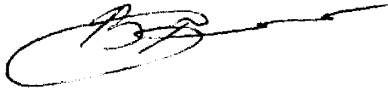


ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ НАФТИ І ГАЗУ

На правах рукопису

ВОВК Роман Богданович



УДК 681.518:622.248:004.89

СИСТЕМА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ  
ДЛЯ ЗАПОБІГАННЯ НЕШТАТНИХ СИТУАЦІЙ В ПРОЦЕСІ БУРІННЯ  
СВЕРДЛОВИН

05.13.07 – автоматизація процесів керування

дисертація на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

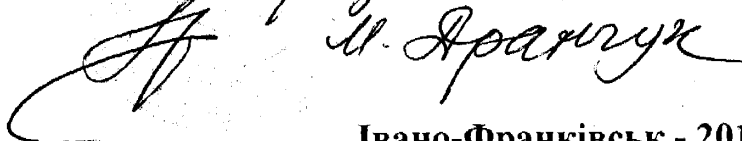
*Цей прелімінарний дисер-  
таційний ідентифікатор за-  
мість з іншими пре-  
лімінарними дисертаціями,  
що були подані до ради*

Науковий керівник:

**Шекета Василь Іванович**

кандидат технічних наук,

доцент

*Вашій секретар  
спец. всієї ради 20.05.2012*  


Івано-Франківськ - 2012



0445

## ЗМІСТ

Стор.

<b>ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ .....</b>	<b>4</b>
<b>ВСТУП.....</b>	<b>6</b>
<b>РОЗДІЛ 1</b>	
<b>АНАЛІЗ ЗАСОБІВ ІНТЕЛЕКТУАЛІЗАЦІЇ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ В АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ БУРІННЯ НАФТОВИХ І ГАЗОВИХ СВЕРДЛОВИН.....</b>	<b>13</b>
1.1. Аналіз технологічного процесу буріння нафтових і газових свердловин як об'єкта керування .....	14
1.2. Аналіз існуючих систем керування технологічним процесом буріння нафтових і газових свердловин .....	19
1.3. Особливості контролю та автоматизації процесів керування бурінням нафтових і газових свердловин.....	29
1.4. Аналіз нештатних ситуацій процесу буріння з метою представлення причин їх виникнення в формі технологічних обмежень .....	38
1.5. Аналіз процедур прийняття рішень у процесі буріння нафтових і газових свердловин.....	45
1.6. Вибір та обґрунтування напрямку досліджень .....	60
<b>РОЗДІЛ 2</b>	
<b>МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОБЛЕМ ПРОЦЕСУ БУРІННЯ ЗАСОБАМИ ТЕОРІЇ ОБМЕЖЕНЬ, ЯК ОСНОВИ ПРОЦЕСУ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ.....</b>	<b>64</b>
2.1. Представлення станів технологічних проблем у процесі буріння на основі обмежень .....	64
2.2. Класифікація та структуризація технологічних проблем на основі обмежень.....	75
2.3. Дослідження ієрархій та методів порівняння систем обмежень для технологічних проблем .....	83
2.4. Побудова рішень на множині структурованих технологічних проблем з накладеними системами та ієрархіями обмежень .....	86

Висновки до другого розділу.....	102
<b>РОЗДІЛ 3</b>	
<b>ОБГРУНТУВАННЯ ПОБУДОВИ СТРУКТУРИ СИСТЕМИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ НА ОСНОВІ ОБМЕЖЕНЬ.....</b>	<b>104</b>
3.1. Реалізація системи інтелектуальної підтримки прийняття рішень на основі стратегій аналізу технологічних помилок.....	104
3.2. Опис функціонування процесу задоволення та порушення обмежень в системі інтелектуальної підтримки прийняття рішень.....	112
3.3. Структура та функціонування технологічних проблем на основі обмежень .....	119
3.4. Методи контролю рішення технологічних проблем в системі інтелектуальної підтримки прийняття рішень.....	135
Висновки до третього розділу .....	144
<b>РОЗДІЛ 4</b>	
<b>РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ДЛЯ ЗАПОБІГАННЯ НЕШТАТНИХ СИТУАЦІЙ У ПРОЦЕСІ БУРІННЯ НАФТОВИХ І ГАЗОВИХ СВЕРДЛОВИН.....</b>	<b>146</b>
4.1. Оцінка реалізації моделі об'єкта підтримки прийняття рішень в інтелектуальній системі .....	146
4.2. Оцінка реалізації функціональності системи інтелектуальної підтримки прийняття рішень на основі обмежень .....	159
4.3. Реалізація структурних елементів представлення знань про процес буріння нафтових і газових свердловин в інтелектуальній системі.....	169
4.4. Розрахунок значення ефективності від впровадження розробленої інтелектуальної системи .....	181
Висновки до четвертого розділу.....	186
<b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....</b>	<b>187</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>	<b>190</b>
<b>ДОДАТКИ .....</b>	<b>207</b>

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ

АПК – апаратно-програмний комплекс;

АС – автоматизована система;

БК – бурильна колона;

ЕОМ – електронна обчислювальна машина;

Ю – ієрархія обмежень;

НГС – нафтові та газові свердловини;

ППР – підтримка прийняття рішень;

СППР – система інтелектуальної підтримки прийняття рішень;

СППРО – система інтелектуальної підтримки прийняття рішень на основі обмежень;

ТП – технологічний процес;

СВМ – Constraint-based modeling – моделювання на основі обмежень;

cf – certainty factor – коефіцієнт визначеності;

CLP - Constraint logic programming;

CM – CurrentModel – поточна модель об'єкта ППР;

ConstrHrch – ієрархія технологічних обмежень;

ConstrSet – множина технологічних обмежень;

ConstrSyst - система технологічних обмежень;

CSP - Constraint satisfaction problems;

FB – Feed Backs – зворотний зв'язок;

LTM – Long-term model – довготривала модель об'єкта ППР;

OF – objective function – цільова функція;

PDZ - Proximal Development Zone - область найближчого розвитку об'єкта ППР;

rc – relevancy condition – умова релевантності обмеження ТП;

sc – satisfaction condition – умова задоволення обмеження ТП;



SCADA – Supervisory Control And Data Acquisition – диспетчерське керування та збір даних;

sd – satisfaction degree – ступінь задоволення обмеження ТП;

STM – Short-term model - короткотривала модель об'єкта ППР;

TP – Technological Problem – технологічна проблема;

TPr – Technological Process – технологічний процес;

TPS – Technological Problem State – стан технологічної проблеми;

$\succ$  – операція “звуження” (в термінах обчислювальної складності);

# – потужність (розмір, порядок) в теорії множин;

$\top$ ,  $\perp$  – операції “максимальне значення”, “мінімальне значення” відповідно;

$\subset$  – операція “є підмножиною”;

$\vee$  – операція “АБО”, диз'юнкція;

$\wedge$  – операція “І”, кон'юнкція;

$\cup$  – операція “об'єднання” множин;

$\cap$  – операція “перетину” множин;

$\exists$ ,  $\nexists$  – квантор “існує”, “не існує” відповідно;

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

$\otimes$  – тензорний добуток;

$\oplus$  – пряма сума в абстрактній алгебрі;

$\circledast$  – комутативна, асоціативна бінарна операція над оціночною множиною;

$\vDash$ ,  $\nVdash$  – відношення наслідування, не наслідування відповідно;

$\vdash$  – інференція;

$\forall$  – квантор загальності “для всіх”, “для будь-яких”;

$\Leftrightarrow$  – “рівно / рівносильно за визначенням”;

$\Rightarrow$  – імплікація, “слідування”;

$\langle \rangle$  – операція “не рівно”;

$\times$  – декартів добуток;

$\cong$  – ізоморфність на рівні структурної ідентичності груп в абстрактній алгебрі.

## ВСТУП

### **Актуальність теми.**

Розвиток нафтової та газової промисловості характеризується зростанням обсягів пошуково-розвідувального буріння свердловин в 6 разів порівняно з 2005 р., як це передбачено «Енергетичною стратегією України до 2030 року». Розрахунки показують, що за таких умов протягом прогнозного періоду (2006 – 2030 рр.) можливо приростити розвідані запаси за базовим сценарієм в обсязі 63 млн.т нафти з газовим конденсатом, за амбітним сценарієм – 150 млн.т нафти з газовим конденсатом. Буріння нафтових і газових свердловин як об'єкт керування у загальному випадку є складним нестационарним технологічним процесом, що розвивається в часі і супроводжується виникненням ускладнень та аварій (нештатних ситуацій), на ліквідацію яких витрачається значна кількість коштів і часу, що, в свою чергу, впливає на загальну вартість буріння свердловин у цілому. Тому основним завданням функціонування комплексних систем автоматизованого керування технологічним процесом буріння нафтових і газових свердловин з програмно - апаратними рішеннями є контроль основних показників технологічного процесу, їх аналогова чи цифрова обробка й оперативне керування підсистемами автоматизації процесів поглиблення свердловини, промивання, запобігання аварійним ситуаціям.

На сьогодні контроль, розпізнавання та попередження аварій, а також прийняття рішень щодо їх усунення здійснюється операторами-бурильниками в більшості випадків на інтуїтивному рівні, базуючись на власному досвіді та професійних навичках, що не завжди відповідає рівням складності, невизначеності та нечіткості, які характеризують нештатні ситуації.

Враховуючи особливості процесу буріння нафтових і газових свердловин та необхідність прийняття рішень щодо попередження та усунення ускладнень та аварій, побудова систем інтелектуальної підтримки прийняття

керуючих технологічних рішень із метою запобігання нештатним аварійним ситуаціям є актуальною науково-практичною задачею.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Вибраний напрямок досліджень є складовою частиною тематичного плану Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу (ІФНТУНГ) і 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.);

- “Наукові основи розробки методів, систем і нормативної бази для вимірювання витрат та контролю обладнання і технологічних параметрів в нафтогазовій галузі ” (номер державної реєстрації 0109U008878);

- “Синтез комп'ютерних систем і мереж для об'єктів нафтогазового комплексу ” (номер державної реєстрації 0111U005890).

Із вищеназваних тем НДР автор був безпосереднім виконавцем робіт щодо розробки формальних моделей інтелектуальних методів системи підтримки прийняття рішень для запобігання виникнення нештатних ситуацій в процесі буріння нафтових і газових свердловин.

**Мета і задачі дослідження.** Метою даної роботи є розроблення методу та системи інтелектуальної підтримки прийняття рішень для запобігання нештатних ситуацій у процесі буріння нафтових і газових свердловин шляхом контролю обмежень, накладених на технологічний процес.

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

1. Аналіз технологічного процесу буріння нафтових і газових свердловин як об'єкта керування, аналіз існуючих автоматизованих систем керування з точки зору інтелектуалізації процедур прийняття рішень та аналіз можливих нештатних ситуацій процесу буріння;
2. Формалізація постановки задачі моделювання технологічного процесу на основі обмежень, розробка методу її розв'язку;

3. Обґрунтування та дослідження технології інтелектуальної підтримки прийняття рішень для запобігання нештатних ситуацій у процесі буріння;
4. Синтез алгоритму функціонування системи інтелектуальної підтримки прийняття рішень;
5. Створення технології контролю процесу рішення нештатних технологічних ситуацій засобами розробленої інтелектуальної системи на основі обмежень;
6. Реалізація системи інтелектуальної підтримки прийняття рішень для запобігання нештатних ситуацій у процесі буріння;
7. Розробка методики запобігання нештатних ситуацій у процесі буріння нафтових і газових свердловин засобами системи інтелектуальної підтримки прийняття рішень і промислова апробація результатів дослідження.

*Об'єктом дослідження є нестационарний технологічний процес буріння нафтових і газових свердловин, який супроводжується виникненням нештатних ситуацій в умовах невизначеності.*

*Предметом дослідження є системи інтелектуальної підтримки прийняття рішень для запобігання нештатних ситуацій у процесі буріння нафтових і газових свердловин.*

**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 та аналізу нештатних ситуацій у формі технологічних обмежень); системного підходу (для визначення сутності нештатних ситуацій); формально-логічних досліджень із використанням базового апарату на основі обмежень (для побудови розширення у вигляді формальних конструкцій представлення та використання знань про технологічний процес буріння); методів теорії множин (для моделювання функціональності складових системи); методів нечітких множин і теорії ймовірності (для опису множин, систем та ієрархій

обмежень, помилок технологічних проблем та їх станів, а також опису процесу прийняття рішень і побудови процедур зворотного зв'язку як базових інтелектуальних функцій системи); методів математичної статистики (для оцінки характеристик рішень технологічних проблем).

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає в розвитку та поглибленні методологічного підходу до запобігання виникнення нештатних ситуацій у процесі буріння нафтових і газових свердловин в умовах невизначеності та визначається наступними науковими результатами:

*вперше:*

– запропоновано метод моделювання нештатних аварійних ситуацій, які виникають у процесі буріння, котрий ґрунтується на засадах теорії представлення та задоволення обмежень, що покладено в основу структури системи інтелектуальної підтримки прийняття рішень;

– розроблено формальні конструкції множин, систем та ієрархій обмежень, покладених в основу інтелектуальної системи, що дозволяють запобігати виникненню нештатних ситуацій при бурінні свердловин і, відповідно, утворюють основу процесу прийняття технологічних рішень в умовах невизначеності;

– отримало подальший розвиток формальне, методичне та програмне забезпечення систем інтелектуальної підтримки прийняття рішень для запобігання нештатних ситуацій у процесі буріння, яке, на відміну від існуючих підходів, що використовують методи чіткої чи нечіткої логіки, базується на теорії представлення та задоволення обмежень.

**Практичне значення отриманих результатів** дисертаційної роботи полягає в тому, що розроблені моделі та метод, а також алгоритмічне та програмне забезпечення, дають змогу вирішувати задачу запобігання нештатних ситуацій у процесі буріння, що підтвердило свою ефективність під час тестування отриманої системи інтелектуальної підтримки прийняття рішень на фактичних даних Прикарпатського УБР щодо аварійних нештатних

ситуацій у період із 2002 по 2010 рр. на родовищах Долинського, Надвірнянського й Охтирського нафтопромислових районів.

Розроблена система та рекомендації з її використання прийняті до впровадження відділом АСУ ТП підприємства “МІКРОЛ” як прототип модуля візуалізації процесу підтримки прийняття технологічних рішень на основі обмежень у SCADA – системах (акт від 11.01.2012р.); “Івано-Франківським Спеціальним конструкторським бюро засобів автоматизації” (акт від 12.01.2012р.) та впроваджена в Прикарпатському УБР (акт від 25.06.2012р.) і НГВУ “Полтаванафтогаз” (акт від 17.07.2012р.). Результати досліджень упроваджені в навчальний процес кафедри програмного забезпечення автоматизованих систем ІФНТУНГ (акт від 12.01.2012р.) 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 “Проектування програмного забезпечення для спеціалізованих автоматизованих систем”.

**Особистий внесок здобувача** полягає у формуванні мети та задачі дослідження, обґрунтуванні вибраних методів дослідження, проведенні формально-логічних, теоретичних та прикладних досліджень, формальному обґрунтуванні основних наукових результатів, методологій та практичних реалізацій. Усі положення дисертації, які виносяться на захист, основні результати теоретичних та прикладних досліджень отримані автором особисто. В усіх роботах, написаних у співавторстві, здобувачеві належить основна ідея, постановка задачі дослідження, побудова та обґрунтування їх рішень. В надрукованих роботах, здобувачеві, зокрема, належать: [100] – ідея контролю станів технологічного процесу буріння на основі концепції обмежень [108] – розробка методу моделювання класів технологічних проблем на основі множин та систем релевантних обмежень; [127] – представлення формального опису процесу контролю задоволення та порушення обмежень в інтелектуальних системах; [133] – спосіб формалізації сумарної моделі об’єкта

в інтелектуальній системі; [142] – методологія представлення даних і знань предметної області; [64,65] – представлення нештатних ситуацій процесу буріння в формі технологічних обмежень; [131] – визначення складових та дослідження зворотного зв'язку в інтелектуальній системі; [132] – розробка формальної моделі інтелектуальної системи на основі обмежень з використанням механізму зворотного зв'язку; [139] – розробка рівнів зворотного зв'язку в інтелектуальній системі на основі обмежень; [135] – введення формально-логічного підходу використання коефіцієнтів впевненості при оперуванні з обмеженнями; [136] – побудова формального підходу модуля адаптивного контролю інтелектуальної системи; [137] – формальне представлення моделі об'єкта підтримки прийняття рішень.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертаційної роботи доповідались, обговорювались і отримали позитивну оцінку на міжнародних конференціях “CSE-2009” (м. Львів, 2009р.); на XIII Міжнародному молодіжному форумі “Радиоелектроника и молодежь в XXI веке” (м. Харків, 2009р.); на XI Міжнародній науково-технічній конференції “Системний аналіз та інформаційні технології САІТ-2009” (м. Київ, 2009р.); IX міжнародній конференції “Інтелектуальний аналіз інформації ІАІ-2009” (м. Київ, 2009р.); XVI Всеукраїнській науковій конференції “Сучасні проблеми прикладної математики та інформатики СППМІ-2009” (м. Львів, 2009р.); 10-тій Ювілейній міжнародній науково-технічній конференції “Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та комп'ютерної інженерії” присвяченій, 165-й річниці Національного університету “Львівська політехніка” TCSET'2010 (м. Львів, 2010р.); П'ятій науково-практичній конференції з міжнародною участю “Математичне та імітаційне моделювання систем МОДС'2010” (м. Київ, 2010р.); Сьомій міжнародній конференції “Інтернет-освіта-наука-2010 ІОН-2010” (м. Вінниця, 2010р.); VIII міжнародній конференції “Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем MPZIS-2010” (м. Дніпропетровськ, 2010р.); 3-тій науково-практичній конференції студентів і молодих учених „Методи та засоби неруйнівного

контролю промислового обладнання” (м. Івано-Франківськ, 2011р.); 6-ій Міжнародній науково-технічній конференції і виставці “Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання” (м. Івано-Франківськ, 2011р.); на наукових семінарах кафедри програмного забезпечення автоматизованих систем (2009-2012 рр.).

**Публікації.** Основні результати дисертації викладені у 18 публікаціях: 7 статтях (із них 2 одноосібні) у фахових виданнях та 11 публікаціях (із них 3 одноосібні) у збірниках праць Міжнародних та Всеукраїнських науково-технічних конференцій.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг дисертації складає 265 сторінок, із них 189 сторінок основного тексту, що включає 37 рисунків і 1 таблицю. Список використаних джерел налічує 151 найменування на 17 сторінках, 8 додатків на 59 сторінках.



## РОЗДІЛ 1

# АНАЛІЗ ЗАСОБІВ ІНТЕЛЕКТУАЛІЗАЦІЇ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ В АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ БУРІННЯ НАФТОВИХ І ГАЗОВИХ СВЕРДЛОВИН

Енергетична стратегія України до 2030 року [1,2] визначає, як одну з пріоритетних цілей суттєве зниження питомих втрат у виробництві енергоносіїв та відповідно зменшення загального техногенного навантаження на довкілля у сфері паливно-енергетичного комплексу. Що стосується процесу буріння нафтових і газових свердловин (НГС), то для досягнення даного завдання доцільним є розробка ефективних методів та відповідних систем підтримки прийняття рішень (СППР) для запобігання виникнення нештатних ситуацій, як суттєвого джерела питомих втрат та екологічних ризиків.

Новітні тенденції розвитку автоматизованих систем керування, як комплексів програмних та технічних засобів призначених для автоматизації задач керування технологічним процесом буріння, полягає в створенні комплексних інтелектуальних систем які не тільки забезпечують автоматизацію процесу, але й інтелектуальну підтримку при прийнятті рішень, особливо в умовах невизначеної, неповної та слабоструктуризованої інформації про процес буріння.

Проблемам автоматизації керування процесом буріння НГС присвячено теоретичні та прикладні дослідження таких вчених як Семенцов Г.Н., Горбійчук М.І., Заміховський Л.М., Когуч Я.Р., Шавранський М.В., Кукурудз С.Ф., Яремійчук Р.С., Ясов В.Г., Коцкулич Я.С., Булатов А.І., Бінгхем М.Г., Гафіятуллін Р.Х., Балденко Ф.Д., Шмидт А.П., Галлі І.М. (USA), Вудс Г.Б. (USA), Дж. Шуберт (USA) та ін. Результати даних досліджень дозволяють описувати процес буріння на рівні формальних та математичних моделей, що є основою створення систем автоматизованого керування процесом, в тому числі з елементами інтелектуального керування, зокрема також для проблеми запобігання виникнення нештатних ситуацій в бурінні.

## 1.1. Аналіз технологічного процесу буріння нафтових і газових свердловин як об'єкта керування

Буріння розглядається як технологічний процес доступу до пластів нафти і газу. Рис. 1.1 зображає структурну схему установки типової реалізації такого процесу. В процесі побудови нафтових і газових свердловин виділяється окремий етап, що полягає в фактичному налаштуванні механічного обладнання в стовбурі свердловини і може включати зокрема процес очистки та інтенсифікації. З другого боку даний процес включає ряд технічних процедур направлених на обслуговування та експлуатаційні витрати, інтенсифікацію гірських порід, штучного підсилення та інтенсифікації дебету.

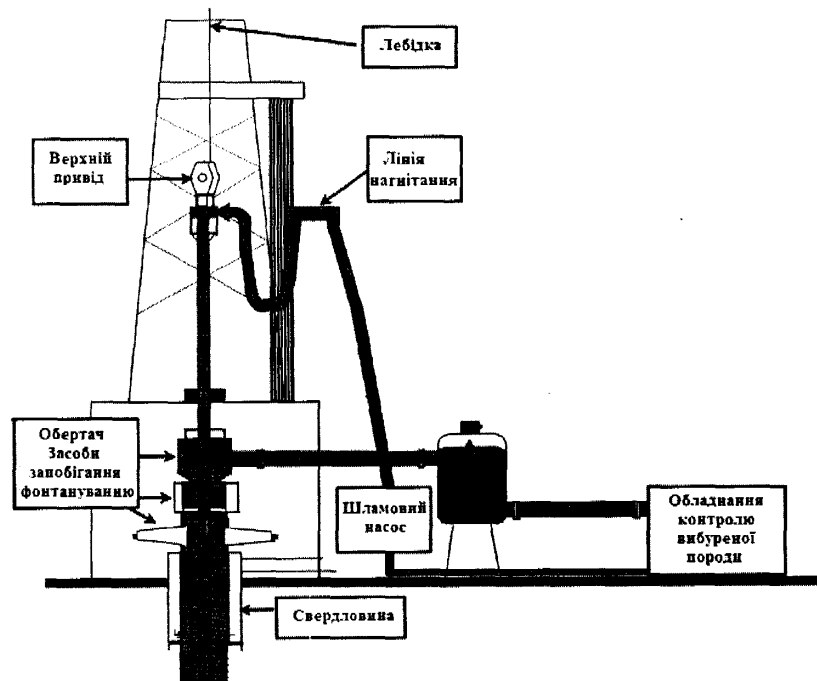


Рис.1.1. Структурна схема установки для роторного буріння [3]

В фахових джерелах [4,5] бурова установка розглядається як складний об'єкт керування для якого визначаються керуючі впливи і збурення. В більшості випадків множину впливів розділяють на чотири групи, що представлені на рис. 1.2:  $U(t)$  – керуючі впливи на вході об'єкта; некеровані параметри  $Z(t)$ , що визначаються режимами буріння; збурюючі параметри  $f(t)$ ;

показники процесу буріння  $X(t)$ , що визначаються множиною вхідних параметрів.



Рис.1.2. Структура моделі процесу буріння свердловин роторним способом

Новітні технології автоматизації технологічного процесу буріння базуються на концепції так званої "розумної свердловини" [3], що полягає у використанні спеціальних пристроїв для вимірювання технологічних умов від рівня пласта нафти і газу до поверхні в реальному часі. Такий підхід дозволяє здійснювати порівняння фактичних значень перебігу процесу з ідеальними, що представлені у відповідній моделі, і виконувати налаштування для оптимізації процесу, шляхом коректуючих впливів на вхідні та вихідні потоки змінних. Для того, щоб процес керування міг розглядатись як процес реального часу, коректуючі впливи повинні генеруватись з однаковою швидкістю як від рівня поверхневого керування так і з нижніх рівнів, на основі поєднання інструментів, що контролюються електронно або гідравлічно, що дозволить коректно відслідковувати та впливати на зміни в процесі, отримані в результаті попередніх вимірювань. Таким чином, оператори-бурильники

можуть керувати позиціюванням та функціонуванням внутрішніх інструментів контролю технологічного процесу буріння.

Застосування таких багаторівневих інтелектуальних технологій дозволяє оптимізувати процес, шляхом вимірювання дебіту свердловини і тиску, а також шляхом виконання необхідних реконфігурацій обладнання та методик керування технологічним процесом буріння.

На рис. 1.3 представлено структуру процесу буріння з точки зору задач функцій контролю та автоматизації.

