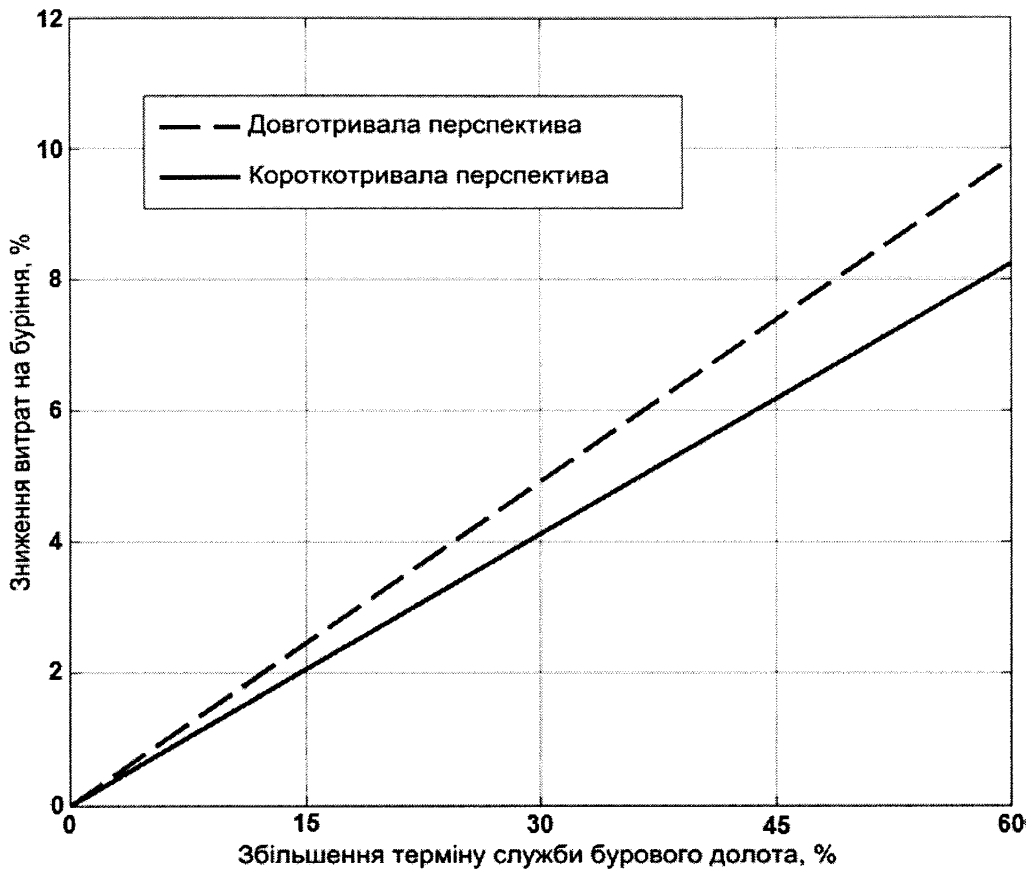


Рис. 2.8. Залежність витрат на буріння від терміну служби бурового долота

В кінцевому підсумку виконується зв'язування з деревом рішень Sol^T множини канонічних обмежень цілісності, що містять заперечення виду:

$$c \leftarrow tcp(v^1), tcp(v^2), v^1 \neq v^2,$$

для кожного атрибута $tcp \in BS$.

Як буде показано далі, імена атрибутів розглядаються як виводимі предикати і множина всіх виводимих предикатів буде представляти можливі класифікації. Обмеження цілісності, означені подібним чином, забезпечують той факт, що в кожній консистентній множині виводимих предикатів кожен атрибут зустрічатиметься не більше одного разу.

Для заданого екземпляру (прикладу) $e^{tcp} = \{tcp_1 = v_1, \dots, tcp_n = v_n\}$, нехай $\Delta_{e^{tcp}}$ є множиною атомів:

$$\Delta_{e^{tcp}} = \{tcp_1(v_1), \dots, tcp_n(v_n)\}.$$

Таким чином, приведені формальні представлення дають всі необхідні

складові для прив'язки абдуктивного фреймворку до дерева рішень Sol^T .

Для заданого дерева рішень Sol^T абдуктивний фреймворк AF_{Sol^T} асоційований з Sol^T представлятиметься триплетом:

$$AF_{Sol^T} = \langle LP_{Sol^T}, BS, Con_{Sol^T}^{int} \rangle,$$

де: LP_{Sol^T} – Хорн-програма асоційована з Sol^T ; $Con_{Sol^T}^{int}$ – множина канонічних обмежень цілісності асоційованих з Sol^T ; BS – множина імен атрибутів.

На рис. 2.9 представлено кінцеву діаграму класифікаційної системи. Як показано на даному рисунку, вхідний потік даних складають екземпляри для класифікації і відповідний набір даних процесу буріння. Дерево рішень індукується з набору даних за допомогою алгоритму класу C4.5 [106, 107], а інстанціації алгоритмів класу APRIORI [108] видобувають часті входження і відповідні асоціативні правила. Абсолютне значення підтримки частих входжень є параметром, що використовується для обчислення ваги їх абдукції.

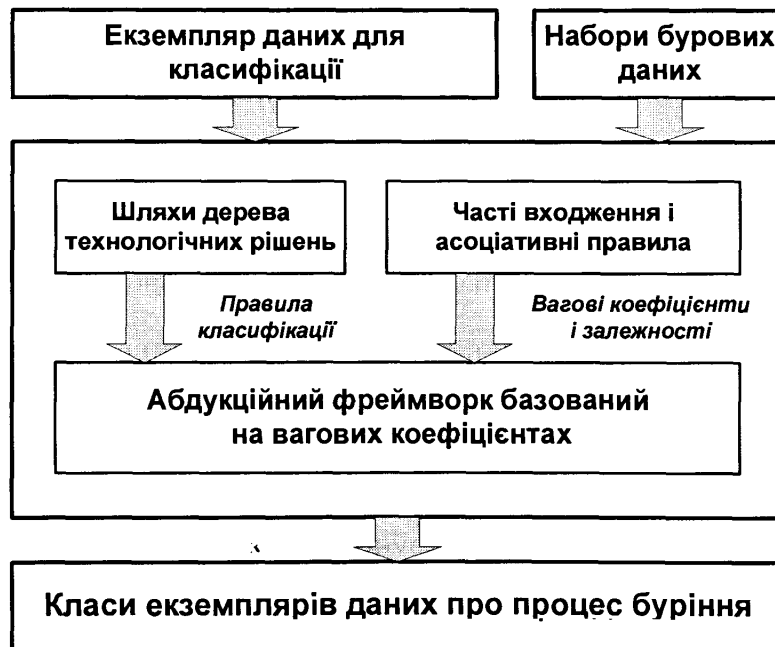


Рис. 2.9. Базована на абдукції класифікаційна схема аналізу даних процесу буріння

Розширення базового фреймворку шляхом включення вагових коефіцієнтів необхідне на основі таких міркувань:

- 1) потрібно введення кількісної міри для вибору серед відмінних

можливих рішень (в тому числі абдуктивних доведень). Слід відмітити, що в класифікації побудованої даним підходом може бути більше одного пояснення;

2) в базі знань використовується ймовірнісна інформація для того щоб відкинути частину малоїмовірних доведень.

Процедури, що використовуються для аналізу пошукового простору є процедурами повного перебору в глибину з можливими відтинаннями, що виконуються шляхом використання базової структури обмеження цілісності. Іншим видом обмежень, що повинні мати місце в кожному здійсненому рішенні є верифіковане виконання кроків обробки даних.

Наведемо основні характеристики абдуктивного фреймворку, що використовується:

1) кожен атом, що входить принаймні в одне правило є асоційованим із значенням, що представляє його вагу, тобто характеристику в термінах істинності, релевантності, задоволення та ін. В нашому випадку при оптимізації режимних параметрів процесу буріння основними керованими параметрами виступають «осьове зусилля на бурове долото» та «швидкість обертання бурового долота». Основним вихідним параметром, що оцінюється є «механічна швидкість проходки». Оцінимо вагові значення лівої та правої частини правила виразами $c(Q^{Sub})$, $c(LP_1)$ та $c(LP_2)$. Тоді правило набуде вигляду:

$$LP_1^{c(LP_1)} \wedge LP_2^{c(LP_2)} \rightarrow [Q^{Sub}]^{c(Q^{Sub})},$$

2) заголовок правила може мати вагу більшу, меншу або рівну тій, що задається в атомах тіла;

3) надлишковості використовуються з метою пошуку доведення з найменшим ваговим значенням.

Вагові значення, що асоціюються кожному атому, правилу або рішенню співвідносяться до їх ймовірності. Вагове значення атома визначається до кількості кортежів в яких даний атом є хибним:

$$\sup(|DataSet|) - \sup(BS) = \sup(\neg BS),$$

де $|DataSet|$ є кількістю кортежів у наборі даних $DataSet$ згідно, наприклад, даних представлених у картці відробки бурових доліт наведених у табл. 2.4.

Таблиця 2.4

Приклад даних, що представлені у картці відпрацювання бурових доліт

Робота доліт								Режим буріння			
Інтервал		Проходка (м)	Час механічного буріння (год.)	Механічна швидкість проходки (м/год.)	Промивка	Час спуско-підймальних операцій	Час нарощування і зміни долота	Зусилля на долото	Тиск на стояку	Продуктивність насосів	Момент на роторі
від	до										
	90	90	14:50	6,07	0:10		0:20	7	10	36	
90	110	20	1:30	13,33	0:20		0:20	6-7	35	32	23
110	269	159	12:35	12,64	0:15	2:35					
269	542	273	28:50	9,47	1:05	1:05					
542	596	54	5:15	10,29	1:15	3:00	0:05				
596	730	134	25:40	5,22	5:05	2:30	0:10	16	45	32	25
730	898	168	27:25	6,13	4:05	0:35	0:05	22	50	32	25
898	1083	185	48:15	3,83	9:45	4:45	0:45				

Відповідно, в термінах ймовірності, вага атома BS дорівнює $|DataSet|LP(BS)$. Подібним чином, кожне правило має вагу, що рівна кількості кортежів в яких правило є хибним. Наприклад, для використання правила $RC \leftarrow SC$ обчислення ваги складатиме:

$$c(RC \leftarrow SC) = \sup(SC \wedge \neg RC).$$

В термінах коефіцієнта впевненості для правила матимемо:

$$\begin{aligned} c(RC \leftarrow SC) &= \sup(SC \wedge \neg RC) = |DataSet|Prb(SC \wedge \neg RC) = \\ &= |DataSet|Prb(\neg RC | SC)Prb(SC) = |DataSet|(1 - Prb(RC | SC))Prb(SC) = \\ &= (1 - conf(RC \leftarrow SC))\sup(SC) \end{aligned}$$

Абдуктивним рішенням Sol^{ab} для цілі \mathcal{G} вважатимемо множину атомів $\{tcp_1 \wedge \dots \wedge tcp_n\}$, тобто $Sol^{ab} \rightarrow \mathcal{G}$, де $Sol^{ab} = \{tcp_1 \wedge \dots \wedge tcp_n\}$.

В даній ситуації бажаним є те, щоб вага Sol^{ab} була інверсно пов'язана з частотою рішення Sol^{ab} .

З припущення щодо взаємного виключення серед інвертованих атомів

матимемо, що:

$$|DataSet|Prb(\neg Sol^{ab.}) = c(Sol^{ab.}).$$

Такий підхід є нещільною апроксимацією ймовірності $Prb(\neg Sol^{ab.})$, оскільки не має прив'язки до проміжку $[0, 1]$. Проте, в даному випадку це не є проблемою, оскільки немає реальної потреби в фактичних значеннях інвертованої частоти, а існує тільки потреба в рішеннях з низькою вагою, що є найбільш ймовірними в певних відношеннях. Таким чином, останнє твердження показує зв'язок між вагою та ймовірністю абдуктивного рішення.

На рис. 2.10 представлена загальна структура абдуктивної системи. Також важливим є те, що спроектований фреймворк допомагає користувачу зрозуміти причини та міркування згідно яких ті чи інші екземпляри були асоційовані з виділеним класом. Слід відмітити, що всі правила видобуваються автоматично з набору даних, шляхом використання алгоритму APRIORI.

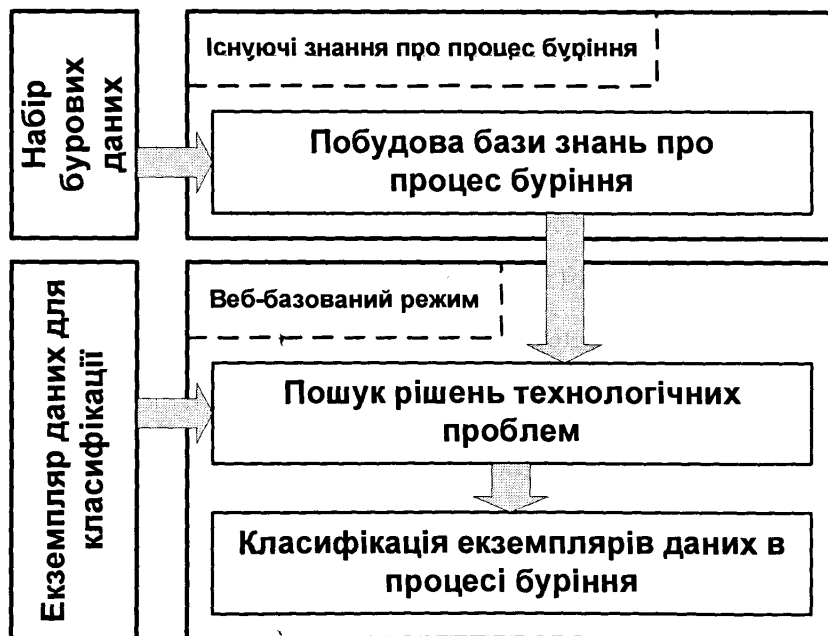


Рис. 2.10. Представлення абдуктивної системи для видобування знань про процес буріння

Особливість даного підходу полягає також в тому, що інформація яка індукується і використовується абдуктивною системою, в загальному випадку повністю ігнорується класифікаторами на основі дерев рішень.

Висновки до другого розділу

1. Структуризовано процеси обробки та видобування даних про процес буріння шляхом виділення концепції нафтогазового об'єкта та знань про нього; формування доменів баз знань нафтогазової предметної області; введення формальної мови числення предикатів; введення графової інтерпретації в формі семантичних мереж; представлення предметної області буріння в формі фактів та правил, а також структуризації фрагментів знань в формі фреймів з виділеними процедурами, які утворюють функціональність фреймової системи, що дозволило визначити процес видобування знань як методологію класифікації шаблонів даних процесу буріння, отриманих за допомогою давачів.

2. Визначено спосіб класифікації даних про процес буріння в формі правил, що дозволяють оперувати з множинами входжень, множинами елементів та наборами даних. Визначено структуру систем інтелектуальної підтримки прийняття рішень на основі чітких правил з можливим включенням значень типу «невизначено», на основі правил з невизначеністю в формі коефіцієнта впевненості та на основі нечітких fuzzy-правил, що можуть включати класи в консеквенті, класи з коефіцієнтом впевненості в консеквенті та коефіцієнт впевненості для всіх класів в консеквенті. Отримані результати дозволяють виконувати аналіз та класифікацію знань і даних на основі градаційних правил, можливісних правил та правил з невизначеністю.

3. Введено спосіб класифікації на основі правил для доменних знань про процес буріння через використання Байєсових каузальних відображень. Основу представленої функціональності складають прості, комплексні, розширені та асоціативні правила, множина яких оновлюється на основі індуктивних кроків. Це дає можливість вводити класифікаційні правила для домену з накладеними обмеженнями, що також дозволяє використовувати значення ймовірності які виражаються правилами для зміни розподілу значень керованих змінних технологічного процесу.

4. Виконано побудову абдуктивного фреймворку підтримки прийняття рішень шляхом введення концепції оптимізаційних запитів, їх потоків, що дозволяє виконувати перетворення проблеми видобування частих входжень наборів даних процесу буріння з віддалених давачів в проблему побудови оператором буріння ефективних запитів щодо оптимізації значень керованих змінних технологічного процесу. Створений в результаті фреймворк використовує вагові коефіцієнти, що дозволяє оперувати з множиною здійснених рішень із заданою диференціацією при встановленні оптимальних значень керованим параметрам процесу буріння.

5. Визначено концепції класифікації даних процесу буріння засобами дерев рішень в умовах невизначеності, що дозволило визначити очікувані рівні застосовності абдуктивного підходу для класифікації великих наборів даних процесу буріння. Закладені в фреймворк вагові коефіцієнти дозволяють підтримку кількісних оцінок на множині відмінних можливих рішень, що дозволяє для кожного виводимого елемента присвоєння певного вагового коефіцієнта, в тому числі вагових коефіцієнтів для правил.

РОЗДІЛ 3

МОДЕЛЮВАННЯ ТА СТРУКТУРИЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ПРИ ВИБОРІ РЕЖИМНИХ ПАРАМЕТРІВ БУРІННЯ

3.1. Керування процесом підтримки прийняття рішень засобами інтелектуальної системи на основі нечіткої логіки

В більшості комерційних фази-затосувань [43, 57, 60, 67, 109-113], результатом є системи на основі правил, які отримують поточну інформацію в формі зворотного зв'язку від апаратного пристрою в режимі його функціонування (реального часу) і, відповідно, керують роботою механічного або іншого пристрою. В типовій системі на основі нечіткої логіки чітка вхідна інформація з апаратного пристрою перетворюється в нечіткі значення для кожної вхідної нечіткої множини через блок фазифікації. Універсум вхідних змінних визначає необхідне масштабування дотримання коректності операцій для кожної одиниці. Вибір масштабування є дуже важливим, оскільки нечітка система може бути переналаштована для інших апаратних пристроїв або діапазонів оперування, шляхом зміни масштабування вхідних і вихідних даних. Логіка прийняття рішення визначає як будуть виконуватися операції нечіткої логіки і, відповідно, спільно з базою знань визначатимуться вихідні значення для кожного нечіткого правила «ЯКЩО-ТОДІ», які будуть об'єднуватися і перетворюватися у відповідні чіткі значення в рамках блоку дефазифікації. Кінцеве вихідне чітке значення може бути обчислене, наприклад, методом центру ваги або як зважене середнє.

Таким чином, для ефективного функціонування нечітка система на основі правил повинна вирішувати наступні задачі:

- 1) ідентифікувати вхідні дані та їх діапазони;
- 2) ідентифікувати вихідні дані та їх діапазони;
- 3) обчислювати ступінь належності для кожного з вхідних та вихідних даних;

4) створювати та підтримувати базу правил, яка визначає функціонування системи;

5) приймати рішення щодо виконання певних системних дій, шляхом присвоєння вагових значень правилам;

6) поєднувати правила і дефазифікувати вихідні значення.

Лінгвістична змінна розглядається як змінна, що приймає значення нечітких змінних.

$$\left\langle \begin{array}{l} lv_name, T = lv_ValuesSet = \{fv_name\}_{j_1}, X, \\ G^{Syn.} = [t_{j_2} \in T] \left| \begin{array}{l} formal\ lang. \\ nat.\ lang. \end{array} \right. , P^{Sem.} : [[lv \in lv_ValuesSet] \rightarrow X_1 \subset X] \end{array} \right\rangle,$$

де: lv_name – назва лінгвістичної змінної (*linguistic variable name*); T – базова терм-множина, що набуває значення лінгвістичних змінних і фактично є переліком назв нечітких змінних; X – універсальна множина (область суджень); G^{Syn} – синтаксичне правило генерації нових термів на основі засобів формальної та природної мови; P^{Sem} – семантичне правило, згідно з яким кожній лінгвістичній змінній ставиться у відповідність певна нечітка підмножина універсальної множини суджень X ; $j_1 = 1..n_1$, $j_2 = 1..n_2$.

Наприклад, якщо механічну швидкість проходки при бурінні нафтових і газових свердловин роторним способом інтерпретувати як лінгвістичну змінну, то її множина термів T може бути представлена як:

$$T(\text{механічна_швидкість_проходки}) = \{\text{низька, середня, висока}\},$$

де кожний терм в T характеризується нечіткою множиною в універсумі $O^{set} = [0, 30]$. Таким чином, можна інтерпретувати, «низьку швидкість» як «швидкість рівну 5 м/год», «середню швидкість» як «швидкість близьку до 15 м/год» і «високу швидкість» як «швидкість понад 25 м/год». Такі терми можуть бути охарактеризовані як нечіткі множини з відповідними функціями належності приведеними на рис. 3.1.

При цьому, механічну швидкість проходки близьку до 9 м/год. можна віднести до нечіткої множини «низька» із ступеню належності 0,35 і до

Правила нечіткого керування виду «**ЯКЩО** ($rc^1 \in RC_i^1$ і $rc^2 \in RC_i^2$) **ТОДІ** ($sc \in SC_i$)» на рівні практичної реалізації імплементуються у вигляді нечіткої імплікації (нечіткого відношення) FR_i , що визначається формулою:

$$mf_{FR_i} = mf_{(RC_i^1 \text{ і } RC_i^2 \rightarrow SC_i)}(o_1, o_2, o_3) = [mf_{RC_i^1}(o_1) \text{ і } mf_{RC_i^2}(o_2)] \rightarrow mf_{SC_i}(o_3),$$

де: RC_i^1 і RC_i^2 є нечіткими множинами $RC_i^1 \times RC_i^2$ в $O_1 \times O_2$; $R_i = (RC_i^1 \text{ і } RC_i^2) \rightarrow SC_i$ є нечіткою імплікацією в домені $O_1 \times O_2 \times O_3$ і \rightarrow позначає функцію нечіткої імплікації. При цьому може існувати ряд способів означення нечіткої імплікації.

Оператор фазифікації виконує перетворення чітких даних в нечіткі множини:

$$FuzzySet = Fuzzyfier(CrispInput),$$

де: *CrispInput* – чітке вхідне значення з процесу; *FuzzySet* – нечітка множина; *Fuzzyfier* – оператор фазифікації. Таким чином, нечітке керування на основі правил складається з множини правил які зв'язуються між собою на основі нечітких імплікацій і композиційних правил логічного висновку. Такі правила нечіткого висновку об'єднуються за допомогою сполучників «І» та «ТАКОЖ». Комбінація, що використовується в питанні включає в себе сполучник «ТАКОЖ». На формальному рівні для правил це представлятиметься як:

$$R = \text{також} (R_1, R_2, \dots, R_n).$$

Для виведення вихідного значення sc із заданих станів процесу rc^1 , rc^2 і нечіткого відношення FR слід застосувати композиційне правило висновку виду:

$$sc = rc^2 \circ (rc^1 \circ FR),$$

де \circ – операція композиції.

Виходом процесу інференції є нечітка множина, що специфікує розподіл можливостей для дій пов'язаних з виконанням керування. Проте, наприклад, в on-line-керуванні, як правило, вимагається виконання чіткої керуючої дії, тому необхідно виконати дефазифікацію нечіткої керуючої дії на виході, шляхом

інференції з алгоритму нечіткого керування:

$$sc^{crisp} = defuzzyfier(sc).$$

Тоді правила нечіткого керування які необхідно ідентифікувати матимуть вигляд:

$$R_i: \text{ЯКЩО } rc^1 \in RC_i^1 \text{ I } rc^2 \in RC_i^2 \text{ ТОДІ } sc \in f_i(sc^1, sc^2), i = 1..n$$

де: rc^1, rc^2, sc – лінгвістичні змінні, що представляють змінні стану процесу, а також керуючу змінну; RC_i^1, \dots, RC_i^2 – лінгвістичні терми для лінгвістичних змінних rc^1, rc^2 і sc в універсумі O^1, O^2 і O^3 відповідно, $i = 1, 2, \dots, n$; sc^1, sc^2 – змінні логічних функцій стану процесу, таких як лінійна функція $f_i(sc^1, sc^2)$. Таким чином, в даному напрямі проблема буде звужена до задачі оцінювання параметрів, яка виконується шляхом оптимізації методом найменших квадратів для індексу виконання через метод лінійної регресії з ваговими коефіцієнтами.

В дослідженнях Сугено [94] було успішно застосовано даний метод до проектування нечіткого логічного керування.

Правила в питаннях є похідними від досвіду досвідченого оператора технологічного процесу. Такі правила розглядаються, як правила нечіткого керування для оцінювання об'єктів. Типове правило даного класу описується як:

$$R_i: \text{ЯКЩО } ((rc^1 \in RC_i^1 \text{ I } rc^2 \in RC_i^2) \text{ I } [cc_i \in SC_i]) \text{ ТОДІ } cc_i \in SC_i, i = 1..n.$$

Команда керування є виводимою з цільового значення оцінювання результатів нечіткого керування, що задовольняють очікувані стани і цілі. Команда керування cc_i отримує чітку множину як значення і rc^1, rc^2 є індикаціями ефективності виконання для оцінювання i -того правила в термінах таких значень як «добре» або «погано». Найбільш ймовірне правило керування вибирається через прогнозуючу пару (rc^1, rc^2) , що відповідає кожній команді керування SC_i .

Відповідно, в лінгвістичних термінах правило інтерпретується як «якщо індекс ефективності виконання для $rc^1 \in RC_i^1$ і індекс ефективності виконання

для $rc^2 \in RC_i^2$ у випадку коли команда керування sc_i вибирається як SC_i , тоді це правило вибирається і команда керування SC_i вибирається як вихідне значення керування».

Дослідження питання інтерактивності правил нечіткого керування виходить з припущення про те, що в найпростішому випадку колекція нечітких правил керування має вид:

$$R_i: \text{ЯКЩО } rc \in RC_i \text{ ТОДІ } sc \in SC_i, i=1,2,\dots,n.$$

Якщо вхідне значення $rc \in RC_i$ то ми можемо очікувати, що керуюча дія $sc \in SC_i$. Фактично керуюча дія sc може бути підмножиною або надмножиною для SC_i , що показано в дослідженнях [115-118]. Вибір відповідної реалізації залежить від означення нечіткої імплікації і операції композиції. Також слід розглядати таку ситуацію, як наслідок взаємодії між правилами.

Проблема взаємодії між правилами є надто комплексною і складною для розуміння в термінах розглянутих засобів дослідження. Відповідно, в дослідженнях [115-118] показано, що взаємодію між правилами можна контролювати шляхом вибору способу означення нечіткої імплікації і операції композиції. З другого боку несуперечливість правил може бути покращена шляхом використання нечіткої кластеризації правил нечіткого керування. В даному контексті методика логічного висновку запропонована Сугено, а також відповідний алгоритм ідентифікації забезпечують альтернативний спосіб рішення описаних проблем.

3.2. Реалізація формальних методів інтелектуального керування підтримкою прийняття рішень щодо вибору значень режимних параметрів на основі нечітких знань про процес буріння

Для моделювання об'єктів буріння використаємо результати роботи [119] в які викладено основні принципи та методи інформаційного моделювання нафтогазових об'єктів в загальному випадку та розширимо дані результати засобами нечіткої логіки.

Оскільки, нечіткі множини вводяться як розширена концепція звичайних множин, за аналогією з характеристичною функцією звичайної множини як характеристика нечіткої множини вводиться аналог функції належності (MF – *Membership Function*). Тоді для деякої нечіткої множини $fSet$, значення функції $MF_{fSet}(x)$ виражатиме ступінь належності до нечіткої множини $fSet$. В такій нотації нечітку множину $fSet$ можна розглядати як множину впорядкованих пар виду:

$$fSet = \left\{ \left\{ MF_{fSet}(x), x \right\}_i \right\}_{i=1..n}, MF_{fSet}^i(x) \in [0; 1].$$

Значення функцій належності $MF_{fSet}(x) = 0$ позначатиме відсутність належності, відповідно значення $MF_{fSet}(x) = 1$ позначатиме повну належність.

Практичне застосування такого формалізму є ефективним, оскільки дозволяє відобразити суб'єктивізм експертних суджень в предметній області відносно об'єктивних категорій, наприклад, введення точних (неточних, відносно точних, частково точних, приблизних) означень базових понять предметної області, без яких неможлива ефективна семантизація та формалізація логіки міркувань експертів як фахівців предметної області.

Розглянемо типову формалізацію даної задачі з точки зору підходу нечітких множин та нечіткої логіки. Нехай X – множина можливих суджень щодо проблеми вибору оптимальних значень режимних параметрів, а $x_i \in X$, $i=1..n$ – деякі виділені судження. Очевидно, що при формулюванні суджень експерти повинні спиратися на певні режимні параметри та їх значення.

Для початкового наближення задачі пошуку оптимальних значень режимних параметрів процесу буріння розглядатимемо випадок одного параметра, наприклад, швидкість обертання бурового долота. Нехай для зручності викладу даний виділений параметр змінюється в діапазоні $[0..100]$. Тоді моделювання поняття предметної області «оптимальне значення швидкості обертання бурового долота» засобами нечіткої множини може бути зведене до вигляду:

$$fSet = \left\{ \begin{array}{l} 0 / 0,0; 10 / 0,0; 20 / 0,1; 30 / 0,3; 40 / 0,5; 50 / 0,7; \\ 60 / 0,9; 70 / 1,0; 80 / 1,0; 90 / 1,0; 100 / 1,0 \end{array} \right\}.$$

Згідно поданої множини входжень нечіткої множини, значення швидкості обертання рівне 60 дозволяє, наприклад, визначити значення оптимальності із ступенем належності 0,9, оскільки одне і те саме значення контрольного параметра може викликати у експертів різні судження щодо визначення рівня його оптимальності. Зрештою такий спосіб міркувань співзвучний з ідеєю нечіткої множини як його теоретичної основи.

Реалізація базової ідеї нечіткого логічного висновку зводиться до роботи з базою правил, що містить нечіткі висловлювання виду «**ЯКЩО-ТОДІ**» з функціями належності для відповідних лінгвістичних термів. Тобто, базова структура конструкції «**ЯКЩО-ТОДІ**» зберігається для бази нечітких правил (аналогічно до бази чітких правил), але входження правил є нечіткими висловлюваннями.

Загалом база нечітких правил представлятиметься входженнями виду:

$$R_i^{fuzzy} : \text{якщо } x_1^i = lv_1^{in} \in fSet_1^i \dots \text{і} \dots x_n^i = lv_n^{in} \in fSet_n^i \text{ тоді } y = lv^{out} \in fSet^j,$$

де: $x_k^i = lv_k^{in}$, – вхідні змінні; $y = lv^{out}$ – вихідна змінна; $fSet_k^i$, – задані нечіткі множини з відповідними функціями належності; $k = 1..n$, $n \in N$.

Таким чином, в результаті нечіткого логічного висновку (*fuzzy inference*) ми отримаємо деяке чітке значення $y = lv^{out}$, базуючись на заданих чітких значеннях $x_k^i = lv_k^{in}$:

$$\left\{ x_k^i \right\}_{k=1..n_2}^{i=1..n_1} \stackrel{fuzzy}{=} \left[y = lv_{crispy}^{out} \right], \text{ де } n_1, n_2 \in N.$$

В інтелектуальній системі, побудованій з використанням нечітких множин та нечіткої логіки на вході та на виході система оперує з чіткими значеннями. В залежності від виду та структури нечітких правил, переліку використаних логічних операцій, особливостей функціонування, методів фазифікації та дефазифікації, застосовними є різні алгоритми функціонування нечіткого логічного висновку, найбільш ефективним з яких є алгоритм Мамдані [120], що складається з таких етапів:

1) на етапі фазифікації за допомогою функцій належності для умов правил визначається ступінь істинності, що в нашому випадку відображається як:

$$fSet_{ik}(x_k^j), i = 1..n_1, j = 1..n_2, k = 1..n_3.$$

2) на етапі власне чіткого висновку визначаються рівні відтинки та обчислюються відповідні функції належності після відтинання:

$$\begin{aligned} cut_level &= \min_i(fSet_{ik}^1(x_k^j)) \mid fSet_{out}^2(y = lv^{out}) = \\ &= \min_i[cut_level_i, fSet^2(y = lv^{out})] \end{aligned}$$

3) імплементація композиції отримання нечітких множин за наступною формулою:

$$MF^{sum}(y = lv^{out}) = \max_i[fSet_{out}^2(y = lv^{out})],$$

де MF^{sum} – функція належності сумарної нечіткої множини.

4) виконання дефазифікації результату на основі одного з методів (як правило методу середнього центру):

$$MF^{sum}(y = lv^{out}) = \max_i[fSet_{out}^2(y = lv^{out})].$$

В даному дослідженні викликає інтерес моделювання поведінки нечіткого керування та засобів керування, що базуються на них, саме з точки зору експертних знань, в основному у формі множини правил з лінгвістичними входженнями. В загальному випадку, множина таких правил може подаватися у вигляді:

$$\left\{ \text{ЯКЩО } [Satisf.Conditions_i^{Set}] \text{ ТОДИ } [Deduce.Consequents_j^{Set}] \right\}_{i,j \in N},$$

де: $[Satisf.Conditions_i^{Set}] \subset T$; $[Deduce.Consequents_j^{Set}] \subset T$; T – базова множина лінгвістичних термів.

В такій інтерпретації процесу управління на основі правил ми отримаємо два випадки:

1. Випадок керування на основі множини чітких правил. В даному випадку кожне правило задаватиме деякий чіткий умовний стан, в якому антецедент визначатиме певну умову предметної області, а консеквент – задаватиме певну керуючу дію, спрямовану на об'єкт керування. В найпростішому випадку, коли

чіткі правила не використовують коефіцієнти впевненості, сутність керуючих конструкцій на основі правил зводиться до розбиття предметної області на деяку скінченну множину секцій:

$$SubjectDomain = \{SubjectSection_i\}_{i \in N},$$

кожна з яких відповідає певній стратегії логічного висновку (засобом обчислення керуючого впливу) і всередині кожної секції ми маємо скінченну множину чітких продукційних правил виду:

$$\text{ЯКЩО } [Conditions_{i_1}^{Set}] \text{ ТОДІ } [Consequents_{i_2}^{Set}],$$

де $i_1, i_2 \in N$, а антецеденти та консеквенти утворені на основі чітких логічних тверджень з використанням логічних операцій кон'юнкції, диз'юнкції та заперечення, а також системних операторів виду *advice* (експертна порада, керуючий вплив), *assign* (присвоєння), *call* (виклик зовнішньої множини правил), *chain* (зв'язування), *do* (виконання):

$$\left[\begin{array}{l} Condition_{i_1}^{Set} = \{[\wedge, \vee, \neg] \mid cond_{j_1}\}_{i_1}^{j_1} \mid \{advice, assign, call, chain, do\} \\ Consequents_{i_2}^{Set} = \{[\wedge, \vee, \neg] \mid consq_{j_2}\}_{i_2}^{j_2} \mid \{advice, assign, call, chain, do\} \end{array} \right.$$

2. Випадок керування на основі множини правил з коефіцієнтами впевненості. Дозволяє реалізовувати входження знань, ступінь невизначеності яких описується відповідними коефіцієнтами впевненості (*Certainty Factors*, $CF \in [0; 1]$). В загальному випадку множина таких правил може бути описана як:

$$\left\{ \text{ЯКЩО } [Conditions_{i_1}^{Set}]: CF_{j_1}^{Sum} \text{ ТОДІ } [Consequents_{i_2}^{Set}]: CF_{j_2}^{Sum} \right\}_{i_1, j_2, j_1, i_2 \in N},$$

а входження антецедентів і консеквентів, відповідно подаються як:

$$\left[\begin{array}{l} [Conditions_{i_1}^{Set}]: CF_{j_1}^{Sum} = \{[\wedge, \vee, \neg] \mid [cond_{j_1}]: CF_{j_1}\}_{i_1}^{j_1} \mid \\ \quad \mid \{advice, assign, call, chain, do\} \\ [Consequents_{i_2}^{Set}]: CF_{j_2}^{Sum} = \{[\wedge, \vee, \neg] \mid [consq_{j_2}]: CF_{j_2}\}_{i_2}^{j_2} \mid \\ \quad \mid \{advice, assign, call, chain, do\} \end{array} \right.$$

Функціональність множини правил може бути підсилена шляхом прив'язки правил до відповідних областей активності (*Scopes*). Структура такої прив'язки має вигляд:

$$\left[Rule_name^i \begin{bmatrix} And \\ Or \end{bmatrix} : CF^i \right]. Scope^j . Actions^k [Asr., Ret., Rep., Act.],$$

де $i, j \in N, k = 1..4$.

Розбиття предметної області на множину секцій, в даному випадку, можна інтерпретувати як певний спосіб введення об'єктів предметної області:

$$Domain.Object^i . CompareSet^j . Scope^k . AttributeSet^l . OptionsSet^m . ValueSet^n ,$$

де: $CompareSet = \{ not, is, =, >, >=, <, <=, \langle \rangle \}$; $j = 1..8, i, k, l, m, n \in N$.

В результаті, для кожного доменного об'єкта (об'єкта предметної області, секції предметної області) ми отримуємо певну множину правил:

$$\left\{ Rule_name_i^{Set} \right\}_{i \in N}^j \leftrightarrow Domain.Object_j^{Set} ,$$

де $j = 1..n, n \in N$.

Концепція нечітких правил дозволяє вводити певну множину нечітких станів, для яких задаються відповідні керуючі впливи на об'єкт керування. В найпростішому випадку процес керування визначатиметься нечіткими правилами виду:

$$\left[\begin{array}{l} R_1^{fuzzy} : \text{ЯКЩО } x \in Lv_1^1 \text{ І } y \in Lv_1^2 \text{ ТОДІ } z \in Lv_1^3 \\ R_2^{fuzzy} : \text{ЯКЩО } x \in Lv_2^1 \text{ І } y \in Lv_2^2 \text{ ТОДІ } z \in Lv_2^3 \\ \dots\dots\dots \\ R_n^{fuzzy} : \text{ЯКЩО } x \in Lv_n^1 \text{ І } y \in Lv_n^2 \text{ ТОДІ } z \in Lv_n^3 \end{array} \right],$$

де: x, y – змінні, що описують стан процесу (у разі припущення про те, що для опису процесу достатньо двох змінних); z – керуюча змінна; $Lv_i^j, (i = 1..n, n \in N; j = 1..3)$ – значення лінгвістичних змінних.

Для ефективної реалізації нечіткого висновку в даному контексті (тобто при використанні бази знань нечітких правил) необхідно передбачити в системі додаткові процедури для виконання наступних операцій:

1) обчислення узагальненого (агрегованого) результату нечіткого висновку

по всій базі нечітких правил $FuzzyKB$:

$$FuzzyInference = Aggr. [SubinferenceChains_i]_{i=1..n, n \in N}^{FuzzyKB};$$

2) обчислення результату інференції для кожного з правил із множини:

$$Inferenced(FuzzyRule_i) \mid FuzzyRule_i \in FuzzyKB,$$

де $i = 1..n$, $n \in N$ – кількість правил в домені (доменному об'єкті).

3) визначення або обчислення рівня активності кожного з правил:

$$FuzzyRule_i \stackrel{def.}{:=} Scope_j, \quad i = 1..n_1, j = 1..n_2,$$

де: $n_1 = |FuzzyKB|$ – кількість правил в базі знань; $n_2 = |SubjectDomains|$ або $n_2 = |DomainsObject|$ – кількість доменів в базі знань; $n_1, n_2 \in N$.

Нехай правила нечіткої бази знань $FuzzyKB$ мають вигляд:

$$FuzzyRule_i \stackrel{def.}{:=} \text{ЯКЩО } [x^i \in Lv_i^1 \text{ I } y^i \in Lv_i^2] \text{ ТОДІ } [z^i \in Lv_i^3], \quad i = 1..n,$$

і стан змінних, на основі яких формується деякий керуючий вплив, подається як певний факт виду:

$$Fact^j := x \in x^j \text{ I } y \in y^j, \quad j \in N.$$

Тоді:

$$(FuzzyRule_i, Fact^j) \stackrel{def.}{=} Conseq. := [z^i \in Lv^3].$$

Дані співвідношення задають спосіб виводу вихідного керуючого значення z^i при заданих нечітких станах x^i і y^i та наборі нечітких відношень, що зображаються правилами $FuzzyRule_i$. Композиційність даного підходу визначається також шляхом обчислення консеквента:

$$Conseq. = Aggr. \left(\prod_{i=1..n} [Fact^j, FuzzyRule_i] \right).$$

Проте, результатом висновку на основі бази нечітких правил буде деяка нечітка множина Lv^{fSet} , тому необхідним завершальним кроком є виконання процедури дефазифікації для обчислення чіткого значення керуючого впливу:

$$z^{crispy} = Defuzzy(Lv^{fSet}).$$

Співвідношення обчислення агрегованих значень на основі функцій

належності матиме вигляд:

$$Lv^{fSet}(lv) = Aggr. \left(\prod_{i=1..n} [Lv_i^1(x^i) \times Lv_i^2(y^i) \rightarrow Lv_i^3(lv^i)] \right),$$

де \times – нормалізована операція наближення кон'юнкції.

Для правил виду «**ЯКЩО** $rc \in RC$ **ТОДІ** $sc \in SC$ », в загальному випадку, перетворення його в нечітку форму означатиме, що при істинності належності rc множині RC , належність sc множині SC є можливісною [67]. RC і SC розглядаються як деякі підмножини, а rc і sc змінні, значення яких ранжуються на відповідних доменах D_1 і D_2 . Тоді введений тип правила забезпечує деякий частковий і неточний опис відношення між змінними rc і sc . В термінах характеристичної функції (*characteristic function*) це означатиме, що:

$$\text{ЯКЩО } chf_{RC}(rc) = 1 \text{ ТОДІ } chf_{SC}(sc) = 1.$$

Розглядатимемо кортежі підстановок змінних $rc_i = (\overline{tcp_1^i, \dots, tcp_n^i})$ (як список керованих змінних (параметрів) технологічного процесу) і $sc_i = cntr_i^{tcp}$ (як змінні керуючих впливів, що визначаються в процесі ініціалізації керованих змінних технологічного процесу).

Таким чином, введений спосіб подання правил визначатиме спосіб, яким повинна бути модифікована множина RC щоб зображати можливість значень sc в SC :

$$RuleForm \mid - Modify(SC) \stackrel{def.}{:=} Close(rc, RC^{core}).$$

де $Close()$ – оператор визначення близькості змінної sc до ядра множини SC .

Якщо виходити з точки зору імплікаційної моделі, то множину SC можна розглядати як верхню границю можливісних значень sc при умові, що $rc \in RC$:

$$SC \stackrel{def.}{:=} UpperBound \left((sc \in SC)^{psbl.} \right)_{rc \in RC}.$$

Тому згаданий метод модифікації множини SC полягатиме в зменшенні рівня її обмежувальності як нечіткої множини при зростанні рівня можливості для значень sc :

$$\# Restriction(SC) \stackrel{def.}{:=} \# Psbl(\exists sc, \text{ for } rc \in RC).$$

Можливі два рішення даної проблеми [112]:

1. Шляхом прив'язки певної невизначеності до множини SC :

$$\left[\begin{array}{l} SC \cup UnCert. \stackrel{Set \ def.}{:=} \# Psbl(sc \notin SC) \neq 0, \\ \uparrow \neq Psbl(sc \notin SC) \stackrel{def.}{:=} \uparrow dist(rc \notin RC^{core}) \end{array} \right] SC^{fuz.}, SC^{crisp.}.$$

Таке рішення дозволяє сформулювати початкове правило в термінах визначеності: «**ЧИМ більше** $rc \in RC$, **ТИМ більш визначено**, що $sc \in SC$ ».

2. Виконання розширення ядра RC^{core} шляхом введення перерізу для множин RC та SC таким чином, що для доменів значень

$RC \rightarrow \left(\overline{(tcp_1^1, \dots, tcp_n^1)} \in D_1 \right)$, $SC \rightarrow (cntr_1^{tcp} \in D_2)$ матимемо, що:

$$RC^{cut} \stackrel{def.}{:=} \left\{ rc \in \left\{ \begin{array}{l} (tcp_1^1, \dots, tcp_n^1), \\ chf_{RC} \left(\overline{(tcp_1^1, \dots, tcp_n^1)} \right) \geq cut \end{array} \right\} \mid \forall v_1 \in SC^{cut}, psbl.(cntr_1^{tcp}) = 1, \right.$$

тобто визначається спосіб отримання значень можливості яких дорівнює 1.

Все це дозволяє представити окремий вид правил в формі послідовних правил, згідно шаблону:

$$Rule^{Gradual} : \langle \text{«**ЧИМ більше } rc \in RC, \text{ ТИМ більше } sc \in SC\text{»} \rangle.**$$

Відповідно, при віддаленні значень від ядра можна говорити тільки про деякий мінімальний рівень гарантованої можливості, або діапазон значень, можливості яких може бути оцінена. Згідно [121] слід виділяти два рішення:

1. Шляхом зменшення нижньої границі рівня можливості значень в sc до ступеня належності $rc \in RC$:

$$LowerBound(\# psbl(sc \in SC)) = \# chf(rc \in RC) \mid SC^{fuz.}, SC^{crisp.}.$$

В даному випадку шаблон правила матиме вигляд «**ЧИМ більше** $rc \in RC$, **ТИМ більш можливо**, що $sc \in SC$ ».

2. В даному рішенні, для значень $rc \in RC^{core}$ розглядаються всі можливі значення множини SC без накладання обмежень. Проте, очевидно, що така множина можливості значень буде звужуватись при віддаленні значення rc

від ядра RC^{core} :

$$\left[\begin{array}{l} rc \in RC^{core} \rightarrow [SC_1^{psbl.}]_{not\ restr.} \\ \uparrow \#dist(rc, [rc \in RC^{core}]) \end{array} \right] | SC_{fuz.}.$$

В даному випадку, ми можемо отримати шаблон правила виду «**ЧИМ більше** $rc \in RC$, **ТИМ більшою** є множина можливих значень для sc навколо ядра SC^{core} ».

Таким чином, коли йдеться про нечіткі правила та процеси керування на їх основі, побудова коректних формальних моделей визначається інтерпретаціями з точки зору можливості та визначеності.

Для побудови нечіткої моделі розглянемо твердження (правило) виду «**ЧИМ більше** $rc \in RC$, **ТИМ більш визначено**, що sc лежить всередині SC ($sc \text{ IN } SC$)». На формальному рівні це можна інтерпретувати також як факт того, що належність sc множині SC можна оцінити визначеністю, яка вимірюється значенням характеристичної функції $chf_{RC}(\overline{tcp_1^1, \dots, tcp_n^1})$:

$$\forall v, \text{ ЯКЩО } rc = (\overline{tcp_1^1, \dots, tcp_n^1}) \text{ ТОДІ } |_{at\ least} CF = chf_{RC}(\overline{tcp_1^1, \dots, tcp_n^1}), \text{ FOR } (sc \text{ IN } SC).$$

Таким чином, кожне значення поза діапазоном SC' ($SC' \subseteq IC$) залишається можливим значенням для SC зі ступенем, рівним Λ . В даному випадку модель матиме вигляд:

$$\{RC^{crisp.}, SC^{fuz.} \rightarrow chf_{SC} = \max(chf_{SC'}, \Lambda)\},$$

а твердження в формі правила: «**ЧИМ більш типовими** є характеристики свердловини, **ТИМ більш визначено**, що її буріння пройде без ускладнень» можна зобразити моделлю:

$$[RC^{fuz.}, SC^{crisp.}].$$

В дослідженні [121] було введено шаблон послідовного правила виду «**ЧИМ більше** $rc \in RC$, **ТИМ більше** $sc \in SC$ ». Характеристика «**більше**» може також замінитися характеристикою «**менше**» на основі співвідношення:

$$\left[\begin{array}{l} RC \rightarrow \overline{RC}, SC \rightarrow \overline{SC} \\ chf_{\overline{RC}} = 1 - chf_{RC} \end{array} \right.$$

В нашому випадку, моделювання значень істинності на основі послідовних правил може бути зведене до шаблону виду: «для кожного $(\overline{tcp_1^1, \dots, tcp_n^1}) \in D_1$, **ЯКЩО** $rc = (\overline{tcp_1^1, \dots, tcp_n^1})$, **ТОДІ** *принаймні* істинно з ступенем $chf_{RC}(\overline{tcp_1^1, \dots, tcp_n^1})$, **ЩО** $(sc = ctr_1^{tcp}) \in SC$ ».