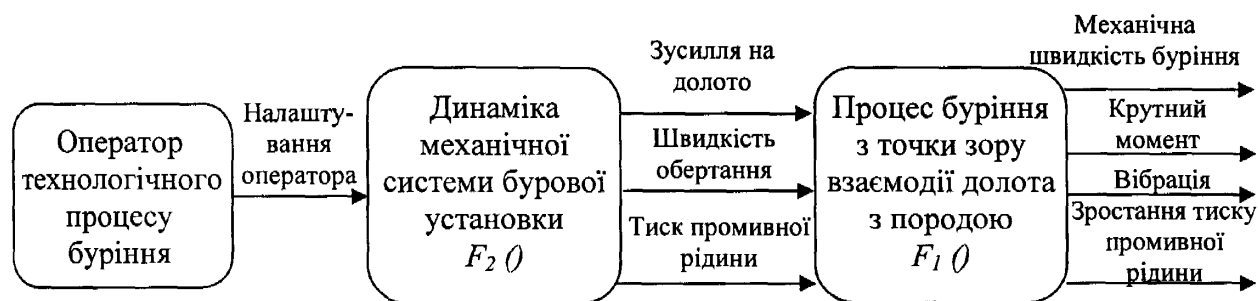


Рис. 1.3. Моделювання загальної структури процесу буріння як об'єкта автоматизації

Оператор технологічного процесу послідовно змінює швидкість обертання долота і тиск нагнітання на вході. Дані зусилля подаються на долото на основі механічних властивостей. Процес взаємодії долота з гірською породою можна розглядати як систему з багатьма параметрами, де  $F_1()$  є функцією, що описує специфіку гірських порід, їх тип, тип долота, ступінь зношення долота. Відповідно вхідними даними для  $F_1()$  є зусилля на долото, швидкість його обертання, тиск промивної рідини. Вихідний потік даних утворюватимуть механічна швидкість буріння, значення крутного моменту, характеристики вібрації. Збільшення тиску рідини промивки спостерігатиметься у випадку якщо фрагменти шламу блокують оправне долото.

На рис. 1.4 представлено процес декомпозиції керованого процесу в множину динамічних систем з часовими характеристиками в рамках більш

загальної структури змінних дискретних подій, що визначає початкову стратегію керування у вигляді дворівневої структури.



Рис. 1.4. Дворівнева стратегія керування технологічним процесом буріння

Хоча події розглядаються такі, що відбуваються майже миттєво в зовнішньому контурі, вони все ж таки вони відбуваються з набагато меншою частотою ніж варіація змінних у внутрішньому динамічному контурі. Таким чином, можна розглядати дану схему як внутрішній контур регулювання з високою пропускною здатністю, навколо якого розміщується система оперативного керування з низькою пропускною здатністю. До внутрішнього контура регулювання застосовуються класичні рішення схем керування, а зовнішній контур з нижчою пропускною здатність вимагає застосування деякої адаптивної методики на основі знань. Можливим є використання контуру оперативного регулювання для забезпечування точок налаштування швидкості обертання долота і тиску подачі для внутрішнього контуру, що буде очевидно, похідною від функції мінімізації витрат на процес буріння. Таким чином, наприклад, якщо функція мінімізації витрат є наперед визначеною, то

вона повинна включати такі змінні як вартість доліт та бурового обладнання, витрати на обслуговуючий персонал, електроенергію та витрати на підтримку технологічного процесу та очікувану ефективність процесу буріння в цілому.

*Формування внутрішнього контуру регулювання з високою пропускнуою здатністю.*

На основі аналізу експериментальних даних можна сформулювати наступні правила:

1. Тиск, необхідний для помпування розчину в пласт є змінною, що в основному впливає на механічну швидкість буріння та проходку за один оберт;

2. Висока швидкість обертання має своїм результатом надмірні вібрації, в основному в сланцевих породах;

3. Регулювання швидкості обертання долота буде впливати не тільки на механічну швидкість буріння, але також впливатиме на рівень вібрації;

4. Зростання тиску, необхідного для помпування розчину в пласт викликає зростання механічної швидкості буріння. Як показує досвід, характеристика тиску, необхідного для помпування розчину в пласт залишається відносно стабільною для різних типів гірських порід. Встановлення даної величини здійснюється шляхом послідовного її налаштування до досягнення рівня необхідного для помпування розчину в пласт з максимізацією механічної швидкості по відношенню до швидкості обертання відносно моменту забурення долота з рівнем вібрації і тиском рідини промивки в прийнятних експлуатаційних діапазонах.

5. При бурінні в нормальному режимі оператор прагне встановити швидкість обертання долота на максимальному рівні і підтримувати тиск, необхідний для помпування розчину в пласт більшим або рівним рекомендованого значення протягом всього часу поки рівень вібрації і тиску промивної рідини знаходяться в прийнятних межах. У випадку раптового зростання вібрації, безпосередньою реакцією оператора є повернення значення швидкості обертання долота в регламентні межі.

6. Значення проходки за оберт не повинно перевищувати максимально допустимі межі для запобігання забурення долота та з метою запобігання виникнення нештатних ситуацій в цілому.

Таким чином, автоматизація процесу буріння НГС на основі заданої схеми керування вимагає досягнення суттєвого розуміння загальної структури процесу і особливостей технологічної поведінки окремих його складових. Відповідно комп'ютерна симуляція даного процесу вимагає побудови ефективної моделі процесу буріння з метою розробки і початкової валідації схеми контролю. З даної точки зору, аналіз існуючих систем керування дозволить визначити необхідний рівень комплексної динаміки таких систем та спосіб побудови відповідних аналітичних оцінок для характеристик заданого рівня складності.

## **1.2. Аналіз існуючих систем керування технологічним процесом буріння нафтових і газових свердловин**

Визначені задачі автоматизації процесу керування бурінням на технологічному рівні отримали реалізації у вигляді пакетів автоматизації процесу буріння різних років виробництва, що відповідно базувалися на поточних рівнях електронних, інформаційних та програмних технологіях. Піонерами в даній області були технології таких фірм як Viscugus Egie, Garner Denver, Marlon. Результати впровадження даних систем описані в роботах [6-8]. Методики керування, що використовуються в даних системах базуються на контролі порушень обмежень, на основі яких визначаються нормальні умови перебігу технологічного процесу буріння, що відповідно підтримуються засобами зворотного зв'язку, шляхом використання відповідних давачів, регуляторів з встановленими граничними значеннями та виконавчих механізмів. Відповідно, границі коректного оперування та функціонування процесу встановлюються для кожної свердловини окремо, базуючись на

очікуваних властивостях гірських порід, очікуваному терміну експлуатації долота і очікуваній продуктивності свердловини в цілому.

Системи автоматизованого керування фірми Garner Denver дозволяють отримувати користувачу різні апаратні конфігурації залежно від потреб та регламенту технологічного процесу буріння. Базова конфігурація апаратного забезпечення автоматизованого керування функціонує на основі початково визначеної множини цільових змінних, таких як швидкість обертання, зусилля на долото, швидкість подачі долота, що в цілому визначають перебіг процесу буріння. Система в кінцевому підсумку стабілізується на деякому значенні швидкості обертання, зусиллі на долото і швидкості подачі бурового інструменту, що будуть настільки близькими до початкових встановлених граничних значень, наскільки це можливо в даній технологічній ситуації [7].

Системи автоматизованого керування фірми Magion будуються на основі базової ідеї, яка полягає в тому, що виділяється набір основних функцій які є необхідними для оптимізації ефективності процесу буріння. Крім того, даний клас систем не прагне замінити знання та досвід людини-оператора, а в більшій мірі прагне підсилити ефективність його роботи. Системи даного класу контролюють тільки деякий виділений набір змінних, а саме зусилля на долото, крутний момент, помпаж.

На сьогоднішній день фірми пропонують оновлені версії даних автоматизованих систем з функціями керування описаними в складі окремих функціональних блоків обладнання або які встановлюються додатково при виготовленні комплексів для буріння свердловин.

Система автоматизації буріння “Союзгеотехніка” (Росія) [9] створена для керування механічною швидкістю проходки на основі контролю параметрів зусилля на долото і швидкості його обертання.

Автоматизовані системи компанії “Humble Oil” [10] використовують архітектуру на основі ЕОМ та системи давачів, що забезпечує комплексне керування технологічним процесом буріння. Основні параметри, що контролюються це – механічна швидкість буріння, ступінь зношення опор,



озброєння долота, вартість проходки. Особливістю процесу керування є те, що початкова загальна модель адаптивно налаштовується системою відповідно до специфіки конкретної свердловини на основі агрегованих даних пробного буріння. Результатом реалізації моделі є адаптивне керування зусиллям на долото і швидкістю його обертання. Модель дозволяє введення обмежень по вартості та витратах.

Автоматизовані системи на основі стандарту UWI [9] дозволяють контролювати такі параметри як вага бурового інструменту, осьове зусилля на долото, проходка, тиск промивної рідини, крутний момент. Система дозволяє реєструвати в реальному часі технологічні параметри процесу буріння, архівувати їх з метою наступного аналізу та інтерпретації (в тому числі з віддаленим доступом до сервера), а також встановлювати сформовані значення технологічних параметрів. На етапі реєстрації частина параметрів приймається з відповідних датчиків, інша – обчислюється. Відповідно інформація виводиться на дисплей в цифровому або графічному вигляді (в режимі реального часу). Особливістю системи полягає в тому, що всі технологічні операції розглядаються нею як події (наприклад, нештатні ситуації, записані дії оператора). Система дозволяє введення граничних інтервалів (доменів зміни) для всіх контрольованих параметрів процесу. З точки зору інформаційних рішень, основною особливістю є ведення системою бази даних реального часу, можливість генерації графічних та аналітичних звітів. Особлива цінність архівації контрольованих параметрів процесу полягає в тому, що можна відслідковувати інтервали їх зміни в часових проміжках реального часу, що є основою побудови прогнозів по нештатних ситуаціях.

Система ADT (США) [11] дозволяє контролювати такі основні параметри як зусилля на долото, крутний момент на роторі, частота обертання ротора. Особливістю даної системи є включення великої кількості параметрів контролю, які дискретезуються та передаються на сервер. Алгоритм управління базується на обмеженнях щодо зносу опор та озброєння інструменту.

Оглянути вище системи можна об'єднати спільним оптимізаційним критерієм у вигляді мінімізації вартості метра проходки.

Системи автоматизованого керування процесом буріння класу “Леуза” [12, 13] дозволяють автоматизувати технологічний процес шляхом контролю і реєстрації певних технологічних параметрів та вибору оптимальних режимів процесу буріння. Типова архітектура системи включає набір датчиків технологічних параметрів, інформаційного дисплею, сигнального пристрою, робочого місця оператора. Подібно до UWI-систем, системи класу “Леуза” приймають дані від датчиків, візуалізують інформацію на дисплеї в графічному та числовому вигляді, ведуть та підтримують базу даних реального часу, розраховують оптимальні режими і видають відповідні рекомендації. В якості найбільш важливої технологічної інформації, що відображається на інформаційній панелі системи є зусилля на гаку, глибина забурення, тиск, тип операції, положення інструменту. Система відображає поточні числові значення параметрів, зображає основні вузли бурового устаткування у вигляді мнемосхем, візуалізує стан поточної ситуації на основі даних реального часу та підтримує ієрархію системних подій ранжованих в часі (нештатні ситуації, попередження). Система також оцінює ступінь зношеності долота і підтримує обмеження щодо вартості метра проходки.

Новітні версії системи (наприклад RT-Leuza [13]) забезпечують додаткові можливості: а) віддалений моніторинг і корекція процесу буріння в режимі реального часу; б) передача експертних порад оператору на буровій; в) паралельний перегляд процесу на кількох свердловинах; г) відображення виділених параметрів процесу буріння в режимі реального часу на моніторі з стратифікацією по часу та глибині. Впровадження такої технології дозволяє знизити непродуктивний час буріння, мінімізувати порушення технології буріння та відхилення від регламенту, підвищити загальну економічну ефективність свердловини.

Станція “Геотест-5” [13] забезпечує автоматизацію процесу збору геологічної і технологічної інформації в процесі буріння, контроль виділених

параметрів буріння, оцінку поточного стану бурового обладнання, уникнення нештатних ситуацій. Система в основному застосовується для буріння пошукових і розвідувальних свердловин на нафту і газ з можливістю віддаленого моніторингу свердловини. Система дозволяє контролювати не менше 19 параметрів за допомогою відповідних давачів. В якості основних технологічних параметрів контролюється зусилля на гаку, крутний момент на роторі, момент на ключі, витрата на виході і вході, тиск, рівень і густина промивної рідини, температура промивної рідини на вході і виході, обороти ротора та вала бурової лебідки та ін. Основою системи є технологічний модуль, що забезпечує збір, реєстрацію, контроль та візуалізацію виділених параметрів процесу буріння.

Система “Контур-2” (Росія) [14] є прикладом системи керування параметрами процесу буріння, що призначена для оперативного управління процесом буріння і запобігання нештатним ситуаціям. Функціональність системи забезпечується збором і обробкою даних від базового комплекту давачів параметрів буріння. Подібно до системи Леуза, “Контур-2” містить комплект давачів, засоби збору даних, монітор оператора бурової, комунікаційні засоби, комп’ютеризовані робочі місця, які об’єднані в локальну мережу. Монітор оператора відображає параметри буріння в числовому або графічному вигляді з використанням мнемосхем. Система “Контур-2” контролює наступні параметри: зусилля на долото, глибину, розміщення талевого блоку, витрату, об’єм, густину, оберти ротора, момент на роторі, положення над вибоєм, зусилля на гаку, тиск, механічну швидкість, хід насосу, момент на ключі. Система дозволяє: калібрування давачів, встановлення граничних значень вимірювальних параметрів, сигналізування при виході параметра за встановлені межі, розпізнавання та класифікацію технологічних ситуацій; архівування даних та результатів вимірювань, формування графічних та числових звітів. Система “Контур-2” забезпечується модулем керування, який генерує керуючі сигнали при перевищенні граничних значень

контрольованих технологічних параметрів (тиск бурового розчину, момент на роторі, зусилля на гаку).

Станція геолого-технологічного керування бурінням і дослідження свердловин “АМТ-121” (Росія) [15] призначена для керування процесом буріння нафтових і газових свердловин, оптимізації процесу буріння, запобігання нештатним ситуаціям. Станція забезпечує наступну функціональність: автоматичне приймання сигналів давачів та інклонометрії; автоматичну обробку та інтерпретацію сигналів; керування процесом буріння; контроль цементування; розпізнавання і класифікацію аварійних ситуацій; керування і прогнозування траєкторії свердловини; візуалізація отриманої інформації на моніторі; архівування значень отриманих параметрів.

Апаратно-програмний комплекс (АПК) “Волга” (Росія) [16] реалізовує автоматизацію керування процесом буріння нафтогазових свердловин з метою забезпечення оперативного управління процесом та уникнення нештатних ситуацій. Функціональність системи базується на обробці геолого-технологічної інформації від давачів на буровій, що поступає на контролер збору і передається на сервер. Крім того, в базі даних сервера містяться також проектні дані та дані геофізичного дослідження. Особливості сервера даних полягають в його масштабованості в реальному часі та жорсткого розділення рівнів доступу. Таким чином, система “Волга” дозволяє керувати процесом буріння в реальному часі та здійснювати оптимізацію процесів шляхом прийняття рішень (в тому числі і у віддаленому режимі). З точки зору інтелектуального управління АПК “Волга” – це інтелектуальна система з базою знань нештатних ситуацій та можливих ускладнень процесу буріння з розвинутою функцією самонавчання. Система приймає рішення та видає експертні рекомендації на основі експертної оцінки поточного стану свердловини. Функціональність системи дозволяє: а) збір інформації з давачів (каротаж, телеметрія); б) контроль технологічних процесів буріння; в) обробка і передача технологічної інформації в режимі реального часу із збереженням даних на сервері; г) комплексне нагромадження і збереження інформації по

свердловині; д) наявність візуалізації даних; е) засоби побудови двох і трьохмірних моделей; є) експертна підтримка процесу буріння, прогнозування і запобігання виникнення нештатних ситуацій та ускладнень; ж) не обмежувана кількість під'єднювальних давачів; и) не обмежувана кількість контрольованих параметрів, що визначається кількістю під'єднаних давачів; і) не обмежувана кількість розрахункових параметрів, що визначається кількістю під'єднаних давачів. Основними вимірювальними параметрами системи є: зусилля на гаку, тиск в нагнітальній лінії бурового розчину; глибина забою; момент скручування бурового інструменту на ключі; зусилля на долото; час опитування давача захоплення клинів.

Станція геолого-технологічних досліджень "Мега-АМТ" розроблена підприємством "Тюменьпромгеофізика" (Росія) [17] дозволяє здійснювати моніторинг дотримання технологічних режимів свердловини, контролю параметрів буріння, оптимізації робочих режимів буріння. Функціональність комп'ютеризованих станцій "Мега-АМТ" дозволяє: а) автоматичне приймання сигналів технологічних давачів та інклонометрії вибою; б) автоматичну обробку сигналів та їх інтерпретацію; в) керування бурінням (поглиблення вибою, спуско-підймальні операції, цементування); г) прогнозування траєкторії свердловини; д) візуалізація даних; е) нагромадження і збереження інформації по свердловинах. Особливістю програмного забезпечення станції є можливість автоматичного розпізнавання аварійних і передаварійних ситуацій роторного і турбінного буріння, а саме: злом бурової колони; посадка і затяжка бурової колони; обвал стінок свердловини; падіння тиску; надмірне зусилля на долото; поглинання; несправність насосу.

Система наземного контролю процесу буріння нафтових і газових свердловин Бур-САК (Україна) [12, 18] призначена для автоматичного контролю технологічних параметрів процесу буріння. Функціональність системи забезпечує: а) вимірювання, автоматичний збір, реєстрацію та накопичення даних про контрольовані параметри; б) обчислення розрахункових параметрів на основі існуючих методик і алгоритмів; в)

відображення контрольованих параметрів; г) контроль виходу технологічних параметрів за наперед встановлені граничні значення з сигналізаційним попередженням; д) моніторинг контрольованих параметрів у виділених часових проміжках; е) формування файлів даних про технологічний процес.

Комплекс засобів наземного контролю і керування процесом буріння нафтових і газових свердловин СКУБ-М2 (Україна) [12, 18] забезпечує контроль основних параметрів процесу буріння свердловин. Функціональність системи включає вимірювання технологічних параметрів, їх реєстрацію, контроль та відображення.

Система технологічного керування параметрами буріння “СГТ-мікро” (Росія) [19] дозволяє: а) автоматичний збір, обробку, обчислення похідних параметрів та відображення інформації про процес буріння; б) облік та відображення основних параметрів в цифровому та графічному вигляді; в) контроль технологічних параметрів по відношенню до наперед встановлених граничних значень з сигналізаційними попередженнями.

Комплекс засобів наземного контролю і управління процесом буріння “КУБ-2” (виробник ОАО “Геофит”, Росія) [20] дозволяє вимірювання, реєстрацію та індикацію значень контрольованих параметрів технологічного процесу буріння, а також індикацію ситуацій перевищення допустимих граничних значень контрольованих параметрів. Апаратні рішення комплексу “КУБ-2” дозволяють інтеграцію цифрових схем обробки даних, використання цифрових та супутникових каналів зв’язку, що дозволяє підвищити швидкість передачі даних і надійність збору інформації.

Існуючі системи автоматизованого контролю і управління технологічним процесом буріння (UWI, Леуза, СКУБ та ін.) базуються на керуванні виділеними технологічними параметрами процесу. В ряді робіт [21-23] досліджується питання обробки технологічної інформації отриманої на основі таких систем в формі наборів значень технологічних параметрів які можуть бути співставлені з відомими діапазонами зміни, засобами існуючих модифікованих або власних алгоритмів та технологічних методик. Основним

результатом таких досліджень є розробка алгоритмів оптимізації процесу буріння, зменшення кількості ускладнень, уникнення нештатних ситуацій (аварій). Ряд досліджень [22, 24, 25] присвячено питанню розробки автоматизованих систем ідентифікації станів буріння та станів бурової установки.

Системи класу SCADA [26,27] використовуються на всіх етапах виробничого циклу нафтогазової промисловості, технологічні операції в якій характеризуються віддаленістю і розосередженістю. Тому SCADA-системи забезпечують для даних операцій повнофункціональне керування (в тому числі з віддалених центрів доступу). Основними параметрами керування є: заводнення, витік, аварійні відключення, витрата нафти і газу, сумарна витрата, тиск в нагнітальній лінії, тиск на гирлі свердловини, стан насосів, рівень нафти в пластах, стан обладнання на станції збору та ряд інших.

Фірма Motorola (США) розробила систему MOSCAD [28], як подальший розвиток класичних SCADA-систем з більш ефективним контролем засобів обробки великих масивів і наборів даних. Архітектура системи MOSCAD включає: а) інтелектуальні дистанційні термінальні пристрої; б) головний центр управління; в) телекомунікаційні канали зв'язку; г) давачі; д) електромеханічні пристрої. Системи MOSCAD (SCADA) використовують аналогові та дискретні вхідні сигнали для керування пристроями та процесами, а саме: тиск нафти і газу, сигналізація, аварійне відключення, пуск і зупинка насосів, продуктивність насосів, стан насосів, клапани приводів, позиціонування дроселя, вологість, температура.

Система DrillView [29], розроблена компанією Maritime Hydraulics (Норвегія) є модульною системою керування і моніторингу, застосування якої є масштабованим, тобто система застосовна в діапазоні від мінімальної конфігурації традиційного бурового устаткування до новітніх комплексних систем буріння з повністю автоматизованими технологічними процесами (операції з трубами, цементування, контроль бурового розчину). Основними параметрами, для відображення є: механічна швидкість буріння, крутний

момент, глибина проходки долота, загальна глибина, вхідний/вихідний потоки бурового розчину, висота гака та ін.

Система infoDRILL [30] компанії Ventec (Німеччина) є новітньою системою вимірювання параметрів буріння на базі серверних технологій. Виділені параметри буріння доступні в режимі реального часу для операторів бурової, бурових майстрів, а також дистанційно, при чому інформація архівується по часових проміжках. Система дозволяє налаштування параметрів, встановлення аварійної сигналізації, масштабування та ряд інших операцій в режимі сенсорного моніторингу. Особливістю системи є контекстно залежний адаптивний вивід релевантної інформації по поточній операції (вибір режиму буріння, спуско-підймальні операції, режими роботи насосів і т.д.). Система infoDRILL встановлюється в кабіні оператора бурової і дозволяє замінити всю існуючу систему контрольно-вимірювальних приладів. Нижній рівень системи базується на програмованих логічних контролерах Siemens S7.

Комплексні системи автоматизованого керування процесом буріння OEM Digital Drilling Control System [31] компанії LeTourneau Technologies Drilling Systems, Inc. (США) забезпечують повний спектр функцій автоматизованого керування, що дозволяють в умовах сучасного буріння поєднувати контроль нагнітальних насосів, приводу, обертання, контроль бурової лебідки та контроль споживання енергії. Системи даного класу дозволяють ефективно керувати нагнітальним насосом, використовувати режим автобуріння, режим ефективного управління кінетичною енергією, що в цілому підвищує і оптимізує технологічний процес. Система забезпечує керування буровим обладнанням на основі новітніх комунікаційних засобів, розміщених в ключових точках бурової установки. Система використовує консоль управління, сенсорні інтерфейсні термінали та засоби контролю на основі джойстика.

Технології TTS Energy [32] компанії TTS Group ASA (Норвегія) використовують інноваційні пульти класу X-COM для оператора бурової,



системи керування процесом буріння On Track, новітні прилади керування буровим обладнанням, інформаційні мережі і сервери архівних даних для роботи на бурових установках різних розмірів та рівнів складності. Система On Track дозволяє здійснювати оптимальне керування і керування буровим обладнанням та технологічними процесами, шляхом візуалізації всієї необхідної інформації. Особливістю пультів оператора X-COM є можливість прямого (віддаленого) управління всіма доступними процесами і обладнанням. Пульт є ефективним для проведення технологічних тренінгів та навчання персоналу з використанням емуляцій та симуляцій технологічних процесів.

Таким чином, проведений аналіз існуючих систем дозволяє виділити в них недостатню розвинутість функцій інтелектуальної ГППР, зокрема щодо уникнення аварійних ситуацій у процесі буріння та максимально швидкого вирішення аварій, що вже мали місце. Тому сформульована задача розробки системи інтелектуальної підтримки прийняття рішень (СІППР) у процесі буріння на основі обмежень накладених на контрольовані технологічні параметри є доцільною та значимою з наукової та практичної точок зору.

### **1.3. Особливості контролю та автоматизації процесів керування бурінням нафтових і газових свердловин**

Розвиток новітніх технологій буріння [33,34] вимагає дослідження можливих шляхів зниження витрат на основний та допоміжні технологічні процеси та підвищення загальної продуктивності шляхом застосування методів автоматизованого контролю. В контексті даної проблеми важливого значення набувають вимоги щодо експертного досвіду операторів технологічного процесу під час активної фази процесу буріння, при якій оператор контролює осьову силу на долото, тиск, необхідний для помпування розчину в пласт та швидкість обертання долота відповідно до зміни природи геологічних порід, через які проходить буріння. Таким чином, початкова стратегія автоматизації полягає в контролі процесу буріння на основі

параметрів швидкості і тиску подачі після позиціювання свердловини та закріплення її гирла.

Основні завдання, які вирішуються при побудові стратегії контролю нафтогазового буріння полягають в мінімізації або повному усуненні технологічних помилок оператора в процесі буріння з максимізацією ступеня продуктивності та утримання загальних витрат на буріння на заданому, допустимому рівні. Теоретичні дослідження в області контролю буріння [4,5,12] та його оптимізації [21-23, 35-39] базуються на підходах щодо побудови уніфікованої моделі процесу буріння.

На сьогоднішній день створено ряд математичних моделей, що в тій чи іншій мірі дозволяють описувати технологічний процес буріння нафтових і газових свердловин. Аналіз існуючих моделей [5, 40-43, 44-46] показує, що основними параметрами в них є: осьова сила на долото  $F$ , швидкість його обертання  $n$ , витрати бурового розчину  $Q$ . Проте, очевидно, що на сьогоднішній день не існує деякої універсальної уніфікованої моделі, що дозволяла б абсолютно точно описувати динамічні та статистичні аспекти процесу буріння. Тому існуючі математичні моделі слід інтерпретувати як наближені.

Як найбільш досліджувані, розглядаються математичні моделі, що використовуються для оптимізації технологічного процесу буріння. На формальному рівні вони представляються трьома диференціальними рівняннями, що описують механічну швидкість  $V_m$ , швидкість зносу оснащення  $\mu$  і опор  $g$  долота, що визначаються осьовою силою на долото  $F$  і швидкістю обертання  $n$ :

$$\begin{aligned} \frac{dh}{dt} &= V_0(F, n) \cdot f(\varepsilon) = f_1(F, n, \varepsilon); \\ \frac{d\varepsilon}{dt} &= f_2(F, n, \varepsilon); \\ \frac{dg}{dt} &= f_3(F, n), \end{aligned} \quad (1.1)$$

де  $h$  – проходка долота;  $\epsilon$  – відносний знос оснащення долота;  $V_0$  – початкова механічна швидкість буріння.

Модель *Galle – Woods'a* [40,41] описує технологічний процес буріння системою диференціальних систем в просторі трьох змінних:

$$\begin{aligned} \frac{dh}{dt} &= C_f \frac{F^{\alpha_f} r(n)}{a_f^p}; \\ \frac{d\mu}{dt} &= A_f^{-1} \frac{i_f}{a_f m_f}; \\ \frac{dg}{dt} &= \frac{n}{S_Q \Phi(F)}; \\ F \cdot n &= \text{const} \end{aligned} \quad (1.2)$$

де  $h$  – проходка,  $\mu$  – відносне зношення оснащення долота,  $g$  – відносне зношення опор долота. В даному випадку важливим є те, що описується швидкість зношення оснащення долота в залежності від абразивних властивостей породи і режимних параметрів.

З структурної точки зору, моделі ВНДІКРнафта [42,45]:

$$\begin{aligned} \frac{dh}{dt} &= V_o(F) \xi_{oc}; \\ \frac{d\xi_{oc}}{dt} &= -B_1 F^{\alpha_1} \xi_{oc}; \\ \frac{d\xi_{on}}{dt} &= -B_2 F^{\alpha_2}; \\ F = \text{var}, n = \text{const}; \xi_{oc}(0) &= 1, \xi_{on}(0) = 1, \end{aligned} \quad (1.3)$$

де  $B_1, B_2, \alpha_1, \alpha_2$  – коефіцієнти, які залежать від конкретних геолого-технічних умов буріння свердловини;  $\xi_{oc}, \xi_{on}$  – відносні висота зубців і технічний стан опор долота та модель запропонована Н.В.Габашвілі і Т.А. Кірієм [43]:

$$\begin{aligned}
\frac{dh}{dt} &= AF^{\varepsilon_1} n^{\beta_1} \frac{1}{(1 + K\xi_{oc})F}; \\
\frac{d\xi_{oc}}{dt} &= \frac{BF^{\alpha_2} n^{\beta_2}}{1 + K\xi_{oc}}; \\
\frac{d\xi_{on}}{dt} &= CF^{\alpha_3} n^{\beta_3}; \\
F &= \text{var}, n = \text{var}; \xi_{oc}(0) = 0, \xi_{on}(0) = 0,
\end{aligned} \tag{1.4}$$

де  $A, B, C, K, \alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2, \alpha_3, \beta_3$  – параметри і коефіцієнти, які залежать від конкретних умов буріння, мають структуру схожу з моделлю *Galle – Woods*'а.

Заслугує на особливу увагу модель створена в ІФНТУНГ професорами Г.Н. Семенцовим та М.І. Горбійчуком [5, 44-46]:

$$\begin{aligned}
\frac{dh}{dt} &= \frac{K_1 F^{\alpha_1} n^{\beta_1}}{\varepsilon}; \\
\frac{d\xi}{dt} &= K_2 F^{\alpha_2} n^{\beta_2}; \\
\frac{d\xi_{on}}{dt} &= K_3 F^{\alpha_3} n^{\beta_3}; \\
F &= \text{var}, n = \text{var}; \varepsilon(0) = 1, \xi_{on}(0) = 0,
\end{aligned} \tag{1.5}$$

де  $\varepsilon$  - оцінка відносного зношення оснащення долота;  $K_1, K_2, K_3, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \beta_1, \beta_2, \beta_3$  – коефіцієнти і показники степеня, які залежать від типу долота і фізико-механічних властивостей гірських порід;  $\xi_{on}$  - знос опор долота.

Особливість математичної моделі, побудованої в Всесоюзному науково-дослідному інституті бурової техніки [44]:

$$\begin{aligned}
V_M &= \frac{an^\alpha \bar{F}^2}{1 + (B\bar{F})^4} e^{-\beta n \bar{F}^2 t}; \\
t_o &= \frac{C_o}{\beta n \bar{F}^2}; \\
q &= \frac{(t_o + T)C_\delta + d}{h},
\end{aligned} \tag{1.6}$$

де  $a, v, \alpha, \beta$  - параметричні коефіцієнти;  $C_o$  – ступінь зношення опор долота ,

відносно одиниці; у нового  $C_0 = 0$ , у повністю зношеного  $C_0 = 1$ ;  $t_0$  – час зношення опори чи тривалість роботи долота;  $\bar{F} = F/D$  – відносна осьова сила на одиницю діаметру долота, т/см;  $T$  – технологічна пауза між періодами механічного буріння (спуск, підйом, необхідні допоміжні операції і т.д.), год;  $q$  – вартість метра проходки свердловини, грн/м;  $C_6$  – вартість години роботи бурової установки, грн.;  $d$  – вартість долота, грн, є можливість прогнозування на її основі процесу очищення вибою свердловини.

Основна концепція даного напрямку полягає в тому, що чим більшими є наші знання і розуміння системи, тим краще вона може бути контрольована в автоматичному режимі і відповідно автоматизована.

В нафтогазовій промисловості результати отримані в лабораторних та польових умовах дозволяють визначити співвідношення між основними змінними даного процесу такими як: швидкість обертання, крутний момент, зусилля на долото і механічна швидкість буріння. Отримані дослідниками рівняння дозволяють виражати механічну швидкість буріння і крутного моменту в термінах контрольованих змінних, а саме – зусилля на долото і швидкості обертання для певного типу породи. Такі рівняння можуть бути використані для представлення залежності змінних процесу буріння і для симуляції бурових операцій. Проте домени даних змінних суттєво обмежуються геологічними характеристиками, характеристиками процесу буріння в загальному випадку, типом долота та фізико-хімічними властивостями бурового розчину, що використовується при їх означенні. В усіх випадках результати повинні розглядатися як специфічні щодо набору припущень і умов, на яких базуються дані дослідження.

Таким чином, потрібні обширні польові та лабораторні тести та відповідний аналітичний аналіз для визначення коректних коефіцієнтів в даних рівняннях.

Можна виділити три категорії впливаючих факторів:

1. Технологічні ефекти пов'язані з передачею зусилля на долото і загальним опором породи. Модель загального опору представляє реакцію

“порода-долото” в залежності від зусилля, що передається на долото, а також швидкості обертання, що базується на концепції енергії, зосередженої в уламках бурової породи, що розглядається як неідеальне середовище передачі. Загальна модель системи таким чином може бути описана деякою скінченною множиною звичайних диференціальних рівнянь [15,16].

2. Технологічні ефекти пов’язані із взаємодією долота і бурової породи, а також загальної поведінки уламків породи. Існуючі теоретичні підходи базуються на механізмах зусилля і руйнування породи під дією долота. Такі дослідження дають змогу виконання прогнозування процесу руйнування породи, що дозволяє послідовно визначати механічну швидкість буріння. Хоча на основі таких досліджень складно побудувати єдину аналітичну модель у зв’язку з впливом таких факторів як механіка уламків, геометрія долота, варіації масивів гірських порід, властивості промивальних рідин, гідравліки долота, зусилля на долото, а також додаткових експлуатаційних впливів, що є відомими або невідомими, структурованими, неструктурованими або слабо структурованими, а також відповідно визначеними і невизначеними, чіткими, нечіткими та розмитими. Таким чином, відповідно до виділених складностей та комплексності процесу буріння ряд дослідників [49-54] вибирають шлях емпіричного дослідження, що відповідно базується на поєднанні лабораторних та польових тестів. Побудовані моделі доповнюються також аналізом процесу зношення долота і процесом промивки стовбура свердловини [48,55].

3. Технологічні ефекти пов’язані з критеріями ефективності буріння, що базуються на специфічних видах енергії. В роботі [56] запропоновано ідею оцінки специфічного виду енергії гірської породи, яка визначається як мінімальна енергія необхідна для руйнування одиниці об’єму гірської породи, що відповідно розглядається як її деяка фундаментальна властивість. В дослідженнях [57-60] дана ідея використовується для обчислення крутного моменту долота і оцінки механічної швидкості проходки на основі співвідношення виділеного виду енергії гірської породи по відношенню до енергії руйнування, що передається долотом. Проте експериментальні дані

наведені в дослідженні [48, 61] показали що фактор ефективності, який обчислюється на основі співвідношення енергії руйнування долота до енергії стійкості гірської породи не є постійним і залежить відповідно від типу гірської породи та інших додаткових факторів. В той же час, вплив таких змінних факторів як стан гірської породи, ступінь зношення долота і ефективність видалення бурового шламу робить надто складним опис процесу буріння шляхом побудови єдиного статичного рівняння. Тому ефективність більшості досліджень в даній області базується на так званій моделі “ідеальної очистки” запропонованої в роботі [54], що дозволяє оцінювати механічну швидкість, а також значення крутного моменту як базових елементів моделі процесу буріння.

Задача комп'ютеризації контролю буріння нафтових і газових свердловин шляхом впровадження методів та засобів інформаційних, програмних та комп'ютерних технологій розглядається як актуальний напрям розвитку нафтогазової промисловості. В даному випадку стратегії контролю типowo базуються на задачі мінімізації витрат на буріння і зводяться до теоретичних та емпіричних технік оптимізації зусиль на долото та вибору швидкості обертання. Базово такий підхід вимагає чисельної оцінки розглядуваних змінних, таких наприклад як механічна швидкість, зношення опор долота, зношення зубців, витрата ресурсів. Крутний момент також розглядається в більшості технологій і завдання полягає в утриманні його в середині встановлених граничних максимальних та мінімальних значень шляхом послідовного уточнення швидкості обертання та зусилля на долото. В промисловому масштабі такі системи використовуються компанією Humble Oil Co [10].

Таким чином, впровадження ефективної стратегії буріння дозволить утримувати процес буріння в рамках заданих експлуатаційних умов, з врахуванням змінних властивостей гірських порід при спробах максимізації механічної швидкості і мінімізації зношення долота. Тому мета даного процесу полягає не в тому, щоб досягнути такого рівня контролю, який би

дозволив усунути потребу у використанні операторів відповідних технологічних процесів, а завдання полягає в покращенні економічної ефективності. Загальна задача контролю буріння НГС зводиться до автоматизації виділених функцій технологічного процесу, що відповідно допоможе оператору покращити загальну ефективність процесу, шляхом зростання його ефективності і зменшення витрат на буріння в цілому та, наприклад, зношення долота зокрема. На теоретичному рівні, задача спостереження визначених параметрів включатиме підтримку прийнятних цільових рівнів крутного моменту, шляхом послідовної зміни швидкості обертання і зусилля на долото. Відповідно контроль механічної швидкості в середині такої системи необхідно утримувати на рівні максимальних допустимих значень, з метою запобігання виходу процесу за межі нижньої та верхньої границь, що попередньо встановлені для інших значимих параметрів (що в основному зводиться до контролю крутного моменту).

В описаних класах систем незважаючи на їх високу функціональність в термінах автоматизації процесу буріння існують також проблеми контролю, які є складними для автоматизації, незважаючи на високий новітній розвиток програмних та апаратних засобів. Так, наприклад професійні навички досвідчених операторів бурової дозволяють виділити елементи їх знань та досвіду які вони самі описують як “відчуття” зміни гірської породи через яку здійснюється проходка, що дозволяє їм в ручному режимі змінювати швидкість обертання і зусилля на долото з метою досягнення оптимальної ефективності буріння. Тому вважається, що процес автоматизації реалізовано успішно, якщо навички оператора емулюються системою контролю з метою модифікації відповідних технологічних функцій процесу буріння. Така логіка знань є складною і може бути досягнута тільки шляхом детального аналізу послідовності технологічних операцій, структури технологічного процесу буріння в цілому та оцінки технологічних помилок, що виникали в ході проведення певних технологічних операцій, розробки відповідної методики їх



контролю та запобігання в ході фактичного процесу буріння або в режимі симуляції на відповідних тренажерах.

Проведення експериментального тестування розглядається як суттєва процедура на шляху побудови реалістичної моделі процесу буріння і таким чином реалізації, в кінцевому підсумку, комп'ютерного симулятора, який здатний реалізовувати певний алгоритм контролю. Реалізація такої моделі дозволяє визначити та описати динаміку силових приводів, описати взаємодію долота і породи; виконати валідацію моделюючих формальних та емпіричних рівнянь; класифікувати знання про динаміку процесу буріння; виділити знання про можливі нештатні ситуації в процесі буріння та методи запобігання їм. Очікуваний результат дозволить ідентифікувати загальну модель процесу буріння яка може бути інтегрована в програмний симулятор зв'язаний з автоматизованою системою керування.

Відповідно нештатні ситуації визначатимуться як ситуації виходу регульованих параметрів за встановлені граничні значення. Проте, як показує досвід, фізико-механічні властивості буріння не дозволяють вимірювати більшість параметрів на границі “долото-порода”.

Оскільки основною задачею дослідження є контроль технологічного процесу, то побудова відповідної моделі повинна включати наступні кроки: 1) ідентифікація вхідних та вихідних функцій передачі; 2) ідентифікація процесу на границі “долото-порода”; 3) ідентифікація статичних взаємозв'язків між механічною швидкістю, крутним моментом та іншими змінними (вводу-виводу, парних залежностей); 4) ідентифікація природи статичних і динамічних взаємозв'язків на основі функціональних умов (в формі установок оператора, очікуваний тип породи).

Результати аналізу даних буріння свердловин дозволяють також виділити наступні правила та обмеження: 1) дані, що характеризують механічну швидкість показують її монотонність по відношенню до тиску, необхідного для помпування розчину в пласт, а також монотонність механічної швидкості по відношенню до характеристик швидкості обертання.

Таким чином, можна бачити, що збільшення тиску, необхідного для помпування розчину в пласт і швидкості обертання збільшуватиме також механічну швидкість до точки забурення долота в породу при умові не порушення накладених обмежень в формі: а) рівень вібрації, б) тиск промивної рідини; 2) дані, що характеризують проходку за оберт показують монотонність даної характеристики по відношенню до тиску, необхідного для помпування розчину в пласт. Відповідно, збільшення тиску, необхідного для помпування розчину в пласт призводитиме до збільшення відношення механічної швидкості до швидкості обертання; 3) в сланцевих породах співвідношення механічної швидкості до швидкості обертання спадає із зростанням швидкості обертання при постійному тиску, необхідному для помпування розчину в пласт; 4) як результат співвідношення механічної швидкості до швидкості обертання може бути збільшено шляхом збільшення тиску, необхідного для помпування розчину в пласт при сталій швидкості обертання для певних типів гірських порід або шляхом зниження швидкості обертання в сланцевих породах при постійному тиску, необхідному для помпування розчину в пласт. Як базову модель можна використати модель утворену на основі характеристики механічної швидкості, що дозволить реалізацію програмного стимулятора для побудови інтерфейсу з розвинутим алгоритмом контролю, що забезпечує налаштування, тестування та валідацію відповідних стратегій автоматизованого контролю. Таким чином, виділені особливості контролю та автоматизації процесів керування бурінням НГС як центральний елемент включає нештатні ситуації, що розглядаються як наслідок виходу контрольованих параметрів за встановлені граничні значення.

#### **1.4. Аналіз нештатних ситуацій процесу буріння з метою представлення причин їх виникнення в формі технологічних обмежень**

Новітні технології буріння використовують механізми нагромадження інформації в формі баз даних та баз знань щодо геологічних та геофізичних

умов та особливостей процесу буріння. Рівень наповнення таких джерел даних залежить від етапу життєвого циклу родовища. Зокрема, в умовах пошукового буріння, інтелектуальні автоматизовані системи та оператори технологічного процесу можуть опиратися на них в незначній мірі, в зв'язку з їх початковою наповненістю, а також низьким рівнем структуризації та класифікованості входжень в формі даних та знань. Проте, із збільшенням кількості пробурених свердловин, зростання рівня та якості виконуваних вимірювань і застосування процедур верифікації отриманих даних та знань відповідно збільшуватиметься рівень наповненості джерел даних та знань про родовище. Очевидно, що ефективність автоматизованих систем, що застосовуються для керування технологічним процесом буріння визначатиметься рівнем достовірності даних та знань щодо геологічних характеристик розрізу. Як показує досвід, ускладнення як певний вид порушення регламентованого перебігу технологічного процесу виникають навіть в найбільш новітніх та інтелектуалізованих системах автоматизації процесу керування бурінням, що було описано вище. Дослідження даної проблеми [62,63], показують що причиною появи нештатної ситуації є виникнення певного виду невідповідності геологічних та геофізичних характеристик розрізу, опису та структуризації параметрів технологічного процесу буріння закладених на етапі проектування та складання технологічного регламенту. Нештатні ситуації приводять до часових та фінансових втрат і відповідно негативно впливають на техніко-економічні показники процесу буріння. Тому виявлення можливих причин нештатних ситуацій та опис їх в формі обмежень, що накладаються на технологічний процес буріння є важливою науково-практичною задачею, вирішення якої дозволяє утворювати формалізовані структури технологічних обмежень в базах знань автоматизованих інтелектуальних системах керування та СППР. Аналіз джерел [62,63] дозволив виділити основні види нештатних ситуацій (ускладнень) та причин їх виникнення, класифікованих на рис. 1.5.

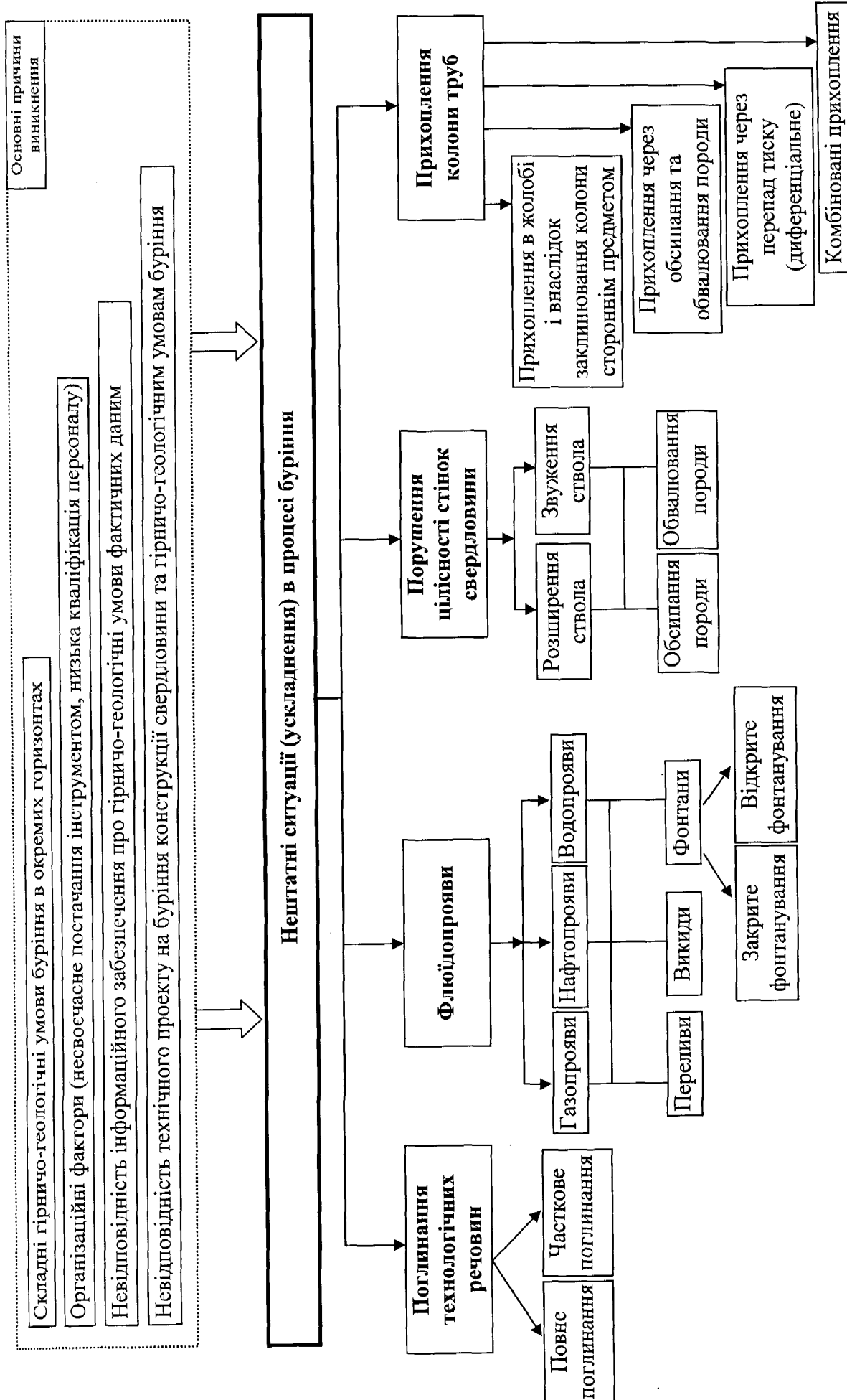


Рис.1.5. Структуризація нештатних ситуацій, що виникають в процесі буріння

Проаналізовані види нештатних ситуацій дозволили визначити множини технологічних обмежень, що задають можливі причини їх виникнення [64,65].

*Технологічні обмеження для нештатної ситуації “Поглинання технологічних речовин”:*

- 1) дотримання рівноваги гідравлічного тиску в свердловині і в поглинаючому горизонті;
- 2) обмеження по геологічній структурі пластів (гранулярна пористість, тріщинуватість, кавернозність);
- 3) обмеження по структурі рідин (в'язкі, структуровані);
- 4) обмеження по градієнту поглинання;
- 5) обмеження по структурі поглинаючого пласту (відкриті тріщини, каверни, система тріщин захищена від дії тиску);
- 6) обмеження щодо величини напружень (розміщення тріщин щодо осі свердловини, геостатичний тиск, технологічні напруження, пружні константи породи, пористість пласта, розмір і форма тріщин);
- 7) обмеження щодо в'язкопластичних властивостей промивної рідини;
- 8) обмеження по властивостях промивних рідин (густина);
- 9) обмеження щодо гідродинамічної обстановки (буріння, спуск-підйом, цементування, тривалість технологічної операції, стан ствола свердловини);
- 10) обмеження по характеристиках поглинаючого пласта;
- 11) обмеження по реологічних властивостях промивних рідин;
- 12) обмеження щодо режиму (швидкості) спуску бурильного інструменту;
- 13) обмеження щодо роботи бурових насосів.

*Технологічні обмеження для нештатної ситуації “Флюїдопрояви”:*

- 1) обмеження щодо рівноваги гідравлічного тиску в свердловині і тиску в проявлю чому пласті;
- 2) обмеження пов'язані з порушенням технології проводки свердловини (низька густина промивальної рідини, зменшення гідродинамічного

- тиску, падіння рівня промивальної рідини в свердловині, утворення штучних зон АВПТ (анормально високого пластового тиску) );
- 3) обмеження щодо густини промивальної рідини;
  - 4) обмеження щодо рівня стовпа промивальної рідини в свердловині (поглинання промивальної рідини з падінням рівня, недолив свердловини при підйомі колони труб, перетоки між трубним і затрубним простором або пластами );
  - 5) обмеження щодо витрати промивальної рідини на вході та виході із свердловини;
  - 6) обмеження щодо реологічних властивостей і хімічного складу фільтрату;
  - 7) обмеження щодо зміни тиску в нагнітальній лінії бурового насосів;
  - 8) обмеження щодо параметрів промивальної рідини ( $\rho$ ,  $Q$ ,  $T$ ) та її рівня у прийомних ємностях;
  - 9) обмеження щодо підйому колони труб (зниження тиску, гідравлічні та інерційні опори руху, зменшення стовпа рідини);
  - 10) обмеження щодо зміни проникності проявляючого пласта;
  - 11) обмеження щодо герметизації устя свердловини та використання превенторів;
  - 12) обмеження щодо якості промивальної рідини на виході з свердловини (густина, вміст газу);
  - 13) обмеження щодо рівня надлишкового тиску в обсадній колоні;
  - 14) обмеження щодо вмісту сірководню в промивальній рідині.

*Обмеження для нештатної ситуації “Порушення цілісності стінок свердловини”:*

- 1) обмеження щодо механічної міцності гірської породи (статичні навантаження, знакозмінні навантаження);
- 2) обмеження щодо механічних характеристик і напруженого стану породи (набухання породи, наявність глини та глиновмісних порід, утворення фільтраційної кірки);

- 3) обмеження по зрівноваженню стану стовпа свердловини (механічне руйнування, розмив, розчинення, розтоплення, пластична течія, випучування);
- 4) обмеження щодо утворення каверн (наявність глиновмісних порід, порушення механічної міцності породи, наявність обсипань та обвалювань, поєднання процесів механічного руйнування і зменшення міцності);
- 5) обмеження по соленосних (хемогенних) відкладах (утворення розмивних каверн, обвалювання прошарків глинистих та нерозчинних порід, каверноутворення від розтеплення);
- 6) обмеження щодо виносу додаткового шламу (форма і розміри уламків, збільшення тиску при промиванні, затягування інструменту, прихоплення);
- 7) обмеження щодо утворення жолобів в пластичних породах (наявність глини, високі значення адгезії);
- 8) обмеження щодо промивальних рідин з малою водовіддачею;
- 9) обмеження щодо бурінні мерзлих порід (підтримка температурного режиму свердловини, підтримка інтенсивності теплообміну);
- 10) обмеження щодо розтоплення мерзлої породи (утворення каверн, збільшення вмісту шламу, обвалювання устя);
- 11) обмеження щодо зминання обсадної колони (замерзання води, наявність каверн, ексцентричне розміщення труб до відношенню до області замерзання);
- 12) обмеження щодо розміщення циркуляційних агентів (стиснене повітря і піни, розчини на нафтовій основі, глинисті розчини);
- 13) обмеження щодо інтенсивності розтоплення (застосування промивальних рідин з меншою теплопровідністю, застосування рідин з меншою фільтрацією, застосування промивальних рідин з меншою температурою, забезпечення ламінарного режиму руху, підведення енергії ззовні).