З точки зору чіткого розподілу можливостей отримаємо, що:

$$\left[\begin{array}{l} pd_{sclrc} \rightarrow \{0, 1\} \\ \forall (\overline{tcp_1^1, \dots, tcp_n^1}) \in D_1, pd_{sclrc} \left(\left(\overline{tcp_1^1, \dots, tcp_n^1} \right), ctr_1^{tcp} \right) \leq \left\{ \begin{array}{l} 1, \text{ якщо } chf_{RC}(\overline{tcp_1^1, \dots, tcp_n^1}) \leq \\ \leq chf_{SC}(ctr_1^{tcp}) \\ 0, \text{ якщо } chf_{RC}(\overline{tcp_1^1, \dots, tcp_n^1}) > \\ > chf_{SC}(ctr_1^{tcp}) \end{array} \right. \end{array} \right.$$

Таке подання уможливило інтерпретацію правила виду: «для кожного $(\overline{tcp_1^1, \dots, tcp_n^1}) \in D_1$, **ЯКЩО** $rc = (\overline{tcp_1^1, \dots, tcp_n^1})$, **ТОДІ** $(sc = ctr_1^{tcp}) \in SC$ *принаймні* з істинністю $chf_{RC}(\overline{tcp_1^1, \dots, tcp_n^1})$ », що відповідає інтерпретації істинності в чіткому сенсі.

Також, зокрема в термінах введеного перерізу можемо бачити, що:

$$\forall cut, rc \in RC^{cut} \Rightarrow sc \in SC^{cut},$$

що означає, що чим більшим є ступінь належності для rc , тим ближчими є його значення до типових значень в RC , і тим ближчими є значення sc до підмножини типових значень в SC . Таким чином, в даному контексті нечітке правило можна розглядати як узагальнення множини звичайних правил виду:

$$\text{ЯКЩО } rc \in RC^{cut} \text{ ТОДІ } sc \in SC^{cut}, cut \in [0, 1],$$

Оскільки, згідно означення функції належності чіткого відношення CR ми матимемо, що:

$$\left[\begin{array}{l} pd_{sc|rc} \stackrel{def.}{:=} UpperBound(CR) \\ CR = \bigcap_{cut \in [0,1]} [RC^{cut} \cup SC^{cut}] \end{array} \right].$$

Побудова моделі інтерпретації можливісних правил починається із шаблону твердження виду «**ЧИМ більше** $rc \in RC$, **ТИМ більш можливо**, що SC є діапазоном значень для sc ».

Таким чином, значення, ступінь належності яких не є більшим за $\left[1 - chf_{RC}(\overline{tcp_1^1, \dots, tcp_n^1})\right]$, не належить до гарантовано можливих значень sc згідно із введеним правилом. З другого боку, таке правило можна розуміти також в термінах значень нечіткої істинності, а саме: «**ЯКЩО** $rc = (\overline{tcp_1^1, \dots, tcp_n^1})$, **ТОДІ істинність належності** sc до SC **можна оцінити принаймні значенням** $\left[1 - chf_{RC}(\overline{tcp_1^1, \dots, tcp_n^1})\right]$ ». В той же час можна використовувати і інтерпретацію виду: «**ЯКЩО** $rc = (\overline{tcp_1^1, \dots, tcp_n^1})$, **ТОДІ хибність того, що** $(sc = ctr_1^{tcp}) \in SC$ **може бути оцінена не більше чим** $chf_{RC}(\overline{tcp_1^1, \dots, tcp_n^1})$ **значенням**». З точки зору побудови перерізу, відповідно можна розглядати всі значення, що відповідають ступеню істинності вище заданого ($cutPoint$), як повністю можливісні, що дозволить збільшення відповідного ядра, а значення, що відповідають ступеню істинності меншому або рівному $[1 - cutPoint]$ розглядати як неможливі.

3.3. Використання нечітких правил для подання знань в інтелектуальних системах підтримки прийняття рішень при бурінні нафтових і газових свердловин

Реалізація логічного висновку в інтелектуальних системах на основі нечіткої логіки вимагає наявності бази знань у вигляді сукупності нечітких предикатних правил. При такому підході знання експерта предметної області

дозволяють відображати нечіткий причинно-наслідковий зв'язок, який розглядають як нечітке відношення FR і позначають:

$$FR = RC \xrightarrow{\text{fuzzy}} SC,$$

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

З точки зору базових означень [122-125], відношення FR розглядають як нечітку підмножину добутку $RC \times SC$, повної множини заголовків RC і висновків SC . Оскільки основним завданням логічного висновку є отримання нових знань, то такий результат можна розглядати як процес отримання нечіткого результату висновку SC' з використанням деякого спостереження RC' і деякого елемента знань $RC \xrightarrow{\text{fuzzy}} SC$, що можна подати у виді:

$$SC' = RC' \circ FR = RC' \circ (RC \xrightarrow{\text{fuzzy}} SC),$$

де \circ – операція згортання.

В термінах характеристичної функції (*characteristic function*) це означатиме, що:

$$\text{ЯКЩО } chf_{RC}(rc) = 1 \text{ ТОДІ } chf_{SC}(sc) = 1. \quad (3.1)$$

Розглядатимемо кортежі значень $\left(\overline{(tcp_1^1, \dots, tcp_n^1)}, cntr_1^{tcp} \right)$ для змінних $rc = \overline{(tcp_1^1, \dots, tcp_n^1)}$ і $sc = cntr_1^{tcp}$. Можна утворювати пари сумісних і несумісних значень на основі (3.1):

$$\text{not comp.} \begin{cases} chf_{RC}(\overline{(tcp_1^1, \dots, tcp_n^1)}) = 1 \\ chf_{SC}(cntr_1^{tcp}) = 0 \end{cases}, \text{ comp.} \begin{cases} chf_{RC}(\overline{(tcp_1^1, \dots, tcp_n^1)}) = 1 \\ chf_{SC}(cntr_1^{tcp}) = 1 \end{cases}.$$

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

$$chf_{RC}(\overline{(tcp_1^1, \dots, tcp_n^1)}) = 0 \mid - [chf_{SC}(cntr_1^{tcp})].$$

Позначимо через $Set^{comp.}$ кортеж $\left(\overline{(tcp_1^1, \dots, tcp_n^1)}, cntr_1^{tcp} \right)$, значень rc та sc , сумісних з початковим правилом:

$$Set^{comp.} \left(\overline{\left(\overline{tcp_1^1, \dots, tcp_n^1} \right)}, cntr_1^{tcp} \right) \stackrel{def.}{=} InitialRule. \\ (rc, sc)$$

На рівні характеристичних функцій це означатиме, що:

$$chf_{RC} \left(\overline{tcp_1^1, \dots, tcp_n^1} \right) \wedge chf_{SC} (cntr_1^{tcp}) \leq chf_{Set^{comp.}} \left(\overline{\left(\overline{tcp_1^1, \dots, tcp_n^1} \right)}, cntr_1^{tcp} \right) \leq \\ \leq num \left[chf_{RC} \left(\overline{tcp_1^1, \dots, tcp_n^1} \right) \vee chf_{SC} (cntr_1^{tcp}) \right]$$

Введення операції булевої кон'юнкції може бути охарактеризовано властивостями:

$$bool \wedge \left[\overline{\left(\overline{tcp_1^1, \dots, tcp_n^1} \right) \wedge cntr_1^{tcp}} = 1, \text{ iff } \left(\overline{tcp_1^1, \dots, tcp_n^1} \right) = cntr_1^{tcp} = 1 \right. \\ \left. \overline{\left(\overline{tcp_1^1, \dots, tcp_n^1} \right) \wedge cntr_1^{tcp}} = 0, \forall \left(\overline{tcp_1^1, \dots, tcp_n^1} \right), cntr_1^{tcp} \right]$$

Ведення операції диз'юнкції характеризується властивостями:

$$bool \vee \left[\overline{\left(\overline{tcp_1^1, \dots, tcp_n^1} \right) \vee cntr_1^{tcp}} = 0, \text{ iff } \left(\overline{tcp_1^1, \dots, tcp_n^1} \right) = cntr_1^{tcp} = 0 \right. \\ \left. \overline{\left(\overline{tcp_1^1, \dots, tcp_n^1} \right) \vee cntr_1^{tcp}} = 1, \forall \left(\overline{tcp_1^1, \dots, tcp_n^1} \right), cntr_1^{tcp} \right]$$

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

$$\left(\overline{\left(\overline{tcp_1^1, \dots, tcp_n^1} \right)}, cntr_1^{tcp} \right) \underset{at\ least.}{\in} Set^{comp.} \left| \begin{array}{l} chf_{RC} \left(\overline{tcp_1^1, \dots, tcp_n^1} \right) = 1 \text{ I } chf_{SC} (cntr_1^{tcp}) = 1 \\ chf_{RC} \left(\overline{tcp_1^1, \dots, tcp_n^1} \right) \wedge chf_{SC} (cntr_1^{tcp}) = 1 \end{array} \right.$$

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

$$sc \in SC \left| rc \in RC \stackrel{def.}{=} Rule^{cond.} \right.$$

З іншого боку, належність також може визначатися співвідношенням:

$$\left(\overline{\left(\overline{tcp_1^1, \dots, tcp_n^1} \right)}, cntr_1^{tcp} \right) \underset{at\ least.}{\in} Set^{comp.} \left| \begin{array}{l} chf_{RC} \left(\overline{tcp_1^1, \dots, tcp_n^1} \right) = 0 \\ chf_{RC} \left(\overline{tcp_1^1, \dots, tcp_n^1} \right) = 1 \text{ I } chf_{SC} (cntr_1^{tcp}) = 1 \end{array} \right| \left. \begin{array}{l} \\ \vdash num \left[chf_{RC} \left(\overline{tcp_1^1, \dots, tcp_n^1} \right) \vee chf_{SC} (cntr_1^{tcp}) \right] = 1 \end{array} \right.$$

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

$$\left[\begin{array}{l} \text{Base Rule} \stackrel{\text{low. bound}}{=} [rc \in RC \text{ I } sc \in SC] \\ \text{Base Rule} \stackrel{\text{up. bound}}{=} [rc \in RC \Rightarrow sc \in SC \mid [rc \notin RC \vee sc \in SC]] \end{array} \right].$$

Введення можливісного розподілу з прив'язкою до значень sc дозволить отримати, що:

$$pd_{sc|rc} \left(\overline{(tcp_1^1, \dots, tcp_n^1)}, cntr_1^{tcp} \right) \geq chf_{RC} \left(\overline{tcp_1^1, \dots, tcp_n^1} \right) \wedge chf_{SC} \left(cntr_1^{tcp} \right).$$

На рівні семантичної інтерпретації, це означає можливість характеристики всіх значень для sc в SC :

$$Sm^{psbl.} : \left[\text{ЯКЩО } rc \in RC \text{ ТОДІ } sc \stackrel{\text{psbl}}{:=} \forall rc_1, rc_1 \in RC_1 \right].$$

Відповідно, розподіл можливостей виду:

$$pd_{sc|rc} \left(\overline{(tcp_1^1, \dots, tcp_n^1)}, cntr_1^{tcp} \right) \leq \text{num} \left(pd_{RC} \left(\overline{tcp_1^1, \dots, tcp_n^1} \right) \vee pd_{SC} \left(cntr_1^{tcp} \right) \right),$$

виражатиме входження кортежів значень $\left(\overline{(tcp_1^1, \dots, tcp_n^1)}, cntr_1^{tcp} \right)$, для яких:

$$\left(\forall \overline{(tcp_1^1, \dots, tcp_n^1)} \in D_1, \forall cntr_1^{tcp} \notin D_2, pd_{sc|rc} \left(cntr_1^{tcp}, \overline{(tcp_1^1, \dots, tcp_n^1)} \right) \leq 0 \right).$$

Таке співвідношення визначає ступінь визначеності щодо належності значень:

$$\left[\begin{array}{l} \text{ЯКЩО } rc \in RC^1 \text{ ТОДІ } sc \in SC^1 \\ \text{ЯКЩО } rc \in RC^2 \text{ ТОДІ } sc \in SC^2 \end{array} \right].$$

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

$$Sm^{cert.} : \left[\begin{array}{l} \text{Rule}^{certain} \stackrel{\text{def.}}{:=} [\text{ЯКЩО } rc \in RC \text{ ТОДІ } sc \in SC] \\ \text{ЯКЩО } rc \in RC', RC' \supset RC \text{ ТОДІ } sc \in SC \text{ АБО } sc \notin SC \mid - \\ \mid - pd_{sc|rc} \left(cntr_1^{tcp}, \overline{(tcp_1^1, \dots, tcp_n^1)} \right) \leq 1 \end{array} \right].$$

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

$$\left[\begin{array}{l} pd_{sclrc} \left(\overline{cntr_1^{tcp}, (tcp_1^1, \dots, tcp_n^1)} \right) \geq chf_{RC^1} \left(\overline{tcp_1^1, \dots, tcp_n^1} \right) \wedge chf_{SC^1} \left(cntr_1^{tcp} \right) \\ pd_{sclrc} \left(\overline{cntr_1^{tcp}, (tcp_1^1, \dots, tcp_n^1)} \right) \geq chf_{RC^2} \left(\overline{tcp_1^1, \dots, tcp_n^1} \right) \wedge chf_{SC^2} \left(cntr_1^{tcp} \right) \end{array} \right].$$

Правило в форматі $\overbrace{RelationCondition}^{RC} \rightarrow \overbrace{SatisfactionCondition}^{SC}$ можна розглядати як деякий фрагмент процесу збору інформації, а диз'юнктивні поєднання правил виконують роль акумуляційних процедур. Відповідно в імплікаційній моделі:

$$pd_{sclrc} \left(\overline{cntr_1^{tcp}, (tcp_1^1, \dots, tcp_n^1)} \right) \geq \left(chf_{RC^1} \left(\overline{tcp_1^1, \dots, tcp_n^1} \right) \wedge chf_{SC^1} \left(cntr_1^{tcp} \right) \right) \vee \left(chf_{RC^2} \left(\overline{tcp_1^1, \dots, tcp_n^1} \right) \wedge chf_{SC^2} \left(cntr_1^{tcp} \right) \right)$$

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

$$Rule \stackrel{def.}{:=} Constraint[SolutionSet].$$

Такий спосіб інтерпретації визначає можливість значень у висновках правил.

Класичні правила форми «ЯКЩО-ТОДИ», 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:

$$\mathbf{ЯКЩО} \quad rc \in RC \quad \mathbf{І} \quad rc_1 \in RC_1 \quad \mathbf{ТОДИ} \quad sc \in SC,$$

де: $RC \subset D_1$; $SC \subset D_2$; $RC_1 \subset D_3$.

В такому випадку отримуємо, що:

$$\left[\begin{array}{l} pd_{sclrc} \left(\overline{cntr_1^{tcp}, (tcp_1^1, \dots, tcp_n^1)} \right) \leq \text{num} \left(chf_{RC^1} \left(\overline{tcp_1^1, \dots, tcp_n^1} \right) \vee chf_{SC^1} \left(cntr_1^{tcp} \right) \right) \\ pd_{sclrc} \left(\overline{cntr_1^{tcp}, (tcp_1^1, \dots, tcp_n^1)} \right) \leq \text{num} \left(chf_{RC^2} \left(\overline{tcp_1^1, \dots, tcp_n^1} \right) \vee chf_{SC^2} \left(cntr_1^{tcp} \right) \right) \end{array} \right].$$

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

$$pd_{sc|rc} \left(\overline{cntr_1^{tcp}, (tcp_1^1, \dots, tcp_n^1)} \right) \leq \left[\text{num} \left(chf_{RC^1} \left(\overline{tcp_1^1, \dots, tcp_n^1} \right) \vee chf_{SC^1} \left(cntr_1^{tcp} \right) \right) \right] \wedge \\ \wedge \left[\text{num} \left(chf_{RC^2} \left(\overline{tcp_1^1, \dots, tcp_n^1} \right) \vee chf_{SC^2} \left(cntr_1^{tcp} \right) \right) \right]$$

Припустимо, що ми маємо деяку загальну інформацію про значення rc_1 з його співвіднесенням до множини RC_1 , причому таке співвіднесення може бути виражене у вигляді твердження «швидше за все (майже напевно) $rc_1 \in RC_1$ ». В термінах можливісного розподілу ми отримуємо наступне подання:

$$rc_1 \in RC_1 \stackrel{def}{:=} \text{num}(RC_1) = \inf_{cntr_2^{tcp} \notin RC_1} \left[1 - pd_{rc_1} \left(cntr_2^{tcp} \right) \right] = 1 - \Lambda.$$

Таким чином, з даного співвідношення можемо бачити, що ступінь визначеності належності змінної rc_1 множині RC_1 можна визначити із співвідношення:

$$pd_{rc_1} \left(cntr_2^{tcp} \right) = \begin{cases} 1, & \text{ЯКЩО } cntr_2^{tcp} \in RC_1 \\ \Lambda < 1, & \text{ЯКЩО } cntr_2^{tcp} \notin RC_1 \end{cases} = \max \left(chf_{RC_1} \left(cntr_2^{tcp} \right), \Lambda \right),$$

або в термінах імплікаційної моделі:

$$pd_{sc|rc, rc_1} \left(\overline{cntr_1^{tcp}, (tcp_1^1, \dots, tcp_n^1)}, cntr_2^{tcp} \right) \leq \text{num} \left[\begin{array}{l} chf_{RC} \left(\overline{tcp_1^1, \dots, tcp_n^1} \right) \vee \\ \vee \text{num} \left(chf_{RC_1} \left(cntr_2^{tcp} \right) \right) \vee chf_{SC} \left(cntr_1^{tcp} \right) \end{array} \right].$$

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

$$chf_{SC'} \left(cntr_1^{tcp} \right) = \max \left(chf_{SC} \left(cntr_1^{tcp} \right), \Lambda \right),$$

то на основі введеної імплікаційної моделі матимемо подання правил виду:

$$\text{ЯКЩО } rc \in RC \text{ ТОДІ } sc \stackrel{Constr.}{:=} [SC'],$$

тобто значення sc задаватимуться у формі накладених обмежень.

Застосування кон'юнкції можливісних розподілів і методу виконання їх

проекції згідно [90, 125] можна отримати такий результат в термінах наближеного висновку:

$$\sup_{cntr_2^{tcp}} \left[\min \left(\begin{array}{l} pd_{(sc=cntr_1^{tcp})} (cntr_2^{tcp}), \\ pd_{sc|rc, rc_1} \left(\overline{cntr_1^{tcp}, (tcp_1^1, \dots, tcp_n^1)}, cntr_2^{tcp} \right) \end{array} \right) \right] =$$

$$= pd_{sc|rc} \left(\overline{cntr_1^{tcp}, (tcp_1^1, \dots, tcp_n^1)} \right) \leq \max \left[\text{num} \left(chf_{RC} \left(\overline{tcp_1^1, \dots, tcp_n^1} \right) \right), chf_{SC} (cntr_1^{tcp}), \Lambda \right]$$

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:

$$\left[\begin{array}{l} [rc \rightarrow sc'] = \max(\text{num}(rc), sc') = \max(\text{num}(rc), sc, \lambda) \\ \text{ЯКЩО } rc \in RC \text{ ТОДІ } [sc \in SC]: [CF = 1 - \lambda] \end{array} \right]$$

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

$$\left[\begin{array}{l} \text{ЯКЩО } rc \in RC \text{ І } rc_1 \in RC_1 \text{ ТОДІ } sc \in SC \\ \text{ЯКЩО } rc \in RC \text{ І } rc_1 \notin RC_1 \text{ ТОДІ } sc \in SC^* \end{array} \right] \vdash$$

$$\vdash pd_{sc|rc} \left(\overline{cntr_1^{tcp}, (tcp_1^1, \dots, tcp_n^1)} \right) \leq \max \left[\begin{array}{l} \text{num} \left(chf_{RC} \left(\overline{tcp_1^1, \dots, tcp_n^1} \right) \right), \\ \max \left(chf_{SC} (cntr_1^{tcp}), \min(\Lambda, chf_{SC^*} (cntr_1^{tcp})) \right) \end{array} \right]$$

В імплікаційній моделі базовим для розгляду є правило виду:

$$BaseRule^{impl.} = \{ \text{ЯКЩО } rc \in RC \text{ ТОДІ } Restriction(sc, SC^i) \},$$

з можливісним розподілом виду:

$$chf_{SC^i} (cntr_1^{tcp}) = \max \left(chf_{SC} (cntr_1^{tcp}), \min(\Lambda, chf_{SC^*} (cntr_1^{tcp})) \right).$$

На рівні множини правил матимемо:

$$RuleSet = \{ \text{ЯКЩО } rc \in RC^i \text{ І } rc_1 \in RC_1^i \text{ ТОДІ } sc \in SC^i \},$$

де $RC_1^i \subset D_3, i = 1..n$.

Згідно з оцінкою можливісного розподілу матимемо, що:

$$\left[\begin{array}{l} pd_{rc_1}(cntr_2^{tcp}) = \Lambda_i \text{ ЯКЩО } rc_1 \in RC_1^i \\ pd_{sclrc}\left(\overline{cntr_1^{tcp}, (tcp_1^1, \dots, tcp_n^1)}\right) \leq \max\left(\text{num}\left(chf_{RC}\left(\overline{tcp_1^1, \dots, tcp_n^1}\right)\right), chf_{SC'}\left(cntr_1^{tcp}\right)\right) \\ chf_{SC'}\left(cntr_1^{tcp}\right) = \max_{i=1..n}\left[\min\left(\Lambda_i, chf_{SC^i}\left(cntr_1^{tcp}\right)\right)\right] \end{array} \right.$$

Відповідно в кон'юнктивній моделі [126] сутність отримання правила полягає в застосуванні нечітких консеквентів у процесі наближеного висновку, що на рівні розподілу можливостей матиме вигляд:

$$\left[\begin{array}{l} pd_{sclrc, rc_1}\left(\overline{cntr_1^{tcp}, (tcp_1^1, \dots, tcp_n^1)}, cntr_2^{tcp}\right) \geq \bigvee_{i=1..n} \left[\begin{array}{l} chf_{RC^i}\left(\overline{tcp_1^1, \dots, tcp_n^1}\right) \wedge \\ \wedge chf_{RC^i}\left(cntr_2^{tcp}\right) \wedge chf_{SC^i}\left(cntr_1^{tcp}\right) \end{array} \right] \\ pd_{sclrc}\left(\overline{cntr_1^{tcp}, (tcp_1^1, \dots, tcp_n^1)}\right) \geq \min\left[chf_{RC'}\left(\overline{tcp_1^1, \dots, tcp_n^1}\right), chf_{SC'}\left(cntr_1^{tcp}\right)\right] \end{array} \right.$$

На нижньому рівні проектування системи слід визначати множини вхідних та вихідних змінних, в тому числі нечітких.

3.4. Моделювання режимних параметрів на основі фреймово-продукційного підходу

На формальному рівні фреймову модель доцільно представляти кортежем виду:

$$FM = \langle FS, \{F_i.SS\}, DT, VR, RS, IR, \rangle,$$

де: FM (*FrameModel*) – фреймова модель; FS (*FrameSet*) – множина фреймів; $F_i.SS$ (*Frame_i.SlotSet*) – множина слотів i -того фрейму; DT (*DataTypes*) – типи даних; VR (*ValuesRange*) – діапазон значень; RS (*RoutinesSet*) – множина процедур; IR (*InheritanceRelations*) – відношення наслідування.

Реалізація методики представлення знань про об'єкти буріння у вигляді фреймів матиме вигляд представлений на рис. 3.3. Відповідно до ситуації предметної області система вибирає певний фрейм з бази, що відповідає даному класу ситуації, виконує його узгодження з описом ситуації шляхом актуалізації певних даних з відповідних наборів, що призводить до отримання максимально адаптивного представлення фрейму. При такому підході система використовує

два типи фреймів: прототипні фрейми із заданими значеннями комірок по замовчуванню та ініціалізовані фрейми з ініціалізованими значеннями комірок відповідно до фактичного стану предметної області. Такий опис дозволяє отримати деталізацію формальної структури фрейму у вигляді:

$$FrameStructure = \{ \langle Slot_1, Value_1 \rangle, \langle Slot_2, Value_2 \rangle, \dots, \langle Slot_k, Value_k \rangle \},$$

де: $Slot_k$ – k -й слот; $Value_k$ – значення k -го слоту.

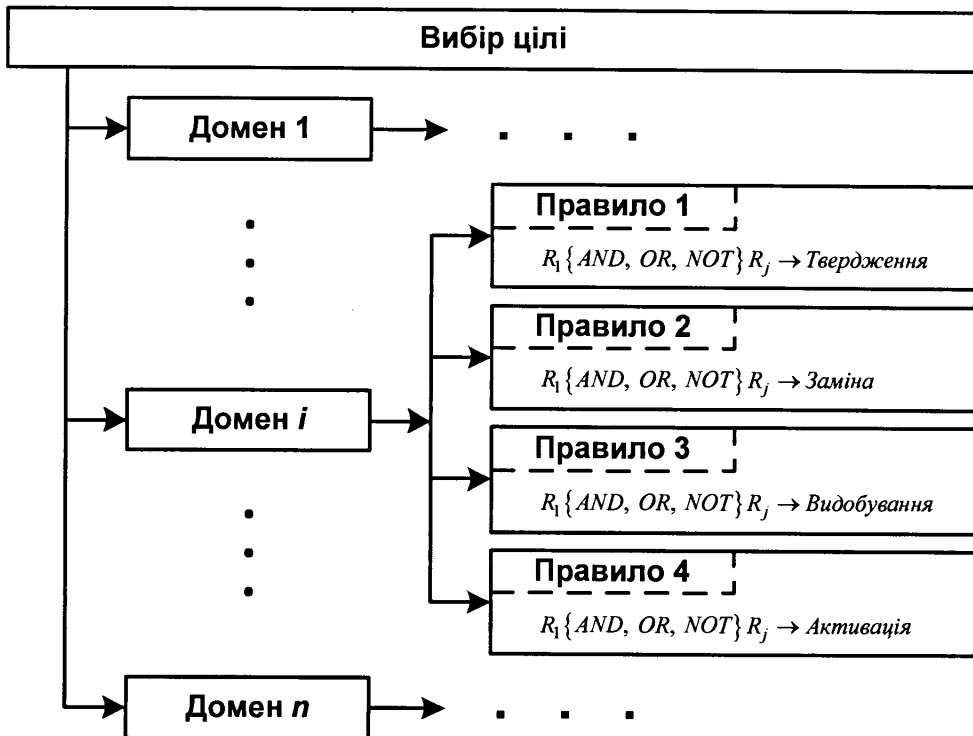


Рис. 3.3. Типова фреймова структура представлення знань нафтогазової предметної області

Деталізація значень слотів може бути зведена до:

$$Slot_i.Value_i = \left\{ \left\langle Slot_i.Attr_j, Attr_j.Values^{set} \right\rangle, \dots, \left\langle Slot_i.Attr_{j_n}, Attr_{j_n}.Values^{set} \right\rangle; Ref_1, \dots, Ref_i \right\},$$

де: $Slot_i.Attr_j$ – j -й атрибут i -го слоту; $Attr_j.Values^{set}$ – множина значень j -го атрибуту; Ref_i – посилання на інші слоти або фрейми.

Структуру слоту можна визначити формальною структурою виду:

$$SlotStructure = \left\{ SlotName, DateType, DefaultValue, InheritanceFeature, \left. \begin{array}{l} Routines, Rules, Pictures, Remarks, Assumes \end{array} \right\}, \right\}$$

де: *SlotName* – ім'я слоту; *DateType* – тип даних; *DefaultValue* – значення по замовчуванню; *InheritanceFeature* – особливість наслідування; *Routines* – процедури; *Rules* – правила; *Pictures* – зображення; *Remarks* – коментарі; *Assumes* – припущення щодо стратегії поведінки.

Результати отримані в [119] показують, що з точки зору практичного застосування в нафтогазовій предметній області ефективним рішенням є побудова фреймової системи (рис. 3.4).

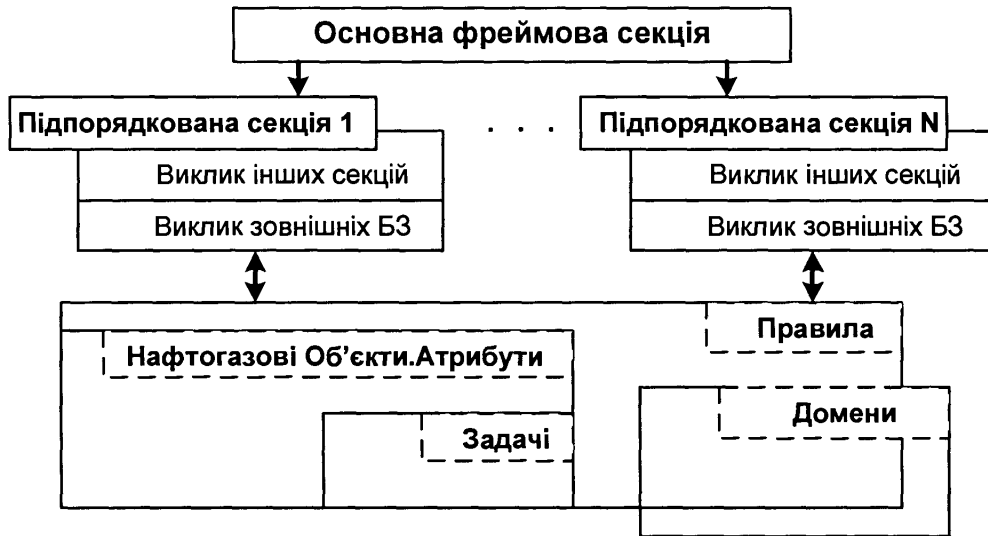


Рис. 3.4. Структура фреймово-продукційного підходу моделювання об'єктів буріння.

Аналіз функціональності інтелектуальних систем для нафтогазової предметної області дозволяє виділити в них фреймово-орієнтовані структуровані входження знань, які на рівні абстрактного представлення можна класифікувати у вигляді формального кортежу:

$$Frame^{set} = \left\{ \left[Object^{frame} \right]_{i_1=1..i_1^{max}}^{i_1}, \left[Rule^{frame} \right]_{i_2=1..i_2^{max}}^{i_2}, \left[Domain^{frame} \right]_{i_3=1..i_3^{max}}^{i_3}, \left[Goal^{frame} \right]_{i_4=1..i_4^{max}}^{i_4} \right\}_{i_1, i_2, i_3, i_4 \in N}$$

Згідно класичних означень в даній області фреймова модель розглядається в першу чергу як добре структурована та об'єктно-орієнтована, що особливо сприятливо для реалізації системи в імперативних програмних парадигмах.

Хоча згідно класичного визначення фреймом вважається структурований фрагмент знань для представлення стандартної ситуації предметної області, в

новітній реалізації систем на основі знань, що орієнтовані на правила, фрейми не використовуються в чистому вигляді, а є, як правило, частиною гібридної конструкції знань. Побудуємо формальне представлення та опишемо формальну математичну модель фреймово-продукційної системи на основі знань нафтогазової предметної області:

$$FPM = \left\{ \begin{array}{l} Frame^{set}, [Frame_i [Slot_j]], Frame_i.Slot_j.AttributesDomain_k, \\ DataTypes, FrameRelations, FrameRoutines \end{array} \right\},$$

де: $i = 1..i_{max}$, i_{max} – максимальна кількість фреймів (розглядається випадок тільки скінченної кількості) в системі; $j = 1..j_{max}^i$, j_{max}^i – максимальна кількість слотів у i -му фреймі; $AttributesDomain_k$ визначає області зміни значень слотів; використовуються три основні типи даних: категорійний (перелічуваний), числовий, логічний:

$$DataTypes = \{Category(enumerated), numerical(number), boolean(logical)\};$$

$FrameRelations$ – множина введених відношень між фреймами (як правило базовим є відношення включення, орієнтоване на фрейми правил $[Rule^{frame}]^2$); $FrameRoutines$ – множина імперативних та декларативних процедур на основі фреймів.

В розглянутих системах використовуються правила різних синтаксисів та семантики. Проте на найбільш загальному рівні можна виділити наступний синтаксис:

{поле_правил} := правила {правила_параметра}.

{правила_параметра} := {правило_параметра} [, {правила_параметра}]

{правило_параметра} := {вираз} [якщо {логічний_вираз}]

правила <вираз> якщо <логічний_вираз>, ..., <вираз>

правило := {[ім'я :], [коэф._впевненості :], [домен :], [тип : <i, або>], [дія :], [об'єкт :], [порівняння :], [атрибут :], [опції :], [значення :]}

Виконаний аналіз дозволяє побудувати фреймово-продукційну систему на основі бази знань про режими буріння у вигляді:

$$FPM = \{Objects^{set}, Rules^{set}, Domains^{set}, Goals^{set}\},$$

де: $Goals^{set} = \{ \text{максимізація_механічної_швидкості_буріння, максимізація_терміну_служби_бурого_долота, мінімізація_зношеності_бурового_долота} \};$
 $Domains^{set} = \{ \text{оптимальний_режим, раціональний_режим, форсований_режим, швидкісний_режим, силовий_режим, спеціальний_режим} \};$
 $Rules^{set} = \{ R1 = (\text{ЯКЩО показники_поглиблення_свердловини } \in \text{ найкращі } \text{І ефективність_роботи_долота } \in \text{ висока } \text{ТОДІ режим_буріння } \in \text{ оптимальний}), R2 = (\dots), \dots, (\text{див. додаток Б}) \};$ $Objects^{set} = \{ \text{бурове_долото, бурова_колона, гірська_порода, буровий_розчин, стовбур_свердловини, вибій_свердловини, \dots} \}.$

На етапі фазифікації вхідних змінних фреймової структури 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:

$$DefuzzyStage = \{ RulesSet, dataArray \},$$

де $dataArray = \{ d_1, d_2, \dots, d_n \}_{n \in N}$ – масив вхідних даних, що відповідно містить значення вхідних змінних.

Згідно з співвідношенням $condition_i = mf(d_i)$, виконується обчислення значень істинності множини умов, які утворюватимуть в кінцевому підсумку множину значень:

$$ConclusionSetValues = \{ condition_i \} = \{ mf(d_i) \},$$

де $i = 1..n, n \in N$.

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

$$Verify(condition_i) = \left[\begin{array}{c} \min(mf(d_i)) \\ \max(mf(d_i)) \end{array} \right]_{i=1..n},$$

де n – кількість підумов в правилі.

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

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

$$\left[mf_{concl_i}^{Set}(t) \right]' = \min \{ Verify(conclusion_i), mf_{concl_i}^{Set}(t) \},$$

де: $\left[mf_{concl_i}^{Set}(t) \right]'$ – активована функція належності; $mf_{concl_i}^{Set}(t)$ – функція належності терма; $Verify(conclusion_i)$ – ступінь істинності i -го підвисновку; $i = 1..n$, $n \in N$. Виконання даної послідовності кроків дасть змогу в кінцевому висновку отримати для кожного підвисновку на множині правил певну сукупність активованих нечітких множин:

$$concl_i \models FuzzySet_{concl_i}^{active}.$$

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

$$lv_i^{out} \models \bigcup_{j=1..k_1} FuzzySet_j,$$

де $i = 1..m_1$, $k_1, m_1 \in N$

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

$$LV_i^{Set} = \bigcup_{j=1..k_2} set_{concl_j},$$

де $i = 1..m_2$, $\forall j, lv_i^{out} \in concl_j$.

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

$$mf^{\cup}(x) = \max \{ mf_1(x), mf_2(x) \}.$$

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:

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

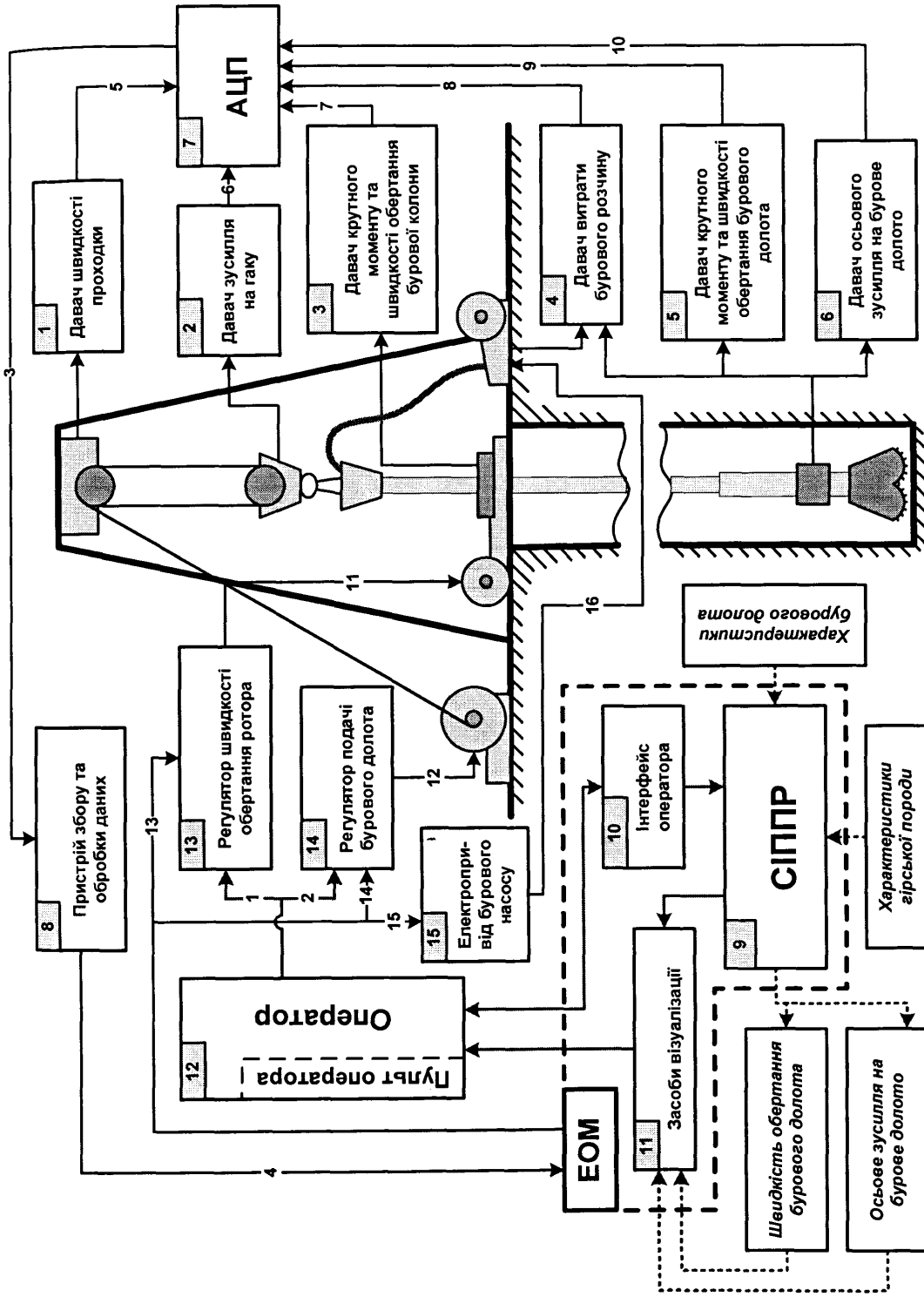
де: CV_i (*crispy value*, *результат дефазифікації*) – відповідне чітке значення для вихідного значення lv_i^{out} ; $mf_i(x)$ – функція належності відповідної нечіткої множини LV_i^{Set} ; min , max – обчислювані границі для універсуму нечітких змінних.

3.5. Аналіз технологічних умов процесу буріння для створення модуля інтелектуальної підтримки прийняття рішень

Системи керування процесом буріння [1, 3, 7, 38, 127] в загальному випадку, в тому числі системи із замкнутим контуром повинні мати наявності засоби обробки даних, що знімаються давачами, розміщеними на буровій площадці і за допомогою телеметричних комунікаційних засобів передавати їх на ЕОМ, з якої скореговані сигнали в цифровій формі передаються на модулі регуляторів подачі бурого долота та швидкості обертання бурового ротора для автоматичної корекції значень зусилля на бурове долото і швидкості обертання бурової колони, що були встановлені вручну оператором в процесі буріння. Також такі системи повинні підтримувати роботу із даними, які знімаються в процесі буріння давачами витрати бурового розчину, що дозволяє координувати та контролювати роботу бурового насосу.

Проектована система інтелектуальної підтримки прийняття рішень при виборі оптимальних режимних параметрів буріння нафтових і газових свердловин (надалі позначатимемо її як СІППР) є частиною системи керування процесом буріння із замкнутим контуром, що базується на взаємодії із обладнанням для буріння, включає вимірювання сигналів з вибою свердловини та з її поверхні, і передбачає інтелектуальне коректування значень режимних параметрів через засоби керування процесом буріння.

Модель системи по своїй суті є інтелектуальним модулем, місце та функціональність якого представлено на рис. 3.5.



СІПР – система інтелектуальної підтримки прийняття рішень при виборі оптимальних режимних параметрів

Рис 3.5. Загальна архітектура інтеграції модуля системи інтелектуальної підтримки прийняття рішень при виборі оптимальних режимних параметрів в структурну схему автоматизації процесу буріння нафтових і газових свердловин.

При бурінні нафтових і газових свердловин за допомогою ротора бурової установки на верхньому кінці бурової колони розміщується буровий вертлюг через який за допомогою бурових насосів закачується буровий розчин, який по каналу в буровій колоні надходить до форсунок бурового долота та повертається на поверхню по затрубному просторі, виносячи разом із собою розбурену породу.

В ряді систем [128] спеціальні давачі під'єднуються до бурової колони поблизу бурового долота і знімають значення заданої кількості бурових параметрів в безпосередній близькості від вибою свердловини. Зчитані подібним чином бурові параметри, як правило, включають в себе зусилля на бурове долото на вибої свердловини крутний момент та швидкість обертання бурового долота, внутрішній тиск бурового розчину всередині бурової колони і тиск бурової рідини всередині затрубного простору між буровою колоною і стінкою стовбура свердловини.

Бурова колона і буровий вертлюг піднімається і опускається гаком за допомогою талевого блоку, який через багатожильний стальний трос з'єднується з буровою лебідкою. Історично склалося так, що барабан лебідки контролювався її гальмівною системою при русі бурової колони вниз. В більш новітніх технологіях переміщення барабану бурової лебідки керується двигуном, що забезпечує, ефективний механізм комп'ютеризованого автоматизованого керування або комп'ютеризовану оптимізацію ручного керування бурових операцій оператором процесу буріння.

Зусилля на гаку бурової установки із загальної точки зору є вагою приводу, бурової штанги та іншого бурового обладнання, що має вплив на сумарну вагу, яка прикладається до бурового долота. Крім того, зусилля на гаку перебуває під впливом сили виштовхування, що є результатом занурення бурової труби у буровий розчин, який відрізняється по своїй густині в залежності від характеристик свердловини, тиску газу на кожній заданій глибині і характером гірської породи, що буриться. Відповідно, тиск на стояку є тиском бурового розчину в кожній точці всередині проточного каналу бурової штанги.

Як показано на рис. 3.5, команди оператора технологічного процесу буріння задаються ручним вводом в блоці 12. Дані команди в основному задаються для контролю швидкості обертання бурового долота та осьового зусилля на бурове долото, яке вимірюється на гаку. Окремо командами оператора виконується контроль бурових насосів. Команди оператора подаються через лінії зв'язку 1 та 2 на блоки 13 та 14. Відповідно блок 13 задає швидкість обертання бурового ротора, а блок 14 контролює операції з буровою лебідкою, що залежать від програмованих параметрів і від вхідного потоку даних процесу буріння, які відображають різноманітні параметри бурової системи.

Дані з давачів 1-4 поступають через лінії зв'язку 5-8 на аналого-цифровий перетворювач 7, а з нього через лінію зв'язку 3 на блок 8. З блоку 8 оцифровані дані поступають через лінію зв'язку 4 на ЕОМ. Дані з множини поверхневих давачів 1-4, які вимірюють висоту талевого блоку, зусилля на гаку, швидкість обертання стола бурового ротора і витрату бурового розчину розглядаються як недостатні для чіткої ідентифікації умов на вибої свердловини, що відбуваються в кожен момент часу в області близькій до бурового долота. Тому, вимірювання зроблені на поверхні свердловини є інтерполяцією умов на вибої свердловини. Тому рішення бурового оператора в деяких випадках можуть бути помилковими, оскільки фактичні умови на вибої не є явними.

Таким чином, в тих випадках, коли рішення оператора прив'язані до вимірювань на поверхні свердловини, то вони можуть виявитися достатньо повільними або неадекватними по відношенню до потенційно можливої шкоди або ступеня зношеності, що може отримати бурове обладнання внаслідок неефективного керування. Тому, бажано отримувати набори даних щодо виділених параметрів на вибої свердловини в процесі буріння і використовувати такі дані в режимі реального часу наскільки це можливо в рамках архітектури системи із замкнутим контуром для оптимізації процесу буріння способом, що максимально враховує умови на вибої.

Тому, дані з давачів 4-6 розміщених на вибої свердловини, які передаються телеметричним зв'язком по каналах 8-10 є відповідно вхідними даними для

блоку 7 з якого через канал зв'язку 3 вони поступають на блок 8. Вихідні інформаційні сигнали представлені у цифровій формі передаються через лінію зв'язку 4 на ЕОМ.

Таким чином, в системах даного класу, вимірювання, що отримуються на певних кроках передаються засобами відповідних лінії зв'язку на ЕОМ, яка після обробки даних передає їх через відповідні лінії зв'язку на цифрові модулі, що є інтегрованими компонентами автоматизованої системи керування процесом буріння, яка контролюється оператором процесу буріння. В типових схемах автоматизації процесу буріння модулі з цифровим керуванням застосовується з метою забезпечення уточнень в процесі керування буровою установкою, шляхом доповнення команд оператора буріння автоматичними корекціями для мінімізації класичних проблем керування, таких як відхилення від бажаного рівня керованості, коливання навколо бажаного рівня контролю, пізні реактування або помилкові керуючі впливи. Проте, оскільки всі бурові операції виконуються в умовах невизначеності, то рівень автоматизації є обмеженим і на даний час продовжує бути залежним в значній мірі від навиків, знань та умінь оператора.