*Технологічні обмеження для нештатної ситуації “Прихоплення колони труб”:*

- 1) обмеження щодо перепаду тиску (буріння з промиванням розчином малої густини, час знаходження колони без руху);
- 2) обмеження щодо властивостей промивальної рідини (мінімальна кількість твердої фази, утворення щільної кірки при фільтрації);
- 3) обмеження щодо заклинювання при спуску (спрацювання долота по діаметру, наявність зон локального викривлення свердловини);
- 4) обмеження щодо очистки вибою (включення шламометаловловлювача, періодична закачка в'язко-пружної рідини);
- 5) обмеження щодо обвалу породи (підвищення тиск на стояку, збільшення моменту на роторі);
- 6) обмеження щодо утворення сальників (розбурювання глинистих відкладів, розбурювання гранулярних високо проникних пластів, формування глинистої кірки, забруднення свердловини шламом, незадовільне промивання, неякісна очистка промивальної рідини, відсутність проміжних промивань, відсутність пророблень пробуреного інтервалу, наявність ступінчастості ствола, наявність каверн та жолобів, негерметичність бурильної колони, велика кривизна ствола);
- 7) обмеження щодо осідання твердої фази (глини, обважнювачі) і шламу (порушення технології буріння, простої в бурінні, незадовільні структурно-механічні властивості промивальної рідини);
- 8) обмеження щодо стійкості стінок свердловини (роторний спосіб розбурювання пластичних порід, застосування відповідної КНБК, невелике осьове навантаження, фіксовані значення частоти обертання, фіксоване значення питомої витрати промивної рідини) та ін.

Таким чином, проведений аналіз нештатних ситуацій процесу буріння дозволив визначити як основну форму структурного представлення причин їх виникнення конструкції технологічних обмежень, що робить також ефективно використання даних засобів в процедурах прийняття технологічних рішень.



## 1.5. Аналіз процедур прийняття рішень у процесі буріння нафтових і газових свердловин

Витрати на спорудження і підтримку НГС складають до 50% всіх капітальних і експлуатаційних вкладень. Крім того заплановані витрати часто перевищуються, оскільки детальних характеристик гірської породи і флюїдів, як правило, не є недостатньо, існуючі описи нештатних технологічних ситуацій є не повними, а методики їх вирішення переважно є відсутніми. Внаслідок таких невизначеностей, пов'язаних з геологією нафтогазоносного пласта і прийняття рішень в режимі реального часу, на сьогоднішній день, відіграє вирішальну роль у процесі буріння свердловин, оскільки експерименти з буровим обладнанням, як правило, є дорогими і не завжди оптимальними. Новітні технології буріння дозволяють використовувати давачі, встановлені на буровій площадці як на поверхні так і на вибої, що дозволяє вимірювати важливі технологічні параметри, такі як швидкість обертання долота, обваженість бурового розчину, зусилля на долото, властивості пласта (тиск, гранульованість, пористість, проникність).

В ряді досліджень [66 - 68] виконується спроба інтеграції початкових моделей процесів в замкнутих контурах з існуючими технологіями буріння. В даному класі задач прийняття рішень виконується з метою корекції траєкторії свердловини базуючись на зібраній інформації зворотного зв'язку під час буріння. Як показують дослідження [69 - 71], процеси буріння зумовлюються рядом умов на поверхні і на вибої. Використання на робочій площадці бурової установки стандартних (серійних) давачів для типових вимірювань (обертання долота, обваженості бурового розчину, напруженості, зусилля на долото) і в процесі збору інформації на вибої для вимірювання тиску і температури, дозволяють відповідно оцінити деякі важливі параметри та властивості пласту нафти і газу такі як тиск, гранулярність, пористість, проникність. Проте, в даному випадку, в процесі ідентифікації змінних критичних станів

залишаються невизначеними певні параметри, а саме характеристики тиску формації гірської породи та характеристик багатофазових потоків.

Для досягнення високої успішності і безпеки процесу буріння, а також максимально повного уникнення можливих нештатних ситуацій використовується ряд симуляторів [72 - 74], які дозволяють поєднувати зібрані дані з давачів з існуючими моделями та прототипами.

Вимірювання під час буріння є ключовим для процедур спостереження і передачі сукупності умов на вибої таких як тиск, температура на вибої і дані про траєкторію свердловини.

Експлуатаційні характеристики буріння можуть бути спрогнозовані на основі використання моделей класу “вхід/вихід”, що дозволяють аналізувати інформацію про значення вхідних та вихідних змінних. Зокрема, в технологіях компанії Noble Engineering [70] застосовується алгоритм, що дозволяє оператору оптимізувати механічну швидкість буріння на основі відомих оптимальних значень зусиль на долото для заданого середовища вибою. Крім того, вимірювання параметрів на поверхні, таких як зусилля на гаку, крутний момент, тиск нагнітальних насосів, використовуються для забезпечення безперервності процесу буріння і обчислення планового значення зусилля на долото. Комп’ютерна програма виконує обчислення і виводить відповідні параметри на монітор для оператора.

В дослідженні [71] представлено експертну систему для автоматичного визначення і діагностування важливих проблем пов’язаних з циркуляцією. Зокрема, система дозволяє визначення, характеризування і дискретизацію процесу втрати циркуляції, припливу флюїду, викиду газу, втрати ефективності бурових насосів, розмивань, забивання сопел, проблем з давачами. Тестування отриманого прототипу на експериментальних даних показало можливість успішного визначення і діагностування ряду можливих нештатних ситуацій.

Як відзначено в роботі [75], основною метою діагностування нештатних ситуацій є визначення та корекція проблем, що виникають у процесі буріння.

Особливістю діагностики нештатних ситуацій в режимі реального часу є те, що виконання цих завдань обмежується певним часовим інтервалом, що дозволяє неперервне безпечне функціонування системи.

Системи автоматизованого керування мають ряд переваг щодо тестування нештатних ситуацій в реальному часі [3]. Такі переваги зумовлюються тим, що дані системи дозволяють відслідковування великої кількості змінних з більшою точністю і швидкістю реагування (зворотного зв'язку) ніж оператор-людина. Проте, на сьогоднішній день для досягнення максимальної функціональності реалізації, система повинна мати наступні функції: а) доступ до даних реального часу; б) наявність процедур інтелектуальної інтерпретації даних; в) інтерфейс для комунікації з експертами (операторами), що приймають участь у процесі прийняття рішень; г) генерації коректуючих впливів зворотного зв'язку.

Наприклад, нейромережі можуть застосовуватись для не інтелектуальної кластеризації інформації або інтелектуального навчання операцій з нештатними ситуаціями. Такі дослідження [74] використовуються для оцінки ефективності проведення оператором певних бурових операцій.

Нейронні мережі дозволяють представляти довільні функції з багатьма змінними із заданим ступенем точності, а також здійснювати вирішення задач функціональної апроксимації і класифікації. Проте, практичне застосування нейромережевих технологій пов'язане з проблемами вибору оптимально кращих мережевих архітектур і способу організації процесу навчання мережі. Крім того, експерти предметної області в багатьох випадках намагаються форсувати процес навчання мережі шляхом формування готових множин особливостей та виконуючи певну попередню обробку даних з метою швидшого виділення наперед визначених властивостей.

Експертні системи на основі правил та їх оболонки реалізують ефективний механізм представлення чітких та нечітких знань. Чіткі знання задаються правилами виду:

*якщо* [множина умов] *тоді* [множина висновків].

Нечіткі знання задаються на основі нечітких продукцій (правил), що можуть інтерпретуватись як правила попереднього виду, але в них як умови та висновки використовуються нечіткі висловлювання (тобто висловлювання виду “ $x \in y$ ”):

*якщо*  $[x_1 \in y_1 \text{ і } x_2 \in y_2]$  *тоді*  $x_3 \in y_3$ ,

де  $x$  – лінгвістична змінна,  $y$  – один з її термів.

Відповідно, множину лінгвістичних правил можна представити у вигляді:

*якщо* [множина антецедентів (умов) для задоволення]

*тоді* [множина консеквентів для висновку].

Антецеденти і консеквенти правил в даному випадку асоціюються з нечіткими лінгвістичними термами. Процес нечіткого висновку базується на формальних етапах, що утворюють алгоритм Мамдані [76].

Таким чином, вирішальним моментом діагностики системи нештатних ситуацій в реальному часі є її здатність обробляти невизначеності. Діагностика нештатних ситуацій включає невизначеність тому, що ряд операцій технологічного процесу буріння не можуть бути спостережені безпосередньо і, як правило, є результатом деяких непрямих вимірювань.

Великі нафтові компанії такі як Halliburton, LukOil, British Petroleum, ExxonMobil, Chevron, Shell підтримують функціонування цілодобових експлуатаційних сервіс-центрів, що забезпечують швидкий зворотний зв'язок, моніторинг в режимі реального часу та віддалену діагностику автоматизованих та контрольних систем бурових установок відповідними кваліфікованими експертами з метою досягнення максимальної ефективності.

Автоматизовані системи буріння вимагають застосування інтегрованих рішень в режимі реального часу на основі виділеної стратегії оптимального контролю, що включає в себе всі елементи ефективного процесу буріння (рис. 1.6).

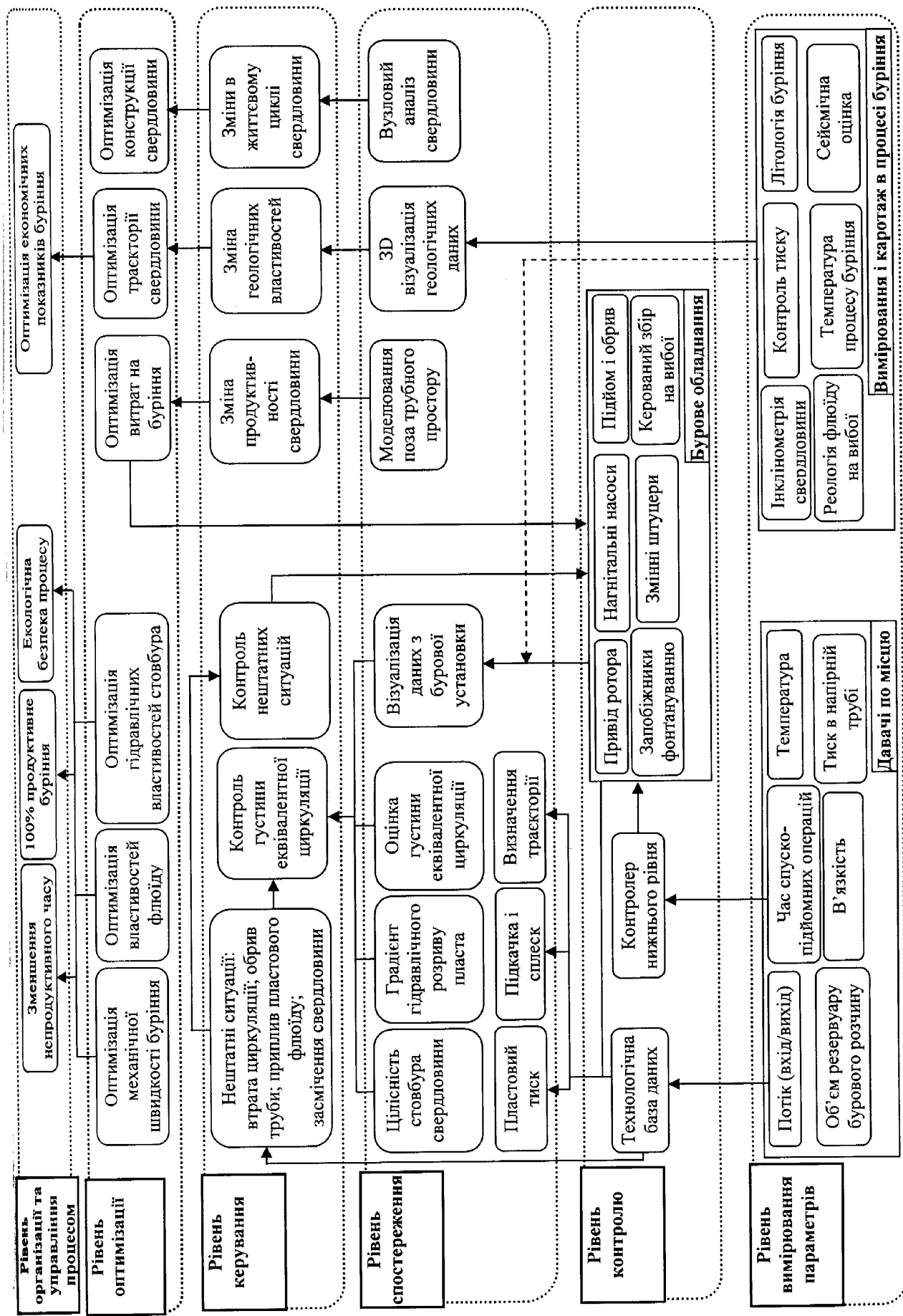


Рис. 1.6. Багаторівнева структурна схема побудови оптимальної стратегії автоматизованого контролю процесу буріння

На нижньому рівні виконується видобування даних для ключових змінних розділених на дві групи, представлені давачі по місцю і засоби вимірювання на вибої, а також каротажні засоби під час буріння. На рівні контролю представлено реалізацію базових функцій контролю і машинних інтерфейсів. Даний рівень є автономним, оскільки він може оперувати тільки з даними отриманими з нижнього рівня, але він також отримує команди оновлення для нових установлених значень і нових обмежень для змінних. На рівні спостереження виконується попередня обробка і обчислення на основі отриманих даних. Такий рівень, сам по собі є також самодостатнім для прийняття важливих рішень про операції процесу буріння, наприклад щодо модуляції часових характеристик спуско-підймальних операцій з метою уникнення поршнювання свердловини. Дані з бурової і тренди візуалізуються з метою прогнозування майбутніх значень характеристик. На рівні керування, управління нештатними ситуаціями покликане передавати інструкції на нижні рівні з метою виконання або підтримки регламентованих дій та операцій. На цьому рівні, також виконується формування релевантної інформації для оновлення моделі пласта, оновлення значення очікуваної продуктивності свердловини. На рівні оптимізації виконується конфігурування архітектури свердловин, визначаються актуальні потреби щодо їх завершення, базуючись на інформації з нижніх рівнів та виконується оцінка проектною моделі витрат. На даному рівні виконується також прийняття відповідних рішень з метою оптимізації загальної ефективності процесу буріння шляхом перегляду параметрів гідравліки стовбура свердловини, механічної швидкості та інших властивостей флюїду. Верхній рівень є найвищим рівнем ієрархії, що відображає основні цілі проекту буріння – максимальний економічний ефект, мінімальна шкода екології, мінімальний непродуктивний час.

На рис. 1.7 представлена структура управління в реальному часі, побудована на основі основних принципів керування викладених в роботі [3]. Така структура представляє підхід автоматизації, що використовується для контролю технологічного процесу буріння.

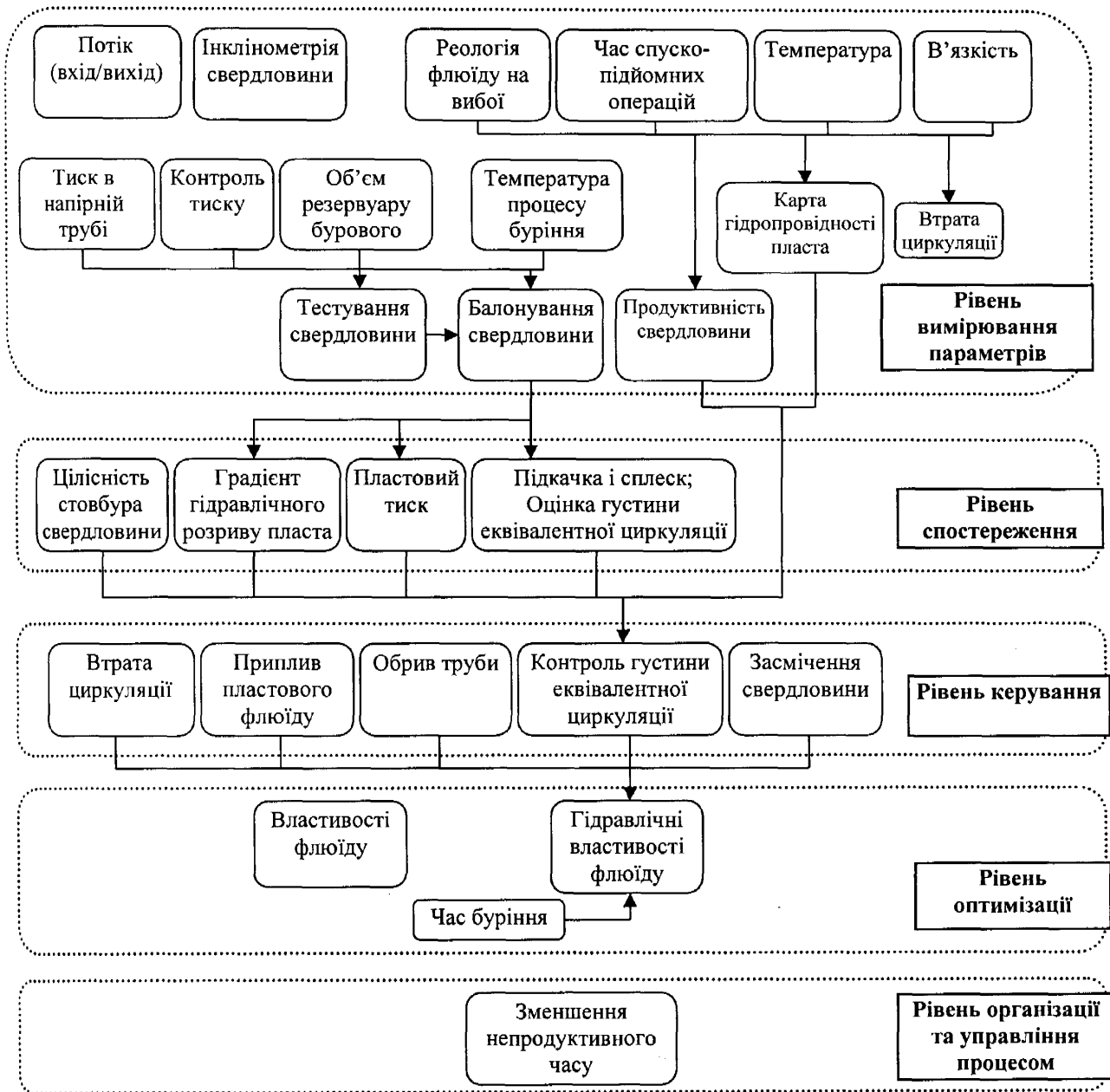


Рис. 1.7. Структурна схема автоматизації гідралічного контролю процесу буріння в режимі реального часу

Рівень вимірювання параметрів є базовим інструментарієм, що використовується на рівні процесу з високою частотою зміни (секунди, мілісекунди). На цьому рівні можна виконати деякі повторно обчислювальні або непрямі вимірювання, наприклад такі як дебіт свердловини та втрата циркуляції. При переході інформаційних потоків на наступний рівень отримується доступ до рівня спостереження. На цьому рівні виконуються

подальші комплексні обчислення з метою оцінки цілісності стовбура свердловини, градієнту гідравлічного розриву, пластового тиску, підкачки і сплеску та густини еквівалентної циркуляції. Наступним рівнем є рівень керування, на якому приймається рішення на основі характеристик густини еквівалентної циркуляції, втрати циркуляції, припливів пластового флюїду, обривів труб, засмічення свердловини. Цей рівень також може розглядатися як модель прогнозуючого контролю в замкненому контурі. Його функціональність полягає в ідентифікації контуру і оптимального контролю з метою пошуку реалізації з мінімальною вартістю для досягнення деякого наступного очікуваного стану. На рівні оптимізації в реальному часі застосовуються визначені методики і програмні засоби пошуку оптимального рішення з метою визначення найкращої експлуатаційної точки, що задає максимізацію значень змінних згідно накладених обмежень. В більшості випадків виконується зміна фізико-хімічних властивостей флюїду, зокрема гідравлічних характеристик з метою оптимізації процесу та часу перебігу. Останній рівень повинен представляти динамічну ціль верхнього рівня ієрархії. Зокрема, в даному випадку, такою ціллю є зменшення непродуктивного часу буріння, базуючись на ефективному управлінні гідравлічними властивостями в реальному часі.

Моніторинг в реальному часі процесу збору інформації на вибої та інформації щодо динамічної поведінки бурового долота є вирішальними факторами покращення ефективності буріння. Це дозволяє оператору бурової уникати руйнівної вібрації бурової колони і підтримувати оптимальні умови процесу буріння, шляхом періодичного налаштування різних параметрів контролю, таких як зусилля на гаку, кількість обертів за хвилину, дебіт.

Вибір оптимальних параметрів керування є складною задачею. Зокрема, необхідно виконати кілька ітерацій зміни параметру для досягнення задоволення накладених обмежень, хоча це і не гарантуватиме оптимальність результату. Тому, згідно таких міркувань, побудова ефективних методів для прогнозування динамічної поведінки збору на вибої та розробка методів для



вибору відповідних контрольованих параметрів є важливими для оптимізації процесу буріння.

В роботі [77] представлено використання нейромереж для моделювання динамічної поведінки нелінійних систем буріння з багатьма входами та виходами. Така модель, разом з оптимізуючим контролером забезпечує оператора буріння рекомендаціями щодо відповідних коректуючих впливів, які необхідні для переведення системи в режим оптимального буріння (оптимальних умов буріння). Таким чином, побудова нейромережевої моделі вимагає використання динамічних даних процесу буріння в реальних виробничих умовах.

В дослідженнях [66-68] представлено приклади віддаленого моніторингу і керування буровими операціями в реальному часі. Основним завданням планування свердловини в реальному часі і проекту її побудови (розробки), представлених в даних дослідженнях, є моніторинг процесу горизонтального буріння свердловини і прийняття інженерних рішень щодо буріння, з метою оптимізації розміщення свердловини, а також що стосується буріння наступних подібних свердловин.

В проекті, що описується в роботі [67] представлено приклади прямого і автоматичного завантаження даних спостереження (кут нахилу і азимут) на основі  $\gamma$  - променів, а також значень опору при бурінні в базу даних геологічних моделей. Це дозволяє розглядати траєкторію свердловини і літологічні записи на основі сейсмічних характеристик і забезпечити рух таких даних по власній (Intranet) мережі нафтогазової компанії.

Розвиток і постійне вдосконалення давачів на вибої і їх інтеграція з автоматизованими системами керування для побудови процесів буріння наступного покоління вимагає суттєвого зростання об'ємів передачі даних з вибою на поверхню на такому рівні, щоб коректна і точна в часі інформація могла бути опрацьована при прийнятті рішень в режимі реального часу. Основним фактором, що обмежує швидкість даного процесу є засоби телеметрії [78; 79]. Новітні телеметричні системи надають каротажну

інформацію в реальному часі з високою швидкістю передачі даних, що сприяє збільшенню продуктивності свердловини, зменшує час буріння і його вартість та відповідно розширює засоби контролю свердловини.

Важливе значення в нафтогазовій промисловості посідає концепція автоматизації на основі керування зі зворотнім зв'язком. Оскільки технологічний процес буріння характеризується комплексністю і неоднозначністю виконуваних операцій, то прийняття рішень в режимі реального часу відіграє важливу роль в більш загальному процесі побудови і ефективної експлуатації свердловин.

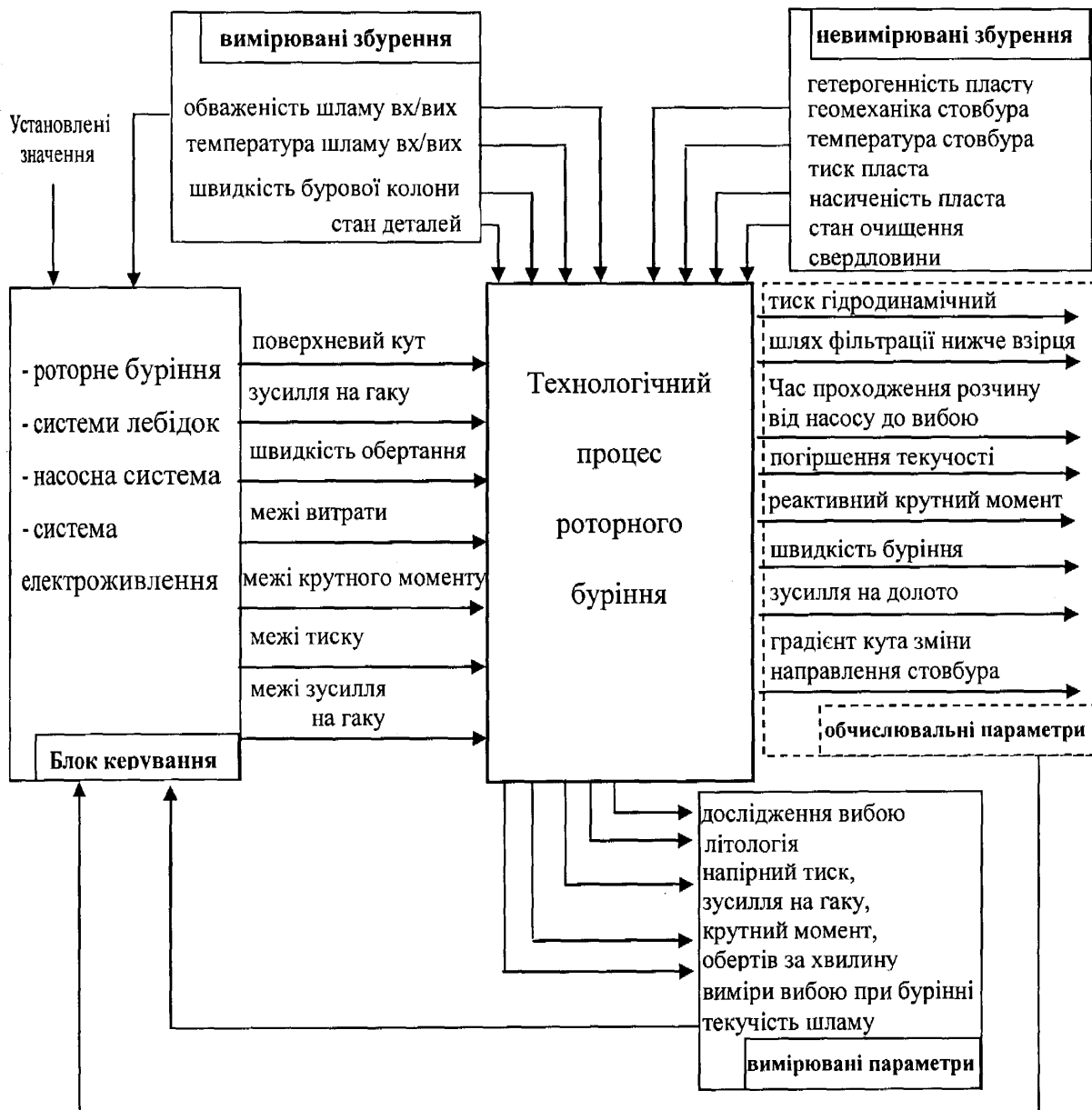


Рис.1.8. Структурна схема видів керування при роторному бурінні

Як можна бачити з рис. 1.8 операції буріння моделюються на основі множини вхідних змінних, що розглядаються як параметри технологічного процесу, а саме такі як поверхневий кут, зусилля на гаку, швидкість обертання, витрата, крутний момент, межі тисків. Відповідно, реакція системи включає в себе як безпосередні вимірювання, такі наприклад як зусилля на гаку, тиск, крутний момент, кількість обертів за хвилину так і результати обчислень на основі непрямих вимірювань, зокрема таких як крутний момент, механічна швидкість буріння, зусилля на долото та ін.

Інтелектуальний контролер приймає рішення, шляхом вимірюваних і обчислюваних реакцій, що вносять необхідні модифікації в множину вхідних змінних. Робастний контролер повинен розглядати також вимірювані збурення, такі як обваженість шламу, спуско-підйомні операції, а також не вимірювальні збурення, такі як геомеханіка стовбура свердловини, температура стовбура, з метою генерації оптимального та коректного зворотного зв'язку за умов можливо неповної або неточної інформації.

Прийняття рішень на основі даних реального часу вимагає відповідних процедур отримання (видобування) даних (відповідно вимірювальних або обчислювальних). В кожен момент часу, після того як прийнято оптимальне рішення, система генерує відповідні керуючі впливи і продовжує відслідковувати технологічні операції. В деякий наступний визначений момент часу, після того як буде зібрано (отримано) нові дані, процес прийняття оптимального рішення повторюється. Застосування таких процедур, очевидно, повинно виконуватись в технологічних процесах з ієрархічною структурою. Модель такого процесу описується як модель прогнозуючого контролю на рівнях інтелектуального або регуляційного керування [80].

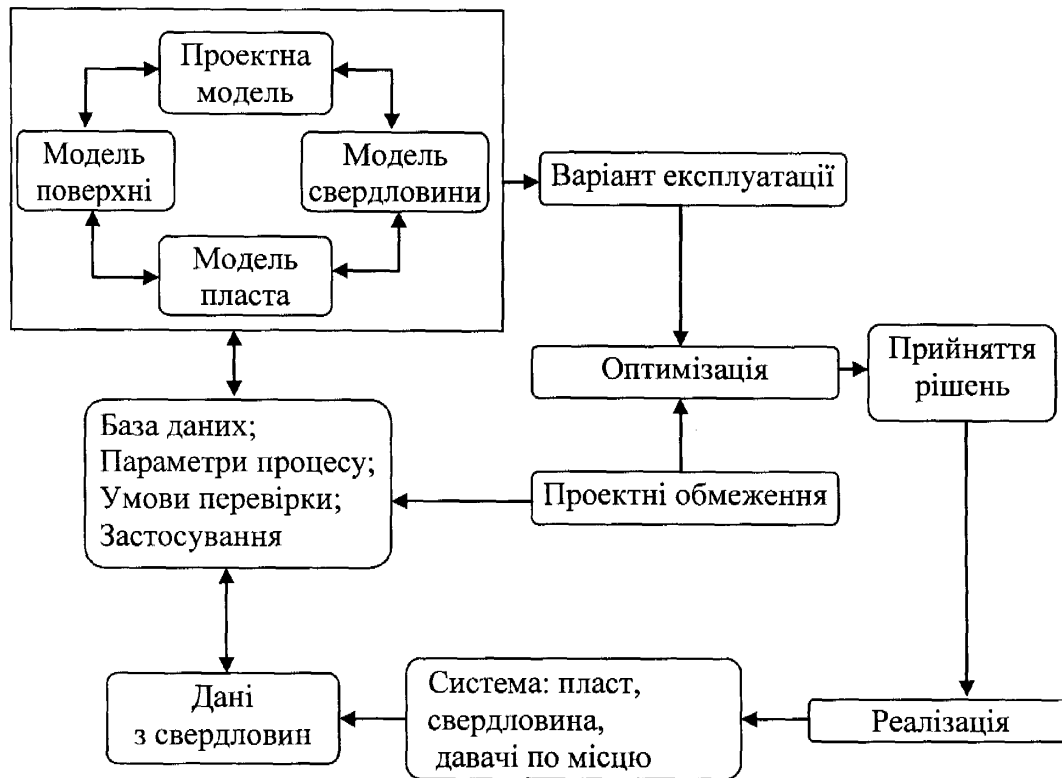


Рис. 1.9. Структура задачі оптимізації при прийнятті рішень в процесі буріння

Як представлено на рис.1.9, процес керування починається зі збору даних із давачів в режимі реального часу та перенесення їх в базу даних для подальшої обробки. Група експертів виконує аналіз та інтеграцію даних для побудови на їх основі моделей пластів нафти і газу, моделей свердловин, моделей поверхні. Наявність таких моделей дозволить прогнозування можливих стратегій видобування вуглеводнів. Проектні обмеження і методики видобутку є основою для побудови оптимального рішення, що робить можливим функціонування процесу прийняття рішень в цілому. Даний процес залежить також від багатьох інших факторів, зокрема від обмежень накладених на реалізацію та регламент технологічного процесу буріння і його окремих операцій. Основна проблема в такій структурі оптимізації, як показує ряд досліджень [21, 36, 37], полягає в недостатньому опису функціональності та взаємодії окремих складових.

Стандартне рішенням даної проблеми полягає в її ієрархічній декомпозиції у вигляді структури прийняття оптимальних рішень на кожному

рівні. Ієрархічна структура представлена на рис. 1.10 відображає приклад виконання декомпозиції для базових технологічних операцій. В даному випадку на кожному рівні виконується обмін інформації з суміжними рівнями, а також з іншими не суміжними. Таким чином інформація, що збирається на кожному рівні відправляється на вищий рівень і рішення, що приймається на кожному рівні передаються на відповідний нижній рівень у вигляді структури зворотного зв'язку.



Рис. 1.10. Ієрархія технологічних операцій для декомпозиції

Відмінною особливістю кожного рівня є визначення для нього частоти прийняття рішень, яка може змінюватись залежно від рівня. Так, наприклад, для рівня керування з безпосереднім регулюванням такі характеристики вимірюються секундами, відповідно для рівня планування і регламентування

часові характеристики можуть вже вимірюватись значно більшими проміжками. На рис. 1.10 виділено наступні основні види контролю:

– *керування з безпосереднім регулюванням* – здійснюється регуляторами, що переважно являють собою автономні самодостатні апаратні одиниці (зокрема для регулювання тиску, температури в насосах в гирлі свердловини). Установлені значення для таких контурів регулювання визначаються на основі значень верхніх рівнів;

– *рівень інтелектуального керування* – дозволяє поєднувати регулятори нижнього рівня, передавати нові набори усталених значень і відповідно оптимізувати проблеми, що описуються багатьма змінними в режимі реального часу. Найбільш поширеним прикладом даного рівня є SCADA-системи, які дозволяють виконувати інтелектуальний контроль та видобування даних. Поширені SCADA-системи керують операціями внизу бурової вишки, операціями відкачки і управління трубопроводами. Також такі системи застосовують для оптимізації процесу розподілу газу в мережі трубопроводів або для виділеного окремого гирла свердловини. Крім того, такі системи здійснюють моніторинг гирл та трубопроводів. На цьому рівні застосовують стандартні оптимізаційні методики на основі інтегрованих моделей, що дозволяє визначати оптимальні стратегії керування технологічним процесом буріння;

– *рівень планування* – включає в себе визначення оптимального розміщення ресурсів в часовому проміжку для задоволення короткотривалих технологічних потреб, наприклад планування частоти нагнітання та відбору, відкриття та закриття свердловин, налаштування параметрів експлуатації свердловин базуючись на аналітичних моделях. Оптимізаційні методики, що застосовуються в даному випадку базуються на засобах пошуку та оптимального планування для заданої множини дискретних змінних з максимізацією виділених значень.

Сукупність технологічних задач та операцій на рівні робочої площадки бурової установки є комплексними задачами з високим ступенем ризику, що відповідно вимагають додаткових вимог по безпеці та автономності керування.

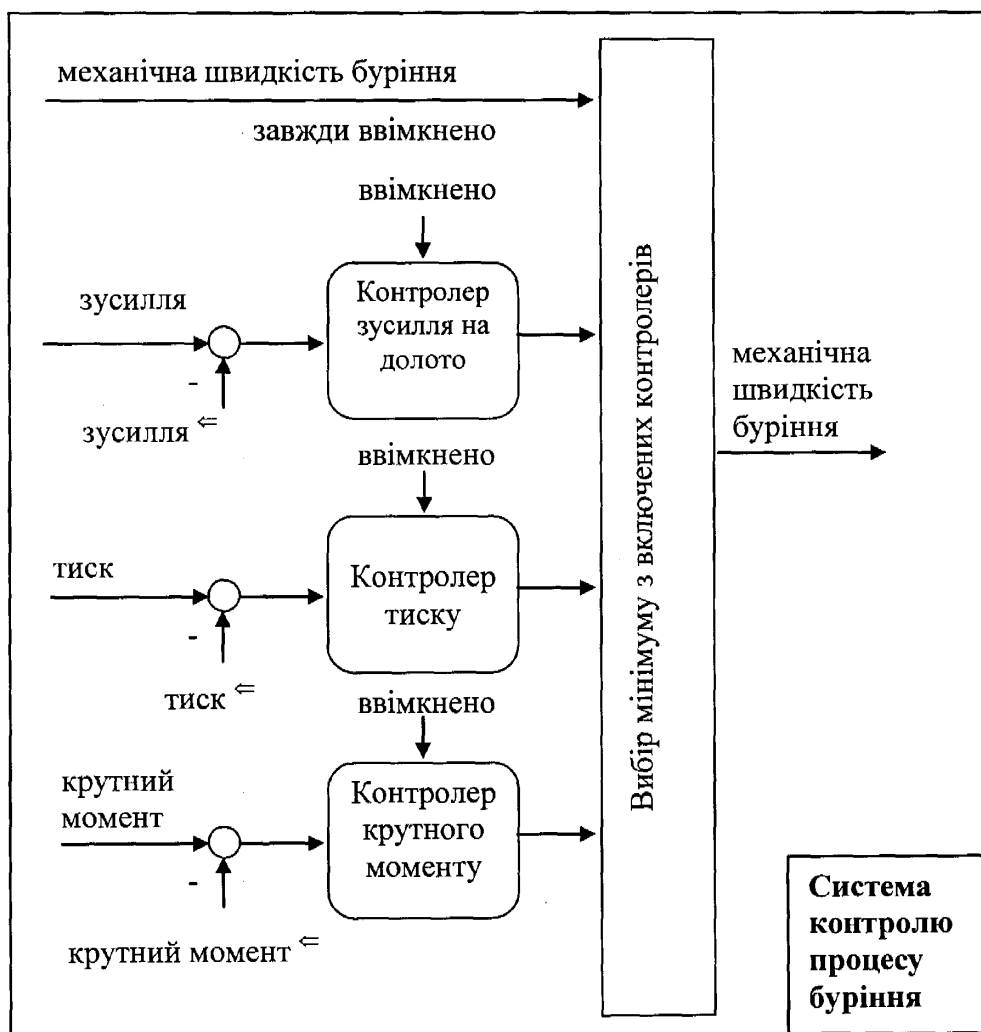
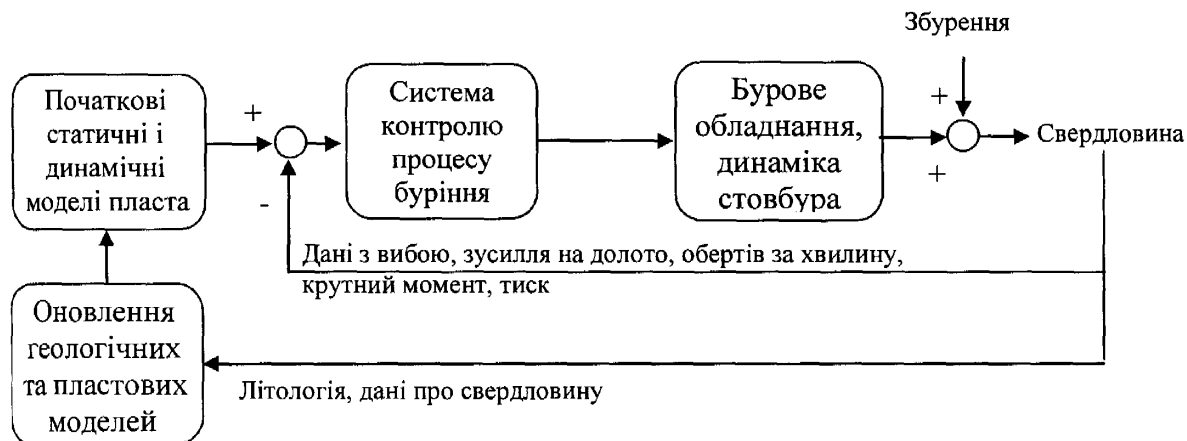


Рис. 1.11. Модель інтерактивного контролю виділених параметрів процесу буріння

Рис.1.11 показує процес на рівні робочої площадки бурової установки як взаємодію в замкнутому контурі контрольних систем, лебідки, нагнітальних насосів, ротора, що зв'язані в режимі зворотного зв'язку в рамках деякої моделі.

Таким чином, на сьогоднішній день залишається актуальною наукова проблема інтерпретації значень контрольованих параметрів технологічного процесу з метою вирішення задач геолого-технологічних досліджень. Пропоноване дослідження представляє інтелектуальний спосіб інтерпретації на основі технологічних обмежень, що дозволяє формалізувати процес запобігання виникнення нештатних ситуацій (аварій) на основі дискретних значень та їх послідовностей для контрольованих технологічних параметрів та відомих або очікуваних діапазонів їх зміни.

### **1.6. Вибір та обґрунтування напрямку досліджень**

Аналіз об'єкта та предмету дослідження, а також засобів підтримки прийняття технологічних рішень, показує що геологічні і технологічні невизначеності впливають на здатність оператора технологічного процесу досягати заданих технічних і економічних цілей при бурінні нафтових і газових свердловин. Новітні розробки на основі використання даних реального часу, а також динамічних моделей свердловини дозволяють суттєво знизити невизначеності і загалом покращити ефективність проекту. Проте такі підходи дозволяють тільки частково вирішити задачу оптимізації цілей процесу буріння. Основними проблемами є велика кількість даних, що описують технологічний процес буріння і складність ефективної інтеграції з існуючими системами автоматизованого контролю. Тому важливим рішенням даних проблем є створення систем інтелектуальної підтримки прийняття рішень у процесі буріння, які включають в себе багатопарові та масштабовані стратегії на основі обмежень. Використання таких стратегій дозволяє оптимізувати загальну ефективність буріння та розробки свердловин із заданою



продуктивністю. Структура задачі полягатиме в досягненні загальних інтегрованих цілей, що не є арифметичною сумою окремих завдань для яких існують рішення.

Проте існуючі рішення даного класу переважно орієнтовані на деяку складову загального технологічного процесу буріння. Існуючі методи інтерпретації даних і прийняття рішень працюють не ефективно при великій кількості даних реального часу, що описують процес буріння. Тому наявні процеси прийняття рішень, в більшості випадків, можна класифікувати як такі, що мають недостатню означеність, використовують весь час виділений технологічним регламентом і в цілому не можуть бути оцінені як точні з достатнім рівнем охоплення. В той же час, існуючі системи контролю технологічних операцій не мають достатнього рівня інтегрованості, що дозволило б побудову глобального рішення з використанням геологічних характеристик реального часу і визначало контроль процесу буріння в цілому.

Вибір роторного буріння в даному дослідженні зумовлено тим, що у порівнянні з турбінним способом проходка за один рейс є більшою, а також переважна кількість НГС в Прикарпатському регіоні буриться саме роторним способом. Ще одним аргументом на користь вибору роторного буріння була наявність фактичних даних Прикарпатського УБР, щодо аналізу аварійності буріння свердловин в даному регіоні, що здійснюється також роторним способом, і слугувало основою наповнення бази знань розробленої системи інтелектуальної підтримки прийняття рішень.

Прийняття рішень в режимі реального часу традиційно відіграє одну з основних ролей в побудові та експлуатації свердловин. Аналіз експериментальних даних розробки існуючих свердловин показує, що отримані результати не завжди є оптимальними. Тому побудова оптимальних послідовностей прийняття рішень в стратегіях контролю, що враховує модель і прогнозування нафтогазових покладів і отримання даних в реальному часі є актуальною задачею.

Недостатні засоби прогнозування ефективності проектів буріння є наслідком неповноти релевантної інформації щодо геологічних послідовностей відповідних формацій гірської породи. Цим зумовлюється необхідність побудови інтегрованих каротажних процедур у процесі буріння з метою оцінки динаміки буріння і представлення результатів в формі ефективних моделей. Інтегровані процедури реального часу дозволяють також покращити засоби вимірювання і каротажу та їх роздільну здатність, зменшити частоту появи можливих бурових дизфункцій і покращити загальну ефективність функціонування свердловин. Технологічні операції процесу буріння слід розглядати як процеси, що можуть бути спроектовані на деяку ієрархію (тобто є такими, що дозволяють представлення в ієрархічній формі). Визначення ієрархічної організації процесу дозволяє спосіб побудови рішення, що може призводити до результатів, що є вищими за множину оптимальних рішень побудованих для окремих неструктурованих елементів процесу.

Таким чином, новітні технології розробки та завершення свердловин вимагають розробки стратегій агрегацій даних реального часу з метою класифікації поточного релевантного експертного досвіду на рівні операторів технологічного процесу буріння та на рівні систем інтелектуальної підтримки прийняття рішень з метою генерації адекватних адаптивних керуючих впливів зворотного зв'язку для уникнення нештатних ситуацій.

Аналіз існуючих реалізацій дозволяє виділити ряд можливостей для покращення процесу прийняття рішень у процесі буріння. Зокрема, в даному дослідженні розробляється інтегрована інтелектуальна ієрархічна стратегія прийняття рішень при бурінні, що дозволяє оптимізацію задачі експлуатаційної ефективності буріння в режимі реального часу, шляхом прогнозування та уникнення аварійних ситуацій. Перевагою пропонованого підходу є те, що він дозволяє використання великих об'ємів фактичних даних, що отримуються від давачів або систем видобування даних на рівні безпосереднього регулювання та їх агрегованого аналізу на основі інтелектуального контуру. Впровадження такої технології в процес буріння

свердловин в умовах України відповідає новітнім технологіям нафтогазової галузі.

Виконаний аналіз існуючих інтелектуальних систем в нафтогазовій галузі дозволяє стверджувати їх високу ефективність, проте в той же час виділити реальну існуючу потребу розробки нових більш ефективних методів та інтелектуальних систем запобігання нештатних ситуацій у процесі буріння нафтових і газових свердловин. Функціонально існуючі інтелектуальні системи є системами на основі правил, що наближає їх до класу експертних систем. Вибір підходу на основі обмежень, пропонованого в даному дослідженні, зумовлено вибором саме таких нових методів роботи з даними та знаннями, що в своїй основі використовують представлення альтернативні до правил, що відповідно забезпечуватиме нову функціональність інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень даного класу.

Для вирішення сформульованої задачі необхідно:

- виконати аналіз автоматизованих систем керування технологічним процесом буріння свердловин;
- визначити та структурувати засоби інтелектуалізації процесу прийняття технологічних рішень при бурінні нафтових і газових свердловин;
- виконати аналіз нештатних ситуацій процесу буріння як основної складової процесу прийняття рішень орієнтованого на контроль технологічних обмежень;
- розробити формальний підхід представлення технологічних проблем процесу буріння в формі технологічних обмежень;
- побудувати формальну структуру системи інтелектуальної підтримки прийняття рішень на основі обмежень для запобігання нештатних ситуацій у процесі буріння нафтових і газових свердловин;
- реалізувати алгоритмічне та програмне забезпечення системи інтелектуальної підтримки прийняття рішень та виконати її тестування на фактичних промислових даних УБР.

## РОЗДІЛ 2

# МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОБЛЕМ ПРОЦЕСУ БУРІННЯ ЗАСОБАМИ ТЕОРІЇ ОБМЕЖЕНЬ, ЯК ОСНОВИ ПРОЦЕСУ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ

### 2.1. Представлення станів технологічних проблем у процесі буріння на основі обмежень

Як показує аналіз літературних джерел [81-91] в області буріння нафтових і газових свердловин, даний технологічний процес характеризується виникненням ряду нештатних (аварійних, позапланових) ситуацій. Технологічно причиною виникнення даних нештатних ситуацій є вихід певних технологічних параметрів за встановлені граничні значення (домени). Опис такого процесу можна представити у вигляді задачі задоволення обмеження [92-99], якщо її змінні представляти технологічними параметрами контролю процесу буріння, а саме:

$$V^1 = \{v_1^1, v_2^1, \dots, v_n^1\} = \{ \text{витрата\_бурового\_розчину\_на\_виході\_із\_} \\ \text{\_свердловини, крутний\_момент\_на\_роторі, осьове\_зусилля\_на\_} \\ \text{\_долото, зусилля\_на\_гаку, тиск\_на\_викиді\_насосів, швидкість\_} \\ \text{обертання\_ротора, механічна\_швидкість\_проходки} \}.$$

Введення для набору змінних  $V^1$  множини доменів  $D^1$  та множини обмежень  $S^1$  дозволить описувати технологічний процес буріння НГС (позначатимемо даний процес через  $TP^1$ ) в термінах представлення та задоволення обмежень. Аварійні нештатні ситуації в даному процесі будемо розглядати як його стани:

$$TP^1.TPS_{set}^1 = \{ \text{обрив\_бурової\_колони, прихоплення\_бурильних\_і\_обсадних\_} \\ \text{\_труб, падіння\_бурового\_інструменту\_і\_сторонніх\_предметів\_у\_} \\ \text{\_свердловину, припікання\_породоруйнівного\_інструменту} \}.$$

Оскільки процес буріння є надзвичайно складним та динамічним процесом, який можливо повністю формалізувати, то контроль окремих його станів,

можна виділяти в окремі технологічні процеси, зокрема важливим є технологічний процес контролю прихоплень бурової колони ( $TP^2$ ). Контроль даного процесу можна описувати набором технологічних параметрів, змінних:

$$V^2 = \{v_1^2, v_2^2, \dots, v_{n_2}^2\} = \{ \text{заклинення}_\text{колони}_\text{труб}, \text{осідання}_\text{шламу}, \text{перепад}_\text{тиску}, \text{звуження}_\text{перерізу}_\text{стовбура}, \text{коефіцієнт}_\text{тертя}_\text{із}_\text{кіркою}, \text{обвал}_\text{порід}, \text{диференційний}_\text{тиск}, \text{плин}_\text{порід}, \text{сальникоутверення}, \text{площа}_\text{контакту}_\text{колони}_\text{труб} \}.$$

Для множини  $V^2$  введемо множину обмежень

$$C^2 = \{ \text{перепад}_\text{тиску}_\text{в}_\text{інтервалі}_\text{проникного}_\text{пласта}, \text{перебування}_\text{колони}_\text{труб}_\text{в}_\text{нерухомому}_\text{стані}, \text{застосування}_\text{бурильних}_\text{труб}_\text{надмірного}_\text{діаметру}, \text{великий}_\text{перепад}_\text{тиску}, \text{вміст}_\text{твердої}_\text{фази}_\text{в}_\text{буровому}_\text{розчині}, \text{швидкість}_\text{фільтрації}_\text{бурового}_\text{розчину}, \text{циркуляція}_\text{бурового}_\text{розчину}, \text{перевищення}_\text{гідралічного}_\text{тиску}_\text{над}_\text{пластовим} \}.$$

Друга категорія виникнення прихоплень, може бути формалізована як

$$V^{21} = \{ \text{операція}_\text{обертання}, \text{операція}_\text{спуску}, \text{операція}_\text{піднімання}, \text{буріння}_\text{в}_\text{м'яких}_\text{породах}, \text{буріння}_\text{в}_\text{гірських}_\text{породах}, \text{абразивне}_\text{зношення}_\text{долота} \}.$$

$$C^{21} = \{ \text{спуск}_\text{нового}_\text{долота}, \text{заклинювання}_\text{колони}_\text{труб}, \text{компоновка}_\text{низу}_\text{колони}_\text{великої}_\text{жорсткості}, \text{наявність}_\text{місцевих}_\text{опорів}, \text{падіння}_\text{сторонніх}_\text{предметів}, \text{жолобні}_\text{виробки}, \text{затягування}_\text{бурильної}_\text{колони}_\text{в}_\text{жолоб}, \text{зони}_\text{жолобоутворення}, \text{зони}_\text{викривлення} \}.$$

Прихоплення третьої категорії дозволяють наступну формалізацію у вигляді змінних та обмежень:

$$V^{31} = \{ \text{сповзання}_\text{шламу}, \text{обвалоутворення}, \text{припинення}_\text{циркуляції}, \text{підвищення}_\text{температури}, \text{протитиск}_\text{бурового}_\text{розчину}, \text{звуження}_\text{стовбурів} \}.$$

$$C^{31} = \{ \text{відповідність}_\text{бурового}_\text{розчину}_\text{типу}_\text{породи}, \text{нестійкий}_\text{стан}_\text{порід}, \text{пластичний}_\text{плин}, \text{глинисті}_\text{відкладення} \}.$$

$$D^{31} = \{ \text{підвищення}_\text{тиску}_\text{нагнітання}, \text{поглинання}_\text{бурового}_\text{розчину}, \text{винос}_\text{шламу}, \text{утворення}_\text{пробок}, \text{затяжка}_\text{інструменту}, \text{інтенсивні}_\text{промивки}_\text{стовбура} \}.$$

Процес сальникоутворення, можна описати власною системою обмежень

$V^{41} = \{ \text{порушення}_\text{ _режиму}_\text{ _циркуляції}, \text{розбурювання}_\text{ _глинистих}_\text{ _відкладень}, \text{підвищення}_\text{ _температури}, \text{відкладення}_\text{ _фільтраційної}_\text{ _кірки} \}$ .