Автоматизовані системи керування процесом буріння із замкнутим контуром, які використовуються разом із традиційним ручним керуванням забезпечують автоматичну корекцію режимних параметрів в залежності від сигналів з поверхні та вибою свердловини, що дозволяє забезпечити оптимізацію швидкості проходки бурового долота і мінімізацію зношеності та навантаження на компоненти на вибої свердловини, такі як бурова колона, давачі на вибої свердловини, бурове долото та ін.

В загальному випадку, як показує досвід реалізації систем даного класу набори даних, що представляють крутний момент, швидкість обертання долота, зусилля на долото на вибої свердловини та внутрішній тиск бурового розчину всередині проточного каналу для промивної рідини і затрубний тиск бурового розчину в просторі між буровою колоною і стінкою стовбура свердловини, що буриться є відповідно вхідними даними для давачів розміщених на вибої свердловини. Ці дані передаються телеметричним зв'язком від давачів через

стовп бурового розчину до поверхні, де вони отримуються як потік вхідних даних. Вихідні інформаційні сигнали представляються у цифровій формі і передаються через лінії зв'язку до відповідних модулів. Зокрема дані з вибою свердловини передаються на пристрій збору та обробки даних, що дозволяє використовувати їх для оптимізації або корекції режимних параметрів процесу буріння. В той же час, швидкість передачі даних із вибою свердловини повинна бути достатньо високою для адекватного та оперативного реагування системи щодо змін умов буріння на вибої свердловини.

У випадку контролю осьового зусилля, крутного моменту та швидкості обертання бурового долота необхідно забезпечити автоматизовану систему відповідними засобами керування, що взаємодіють із даними з вибою свердловини. Для досягнення технологічних рішень даного класу система автоматизації процесу буріння має в своєму розпорядженні механізм подачі бурового долота для опускання або піднімання бурової колони та механізм приводу ротора для надання обертання буровій колоні. Давачі осьового зусилля 6, крутного моменту та швидкості обертання бурового долота 5 розміщуються на вибої свердловини в безпосередній близькості до бурового долота. Через лінію зв'язку 10 та 9 дані від давачів осьового зусилля, крутного моменту та швидкості обертання з вибою свердловини передаються на аналого-цифровий перетворювач 7, а з нього на блок 8. Дані з вибою свердловини, що обробляються в блоці 8 представлені в цифровій формі і передаються через лінію зв'язку 4 на ЕОМ. Керуючий вихідний сигнал для приводу бурової колони передається на механізм подачі бурового долота 14 та приводу бурового ротора 13 через лінії зв'язку 12 і 11. Давачі 2 та 3 розміщені на талевому блоці і приводі бурового ротора забезпечують вимірювання зусилля на гаку, швидкості обертання та крутного моменту на поверхні свердловини, при цьому сигнали вимірювання передаються на блок 7 через лінії зв'язку 6 і 7.

Архітектурне та функціональне рішення в системах даного класу полягає в тому, що інструменти для вимірювань в процесі буріння розміщуються в нижній частині бурової колони перед буровим долотом. Дані з вибою свердловини, які обробляються за допомогою ЕОМ представляються в

цифровій формі і передаються через лінії зв'язку до цифрових модулів. Зокрема керуючий вихідний сигнал для приводу бурової колони передається до керуючого механізму приводом через лінію зв'язку 13, а керуючий сигнал для приводу подачі бурового долота через відповідну лінію зв'язку 14. З метою автоматичного порівняння даних, команди оператора будуть встановлювати бажане зусилля на бурове долото та бажану швидкість обертання бурового долота.

Дані, що поступають від давачів вимірювання осьового зусилля, крутного моменту та швидкості обертання бурового долота на вибої свердловини не є єдиними даними, що передаються на ЕОМ як вхідні параметри, але саме таке спрощення, як правило приймається в системах керування процесом буріння із замкнутим контуром.

В загальному випадку, системи керування із замкнутим контуром, використовуються також для оптимізації гідравліки бурового розчину під час буріння свердловини і є чутливими до зміни гідравлічних умов на вибої свердловини. З точки зору гідравліки бурового розчину давачі 4 виконують вимірювання витрати бурового розчину, тиску бурового розчину в середині проточного каналу бурової колони і вимірюють тиск бурового розчину всередині затрубного простору між буровою колоною і стінками свердловини. Такі дані передаються від давачів 4 за допомогою телеметричних ліній зв'язку 8 до поверхні, де вони використовуються як вхідні для відповідних цифрових модулів автоматизованої системи.

Оператор процесу буріння забезпечує команди гідравлічного контролю для встановлення бажаної витрати бурового розчину і максимального тиску на виході насоса. Дані, отримані на усті свердловини про витрату бурового розчину і тиску на виході насоса передаються через лінію зв'язку 4 на ЕОМ з метою виконання порівняння з фактично вимірюваними даними щодо гідравліки бурового розчину на вибої свердловини. Оброблені за допомогою ЕОМ дані щодо гідравліки бурого розчину використовується для внесення змін в налаштування бурового насоса, які були встановленні командами оператора у випадку необхідності забезпечення або підтримки внутрішнього або

зовнішнього тисків, і, також витрати на вибої свердловини для бурового розчину всередині наперед визначеного діапазону для досягнення оптимальної швидкості проходки бурового долота, або задоволення інших критеріїв оптимальності та передаються на привід бурового насосу через лінію зв'язку 15, а від нього через лінію зв'язку 16 керуючий сигнал подається на буровий насос.

Висновки до третього розділу

1. Визначено структуру керування процесом підтримки прийняття рішень в інтелектуальній системі на основі нечіткої логіки, що дозволяє створювати ефективний спосіб перетворення експертного досвіду оператора буріння в деяке комп'ютерне представлення. Засоби підтримки прийняття рішень на основі правил розглядаються саме як засоби інтелектуального управління, особливо в умовах невизначеної, неточної, нечіткої, слабо структурованої і неструктурованої інформації, та в умовах браку кількісних даних, які б дозволяли чітко співвідносити множини вхідних та вихідних даних, що в кінцевому підсумку дозволяє використовувати лінгвістичні стратегії керування, які базуються на знаннях.

2. Реалізовано формальні методи інтелектуального керування процесом підтримки прийняття рішень на основі нечітких знань про процес буріння, що дозволяє безпосередньо оперувати із заданою чіткою або нечіткою структурою та інформацією в формі баз даних та баз знань з можливими неструктурованими, слабоструктурованими та лінгвістичними входженнями, а також входженнями з невизначеністю, що в свою чергу визначає найбільш повний спосіб подання знань експертів технологічного процесу буріння. Необхідність саме такого підходу визначається характеристиками процесу буріння, які, відповідно, описуються високим рівнем складності даних з віддалених давачів, ієрархічним поданням множин цілей та відповідних множин і систем ієрархії обмежень, що не можуть бути проаналізовані на основі засобів чіткої логіки, зокрема у формі правил чітких продукцій.

3. Представлено спосіб використання нечітких правил для подання знань в інтелектуальних системах підтримки прийняття рішень при бурінні нафтових і газових свердловин, що дозволяє будувати правила на основі ймовірнісних та можливісних розподілів з введеними функціями доцільності та корисності. Наявність ймовірнісних значень дає змогу уникати складних технік та методик оцінювання і визначати основним завданням задачу виведення значень доцільності та корисності, як вимірюваного способу вираження переваг та технологічних впливів від прийняття відповідних рішень.

4. Побудовано спосіб моделювання предметної області буріння нафтових і газових свердловин на основі фреймово-продукційного підходу при якому фреймова модель розглядається як множина фреймів, множина слотів, введених типів даних, введених діапазонів значень і введених множин процедур та відношення наслідування. Функціональність системи зводиться до вибору відповідного релевантного фрейму з бази, що відповідає поточній технологічній проблемі та актуалізації оптимальних наборів значень керованих параметрів. Продукційні правила, що використовуються в системі, включають в себе чіткі, нечіткі та змішані типи правил.

5. Представлено опис проблеми прийняття рішень в процесі буріння нафтових і газових свердловин шляхом виділення множин керованих, некерованих, збурюючих та вихідних технологічних параметрів. Виділено, що основною досліджуваною метою підтримки прийняття рішень є оптимізація значень керованих параметрів, що дозволяє розглядати результуючу модель підтримки прийняття рішень як оптимізаційну, оскільки в ній наявні цільові функції, які повинні бути оптимізовані, в тому числі в процесі задоволення обмежень накладених на множини введених змінних (технологічних параметрів), що описують процес буріння нафтових і газових свердловин.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА СИСТЕМИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ПРИ ВИБОРІ ОПТИМАЛЬНИХ РЕЖИМНИХ ПАРАМЕТРІВ БУРІННЯ

4.1. Особливості застосування систем підтримки прийняття рішень в процесі буріння

Проектована система інтелектуальної підтримки прийняття рішень (СІППР) включає в себе тіло знань, яке описує певні аспекти прийняття рішень щодо вибору оптимальних режимних параметрів буріння, що в свою чергу дозволяє відобразити, які висновки та дії оператора технологічного процесу є дійсними за різних початкових умов буріння. Очікувані переваги проекрованої СІППР полягають у підвищенні якості прийняття рішень в процесі буріння, покращенні комунікаційної взаємодії між операторами технологічного процесу, зменшенні вартості проекту свердловини, збільшенні загальної продуктивності, економії часу і підвищення загального рівня рентабельності свердловини [41]. Таким чином, створена СІППР для вибору оптимальних режимних параметрів буріння [129-132] є комп'ютер-базованою системою, що складається з трьох основних взаємодіючих компонент: 1) формальна мовна система – механізм, що забезпечує комунікацію між оператором та іншими компонентами СІППР; 2) система знань – репозиторій проблем домену знань, що втілена в СІППР в формі даних або процедур; 3) система обробки проблем предметної області – зв'язуюча ланка попередніх двох компонент, що містить засоби маніпуляції з проблемами предметної області, які необхідні для прийняття рішень.

В загальному випадку, для досліджуваної предметної області можна проектувати наступні категорії систем інтелектуальної підтримки прийняття рішень [133-137]: 1) СІППР забезпечення доступу до входжень даних процесу буріння; 2) СІППР в формі системи аналізу даних процесу буріння, що дозволяють маніпуляцію з даними засобами комп'ютеризованих інструментів, налаштованих на вирішення специфікованих задач; 3) СІППР в формі

аналітичних інформаційних систем, що забезпечують доступ до послідовності баз даних процесу буріння, орієнтованих на підтримку прийняття рішень; 4) СІППР на основі репрезентаційних моделей, що виконують оцінку наслідків певних дій, базуючись на моделях, які включають причинно-наслідкові відношення; 5) СІППР на основі оптимізаційних моделей [138, 139], що забезпечують рекомендації щодо дій, шляхом генерації оптимальних рішень, сумісних з послідовністю накладених обмежень; 6) СІППР на основі пропозиційних моделей, що виконують логічну обробку, яка веде до специфікованих пропозиційних рішень або добре структурованих і формалізованих задач [140, 141].

Одним із важливих інструментів підготовки процедури прийняття рішень в процесі буріння є застосування технік видобування даних [142, 143] процесу буріння. В загальному випадку видобування даних є процесом їх аналізу з різних точок зору (перспектив) і сумаризації корисної інформації.

Розвиток технологій видобування даних базувався на досягнутих рівнях апаратного та програмного забезпечення. Слід виділити такі вагомні етапи розвитку даної технології: 1) методи роботи з колекціями даних; 2) розвиток методів доступу до даних на основі концепції системи управління реляційними базами даних, структурованих запитів та стандарту мови SQL; 3) технологія сховищ даних та підтримки прийняття рішень в формі аналітичної обробки даних в реальному часі, багатовимірних баз даних та сховищ даних; 4) видобування даних в формі новітніх алгоритмів, багатопроцесорних комп'ютерів та надвеликих баз даних.

Слід виділити наступні особливості даного процесу: 1) визначення цілей і очікуваних специфікацій середовища; 2) вибірка даних, що необхідна для ідентифікації значимих зразків; 3) перетворення даних, з метою представлення даних у відповідному форматі, що дозволяє використання відповідного алгоритму видобування; 4) вибір та імплементація алгоритму видобування даних, залежно від цілей процесу видобування; 5) аналіз видобутих даних, що необхідний для формулювання загальної множини результатів; 6) представлення та виділення найбільш важливих результатів.

В загальному випадку видобування даних складається з 5-ти основних елементів: видобування; перетворення; завантаження даних транзакцій в систему сховища даних; збереження і управління даними у багатовимірній системі на основі баз даних; забезпечення доступу до даних для аналітиків та інших ІТ-спеціалістів, аналіз даних відповідним програмним забезпеченням і кінцеве представлення даних в корисному інтерпретованому форматі.

Існує два основні підходи до видобування даних, а саме: прогнозуючий та описовий. Прогнозуюче видобування даних використовує архівні дані для інференції входжень щодо майбутніх подій. Відповідно, прогнозуючі задачі видобування використовують дані для побудови моделей щодо прогнозування майбутніх входжень. Описове видобування даних має на меті пошук шаблонів в даних, що забезпечить інформацію щодо прихованих відношень.

Техніки видобування даних, що можуть бути застосовані в процесі буріння представлені на рис. 4.1. Зрозуміло, що для ефективного функціонування описового видобування даних, необхідно охарактеризувати загальні властивості даних і представляти їх значимим способом.

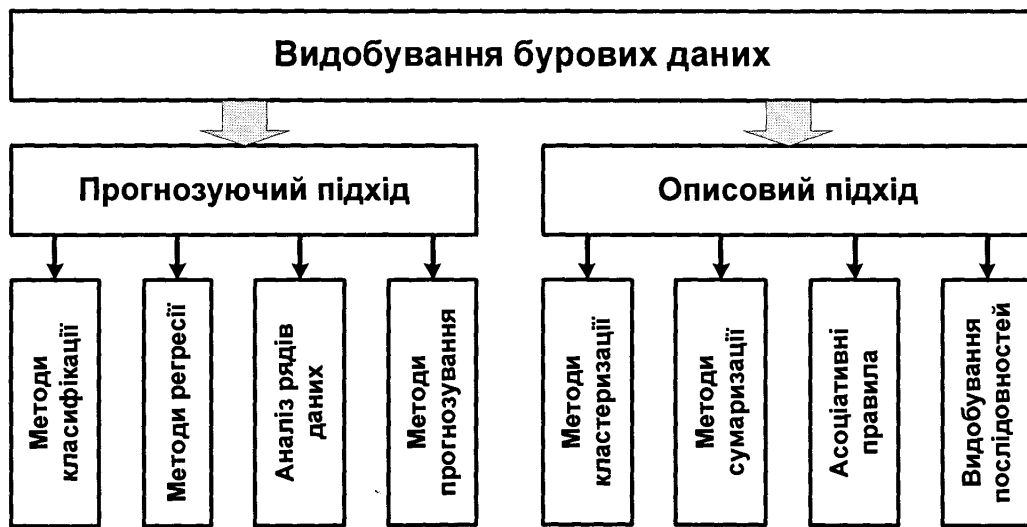


Рис. 4.1. Техніки видобування даних застосовні до предметної області «Буріння нафтових і газових свердловин»

Асоціативні правила [142] використовуються для видобування відношень між множинами атрибутів для заданого вхідного шаблону. Означення послідовності видобування, як деякої послідовної техніки призводитиме до

задавання послідовності на якій слід знайти повну множину частих підпослідовностей.

Кластеризація [11] є процесом організації об'єктів у групи, члени яких є схожими між собою за певною ознакою. Отже, кластер є колекцією об'єктів, які є схожими між собою і не є схожими до об'єктів, що належать до іншого кластера. Таким чином, виконується пошук внутрішньої структури колекції даних. Процес кластеризації також включає в себе ідентифікацію скінченної множини категорій або сегментів кластерів для опису даних відповідно до заданої метрики.

Таке означення кластеризації дозволяє пошук специфікованих факторів розрізнення або атрибутів серед даних, що вивчаються. Кожен член кластера повинен бути дуже схожим до інших членів в цьому кластері і, відповідно, дуже не схожим до входжень інших кластерів. Коли виконується введення нових даних, то вони класифікуються в множину найбільш схожих кластерів.

Самі кластери можуть класифікуватися як: взаємовиключні, ієрархічні або такі, що перекриваються. Також кластери класифікуються як ієрархічні або розділювальні. Важливим моментом є те, що ієрархічні методи класифікації в більшості випадків базуються на деревах рішень, які можна використати в процесі буріння нафтових і газових свердловин (рис. 4.2.).

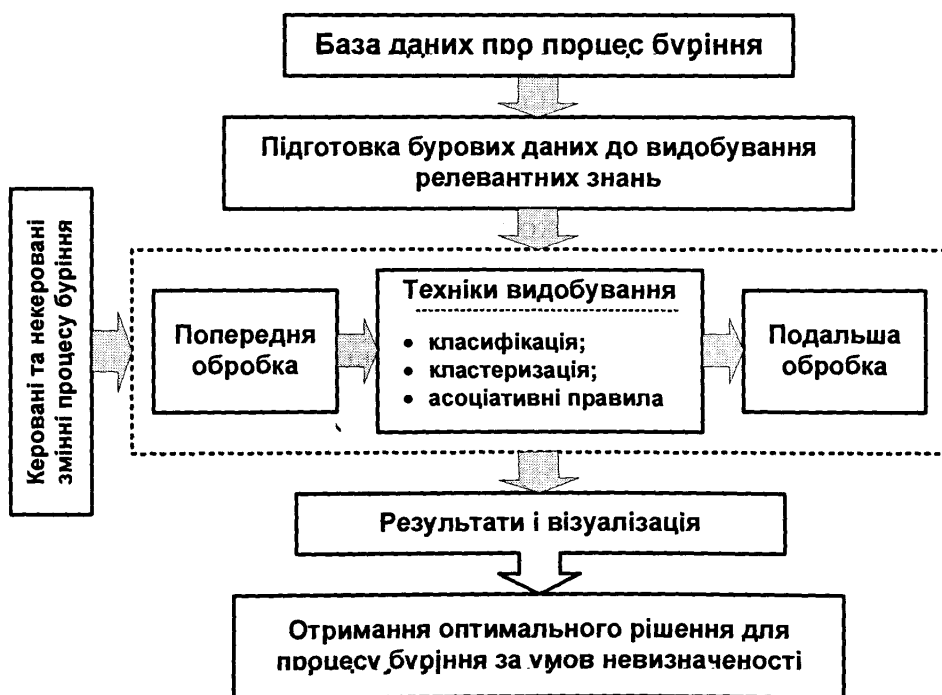


Рис. 4.2. Структура системи видобування даних процесу буріння

Пропонована структура фреймворку видобування даних процесу буріння має на меті побудову системи видобування (для випадку буріння). Така система складається з ряду компонентів [132]: збір даних; підготовка даних для відкриття знань; попередня обробка даних з використанням технік видобування даних в послідовностях крок за кроком, починаючи з класифікаційних даних; кластеризація даних; вибірка кращого результату; встановлення і виконання асоціативних правил для рішення проблеми; постфіксна обробка даних; отримання результату і його візуалізація в режимі створення кращого рішення за умов невизначеності.

З точки зору практичної реалізації, проектована СІПІР складається з таких компонентів (рис. 4.3), як: 1) СУБД; 2) система управління базою моделей; 3) інтерфейс користувача; 4) система управління технологічними повідомленнями.

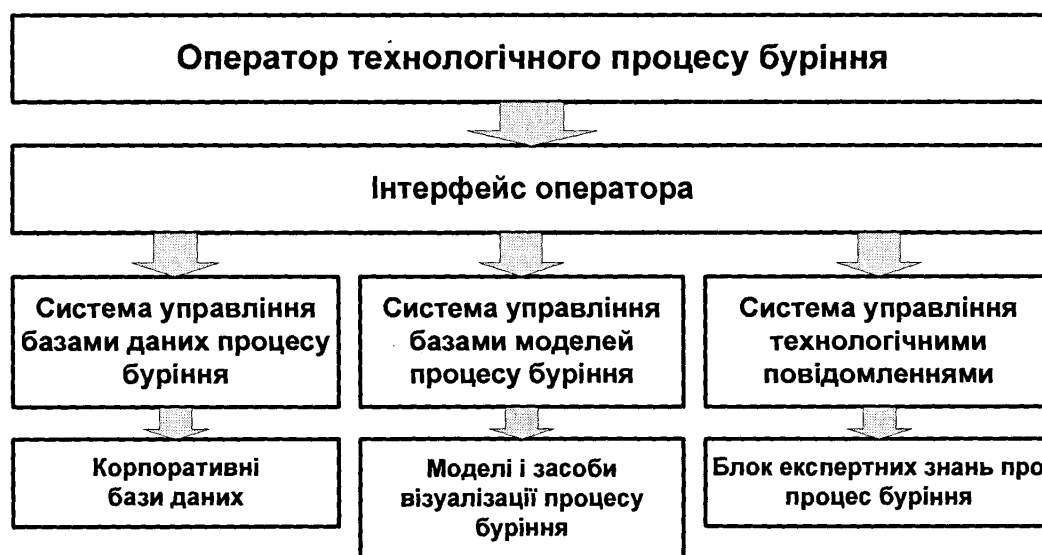


Рис. 4.3. Структура СІПІР при бурінні нафтових і газових свердловин

Функціональність означених складових відповідно наступна:

1. СУБД забезпечує доступ до даних, а також засобів контролю, необхідних для отримання цих даних у відповідній формі для виконання аналізу згідно заданої специфікації. Дана система повинна бути достатньо складною щоб давати користувачам доступ до даних навіть у тих випадках, якщо достовірно не відомо, де останні знаходяться фізично. У новітніх застосуваннях СУБД-засоби дозволяють злиття даних з різних джерел.

Основною перевагою, що надає СУБД-компонента є забезпечення незалежності між фізичним налаштуванням даних, тобто способом їх фізичного представлення і явним представленням даних в додатку.

2. Система управління базою моделей виконує схожу задачу для моделей в СІППР. Дана компонента відслідковує всі можливі моделі, що можуть бути виконані під час аналізу, а також забезпечує необхідні засоби контролю виконуваних моделей, що включає синтаксис, формат даних моделі, формат даних після вивантаження моделі. Система управління базою моделей також виконує побудову зв'язку між моделями таким чином, що вихід однієї моделі може використовуватися як вхід іншої моделі. Крім того, забезпечується модельно-чутливий вид допомоги щодо вибору моделі найбільш прийнятної в поточному контексті.

3. Інтерфейс користувача забезпечує механізми введення даних в систему і їх виводу з системи. Дана система включає всі екрани вводу даних, в яких виконується запит на дані та моделі. Також, інтерфейс включає вихідні екрани через які оператор отримує результати. Особливість інтерфейсів СІППР в тому, що вони розглядаються як найбільш дійсна частина системи в якій відбувається взаємодія з користувачем.

4. Система управління технологічними повідомленнями. Даний компонент дозволяє використання електронної пошти як іншого джерела даних, джерела моделювання або загальної допомоги в процесі прийняття рішень.

Засоби візуалізації СІППР специфікуються відповідно до поставлених задач та технік відображення даних. Моделювання процесу підтримки прийняття рішень (ППР) базується на преференціях користувача вибраних відповідно в попередніх сесіях, що вимагає розвинутих засобів його профілізації і адаптації наявних внутрішніх знань. Таким чином, СІППР, що використовує правила на основі експертного досвіду дозволяє модифікацію відповідно до преференцій користувача.

Архітектура системи візуалізації СІППР представлена на рис. 4.4 включає:

1) засоби контролю – отримують інформацію від середовища візуалізації, що включає профіль користувача та виконують ініціалізацію відповідних

запитів;

2) засоби управління знаннями – формуються на основі знань експертів щодо особливості візуалізації в нечітких системах, шляхом використання засобів експертних систем (ЕС);

3) засоби візуалізації – забезпечують візуалізацію і виконують підтримку процедури рендерингу;

4) засоби обробки нечітких даних – виконують обслуговування даних з нечітких систем у відповідних форматах, що вимагаються для візуалізації.

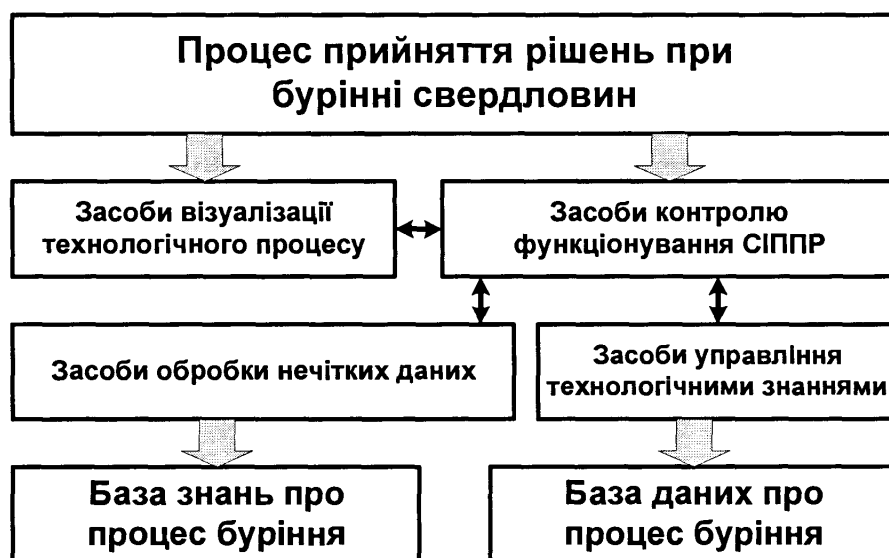


Рис. 4.4. Архітектура системи візуалізації СІППР буріння нафтових і газових свердловин

Не можливо приймати якісні рішення без доступу до відповідної інформації [72]. Аналіз існуючих апаратів прийняття рішень [144-146] показує, що в багатьох випадках існують складності з середовищем прийняття рішень, а також як показує досвід, метод спроб і помилок в більшості випадків є надто вартісним та неефективним. Використання моделей при прийнятті рішень дозволяє зменшити їх вартість і зробити застосування процесу спроб та помилок більш ефективним, що особливо актуально в умовах значної вартості процесу розробки нафтових і газових свердловин в умовах виснажених родовищ.

4.2. Оцінка застосовності методів експертних систем при побудові інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень в процесі буріння

Створена СППР забезпечує підтримку прийняття рішень згідно підходу представленого на рис. 4.5. СППР на основі знань дозволяють інтегрувати традиційні СППР з перевагами, що надає використання ЕС. Відповідно, традиційні СППР забезпечують управління даними, моделювання методології рішень і відображення числових даних, в той час, як переваги, що надаються підходом ЕС включають символічні міркування і засоби пояснень [66].

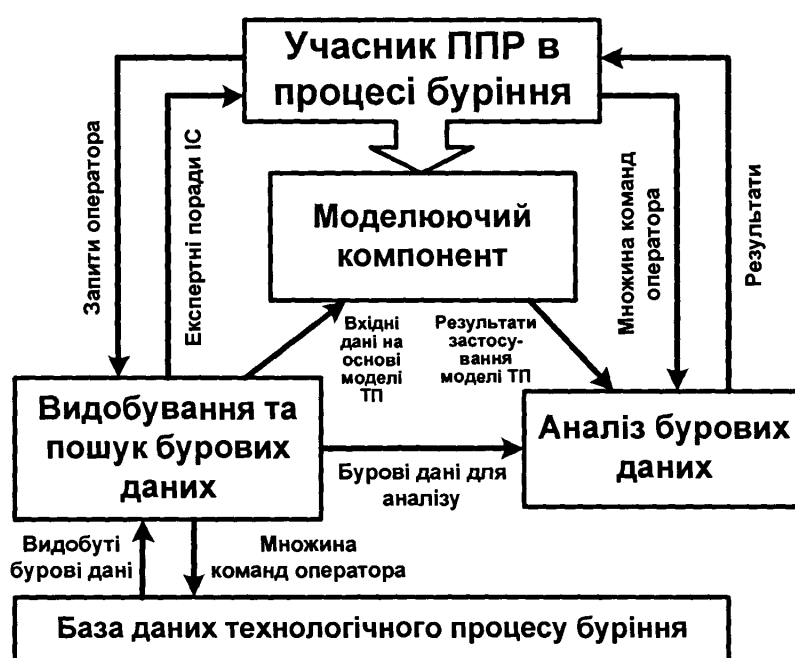


Рис. 4.5. Структура потоків даних процесу буріння для СППР буріння

Методи розробки систем на основі знань в області підтримки прийняття рішень розвинулися до рівня нового покоління інструментів підтримки прийняття рішень, що відомі, як системи інтелектуальної підтримки прийняття рішень. СППР допомагають в прийнятті рішень шляхом представлення інформації предметної області та інтерпретацій на її основі для вибору різних альтернатив. Найбільш важливими підходами в розробці сучасних СППР, що забезпечує використання інтерпретації знань є: 1) міркування на основі правил (*RBR – Rule-based reasoning*) [147]; 2) міркування на основі *case*-ів (*CBR – Case-based reasoning*) [109]; 3) гібридний підхід (*RBR+CBR*).

Зрозуміло, що СІППР-фреймворк може бути суттєво розширений шляхом додавання засобів властивих експертним системам [148]. Таке розширення може бути виконане в наступних напрямках:

1. Генерація експертних порад у виділеній предметній області під час допомоги оператору у визначенні концепцій, обчисленні процедур, виконанні моделей рішень і представленні звітів. В таких випадках, класична СППР, як правило, не забезпечує користувача експертними порадами. Додавання функцій ЕС до СППР дозволить оператору використовувати переваги СІППР, що полягають у наданні експертної допомоги. Така функціональність вимагатиме наявності бази знань для домену знань, а також механізму логічного висновку, що пропонує експертну допомогу, як частину функціональності СІППР.

2. Пояснення висновку експерта. СППР повинні сприяти процесу навчання операторів технологічного процесу. Тому інтеграція ЕС в СППР дає змогу: 1) спонукати користувача до більшої довіри щодо результатів, і, відповідно, до більшої впевненості в самій системі; 2) явно представляти припущення, що лежать в основі системи; 3) уможливити швидшу розробку системи, оскільки система стає простішою з точки зору відлагодження.

3. Інтелектуальна допомога в підтримці методології аналізу рішень. Система аналізу рішень є потужним засобом, що забезпечує допомогу учасникам ППР в прийнятті складних рішень, таким чином, наприклад, база знань з методологічними знаннями може допомагати учаснику ППР в: 1) визначенні моделі прийняття рішень; 2) оцінці розподілу ймовірностей; 3) оцінці функції-значення.

4. Пояснення результатів моделі або поведінки моделі. Навіть прості технологічні проблеми можуть вимагати використання комплексних баз даних. Відповідно, ЕС може, допомогти в поясненні логічної структури самих моделей і причинно-наслідкових зв'язків серед змінних в моделях. Використання ЕС дасть змогу генерувати пояснення алгоритму оцінювання, шляхом коментування сценаріїв виду «що-якщо» і підсвічування трендів та змін значень.

5. Надання допомоги при використанні оптимізаційних технік. В таких

випадках ЕС може виконувати супровід нового користувача щодо коректного використання відповідних інструментів, допомагати користувачу у вивченні хороших стратегій використання існуючих інструментів та видобувати доменні знання з великих баз даних.

6. Розробка інтелектуального інтерфейсу користувача. Коли СППР вводиться в експлуатацію, то з часом зростає кількість баз даних, моделей рішень та звітів. Якщо при цьому існують певні обмеження по ресурсах, що створює складності в навчанні персоналу, то стають дуже корисними наявні види експертної допомоги щодо вибору відповідних ресурсів. Таким чином, інтелектуальний інтерфейс користувача в даному випадку може допомогти користувачу у виборі і відповідному використанні ресурсів системи.

7. Допомога у формулюванні експертних питань. Експертна система може допомагати оператору у формулюванні його запитів у випадку коли оператор працює з надвеликими реляційними базами даних.

СППР, що базуються на базах знань повинні забезпечувати [59, 145]: 1) інтерфейс підтримки людино-машинної взаємодії під час вирішення проблем предметної області; 2) підтримку доступу до релевантної інформації під час вирішення проблем; 3) інструменти для розпізнавання проблем; 4) інструменти для структуризації проблем; 5) інструменти для формулювання і аналізу проблем; 6) реалізацію механізму логічного висновку і системи управління знаннями для забезпечення експертного супроводу оператора; 7) реалізацію алгоритму логічного висновку, включеного в підсистему моделювання.

СППР можуть містити декілька баз знань, що використовуються для прийняття рішень в певній предметній області. Функціональний аналіз БЗ СППР приведено на рис. 4.6.

Як було зазначено вище СППР є видом СППР з включенням експертної системи або іншого виду інтелектуального компонента як центрального елемента. Таким чином, середовище СППР повинно підсилювати комунікацію між експертним модулем і традиційними модулями, що утворюють інструменти розробки СППР (див. додаток В). Також, є необхідною комунікація і взаємодія між моделями СППР і БЗ. Правила в БЗ потребують

інформації в формі значень змінних з введених моделей з метою досягнення обґрунтованих висновків. Обмін інформацією між ресурсами і файлом програмного додатку представлено на рис. 4.7.

Спроектоване середовище СППР володіє наступною функціональністю: 1) поєднання глибинних знань каузальних моделей з поверхневими знаннями експертних систем в символічному представленні; 2) розробка інтелектуальних інтерфейсів користувача, що допомагають у виборі доступних ресурсів або взаємодії з рівнем моделі.



Рис. 4.6. Функціональна структура додатку бази знань СППР

Сумаризація характеристики прийнятності рівня застосовності інтелектуальних систем в процесі буріння зводиться до однієї з форм:

1. Когнітивних проблем, як протилежність до обчислюваних проблем. Застосування такого рівня вимагає підтримки логічного висновку з невизначеними або неповними даними.

2. Контрольованість домену проблеми, що полягає в її точному прогнозуванні методом звуження та специфікації.

3. Вимоги щодо ресурсів для рішення проблеми. Передбачають наявність принаймні хоча б одного експерта в предметній області, що має мотивацію і здатність привносити знання в проект. У випадку використання більше чим одного експерта, необхідний також механізм узгодження експертних суджень щодо рішення проблеми.

4. Вважається, що проблема предметної області є вартою рішення, якщо її рішення: 1) є результатом в збереженні часу; 2) сприяє підвищенню продуктивності; 3) сприяє пропагації знань в системі; 4) виконує збереження знань; 5) забезпечує підтримку консистентності знань.

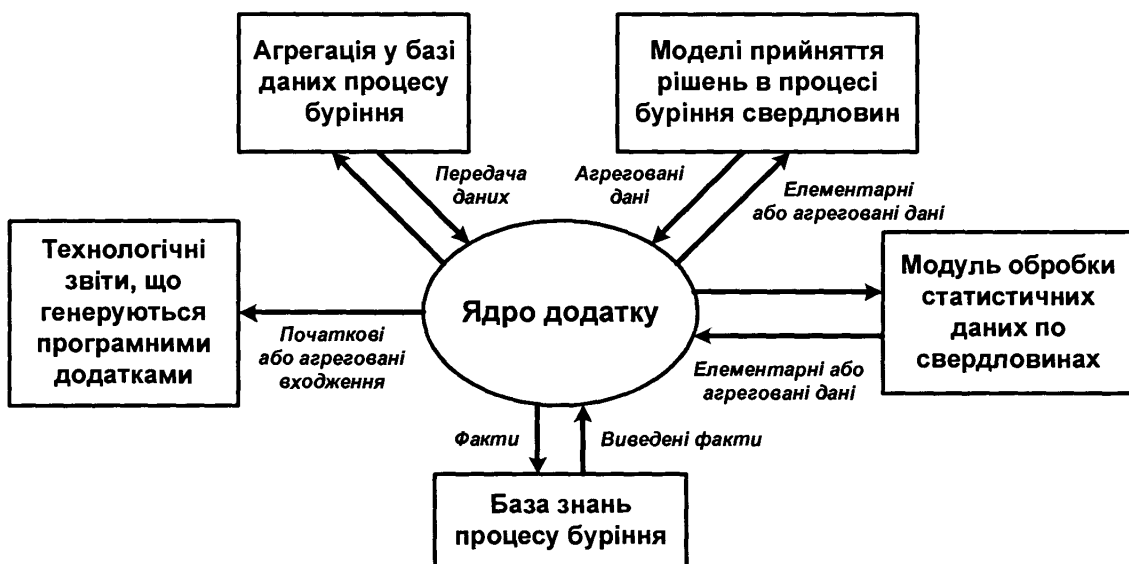


Рис. 4.7. Структурна схема передачі інформації між ресурсами і файлом програмного додатку

Проблема побудови експертних порад, в загальному випадку, відповідає підходу на основі знань, що, є дещо звужений в своєму обсязі і потребує наявності експертів здатних привносити знання в проект.

Таким чином, спроектована СІППР може підтримувати неструктуровані або напівструктуровані рішення, причому, незалежно від ступеня структурованості рішення вимагається участь оператора в процесі прийняття рішення. СІППР включає представлення баз даних різної складності, починаючи з рівня колекцій даних. Рішення базуються на інформації наявній в СІППР, що часто є результатом відповідного процесу видобування з баз даних. Також СІППР включає в себе певні моделі предметної області. Додаткове

призначення моделей СІПІР полягає в оцінці результатів (наслідків) прийнятих рішень (рис. 4.8).

В загальному випадку, вважається, що інформаційні системи можуть включатися в процес підтримки прийняття рішень двома шляхами [138]: 1) як інформаційні системи із здатністю підтримки прийняття рішень; 2) як СІПІР, що мають основною ціллю підтримку прийняття рішень.

Особливість інформаційного процесу прийняття рішень полягає в тому, що для його забезпечення можна використовувати майже всі типи існуючих інформаційних систем. Тому основною відмінною рисою СІПІР вважається те, що вони створюються виключно для забезпечення процесу підтримки прийняття рішень.

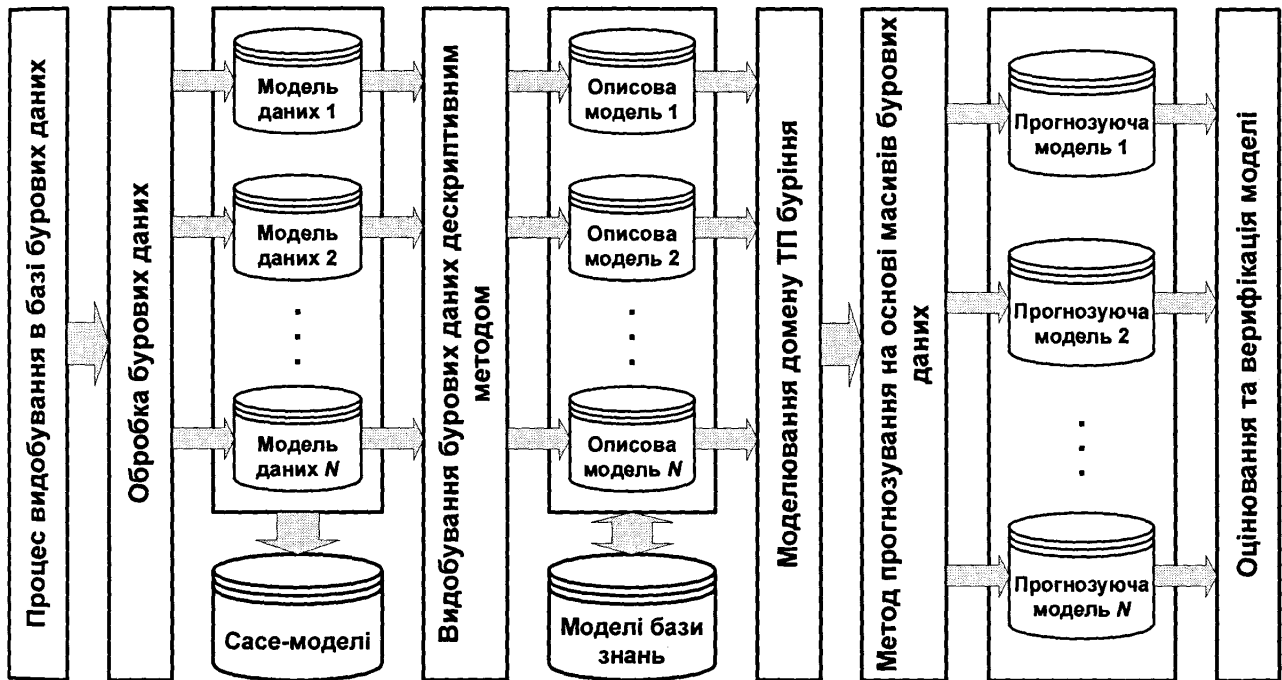


Рис. 4.8. Описові і прогнозуючі моделі процесу обробки даних процесу буріння

Крім методологічного аспекту, зрозуміло, що проектована інтелектуальна система повинна мати характеристики, які в загальному випадку асоціюватимуться з інтелектуальністю оператора технологічного процесу. Відповідно, розглядається позиціонування, що інтелектуальна система повинна демонструвати певні види інтелектуальної поведінки, аналогічно до тої, яка застосовується оператором і, що на програмному рівні забезпечується

відповідним динамізмом генерації. Таким чином, чим більш інтелектуальною є поведінка, що демонструє система у плані своєї функціональності, тим більш потужні повинні бути засоби ефективного використання базових інтелектуальних механізмів.

Розрізняють два основних етапи в функціонуванні моделі прийняття рішення [60]. На першому етапі застосовуються описові моделі які будуються в домені застосувань. На другому етапі використовуються прогнозуючі моделі, що застосовуються в домені.

На рис. 4.9 представлено основні компоненти архітектури спроектованої системи та їх взаємодію. Представлена модель включає всі репозиторії даних, що використовуються на різних стадіях прийняття рішення, а саме, вона включає орієнтований на рішення репозиторій даних в формі сховища даних, базу *case-ів*, базу знань в формі правил.

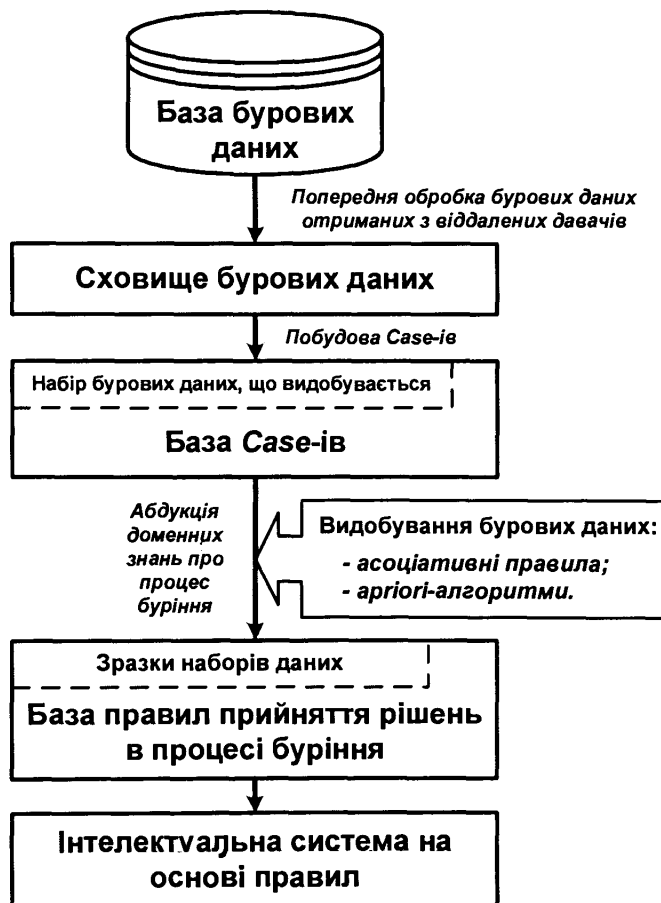


Рис. 4.9. Структура процесу видобування даних процесу буріння для інтелектуальної системи на основі правил

Базові обчислювальні елементи представленої архітектури складають:

1) орієнтований на рішення репозиторій даних в формі сховища; 2) база *case-ів*; 3) абдуктивний алгоритм для видобування даних в формі описового методу; 4) база знань (бази знань); 5) інтелектуальна консультаційна система на основі прогнозуючої моделі.

Особливості описових і прогнозуючих моделей, що застосовуються в даній архітектурі полягають в тому, що вони використовують «сирі» дані, видобуті з баз даних, попередньо обробляють їх і визначають множину *case-ів*, що утворюється як результат даного процесу. Такі множини *case-ів* розглядаються як моделі даних. Відповідно, моделі даних використовуються як вхідні дані в специфікований описовий метод, яким може виступати алгоритм видобування даних, з метою побудови кінцевих описових моделей, які в свою чергу зберігаються в БЗ. На наступному кроці описові моделі використовуються як вхідні дані у відповідному методі прогнозування.

4.3. Розробка методики прийняття оптимальних рішень в процесі буріння нафтових і газових свердловин на основі функцій доцільності

Ґрунтовність аналізу процесу прийняття рішень неможлива без введення можливісних характеристик рішення та суджень в термінах можливості та ймовірності. Якщо учасник ППР буде абсолютно впевнений щодо появи певного часткового класу покриття предметної області, що згідно [149] розглядається як подія в теорії аналізу рішень (в досліджуваному випадку такою подією є виконання встановлення значень керованих змінних в процесі буріння), то тоді рішення, пов'язане з присвоєнням на основі даного класу є таким, що легко прийняти, більше того, навіть без потреби розгляду наслідків можливих помилкових класифікацій.

На рис. 4.10 представлено множину подій в формі встановлення значень керованим змінним tcp_i та 'множину рішень Sol^{Set} в формі виділених присвоєнь, що визначають режими буріння, які характеризуються станами, що

представляються класами $Class_i^{Sol_j}$. Таким чином, класи оцінюються по ступеню їх релевантності відповідним станам:

якщо вибрано $Class_i^{Relev.}$ **тоді** необхідно внести оновлення в базу знань,
якщо $Class_i^{UnRelev.}$ **тоді** залишити без змін

де $i = 1..n, n, j \in N$.

Для процедури прийняття рішень із заданою чутливістю, як і список подій так і множина рішень повинні бути унікальними і повними, як і у випадку коли виходять з припущення, що тільки одне рішення базується на одному входженні і приймається тільки після ґрунтовного розгляду всього діапазону подій.