$C^{41} = \{ \text{негерметичність}_\text{ _бурової}_\text{ _колони}, \text{забруднення}_\text{ _стовбура}_\text{ _свердловини}, \text{незадовільне}_\text{ _промивання}, \text{втрата}_\text{ _циркуляції}, \text{забруднення}_\text{ _приймальних}_\text{ _ємностей}, \text{накопичення}_\text{ _осаду}, \text{залипання}_\text{ _з}_\text{ _фільтраційною}_\text{ _кіркою}, \text{наявність}_\text{ _вимоїн}, \text{зниження}_\text{ _тиску}, \text{зниження}_\text{ _температури} \}$ .

$D^{41} = \{ \text{періодичність}_\text{ _відриву}_\text{ _долота}, \text{припинення}_\text{ _циркуляції}, \text{глинисті}_\text{ _відкладення}, \text{розміри}_\text{ _каверн}_\text{ _і}_\text{ _жолоба}, \text{ступінчастість}_\text{ _стовбура}, \text{прояви}_\text{ _затягування} \}$ .

В загальному випадку як основні технологічні параметри (змінні задачі задоволення обмежень) на основі яких описуються причини виникнення прихоплень бурової колони слід розглядати:

$V^{51} = \{ v^1, v^2 \dots v^{18} \} = \{ v^1 = \text{жорсткість}_\text{ _низу}_\text{ _бурової}_\text{ _колони}, v^2 = \text{вид}_\text{ _мастильної}_\text{ _добавки}, v^3 = \text{дотримання}_\text{ _технічних}_\text{ _норм}_\text{ _і}_\text{ _правил}, v^4 = \text{фізико} - \text{механічні}_\text{ _властивості}_\text{ _бурового}_\text{ _розчину}, v^5 = \text{величина}_\text{ _перепаду}_\text{ _тиску}, v^6 = \text{пористість}_\text{ _породи}, v^7 = \text{швидкість}_\text{ _висхідного}_\text{ _потoku}_\text{ _бурового}_\text{ _розчину}, v^8 = \text{вміст}_\text{ _мастильної}_\text{ _добавки}_\text{ _в}_\text{ _буровому}_\text{ _розчині}, v^9 = \text{площа}_\text{ _поверхні}_\text{ _контакту}_\text{ _колони}_\text{ _труб}, v^{10} = \text{час}_\text{ _нерухомого}_\text{ _контакту}_\text{ _бурового}_\text{ _інструменту}_\text{ _зі}_\text{ _стілкою}_\text{ _свердловини}, v^{11} = \text{викривлення}_\text{ _стовбура}_\text{ _свердловини}, v^{12} = \text{тип}_\text{ _бурового}_\text{ _розчину}, v^{13} = \text{коефіцієнт}_\text{ _тертя}_\text{ _в}_\text{ _зоні}_\text{ _контакту}, v^{14} = \text{температура}_\text{ _в}_\text{ _стовбурі}_\text{ _свердловини}_\text{ _в}_\text{ _момент}_\text{ _прихоплення}, v^{15} = \text{фізико} - \text{механічні}_\text{ _властивості}_\text{ _фільтраційних}_\text{ _кірок}, v^{16} = \text{абсолютна}_\text{ _величина}_\text{ _гідростатичного}_\text{ _тиску}, v^{17} = \text{тип}_\text{ _пластового}_\text{ _флюїду}, v^{18} = \text{проникність}_\text{ _породи}_\text{ _в}_\text{ _зоні}_\text{ _прихоплення} \}$ .

$C^{51} = \{ c^1, c^2 \dots c^5 \} = \{ c^1 = \text{динаміка}_\text{ _руху}_\text{ _бурової}_\text{ _колони}, c^2 = \text{проникність}_\text{ _породи}, c^3 = \text{гідростатичний}_\text{ _тиск}, c^4 = \text{пластовий}_\text{ _тиск}, c^5 = \text{властивості}_\text{ _промивальних}_\text{ _рідин} \}$ .

$D^{51} = \{ d^1, d^2 \dots d^{10} \} = \{ d^1 = \text{діаметр}_\text{ _поперечного}_\text{ _перерізу}_\text{ _свердловини}, d^2 = \text{обвал}_\text{ _порід}, d^3 = \text{осипання}_\text{ _порід}, d^4 = \text{жолоби}, d^5 = \text{сальники}, d^6 = \text{каверни}, d^7 = \text{осідання}_\text{ _шламу}, d^8 = \text{застосування}_\text{ _обважнювачів}, d^9 = \text{посадка}_\text{ _колони}, d^{10} = \text{затяжка}_\text{ _колони} \}$ .

Як показує аналіз літературних джерел [82-84, 100] та підтверджує досвід експертів виробничої сфери, для певних технологічних параметрів, в більшості випадків, не вдається встановити точний робочий діапазон їх зміни, що можна було би використати для побудови контрольованих діапазонів і показників технологічних параметрів буріння НГС, тому введення доменів зміни значень змінних з накладеними обмеженнями є ефективним методом ідентифікації можливих аварійних ситуацій на основі контролю значень технологічних параметрів в межах визначених доменів та накладених обмежень.

В теоретичних дослідженнях проблем представлення та задоволення обмежень як ефективне рішення виділяється методика звуження області пошукової задачі. У випадку введеного формулювання  $(V^{51}, D^{51}, C^{51})$  можна отримати звужене формулювання з наступною множиною змінних:

$$V^{51'} = \{v^1 = \text{вага\_бурового\_інструменту}, v^2 = \text{крутний\_момент\_обертання}, v^3 = \text{механічна\_швидкість\_проходки}, v^4 = \text{витрати\_бурового\_розчину\_на\_вході}, v^5 = \text{витрати\_бурового\_розчину\_на\_виході}, v^6 = \text{тиск\_бурового\_розчину\_нагнітання}\}.$$

Згідно класичного означення введеного в [81] аварійна ситуація розглядається як наслідок відхилення значень контрольованих технологічних параметрів від встановлених діапазонів зміни (довірливих інтервалів).

В запропонованому підході аварійна ситуація розглядається як наслідок порушення змінними (технологічними параметрами) накладеної множини (системи, ієрархії) обмежень. Накладені обмеження впорядковуються експертами промислового буріння по степені їх значимості або іншими словами, по ступеню релевантності технологічній проблемі.

Згідно результатів опитування експертів наведених в роботі [81] отримаємо впорядковані системи обмежень по ступеню їх релевантності:

$$\begin{aligned} C^1 &= \{c^5, c^{10}, c^9, c^{18}, c^{15}, c^3, c^{16}, c^{11}, c^8, c^{13}, c^{12}, c^4, c^1, c^2, c^7, c^6, c^{17}, c^{14}\} \\ C^2 &= \{c^{11}, c^3, c^1, c^9, c^{13}, c^{12}, c^8, c^2, c^4, c^{15}, c^{10}, c^{18}, c^5, c^{16}, c^7, c^{14}, c^6, c^{17}\}, \\ C^3 &= \{c^4, c^{12}, c^7, c^3, c^8, c^{15}, c^2, c^{18}, c^{11}, c^{16}, c^{13}, c^5, c^9, c^{10}, c^{14}, c^1, c^6, c^{17}\} \end{aligned}$$

де  $c_1$  - жорсткість низу бурової колони,  $c_2$  - вид мастильної добавки,  $c_3$  - дотримання технічних правил і норм,  $c_4$  - фізико-механічні властивості бурового розчину,  $c_5$  - величини перепаду тиску,  $c_6$  - пористість середовища (породи),  $c_7$  - швидкість висхідного потоку бурового розчину,  $c_8$  - вміст мастильної добавки в буровому розчині,  $c_9$  - площа поверхні контакту колони труб,  $c_{10}$  - час нерухомого контакту бурового інструменту зі стінкою свердловини,  $c_{11}$  - викривлення стовбура свердловини,  $c_{12}$  - тип бурового розчину,  $c_{13}$  - коефіцієнт тертя в зоні контакту,  $c_{14}$  - температура в стовбурі свердловини в момент прихоплення,  $c_{15}$  - фізико-механічні властивості фільтраційних кірок,  $c_{16}$  - абсолютна величина гідростатичного тиску,  $c_{17}$  - тип пластового флюїду,  $c_{18}$  - проникність породи в зоні прихоплення.

Як показують побудовані множини обмежень, останні входження в кожній з них можна об'єднати в нову систему обмежень з низькою релевантністю, що означатиме, що їх можна відкинути в процесі послаблення початкового формулювання пошукової задачі. В той же час, обмеження, що йдуть на початку списку мають високий рівень релевантності і їм можна встановлювати в системі високі ступені преференції, що означатиме необхідність їх першочергового задоволення.

Ранжовані системи обмежень можна використовувати для виконання класифікації технологічних проблем в рамках технологічного процесу. Виконаний огляд літературних джерел показує, що в якості базової класифікаційної системи обмежень для технологічних проблем пов'язаних з прихопленням бурової колони можна розглядати наступну систему обмежень

$$C^{class.} = \{c^1, c^2 \dots c^7\},$$

де  $c^1$  - неможливість обертання бурової колони,  $c^2$  - неможливість переміщення бурової колони,  $c^3$  - забруднення обертання бурової колони,  $c^4$  - зменшення циркуляції розчину,  $c^5$  - припинення циркуляції розчину,  $c^6$  - різке зростання потужності,  $c^7$  - збільшення тиску на викиді.

Таким чином, проведений аналіз дозволяє сформулювати технологічну проблему контролю стану бурової колони у вигляді набору змінних



$$V^6 = \{v^1, v^2 \dots v^8\},$$

де  $v^1$  – механічна швидкість,  $v^2$  – швидкість обертання,  $v^3$  – переміщення бурової колони,  $v^4$  – витрата бурового розчину на виході,  $v^5$  – витрата бурового розчину на вході,  $v^6$  – осьове зусилля на долото,  $v^7$  – тиск бурового розчину на викиді,  $v^8$  – потужність обертання бурової колони.

В роботі [81] дані змінні розглядаються як параметри стану бурової колони. Сам процес буріння як технологічна проблема описується наступними параметрами (змінними):

$$V^7 = \{v^1, v^2 \dots v^8\},$$

де  $v^1$  – частота обертання,  $v^2$  – осьове зусилля на долото,  $v^3$  – тиск бурового розчину,  $v^4$  – глибина вибою,  $v^5$  – середня швидкість буріння,  $v^6$  – витрата бурового розчину на виході,  $v^7$  – витрата бурового розчину на вході,  $v^8$  – крутильний момент ротора.

В нашому підході контроль та запобігання процесу виникнення прихоплень бурової колони можна здійснити шляхом накладання систем обмежень:

$$C^7 = \{C^{71}, c_2^7, c_3^7, c_4^7, c_5^7\}$$

$$\uparrow$$

$$\overline{C_1^{71} = \{c_1^{71}, c_2^{71} \dots c_7^{71}\}}$$

де  $C^{71}$  – система обмежень для змінних параметрів бурової колони  $V_1^{71} = \{v_1^{71}, v_2^{71} \dots v_7^{71}\}$ , де  $v_1^{71}$  – діаметр бурильних труб,  $v_2^{71}$  – параметр компоновки низу бурової колони,  $v_3^{71}$  – діаметр центратора,  $v_4^{71}$  – діаметр долота,  $v_5^{71}$  – довжина бурильної колони,  $v_6^{71}$  – азимут,  $v_7^{71}$  – зенітний кут;  $c_2^7$  – вхідні керуючі впливи,  $c_3^7$  – озброєння долота,  $c_4^7$  – фізико-механічні властивості породи,  $c_5^7$  – абразивні властивості породи.

Оскільки ряд технологічних процесів і технологічних проблем в області буріння характеризується невизначеністю, то доцільним є введення формулювання пошукових задач на основі обмежень з введеними мітками для

змінних та обмежень, виду  $(V : L_V^{set}, D, C : L_C^{set})$ , де

$V : L_V^{set} = \{v_1 : l_V^1, v_2 : l_V^2, \dots, v_n : l_V^n, \}_{n \in N}$ ,  $L_V^{set}$  - множина міток для змінних,

$C : L_C^{set} = \{c_1 : l_C^1, v_2 : l_C^2, \dots, v_n : l_C^n, \}_{n \in N}$ ,  $L_C^{set}$  - множина міток для обмежень.

Множина змінних, для якої слід внести мітки, що описують невизначеність у випадку технологічної проблеми контролю прихоплення бурової колони, матиме вигляд  $V^{72} = \{v_1, v_2, \dots, v_8, V_1^{72}\}$ , де  $v_1$  - властивості гірських порід,  $v_2$  - азимут свердловини,  $v_3$  - zenітний кут свердловини,  $v_4$  - динаміка бурової колони,  $v_5$  - талева система,  $v_6$  - похибка вимірювання,  $v_7$  - дискретність вимірювань,  $v_8$  - періодичність контролю;  $V_1^{72}$  - параметри бурового розчину.

Таким чином, для технологічної проблеми контролю прихоплення бурильної колони, вирішальне значення має утримання технологічних параметрів (змінних) в межах довірливих інтервалів, а саме  $V_D^8 = \{v_{d_1}^1, v_{d_2}^2, \dots, v_{d_8}^8\}$ , де  $\{d_i \in D_i\}_{i=1 \dots 8}$  для  $(V^8, D^8, C^8)$ , де  $d_i$  - довірливий інтервал змінної  $v_i$ ,  $v^1$  - механічна швидкість буріння,  $v^2$  - швидкість обертання буру,  $v^3$  - тиск розчину на вході,  $v^4$  - вага бурильного інструменту,  $v^5$  - момент обертання,  $v^6$  - витрати розчину на вході,  $v^7$  - витрати розчину на виході,  $v^8$  - проходка.

Всі визначені змінні які відповідають технологічним параметрам процесу буріння можна розділити на 2 категорії:

- 1) змінні числового типу, значення яких є дійсні числа;
- 2) змінні, що приймають текстові або лінгвістичні значення.

Основні змінні I типу це: витрата бурового розчину на вході в свердловину, диференційні витрати бурового розчину, тиск на вході в свердловину, температура бурового розчину на вході, температура бурового розчину на виході, механічна швидкість буріння, об'єм бурового розчину, осьове зусилля на долото.

Прикладами змінних II типу є: якість бурової установки, якість інструменту, стан обладнання, стан приладів, стан бурової установки, дотримання технологічних норм, дотримання правил експлуатації.

Оскільки існуючі солвери пошукових задач на основі обмежень вимагають зведення пошукової задачі до числового представлення, то відповідно значення змінних та обмежень в текстовій та лінгвістичній формі слід переводити в числове представлення згідно визначених шкал перетворень.

Найбільш вживаними лінгвістичними значеннями є: *{задовільно, достатньо, добре}*, *{поганий, задовільний, нормальний}*, *{занижений, нормальний, завищений}*, *{низький, середній, нормальний, високий, надвисокий, критичний}* і т.д.

В роботі [81] наведено задачу запобігання прихоплень бурової колони у вигляді:

- 1) введення множини прихоплень бурової колони  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_k\}_{k \in N}$ ;
- 2) введення множини параметрів технологічного процесу  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_l\}_{l \in N}$ , що визначають структуру контролю процесу прихоплення бурової колони;
- 3) опис діапазонів зміни кожного з введених параметрів  $x_i \in [x_i^1; x_i^2]_{i=1..l}$ ;
- 4) введення функцій належності  $\mu_{x_i}$  для представлення поведінки параметрів  $x_i$ ;
- 5) введення матриці знань *KnowledgesMatrix*.

В пропонованому підході дана задача описується формальною структурою представлення та задоволення обмежень, яка утворюється послідовністю кроків:

- 1) введення технологічних проблем пов'язаних з виникненням прихоплень бурової колони  $TP^{set} = \{TP^1, TP^2, \dots, TP^k\}_{k \in N}$ ;
- 2) введення множини змінних  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_l\}_{l \in N}$ , що відповідають контрольованим технологічним параметрам процесу;

3) введення множини доменів  $D = \{d_1, d_2, \dots, d_l\}_{l \in N}$ , що визначають області зміни для змінних з області  $V$ , і субдомени  $d_i \subset D_i$  відповідають довірчим інтервалам технологічних параметрів, що представлені змінними  $v_i, i = 1..N$ ;

4) введення системи нечітких обмежень  $C^{fuzzy} = \{c_1 : l_{v_1}, c_2 : l_{v_2}, \dots, c_l : l_{v_l}\}$ ,

де

$$l_{v_i} \in L_V^{set} = \left\{ \frac{\text{"Критичний"}}{[1.00;1.00]}, \frac{\text{"Надвисокий"}}{[0.98;0.99]}, \frac{\text{"Високий"}}{[0.83;0.97]}, \frac{\text{"Нормальний"}}{[0.68;0.82]}, \frac{\text{"Вище середнього"}}{[0.33;0.67]}, \frac{\text{"Середній"}}{[0.18;0.32]}, \frac{\text{"Нище середнього"}}{[0.03;0.17]}, \frac{\text{"Низький"}}{[0.01;0.02]}, \frac{\text{"Найвищий"}}{[0.00;0.00]} \right\}$$

у вигляді множини обмежень з лінгвістичними мітками.

5) побудова множини рішень  $Solution^{set}$  в очікуваному просторі рішень  $SolutionSpace$  на основі стандартного або модифікованого солвера для отриманого формулювання інформаційно-пошукової задачі на основі обмежень:  $Solution^{set} = Sol(V, D, C^{fuzzy})$ .

За допомогою обмежень можна також моделювати контрольовані технологічні параметри, що стосуються бурового обладнання [81, 101]. В даному випадку можна отримати множину змінних виду:

$$V^{equip.} = \{v_1, v_2, \dots, v_{13}\},$$

де  $v_1$  - осьове зусилля на буровий інструмент,  $v_2$  - подача бурового інструменту,  $v_3$  - зусилля на гаку,  $v_4$  - положення талевого блоку,  $v_5$  - витрата бурового розчину,  $v_6$  - тиск нагнітання бурового розчину,  $v_7$  - частота обертання ротора,  $v_8$  - крутний момент на гаку,  $v_9$  - крутний момент на роторі,  $v_{10}$  - рівень розчину,  $v_{11}$  - витрата бурового розчину на виході,  $v_{12}$  - температура бурового розчину,  $v_{13}$  - густина бурового розчину.

Для введеної множини змінних використовується наступна множина доменів (довірчих інтервалів):

$$D^{equip.} = \{D_1, D_2, \dots, D_{13}\}, \text{ де}$$

$$\begin{aligned} [d_1..400] &\subseteq D_1, [d_2..20] \subseteq D_2, [1250..400] \subseteq D_3, [d_4..40] \subseteq D_4, [d_5..0.1] \subseteq D_5, \\ [d_6..25.4] &\subseteq D_6, [d_7..300] \subseteq D_7, [d_8..60] \subseteq D_8, [d_9..60] \subseteq D_9, [d_{10}..1.6] \subseteq D_{10}, \\ [d_{11}..100] &\subseteq D_{11}, [d_{12}..100] \subseteq D_{12}, [800..2600] \subseteq D_{13}. \end{aligned}$$

Введення системи обмежень дозволяє виконувати контроль технологічного процесу

$$C^{equip.} = \{c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7\},$$

де  $c_1$  - крутильний момент на роторі,  $c_2$  - витрата бурового розчину на вході,  $c_3$  - осьове зусилля на долото,  $c_4$  - витрата бурового розчину на виході,  $c_5$  - частота обертання ротора,  $c_6$  - подача бурового інструменту,  $c_7$  - тиск бурового розчину.

На основі фактичних даних виробничих процесів буріння НГС приведених в роботі [81] виконаємо представлення процесу ідентифікації можливого прихоплення бурової колони на основі введення змінних, їх доменів та накладання системи обмежень:

$$V^{ident.} = \{v_1, v_2, \dots, v_{13}\},$$

де  $v_1$  - пластовий тиск,  $v_2$  - перепад тиску,  $v_3$  - місце знаходження долота,  $v_4$  - густина бурового розчину,  $v_5$  - статична напруга зсуву,  $v_6$  - статична напруга зсуву з затримкою,  $v_7$  - в'язкість,  $v_8$  - водовіддача,  $v_9$  - зазор "бурова труба - стінка свердловини",  $v_{10}$  - довжина бурильної труби,  $v_{11}$  - викривлення стовбура свердловини,  $v_{12}$  - вміст змащувальної добавки,  $v_{13}$  - температура в зоні прихоплення.

Для введених змінних визначимо множину доменів:

$$D^{ident.} = \{D_1, D_2, \dots, D_{13}\}, \text{ де}$$

$$\begin{aligned} [4.6..700] &\subseteq D_1; [1.0..270] \subseteq D_2; [301..4785] \subseteq D_3; [1.16..2.05] \subseteq D_4; \\ [5..210] &\subseteq D_5; [11..300] \subseteq D_6; [36..200] \subseteq D_7; [2.0..16.5] \subseteq D_8; \\ [7.0..77.5] &\subseteq D_9; [10..247.3] \subseteq D_{10}; [0..32] \subseteq D_{11}; [1..18] \subseteq D_{12}; [24..110] \subseteq D_{13}. \end{aligned}$$

Система обмежень в даному випадку визначатиметься трьома множинами обмежень  $C^{ident.} = \{C_1^{ident.}, C_2^{ident.}, C_3^{ident.}\}$ . Множина обмежень  $C_1^{ident.}$  описує технологічні проблеми прихоплення, як наслідку звуження перерізу стовбура, утворення сальників, процесу осідання шламу та обважнювача; множина обмежень  $C_2^{ident.}$  описує технологічні проблеми прихоплення, як наслідку перепадів тиску, а множина  $C_3^{ident.}$  описує технологічні проблеми пов'язані із заклинюванням колони труб.

Таким чином, можна виділити наступні системи обмежень, що описуватимуть категорії прихоплення:

$$C^1 = \{C_1^{ident.}, C_2^{ident.}, C_3^{ident.}\};$$

$$C^2 = \{C_3, C_{12}\};$$

$$C^3 = \{C_1, C_2\};$$

$$C^4 = \{C_4, C_7, C_5, C_6, C_8, C_{12}\};$$

$$C^5 = \{C_{10}, C_9, C_{11}\}.$$

В роботі [81] представлено приклади лінгвістичних правил, які використовуються в процесі прийняття рішення, щодо управління бурінням. Структура таких правил визначається введеними лінгвістичними значеннями. Покажемо, що такі правила на основі лінгвістичних змінних можна легко перетворити на обмеження у вигляді лінгвістичних змінних:

**правило 1:** якщо осьове зусилля на долото і бурову колону перевищує граничні значення то можливе виникнення нештатної ситуації;

**обмеження 1:** граничні значення осьового зусилля осьового зусилля на долото і бурову колону визначають коректність процесу буріння;

**правило 2:** якщо спостерігається значне збільшення моменту на буровій колоні і значне збільшення тиску бурового розчину і зменшення механічної швидкості буріння то висока ймовірність прихоплення бурової колони;

**обмеження 2:** прихоплення бурової колони визначається значним збільшення моменту на буровій колоні, тиску бурового розчину, зменшення механічної швидкості буріння;

**правило 3:** якщо спостерігається значне зменшення моменту і значне збільшенням механічної швидкості буріння то висока ймовірність переходу в зону аномально високого пластового тиску;

**обмеження 3:** перехід технологічного процесу в зону з аномально високим тиском, визначається значним зменшенням моменту та значним збільшенням механічної швидкості буріння;

**правило 4:** якщо бурова колона переходить в зону з аномально високим тиском або змінюється сила опору обертання бурової колони то процес контролю стає некоректним;

**обмеження 4:** процес контролю вважається некоректним у випадку зони аномально високого пластового тиску якщо присутні зміни опору обертання бурової колони.

Таким чином, наведені приклади дозволяють виділити обмеження як основну складову формального апарату інформаційно-пошукових задач, практична цінність та перевага, яких полягає у можливості використання описів обмежень, форма яких наближається до природно-мовних, а також побудови відповідної класифікованої структури технологічних проблем.

## 2.2. Класифікація та структуризація технологічних проблем на основі обмежень

На формальному рівні задача задоволення обмежень [102-106] формулюється у вигляді кортежу  $(V; D; C)$ , де  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$  – множина змінних (параметрів) системи;  $D = \{D_1, D_2, \dots, D_n\}$  – множина доменів (областей визначення) кожної змінної;  $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$  – множина обмежень, тобто відношень, заданих на підмножині змінних  $\{v_{i_1}, \dots, v_{i_k}\}$  над їхніми доменами

$$\{D_{i_1} \times \dots \times D_{i_k}\} \supseteq c_i.$$

В запропонованому дослідженні як відправна точка використовується формальна ідея запропонована в [107], яка дозволяє виконувати керування роботою інтелектуальної системи на основі контролю задоволених і порушених обмежень. Для побудови формальної ідеї функціонування системи інтелектуальної підтримки прийняття рішень (СІПТР) введемо формальне представлення технологічної проблеми (нештатної ситуації при бурінні НГС)  $TP$  ( $TP$ -*Technological Problem*) як виду початкового формулювання задачі задоволення обмежень із додатковими множинами обмежень  $C^R = C^S \cup C^V$ ,  $C^{UnR}$ , де  $C^R$  - множина релевантних обмежень (*Relevant Constraints*) до технологічної проблеми  $TP$ ;  $C^S$  - множина обмежень, що задовольняється (*Satisfied Constraints*) при вирішенні технологічної проблеми;  $C^V$  - множина обмежень, що порушується (*Violated Constraints*) при рішенні технологічної проблеми;  $C^{UnR}$  - множина нерелевантних обмежень до технологічної проблеми.

Таким чином, технологічною проблемою на основі обмежень будемо вважати кортеж  $TP = \{V; D; C^R; C^{UnR}\}$ , де  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$  – множина змінних;  $D = \{D_1, D_2, \dots, D_n\}$  – множина доменів (областей визначення) кожної змінної;  $C^R = \{c_1^1, c_2^1, \dots, c_n^1\}$  – множина релевантних обмежень;  $C^{UnR} = \{c_1^2, c_2^2, \dots, c_n^2\}$  – множина нерелевантних обмежень [108].

У випадку технологічних проблем основна ідея реалізації полягає в контролі множини порушених і задоволених обмежень, то кожному обмеженню доцільно присвоїти певне оціночне значення, що задаватиме загальну преференцію обмежень.

Введення впорядкованої множини  $Ev^{set}$  необхідно для представлення різних рівнів порушення та задоволення обмежень. Спосіб побудови структури оцінювання визначає залежність оціночних значень від множин порушених і задоволених обмежень. Комутативність та асоціативність введеної операції дозволяє обчислювати сумарні значення оцінок для множин



$ConstrSet$ , систем  $ConstrSyst$  та ієрархій  $ConstrHrch$  порушених і задоволених обмежень. Введемо оціночну функцію виду:

$$evf \in (Ev^{set}, \otimes_{TP}, \succ_c, \top, \perp),$$

де  $Ev^{set}$  - множина, елементи якої називається оцінками;  $\otimes_{TP}$  - комутативна, асоціативна бінарна операція над  $Ev^{set}$ , яка задовольняє властивостям ідентичності та монотонності;  $\succ_c$  - відношення загального порядку над  $Ev^{set}$ ;  $\top$  та  $\perp$  - максимальний та мінімальний елемент з  $Ev^{set}$ , що задається відношенням  $\succ_c$ .

Для введеної оціночної функції на основі властивостей монотонності матимемо, що

$$\left\{ \begin{array}{l} evf(\psi) \vDash ConstrSet \Rightarrow evf(\psi) \vDash ConstrSet', ConstrSet' \subset ConstrSet \\ evf(\psi) \vDash ConstrSyst \Rightarrow evf(\psi) \vDash ConstrSyst', ConstrSyst' \subset ConstrSyst \\ evf(\psi) \vDash ConstrHrch \Rightarrow evf(\psi) \vDash ConstrHrch', ConstrHrch' \subset ConstrHrch \end{array} \right. .$$

На основі введеної структури оцінювання обмежень можемо визначити очікувані класи технологічних проблем:

1. *Класичні технологічні проблеми на основі обмежень* – на формальному рівні задаються як  $TP^{constr.} = ([0,1], \wedge, <, 0, 1)$ . Структура оцінювання, що використовується в даному випадку дозволяє отримати для кожного обмеження два види оцінок: 1 – якщо обмеження задовольняється, 0 – якщо обмеження порушується. Проте, при побудові присвоєнь, як рішень технологічних проблем, складно очікувати ситуації повного задоволення всіх накладених обмежень. Тому згідно введеного розділення обмежень матимемо:

– для множин –  $ConstrSet = ConstrSet^R \cup ConstrSet^{unR}$  (підмножини релевантних та нерелевантних обмежень);  $ConstrSet^R = ConstrSet^S \cup \cup ConstrSet^V$  (підмножини задоволених і порушених релевантних обмежень, оскільки порушення чи задоволення нерелевантних обмежень не розглядається системою при рішенні поточної технологічної проблеми);

– для систем –  $ConstrSyst = ConstrSyst^R \cup ConstrSyst^{unR}$  (підсистеми релевантних та нерелевантних обмежень) ;  $ConstrSyst^R = ConstrSyst^S \cup \cup ConstrSyst^V$  (підсистеми задоволених і порушених релевантних обмежень);

– для ієрархій –  $ConstrHrch = ConstrHrch^R \cup ConstrHrch^{unR}$  (субієрархії релевантних та нерелевантних обмежень);  $ConstrHrch^R = ConstrHrch^S \cup \cup ConstrHrch^V$  (субієрархії задоволених і порушених релевантних обмежень).

Для описаного розподілу доцільним буде застосування додаткових оціночних функцій максимізації кількості задоволених обмежень і мінімізації кількості порушених, що відповідно дозволить контролювати якість рішення.

Оперування з конструкціями обмежень в подальшому викладі здійснюється на основі їх прив'язки до деякої виділеної поточної технологічної проблеми  $TP_j$  наступним чином:

$$ConstrHrch_{TP_j} = \bigcup_{i=1}^{k_{max}} ConstrSyst_{TP_j} = \bigcup_{i=1}^{k_{max}} \{c_1, c_2, \dots, c_{n_i}\}_{n \in N}.$$

## 2. Технологічні проблеми на основі обмежень з ваговими коефіцієнтами

– на формальному рівні можуть бути представлені як  $TP^{weight} = (N, \otimes_{weight}, >, [0,1])$ . Специфіка такого класу технологічних проблем полягатиме в обчисленні сум вагових коефіцієнтів для множин (систем, ієрархій) порушених і задоволених обмежень і вибору присвоєння з відповідно мінімальними та максимальними значеннями сум.

## 3. Технологічні проблеми на основі обмежень з ймовірнісними коефіцієнтами

– можуть представлятися формальними структурами виду  $TP^{prb} = ([0,1], \otimes_{prb}, <, 0,1)$ . В даному випадку ймовірнісний коефіцієнт визначатиме ймовірність релевантності обмеження фактичній технологічній проблемі  $TPF$ , оскільки при побудові присвоєнь важливим є порушення чи задоволення тільки релевантних обмежень. Для функції оцінювання присвоєнь  $evf(\psi)$  та для деякого присвоєння  $\psi$ ,  $\psi \in \Psi_V$  із припущення про незалежність обмежень в множині (системі) можемо отримати оціночне значення для

присвоєння  $\psi$  у вигляді  $evf_{TP^{prb}}(\psi) = \prod_{(c_i \in ConstrSet^R) \wedge (\psi \models c_i \in ConstrSet^{UnR})} (1 - prb(c_i))$ , де  $prb(c_i)$  - ймовірність релевантності обмеження  $c_i$ ,  $c_i \in ConstrSet^R$  в фактичній технологічній проблемі  $TPF^{prb}$ . Для заданої множини (системи, ієрархії) обмежень слід обчислити сумарне значення ймовірнісних оцінок і як рішення технологічної проблеми  $Sol(TPF^{prb})$  вибрати присвоєння з максимальним різним значенням ймовірнісної релевантності, оскільки саме таке рішення максимально відповідатиме очікуванням інтелектуальної системи.

4. Технологічні проблеми на основі обмежень з можливісними коефіцієнтами – можуть представлятися формальною структурою  $TP^{posbl} = (\langle 0,1 \rangle, max, \langle \cdot, \cdot \rangle, 1, 0)$ . Дана формальна структура дозволяє виконувати оцінювання можливісної необхідності задоволення чи порушення множини (системи, ієрархії) накладених обмежень при побудові присвоєнь у процесі пошуку рішення технологічної проблеми. Пошук оптимального присвоєння з введеною функцією мінімізації по сумарних значеннях переваг множини порушених та введеною функцією максимізації по сумарних значеннях переваг множини задоволених обмежень розглядається як основна складова процесу пошуку рішень. Введення переваг в даному випадку дозволяє виконати ранжування множини релевантних обмежень  $ConstrSet^R$  по ступеню важливості.

Введена класифікація відображена на рис. 2.1.

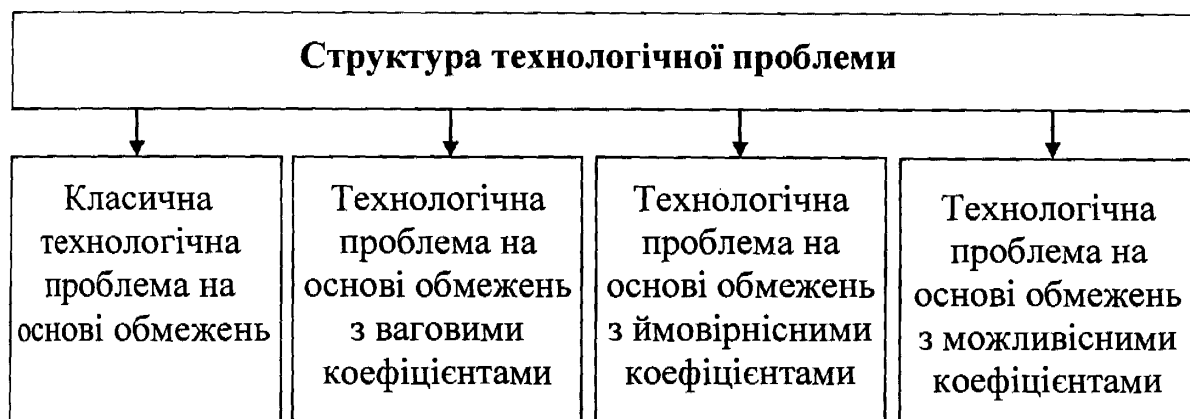


Рис. 2.1. Класифікація технологічних проблем з обмеженнями

В загальному випадку, введення рівня метаструктури є необхідним для вибору певного способу специфікації значень які повинні асоціюватися з кортежами значень в доменах змінних при виконанні присвоєнь. Крім того, для вибраної метаструктури слід ввести формальні операції, що дозволятимуть оперувати з обмеженнями.

Як базову метаструктуру слід розглядати кортеж  $(MS, \oplus, \otimes, 0, 1)$ , де  $MS$  - множина метаструктури;  $0, 1 \in MS$ ;  $\oplus, \otimes$  - введені операції з властивостями комутативності, асоціативності та дистрибутивності відповідно. Системою обмежень вважається кортеж  $CS = (MS, D, V)$ , де  $MS$  - формальна метаструктура,  $D$  - домен змінних,  $V$  - множина змінних.

Для заданої формальної метаструктури  $FMS = (MS, \oplus, \otimes, 0, 1)$  і системи обмежень  $CS^{MS} = (MS, D, V)$ , як обмеження розглядається пара  $(RC, SC)$ , де  $SC \subseteq V$  та  $RC : D^{|SC|} \rightarrow MS$ .

Інтерпретація кортежу  $(RC, SC)$  відповідає парам значень  $\langle \{умова\_релевантності\_i\}_i, \{умова\_задоволення\_i\}_i \rangle$ . Обмеження визначатиме множини змінних в  $sc$  і присвоюватиме кожному кортежу значень елементи з формальної метаструктури.

Рішенням технологічної проблеми на основі м'яких обмежень  $TP^{soft} = (ConstrSet, SC)$  будемо вважати обмеження утворене в результаті проєкції:  $Sol(TP^{soft}) = (\otimes ConstrSet) \Downarrow SC$ .

Тобто, всі обмеження поєднуються і після чого проєктуються на множину змінних в  $SC$ . Таким чином, отримуємо обмеження над множиною  $SC$ , яке індукується всією формальною структурою технологічної проблеми на основі м'яких обмежень. В загальному, для цього обмеження задається розподіл відносно оцінок його складової  $RC$  на кожному кортежі присвоєнні), тобто формула може розглядатися як інтерпретація ступеня задоволення:

$$(\otimes ConstrSet) \Downarrow SC \vDash SD(ConstrSet),$$

де  $SD(ConstrSet)$  – ступінь задоволення множини обмежень.

На формальному рівні, максимальне метаструктурне значення стосовно операції  $\prec_{MS}$  для кортежів в рішенні  $Sol(TP^{soft})$  відповідає найкращому рівню послідовності рішення. Множину таких кортежів можна розглядати як множину оптимальних кортежів, які задовольнятимуть введеним формальним означенням.

Метаструктурне значення оптимального рішення будемо вважати найкращим рівнем послідовності рішення технологічної проблеми на основі м'яких обмежень і позначатимемо його як:  $bl^{consist}(TP^{soft}) = Sol(TP^{soft}) \Downarrow \emptyset$ .

Оскільки інтелектуальна система розглядатиме ряд технологічних проблем та множини їх рішень, то заслуговує уваги дослідження питання еквівалентності на множині технологічних проблем. Розглянемо випадок технологічних проблем з м'якими обмеженнями.

Технологічну проблему на основі м'яких обмежень  $TP^{soft}$  будемо вважати *сильним уточненням*  $TP'^{soft}$ , якщо основна властивість матиме місце для всіх  $RC_1$  та  $RC_2$ , визначених як  $(RC_1, SC_{\subseteq}) \in ConstrSet$  та  $(RC_2, SC_{\subseteq}) \in ConstrSet'$ , де  $SC_{\subseteq} \subseteq SC$ . Суть означення полягає в тому, що якщо  $TP^{soft}$  є уточненням  $TP'^{soft}$ , тоді множина відповідних оптимальних кортежів з  $TP^{soft}$  включається в множину оптимальних кортежів з  $TP'^{soft}$ . Тому задача знаходження оптимальних кортежів для  $TP^{soft}$  може бути зведена до пошуку оптимальних кортежів у  $TP'^{soft}$ . Формальна структура технологічних проблем на основі обмежень з оцінками, що є початковою базою введення процедури уточнення, не включає жодного часткового впорядкування.

Досліджуючи представлення формальних метаструктур можна вивести класи технологічних проблем на їх основі. Для цього необхідно встановити відповідність між технологічними проблемами на основі м'яких обмежень і технологічними проблемами на основі обмежень з оцінками. Виконання даної задачі дозволить отримати два нових класи технологічних проблем:

1. *Технологічні проблеми на основі нечітких обмежень*  $TR^{fuzzy}$  – даний клас можна отримати як наслідок застосування операцій поєднання і проєкції. Для введеної формальної метаструктури її множина задається інтервалом  $[0,1]$ , де 1 це найкращий елемент, а 0 – найгірший. Введення максимального та мінімального елементів дозволить застосувати операцію кон'юнкції. Особливість даного типу технологічних проблем полягатиме у використанні лінгвістичних оціночних значень, таких як “в більшості випадків”, “швидш за все”, “інколи”, “деколи” та ін.

2. *Технологічні проблеми на основі лексикографічних обмежень.* Класичні пошукові задачі на основі лексикографічних обмежень вперше введені в [109], як вид розширення пошукових задач на основі нечітких обмежень. Таке розширення може бути також побудоване і для пошукових задач на основі обмежень з можливісними коефіцієнтами.

У випадку технологічних проблем на основі м'яких обмежень, побудова подібного розширення вимагатиме використання концепції мультимножин елементів над інтервалом  $[0,1]$ . Основні задачі які необхідно вирішити при введенні мультимножин полягатимуть у визначенні заборонених та дозволених кортежів значень, введення найкращого та найгіршого значення та переозначення операцій поєднання та проєкції обмежень.

Досліджувані формальні структури технологічних проблем на основі обмежень можна розбити на дві групи: технологічні проблеми на основі обмежень з ваговими, ймовірнісними, можливісними коефіцієнтами, а також технологічні проблеми з обмеженнями з оцінками, що виконують прив'язку преференцій до кожного обмеження, тобто обмеження задаватиметься парою  $(c, pd)$ , що складається з класичного обмеження  $c$  і значення преференції деякого виду  $pd$ , що залежить від типу формальної структури. В технологічних проблемах з нечіткими та лексикографічними обмеженнями, а також м'якими обмеженнями, обмеження розглядаються як функція, означена на кортежі значень, що як результат видає деякий рівень преференцій, тобто

для обмеження  $c$  із змінними  $c:(v_1, v_2, \dots, v_k)$  отримаємо відображення:  $D_1 \times \dots \times D_k \rightarrow PD^{set}$ , де  $D_1, \dots, D_k$  – домени змінних в обмеженні  $c$ , а  $PD^{set}$  – множина можливих преференцій.

Розширена класифікація технологічних проблем на основі обмежень представлена на рис. 2.2.

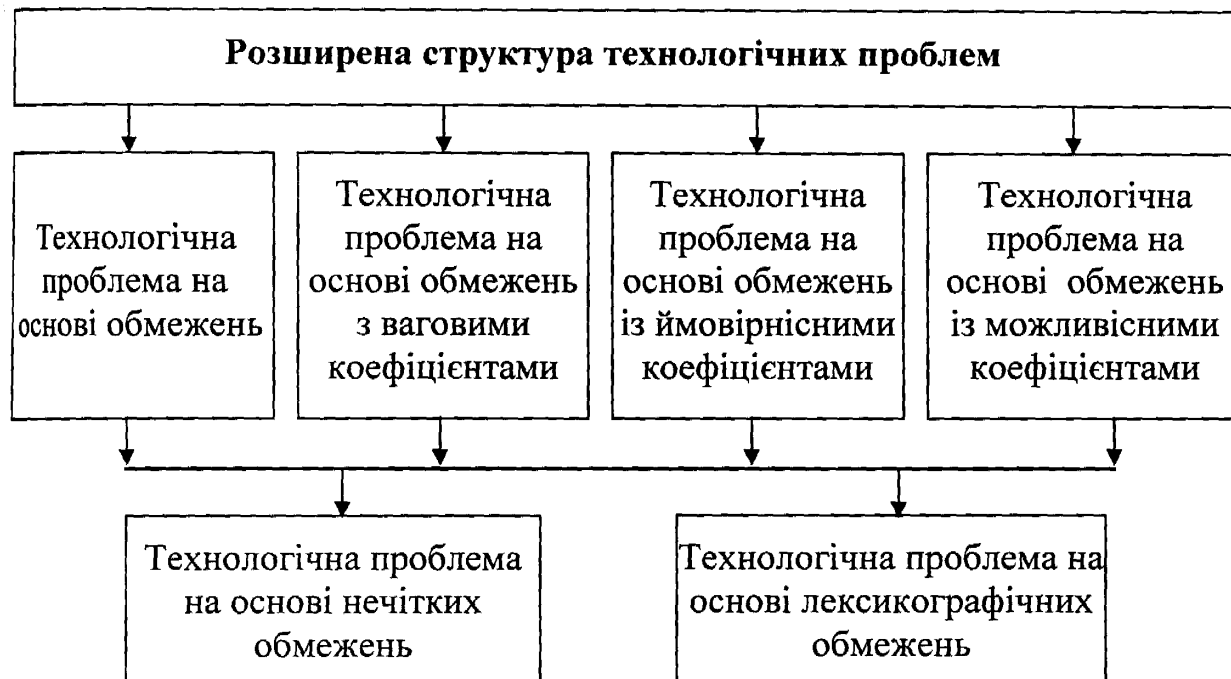


Рис. 2.2. Розширена класифікація технологічних проблем на основі обмежень

Таким чином, такий підхід дає можливість моделювати обмеження з пріоритетами, що мають таку саму інтерпретацію як і обмеження із значеннями необхідності у випадку класичних пошукових задач на основі обмежень з можливісними коефіцієнтами [110,111] і визначає необхідність введення певного способу порівняння для систем обмежень технологічних проблем.

### 2.3. Дослідження ієрархій та методів порівняння систем обмежень для технологічних проблем

Для того, щоб мати можливість виконувати оцінку присвоєнь  $\psi$  на ієрархії систем  $ConstrSyst$ , та множин  $ConstrSet$ , необхідним, очевидно є

перехід на рівень мультимножин та введення відповідних операцій над мультимножинами.

Для кожного присвоєння  $\psi$  і рівня ієрархії  $ConstrSet_i = \{c_1, \dots, c_{n_k}\}$  для ієрархії обмежень  $ConstrHrch$  значення  $SF(ConstrSet_i, \psi)$  відповідатиме мультимножині  $MultiSet^{lex} = \{cw(c_1)SF(c_1\psi), \dots, cw(c_{n_k})SF(c_{n_k}\psi)\}$ , тобто  $SF(ConstrSet_i, \psi) \in N$ , що має місце для кожного  $SF(c\psi), cw(c) \in N$ .

Це означатиме, що можливим способом порівняння (компаратором) технологічних проблем буде спосіб “лексикографічно кращий”, що виконуватиме додавання елементів до мультимножини  $SF(ConstrSet_i, \psi)$  або генеруватиме ваговий коефіцієнт порушеного обмеження або присвоюватиме “1” для кожного задоволеного обмеження.

Таким чином, використання функції успішності обмежень, а також компаратора для впорядкування ваг обмежень на кожному з рівнів ієрархії  $i=1..k_{max}$  є очікувано ефективним інструментом.

Присвоєння  $\psi^1$  будемо вважати “краще впорядкованим” ніж інше присвоєння  $\psi^2$  по відношенню до ієрархії обмежень (ІО), якщо для кожного з обмежень з рівнів  $1..k-1$ , їх успішність після застосування  $\psi^1$  дорівнює їх успішності після застосування  $\psi^2$ :  $\left( \forall c \in \bigcup_{i=1}^{k-1} ConstrSyst_i \right) \vdash (SF(c\psi^1) = SF(c\psi^2))$ , а на рівні  $k$  успішність обмежень можна порівняти за допомогою їх вагових коефіцієнтів  $cw(c)$ :

$$\forall c \in ConstrSyst_k \vdash (SF([c : cw]\psi^1) =_{cw(c)} SF([c : cw]\psi^2)).$$

Розглянемо ієрархію обмежень деякої технологічної проблеми з ваговими коефіцієнтами:

$$ConstrHrch^{weight} = \bigcup_{i=1}^{k_{max}} ConstrSyst_i = \bigcup_{i=1}^{k_{max}} \{c_{i1} : cw(c_{i1}), \dots, c_{in_i} : cw(c_{in_i})\}_{n \in N}.$$



Впорядкованість формальної структури  $(ConstrHrch^{weight}, W^{set}, \leq_{W^{set}})$  дозволяє встановити відношення між компараторами виду “краще впорядкований” та “кращий локально”.

Нехай  $ConstrHrch^{weight} = \bigcup_{i=1}^{k_{max}} ConstrSyst_i$  - ієрархія обмежень з ваговими коефіцієнтами і  $cw: ConstrHrch^{weight} \rightarrow W^{set}$  - вагова функція. Уточнення ієрархії  $ConstrHrch^{weight} / cw$  визначимо як  $\bigcup_{i=1}^{k_{max}} ConstrSyst_i / cw, ConstrSyst_i / cw = \bigcup_{l=1}^{n_i} ConstrSet_{il}$ . Якщо твердження  $ConstrSyst_i / cw = ConstrSyst_i$  має місце, а значення  $ConstrSet_{il}$  є заданим для  $\forall i \in 1 \dots n_i, \forall l \in 1 \dots n_i$  згідно формули:

$$(\forall c \in ConstrSyst_i, \forall c^l \in ConstrSyst_i : (c \in ConstrSet_{il}, c^l \in ConstrSet_{il}, l_1 \in 1 \dots n_i, l < l_1) \Leftrightarrow (cw(c^l) <_w cw(c)))$$

Оскільки рівень  $ConstrSyst_i$  є обов'язковим і вагові коефіцієнти мають однакову інтерпретацію, то можна вважати, що:

$$\forall c_1, c_2 \in ConstrSyst_1 \models cw(c_1) = cw(c_2).$$

Таким чином, отримаємо справедливість рівності  $ConstrSyst_1 / cw = ConstrSyst_1 = ConstrSet_{11}$ . Крім того, оскільки рівень  $ConstrSyst_1$  є обов'язковим, то  $Sol(ConstrHrch^{weight}) \models c, \forall c \in ConstrSyst_1$ .

З другого боку, уточнення ієрархії можна розглядати як деяку нову ієрархію, в якій рівень  $ConstrSet_{i_1 l_1}$  є більш важливим, ніж рівень  $ConstrSet_{i_2 l_2}$ , якщо  $(i_1 < i_2) \vee ((i_1 = i_2) \wedge (l_1 < l_2))$ .