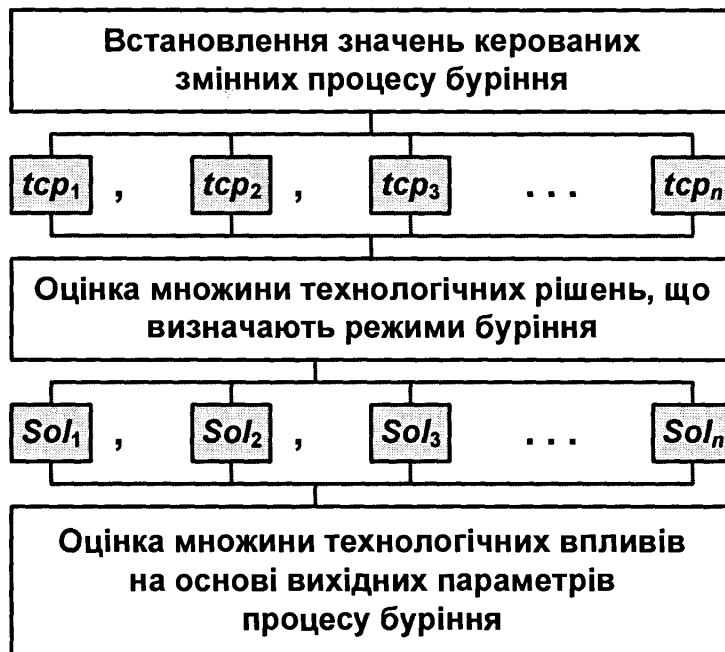


Рис. 4.10. Структура пропонованої методології прийняття рішень в процесі буріння нафтових і газових свердловин

В даному випадку подіями є можливі класи $Class_1, Class_2, \dots, Class_n$, де n є кількістю класів, а невизначеності представляються вектором апостеріорних ймовірностей для заданого окремого об'єкту підтримки прийняття рішень. При цьому, слід також відмітити, що стандартний максимум підходу апостеріорної класифікації є базованим на процедурі прийняття рішень в якій вибирається подія з відповідною найвищою ймовірністю.

$$Sol := \overset{def.}{\left[Class_i^{SC} \right]} \Big| prb^{\max} (Class_j^{RC}), \quad i, j = 1..n.$$

Важливість цієї теорії закладена в її здатності підтримувати ефективність процесу прийняття рішення, оскільки вона визначає критичні границі в просторі рішень, що в загальному випадку характеризується невизначеністю.

$$Utility \mid = Bound(DecisionSpace).$$

Таким чином, доцільності оцінюються і присвоюються до комбінації певного рішення Sol_j і події класу $Class_i$:

$$ut\left(\left[Sol = Sol_j \right] \wedge \left[Class = Class_i \right]\right),$$

Доцільність виражає бажаність певного сценарію в якому рішення Sol_j приймається з урахуванням об'єкта Obj , для якого клас $Class_i$ є його істинним інформаційним класом. Фактичні доцільності асоційовані з різними сценаріями залежать від цілей, що ставляться перед певною інтерпретацією. Слід відмітити, що використання інтерпретацій замість класифікацій дозволяє створити відмінність між ситуаціями в яких рішення приймаються безпосередньо на основі даних і їх невизначеностей, тобто без прив'язки щодо їх належностей виділеним класам $Class_1, Class_2, \dots, Class_n$. (рис. 4.11).



Рис. 4.11. Послідовність утворення множини технологічних рішень в процесі буріння

Для цілей прийняття рішень використання тільки методу класифікацій не є достатньо, оскільки власне потрібні не тільки результати класифікації, але в більшій мірі інформація щодо обсягу і розподілу невизначеностей введених такою класифікацією.

Імплементація доцільності в таблиці прийняття рішень дозволяє

представити відношення між рішеннями, подіями і наслідками (табл. 4.1).

Альтернативне представлення задається на основі дерева рішень, що дозволяє графічно представляти певну проблему. Різні змінні і значення проблеми предметної області організуються у формі дерева з виділеним коренем.

Таблиця 4.1

Таблиця рішень для прикладу модифікації параметрів буріння нафтових і газових свердловин.

	tcp_i	tcp_j	tcp_k
Sol_i	$ut(Class_{ii})$	$ut(Class_{ij})$	$ut(Class_{ik})$
Sol_j	$ut(Class_{ji})$	$ut(Class_{jj})$	$ut(Class_{jk})$
	CF_i	CF_j	CF_k

На рис. 4.12 представлено дерево рішень для даних з таблиці 4.1. Перевага таких дерев рішень полягає в тому, що стає більш зрозумілим як аналіз невизначеностей і доцільностей призводитиме до найкращого (оптимального) рішення. При цьому базова ідея полягає в тому, що слід іти з кінців віток і назад до основи дерева при оцінюванні бажаності рішень, тобто для $ut(Sol = Sol_j)$. Також, таке значення є залежним від істинного значення ймовірнісної змінної, хоча її значення є невідомим апріорно до виконання процедури прийняття рішення.

Таким чином, доцільність всіх можливих сценаріїв для рішення зважується з ймовірністю проявів цих сценаріїв. Фактично, в кожному вузлі дерева рішень, що представляє ймовірнісну змінну, виконується обчислення очікуваної доцільності. Очікувана доцільність визначає бажаність рішення Sol_j для заданого значення j і може бути формалізована у вигляді:

$$\overline{ut}(Sol = Sol_j) = \sum_i ut(Sol = Sol_j \wedge Class = Class_i) * Prb(Class = Class_i).$$

Відповідно, кращим рішенням, що може бути прийнято, є рішення з максимальним значенням очікуваної доцільності.

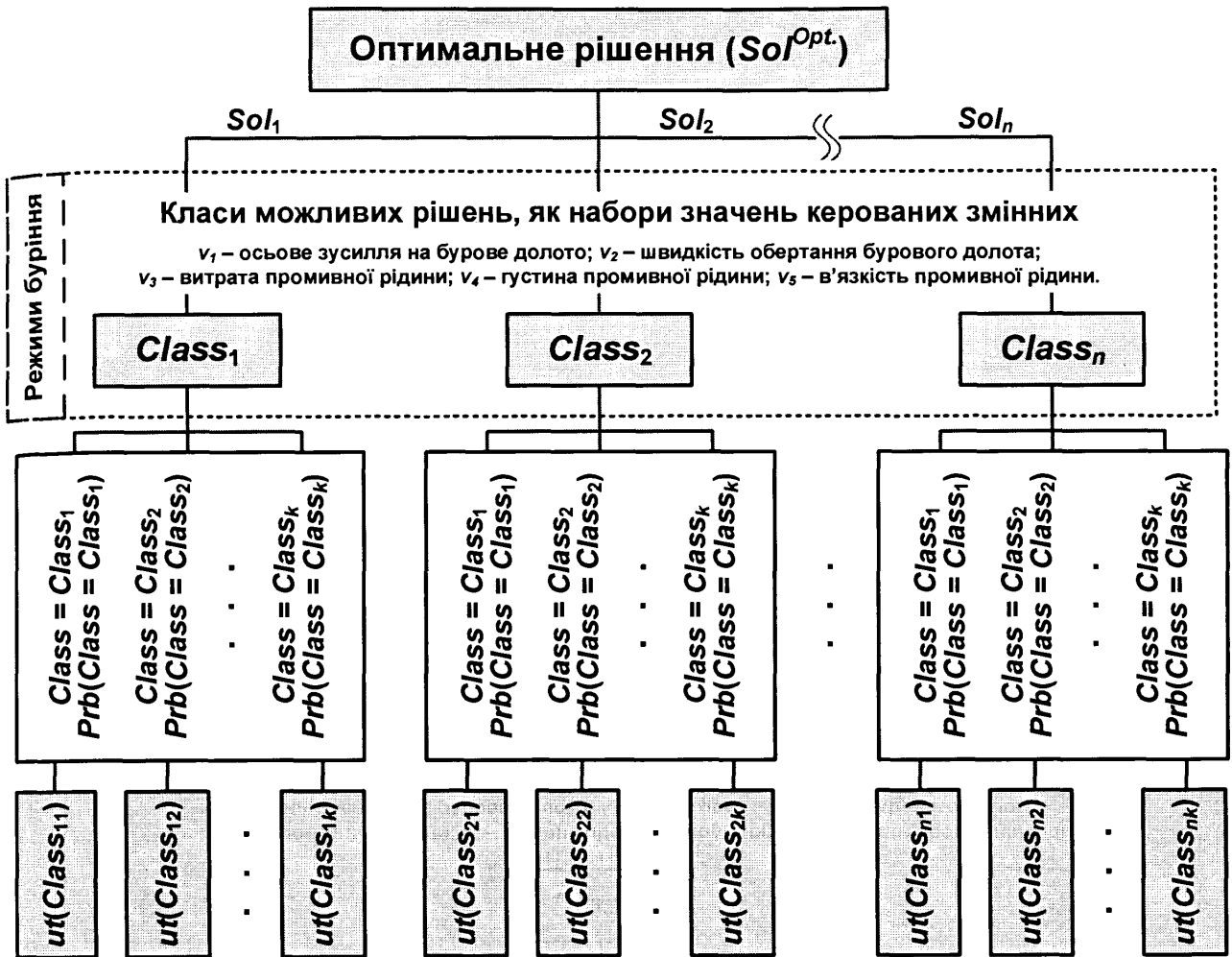


Рис. 4.12. Приклад дерева рішення для предметної області буріння нафтових і газових свердловин.

Отже, в термінах доцільностей для рішення Sol_j виконання присвоєння класу $Class_i$ до об'єкта задаватиметься формулою:

$$\begin{cases} ut(Sol = Sol_j \wedge Class = Class_i) = 1 \text{ для всіх } j = 1, \dots, n \text{ (} n \text{ є числом класів)} \\ ut(Sol = Sol_j \wedge Class = Class_i) = 0 \text{ для всіх } i, j = 1, \dots, n \text{ та } i \neq j \end{cases}$$

Нехай маємо послідовність керованих змінних (технологічних параметрів) виду:

$$tcp_1, tcp_2, \dots, tcp_n, \quad (4.1)$$

де n – кількість параметрів, $n \in \mathbb{N}$.

Тоді процес прийняття рішень щодо вибору оптимальних режимних параметрів буріння включатиме наступні кроки:

1. Виконання присвоєння ймовірних значень керованим параметрам

технологічного процесу, які в загальному випадку розглядаються як невизначені.

Нехай виділеній послідовності технологічних параметрів в момент прийняття рішення присвоюється послідовність значень (v_1, v_2, \dots, v_n) , при чому, кожне v_i , $(1 \leq i \leq n)$ характеризується ймовірнісним значенням CF_i , $(0 \leq CF_i \leq 1)$, а саме $[v_i : CF_i]$. В даному випадку значення CF_i характеризує ймовірність встановлюваного значення керованого параметру з точки зору його відповідності деякій очікувано ідеальній установці (оптимальному значенню, що може бути вибрано для встановлення поточним значенням керованого параметра).

Відповідно базове представлення (4.1) можна розширити у вигляді:

$$\{tcp_1 : [v_1 : CF_1], tcp_2 : [v_2 : CF_2], \dots, tcp_n : [v_n : CF_n]\},$$

або в формі скороченого представлення:

$$\{tcp_i : [v_i : CF_i]\}_{i \in N}^{1 \leq i \leq n}.$$

2. Виконання присвоєння значень доцільності можливим очікуваним технологічним впливам від встановлення керованим змінним ймовірних значень.

Для реалізації п. 2 будемо виходити з технологічної залежності яка говорить про те, що вплив кожного керованого технологічного параметра на весь процес буріння залежить від встановлених значень інших параметрів [150-155].

Позначатимемо даний факт впливу для i -го параметра представленням:

$$tcp_i \longrightarrow TP,$$

де TP – технологічний процес буріння нафтових і газових свердловин.

Згідно формулювання п. 2, нехай технологічному параметру tcp_i встановлено деяке значення v_i , $(tcp_i : v_i)$, що матиме своїм наслідком зміну впливів всіх інших параметрів на процес буріння, що позначимо, як:

$$tcp_j \Big|_{[tcp_i : v_i]} \xrightarrow{[tcp_i : v_i]} TP, \quad i \neq j, \quad i, j \in [1..n].$$

Оцінюватимемо доцільність такого впливу представленням:

$$ut_{tcp_i:v_i}^{[tcp_j \rightarrow TP]}, i \neq j, i, j \in [1..n].$$

Тоді отримаємо представлення виду:

$$tcp_j \left| \begin{array}{c} [tcp_i:v_i] \\ \xrightarrow[ut_{tcp_i:v_i}^{[tcp_j \rightarrow TP]}]{[tcp_i:v_i]} \end{array} \right. \rightarrow TP, 0 \leq ut_{tcp_i:v_i}^{[tcp_j \rightarrow TP]} \leq 1. \quad (4.2)$$

Враховуючи ймовірний та вірогідний характер присвоєння значень, згідно п.1, формулу (4.2) можна переписати у вигляді:

$$tcp_j \left| \begin{array}{c} [tcp_i:v_i:CF_i] \\ \xrightarrow[ut_{tcp_i:v_i:CF_i}^{[tcp_j \rightarrow TP]}]{tcp_i:[v_i:CF_i]} \end{array} \right. \rightarrow TP. \quad (4.3)$$

3. Вибір технологічного рішення, що максимізує очікувану доцільність технологічних впливів від встановлення керованим змінним ймовірнісних значень.

Формула (4.3) при $1 \leq j \leq n$ дозволить отримувати відповідні значення доцільності наслідків в формі впливів керованих змінних на процес буріння. При формуванні рішення $Sol(TP)$ необхідне досягнення максимізації очікуваної доцільності наслідків у формі технологічних впливів:

$$Sol(TP) = \max_{j=1..m} \left[\max_{i_2=1..n} \left[\sum_{i_1=1}^n \left[ut_{tcp_{i_1}:v_{i_1}:CF_{i_1}}^{tcp_{i_2} \rightarrow TP} \right] \right] \right], \quad (4.4)$$

де $n, m \in N$, а індекс j позначає генерацію підстановок виду $j: (v_1^j, v_2^j, \dots, v_n^j)$.

Наведені міркування можна підсилити в термінах задачі представлення та задоволення обмежень [156-157], шляхом введення множини змінних як наборів технологічних параметрів, діапазонів їх регламентних значень та множини накладених обмежень:

$$Sol(TP) \models \left[Constr^{Syst.} (CS^{crisp}, CS^{fuzzy}, CS^{psbl.}) \right] \left| \begin{array}{c} (tcp_1, tcp_2, \dots, tcp_n) \rightarrow (D_1, D_2, \dots, D_n) \\ C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\} \\ c_i: (tcp_{i_1}, tcp_{i_2}, \dots, tcp_{i_k}) \models \{D_{i_1}, D_{i_2}, \dots, D_{i_k}\} \supseteq c_i \end{array} \right.,$$

Відповідно, пошук рішення $Sol(TP)$ здійснюватиметься в системі:

$$\text{ConstrSyst}(c_1, c_2, \dots, c_n).$$

Кожна підстановка $v^j = (v_1^j, v_2^j, \dots, v_n^j)$ буде шуканим оптимальним рішенням щодо вибору режимних параметрів процесу буріння, якщо вона задовольняє накладену систему обмежень (в чіткому, нечіткому або можливісному формулюванні):

$$\text{Sol}^{\text{Opt.}}(TP) = [v^j = (v_1^j, v_2^j, \dots, v_n^j)] | = [\text{Constr}^{\text{Syst.}}(CS^{\text{crisp}}, CS^{\text{fuzzy}}, CS^{\text{psbl.}})].$$

Для випадку представлення технологічних проблем процесу буріння на основі обмежень подібний підхід був розвинутий в роботі [37]. В нашому випадку такий підхід розвинуто до рівня введення нечіткого лінгвістичного ранжування наборів значень керованих параметрів процесу буріння з прив'язкою вагових значень, що може бути в подальшому розвинуто до рівня формулювання проблем задоволення обмежень з нечіткістю або можливісністю [158, 159], для предметної області «буріння свердловин».

Специфікуємо проблему оптимізації режиму буріння та визначимо лінгвістичні змінні (на прикладі виділеного інтервалу буріння і типу гірської породи).

Будемо розглядати шість основних лінгвістичних змінних: «Механічна швидкість буріння (*ROP*)», «Доцільність встановленого значення механічної швидкості буріння (*ROP.value.ut*)», «Термін служби бурового долота (*BitLife*)», «Доцільність встановлюваного значення терміну служби бурового долота (*BitLife.value.ut*)», «Осьове зусилля на бурове долото (*WOB*)», «Швидкість обертання бурового долота (*RPM*)».

Визначимо діапазони зміни значень лінгвістичних термів. З метою спрощення задачі моделювання предметної області вибору режимних параметрів процесу буріння нафтових і газових свердловин, розглянемо формування бази нечітких правил для випадку гірської породи з наступними характеристиками: 1) тип гірської породи – тверда; 2) температура пласта не більше 50°C; 3) Пластовий тиск не перевищує 100 МПа; 4) коефіцієнт водонасиченості пласта не більше 30%. Також, будемо вважати, що значення

витрати промивної рідини та значення параметрів, що її характеризують завжди є оптимальними.

Для кожної лінгвістичної змінної визначимо по три терми з назвами «низький», «середній» та «високий». Для спрощення та скорочення запису позначимо через L терм з назвою «низький», через M терм з назвою «середній» та через H терм з назвою «високий».

Таблиця 4.2

Лінгвістичні змінні та діапазони зміни значень лінгвістичних термів

Лінгвістична змінна	Лінгвістичний терм	Діапазон зміни
Механічна швидкість буріння (ROP), m/god	L	[1, 6]
	M	[2, 13]
	H	[9, 15]
Доцільність встановленого значення механічної швидкості буріння ($ROP.value.ut$), %	L	[0, 40]
	M	[10, 90]
	H	[60, 100]
Термін служби бурового долота ($BitLife$), god	L	[1, 12]
	M	[4, 26]
	H	[18, 30]
Доцільність встановлюваного значення терміну служби долота ($BitLife.value.ut$), %	L	[0, 40]
	M	[10, 90]
	H	[60, 100]
Осьове зусилля на бурове долото (WOB), kH	L	[50, 220]
	M	[80, 420]
	H	[280, 450]
Швидкість обертання бурового долота (RPM) $об./хв$	L	[20, 60]
	M	[30, 110]
	H	[80, 120]

Нечіткі множини можуть бути графічно представленні в ряді форм. Тим не менше, трикутна або трапецевидна форма представлення забезпечує адекватний опис знань предметної області і в той же час значно спрощує процедуру виконання обчислень (рис. 4.13-4.18).

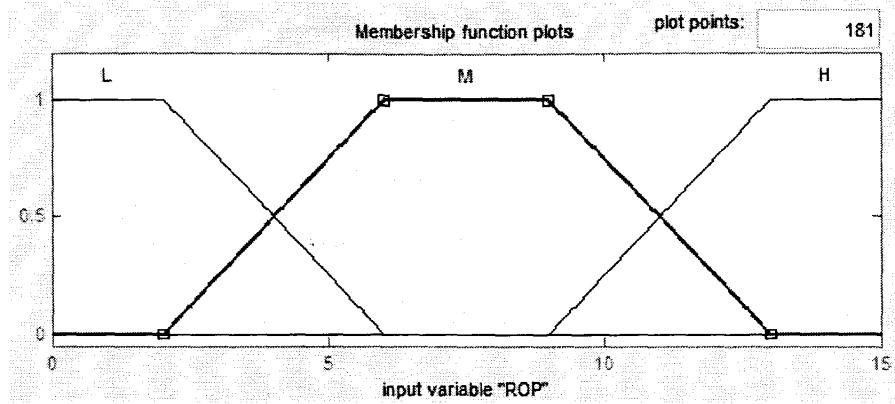


Рис. 4.13. Нечіткі множини для лінгвістичної змінної «Механічна швидкість буріння (ROP)»

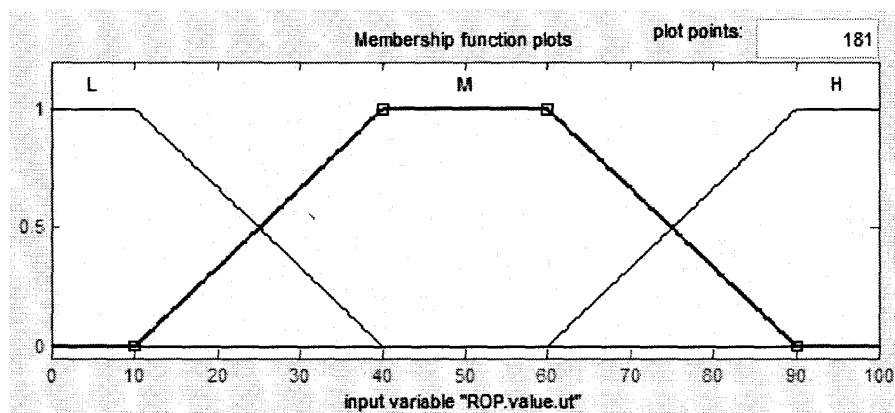


Рис. 4.14. Нечіткі множини для лінгвістичної змінної «Доцільність встановленого значення механічної швидкості буріння ($ROP.value.ut$)»

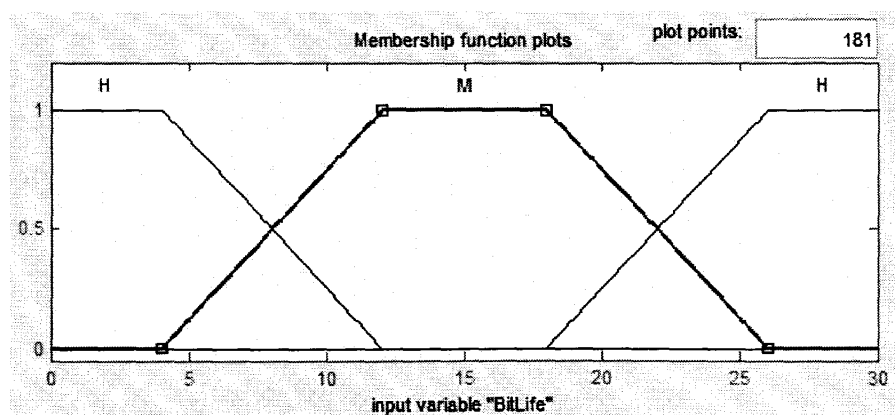


Рис. 4.15. Нечіткі множини для лінгвістичної змінної «Термін служби бурового долота ($BitLife$)»

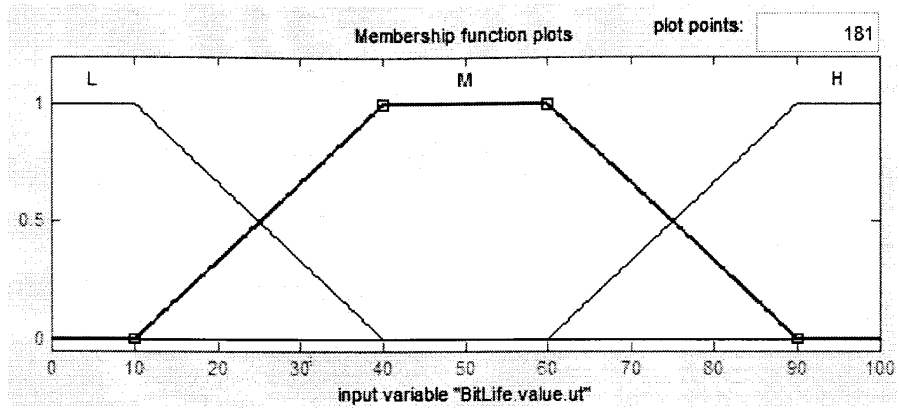


Рис. 4.16. Нечіткі множини для лінгвістичної змінної «Доцільність встановлюваного значення терміну служби бурового долота (*BitLife.value.ut*)»

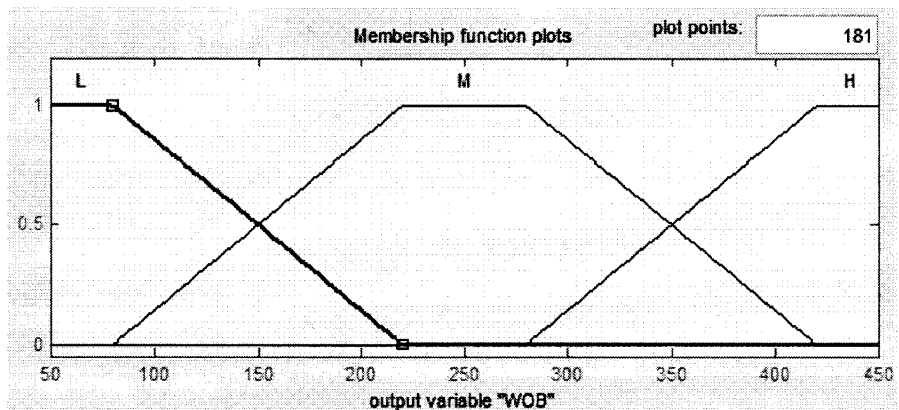


Рис. 4.17. Нечіткі множини для лінгвістичної змінної «Осьове зусилля на бурове долото (*WOB*)»

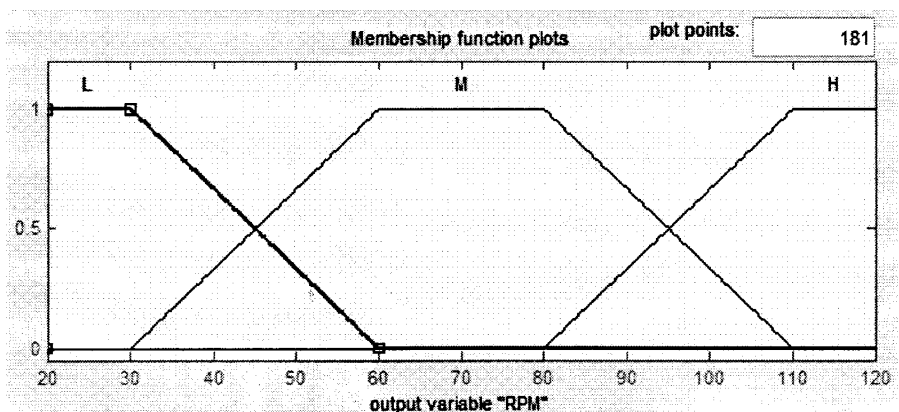


Рис. 4.18. Нечіткі множини для лінгвістичної змінної «Швидкість обертання бурового долота (*RPM*)»

Для вирішення задачі побудови нечітких правил в даному дослідженні використовується метод опитування експертів предметної області з метою того, щоб вони описали спосіб рішення проблеми з використанням вище оголошених лінгвістичних нечітких змінних. В результаті опитування експертів предметної області «буріння нафтових і газових свердловин» отримано базу нечітких правил представлених в додатках (див. додаток Д).

Створена система є системою класу IDSS\СІППР, що забезпечує інтелектуальну підтримку прийняття рішень щодо оптимізації параметрів буріння нафтових і газових свердловин на основі використання цільових функцій для позначення доцільностей вихідних технологічних параметрів згідно базової схеми представленої на рис. 4.19.

Система забезпечує інтелектуальну підтримку прийняття рішень при встановленні значень керованих параметрів технологічного процесу буріння. Крім стандартних рішень, що присутні в будь-якій СІППР на основі правил, дана система вирізняється оригінальною базовою методикою оперування цільовими функціями обчислення доцільностей.



Рис. 4.19. Структурна схема моделі прийняття оптимізаційних рішень в процесі буріння нафтових і газових свердловин роторним способом

4.4. Оцінка функціональності проекрованої моделі інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень в процесі буріння

Функціональність проекрованої моделі СІППР може розглядатися з двох точок зору: як інтерактивний процес прийняття рішення і як процес на основі деякої обчислюваної архітектури. Таким чином, в першу чергу ми визначаємо процес прийняття рішень, і в той же самий час, він забезпечує обчислювальну архітектуру для зв'язування різних технологічних компонент в єдиний цикл підтримки прийняття рішення. З точки зору процесу він дозволяє певну послідовність дій, які можуть бути виконані для підтримки певної специфікованої ситуації прийняття рішення. Тому, з даної точки зору, такий процес є нормованим, в якому кожен вид активності базується на попередніх видах активності, пов'язаних певним алгоритмічним відношенням. Не зважаючи на аспекти нормованості, для учасника процедури прийняття рішень не є обов'язковим слідувати всім запропонованим крокам, доки не буде досягнута кінцева рекомендація (експертна порада). Якщо учасник процесу прийняття рішень є задоволений результатами, то процес може бути зупинений на даному рівні.

Описаним вимогам задовольняє архітектура представлена на рис. 4.20, що складається з трьох основних компонент: інтерфейс користувача, база даних, моделюючий компонент. Відповідно інтерфейс користувача дозволяє учаснику ППР отримувати доступ і маніпулювати компонентами моделювання та компонентами баз даних, а також аналізувати різноманітні сценарії прийняття рішень засобами управління сценаріями.

В рамках реалізованого фреймворку моделюючий компонент дозволяє учаснику ППР вибирати критерії, ресурси, змінні рішення і обмеження релевантні до поточної проблеми. Крім того моделюючий компонент дозволяє користувачу вибирати деяке специфіковане формулювання алгоритмічної моделі і забезпечувати її даними, що відносяться до даного формулювання, наприклад, функціями належності у випадку нечіткого багатоцільового лінійного програмування.



Рис. 4.20. Структура інтерфейсу для СІППР процесу буріння нафтових і газових свердловин

З точки зору моделі на основі ймовірнісної теорії прийняття рішень [158], невизначеність щодо наслідків (технологічних впливів) деякого рішення Sol моделюється розподілом ймовірностей $pd: V^{Set} \rightarrow [0,1]$, що виконує присвоєння кожному можливому стану (в нашому випадку набору значень $\{v_1, v_2, \dots, v_k\} \in V^{Set}$ керованих змінних процесу буріння $\{p_1, p_2, \dots, p_k\}$, де k – кількість керованих змінних, в даному дослідженні розглядається випадок $k=3$, а саме: p_1 – осьове зусилля на долото, p_2 – швидкість обертання бурового долота, p_3 – витрата промивної рідини; де після виконання присвоєння отримується, що $\{p_1 = v_1, p_2 = v_2, \dots, p_k = v_k\}$) певного ймовірнісного значення. Відповідно, преференції експертів, що приймають рішення представляються функцією доцільності $uf: V^{Set} \rightarrow [0,1]$. Якщо розподіл ймовірностей будується для кожного з можливих рішень, то тоді очікувана доцільність може бути обчислена для кожного з цих рішень згідно формули:

$$ut^{Sol} = uf(Sol) = \sum_{v^j \in V^{Set}} \left[pd(v^j : Constr^{Syst.}), uf(v^j : Constr_j^{Set}) \right]_{j=1..n, n \in N},$$

де $v^j = (v_1^j, v_2^j, \dots, v_k^j)$.

Відповідно, для максимізації результату слід вибрати рішення з найвищою очікуваною доцільністю.

В деяких ситуаціях при бурінні свердловин наявна технологічна інформація може не бути достатньою для побудови ймовірнісного розподілу. Тому одним з альтернативних підходів в даному випадку є застосування можливісної теорії [158]. Базова ідея теорії можливостей зводиться до розподілу можливостей, який є відповідником для розподілу ймовірностей в класичному підході. Розподіл можливостей $psd: V^{Set} \rightarrow [0,1]$ виконує присвоєння до кожного можливого результату рівня його вірогідності (правдоподібності, достовірності). Різниця між ймовірністю і можливісністю полягає в тому, що перша концепція, як правило, представляє міру частоти появи (прояву) певної події, а друга характеристика є мірою екстену (протяжності, обсягу) до якого певна подія може траплятися. Як і в попередньому підході функція доцільності $uf: V^{Set} \rightarrow [0,1]$ також повинна бути специфікована. Оптимальне рішення може бути вибране шляхом агрегації оптимістичних і песимістичних сценаріїв з можливісними оцінками перебігу технологічного процесу в накладених системах та множинах обмежень.

$$Sol^{Opt.} \stackrel{def.}{=} Aggr \left[\begin{array}{l} Sol^{Optm.}(psd|uf) = \left[\min_{v^j \in V^{Set}} \max \left(\left(psd(v^j : Constr^{Syst.}) \right), uf(v^j : Constr_j^{Set}) \right) \right] \\ Sol^{Pes.}(psd|uf) = \left[\max_{v^j \in V^{Set}} \min \left(\left(psd(v^j : Constr^{Syst.}) \right), uf(v^j : Constr_j^{Set}) \right) \right] \end{array} \right],$$

Процес міркувань експертів (операторів процесу буріння) можна розглядати як випадок розподіленої проблеми задоволення обмежень в якій обмеження кожної частини є розділеними між інтелектуальними складовими, що виконують обмін інформацією з метою пошуку рішення, що задовольняє всі обмеження [160-163].

В загальному випадку нечітке відношення, що представляє множину обмежень накладену i -м учасником процесу підтримки прийняття рішень може

бути означене наступним чином:

$$\text{Constr}_i^{\text{Syst.}}[\mathbf{v}^j] = \bigwedge_{l=1..n_l} [\text{Constr}_l^{\text{Set}}[\mathbf{v}^j]],$$

де: $\text{Constr}_l^{\text{Set}} = \{c_1^l, c_2^l, \dots, c_{m_l}^l\}$ – накладені множини обмежень в рамках системи обмежень встановленої учасником підтримки прийняття рішень, що визначається набором значень керованих параметрів $\mathbf{v}^j = (v_1^j, v_2^j, \dots, v_k^j)$, $j = 1..n$, $n_l, m_l \in N$; \bigwedge – оператор кон'юнктивної комбінації. Для кожного c_i^l учасник прийняття рішень задає доцільність $ut(c_i^l)$ та преференцію $prf(c_i^l): [c_i^l]_{prf(c_i^l)}^{ut(c_i^l)}$, де $1 \leq i \leq m_l$, що забезпечує обмін преференційними рішеннями учасників відповідно до рівня задоволення накладених ними систем обмежень та вироблення оптимального рішення щодо вибору режимних параметрів буріння нафтових і газових свердловин.

Такий підхід відображається формулою виду:

$$mf(\mathbf{v}^j) = \max_{(v_i, c_i) \in KB} [V_R^{\text{Set}}(v^{cur}, v_i)] \otimes [Consq_R^{\text{Set}}(cc_i, v_i)],$$

де: V_R^{Set} та $Consq_R^{\text{Set}}$ – відношення схожості для станів, що визначаються наборами значень керованих параметрів та результатів в формі технологічних впливів; \otimes – нормалізований оператор мінімальності; KB – набір описів попередніх випадків в формі бази знань; v^{cur} – набір значень керованих параметрів для поточного стану i -го контексту; cc_i – результат в формі технологічних впливів для контексту i -го стану. Отримана в результаті функція mf є монотонною стосовно вибраного рішення. Дана функція агрегується з функцією доцільності uf з метою визначення оптимального рішення згідно підходу можливісної теорії прийняття рішень.

В загальному випадку прийняття рішень в процесі буріння слід розглядати як виконання вибору, завданням якого є досягнення певної цілі (в нашому випадку встановлення оптимальних значень параметрам технологічного процесу) шляхом аналізу суб'єктивних і об'єктивних умов, а також генерація альтернатив і вибір найбільш властивої (придатної) серед них. На абстрактному

рівні процес підтримки прийняття рішення може бути описаний як такий, що має наступні інтерактивні аспекти: інтелектуальність, проектування, вибір, імплементація (рис. 4.21).

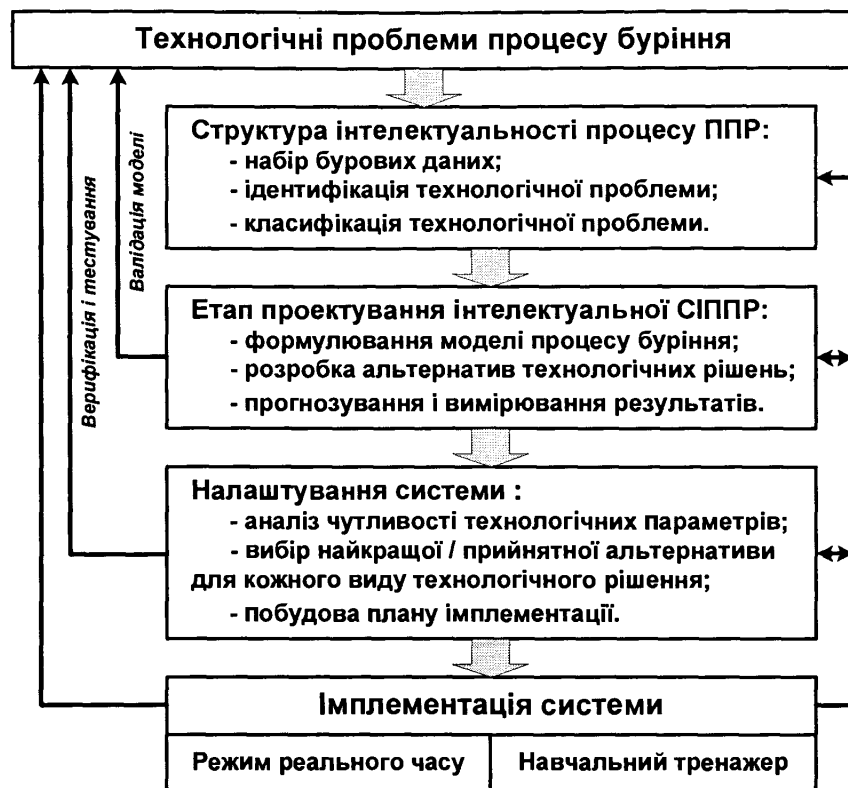


Рис. 4.21. Процес підтримки прийняття рішень в процесі технологічних проблем буріння нафтових і газових свердловин

Одним з відомих методів багатокритеріального прийняття рішень [62, 64, 139] є традиційна процедура обчислення зваженого (тобто з ваговими коефіцієнтами CW (*Weight Coeficient*)) середнього рейтингу $Rate_i^{aver.}$, шляхом аналізу значень або вартісного аналізу [135]:

$$Rate_i^{aver.} = \frac{\sum_{j=1}^{k_2} (CW_j^{Crt_j} Rate^{ij})}{\sum_{j=1}^{k_2} CW_j^{Crt_j}},$$

де: $i = 1, 2, \dots, k_1$, $j = 1, 2, \dots, k_2$; $Rate^{ij}$ – вагова корисність набору значень $v^j = (v_1^j, v_2^j, \dots, v_k^j)$ відповідно до критеріїв Crt_j ; $CW_j^{Crt_j}$ – важливість критерію Crt_j щодо оцінювання наборів значень керованих змінних. Таким чином, чим вищим є значення $Rate_i^{aver.}$, тим кращою є загальна агрегована ефективність процесу буріння.

Тим не менше, приведена вище класична процедура [135] не є застосовною для ситуацій в яких існує невизначеність та в яких доступна інформація характеризується неповнотою. Наприклад, входження виду «дуже», «достатній», «недостатній» утворюватимуть деяку нечітку множину. Розглянемо випадок нечіткого ранжування в термінах оцінки множини з j_{\max} наборів значень:

$$V^{Set} = \left\{ \left\{ v_1^1, v_2^1, \dots, v_k^1 \right\}, \left\{ v_1^2, v_2^2, \dots, v_k^2 \right\}, \dots, \left\{ v_1^{j_{\max}}, v_2^{j_{\max}}, \dots, v_k^{j_{\max}} \right\} \right\}_{k=5},$$

або

$$V^{Set} = \left\{ \left\{ v_1^j, v_2^j, \dots, v_k^j \right\}_{j=1..j_{\max}}^{k=5} \right\},$$

є нечіткою множиною на множині з n -критеріїв $Crt^{Set} = \{Crt_1, Crt_2, \dots, Crt_n\}$, що повинні бути оцінені. Припустимо, що нечітке ранжування $Rate_{ij}^i$ по відношенню до певної множини наборів V_j^{Set} ($V_j^{Set} \subseteq V^{Set}$) значень керованих змінних $\{v_1^i, v_2^i, \dots, v_k^i\}_{k=3}$ характеризується функцією належності $mf_{Rate_{ij}^i}(Rate_{ij}^i)$, де $Rate_{ij}^1, Rate_{ij}^2 \in R$ і множиною вагових значень $CW_{\sim}^{Set} = \{CW_{\sim}^1, CW_{\sim}^2, \dots, CW_{\sim}^n\}$ для нечітких лінгвістичних змінних, що характеризуються як $mf_{[CW_{\sim}^j]^{Set}}(CW_{\sim}^j)$, $CW_{\sim}^j \in R$. Розглянемо функцію відображення $f_i(CW_{\sim}^i): R \rightarrow R$, яку означимо співвідношенням:

$$f_i(CW_{\sim}^i) = \sum_{j=1}^n (CW_{\sim}^j Rate_{\sim}^{ij}) / \sum_{j=1}^n [CW_{\sim}^j],$$

де \wedge° – оператор обчислення для отримання мінімального значення. Таким чином, через відображення $f_i(\overline{CW_{\sim}^i}): R \rightarrow R$, нечітка множина $[CW_{\sim}^i]^{Set}$ індукує множину нечіткого ранжування $Rate_{\sim}^i$ з функцією належності виду:

$$mf_{[Rate_{\sim}^i]^{Set}}(Rate_{\sim}^i) = \sup_{[CW_{\sim}^i]^{Set}} mf_{[CW_{\sim}^i]^{Set}}(CW_{\sim}^i), Rate_{\sim}^i \in R.$$

Кінцеве нечітке ранжування наборів значень керованих параметрів $v^j = \{v_1^i, v_2^i, \dots, v_k^i\}$ може бути охарактеризовано даною функцією належності.

Проте, такий спосіб обчислення не означає наявності набору з оптимальним (ефективним) значенням $mf_{[Rate^i]}^{Ser}(Rate^i)$, що очевидно є кращим значенням.

Для подальшого представлення двох виділених нечітких множин можуть бути застосовані наступні характеристичні процедури: 1) зумовлена нечітка множина позначається функцією належності виду:

$$mf_{I/R}(i | Rate^1, \dots, Rate^m) = \begin{cases} 1 & \text{якщо } Rate^i > Rate^k, \forall k \in (1, 2, \dots, m); \\ 0 & \text{у всіх інших випадках} \end{cases};$$

2) нечітка множина проектується з функції належності виду:

$$mf_R(Rate^1, \dots, Rate^m) = \bigwedge_{i=1, \dots, m} mf_{[Rate^i]}^{Ser}(Rate^i).$$

Таким чином, комбінування двох даних нечітких множин індукує відповідну нечітку множину в якій можна визначити кращі альтернативи проектування з найвищим кінцевим ранжуванням виду:

$$mf_I(i) = \sup_{Rate^1, \dots, Rate^m} mf_{I/R}(i | Rate^1, \dots, Rate^m) \wedge mf_R(Rate^1, \dots, Rate^m).$$

Головне вікно програми СИПР представлено на рис. 4.22. Воно складається із заголовка в якому вказано назву системи, стрічки меню, що розміщена у верхній частині вікна та робочої області у яку виводяться результати роботи інтелектуальної системи.

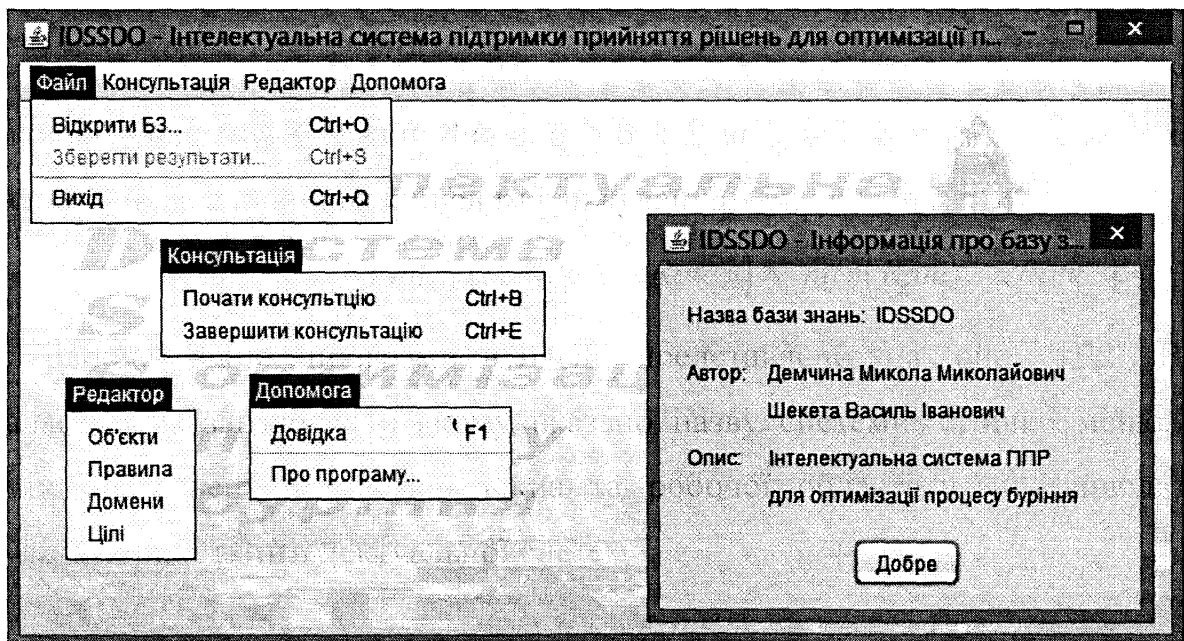


Рис. 4.22. Головне вікно інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень для оптимізації процесу буріння нафтових і газових свердловин

Для того щоб розпочати процес консультації необхідно вибрати пункт меню «Почати консультацію», що знаходиться на вкладці «Консультація». В режимі консультації користувачу буде запропоновано дати відповіді на ряд запитань, які можуть бути представлені одним з 3-ох типів, а саме: числовим, логічним і перелічуваним.

Всі входження бази знань створюються за допомогою налаштувань в опціях системи, які активуються через пункт меню «Редактор».

Вкладка «Об'єкти» служить для збереження інформації про об'єкти оптимізації процесу буріння які використовуються в інтелектуальній системі підтримки прийняття рішень (рис. 4.23).

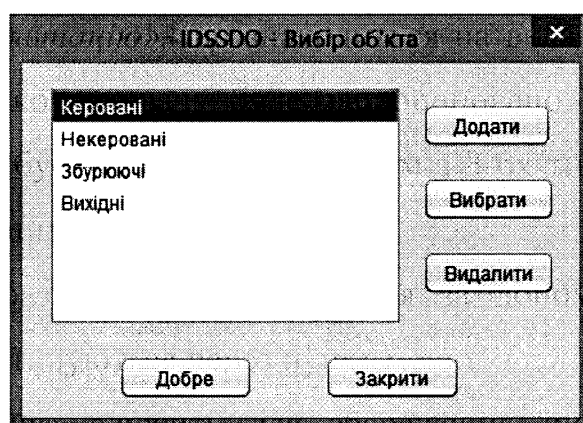


Рис. 4.23. Діалог вибору об'єктів оптимізації процесу буріння.

Об'єкт складається з назви та атрибутів, які в свою чергу можуть бути одного з трьох типів: числовий, логічний та перелічуваний (рис. 4.24).

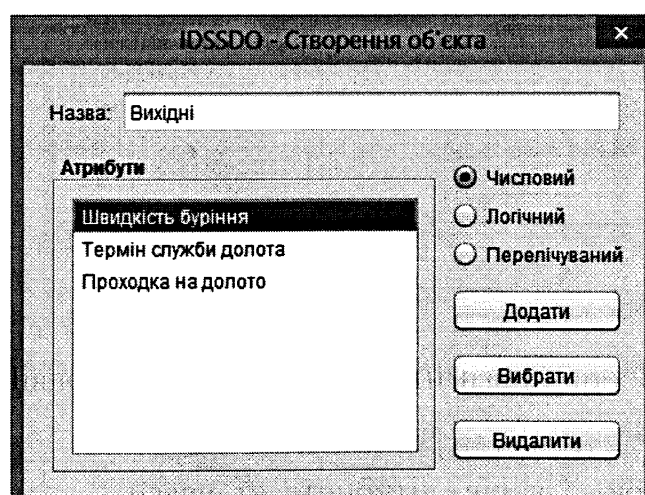


Рис. 4.24. Діалог вибору об'єкта для редагування.

Логічний атрибут може приймати одне з 3-ох значень: *істина*, *хиба* та *невідомо*, відповідне відображення яких в режимі консультації задається в блоці «Список можливих значень». Атрибут складається з імені та підказки, що відображається під час консультації (рис. 4.25).

Рис. 4.25. Представлення логічного атрибуту.

Числовий атрибут зберігає числові значення заданого об'єкта. Значення числового атрибуту може лежати в наперед визначеному діапазоні, що задається за допомогою відповідних текстових полів. Для того, щоб вказати одиниці вимірювання введеного значення використовується поле «*Одиниці вимірювання*». Як і логічний тип, він описується за допомогою назви та підказки, які використовуються аналогічно попередньому атрибуту (рис. 4.26).

Рис. 4.26. Представлення числового атрибуту.

Перелічуваний атрибут використовується для занесення в базу знань інформації про об'єкт у вигляді послідовності елементів. Ім'я та підказка використовуються для тих самих цілей, що і в попередніх атрибутах. В поле «Список можливих значень» за допомогою кнопки «Додати» заносяться елементи перелічуваного типу (рис. 4.27).

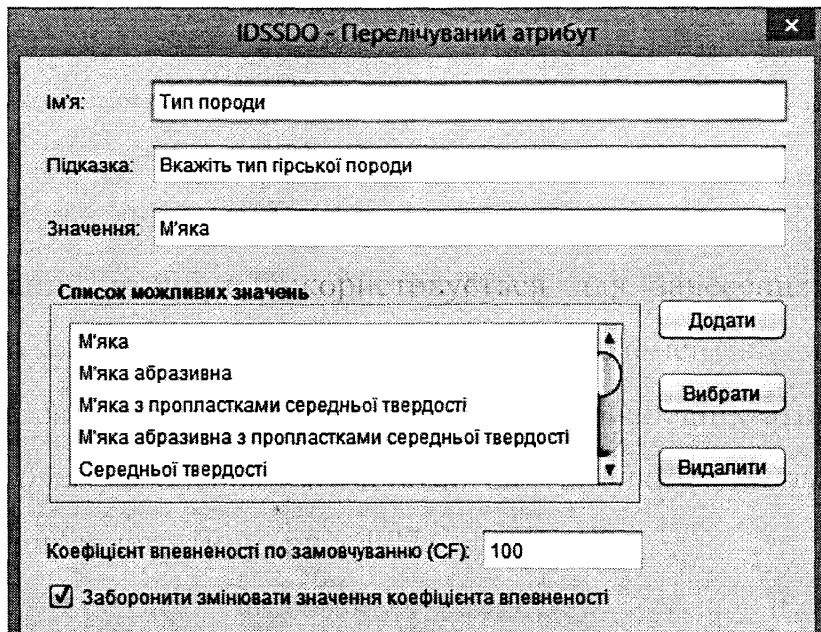


Рис. 4.27. Представлення перелічуваного атрибуту.

В діалозі налаштування атрибутів є окремий блок опцій, що дозволяє задати значення коефіцієнта впевненості по замовчуванню. Для цього використовується текстове поле з назвою «Коефіцієнт впевненості по замовчуванню (CF)».

Вкладка «Правила» використовується для зв'язування об'єктів оптимізації процесу буріння між собою. В даному діалоговому вікні можна створити нове правило та видалити або відредагувати уже існуюче. Кожне правило характеризується коефіцієнтом впевненості який вказує спосіб застосування правила при істинній передумові.

Кожне правило міститься в певному домені. Вхідження в передумовах правил можуть з'єднуватись за допомогою логічних операцій «І» чи «АБО». Правила специфікуються по типу дії (режими «твердження», «видобування», «заміна», «активація»). Прикладом правила з предметної області «оптимізація процесу буріння» є правило представлене на рис. 4.28.

Правила та домени БЗ спроектовані на основі зразків фактичних даних Охтирського та Прикарпатського УБР ПАТ «Укрнафта» (див. додаток Е)

IDSSDO - Створення правила

Ім'я:

Коефіцієнт впевненості (CF):

Домен:

Логічна операція

І правило

АБО правило

Дія

Твердження Заміна

Вибудування Активація

Об'єкт:

Атрибут:

Компаратор:

Опція:

Домен:

Значення:

ЯКЩО Швидкість буріння = 12 м/год

1 Термін служби долота = 20 год

ТОДІ Активація Домен_1 (Вибір рішення)

Рис. 4.28. Діалогове вікно створення правила

Правило використовується в процесі висновку, тільки тоді, коли його домен активний (рис. 4.29), тобто коли вибрано опцію «Активація». Головний домен бази знань завжди активний, інші домени активуються правилами. Головний домен створюється по замовчуванню, але його ім'я за необхідності можна змінити (рис. 4.30).

IDSSDO - Вибір правила

Правило_1 (Швидкість буріння)

Правило_2 (Швидкість буріння)

Правило_3 (Швидкість буріння)

Правило_4 (Швидкість буріння)

Правило_5 (Швидкість буріння)

Правило_6 (Швидкість буріння)

Правило_7 (Швидкість буріння)

Рис.4.29. Діалог вибору правил

IDSSDO - Створення домену

Ім'я:

Домен_1 (Швидкість буріння)

Домен_2 (Служба долота)

Домен_3 (Проходка долота)

Рис. 4.30. Діалог налаштування домену

За допомогою діалогу «Вибір цілі» відбувається вибір технологічних рішень, що максимізують очікувану доцільність технологічних впливів від встановлення керованим змінним можливих значень (рис. 4.31). Ціль може

містить одне або більше входжень, які будуть первинною метою в процесі пошуку оптимального рішення (рис. 4.32).

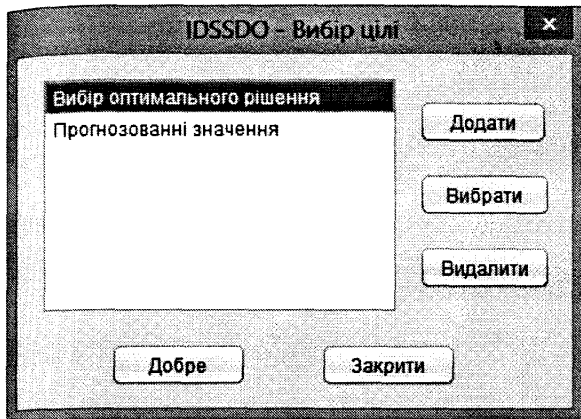


Рис. 4.31. Діалогове вікно вибору цілей

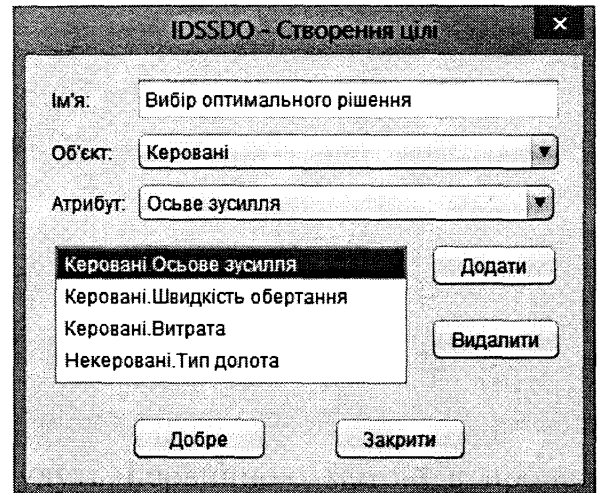


Рис. 4.32. Діалог створення цілі.

Задача пошуку оптимального рішення зводиться до того, що користувачу по черзі задається ряд наперед визначених запитань. Користувач в свою чергу через діалог з системою виконує присвоєння значень параметрам технологічного процесу буріння та задає відповідні їм значення доцільностей. На основі списку визначених цілей система виконує пошук оптимального рішення, що задовольняє всім накладеним на технологічні параметри обмеженням. Вікно проектованої системи із списком оптимальних значень режимних параметрів буріння представлено на рис. 4.33.

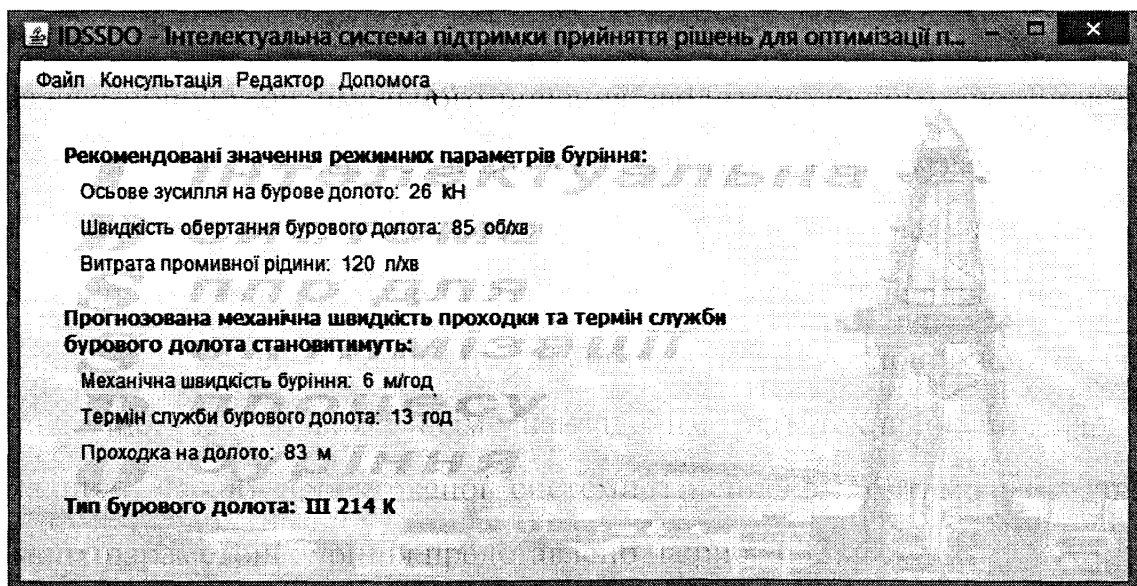


Рис. 4.33. Вікно проектованої системи із списком оптимальних значень режимних параметрів буріння

Деталізовані описи функціональності спроектованої системи представлені в додатках (див. додаток Ж).

Результати впровадження створеної інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень при виборі оптимальних режимних параметрів процесу буріння підтверджені відповідними актами (див. додатки З, К, Л).

Висновки до четвертого розділу

1. Проаналізовано особливості застосування систем підтримки прийняття рішень в процесі буріння, що дозволило виділити такі специфікації як: засоби контролю, засоби управління знаннями, засоби візуалізації та засоби на основі нечітких даних. Це в кінцевому підсумку дозволило інтегрувати в систему наступні складові: базу даних процесу буріння, систему управління базою моделей, інтерфейс користувача, систему генерації та керування повідомленнями щодо підтримки прийняття рішення.

2. Виконано оцінку застосовності методів експертних систем при побудові інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень в процесі буріння. В результаті чого визначено, що проєктована система прийняття рішень повинна підтримувати неструктуровані або напівструктуровані рішення, при чому, не залежно від ступеня їх структурованості вимагається участь оператора технологічного процесу буріння в процесі прийняття рішення. Виділено необхідність реалізації систем підтримки прийняття рішень на основі баз знань, що дозволить забезпечити інтерфейс взаємодії системи з оператором технологічного процесу буріння під час вирішення технологічних проблем, підтримку доступу до релевантної інформації, структурування, класифікацію та ініціалізацію технологічних проблем, реалізацію ефективного логічного висновку.

3. Розроблено методику прийняття оптимальних рішень в процесі буріння нафтових і газових свердловин на основі оперування з цільовими функціями обчислення доцільностей вихідних технологічних параметрів, що забезпечує інтелектуальну підтримку прийняття рішень при встановленні значень

керованих параметрів технологічного процесу буріння. Основою створеної методики є деревоподібна модель яка забезпечує високий рівень аналізу невизначеностей і доцільностей на шляху побудови найкращого оптимального рішення, шляхом обчислення очікуваної доцільності рішення, що дозволяє кращим рішенням вибрати саме рішення з максимальним значенням очікуваної доцільності.

4. Представлено оцінку функціональності проекрованої моделі інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень в процесі буріння. Створена система на основі списку визначених цілей, як результатів обчислення цільових функцій виконує пошук оптимального рішення у вигляді набору значень керованих змінних процесу буріння нафтових і газових свердловин, що, відповідно, задовольняє накладеним на технологічні параметри обмеженням.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертації наведено теоретичне узагальнення та нове вирішення важливої науково-практичної задачі в галузі автоматизації процесів керування – розроблено метод і систему інтелектуальної підтримки прийняття рішень при виборі оптимальних режимних параметрів буріння нафтових і газових свердловин на основі цільових функцій обчислення доцільностей вихідних технологічних параметрів. В роботі отримано такі основні результати:

1. Проведено аналіз особливостей інтелектуалізації процедур прийняття оптимізаційних рішень в процесі буріння нафтових і газових свердловин, що дозволило виділити характеристики критеріїв оптимізації буріння нафтових і газових свердловин в термінах режимів буріння. Розглянуто особливості застосування інтелектуальних систем при бурінні і прийнятті рішень на їх основі, що визначило оцінки рівня застосовності інтелектуальних методів при вирішенні технологічних проблем буріння нафтових і газових свердловин. Проведений аналіз застосувань експертних систем в бурінні дозволив визначити параметри, що в них контролюються. Проаналізовано види та способи вибору оптимальних режимів буріння, що сталою основою обґрунтування способу оптимізації керованих параметрів шляхом оперування з цільовими функціями обчислення доцільностей вихідних технологічних параметрів.

2. Запропоновано формальний опис постановки задачі моделювання інтелектуальної підтримки прийняття рішень при виборі оптимальних режимних параметрів буріння шляхом побудови абдуктивного фреймворку з ваговими коефіцієнтами, що дало змогу розглядати виконання присвоєння вагових коефіцієнтів як вираження значень ймовірності, які представляються правилами для зміни розподілу значень керованих змінних технологічного процесу.

3. Уперше обґрунтовано та досліджено технологію інтелектуальної підтримки прийняття рішень на основі баз знань чітких, нечітких та імовірнісних правил, що дозволяють оперувати з множинами вихідних

технологічних параметрів та їх доцільностями. Реалізовано формальні методи інтелектуального керування процесом підтримки прийняття рішень на основі нечітких знань про процес буріння, що дозволяє безпосередньо оперувати із заданою чіткою або нечіткою структурою та інформацією в формі баз даних та баз знань з можливими неструктурованими, слабо структурованими та лінгвістичними входженнями, а також входженнями з невизначеністю, що в свою чергу визначає найбільш повний спосіб подання знань експертів технологічного процесу буріння.

4. Побудовано формальну структуру функціонування системи підтримки прийняття рішень при виборі оптимальних режимних параметрів буріння, шляхом виділення множин керованих, некерованих, збурюючих та вихідних технологічних параметрів, що дозволяє звести задачу підтримки прийняття рішень до оптимізації значень керованих параметрів. Це дає змогу розглядати результуючу формальну модель як оптимізаційну, оскільки у ній наявні цільові функції, що повинні бути оптимізовані, в тому числі в процесі задоволення обмежень, накладених на множини введених змінних, які описують процес буріння нафтових і газових свердловин.

5. Розроблено формальний механізм інтелектуальної підтримки прийняття рішень при виборі оптимальних режимних параметрів в процесі буріння нафтових і газових свердловин шляхом оперування з цільовими функціями обчислення доцільностей вихідних технологічних параметрів, що забезпечує інтелектуальну підтримку прийняття рішень при встановленні значень керованих параметрів технологічного процесу. Основою розробленого формального механізму є деревоподібна модель, яка забезпечує високий рівень аналізу невизначеностей і доцільностей в процесі побудови найкращого оптимального рішення, шляхом обчислення максимальної очікуваної доцільності на множині можливих рішень.

6. Реалізовано систему інтелектуальної підтримки прийняття оптимізаційних рішень в процесі буріння нафтових і газових свердловин, що базується на методиці вибору оптимальних режимних параметрів буріння на основі функцій доцільності. Створена система на основі списку визначених

цілей як результатів обчислення цільових функцій доцільності виконує пошук оптимального рішення у вигляді набору значень керованих змінних процесу буріння нафтових і газових свердловин, що, відповідно, задовольняє всі накладені на технологічні параметри обмеження.

7. Розроблено методику інтелектуальної підтримки прийняття рішень при виборі оптимальних режимних параметрів буріння на основі цільових функцій, яку впроваджено в ПАТ «Укрнафта»; отримані результати дослідження також прийняті до впровадження підприємством «Мікрол» і застосовуються у навчальному процесі Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, що підтверджено відповідними актами впровадження.

Розроблена в дисертації система інтелектуальної підтримки прийняття рішень при виборі оптимальних режимних параметрів буріння нафтових і газових свердловин може застосовуватись також для пошуково-розвідувального й експлуатаційного буріння нафтових і газових свердловин у формі предметно-незалежної інтелектуальної оболонки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Семенцов Г.Н. Автоматизация процесса бурения свердловин / Г.Н. Семенцов – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 1998. – Ч. 1. – 300 с.
2. Горбійчук М.І. Оптимізація процесу буріння глибоких свердловин: монографія. / М.І. Горбійчук, Г.Н. Семенцов – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2003. – 493 с.
3. Булатов А.И. Техника и технология бурения нефтяных и газовых скважин: Бурение нефтяных и газовых скважин. / А.И. Булатов, Ю.М. Проселков, С.А. Шаманов – М.: Недра-Бизнесцентр, 2003. – Ч. 2. – 1007 с.
4. Семенцов Г.Н. Оптимальное управление процессом бурения нефтяных и газовых скважин: автореф. дис. д-р. тех. наук, спец. 05.13.07 – Автоматизация технологических процессов и производств (промышленность) / Г.Н. Семенцов. – М.: МИНИГ, 1990. – 44 с.
5. Горбійчук М.І. Адаптація оптимального режиму до зміни умов буріння / М.І. Горбійчук // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – 2001. – №1(1). – С.40-49.
6. Мислюк М.А. Буріння свердловин. У 5 т. Т. 2. Промивання свердловин. Відробка доліт: довідник / М.А. Мислюк, І.Й. Рибчич, Р.С. Яремійчук – К.: Інтерпрес ЛТД, 2002. – 303 с.
7. Mitchell B. Advanced Oil well drilling engineering: Handbook & computer programs / B. Mitchell – 10 th Edition. – 1st Revision. – July 1995. – 626 p.
8. Jiawei Han. Data Mining: Concepts and Techniques / Jiawei Han and Micheline Kamber. – Morgan-Kaufman, 2000. – 28 p.
9. Hand D. Principles of Data Mining / D. Hand, H. Mannila, P. Smyth. – MIT: Press, 2001. – 546 p.
10. Fayyad U.M. From data mining to knowledge discovery: an overview. In Advances in Knowledge Discovery and Data Mining / U.M. Fayyad, G. Piatesky-Shapiro, and P. Smyth – The MITT Press, 1996. – P 1-34.
11. Pavel Berkhin. Survey of clustering data mining techniques. Technical report, Accrue Software. – San Jose, CA, 2002. – 56 p.

12. Rakesh Agrawal and Ramakrishnan Srikant. Fast algorithms for mining association rules / Rakesh Agrawal and Ramakrishnan Srikant; In Jorge B. Bocca, Matthias Jarke, and Carlo Zaniolo, editors, Proc. 20th Int. Conf. Very Large Data Bases, VLDB. – Morgan Kaufmann, 1994. – P. 487– 499.

13. Кропивницька В.Б. Оптимальне керування процесом буріння нафтових і газових свердловин з дискретно-неперервною зміною керувальних дій: автореф. дис. канд. тех. наук, спец. 05.13.07 – Автоматизація технологічних процесів / В.Б. Кропивницька. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2007. – 20 с.

14. Горбійчук М.І. Оптимальне відпрацювання шарошкових доліт за станом озброєння в неоднорідних породах / М.І. Горбійчук, Т.В. Гуменюк // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2006. – №4(21). – С 23-26.

15. The complete package of software for the man on the rig [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.drillingsoftware.com>.

16. Gorte B.G.H. Decision-analytic interpretation of remotely sensed data / B. G. H. Gorte, L. C. van der Gaag, F. J. M. van der Wel // Proceedings of the 7th International Symposium on Spatial Data Handling / in M.J. Kraak & M. Molenaar (eds.). – Columbia: International Geographical Union, 1996. – Vol. 2. – P. 1-10.

17. Осипов П.Ф. Оптимізація режимів бурення гідромониторними шарошечними долотами / Осипов П.Ф., Скрябин Г.Ф. – Ярославль: Медиум-пресс, 2001. – 239 с.

18. Семенцов Г.Н. Основные принципы оптимизации режимов при бурении скважин роторным способом / Г.Н. Семенцов // Изв. вузов. Горный журнал. – 1984. – № 11. – С. 46-49.

19. Волобуєв А.І. Використання промислової інформації для оптимізації режиму буріння / А.І. Волобуєв, М.М. Слєпко // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2007. – №2. – С. 127-130.

20. Семенцов Г.Н. Метод інтенсифікації параметрів математичної моделі за умов апіорної та поточної невизначеності процесу буріння / Г.Н. Семенцов, О.В. Фадеева // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – 2005. – №3(12). – С.165-168.

21. Кульгинов А.С. Алгоритмы оптимизации процесса бурения с учетом

технико-технологических мероприятий по усовершенствованию узлов управления / А.С. Кульгинов С.М. Ахметов, А.С. Айтимов // Инновации в науке: материалы XII междунар. заочной науч.-практ. конф., 17 сентября 2012 г. – Новосибирск, 2012. – 106 с.

22. Добыча нефти и газа. Режим бурения [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.neftedob.ru/index/rezhim_burenija/0-39.

23. Бревдо Г. Д. Проектирование режима бурения / Г. Д. Бревдо– М.: Недра, 1988. – 200 с.

24. Крижанівський Є.І. Підвищення ефективності буріння тришарошковими буровими долотами з відкритою опорою / Є.І. Крижанівський, Р.С. Яким, Л.Є. Шмандровський, Ю.Д. Петрина // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2010. – №2(35). – С. 17-22.

25. Горбійчук М.І. Моделювання та ідентифікація процесу заглиблення свердловин / М.І. Горбійчук, В.Б. Кропивницька // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – 2004. – №1(7). – С. 9-13.

26. Maurer W.C. The «Perfect-Cleaning» Theory of Rotary Drilling / Maurer W.C. – Journal of Pet. Tech. – 1962. – November. – P. 1270-1274.

27. Galle E.M. Best Constant Weight and Rotary Speed for Rotary Rock Bits / Galle E.M and Woods A.B // Drill. And Prod. Prac., API. – 1963. – P. 48-73.

28. Bourgoyne A. T. A Multiple Regression Approach to Optimal Drilling and Abnormal Pressure Detection / Bourgoyne A.T. Jr., Young F.S. – SPE 4238, 1974. – August – P. 371-384.

29. Ситников Н.Б. Зависимость механической скорости от времени чистого бурения / Н.Б. Ситников, В.А. Троп // Изв. вузов. Горный журнал. – 1994. – №8.– С.80-84.

30. Будников В.Ф. Проблемы механики бурения и заканчивания скважин / Будников В.Ф., Булатов А.И., Макаренко П.П. – М.: Недра, 1996. – 495 с.

31. Юнин Е.К. Динамика глубокого бурения. / Е. К. Юнин, В. К. Хегай. – М. : Недра, 2004. – 286 с.

32. Попов А.Н. Технология бурения нефтяных и газовых скважин / А.Н.

Попов, А.И. Спивак, Т.О. Акбулатов [и др.]; под общей ред. А.И. Спивака. – М.: Недра-Бизнесцентр, 2003. – 509 с.

33. Сомов В.Ф. Оптимизация размещения и порядка бурения многоствольных скважин в процессе мониторинга разработки Кравцовского месторождения / В.Ф. Сомов, В.З. Минликаев, В.М. Десятков [и др.] // Нефтяное хозяйство. – 2006. – №5. – С. 92-97.

34. Чудик І.І. Оптимальна подача промивальної рідини на вибій при бурінні свердловини / І.І. Чудик, Р.Б. Бабій // Нафтогазова енергетика. – 2007. – №3(4). – С.71-75.

35. Макаренко П. П. Комплексное решение проблем развития газодобывающего региона / Макаренко П.П. – М.: Недра, 1996. – 320 с.

36. Шавранський М.В. Система контролю для запобігання прихоплень бурильної колони в процесі буріння: дис. канд. техн. наук: спец. 05.11.13 – Прилади і методи неруйнівного контролю та визначення складу речовин / М.В. Шавранський. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2003. – 168 с.

37. Вовк. Р.Б. Система інтелектуальної підтримки прийняття рішень для запобігання нештатних ситуацій в процесі буріння свердловин: дис. канд. техн. наук: спец. 05.13.07 – Автоматизація процесів керування / Р.Б. Вовк. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2012. – 265 с.

38. Семенцов Г.Н.. Автоматизація технологічних процесів у нафтовій та газовій промисловості / Г.Н. Семенцов, Я.Р. Когуч, Я.В. Куровець, М.М. Дранчук. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ Факел, 2009. – 300 с.

39. Про схвалення енергетичної стратегії України на період до 2030 року: розпорядження Кабінету Міністрів України від 15.03.2006 р. №145. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/145-2006-p>.

40. Лорьер Ж.Л. Системы искусственного интеллекта / Лорьер Ж.Л. – М.: Мир. – 1991. – 400 с.

41. Семенцов Г.Н. Інтелектуальні системи керування технологічними процесами / Г.Н. Семенцов – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2012. – 173 с.

42. Drilling Software [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://>

www.pvicom.com/drilling-software.html.

43. 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.

44. Демчина М.М. Імплементация концепцій штучного інтелекту в технологічних процесах буріння нафтових і газових свердловин / М.М. Демчина // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – Івано-Франківськ, 2012. – С. 98-111.

45. Семенцов Г.Н. Математичний аналіз критеріїв відпрацювання доліт / Г. Семенцов, М. Горбійчук, І. Чигур // Нафтова і газова промисловість. – 2001. – №6. – С. 25-28.

46. Семенцов Г.Н. Визначення часу відпрацювання долота за оснащенням / Г.Н. Семенцов, М.І. Горбійчук, І.І. Чигур // Нафтова і газова промисловість. – 2001. – №5. – С. 20-25.

47. Крижанівський Є.І. Критерії підвищення довговічності тришарошкових бурових доліт з опорами типу ВУ / Є.І. Крижанівський, Р.С. Яким, Л.Є. Шмандровський, Д.Ю. Петрина // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – 2011. – №1(27). – С. 31-38.

48. Семенцов Г.Н. Моделирование функції мети для системи адаптивного оптимального керування процесом буріння нафтових і газових свердловин долотами нового покоління / Г.Н. Семенцов, О.В. Гутак // Вісник Хмельницького нац. ун-ту. – 2010. – №2. – С 133-140.

49. Дудля М.А. Алгоритм адаптивної стабілізації навантаження на долото / Дудля М.А., Карпенко В.М. // Науковий вісник: зб. наук. пр. Національної гірничої академії. – 2000. – №4. – С. 81-88.

50. Горбійчук М.І. Інформаційне забезпечення адаптивної системи керування процесом буріння // Методи та прилади контролю якості. – 2002. – №8. – С. 86-89.

51. Калинин А.Г. Практическое руководство по технологии бурения скважин на жидкие и газообразные полезные ископаемые / Калинин А.Г.,

Левицкий А.З., Мессер А.Г. [и др.]. – М.: Недра, 2001. – 450 с.

52. Горбійчук М.І. Аналіз алгоритмів ідентифікації процесу заглиблення свердловин / М.І. Горбійчук, В.Б. Кропивницька // Нафтова і газова промисловість. – 2005. – №2. – С. 24-26.

53. Акбулатов Т.О. Информационное обеспечение процесса бурения / Т.О. Акбулатов, Х.И. Акчурин, Л.М. Левинсон [и др.]. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2002. – 55 с.

54. Кропивницька В.Б. Комп'ютерна система оптимального керування процесом буріння нафтових і газових свердловин / Кропивницька В.Б. // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – 2008. – №1. – С. 105-108.

55. Герасимов Б.М. Системы поддержки принятия решений: проектирование, применение, оценка эффективности / Б.М. Герасимов, М.М. Дивизнюк, И.Ю. Субач // Севастополь: Научно-исследовательский центр вооруженных сил Украины «Государственный океанариум», 2004. – 320 с.

56. Алексеев А.В. Интеллектуальные системы принятия проектных решений / Алексеев А.В., Борисов А.Н., Вилюмс Э.Р. – Рига: Зинатне, 1997. – 206 с.

57. Алтунин А.Е. Модели и алгоритмы принятия решений в нечетких условиях / А.Е. Алтунин, М.В. Семухин // Тюмень: Изд-во Тюменского государственного университета, 2000. – 352 с.

58. Ларичев О.И. Теория и методы принятия решений / Ларичев О.И. – М.: Логос, 2000. – 296 с.

59. Фролов Ю.В. Интеллектуальные системы и управленческие решения / Фролов Ю.В. – М., 2000. – 122 с.

60. Берштейн Л.С. Нечеткие модели принятия решений: дедукция, индукция, аналогия / Л.С. Берштейн, А.В. Боженюк // Таганрог : Изд-во ТРТУ, 2001. – 110 с.

61. Herrera F. A model of consensus in group decision making under linguistic assessments / F. Herrera, E. Herrera-Viedma, J.L. Verdegay // Fuzzy Sets and Systems, 1996. – V. 78. – P. 73-87.

62. Лотов А.В. Многокритериальные задачи принятия решения / А.В. Лотов, И.И. Поспелова. – М. : МАКС Пресс, 2008. – 197 с.

63. Недашківська Н.І. Багатокритеріальне прийняття рішень із використанням максимального синтезу в методі аналізу ієрархій (МАІ) / Н.І. Недашківська // Системні дослідження та інформаційні технології. – 2010.– №3. – С. 7-16.

64. Ногин В.Д. Принятие решений в многокритериальной среде / Ногин В.Д. – М.: Физматлит, 2002. – 162 с.

65. Гаврилова Т.А. Извлечение и структурирование знаний для экспертных систем / Т.А. Гаврилова, К.Р. Червинская. – М.: Радио и связь, 1992.– 200 с.

66. Michel R. Klein. Knowledge-Based Decision Support Systems: With Applications in Business / Michel R. Klein, Leif B. Methlie // 2nd John Wiley & Sons, Inc. – New York, NY, USA, 1995. – 674 pages.

67. Dubois D. Fuzzy rules in knowledgebased systems – Modelling gradedness, uncertainty and preference / D. Dubois, H. Prade // An introduction to Fuzzy Logic Applications in Intelligent Systems. – 1992. – Vol. 165. – P. 45-68.

68. Усков А.А. Интеллектуальные системы управления на основе методов нечеткой логики / А.А. Усков, В.В. Круглов. – Смоленск: Смоленская городская типография, 2003. – 177 с.

69. Демчина М.М. Представлення знань нафтогазової предметної області у вигляді структурованої фреймової системи / М.М. Демчина // Обчислювальний інтелект (результати, проблеми, перспективи): матеріали I міжн. наук.-тех. конф., 10-13 травня 2011 р. – Черкаси, 2011. – С. 91.

70. Демчина М.М. Структуризація знань нафтогазової предметної області у вигляді продукційної системи / М.М. Демчина // Системний аналіз та інформаційні технології : матеріали міжн. наук.-техн. конф., 23-28 травня 2011 р.– К., 2011. – С. 233.

71. 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.

72. Демчина М.М. Технологія інтелектуального опрацювання інформації про нафтогазові об'єкти / М. Демчина, Л. Старчевська, Д. Цінявський // Інформація, комунікація, суспільство 2012: матеріали I міжн. наук. конф., 25-28 квітня 2012 р. – Львів, 2012. – С. 236-237.

73. William W. Cohen. Fast effective rule induction / William W. Cohen. – In ICML, 1995. – P. 115-123.

74. Jochen Hipp. Algorithms for association rule mining - a general survey and comparison / Jochen Hipp, Ulrich Guntzer, and Gholamreza Nakhaeizadeh // SIGKDD Explorations. – 2000. – V 2(1). – P. 58-64.

75. Goethals B. Advances in frequent itemset mining implementations: Introduction to fimi'03 / B. Goethals and Mohammed J. Zaki // In Proceedings of the FIMI'03 Workshop on Frequent Itemset Mining Implementations., 2003. – P. 26-29.

76. Шекета В.І. Класифікація об'єктів нафтогазової предметної області на основі шаблонів у формі правил / Шекета В.І., М.М. Демчина, Г.Я. Процюк // Інтелектуальний аналіз інформації: матеріали XII міжн. наук. конф. ім. Т.А.Таран, 16-18 травня 2012 р. – К., 2012. – С. 233-239.

77. Weiss S.M. Computer Systems That Learn: Classification and Prediction Methods from Statistics, Neural Nets, Machine Learning and Expert Systems / S.M. Weiss and C.A. Kulikowski . – Morgan Kaufmann, 1991. – 223 p.

78. Donald Michie. Machine Learning, Neural and Statistical Classification / Donald Michie, D.J. Spiegelhalter, and C.C. Taylor. – Ellis Horwood, 1994. – 289 p.

79. Ishibuchi H. Distributed representation of fuzzy rules and its application to pattern classification / H. Ishibuchi, K. Nozaki, H. Tanaka, Fuzzy Sets and Systems. – 1992. – 25 Nov. – Vol. 52. – Iss. 1. – P. 21-32.

80. Freitas Alex Alves. Understanding the crucial differences between classification and discovery of association rules - a position paper / Alex Alves Freitas // SIGKDD Explorations. – 2000. – V. 2 (1). – P. 65–69.

81. Davy Janssens. Integrating classification and association rules by proposing adaptations to the cba algorithm / Davy Janssens, Geert Wets, Tom Brijs, and Koen

Vanhoof // *Recent Advances in Retailing and Services Science: 10th International Conference, 2003.* – P. 235-241.

82. Wenmin Li. CMAR: Accurate and efficient classification based on multiple class-association rules / Wenmin Li, Jiawei Han, and Jian Pei. – In *ICDM, 2001.* – P. 369-376.

83. Семенцов Г.Н. Контроль технологічних параметрів і показників процесу буріння на базі системних технологій Data Mining DMPC / Семенцов Г.Н. // *Приладобудування - 2006 (стан і перспективи) : зб. наук. праць п'ятої наук.-тех. конф., 25-26 квітня 2006 р.* – К., 2006. – С. 254-255.

84. Демчина М.М. Моделирование нефтегазовой предметной области на основе фреймово-продукционного подхода / М.М. Демчина, В.Р. Процюк, В.І. Шекета // *Збірник наукових праць національного гірничого університету.* – Дніпропетровськ, 2011. – №36. – Т. 1. – С. 98-105.

85. Bezdek J.C. Fuzzy models for pattern recognition. Methods that search for structures in data / J.C. Bezdek, S.K. Pal [Eds]. – IEEE Press, 1992. – P. 2.

86. Заде Л.А. Роль мягких вычислений и нечеткой логики в понимании, конструировании и развитии информационных интеллектуальных систем / Заде Л.А. // *Новости искусственного интеллекта.* – 2001. – № 2-3. – С. 7-11.

87. Прикладные нечеткие системы: пер. с япон. / Асаи К., Ватада Д., Иваи С. [и др.]; под ред. Т. Тэрано, К. Асаи, М. Сугено. – М.: Мир, 1993. – 368 с.

88. Ротштейн А.П. Интеллектуальные технологии идентификации: нечеткая логика, генетические алгоритмы, нейронные сети / Ротштейн А.П. – Винница : УНИВЕРСУМ, 1999. – 320 с.

89. Driankov D. Fuzzy logic with unless-rules / D. Driankov, H. Hellendoorn. – *Fuzzy Systems.* – 1992. – 8-12 Mar. – P. 255-262.

90. Zadeh L. A. Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility / Zadeh L. A. – *North-Holland, 1999.* – V. 100. – P. 9-34.

91. Arnold Kaufman. Introduction to Fuzzy Arithmetic / Arnold Kaufman, Madan M. Gupta. – New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1991. – 384 p.

92. Zimmermann H. J. Fuzzy Set Theory-And Its Applications /

Zimmermann H. J. – Springer, 2001. – 514 p.

93. L.A. Zadeh. Fuzzy logic = computing with words / Fuzzy Systems, IEEE Transactions, 1996. – V. 4 (2). – P. 103-111.

94. Murofushi T. Fuzzy measures and fuzzy integrals / T. Murofushi, M. Sugeno // Fuzzy Measures and Integrals (Theory and Applications). – Heidelberg: Physica Verlag, 2000. – P. 3-41.

95. Dubois D. Automated reasoning using possibilistic logic: Semantics, belief revision, and variable certainty weights / D. Dubois, J. Lang, H Prade. – Knowledge and Data Engineering. –1994. – Feb. – P. 64-71.

96. Benferhat S. Representing default rules in possibilistic logic / S. Benferhat, D. Dubois, H. Prade // Principles of Knowledge Representation and Reasoning: Proc. of the 3rd Inter. Conf. (KR'92), 25-29 Oct. 1992 year. – Cambridge, MA, 1992. – P. 673-684.

97. Fenton N., Neil M. The use of Bayes and causal modeling in decision making, uncertainty and risk / N. Fenton, M. Neil // The Journal of CEPIS (Council of European Professional Informatics Societies). – 2011. – V. 12(5). – P. 10-21.

98. Bayes Nets [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://http://www.bayesnets.com>

99. Richard M. Karp A simple algorithm for finding frequent elements in streams and bags / Richard M. Karp, Scott Shenker, and Christos H. Papadimitriou // In Proceedings of the ACM PODS 2003; ACM, 2003. V. 28. – P. 84-88

100. Hobbs J. Interpretation as abduction / Hobbs J., Stickel M.E., Appelt D. et al. // Artificial Intelligence, 1993. 63(1-2). – P. 69-142.

101. Kakas A.C Abductive logic programming / A.C. Kakas, R.A. Kowalski, and F. Toni // Journal of Logic and Computation, 1993. –V. 2(6). – P. 719-770,

102. Вагин В.Н. Абдукция в задачах планирования работ в сложных объектах / В.Н. Вагин, К.Ю. Хотимчук // Искусственный интеллект и принятие решений. – М.: Ленанд, 2011. – Т.1. – С. 3-13.

103. Kakas A.C. The role of Abduction in Logic Programming / R.A. Kowalski and F. Toni // Handbook in Artificial Intelligence and Logic Programming. – 1998. – V. 5. – P. 235-324.

104. Kakas A.C. Aclp: Abductive constraint logic programming / A.C. Kakas, A. Michael, and C. Mourlas // *Journal of Logic Programming*, 2000. – V. 44 (1-3). – P. 129-177.
105. Kakas A.C. Abductive concept learning / Antonis C. Kakas, F. Riguzzi // *New Generation Computing*, 2000. – V. 18(3). – P. 243-294.
106. Pat Langley. *Elements of Machine Learning*. – Morgan Kaufmann, 1995. – 419 p.
107. Quinlan J.R. Improved use of continuous attributes in C4.5 / Quinlan J.R. // *Journal of Artificial Intelligence Research*. – 1996. – V.4. – P. 77-90.
108. Michell T. *Machine Learning* / T. Michell. – McGraw Hill, 1997. – 414 p.
109. Dubois D. Fuzzy set modelling in case-based reasoning / Dubois D, Esteva F, [et al] // *International Journal of Intelligent Systems*. – 1998. – V. 13. – P. 345-373.
110. Kowalczyk R. Fuzzy eNegotiation Agents / Kowalczyk R // *Journal of Soft Computing, Special Issue on Fuzzy Logic and the Internet*. – 2002. – V. 6(5). – P. 337-347.
111. Zadeh L.A. Computing with words (CW) and its application to decision support and systems analysis / Zadeh L.A. // *Intelligent Signal Processing: IEEE International Symposium*, 2003. – V. 1-2. – P. 1-2.
112. Dubois D. Fuzzy sets in approximate reasoning. Part 1: Inference with possibility distributions / D. Dubois, H. Prade // *Fuzzy Sets and Systems – Special memorial volume on foundations of fuzzy reasoning*. – 1991. – 5 March. – Vol. 40. Iss. 1. – P. 143-202.
113. Круглов В.В. Нечёткая логика и искусственные нейронные сети / В.В. Круглов, М.И. Дли, Р.Ю. Голунов. – М.: Физматлит, 2001. – 221 с.
114. Didier Dubois. Possibility theory and formal concept analysis: Characterizing independent sub-contexts / Didier Dubois, Henri Prade. – *Fuzzy Sets and Systems*, 2012. V. 196. – P. 4-16.
115. Calvo T. On some solutions of the distributivity equation / *Fuzzy Sets and Systems*, 1999. – V. 104. – P. 85-96.
116. Dubois D. The three semantics of fuzzy sets / Dubois D., Prade H. // *Fuzzy Sets and Systems*, 1997. – V. 90. – P. 141-150.

117. Roychowdhury S. New triangular operator generators for fuzzy systems / IEEE Trans. Fuzzy Syst., 1997. – V. 5. – P. 189-198.

118. Yager R.R. Uninorms in fuzzy systems modeling / Fuzzy Sets and Systems, 2001. – V. 122. – P. 167-175.

119. 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.

120. Mamdani E. H. Fuzzy logic control - from owning the problem to finding a good solution / E. H. Mamdani // Fuzzy Systems «FUZZ '03»: the 12th IEEE International Conference, 25-28 May 2003 year. – 2003. – V. 1. – P. 12-13.

121. Dubois D. Gradual inference rules in approximate reasoning / D. Dubois, H. Prade // Information Sciences. – 1992. – 1-2 May. – Vol. 61 Iss. – P. 103-122.

122. Batyrshin I. Generalized conjunction and disjunction operations for fuzzy control / Batyrshin I., Kaynak O., Rudas I. // in: Proceeding of 6th European Congress on Intelligent Techniques & Soft Computing, EUFIT'98, Aachen, Germany, 1998. – V. 1. – 52-57 p.

123. Berger M. A. New parametric family of fuzzy connectives and their application to fuzzy control / Berger M. A. // Fuzzy Sets Syst. – 1998. – V. 93. – P. 1-16.

124. Семенцов Г.Н. Фазі-логіка в системах керування / Г.Н. Семенцов, І.І. Чигур, М.В. Шавранський, В.С. Борин. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2002. – 84 с.

125. Zadeh L.A. Toward a theory of fuzzy information granulation and its centrality in human reasoning and fuzzy logic / Fuzzy Sets and Systems, 1997. – V. 90. – P. 111-127.

126. Шекета В.І. Управління процесом інтерпретації інформації про нафтогазові об'єкти на основі нечітких моделей / В.І. Шекета, М.М. Демчина, Л.М. Гобир // Математичне та імітаційне моделювання систем: матеріали XII міжн. наук.-практ. конф., 25-28 червня 2012 р. – Чернігів-Жукин, 2012. – С. 43-46.

127. Горбійчук М.І. Оптимальне керування процесом механічного буріння / М.І. Горбійчук, В.Б. Кропивницька // Нафтова і газова промисловість. – 2005. – №3. – С.20-22.

128. Система привода и автоматизации буровых установок [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.tscoffshore.com/ru/products/drilling/rig/>

129. Демчина М.М. Використання нечітких правил для представлення знань в інтелектуальних системах нафтогазової предметної області / М.М. Демчина // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – Івано-Франківськ, 2012. – С. 132-141.

130. Демчина М.М. Нечіткі методи і моделі управління в інтелектуальних системах нафтогазової предметної області / М.М. Демчина, Г.Я. Процюк, В.Р. Процюк // Контроль і управління в складних системах: матеріали XI міжн. конф., 9-11 жовтня 2012 р. – Вінниця, 2012. – С. 248.

131. Демчина М.М. Реалізація формальних методів інтелектуального керування на основі нечітких знань про нафтогазові об'єкти / М.М. Демчина, В.Р. Процюк, Г.Я. Процюк // Нафтогазова енергетика. – 2011. – №3. – С. 96-107.

132. Демчина М.М. Розробка структури інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень в процесі буріння / М.М. Демчина // Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем : матеріали X ювілейної міжнар. наук.-практ. конф., 21-23 листопада 2012 р. – Дніпропетровськ, 2012. – С. 156

133. Harmon P. The Size of the Commercial AI Market in the US. Intelligent Software Strategies. – V.10. – N.1. – 1994. – P. 1-16.

134. Эддоус М. Методы принятия решений: пер. с англ. / Эддоус М., Стенсфилд Р.; под ред. И.И. Елисеевой. – М.: Аудит, ЮНИТИ, 1997. – 590 с.

135. Pahl G. Engineering Design - A Systematic Approach / Pahl G, Beitz W. – New York: Springer, 1996. – 617 p.

136. Mistree F. Modeling design processes: a conceptual decision-based perspective / Mistree F, Bras B, Smith WF, Allen JK // Engineering Design &

Automation. – 1995. – V. 1 (4). – P. 209-321.

137. Turban E. Information Technology for Management. John Wiley & Sons / Turban E., McLean E., Wetherbe J. – New York. 2001. – 832 p.

138. Черноруцкий И.Г. Методы оптимизации и принятия решений / Черноруцкий И.Г. – СПб.: Лань, 2001. – 398 с.

139. Штойер Р. Многокритериальная оптимизация. Теория, вычисления и приложения / Штойер Р. – М.: Радио и связь, 1992. – 330 с.

140. Гуц А.К. Математическая логика и теория алгоритмов / А.К. Гуц. – Омск: Наследие, 2003. – 108 с.

141. Jajodia S. A Logical Language for Expressing Authorizations. IEEE Computer Society Press / S. Jajodia, P. Samarati, V. Subrahmanian. – Los Alamitos, 1997. – P. 31-42.

142. Mohammed J. Zaki. Theoretical foundations of association rules / Mohammed J. Zaki and Mitsunori Ogihara; in Proceedings of 3 rd SIGMOD'98 Workshop on Research Issues in Data Mining and Knowledge Discovery (DMKD'98), Seattle, Washington, 1998. – P. 10-17.

143. Pang-Ning Tan. Selecting the right interestingness measure for association patterns. In Proceedings of the eighth ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining / Pang-Ning Tan, Vipin Kumar, and Jaideep Srivastava. – ACM Press, 2002. – P. 32-41.

144. Bui, T. An agent-based framework for building Decision Support Systems / Bui, T. & Lee, J // Decision Support Systems. – 1999. – V. 25. – P. 225-237.

145. Вовк Р.Б. Система інтелектуальної підтримки прийняття рішень при контролі технологічних параметрів / Р.Б. Вовк, В.І. Шекета, В.Д. Мельник // Методи і прилади контролю якості. – 2012. – № 29. – С. 119-129.

146. Collins J. MAGNET: A Multi-Agent Contracting System for Plan Execution. Workshop on Artificial Intelligence and Manufacturing: State of the Art and State of Practice / Collins J, Tsvetovat M. [et al]. - Albuquerque, USA, AAAI Press, 1998.

147. Mancarella P. An abductive proof procedure handling active rules / P. Mancarella and G. Terreni // AI*IA 2003: Advances in Artificial Intelligence /

A.Cappelli and F.Turini, editors. – SV of LNAI, 2003.– P. 105-117.

148. Нейлор К. Как построить свою экспертную систему / Нейлор К. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 154 с.

149. Lindley D.V. Making Decisions / Lindley D.V. – 2nd Edition // Publisher: Wiley. – 1991. – April 5. – 220 p.

150. Семенцов Г.Н. Інтелектуальний пристрій на нечіткій логіці для розпізнавання образів у бурінні / Г.Н. Семенцов, І.І. Чигур, М.І. Когутяк, Л.Я. Чигур // Нафтогазова енергетика. – 2009. – №1(10). – С. 75-77.

151. Семенцов Г.Н. Інформаційна модель контролю питомих енерговитрат на поглиблення свердловини / Г.Н. Семенцов, Т.Я. Кузь // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – 2001. – №1(1). – С. 76-80.

152. Семенцов Г.Н. Нечіткі моделі технологічних процесів і їх ідентифікація / Г.Н. Семенцов, І.І. Чигур // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. – Івано-Франківськ: ІФДТУНГ. – 1996. – Вип. 33(6). – С. 12-17. – (Серія: Технічна кібернетика та електрифікація об'єктів паливно-енергетичного комплексу).

153. Семенцов Г.Н. Автоматизація технологічних процесів на базі методів нечіткої логіки. // Г.Н. Семенцов, Ю.В. Матієвський / Наука і газ України – 2004 : матеріали VIII міжнар. конф., 29 вересня 2004 р. – Львів, 2004. – С. 280-282.

154. Вовк Р.Б. Моделювання структури та функціональності технологічних проблем на основі обмежень / Вовк Р.Б. // Математичні машини та системи. – 2011. – № 2. – С. 153-161.

155. Овчинников В.П. Определение осевой нагрузки на долото при бурении скважин с горизонтальным окончанием / В.П. Овчинников, М.В. Двойников, С.В. Пролубщиков // Специализированный журнал «Бурение и нефть». – 2007. - №5. – С 18-20.

156. Kaufmann, San Mateo, CA, 1989. Yokoo M, Durfee EH et al. The distributed constraint satisfaction problem: formalization and algorithms / Yokoo M, Durfee EH [et al] // IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering. – 1998.

– V. 10(5). – P. 673-685,

157. Kowalczyk R. On Constraint based Reasoning in eNegotiation Agents / Kowalczyk R, Bui V; in: F. Dignum and U. Cortes (Eds) // Agent Mediated Electronic Commerce III. – Springer-Verlag, 2003. – P. 31-46.

158. Didier Dubois. Possibility Theory, Probability Theory and Multiple-Valued Logics: A Clarification / Didier Dubois, Henri Prade // Annals of Mathematics and Artificial Intelligence archive. – 2001. – August. – V. 32. I. 1-4. – P. 35 – 66.

159. Xuan Thang Nguyen On Solving Distributed Fuzzy Constraint Satisfaction Problems with Agents / Xuan Thang Nguyen, Ryszard Kowalczyk // IAT '07 Proceedings of the 2007 IEEE/WIC/ACM International Conference on Intelligent Agent Technology. – P. 387-390.

160. Kowalczyk R. On negotiation as a distributed fuzzy constraint satisfaction problem / Kowalczyk R. // Proceedings of the Third International Symposium on Soft Computing for Industry of the World Automation Congress. – 2000. – P. 631-637

161. Luo X. A Fuzzy constraint based model for bilateral multi-issue negotiation in semi-competitive environments / Luo X, Jennings NR, [et al] // Artificial Intelligence. – 2003. – V. 148 (1-2). – P. 53-102.

162. Luo X. Prioritised Fuzzy Constraint Satisfaction Problems: Axioms, Instantiation and Validation / Luo X, Lee JH, [et al] // Fuzzy Sets and Systems. – 2003. – V. 136 (2). – P. 155-188.

163. Didier Dubois. Gradual elements in a fuzzy set / Didier Dubois, Henri Prade // Soft Computing, 2008. – V. 12(2). – P. 165-175.

ДОДАТКИ

Додаток А

Структура та класифікація інтелектуальних рішень в області буріння нафтових і газових свердловин

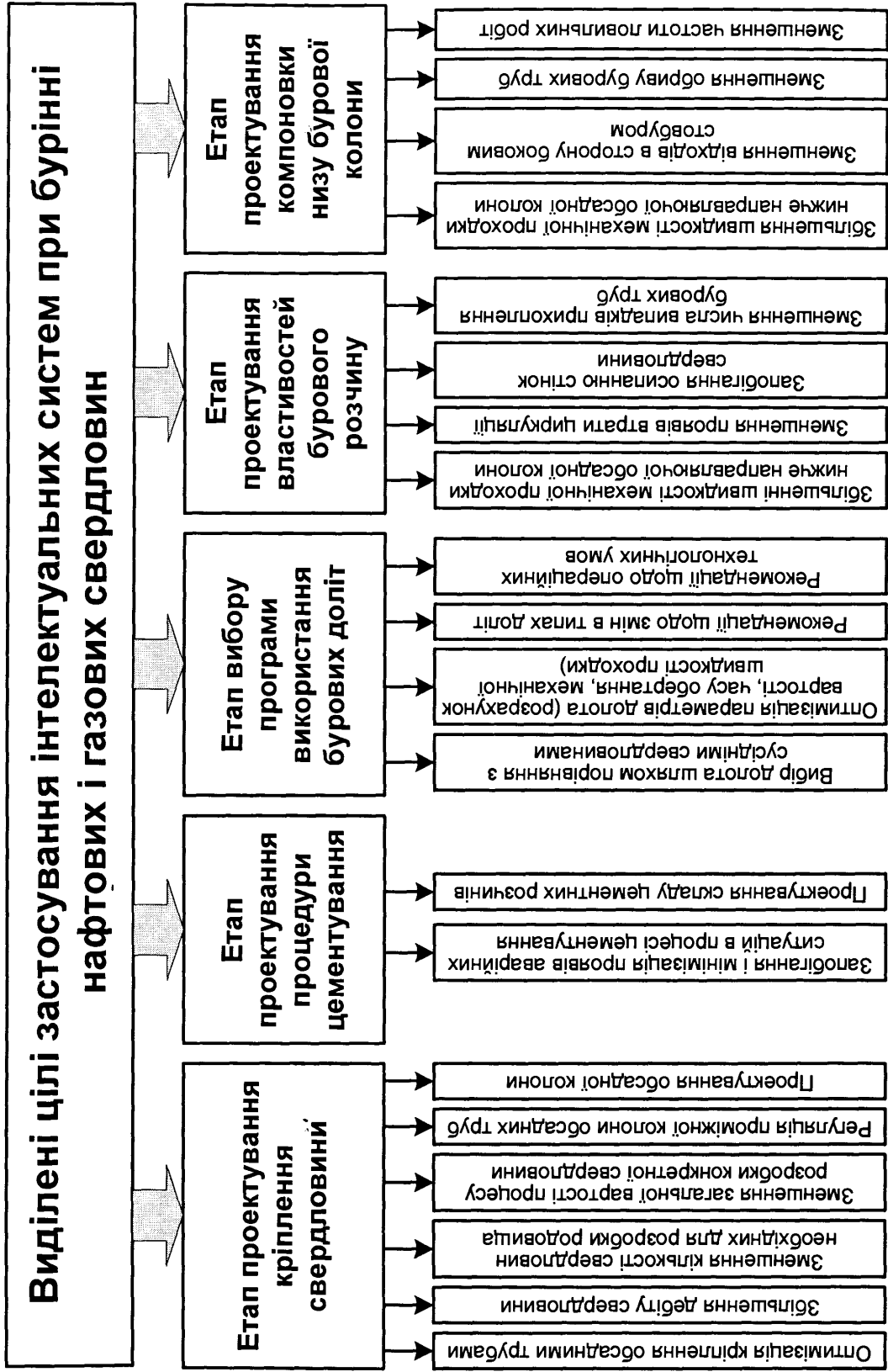


Рис. А.1. Стратегія застосування інтелектуальних систем при бурінні нафтових і газових свердловин

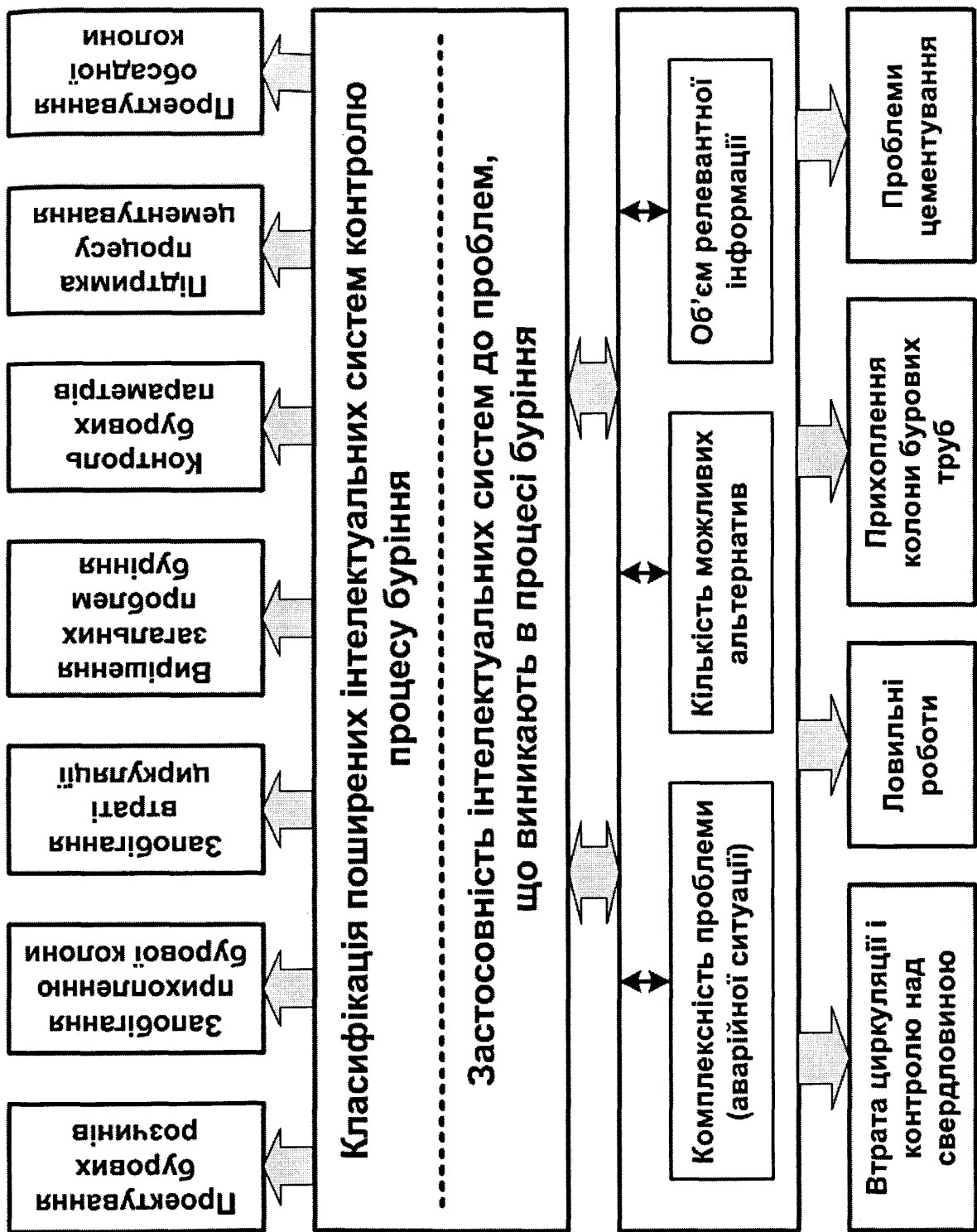


Рис. А.2. Класифікація та застосовність інтелектуальних систем в процесі буріння

Додаток Б

Зразки структурованих та формалізованих фактів і правил предметної області
«режими буріння»

$$\begin{aligned} \text{Режим_буріння} &|= \left[\begin{array}{l} \text{осьове_зусилля_на_долото} \vee \\ \text{швидкість_обертання_долота} \end{array} \right] |= \\ &|= \left[\begin{array}{l} \text{швидкість_механічного_буріння} \vee \\ \text{вартість_проходки_метра_свердловини} \end{array} \right] \end{aligned}$$

$$\text{Режим_буріння} |= \left[\begin{array}{l} \text{тип_бурового_долота} \vee \\ \text{режим_роботи_долота} \vee \\ \text{спосіб_обертання_долота} \end{array} \right]$$

$$\text{Оптимальний_режим_буріння} \left(\begin{array}{l} \left[\begin{array}{l} \bigvee_i [\text{режимні_параметри}]_i \end{array} \right] \stackrel{def}{:=} \\ \stackrel{def}{:=} \left[\begin{array}{l} \text{ефективне_поглиблення_свердловини,} \\ \text{ефективна_робота_бурового_долота} \end{array} \right] |= \\ \left[\begin{array}{l} \text{техніко-економічні_показники} \end{array} \right] \end{array} \right) |=$$

$$\text{Раціональний_режим_буріння} \left(\bigvee_i [\text{режимні_параметри}]_i \mid \left[\begin{array}{l} \text{задана_конфігурація_обладнання} \end{array} \right] \right)$$

$$\begin{aligned} \text{Форсований_режим_буріння}(\text{inprm}(\text{швидкість_буріння})) &:= \\ &:= \left(\text{inprm} \left[\begin{array}{l} \text{осьове_зусилля_на_долото} \vee \\ \text{швидкість_обертання_долота} \end{array} \right] \right) \rightarrow \\ &\rightarrow \text{inprm}(\text{механічна_швидкість_буріння}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Швидкісний_режим_буріння}(\text{inprm}[\text{швидкість_руйнування_породи}]) &|= \\ &|= \text{inprm}[\text{швидкість_обертання_долота}] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Силовий_режим_буріння}(\text{inprm}[\text{швидкість_руйнування_породи}]) &|= \\ &|= \text{inprm}[\text{осьове_зусилля_на_долото}] \end{aligned}$$

$$\text{Спеціальний_режим} \left(\begin{array}{l} \text{встановлення_кута_нахилу_стовбура,} \\ \text{попередження_та_мінімізація_викривлень_стовбура,} \\ \text{відбір_керну,} \\ \text{максимізація_виходу_керну, аварійні_роботи,} \\ \text{проводка_свердловини_через_поглинаючі_пласти,} \\ \text{забезпечення_якості_розробки_пластів} \end{array} \right)$$

Проходка _ на _ долото $\left(\begin{array}{l} \text{швидкість}_\text{руйнування}_\text{породи}, \\ \text{тривалість}_\text{роботи}_\text{долота} \end{array} \right)$

Режим _ роботи _ долота $\left(\begin{array}{l} \text{низькооборотний}, \\ \text{середньооборотний}, \\ \text{високооборотний} \end{array} \right)$

Параметри _ режиму _ буріння $\left(\begin{array}{l} \text{осьове}_\text{зусилля}_\text{на}_\text{долото}, \\ \text{частота}_\text{обертання}_\text{долота}, \\ \text{розхід}_\text{промивної}_\text{рідини} \end{array} \right)$

Проектування _ режимів _ буріння $\left(\begin{array}{l} \text{статичний}_\text{метод}, \\ \text{аналітичний}_\text{метод}, \\ \text{метод}_\text{перерахунку} \end{array} \right)$

Зміна _ параметрів _ режиму _ буріння \rightarrow
 \rightarrow Інтенсивність _ відпрацювання _ бурового _ долота

Зношення _ бурового _ долота \rightarrow Зменшення _ механічної _ швидкості _ буріння

Поєднання _ долото – порода \rightarrow Розрахунок $\left(\begin{array}{l} \text{вартість}_\text{метра}_\text{проходки}, \\ \text{режимні}_\text{параметри} \end{array} \right)$

Розрахунок _ параметрів _ режиму _ буріння $\left(\begin{array}{l} \text{гірська}_\text{порода}, \\ \text{тип}_\text{долота}, \\ \text{спосіб}_\text{буріння} \end{array} \right)$

Статичний _ метод _ розрахунку $\left(\begin{array}{l} \text{відпрацювання}_\text{доліт}, \\ \text{геолого} - \text{технічні}_\text{умови} \end{array} \right) \rightarrow$
 \rightarrow Виділення _ інтервалів _ однакової _ буримості \Rightarrow
 Основна _ ціль = Ефективні _ режими _ буріння
 \Rightarrow (висока _ ресурсна _ ємність, рівень _ освоєння _ родовища)

Застосування _ статистичного _ методу $\left(\begin{array}{l} \text{виділений}_\text{інтервал}, \\ \text{порівняння}_\text{результатів} \end{array} \right) \rightarrow$
 \rightarrow Середнє _ значення (амплітуда _ шуканого _ параметра)

Оптимальний _ режим _ буріння $= \text{dom} \left(\bigvee_i [\text{виділені}_\text{параметри}]_i \right) \rightarrow$
 \rightarrow Роторне _ буріння [мінімальна _ швидкість _ обертання _ долота]

Оптимальний _ режим _ буріння $\mid =$

$\mid =$ Співставлення (показники _ буріння) $\left(\begin{array}{l} \text{способи _ буріння, цілі _ буріння,} \\ \text{тип _ бурового _ обладнання} \end{array} \right)$

Застосування _ аналітичного _ методу $\left(\begin{array}{l} \text{дані _ розвідувального _ буріння,} \\ \text{характеристики _ доліт} \end{array} \right) \mid =$

$\mid =$ Залежність $\left(\begin{array}{l} \text{межанічна _ швидкість _ проходки,} \\ \text{осьове _ зусилля _ на _ долото,} \\ \text{частота _ обертання _ долота,} \\ \text{характеристики _ довговічності _ долота} \end{array} \right) \rightarrow$

\rightarrow Аналітичні _ залежності $\left(\begin{array}{l} \text{інтервали _ порід,} \\ \text{схожі _ механічні _ властивості _ порід,} \\ \text{буримість (визначений _ тип _ доліт)} \end{array} \right)$

Роторне _ буріння $\left[\left[\text{максимальне _ зусилля _ на _ долото} \right] \right] \mid =$

$\mid =$ (міцність _ конструкції _ долота, стікість _ бурової _ установки)

Оптимізація _ бурового _ процесу $\left\{ \begin{array}{l} \text{набір _ долото - порода} \\ \text{умови _ буріння} \end{array} \right.$

Співставлення _ умов _ буріння \rightarrow Проектування _ режиму _ буріння

Режим _ буріння (оптимізація, критерії _ оптимізації) \rightarrow

\rightarrow Покращення _ техніко - економічних _ показників $\mid =$ $\left(\begin{array}{l} \text{вибір _ типу _ долота,} \\ \text{режими _ роботи _ долота} \end{array} \right)$

Прийняття _ рішень (оптимізація) $\rightarrow \bigvee_i \left[\text{екстремум (показник _ роботи _ долота)} \right]_i$

Показники _ роботи _ долота $\left(\begin{array}{l} \text{проходка _ на _ долото,} \\ \text{механічна _ швидкість _ буріння,} \\ \text{рейсова _ швидкість _ буріння} \end{array} \right) \stackrel{def}{:=}$

$\stackrel{def}{:=}$ Оптимальність $\mid = \max_i \left[\text{показники _ буріння} \right]_i \vee$

\vee ЯКЩО Критерій _ оптимальності = вартість _ метра _ проходки

ТОДІ Оптимальність $\mid = \min_i \left[\text{показники _ буріння} \right]_i$

Оптимізація _ режиму _ буріння $\mid =$

$\mid =$ Режим _ буріння $\left(\begin{array}{l} \text{умови _ буріння,} \\ \text{екстремум (оптимізуючий _ параметр)} \end{array} \right)$

Продовження додатку Б

$$\begin{aligned} \text{Множина_обмежень(величини_критеріїв)} &\rightarrow \\ &\rightarrow \max(\text{рейсова_швидкість_буріння}) \Big|_{\text{встановлена_вартість_метра_проходки}} \checkmark \\ &\rightarrow \min(\text{вартість_метра_проходки}) \Big|_{\text{задана_рейсова_швидкість_буріння}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Ефективність_буріння} &\left(\begin{array}{l} \text{механічна_оцінка,} \\ \text{економічна_оцінка} \end{array} \right) \Big| = \\ & \Big| = \text{Параметри} \left(\begin{array}{l} \text{проходка_на_долото,} \\ \text{рейсова_швидкість_буріння,} \\ \text{вартість_метра_проходки} \end{array} \right) \Big| = \\ & \Big| = \left(\begin{array}{l} \text{швидкість_механічної_проходки,} \\ \text{залежність(зношення_долота, параметри_режиму_буріння)} \end{array} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Метод_перерахунку} &\left(\begin{array}{l} \text{нові_типи_бурових_доліт,} \\ \text{максимальна_ефективність(попередній_режим)} \end{array} \right) \rightarrow \\ &\rightarrow \text{Вид_оцінки(родовище, інтервал_буріння)} \rightarrow \\ &\rightarrow \left(\begin{array}{l} \text{залежність} \uparrow \left(\begin{array}{l} \text{рейсова_швидкість,} \\ \text{мехнічна_швидкість} \end{array} \right), \\ \text{залежність} \downarrow \left(\begin{array}{l} \text{механічна_швидкість,} \\ \text{проходка_на_долото} \end{array} \right) \end{array} \right) \end{aligned}$$

Процес_буріння \rightarrow (сталі_режимні_параметри, коректування_параметрів)

$$\begin{aligned} \text{Визначення_способу_буріння} & \stackrel{\text{def.}}{=} \\ & \stackrel{\text{def.}}{=} \left[\begin{array}{l} \text{ЯКЩО спосіб_буріння} = \text{турбінний ТОДІ} \\ \text{пошук_оптимального_зусилля_на_долото} \vee \\ \text{ЯКЩО спосіб_буріння} = \text{роторний ТОДІ} \\ \text{пошук} \left(\begin{array}{l} \text{оптимальне_зусилля_на_долото,} \\ \text{оптимальна_швидкість_обертання_долота} \end{array} \right) \end{array} \right] \end{aligned}$$

Розрахунок_показників_ефективності_буріння $\Big|_{\text{швидкість_проходки}=\text{початковий_швидкості}=\text{const}}$

$$\begin{aligned} \left(\text{Час_роботи_долота} = \left(\begin{array}{l} \text{стійкість_опори} \left(\begin{array}{l} \text{зміна_пачки_породи} \rightarrow \\ \rightarrow \text{заміна_долота} \end{array} \right) \right) \right) \Big| \stackrel{\text{def.}}{\Rightarrow} \\ \Rightarrow \left(\text{Час_роботи_долота} = \text{параметри_режиму_буріння} \right) \stackrel{\text{def.}}{\Rightarrow} \end{aligned}$$

ЯКЩО Оптимальний_режим $\stackrel{\text{def.}}{=} \text{екстремум(показник_оптимізації_буріння)} \Big| =$
 $\Big| = \text{множина(кількісні_параметри_режиму_буріння)}$

Залежність(час_роботи_долота, виділені_параметри_режиму_буріння) $\Big| =$
 $\Big| = \text{Промислова_інформація(відробка_бурових_доліт)}$

Процес _оптимізації |=
 |= Залежності $\left(\begin{array}{l} \text{проходка_на_долото,} \\ \text{рейсова_швидкість_проходки,} \\ \text{вартість_метра_проходки} \end{array} \right) \Leftrightarrow \left[\begin{array}{l} \text{осьове_зусилля,} \\ \text{частота_обертання,} \end{array} \right]$

[Програма _промивання]^{накладені_обмеження} |=
 |= Оптимальність $\left(\begin{array}{l} \text{осьове_зусилля,} \\ \text{швидкість_обертання} \end{array} \right) \Big| \text{задані_умови_промивання}$

Вибір _типу _долота |=
 |= Порівняння _результатів $\left(\begin{array}{l} \text{оптимальне_осьове_зусилля,} \\ \text{оптимальна_швидкість_обертання} \end{array} \right)$

ЯКЩО Режимні _параметри = const →
 → Відхилення _жежиму _буріння (оптимальність) |=
 $\left(\begin{array}{l} \text{геологічна_неоднорідність,} \\ \text{зміна_властивостей_породи,} \\ \text{зміна_умов_долото - порода,} \\ \text{зношення_долота,} \\ \text{зношення_опор_долота} \end{array} \right)$

(технологічні _регламенти, специфікації _обладнання)^{def.}
^{def.} = Простір _оптимальних _значень $\left(\begin{array}{l} \text{виділені_параметри,} \\ \text{накладені_обмеження} \end{array} \right)$

Динамічний _підбір _оптимальних _значень(параметри _режиму _буріння) →
 → $\left(\left(\begin{array}{l} \text{швидкість_механічно_проходки,} \\ \text{інтенсивність_зношення_долота} \end{array} \right), \left(\begin{array}{l} \text{проходка_на_долото,} \\ \text{рейсова_швидкість,} \\ \text{вартість_метра_проходки} \end{array} \right) \right)$

Параметри режиму буріння(осьове зусилля на долото,
 частота обертання бурового долота, розхід промивної рідини)

Параметри режиму буріння(тиск на виході бурового насосу,
 крутний момент на долоті)

Режим буріння \cong [параметри режиму буріння]

ЯКЩО рейсова швидкість буріння \in висока І технічне озброєння бурової \in
 стале І якість буріння \in задовільна ТОДІ режим буріння \in оптимальний АБО
 режим буріння \in раціональний

ЯКЩО вид обладнання \in енергетичне І вид обладнання \in заміниме І

темп_поглиблення Є зростаючим ТОДІ режим_буріння Є швидкісним

Нераціональні_режими_буріння(силовий, форсований, максимальної_проходки)

*Спеціальний_режим_буріння(відбір_необхідної_кількості_керну,
поглиблення_свердловини_в_зонах_ускладнень, аварійна_ситуація,
інтенсивна_зміна_зенітного_кута_осі,
інтенсивна_зміна_азимутального_кута_осі, корекція_напряму_осі_свердловини)*

Режими_буріння(роторне, турбінне, з_електробуром)

Проектування_режимів_буріння(статичний, аналітичний, шляхом_перерахунку)

*ЯКЩО застосовані_методи Є статистичні І застосовані_алгоритми Є
статистичні І дані Є промислові ТОДІ метод_проектування_режиму_буріння Є
статистичний*

*ЯКЩО показники_буріння Є показниками_відробки_доліт І метод_групування Є
співставленням_геологічних І технічних_умов_буріння І метод_обробки Є
відповідним_до_інтервалів_порід_геологічного_розрізу І свердловини Є
умовно_з_однаковою_буримістю ТОДІ метод Є статистичний*

*Виявлення_ефективних_режимів_буріння(моделі_доліт, типи_доліт,
забійні_двигуни, ефективний_спосіб_буріння) І
дані_механічних_властивостей_гірських_порід(відсутні)*

*Детермінованість_режиму_буріння(наявна_техніка, технологія_буріння,
рівень_освоєння_родовища)*

*Застосовність_статистичного_методу(по_окремих_інтервалах_буріння,
для_порівняння_результатів_буріння)*

*Спроцення_статистичного_методу(середнє_значення_шуканих_параметрів,
відсутність_вибірки)*

Аналітичний_метод(дані_розвідувального_буріння, характеристики_доліт)

*Аналітичні_залежності(механічна_швидкість_проходки, осьове_зусилля,
частота_обертання, довговічність_долота)*

*Застосовність_аналітичних_залежностей(виділені_інтервали_порід,
подібні_механічні_властивості, подібні_властивості_буримості,*

визначений_тип_доліт)

*Метод_перерахунку(перехід_на_новий_тип_доліт,
рейсова_швидкість_буріння(механічна_швидкість_буріння,
проходка_на_долото))*

*ЯКЩО тип_доліт Є змінюваним І поточний_режим_буріння Є
найбільш_ефективним(родовище, інтервал) І
рейсова_швидкість_буріння(механічна_швидкість_буріння, проходка_на_долото)
ТОДІ застосовувати метод перерахунку*

*ЯКЩО вибір_методу_пректування_режиму_буріння ТОДІ
співставлення_умов_умов_буріння(родовище, район, інтервали_буріння)*

Параметри_режиму_буріння(тип_гірської_породи, тип_долота, спосіб_буріння)

*ЯКЩО показники_поглиблення_свердловини Є найкращі І
ефективність_роботи_долота Є висока І якість_бурових_робіт Є задовільна І
конфігурація_обладнання Є стала ТОДІ режим_буріння Є оптимальний*

*Раціональний_режим_буріння(оптимізація_виділеного_параметра,
оптимізація_групи_параметрів)*

Форсований_режим_буріння(зростання_механічної_швидкості(швидкість_обертання_долота, осьове_зусилля_на_долото))

*Швидкісний_режим_буріння(інтенсифікація_руйнування_породи,
збільшення_швидкості_обертання_долота)*

*Силовий_режим_буріння(інтенсифікація_руйнування_породи,
збільшення_осьового_зусилля_на_долото)*

*Спеціальний_режим_буріння(встановлення_кута_нахилу_стовбура_свердловини,
попередження_та_мінімізація_викривлень_стовбура_свердловини,
відбір_керну_та_максимізація_його_виходу, аварійні_роботи_в_свердловині,
проводка_свердловини_через_поглинаючі_пласти,
забезпечення_якості_розробки_продуктивних_пластів)*

Режим_буріння(швидкість_проходки, вартість_проходки_інтервалу)

*Режим_буріння(тип_долота, клас_долота, режим_роботи_долота,
спосіб_обертання)*

Продовження додатку Б

Режим роботи бурового долота(осьове зусилля на бурове долото, частота обертання бурового долота, кількість промивної рідини)

Режими роботи бурового долота по частоті обертання(низькооборотний, середньооборотний, високооборотний)

Оптимізація режиму буріння(вибір долота, режим роботи долота)

Оптимізація режиму буріння(екстремум показників роботи долота)

Показники роботи долота(проходка на долото, механічна швидкість буріння, рейсова швидкість буріння)

Оптимальний режим \cong max(проходка на долото, механічна швидкість буріння, рейсова швидкість буріння(обмеження по вартості метра проходки)) АБО min(вартість метра проходки(обмеження по рейсовій швидкості буріння))

Обмеження по вартості(максимізація рейсової швидкості, вартість метра не більша за планову)

Обмеження по рейсовій швидкості(мінімізація вартості метра проходки, рейсова швидкість не менша за планову)

Ефективність буріння(проходка на долото, рейсова швидкість буріння, вартість метра проходки)

Параметри режиму буріння(швидкість проходки, зношення долота, математичні моделі, експериментальні залежності)

Час роботи долота(параметри режиму буріння)

Динамічна оптимізація режимних параметрів(швидкість механічної проходки, інтенсивність зношення долота, проходка, рейсова швидкість, вартість метра проходки)

ЯКЩО осьове зусилля на долото \in невелике І тиск по площі контакту долото-порода \in меншим границі втоми ТОДІ руйнування породи \in поверхневим І механічна швидкість буріння \in невисока І механічна швидкість буріння \in пропорційна зусиллю на долото

ЯКЩО явища втоми породи \in присутні ТОДІ руйнування породи \in об'ємним

ЧИМ вищий Є контактний тиск ТИМ

менше циклів навантаження необхідно для руйнування гірської породи

ЯКЩО осьове зусилля Є зростає ТОДІ енергія ударів Є зростає

ЯКЩО контактний тиск Є вищим твердості породи ТОДІ

порода руйнується при кожному ударі зубця долота

ЯКЩО осьове зусилля Є постійне ТОДІ контактний тиск Є зменшується

ЧИМ більше Є зношені зубці ТИМ

більш високі осьові зусилля необхідні для поверхневого і втомлюючого руйнування породи

ЧИМ більша Є глибина свердловини ТИМ вища Є твердість гірських порід

ЯКЩО зусилля на бурове долото Є високе І

контактний тиск перевищує межу текучості породи ТОДІ

глибина проникнення долота зростає

ЯКЩО швидкість обертання долота зростає ТОДІ

тривалість контакту зубця з породою зменшується

ЧИМ вище Є осьове зусилля на долото ТИМ вищий Є

темп зниження величини поглиблення за один оборот

ЯКЩО швидкість обертання долота Є висока ТОДІ

часу для ефективної взаємодії зубців шарошок з гірською породою ШВИДШ

ЗА ВСЕ буде недостатньо

ЯКЩО швидкість обертання долота зростає ТОДІ

зношення зубців шарошок інтенсифікується І

контактний тиск зубців на породу зменшується

ЯКЩО швидкість обертання долота Є висока ТОДІ

сила удару зубців долота зменшується

ЧИМ вища пластичність гірської породи І менша твердість гірської породи

ТИМ більше відхилення від лінійної залежності І

зменшення механічної швидкості проходки ПРИ

меншій швидкості обертання бурового долота

ЯКЩО *осьове зусилля на долото зростає* ТОДІ
*швидкість обертання брового долота при якій відбувається відхилення від л
 інійної залежності механічної швидкості проходки збільшується*

ЯКЩО *очистка вибою є недостатня* ТОДІ
*темп росту механічної швидкості проходки із збільшенням осьового зусилля
 знижується*

ЯКЩО *осьове зусилля на долото є стале і швидкість обертання долота є
 стала і витрата промивної рідини збільшується* ТОДІ
механічна швидкість проходки зростає

ЯКЩО *механічна швидкість проходки < 15 м/год.* ТОДІ
збільшувати витрату промивної рідини доки швидкість висхідного потоку <=
0,5 м/с.

*Проходка на долото (швидкість руйнування породи,
 тривалість роботи на вибої)*

ЯКЩО *значення параметра режиму буріння змінюється* ТОДІ
інтенсивність відпрацювання долота змінюється

ЧИМ більше є зношення долота ТИМ нижча є механічна швидкість проходки

ЯКЩО *режим буріння є визначеним і порода є однорідна* ТОДІ
*механічна швидкість (початкова механічна швидкість,
 час з моменту початку роботи, величина зношення долота)*

ЯКЩО *зношення зубців долота* ТОДІ *збільшення площі контакту і
 зменшення контактного тиску і швидкості зношення*

ЯКЩО *період роботи долота є початковий* ТОДІ
механічна швидкість проходки знижується

ЯКЩО *контактний тиск є
 менший заданого значення (межа текучості матеріалу, межа виносливості)*
 ТОДІ
швидкість зношення долота збільшується пропорційно осьовому зусиллю

Додаток В

Структура та класифікація функціональності систем інтелектуальної підтримки прийняття рішень

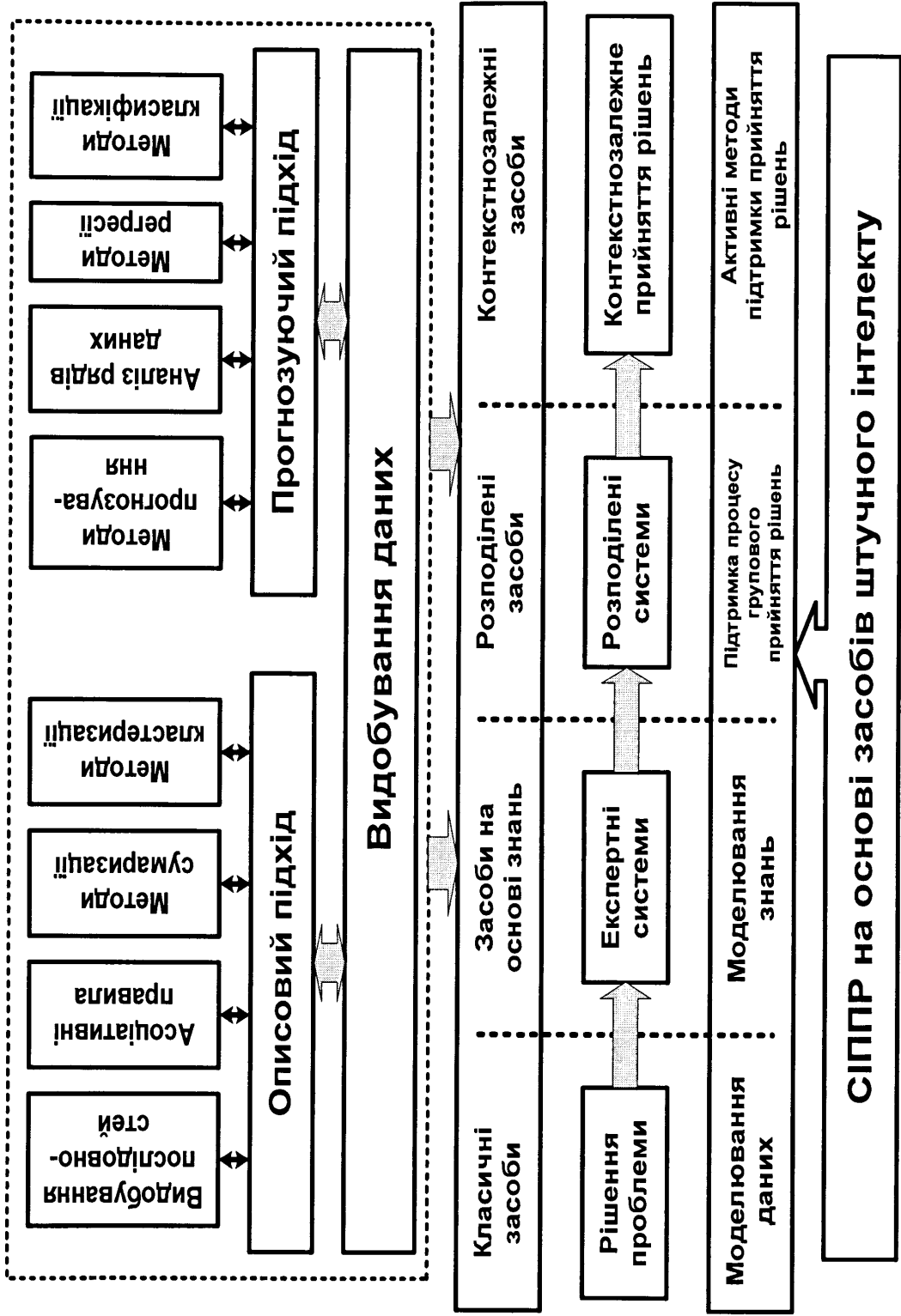


Рис. В.1. Загальна структура СІППР на основі засобів штучного інтелекту

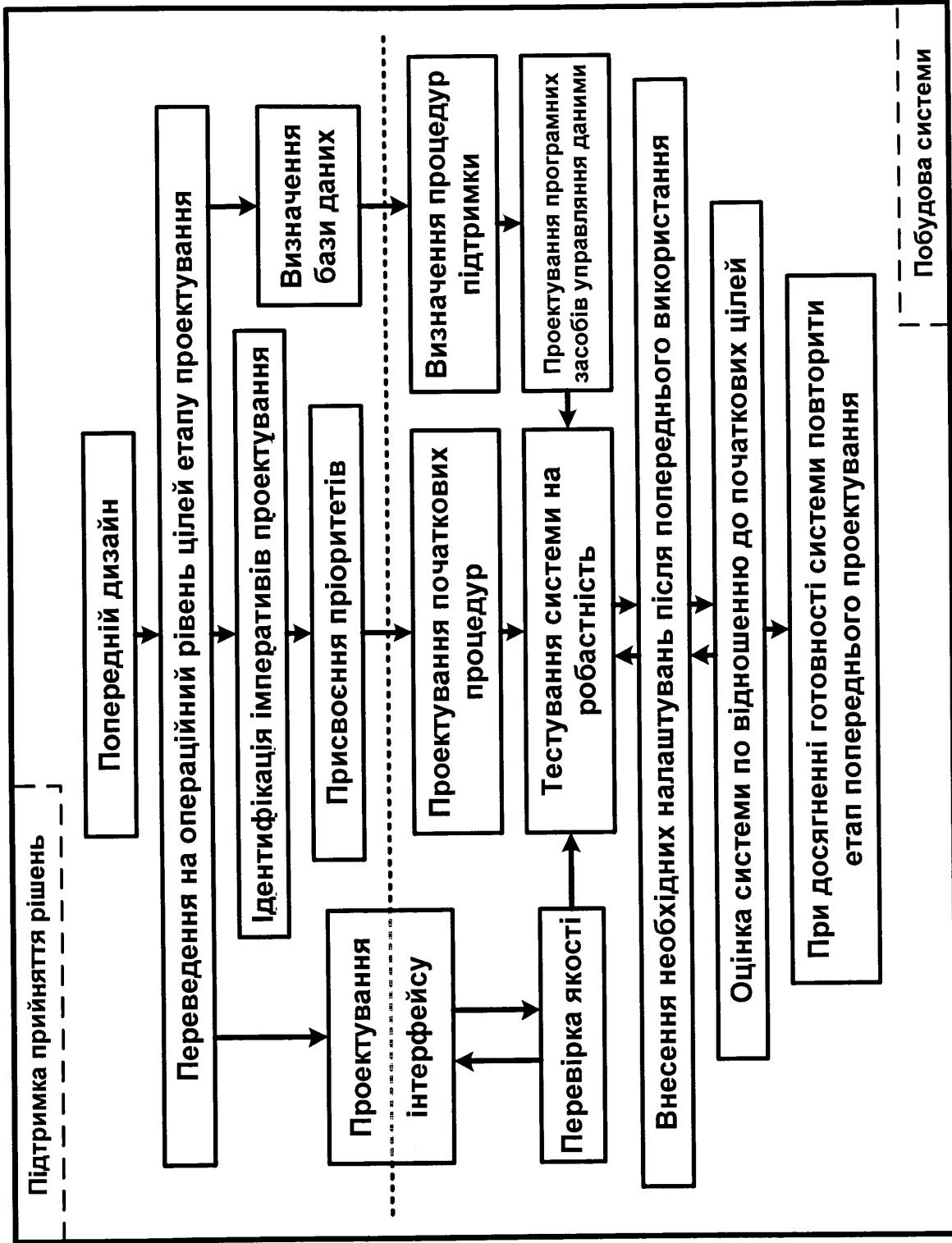


Рис. В.2. Етапи побудови СІПР

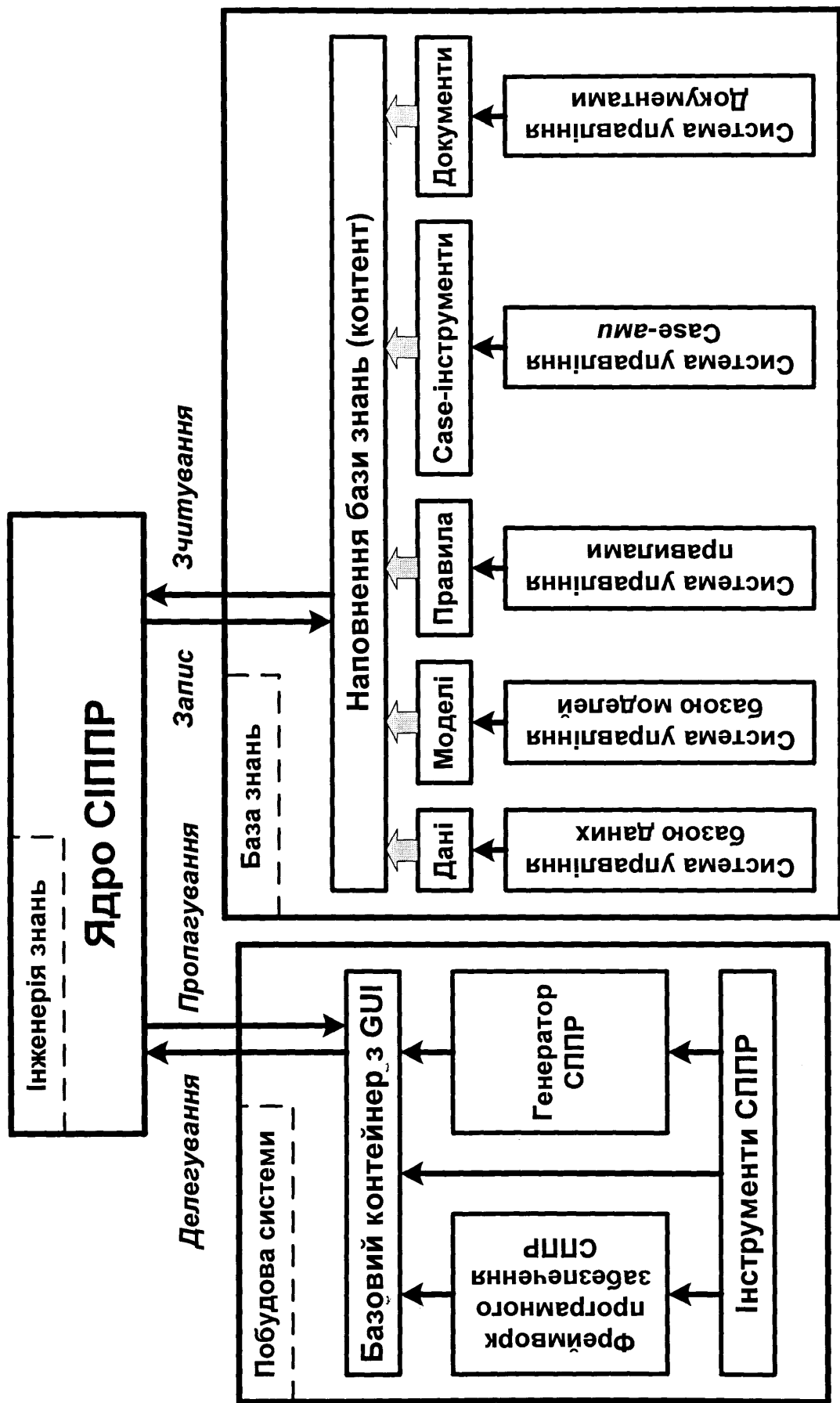


Рис. В.3. Функціональність основних складових СІПР

Додаток Д

База знань на основі нечітких правил, отриманих в результаті опитування експертів
предметної області «буріння свердловин»

RULE 1: IF (ROP IS L) AND (ROP.value.ut IS L) AND (BitLife IS L) AND (BitLife.value.ut IS L) THEN (WOB IS L) AND (RPM IS L)

RULE 2: IF (ROP IS H) AND (ROP.value.ut IS H) AND (BitLife IS H) AND (BitLife.value.ut IS M) THEN (WOB IS M) AND (RPM IS M)

RULE 3: IF (ROP IS H) AND (ROP.value.ut IS H) AND (BitLife IS H) AND (BitLife.value.ut IS L) THEN (WOB IS M) AND (RPM IS H)

RULE 4: IF (ROP IS H) AND (ROP.value.ut IS H) AND (BitLife IS M) AND (BitLife.value.ut IS H) THEN (WOB IS M) AND (RPM IS H)

RULE 5: IF (ROP IS H) AND (ROP.value.ut IS H) AND (BitLife IS M) AND (BitLife.value.ut IS M) THEN (WOB IS M) AND (RPM IS H)

RULE 6: IF (ROP IS H) AND (ROP.value.ut IS H) AND (BitLife IS M) AND (BitLife.value.ut IS L) THEN (WOB IS H) AND (RPM IS H)

RULE 7: IF (ROP IS H) AND (ROP.value.ut IS H) AND (BitLife IS L) AND (BitLife.value.ut IS H) THEN (WOB IS M) AND (RPM IS H)

RULE 8: IF (ROP IS H) AND (ROP.value.ut IS H) AND (BitLife IS L) AND (BitLife.value.ut IS M) THEN (WOB IS H) AND (RPM IS H)

RULE 9: IF (ROP IS H) AND (ROP.value.ut IS H) AND (BitLife IS L) AND (BitLife.value.ut IS L) THEN (WOB IS H) AND (RPM IS H)

RULE 10: IF (ROP IS H) AND (ROP.value.ut IS M) AND (BitLife IS H) AND (BitLife.value.ut IS H) THEN (WOB IS M) AND (RPM IS M)

RULE 11: IF (ROP IS H) AND (ROP.value.ut IS M) AND (BitLife IS H) AND (BitLife.value.ut IS M) THEN (WOB IS M) AND (RPM IS M)

RULE 12: IF (ROP IS H) AND (ROP.value.ut IS M) AND (BitLife IS H) AND (BitLife.value.ut IS L) THEN (WOB IS M) AND (RPM IS H)

RULE 13: IF (ROP IS H) AND (ROP.value.ut IS M) AND (BitLife IS M) AND (BitLife.value.ut IS H) THEN (WOB IS M) AND (RPM IS H)

RULE 14: IF (ROP IS H) AND (ROP.value.ut IS M) AND (BitLife IS M) AND (BitLife.value.ut IS M) THEN (WOB IS M) AND (RPM IS H)

RULE 15: IF (ROP IS H) AND (ROP.value.ut IS M) AND (BitLife IS M) AND (BitLife.value.ut IS L) THEN (WOB IS M) AND (RPM IS H)

RULE 16: IF (ROP IS H) AND (ROP.value.ut IS M) AND (BitLife IS L) AND (BitLife.value.ut IS H) THEN (WOB IS M) AND (RPM IS M)

RULE 17: IF (ROP IS H) AND (ROP.value.ut IS M) AND (BitLife IS L) AND (BitLife.value.ut IS M) THEN (WOB IS M) AND (RPM IS H)

RULE 18: IF (ROP IS H) AND (ROP.value.ut IS M) AND (BitLife IS L) AND (BitLife.value.ut IS L) THEN (WOB IS H) AND (RPM IS H)

RULE 19: IF (ROP IS H) AND (ROP.value.ut IS L) AND (BitLife IS H) AND (BitLife.value.ut IS H) THEN (WOB IS L) AND (RPM IS M)

RULE 20: IF (ROP IS H) AND (ROP.value.ut IS L) AND (BitLife IS H) AND (BitLife.value.ut IS M) THEN (WOB IS L) AND (RPM IS M)

RULE 21: IF (ROP IS H) AND (ROP.value.ut IS L) AND (BitLife IS H) AND (BitLife.value.ut IS L) THEN (WOB IS M) AND (RPM IS M)

RULE 22: IF (ROP IS H) AND (ROP.value.ut IS L) AND (BitLife IS M) AND (BitLife.value.ut IS H) THEN (WOB IS L) AND (RPM IS M)

RULE 23: IF (ROP IS H) AND (ROP.value.ut IS L) AND (BitLife IS M) AND (BitLife.value.ut IS M) THEN (WOB IS M) AND (RPM IS M)

RULE 24: IF (ROP IS H) AND (ROP.value.ut IS L) AND (BitLife IS M) AND (BitLife.value.ut IS L) THEN (WOB IS M) AND (RPM IS M)

RULE 25: IF (ROP IS H) AND (ROP.value.ut IS L) AND (BitLife IS L) AND (BitLife.value.ut IS H) THEN (WOB IS M) AND (RPM IS M)

RULE 26: IF (ROP IS H) AND (ROP.value.ut IS L) AND (BitLife IS L) AND (BitLife.value.ut IS M) THEN (WOB IS M) AND (RPM IS M)

RULE 27: IF (ROP IS H) AND (ROP.value.ut IS L) AND (BitLife IS L) AND (BitLife.value.ut IS L) THEN (WOB IS M) AND (RPM IS M)

RULE 28: IF (ROP IS M) AND (ROP.value.ut IS H) AND (BitLife IS H) AND (BitLife.value.ut IS H) THEN (WOB IS L) AND (RPM IS M)

RULE 29: IF (ROP IS M) AND (ROP.value.ut IS H) AND (BitLife IS H) AND (BitLife.value.ut IS M) THEN (WOB IS L) AND (RPM IS M)

RULE 30: IF (ROP IS M) AND (ROP.value.ut IS H) AND (BitLife IS H) AND (BitLife.value.ut IS L) THEN (WOB IS M) AND (RPM IS M)

RULE 31: IF (ROP IS M) AND (ROP.value.ut IS H) AND (BitLife IS M) AND (BitLife.value.ut IS H) THEN (WOB IS L) AND (RPM IS M)

RULE 32: IF (ROP IS M) AND (ROP.value.ut IS H) AND (BitLife IS M) AND (BitLife.value.ut IS M) THEN (WOB IS M) AND (RPM IS M)

RULE 33: IF (ROP IS M) AND (ROP.value.ut IS H) AND (BitLife IS M) AND (BitLife.value.ut IS L) THEN (WOB IS M) AND (RPM IS M)

RULE 34: IF (ROP IS M) AND (ROP.value.ut IS H) AND (BitLife IS L) AND (BitLife.value.ut IS H) THEN (WOB IS M) AND (RPM IS M)

RULE 35: IF (ROP IS M) AND (ROP.value.ut IS H) AND (BitLife IS L) AND (BitLife.value.ut IS M) THEN (WOB IS M) AND (RPM IS M)

RULE 36: IF (ROP IS M) AND (ROP.value.ut IS H) AND (BitLife IS L) AND (BitLife.value.ut IS L) THEN (WOB IS H) AND (RPM IS M)

RULE 37: IF (ROP IS M) AND (ROP.value.ut IS M) AND (BitLife IS H) AND (BitLife.value.ut IS H) THEN (WOB IS L) AND (RPM IS M)

RULE 38: IF (ROP IS M) AND (ROP.value.ut IS M) AND (BitLife IS H) AND (BitLife.value.ut IS M) THEN (WOB IS L) AND (RPM IS M)

RULE 39: IF (ROP IS M) AND (ROP.value.ut IS M) AND (BitLife IS H) AND (BitLife.value.ut IS L) THEN (WOB IS M) AND (RPM IS M)

RULE 40: IF (ROP IS M) AND (ROP.value.ut IS M) AND (BitLife IS M) AND (BitLife.value.ut IS H) THEN (WOB IS L) AND (RPM IS M)

RULE 41: IF (ROP IS M) AND (ROP.value.ut IS M) AND (BitLife IS M) AND (BitLife.value.ut IS M) THEN (WOB IS M) AND (RPM IS M)

RULE 42: IF (ROP IS M) AND (ROP.value.ut IS M) AND (BitLife IS M) AND (BitLife.value.ut IS L) THEN (WOB IS M) AND (RPM IS M)

RULE 43: IF (ROP IS M) AND (ROP.value.ut IS M) AND (BitLife IS L) AND (BitLife.value.ut IS H) THEN (WOB IS M) AND (RPM IS M)

RULE 44: IF (ROP IS M) AND (ROP.value.ut IS M) AND (BitLife IS L) AND (BitLife.value.ut IS M) THEN (WOB IS H) AND (RPM IS M)

RULE 45: IF (ROP IS M) AND (ROP.value.ut IS M) AND (BitLife IS L) AND (BitLife.value.ut IS L) THEN (WOB IS H) AND (RPM IS M)

RULE 46: IF (ROP IS M) AND (ROP.value.ut IS L) AND (BitLife IS H) AND (BitLife.value.ut IS H) THEN (WOB IS L) AND (RPM IS M)

RULE 47: IF (ROP IS M) AND (ROP.value.ut IS L) AND (BitLife IS H) AND (BitLife.value.ut IS M) THEN (WOB IS L) AND (RPM IS M)

RULE 48: IF (ROP IS M) AND (ROP.value.ut IS L) AND (BitLife IS H) AND (BitLife.value.ut IS L) THEN (WOB IS M) AND (RPM IS M)

RULE 49: IF (ROP IS M) AND (ROP.value.ut IS L) AND (BitLife IS M) AND (BitLife.value.ut IS H) THEN (WOB IS L) AND (RPM IS M)

RULE 50: IF (ROP IS M) AND (ROP.value.ut IS L) AND (BitLife IS M) AND (BitLife.value.ut IS M) THEN (WOB IS L) AND (RPM IS M)

RULE 51: IF (ROP IS M) AND (ROP.value.ut IS L) AND (BitLife IS M) AND (BitLife.value.ut IS L) THEN (WOB IS M) AND (RPM IS M)

RULE 52: IF (ROP IS M) AND (ROP.value.ut IS L) AND (BitLife IS L) AND (BitLife.value.ut IS H) THEN (WOB IS M) AND (RPM IS M)

RULE 53: IF (ROP IS M) AND (ROP.value.ut IS L) AND (BitLife IS L) AND (BitLife.value.ut IS M) THEN (WOB IS M) AND (RPM IS M)

RULE 54: IF (ROP IS M) AND (ROP.value.ut IS L) AND (BitLife IS L) AND (BitLife.value.ut IS L) THEN (WOB IS M) AND (RPM IS M)

RULE 55: IF (ROP IS L) AND (ROP.value.ut IS H) AND (BitLife IS H) AND (BitLife.value.ut IS H) THEN (WOB IS L) AND (RPM IS L)

RULE 56: IF (ROP IS L) AND (ROP.value.ut IS H) AND (BitLife IS H) AND (BitLife.value.ut IS M) THEN (WOB IS L) AND (RPM IS L)

RULE 57: IF (ROP IS L) AND (ROP.value.ut IS H) AND (BitLife IS H) AND (BitLife.value.ut IS L) THEN (WOB IS M) AND (RPM IS L)

RULE 58: IF (ROP IS L) AND (ROP.value.ut IS H) AND (BitLife IS M) AND (BitLife.value.ut IS H) THEN (WOB IS L) AND (RPM IS L)

RULE 59: IF (ROP IS L) AND (ROP.value.ut IS H) AND (BitLife IS M) AND (BitLife.value.ut IS M) THEN (WOB IS L) AND (RPM IS L)

RULE 60: IF (ROP IS L) AND (ROP.value.ut IS H) AND (BitLife IS M) AND (BitLife.value.ut IS L) THEN (WOB IS M) AND (RPM IS L)

- RULE 61:** IF (ROP IS L) AND (ROP.value.ut IS H) AND (BitLife IS L) AND (BitLife.value.ut IS H) THEN (WOB IS L) AND (RPM IS L)
- RULE 62:** IF (ROP IS L) AND (ROP.value.ut IS H) AND (BitLife IS L) AND (BitLife.value.ut IS M) THEN (WOB IS M) AND (RPM IS L)
- RULE 63:** IF (ROP IS L) AND (ROP.value.ut IS H) AND (BitLife IS L) AND (BitLife.value.ut IS L) THEN (WOB IS M) AND (RPM IS L)
- RULE 64:** IF (ROP IS L) AND (ROP.value.ut IS M) AND (BitLife IS H) AND (BitLife.value.ut IS H) THEN (WOB IS L) AND (RPM IS L)
- RULE 65:** IF (ROP IS L) AND (ROP.value.ut IS M) AND (BitLife IS H) AND (BitLife.value.ut IS M) THEN (WOB IS L) AND (RPM IS L)
- RULE 66:** IF (ROP IS L) AND (ROP.value.ut IS M) AND (BitLife IS H) AND (BitLife.value.ut IS L) THEN (WOB IS L) AND (RPM IS M)
- RULE 67:** IF (ROP IS L) AND (ROP.value.ut IS M) AND (BitLife IS M) AND (BitLife.value.ut IS H) THEN (WOB IS L) AND (RPM IS L)
- RULE 68:** IF (ROP IS L) AND (ROP.value.ut IS M) AND (BitLife IS M) AND (BitLife.value.ut IS M) THEN (WOB IS L) AND (RPM IS M)
- RULE 69:** IF (ROP IS L) AND (ROP.value.ut IS M) AND (BitLife IS M) AND (BitLife.value.ut IS L) THEN (WOB IS M) AND (RPM IS M)
- RULE 70:** IF (ROP IS L) AND (ROP.value.ut IS M) AND (BitLife IS L) AND (BitLife.value.ut IS H) THEN (WOB IS M) AND (RPM IS M)
- RULE 71:** IF (ROP IS L) AND (ROP.value.ut IS M) AND (BitLife IS L) AND (BitLife.value.ut IS M) THEN (WOB IS M) AND (RPM IS M)
- RULE 72:** IF (ROP IS L) AND (ROP.value.ut IS M) AND (BitLife IS L) AND (BitLife.value.ut IS L) THEN (WOB IS M) AND (RPM IS M)
- RULE 73:** IF (ROP IS L) AND (ROP.value.ut IS L) AND (BitLife IS H) AND (BitLife.value.ut IS H) THEN (WOB IS L) AND (RPM IS L)
- RULE 74:** IF (ROP IS L) AND (ROP.value.ut IS L) AND (BitLife IS H) AND (BitLife.value.ut IS M) THEN (WOB IS L) AND (RPM IS L)
- RULE 75:** IF (ROP IS L) AND (ROP.value.ut IS L) AND (BitLife IS H) AND (BitLife.value.ut IS L) THEN (WOB IS M) AND (RPM IS L)
- RULE 76:** IF (ROP IS L) AND (ROP.value.ut IS L) AND (BitLife IS M) AND (BitLife.value.ut IS H) THEN (WOB IS L) AND (RPM IS L)
- RULE 77:** IF (ROP IS L) AND (ROP.value.ut IS L) AND (BitLife IS M) AND (BitLife.value.ut IS M) THEN (WOB IS L) AND (RPM IS L)
- RULE 78:** IF (ROP IS L) AND (ROP.value.ut IS L) AND (BitLife IS M) AND (BitLife.value.ut IS L) THEN (WOB IS M) AND (RPM IS L)
- RULE 79:** IF (ROP IS L) AND (ROP.value.ut IS L) AND (BitLife IS L) AND (BitLife.value.ut IS H) THEN (WOB IS H) AND (RPM IS L)
- RULE 80:** IF (ROP IS L) AND (ROP.value.ut IS L) AND (BitLife IS L) AND (BitLife.value.ut IS M) THEN (WOB IS M) AND (RPM IS L)
- RULE 81:** IF (ROP IS L) AND (ROP.value.ut IS L) AND (BitLife IS L) AND (BitLife.value.ut IS L) THEN (WOB IS H) AND (RPM IS L)

Оцінювання і налаштування нечіткої системи

Для оцінки спроектованої бази знань згенеруємо за допомогою інструменту Fuzzy Logic Toolbox поверхні (рис.Д.1-Д.2), що дозволить виконати візуальний аналіз продуктивності спроектованої системи.

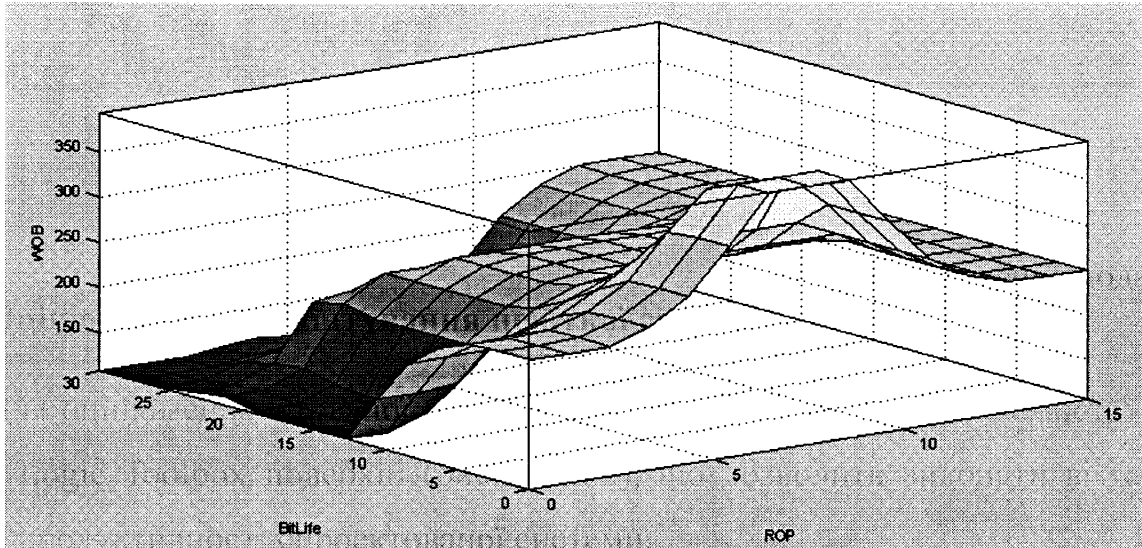


Рис. Д.1. Залежність між механічною швидкістю буріння (ROP), терміном служби бурового долота (BitLife) та осьовим зусиллям на долото (WOB)

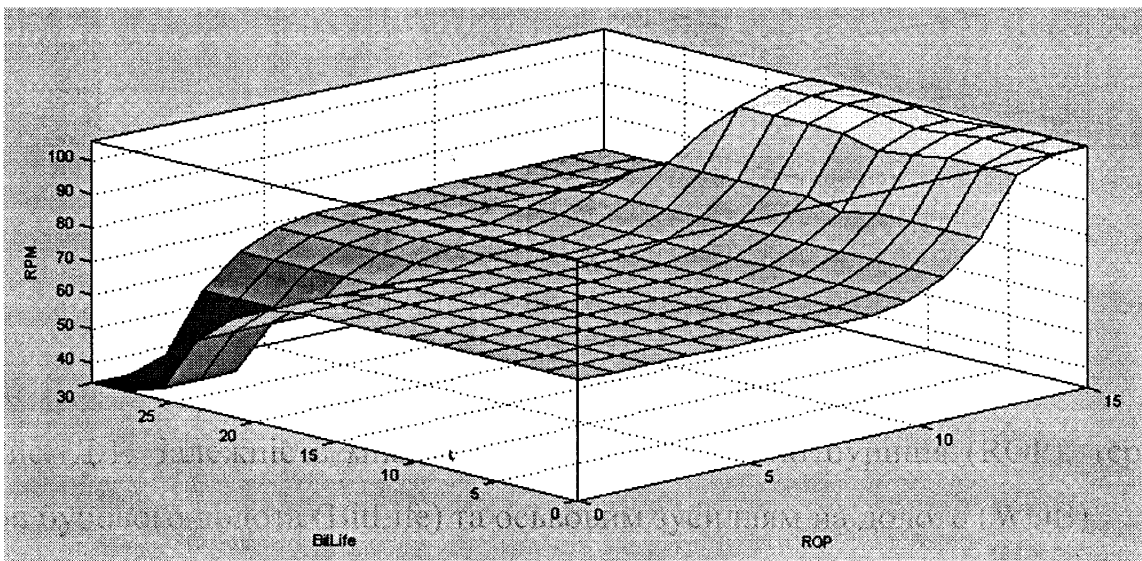


Рис. Д.2. Залежність між механічною швидкістю буріння (ROP), терміном служби бурового долота (BitLife) та швидкістю обертання бурового долота (WOB).

На рис. Д.3 представлено результати тестування спроектованої нечіткої системи з використанням фактичних даних.

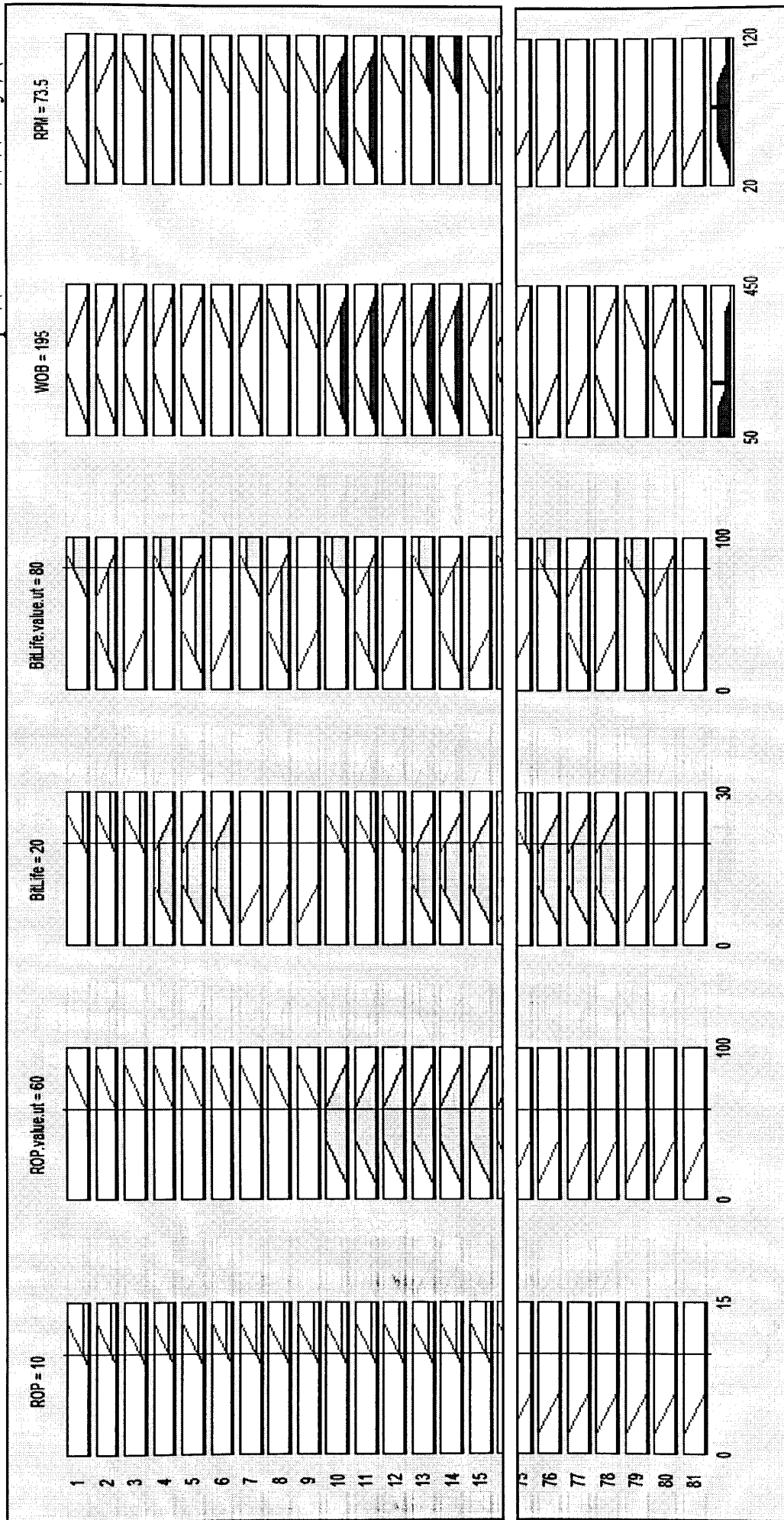


Рис. Д.3. Результати тестування спроектованої системи з використанням фактичних даних

гравень 2006 року														
№	класифікація	кількість	розмір	розмір	розмір	розмір	розмір	розмір	розмір	розмір	розмір	розмір	розмір	розмір
№	класифікація	кількість	розмір	розмір	розмір	розмір	розмір	розмір	розмір	розмір	розмір	розмір	розмір	розмір
22	1 295.3 АUL-LS21Т(С-ГАУ)R-403 (6У)	1845	2161	316	87.45	3,60	4:35	5:40	1:15	18	70	28	70	70
23	6 295.3 МСЦ-ГАУ (АUL-KLS13ТG)R-15.9;18;20.6	2161	2302	141	50:55	2,77	0:55	2:35	0:30	20	60	28	27	32
24	9 Геофізичні дослідження				12:00									
25	9 Роботи по кріпленню				204:05									
26	18 215.9 V-QN21Т(С-ГВ)R-192	1081	1137		6:10	2,05	2:05	8:45	0:05					
27	18 Роботи по кріпленню				1:50									
28	19 215.9 V-QN21Т(С-ГВ)R-192	1137	1151		1:00	2,05	2:05	8:45	0:05					
29	19 Роботи по кріпленню				7:00									
30	19 215.9 V-QN21Т(С-ГВ)R-192	2278	2302		2:00	2,05	2:05	8:45	0:05					
31	19 Роботи по кріпленню				4:30									
32	19 215.9 V-QN21Т(С-ГВ)R-192	15:18	2302	2306	4	1,00	4,00	2,05	8:45	0:05	5	80	22	25
33	19 Опресування цементного кільця				0:30									
34	19 215.9 V-QN21Т(С-ГВ)R-192	2306	2312	6	2:45	2,18	2,05	8:45	0:05					
35	22 215.9 V-QN21Т(С-ГВ)R-192	18:20	2312	2485	173	57:40	3,00	2:50	5:45	0:13	18	60	22	35
36	26 215.9 АUL-KLS13ТG(МСЦ-ГАУ)R-442	2485	2693	208	100:45	2,06	1:35	5:45	0:12					
червень 2006 року														
37	1 215.9 АUL-KLS13ТG(МСЦ-ГАУ)R-2x14.3;15.9	2693	2839	146	30:50	4,74	6:40	6:20	0:10	18	85	22	27	55
38	3 Геофізичні дослідження				9:00									
39	3 215.9 С3ГАУ (6У)	12.3;15;13.5	2839	2892	53	41:40	1,27	2:50	7:40	0:10	18	90	24	25
40	6 215.9 VQ-N54X(С3-ГВ) R-162	15,18	2892	2907	15	13:30	1,11	2:30	3:05	0:05	17	95	22	32
41	7 215.9 НУТ547GL (6У)	18;15x2	2907	3003	96	42:20	2,27	2:00	12:00	0:05	18	85	24	25
42	10 215.9 М3-ГАУ(АUL-LS43Z)R-440	14.3;15.9;19	3003	3080	77	42:10	1,83	1:35	9:15	0:10	18	90	24	25
43	12 215.9 АUL-KLS13ТG(МСЦ-ГАУ)R-розширка							2:20	8:30	0:10	18	90	22	21
44	12 215.9 АUL-KLS13ТG(МСЦ-ГАУ)R-442 (6У)	3080	3129	49	38:20	1,28	2:20	8:30	0:10					
45	15 215.9 АUL-LS43X(М3-ГАУ)R-233	14.3;15.9;19	3129	3150	21	16:45	1,25	2:10	6:45	0:10	16	90	24	20
46	16 215.9 АUL-KLS13ТG(МСЦ-ГАУ)R-2x14.3;15.9	3150	3200	50	36:10	1,38	2:15	3:35	0:05	18	90	24	25	45
47	18 215.9 АUL-KLS13ТG(МСЦ-ГАУ)R-442 (6У)	3200	3233	33	22:30	1,47	5:00	9:40	0:10					
48	20 Геофізичні дослідження				20:00									
49	21 215.9 АUL-KLS13ТG(МСЦ-ГАУ)R-442 (6У)	3233	3295	62	46:55	1,32	1:55	9:20	0:20	18	100	24	20	50
50	24 215.9 АUL-LS43X(М3-ГАУ)R-233	14.3;15.9;19	3295	3365	70	51:40	1,35	4:05	8:20	0:15	16	100	24	23
51	27 215.9 АUL-LS43X(М3-ГАУ)R-233 (6У)	3365	3461	96	36:45	2,61	2:20	10:20	0:20					
52	29 215.9 АUL-LS43X(М3-ГАУ)R-439L	3461	3495	34	22:35	1,51	2:50	9:10	0:20					
липень 2006 року														
53	1 Геофізичні дослідження				11:00									
54	2 215.9 АUL-LS43X(М3-ГАУ)R-439L	3495	3527	32	37:00	0,86	7:35	17:40	0:10	18	100	24	25	50
55	5 215.9 VQ-N54X(С3-ГВ) R-162	15,18	3527	3558	31	24:05	1,29	3:35	8:30	0:10	13	100	22	23
56	7 215.9 АUL-LS43X(М3-ГАУ)R-439L	3558	3586	28	28:35	0,98	1:40	4:10	0:05	16	110	24	23	50
57	9 215.9 АUL-LS43X(М3-ГАУ)R-439L (6У)	3586	3627	41	38:10	1,07	1:05	13:45	0:05					

**ВАТ "Укрнафта"
Охтирське УБР**

**Карточка роботи доліт в свердловині № 524 Бугруватівська
/за період з січня по лютий 2008 року/**

Обладнання:

Площа **Бугруватівська**
Проектна глибина свердловини **м**
Спосіб буріння **Суміщений**

Тип бурової установки **3E-76**
Вишка **ВБ-53х320М**
Насоси **електричний**
Привід лебідки **електричний**
Привід насосів

Назва	Проектна		Фактична	
	Д	Гл.спуску		Д
Направлення	426	90		
Кондуктор	324	1110		
Перша проміжна	245	2312		
Експлуатаційна	148/168	4012		

№	Дата	Типорозмір	Розмір і кількість насадок	Інтервал		Робота доліт				Режим буріння				Число обертів ротора в хвилину або тип типу бурова	Компоновка низу колонни	Параметри				Відробка долота		
				до	від	Проходка (м)	Час мех. бур (год)	Мех. швид. м/год	Промивка	Час сплида	Час нарощування і зміни долота	Навантаження	Тиск на столу			Продуктивність насосів	Момент на роторі	Літома вага (т/см)	В'язкість (сМ)	Водовіддача (сМ/хв)	озброєння, мм	всього люфт, мм
1	27	490 СІВ (6/у)			95	95	11:00	8:64	1:00	0:20	0:20	10	32	20		1,18	40	7	18/54			
2	27	Роботи по крипленню					22:00															
3	28	393.7 VU-KL11T (МЦ-ГВУ) R-370 (6/у)			95	115	2:00	10:00	1:30	1:00	0:13											
4	1	393.7 VU-KL11T (МЦ-ГВУ) R-370 (6/у)			115	232	10:30	11,14	2:50	0:40	0:05	18	20	33	20	1,17	40	7	57/85			
5	2	393.7 VU-KL11T (МЦ-ГВУ) R-370 (6/у)			232	330	8:30	11,53	1:30	1:05	0:07											
6	3	295.3 V-11 0061 (М-ГВ) D-61	17,5х3		330	465	13:5	16,10	8:35	2:35	0:30	4	50	33	22							
7	5	295.3 V-11 0061 (М-ГВ) D-61 (6/у)			465	495	3:10	9,47	2:10	1:25	0:05	18	30	33	24							
8	5	295.3 V-11 0061 (М-ГВ) D-61 (6/у)			495	520	2:30	10,00	1:40	1:45	0:05											
9	6	295.3 V-13 (МС-ГВ) 0062			520	608	9:55	8,87	0:20	1:15	0:02	18	40	33	24	1,24	22	7	12/28			
10	7	295.3 V-13 (МС-ГВ) 0062 (6/у)			608	657	10:30	4,67	1:10	2:10	0:03											
11	8	295.3 V-13 (МС-ГВ) 0062 (6/у)			657	750	22:00	4,23	2:50	2:05	0:05											
12	10	Геофізичні дослідження					2:30															
13	10	295.3 V-13 (МС-ГВ) 0062	17,5х3		750	884	15:40	8,55	1:50	2:05	0:05	18	50	33	28							
14	11	Геофізичні дослідження					2:30															
15	11	295.3 V-13 (МС-ГВ) 0062 (6/у)			884	970	12:50	6,70	2:00	2:15	0:05											
16	12	Геофізичні дослідження					3:00															
17	12	295.3 V-13 (МС-ГВ) 0062			970	1120	15:00	4,50	0:40	2:30	0:07	20	60	33	30							
18	14	5PШ 393.7 МС	розширка					0:30	1:00	0:08												
19	16	5PШ 393.7 МС (6/у)	розширка					0:40	0:40	0:02												
20	17	5PШ 393.7 МС (6/у)	розширка					0:55	1:35													
21	18	5PШ 393.7 МС (6/у)	розширка					1:45	2:55	0:03												
22	21	5PШ 393.7 МС (6/у)	розширка					2:25	1:00	0:02												
23	22	Геофізичні дослідження					12:00															
24	22	Роботи по крипленню					88:00															
25	26	295.3 V-13 (МС-ГВ) 0062	проборка					1:00	3:15	0:03												
26	26	295.3 МХЛ - 3 (6/у)	2х10,2х13		1120	1320	200	4:20	2:35	1:20	0:02	22	80	33	23	1,2	28	6	21/45			
27	29	295.3 МХЛ - 3 (6/у)			1320	1450	130	31:40	4:11	6:10	0:03											

28	1	295.3 МХL - 3 (6у)	10x2:13x2	1450	1600	150	35:00	4:29	2:30	8:15	0:03	22	90	33	26	60	ОБТ 229-9м + КПС-295.3-1м + ОБТ 229-9м + КПС-295.3-1м + ОБТ 229-29м + ОБТ 203-103м	1,2	23	6	16/55				
29	2	295.3 V-13 (МС-ГВ) 0062	3x17,5	1600	1772	172	17:10	10:02	4:20	4:20	0:05	20	70	33	25	60									
30	4	Георізичні дослідження					9:00																		
31	4	295.3 V-13 (МС-ГВ) 0062	3x17,5	1772	1870	98	28:10	3:48	1:40	3:55	0:05	20	90	33	24	60					B2	П2	Д5		
32	6	295.3 МХL - 3	14x2:11x2	1870	2319	449	97:50	4:59	5:30	5:10	0:05	24	90	33	28	60	ОБТ 229-9м + КПС-295.3-1м + ОБТ 229-29м + ОБТ 203-103м	1,18	26	5,5	16/35	B2	Д2		
33	11	Георізичні дослідження					11:00																		
34	11	Роботи по крипленню					210:45																		
35	20	215.9 V-QN21T(C-ГВ)R-192	18,2	2319	2322	3	0:50	3:60	5:30	1:15	0:02	8	65	20	35	60	ОБТ 178-174м	1,18	35	6	24/58				
36	20	Роботи по крипленню					0:30																		
37	22	215.9 V-QN21T(C-ГВ)R-192 (6у)		2322	2337	15	4:45	3:16	1:30	4:15	0:03	18	70	20	28	60					B3	П3			
38	23	215.9 V-QN21T(C-ГВ)R-192	18,2	2337	2442	105	31:10	3:37	2:10	5:55	0:05	18	70	20	27	60	ШМУ-1,2м + ОБТ 178-9м + КПС-215.3-1м + ОБТ 178-183м					B1	П3К2		
39	25	215.9 V-QN21T(C-ГВ)R-192	18,2	2442	2511	69	33:50	2:04	2:20	6:40	0:10	18	80	22	35	60					62/80				
40	28	215.9 АUL-LS43X(M3-ГAУ)R-233	14,3:15,9:18	2511	2535	24	24:10	0:99	4:15	16:10	0:12	16	95	20	35	70					B2(30)	П1			
41	29	215.9 АUL-LS43X(M3-ГAУ)R-233	14,3:15,9:18	2535	2570	35	25:20	1:38	0:20	3:30	0:10	17	95	20	40	70	ШМУ-1,2м + КПС-215.3-1,2м + ОБТ 178-9м + КПС-215.3-1м + ОБТ 178-168м + ОБТ 114-112м	1,14	55	6,5	70/114				
гравень 2007 року																									
42	1	215.9 АUL-LS43X(M3-ГAУ)R-233	14,3:15,9:18	2570	2778	208	40:40	5:11	2:50	7:40	0:10	18	95	22	35	60	ШМУ-1м + КПС-215.3-1м + ОБТ 178-9м + КПС-215.3-1м + ОБТ 178-165м + ОБТ 114-112м	1,16	55	6	65/85	B2C60	П1		
43	3	Георізичні дослідження					9:30																		
44	3	215.9 С34LRGSP	3x14,3	2778	2833	55	36:40	1:50	2:20	3:40	0:05	20	95	20	30	45									
45	5	215.9 С34LRGSP (6у)		2833	2936	103	77:10	1:33	2:20	8:05							Роторний				42	5,5	30/66	В1С10	П0
46	10	215.9 С34LRGSP (6у)		2936	2983	47	32:50	1:43	3:30	11:35	0:03						Роторний				60	6	29/64		
47	12	215.9 С34LRGSP (6у)		2983	3020	37	37:45	0:98	2:55	6:00	0:05						Роторний							B2C20	П3
48	14	215.9 VQ - N54X(C3-ГВ) R-162	15,18	3020	3066	46	24:10	1:90	2:40	3:05	0:02	18	100	20	30	70							B1	П3	
49	17	215.9 EBXS 20 S	11,11x3	3066	3272	206	123:10	1:67	10:30	11:30	0:03	18	110	20	30	40	КПС-215.3-1,2м + ОБТ 178-185м + ОБТ 114-112м							B0	П0
50	24	Георізичні дослідження					14:00																		
51	25	215.9 EBXS 20 S (6у)		3272	3396	124	65:20	1:90	3:50	6:05	0:02	20	90	20	35	40	78-9м + КПС-215.3-1,2м + ОБТ 178-165м + ОБТ 114-112м	1,18	55	6	38/69	B0	П0		
52	29	215.9 EBXS 20 S (6у)		3396	3407	11	7:00	1:57		6:20	0:13						Роторний								
53	30	215.9 VQ - N54X(C3-ГВ) R-162	15,18	3407	3415	8	16:25	0:49	3:45	7:35	0:15	18	90	20	35	40	78-9м + КПС-215.3-1,2м + ОБТ 178-165м + ОБТ 114-112м	1,18	50	7	65/95			П3	
червень 2007 року																									
54	1	215.9 EBXS 20 S (6у)	3x15,9	3415	3506	91	77:35	1:17	4:15	8:35	0:05	20	90	20	35	40									
55	6	215.9 EBXS 20 S (6у)		3506	3552	46	38:30	1:19	3:25	14:10	0:10						Роторний								
56	8	215.9 VQ - N54X(C3-ГВ) R-162	18,2	3552	3569	17	19:00	0:89	2:40	9:10	0:15	17	75	20	30	40									
57	10	215.9 С34LRGSP	3x14,3	3569	3599	30	24:40	1:22	7:20	9:25	0:12	18	90	20	32	40									
58	12	Георізичні дослідження					15:00																		
59	13	215.9 С34LRGSP (6у)		3599	3635	36	45:20	0:79	2:50	8:25	0:08						Роторний								
60	16	215.9 VQ - N54X(C3-ГВ) R-162	15,18	3635	3648	13	15:10	0:86	3:40	8:35	0:07	17	100	20	35	70									
61	18	215.9 С34LRGSP	3x14,3	3648	3779	131	150:50	0:87	5:30	9:35	0:08	18	110	20	38	40									
62	26	215.9 VQ - N54X(C3-ГВ) R-162	15,18	3779	3791	12	12:40	0:95	2:30	10:10	0:07	17	90	20	32	40									
63	27	215.9 НУТ547GL	18:20:22:	3791	3877	86	48:20	1:78	8:20	9:30	0:08	20	100	20	35	40									
64	30	Георізичні дослідження					19:00																		
липень 2007 року																									
65	1	Георізичні дослідження					8:00																		
66	3	Роботи по крипленню					66:00																		
67	6	215.9 НУТ547GL (6у)		3877	3888	11	3:00	3:67	5:05	26:35	0:02						Роторний								
68	6	Роботи по крипленню					533:25																		

Буріння закінчено 29.07.07 р. в 9:00

№	Назва	3686	3719	33	21:40	1:52	5:30	8:25	0:08	19	100	18	45	60				В1	П1
70	24 215.9 МХЛ-20 (б/у)																		
71	26 Геофізичні дослідження				22:00														
72	27 215.9 МХЛ-20 (б/у)	3719	3759	40	22:05	1:81	2:35	8:40	0:02										
73	29 215.9 МХЛ-20 (б/у)	3763	3785	22	34:50	0:63	2:05	7:50											
74	30 215.9 МХЛ-20 (б/у)	3785	3800	15	31:40	0:47	0:30	2:45	0:03										
липень 2007 року																			
75	1 215.9 МХЛ-20 (б/у)	3800	3875	75	37:10	2:02	3:30	8:30	0:03	19	105	18	42	60					
76	3 Геофізичні дослідження				4:00														
77	3 215.9 АУЛ-LS43X(M3-ГЛУ)R-233	3875	3911	36	10:45	3:35	5:05	10:05	0:05	16	115	20	42	60					
78	5 212.7/80 ТК3	3911	3916	5	10:00	0:50	2:40	9:55	0:05	10	90	17	42	50					
79	6 212.7/80 ТК3	3916	3921	5	8:00	0:62	0:50	9:50	0:05										
80	7 215.9 VQ - N54X(C3-ГВ) R-162	3921	3944	23	14:40	1:57	1:35	4:30	0:02	17	95	18	45	60					
81	8 215.9 VQ - N54X(C3-ГВ) R-162 (б/у)	3944	3950	6	6:00	1:00	1:10	7:30	0:05										
82	9 215.9 МХЛ-20 (б/у)	3950	4012	62	34:05	1:82	11:15	15:00	0:08	19	115	20	43	60					
83	12 Геофізичні дослідження				21:00														
84	13 215.9 V-QN21T(C-ГВ)R-192	4012	4013	1	0:30	2:00	3:55	4:25	0:02	18	105	19	42	60					
85	16 215.9 V-QN21T(C-ГВ)R-192 (б/у)	4013	4015	2	0:40	3:00	1:00	9:55	0:05	16	110	20	43	60					
86	17 215.9 АУЛ-LS43X(M3-ГЛУ)R-233	4015	4025	10	7:00	1:43	2:25	4:40	0:05	16	110	18	48	60					
87	18 Роботи по крипленню				546:10														
травень 2007 року																			
88	1 Роботи по крипленню				256:30														
Буріння закінчено 12.06.07 р. в 8:00																			

Додаток Ж

Функціональність створеної системи інтелектуальної підтримки прийняття рішень при виборі оптимальних режимних параметрів процесу буріння

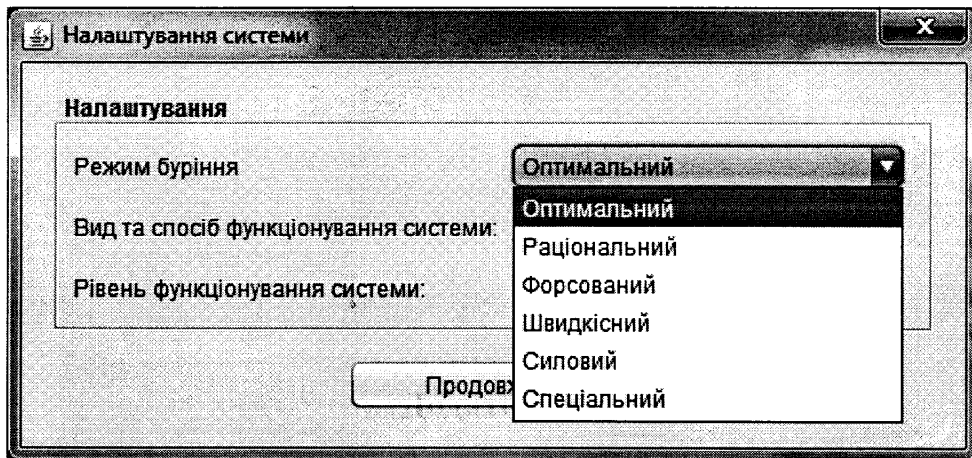


Рис. Ж.1. Ініціалізація системи. Вибір режиму буріння

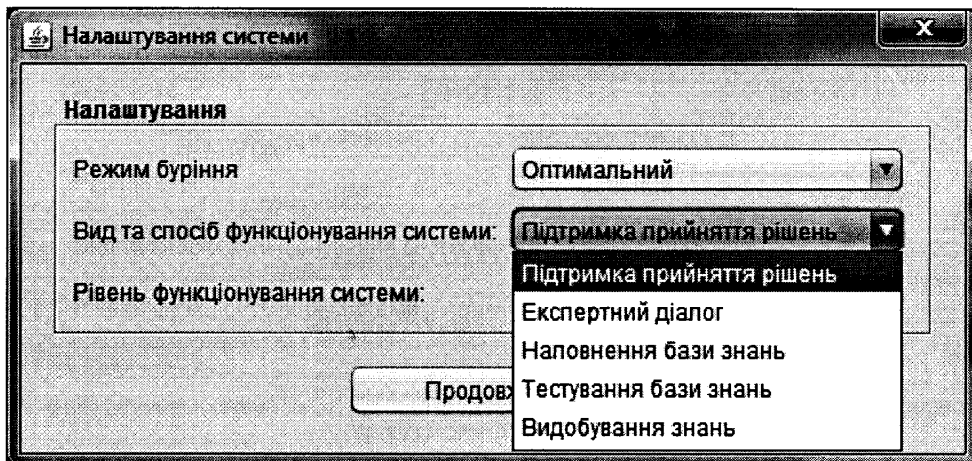


Рис. Ж.2. Ініціалізація системи. Вибір способу функціонування

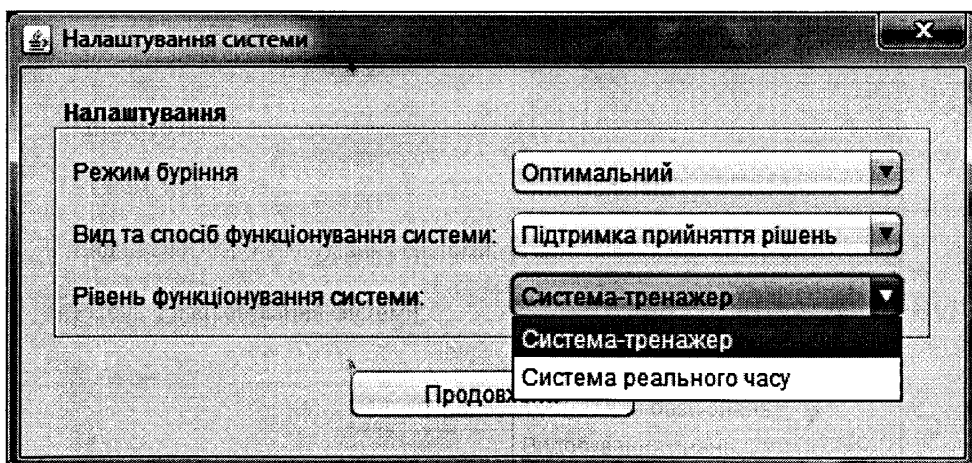


Рис. Ж.3. Ініціалізація системи. Вибір рівня функціонування

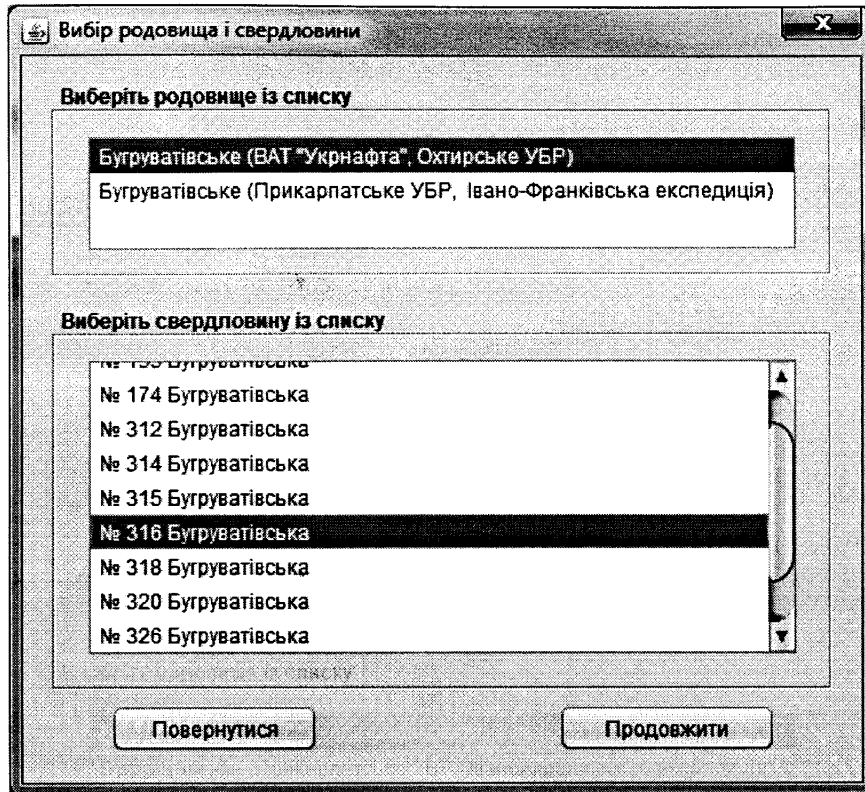


Рис. Ж.4. Вибір родовища та свердловини

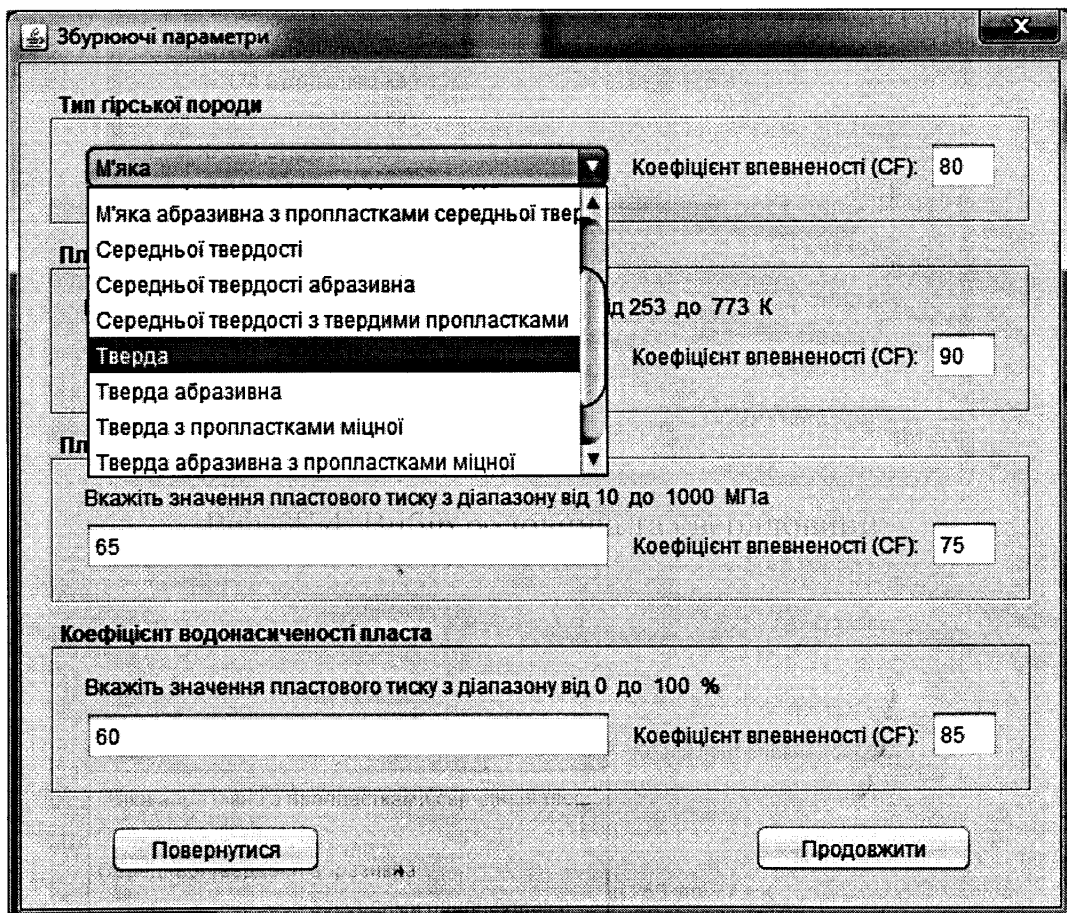


Рис. Ж.5. Встановлення значень збурюючим параметрам. Вибір типу гірської породи

Збурюючі параметри

Тип гірської породи
Тверда Коефіцієнт впевненості (CF): 80

Пластова температура
Вкажіть значення температури пласта з діапазону від 253 до 773 К
300 Коефіцієнт впевненості (CF): 90

Пластовий тиск
Вкажіть значення пластового тиску з діапазону від 10 до 1000 МПа
65 Коефіцієнт впевненості (CF): 75

Коефіцієнт водонасиченості пласта
Вкажіть значення пластового тиску з діапазону від 0 до 100 %
20 Коефіцієнт впевненості (CF): 85

Повернутися Продовжити

Рис. Ж.6. Встановлення значень збурюючим параметрам

Схожі родовища і свердловини

Список схожих родовищ

- Бугруватівське (ВАТ "Укрнафта", Охтирське УБР)
- Бугруватівське (Прикарпатське УБР, Івано-Франківська експедиція)

Список схожих свердловин

- № 155 Бугруватівська
- № 174 Бугруватівська
- № 336 Бугруватівська

Повернутися Продовжити

Рис. Ж.7. Статистика по схожих родовищах та свердловинах

Некеровані параметри

Діаметр бурового долота

Вкажіть діаметр бурового долота з діапазону від 75 до 490 мм

214 мм

Кількість шарошок в долоті

Три

Одна

Дві

Три

Чотири

Шість

Багат шарошкове

В'язкість промивної рідини

Вкажіть в'язкість промивної рідини з діапазону від 5 до 35 Па/с

15 $\times 10^3$ Па/с

Повернутися Продовжити

Рис. Ж.8. Встановлення значень некерованим параметрам. Вибір кількості шарошок в долоті

Некеровані параметри

Діаметр бурового долота

Вкажіть діаметр бурового долота з діапазону від 75 до 490 мм

214 мм

Кількість шарошок в долоті

Три

Густина промивної рідини

Вкажіть густину промивної рідини з діапазону від 1000 до 1500 кг/м^3

1250 кг/м^3

В'язкість промивної рідини

Вкажіть в'язкість промивної рідини з діапазону від 5 до 35 Па/с

15 $\times 10^3$ Па/с

Повернутися Продовжити

Рис. Ж.9. Встановлення значень некерованим параметрам.

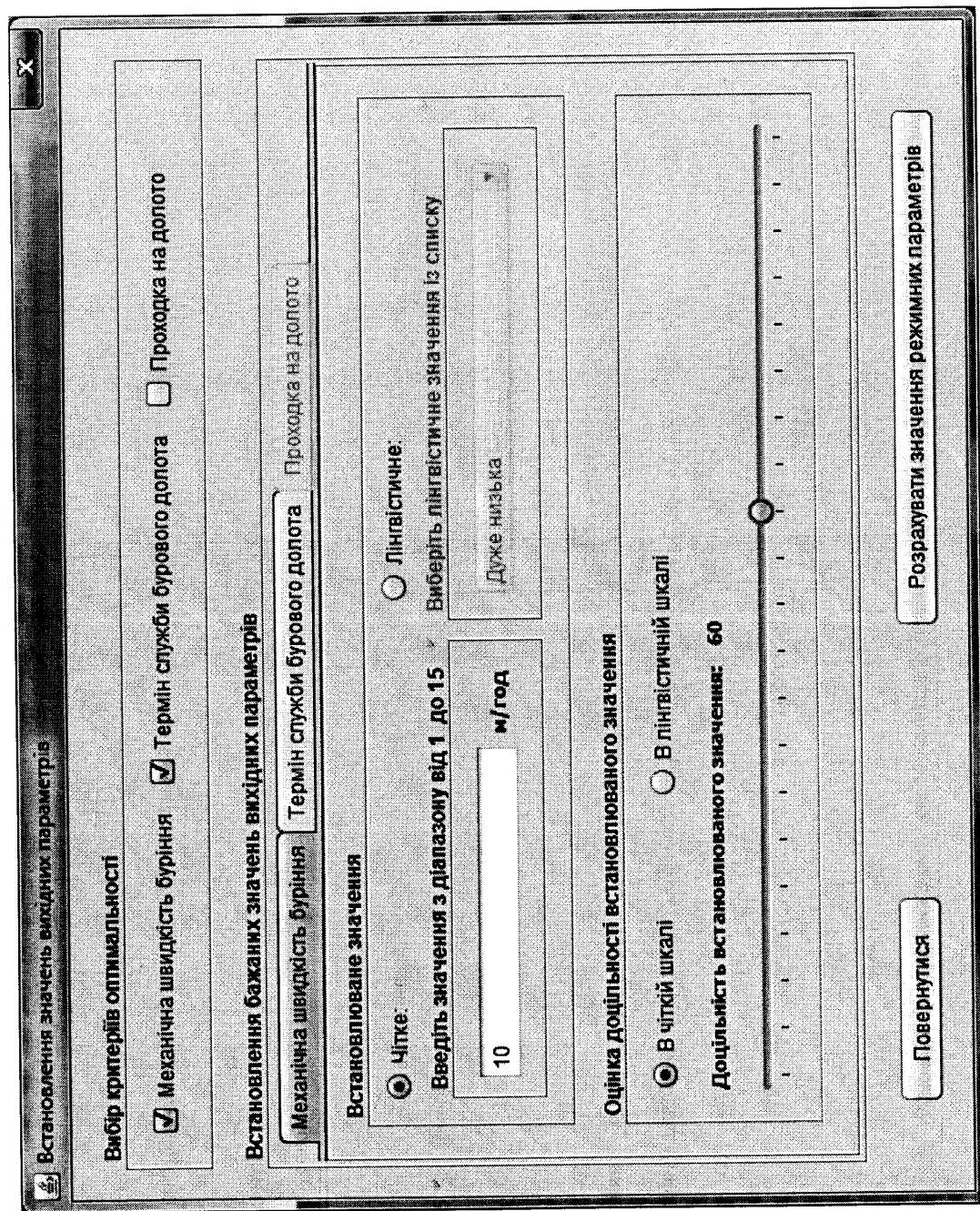


Рис. Ж.10. Встановлення бажаних чітких значень вихідних параметрів та оцінок доцільності встановлюваних значень з чіткої шкали для параметру «Механічна швидкість буріння»

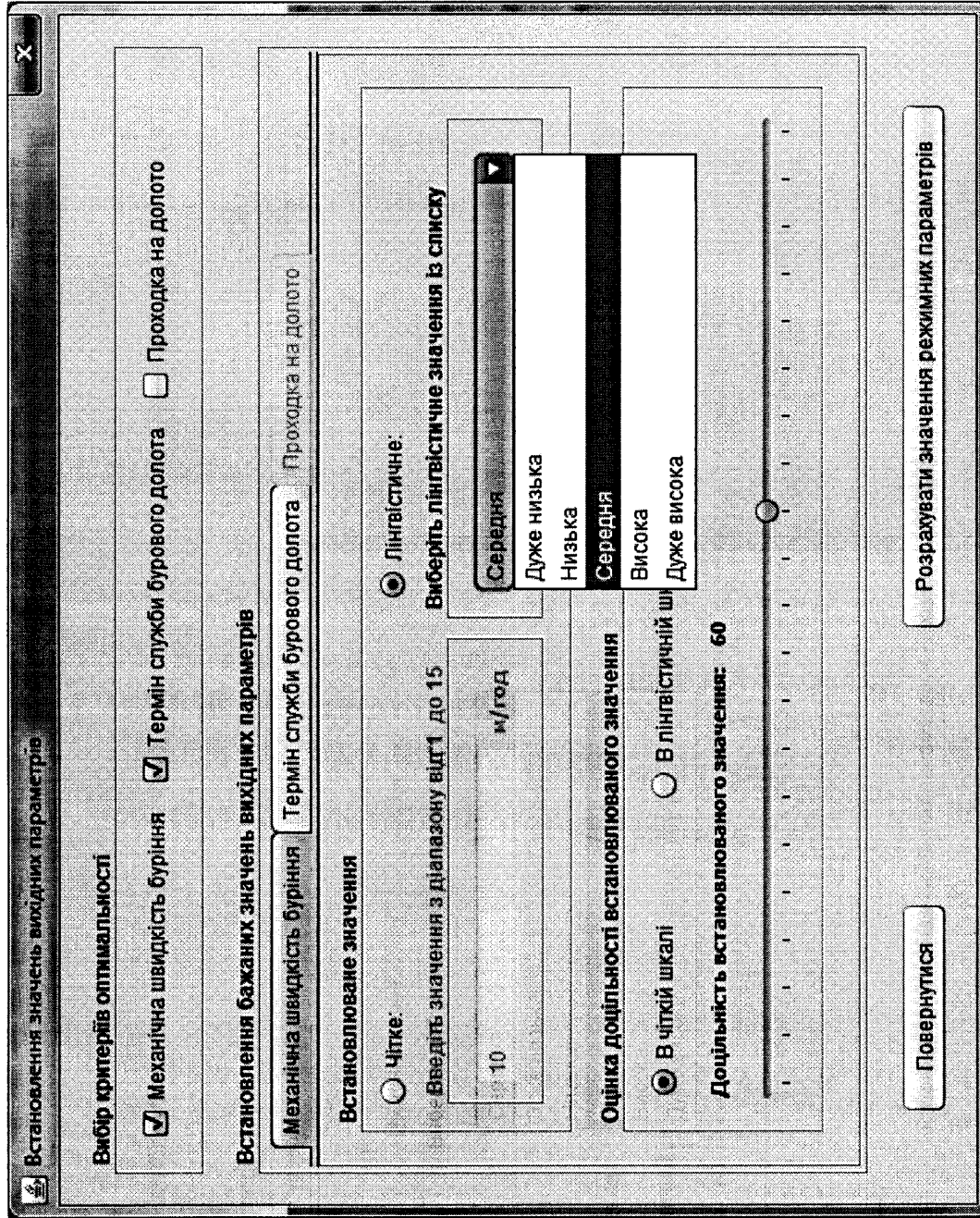


Рис. Ж.11. Встановлення бажаних лінгвістичних значень вихідних параметрів та оцінок доцільності встановлюваних значень з чіткої шкали для параметру «Механічна швидкість буріння»

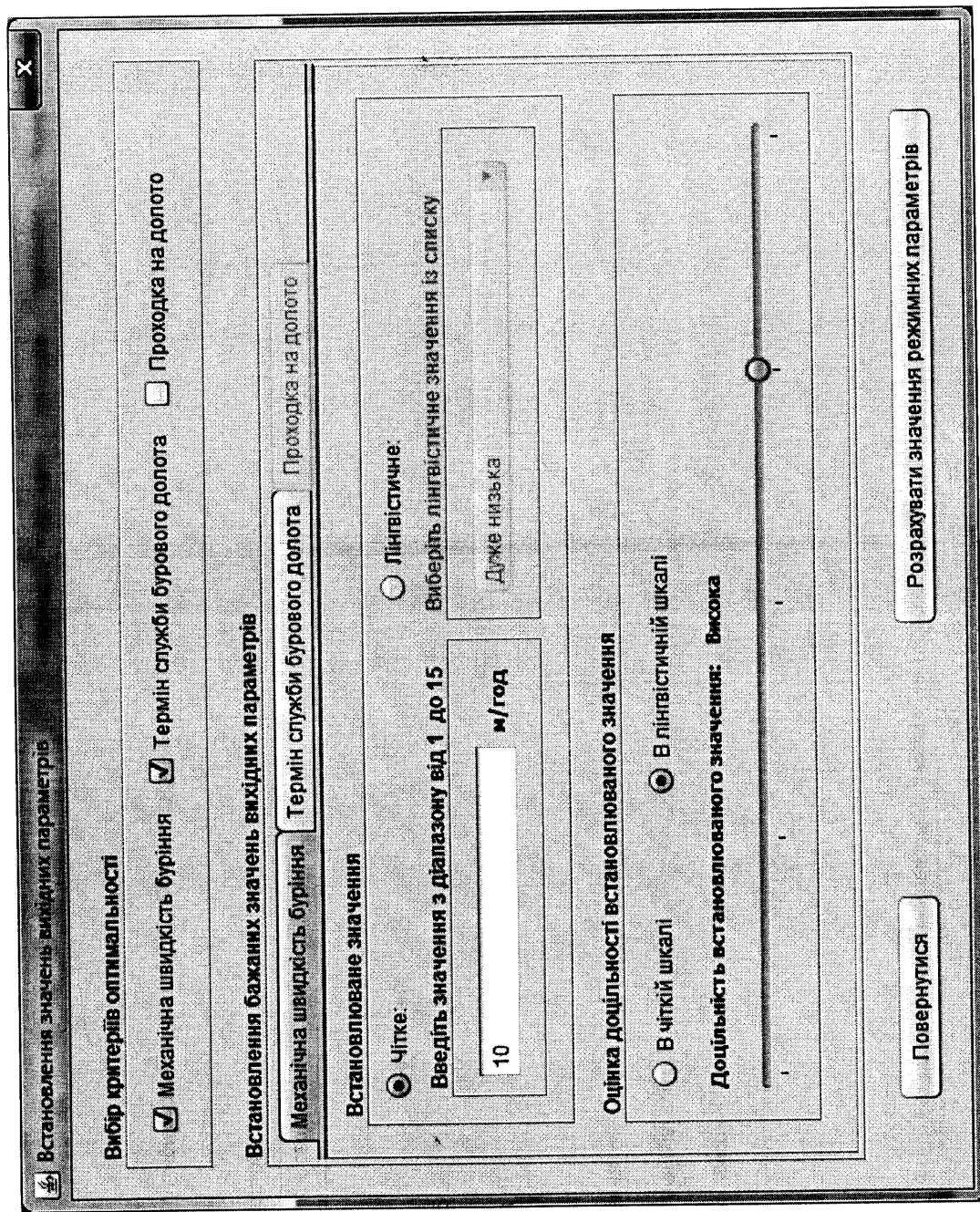


Рис. Ж.12. Встановлення бажаних чітких значень вихідних параметрів та оцінок доцільності встановлюваних значень з лінгвістичної шкали для параметру «Механічна швидкість буріння»

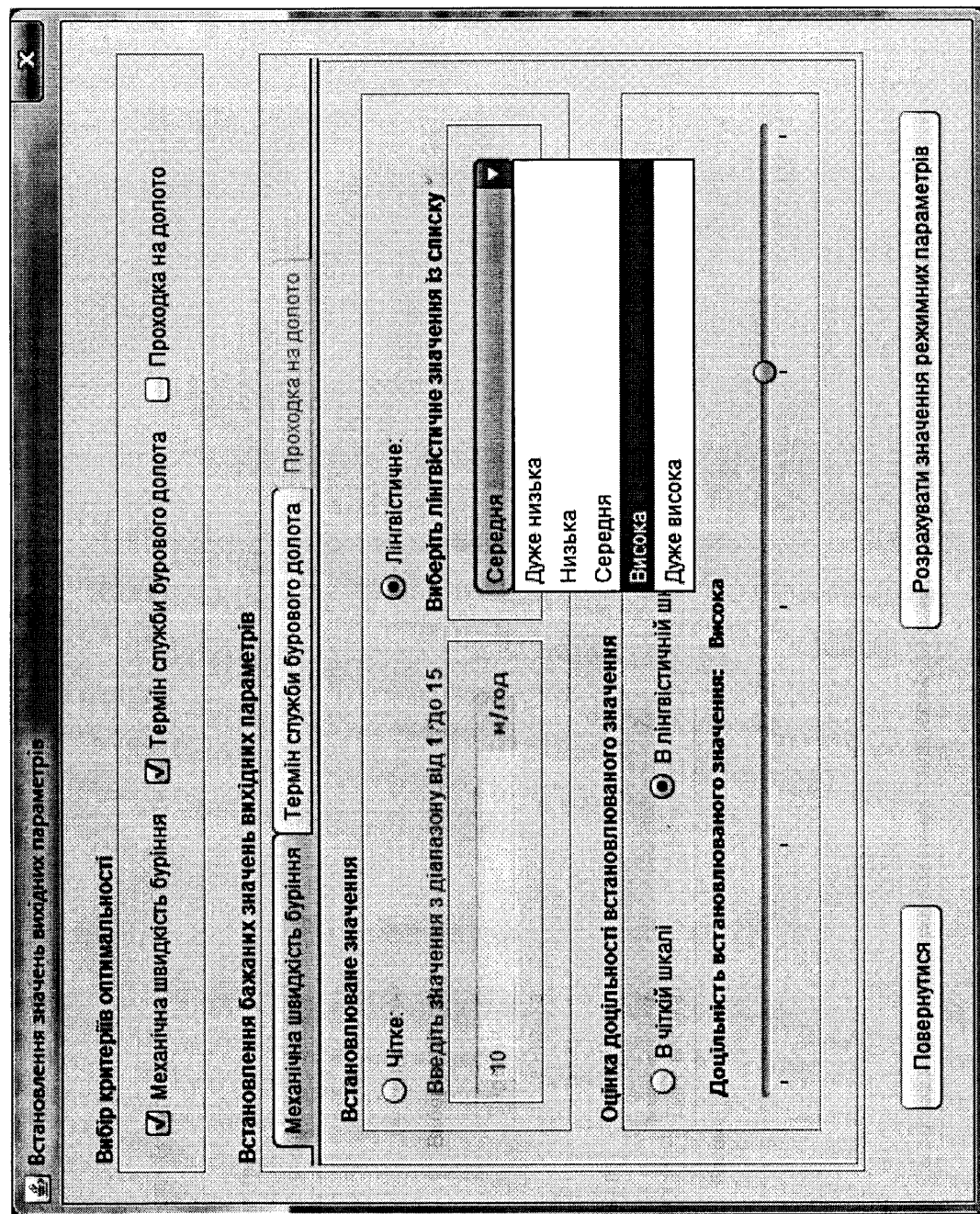


Рис. Ж.13. Встановлення бажаних лінгвістичних значень вихідних параметрів та оцінок доцільності встановлюваних значень з лінгвістичної шкали для параметру «Механічна швидкість буріння»

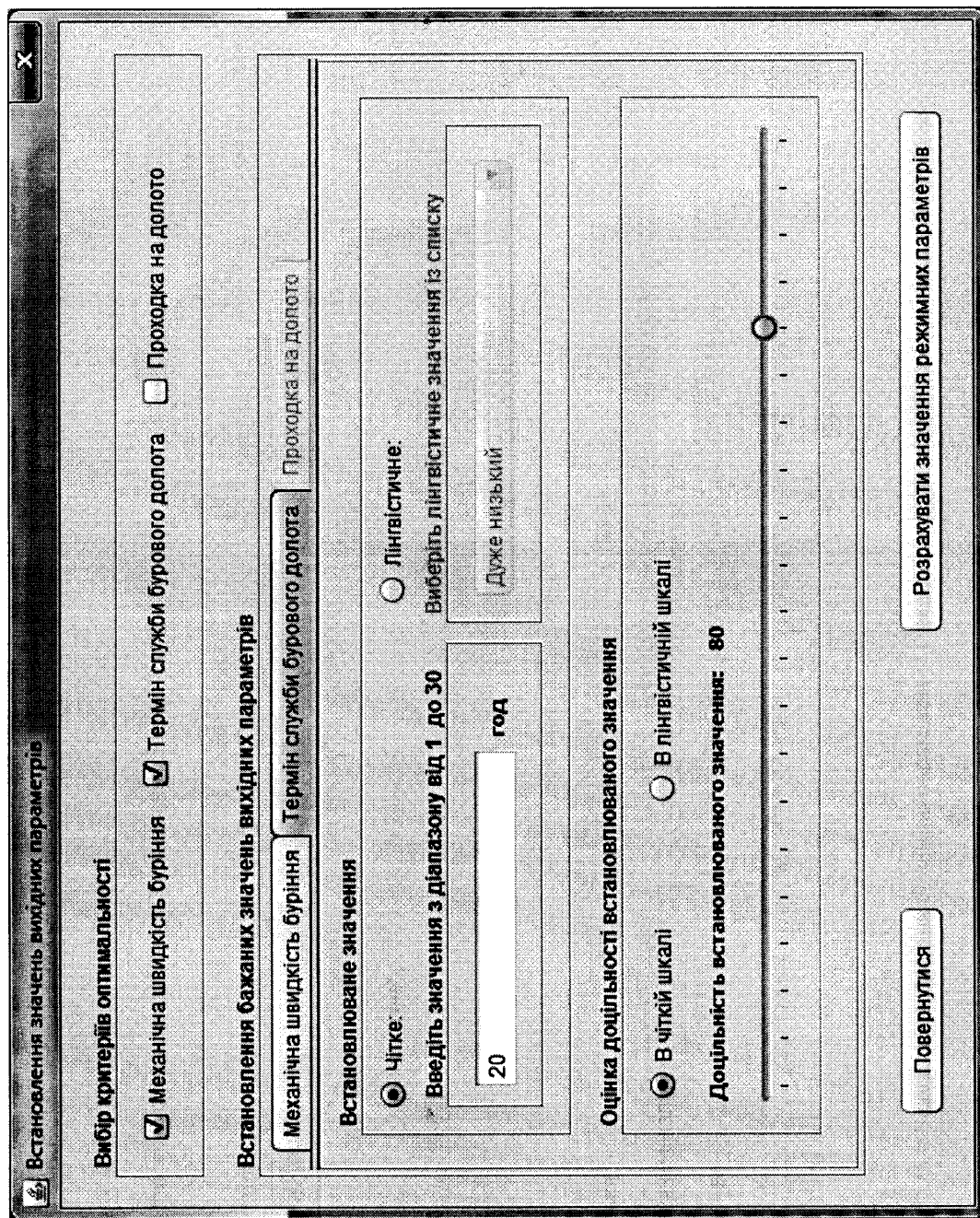


Рис. Ж.14. Встановлення бажаних чітких значень вихідних параметрів та оцінок доцільності встановлюваних значень з чіткої шкали для параметру «Термін служби бурового долота»

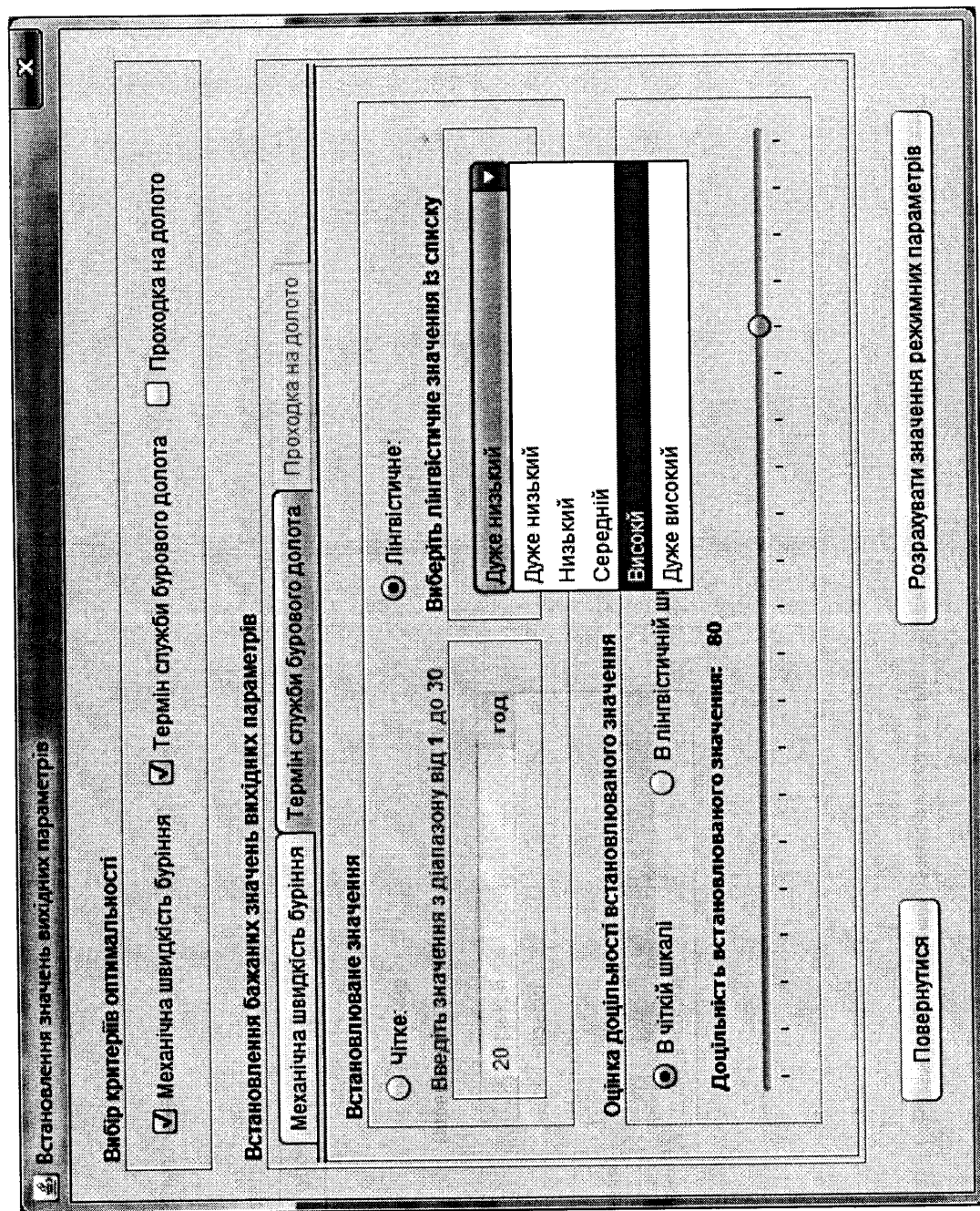


Рис. Ж.15. Встановлення бажаних лінгвістичних значень вихідних параметрів та оцінок доцільності встановлюваних значень з чіткої шкали для параметру «Термін служби бурового долота»

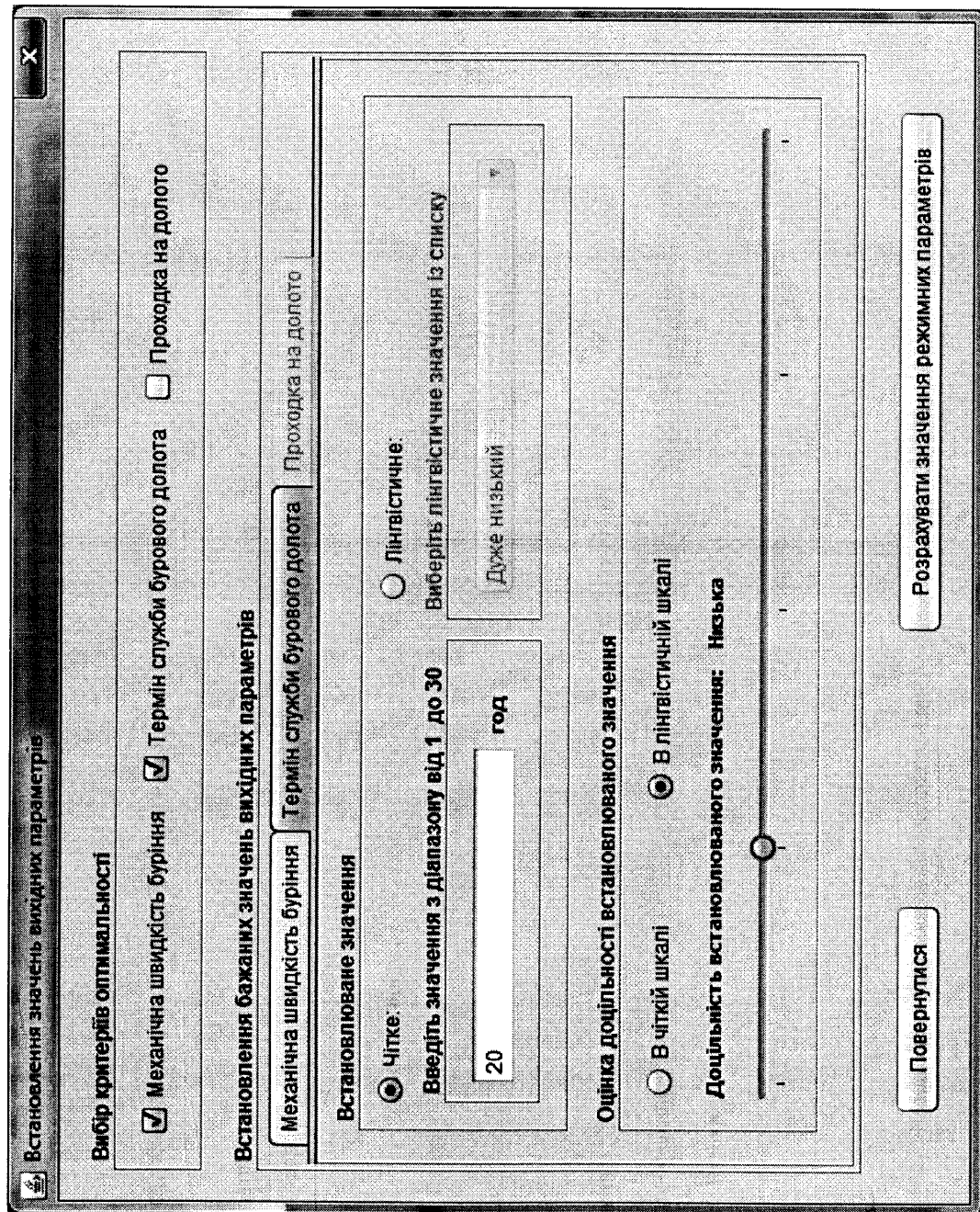


Рис. Ж.16. Встановлення бажаних чітких значень вихідних параметрів та оцінок доцільності встановлюваних значень з лінгвістичної шкали для параметру «Термін служби бурового долота»

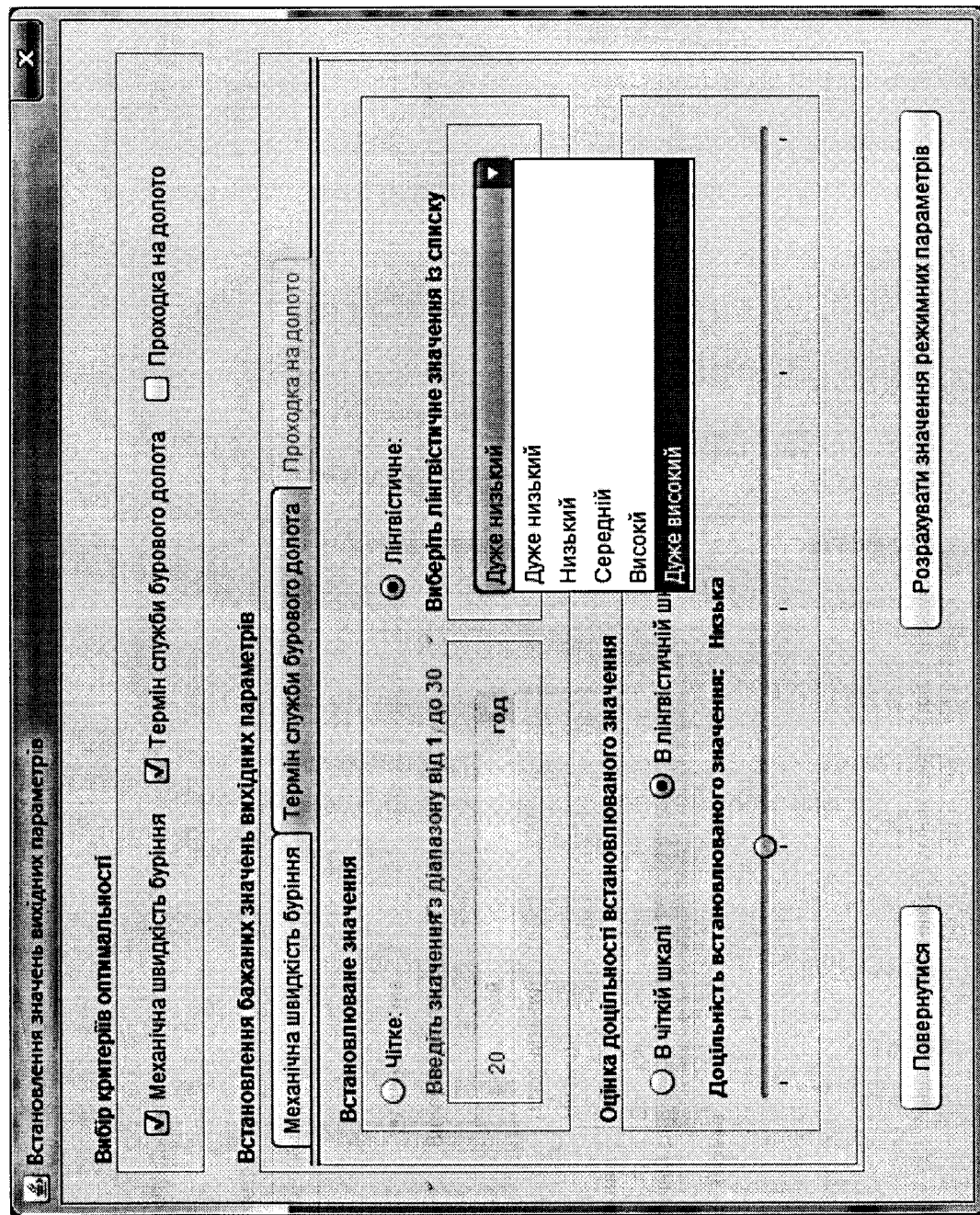
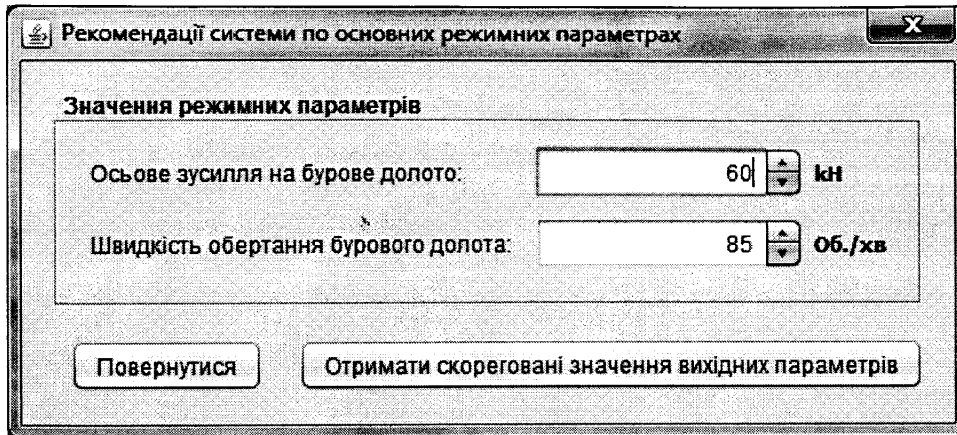


Рис. Ж.17. Встановлення бажаних лінгвістичних значень вихідних параметрів та оцінок доцільності встановлюваних значень з лінгвістичної шкали для параметру «Термін служби бурового долота»



Рекомендації системи по основних режимних параметрах

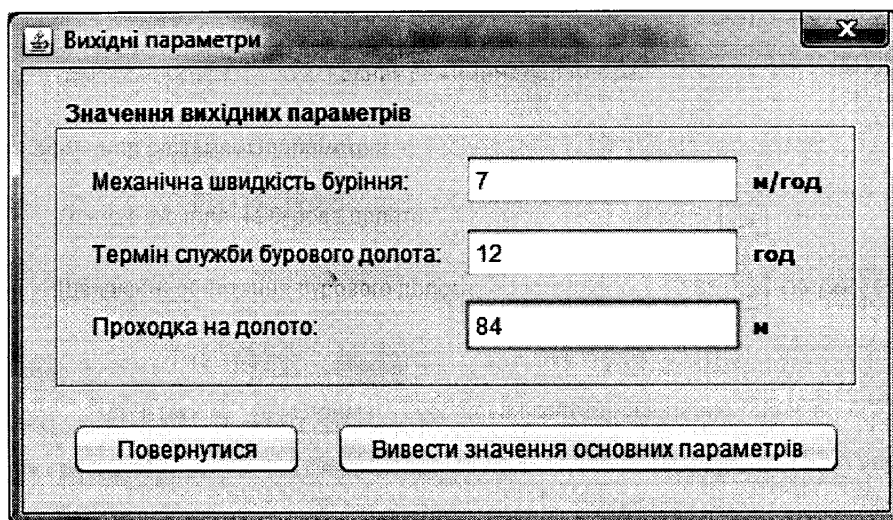
Значення режимних параметрів

Осьове зусилля на бурове долото: 60 kN

Швидкість обертання бурового долота: 85 Об./хв

Повернутися Отримати скореговані значення вихідних параметрів

Рис. Ж.18. Вивід системою рекомендацій щодо значень режимних параметрів



Вихідні параметри

Значення вихідних параметрів

Механічна швидкість буріння: 7 м/год

Термін служби бурового долота: 12 год

Проходка на долото: 84 м

Повернутися Вивести значення основних параметрів

Рис. Ж.19. Вивід системою розрахованих значень вихідних параметрів з максимальним значенням доцільності

ЗАТВЕРДЖУЮ

Додаток 3


ЗАТВЕРДЖУЮ

236

Проректор з наукової

роботи ІФНТУНГ

проф. Карпаш О. М.



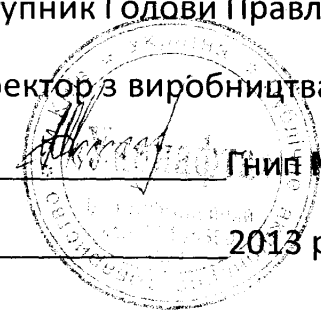
5.03.2013 2013 р.

Заступник Голови Правління-

директор з виробництва


_____ Гниє М. П.

_____ 2013 р.



АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи аспіранта кафедри програмного забезпечення автоматизованих систем Демчини Миколи Миколайовича

«СИСТЕМА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ БУРЯННЯ НАФТОВИХ І ГАЗОВИХ СВЕРДЛОВИН»


Ми, які підписали нижче, склали даний акт про те, що результати дисертаційної роботи **Демчини Миколи Миколайовича** «Система інтелектуальної підтримки прийняття рішень для оптимізації параметрів буріння нафтових і газових свердловин» у вигляді методики та програмного забезпечення «Інтелектуальна система підтримки прийняття рішень для оптимізації процесу буріння» передані і впроваджені ПАТ «Укрнафта» та дозволяють зменшити витрати на буріння внаслідок збільшення механічної швидкості проходки і терміну служби бурових доліт. Очікування економічний ефект від впровадження розробки складає близько 75 тис.грн. в рік для одного родовища.

Науковий керівник

к.т.н., доцент


_____ Шекета В. І.

Аспірант

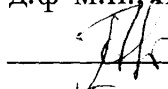

_____ Демчина М. М.

Додаток К

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Проректор з науково-педагогічної роботи

Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу
д.ф-м.н., проф.


 М.О.Галушак
15.03.2013 2013 р.

АКТ

Про впровадження результатів дисертаційного дослідження аспіранта кафедри програмного забезпечення автоматизованих систем Демчини М.М. у навчальний процес

Ми, що нижче підписалися, начальник навчального відділу, кандидат технічних наук, доцент Сверида Б.В., завідувач кафедри ПЗАС, доктор технічних наук, професор Юрчишин В.М. та аспірант кафедри ПЗАС Демчина М.М., склали цей акт у тому, що матеріали дисертації «СИСТЕМА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ БУРІННЯ НАФТОВИХ І ГАЗОВИХ СВЕРДЛОВИН», розроблені аспірантом Демчиною М.М. впроваджені у навчальний процес при вивченні дисциплін «Методологічні основи наукових досліджень в нафтогазовій галузі» студентами спеціальності 6.050103 – програмна інженерія (Модуль М1, змістовний модуль ЗМ2, навчальний елемент НЕ4 «Моделі та методи прийняття оптимальних рішень») та «Математичні методи аналізу алгоритмів» студентами спеціальності 8.05010301 – програмне забезпечення систем (Модуль М1, змістовний модуль ЗМ4 «Теорія прийняття оптимальних рішень та систем інтелектуальної підтримки прийняття рішень»)

Начальник навчального відділу
к.т.н., доцент

 Б.В. Сверида

Завідувач кафедри ПЗАС
д.т.н., професор

 В.М. Юрчишин

Аспірант

 М.М. Демчина

Додаток Л

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Директор ТзОВ «Мікрол»

Б.С. Демчина

15.02. 2013 р.

АКТ

про впровадження результатів дисертаційного дослідження аспіранта
кафедри програмного забезпечення автоматизованих систем
Демчини М.М. на тему

**«СИСТЕМА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ДЛЯ
ОПТИМІЗАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ БУРІННЯ НАФТОВИХ І ГАЗОВИХ СВЕРДЛОВИН»**

у виробництво

Ми, що нижче підписалися, директор ТзОВ «МІКРОЛ» Демчина Б.С.,
головний інженер ТзОВ «МІКРОЛ» Слободян Р.Й., начальник відділу АСУ ТП
ТзОВ «МІКРОЛ» Парасюк Р.М. з **однієї сторони** та к.т.н., доцент кафедри
програмного забезпечення автоматизованих систем Івано-Франківського
національного технічного університету нафти і газу Шекета В.І., аспірант кафедри
Демчина М.М. з **другої сторони** склали цей акт про те, що ТзОВ «МІКРОЛ»
прийняло до впровадження технологію підтримки процесу прийняття рішень щодо
оптимізації параметрів при бурінні нафтових і газових свердловин на основі
цільових функцій в системі автоматизації технологічних процесів типу SCADA (в
формі алгоритмічного та програмного забезпечення), що є основним результатом
дисертаційного дослідження аспіранта Демчини М.М.

Директор

ТзОВ «Мікрол»
Б.С. Демчина

Головний інженер

ТзОВ «Мікрол»
Р.Й. Слободян

Науковий керівник

к.т.н., доцент

В.І. Шекета

Аспірант

М.М. Демчина

Начальник АСУ ТП

ТзОВ «Мікрол»

Р.М. Парасюк



d488