Нехай задана ієрархія  $ConstrHrch^{weight}$ , вагова функція  $cw$  та присвоєння  $\psi^1$  і  $\psi^2$ . Якщо формальна структура  $(\psi^1, \psi^2, ConstrHrch^{weight})$  є “краще впорядкованою” то відповідно формальна структура  $(\psi^1, \psi^2, ConstrHrch^{weight} / cw)$  є “локально кращою”. Присвоєння  $\psi^1$  є “краще впорядкованим” рішенням для ієрархії  $ConstrHrch^{weight}$  з ваговою функцією

$cw$ , тоді, якщо  $\psi^1$  є “локально кращим” рішенням для уточнення початкової ієрархії  $ConstrHrch^{weight} / cw$ . Кожне “краще впорядковане” рішення  $\psi$  для ієрархії  $ConstrHrch^{weight}$  є відповідно локально кращим.

Таким чином, на кожному з рівнів можна виконувати оцінювання виходячи з припущення про те, що множина обмежень з найнижчим індексом буде, відповідно, обов’язковою і всі її обмеження задовольнятимуться, що в кінцевому підсумку дозволить побудувати рішення на рівні загальної структури технологічної проблеми.

#### 2.4. Побудова рішень на множині структурованих технологічних проблем з накладеними системами та ієрархіями обмежень

У випадку технологічних проблем, компаратори “доменно кращі” виконують порівняння присвоєнь, що не можуть бути порівнювані засобами локальних компараторів. Присвоєння можуть бути непорівнювані до певного рівня  $k-1$ , а на рівні  $k$  функції успішності обмежень порівнюються окремо.

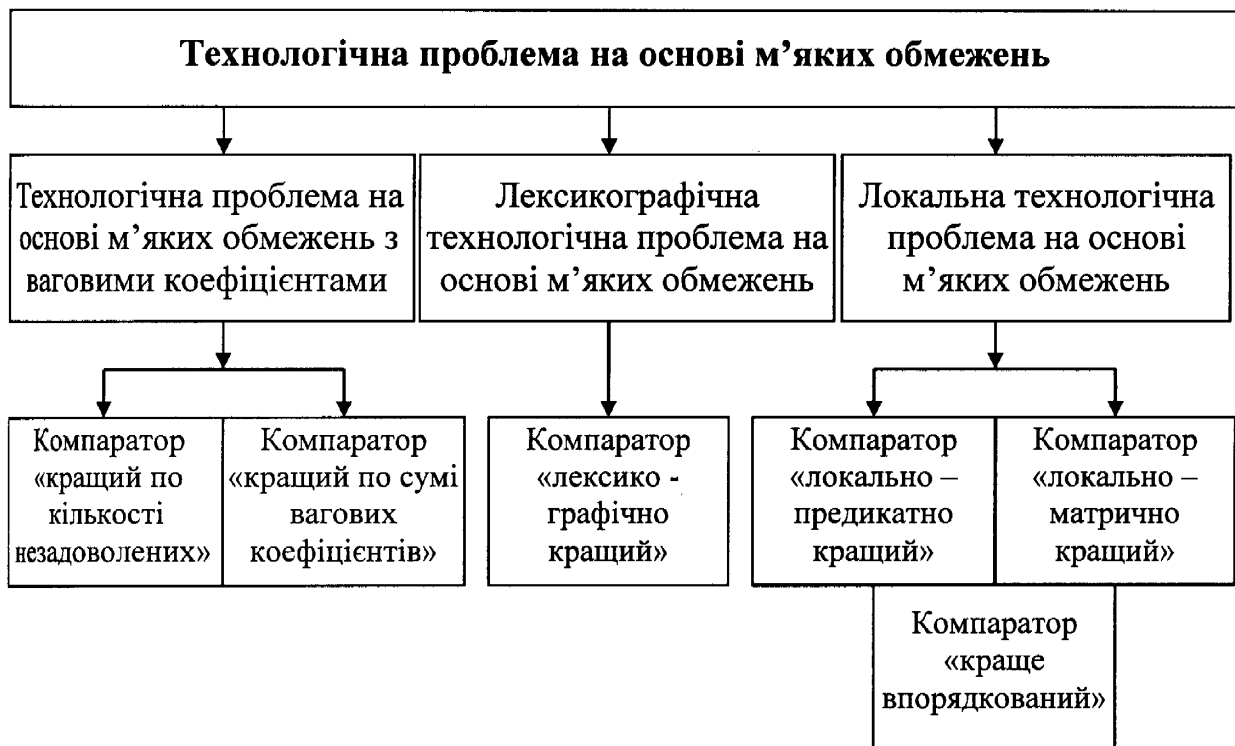


Рис. 2.3. Класифікація компараторів рівня ієрархії обмежень

Таким чином, може бути введено означення технологічних проблем на основі м'яких обмежень для компараторів “лексикографічно кращий” в формі лексикографічних технологічних проблем на основі м'яких обмежень і компаратора “кращий по сумах вагових коефіцієнтів” в формі технологічних проблем на основі м'яких обмежень з коефіцієнтами та “локально кращі” компаратори в формі локальних технологічних проблем на основі м'яких обмежень відповідно. Для всіх визначених класів технологічних проблем можна побудувати відношення між цими класами і класичними пошуковими задачами на основі обмежень з ваговими коефіцієнтами. Зокрема можна показати, що компаратори “лексикографічно кращий” та “кращий по сумах вагових коефіцієнтів” є еквівалентними до пошукових задач на основі обмежень з ваговими коефіцієнтами. Така еквівалентність базується на деякому поліноміальному перетворенні. ІО з локальними компараторами належать до окремого класу задач, оскільки введені в них формальні метаструктурні множини є частково впорядкованими. Клас локальних технологічних проблем на основі м'яких обмежень може бути перетворений в клас пошукових задач на основі обмежень з ваговими коефіцієнтами, шляхом застосування процедури уточнення з поліноміальними характеристиками. Проте, побудова зворотної процедури уточнення неможлива в силу часткової впорядкованості множини присвоєнь для ІО.

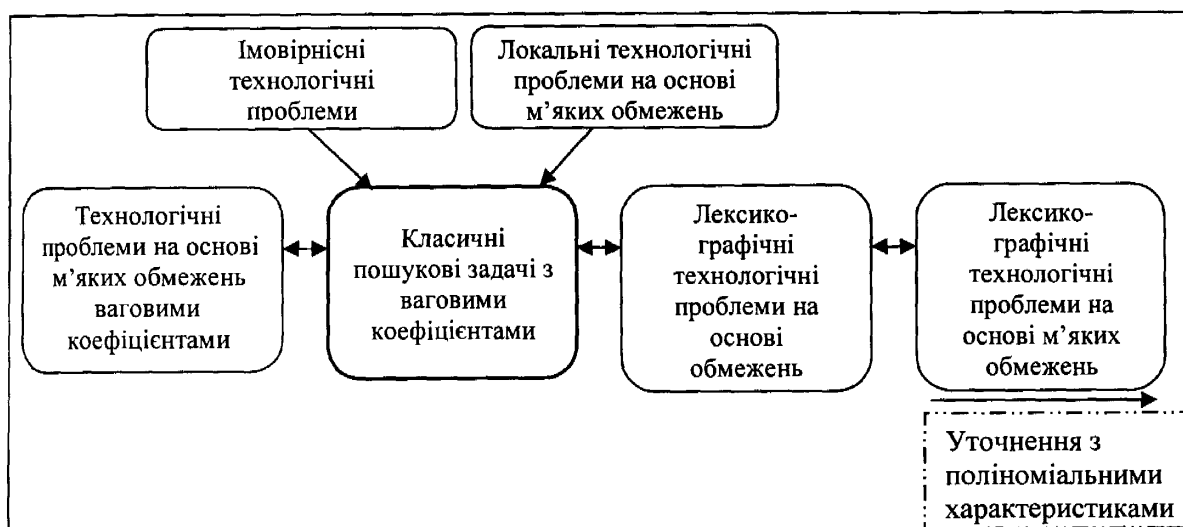


Рис. 2.4. Відношення між базовими класами технологічних проблем на основі м'яких обмежень

На рис. 2.4 представлено відношення між базовими класами технологічних проблем на основі м'яких обмежень по відношенню до їх властивостей.

Класи технологічних проблем на основі м'яких обмежень з ваговими коефіцієнтами і лексикографічні технологічні проблеми на основі м'яких обмежень можна розглядати як класи пошукових задач з оцінками на основі побудови деякого відношення між класами технологічних проблем на основі м'яких обмежень та пошукових задач з оцінками. Проте така відповідність не буде повною, оскільки в пошукових задачах з оцінками вимагається виконання повного впорядкування оціночних значень. Проте ця властивість не задовольняється для класу локальних технологічних проблем на основі м'яких обмежень, тому неможливо означити клас пошукових задач з оцінками для ІО з будь-яким локальним компаратором.

Технологічні проблеми на основі м'яких обмежень з ваговими коефіцієнтами можна розглядати як перший необов'язковий рівень ІО з компаратором *“кращий по сумах вагових коефіцієнтів”*. Повинно існувати просте уточнення з поліноміальними характеристиками з початкової ІО з компаратором *“кращий по сумах вагових коефіцієнтів”* в пошукову задачу з ваговими коефіцієнтами.

Лексикографічні технологічні проблеми на основі м'яких обмежень відповідають першому необов'язковому рівню ІО з компаратором *“лексикографічно кращий”*.

Локальна технологічна проблема на основі м'яких обмежень може бути трансформована в задачу, яка є еквівалентною до пошукової задачі на основі обмежень з ваговими коефіцієнтами шляхом деякого уточнення з поліноміальними характеристиками. В даному випадку оптимальний кортеж локальної технологічної проблеми на основі м'яких обмежень не тільки максимізує функцію успішності окремого обмеження на кожному рівні, але й також мінімізує суму вагових коефіцієнтів всіх порушених обмежень. Локальна технологічна проблема на основі м'яких обмежень не може бути

задана як уточнення лексикографічної технологічної проблеми на основі м'яких обмежень тому, що непорівнювані елементи метаструктури в локальній технологічній проблемі на основі м'яких обмежень повинні також бути непорівнюваними в класі технологічних проблем на основі м'яких обмежень для класичних пошукових задач з ваговими коефіцієнтами, для яких множина формальної метаструктури є повністю впорядкованою.

Оскільки, як показано вище, класи технологічних проблем на основі обмежень можна звести до відповідних класів класичних пошукових задач, то очевидно матиме місце відповідність між способом побудови рішення технологічної проблеми та способом рішення класичних пошукових задач, зокрема методів роботи з простором рішень. Оскільки для інтелектуальної системи більш важливе значення має сам процес пошуку рішення в ході якого, шляхом аналізу порушених і задоволених обмежень, система вибирає та застосовує певну стратегію, то доцільним для аналізу є процес пошуку всіх розв'язків, виділених розв'язків, а також процес пошуку найкращого оптимального рішення відповідно до заданих критеріїв. В класичних пошукових задачах процес пошуку оптимального рішення розглядається як задача оптимізації [112].

Розглянемо формальне представлення такого процесу для введених класів технологічних задач на основі обмежень, формальна структура яких представлена рис. 2.5. Виділимо основні типи обмежень, що будуть застосовуватись для формалізації технологічних проблем:

- 1) обмеження з ваговими коефіцієнтами  $c^{weigh.}$  ;
- 2) обмеження з ймовірнісними коефіцієнтами  $c^{probl.}$  ;
- 3) обмеження з можливісними коефіцієнтами  $c^{posbl.}$  ;
- 4) обмеження з оціночними значеннями  $c^{ev.}$  ;
- 5) обмеження з преференціями  $c^{pref.}$  ;

6) нечіткі обмеження  $c^{lv.}$  (обмеження з лінгвістичною міткою) – лінгвістична мітка характеризує лінгвістичне значення однієї з характеристик обмеження, наприклад валідності (дійсності).

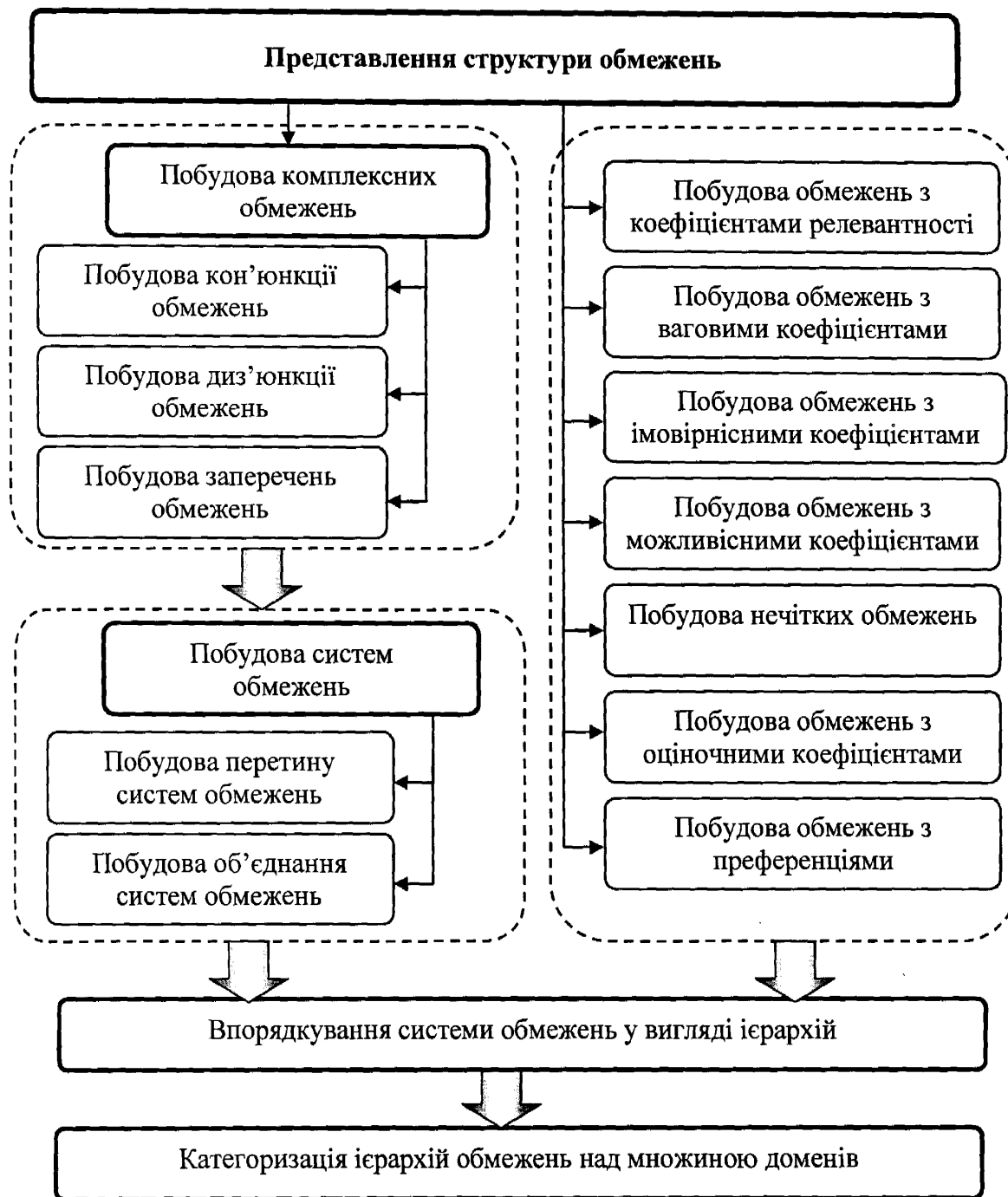


Рис. 2.5. Класифікація та структуризація обмежень для технологічних проблем

Для оперування з обмеженнями в формальних представленнях технологічних проблем введемо їх наступні характеристики:

1. Ступінь релевантності (дійсності, валідності;  $rd$  – *relevancy degree*) – характеризує міру повноти опису обмеженням технологічної проблеми. Дана характеристика розглядається як статична, профільна;

2. Ступінь задоволення ( $sd - satisfaction degree$ ) - динамічна характеристика етапу виконання. Значення  $sd = 1$  відповідає повному задоволенню обмежень, а значення  $sd = 0$  відповідає повному незадоволенню (порушенню) обмеження. Дані значення є граничними, тому, як правило, ступінь задоволення отримуватиме значення з проміжку  $[0;1]$ . Можна також розглядати обмеження з точки зору потенційності його задоволення та потенційності його релевантності, що буде розкрито в наступних означеннях;

3. Вага обмеження характеризується ваговим значенням ( $cw - constraint weight$ ).

Система може оперувати як із одиничними обмеженнями (з ваговими або оціночними значеннями відповідно) так і зі системами обмежень  $CS$  (*constraints system*) та ієрархіями обмежень  $CH$  (*constraints hierarchy*) із заданою кількістю рівнів. В ієрархії виділяють обов'язкові рівні (обмеження на цьому рівні повинні задовольнятися) і необов'язкові (задоволення обмежень є преференційним). Обмеження можуть задовольнятися повністю чи частково з певним ступенем задоволення  $sd$ .

На множині введених обмежень можна будувати комплексні обмеження на основі об'єднання та перетину існуючих множин і систем обмежень, а також на основі кон'юнкції, диз'юнкції та заперечення одиничних обмежень. Згідно області застосування (рівня активності) обмеження поділяють на локальні, доменні та глобальні.

Таким чином, під *технологічною проблемою*  $TP$  будемо розуміти певну сутність предметної області яка містить задачу, що вимагає рішення, котре належить простору можливих рішень технологічної проблеми.

Ступенем релевантності обмеження  $c$  технологічній проблемі  $TP$  будемо вважати міру відношення обмеження  $c$  до технологічної проблеми  $TP$  з точки зору повноти опису. Ступінь релевантності будемо позначати  $rd, rd \in [0;1]$ . Ступінь релевантності  $rd = 1$  означає абсолютну релевантність обмеження технологічній проблемі, а ступінь релевантності  $rd = 0$  означає абсолютну нерелевантність обмеження цій проблемі.

Для кожної технологічної проблеми  $TP_i$  з множини  $\{TP_i\}_{i=1..n}$ , що описується власною множиною обмежень  $ConstrSet_i = \{c_i^j\}_{j=1..m}$ ,  $m, n \in \mathbb{N}$ , множина обмежень з введеним ступенем релевантності матиме вигляд:

$$\{ConstrSet_i = \{c_i^j : rd^j\}_{j=1..m}\}_{i=1..n}.$$

Ваговим коефіцієнтом обмеження  $c$  будемо вважати міру повноти опису технологічної проблеми, що задається даним обмеженням. Ваговий коефіцієнт обмеження будемо позначати  $cw, cw \in [0;1]$ . Значення вагового коефіцієнта  $cw=1$  означає абсолютну повноту опису обмеженням технологічної проблеми, а значення вагового коефіцієнта  $cw=0$  означає повну відсутність опису технологічної проблеми в формулюванні обмеження.

Ваговим коефіцієнтом присвоєння будемо вважати характеристику важливості виконання присвоєння певного значення змінної. Найбільш зручним способом представлення вагових значень присвоєнь є їх використання в якості міток змінних. Множина обмежень з введеними ваговими коефіцієнтами матиме вигляд:

$$\{ConstrSet_i = \{c_i^j : cw^j\}_{j=1..m}\}_{i=1..n}.$$

Ймовірнісним коефіцієнтом обмеження  $c$  будемо називати міру ймовірності задоволення або порушення обмеження при вирішенні технологічної проблеми. Ймовірнісний коефіцієнт обмеження будемо позначати  $cpr, cpr \in [0;1]$ . Значення ймовірнісного коефіцієнта  $cpr=1$  позначає абсолютну ймовірність задоволення (порушення) обмеження при рішенні технологічної проблеми, а значення ймовірнісного коефіцієнта  $cpr=0$  позначає абсолютне унеможливлення задоволення (порушення) обмеження при рішенні технологічної проблеми. Множина обмежень з введеними ймовірнісними коефіцієнтами матиме вигляд:

$$\{ConstrSet_i = \{c_i^j : cpr^j\}_{j=1..m}\}_{i=1..n}.$$

Якщо позначити  $cpr^{sat}$  - ймовірність задоволення обмеження,  $cpr^{viol}$  - ймовірність, того що обмеження буде порушене, то очевидно, що



$$cpr^{sat.} = 1 - cpr^{viol.}$$

Можливісним коефіцієнтом обмеження  $c$  будемо вважати можливісну міру задоволення або порушення обмеження при вирішенні технологічної проблеми. Можливісний коефіцієнт обмеження будемо позначати  $cps, cps \in [0; 1]$ . Значення можливісного коефіцієнта  $cps = 1$  означає абсолютну можливість задоволення (порушення) обмеження при рішенні технологічної проблеми, а значення можливісного коефіцієнта  $cps = 0$  означає абсолютну неможливість задоволення (порушення) обмеження при рішенні проблеми. Множина обмежень з введеними можливісними коефіцієнтами матиме вигляд:

$$\{ ConstrSet_i = \{ c_i^j : cps^j \}_{j=1..m} \}_{i=1..n}.$$

Обмеження  $c$  із оцінкою характеризується описом на основі оціночного значення  $evc, evc \in [0; 1]$ , яке є суб'єктивною оцінкою значимості обмеження, що вказується об'єктом ППР. Множина обмежень  $ConstrSet_i$  із введеними оціночними значеннями матиме вигляд:

$$\{ ConstrSet_i = \{ c_i^j : evc^j \}_{j=1..m} \}_{i=1..n}.$$

Обмеження  $c$  із перевагами характеризується описом на основі коефіцієнта переваги  $pfv, pfv \in [0; 1]$ , який є суб'єктивною оцінкою важливості (значимості) обмеження, що вказується експертом нафтогазової предметної області. Множина обмежень  $ConstrSet_i$  з введеними перевагами матиме вигляд:

$$\{ ConstrSet_i = \{ c_i^j : pfv^j \}_{j=1..m} \}_{i=1..n}.$$

Нечітке обмеження (*fuzzy constraint*) характеризується описом на основі лінгвістичних значень, тобто значень типу “швидше за все”, “в більшості випадків”, “майже ніколи”, “майже завжди”, “завжди”, “дуже часто”, “часто”, “середньо”, “рідко”, “дуже рідко”, “ніколи”, “невідомо” і т.п. Множина обмежень з введеними лінгвістичними значеннями матиме вигляд:

$$\{ ConstrSet_i = \{ c_i^j : lv^j \}_{j=1..m} \}_{i=1..n}.$$

Підсумкова ієрархія видів обмежень представлена на рис. 2.6.

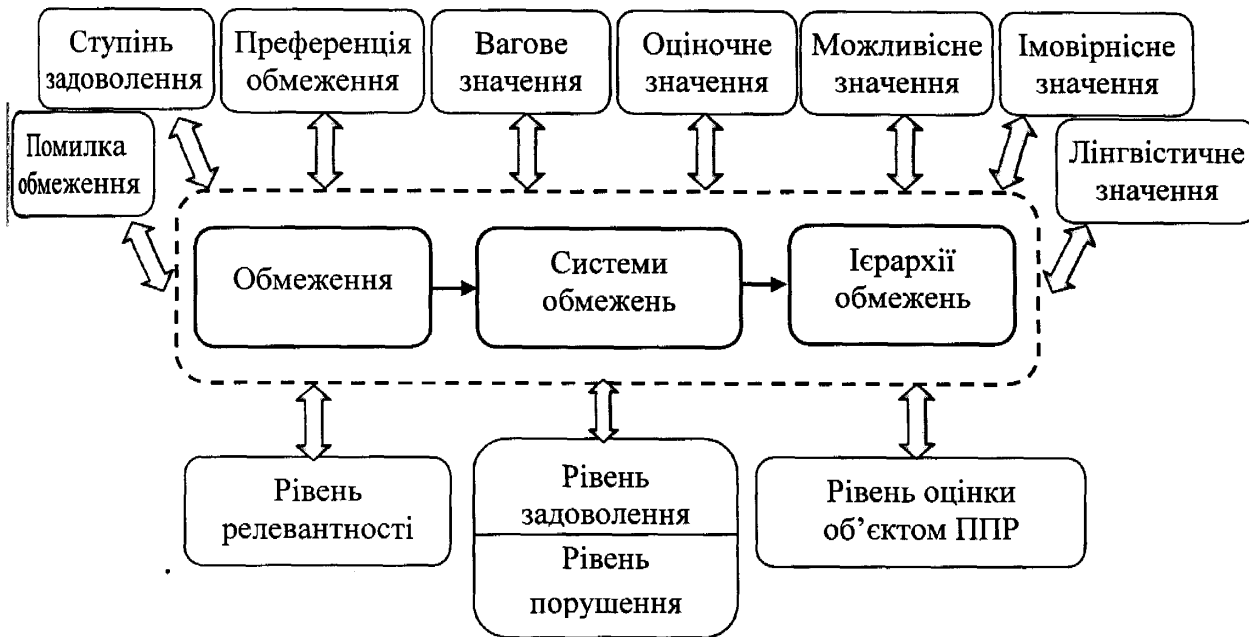


Рис. 2.6. Структура рівнів та атрибутів обмежень

Цільовою функцією  $OF$  (objective function) вважають деяку функцію задану на впорядкованій множині  $W^{set}$  над множиною змінних  $V$ . На множині  $W^{set}$  введено деяке впорядкування  $\leq_{W^{set}}$ .

Елементи множини  $W^{set}$  будемо розглядати як коефіцієнти преференцій обмежень. Процес пошуку оптимального рішення технологічної проблеми  $TP$  (задача оптимізації (рис. 2.7)) будемо розглядати як процес задоволення (порушення) накладеної множини (системи, ієрархії) обмежень  $ConstrSet$  ( $ConstrSyst, ConstrHrch$ ) з введеною цільовою функцією  $OF$ . У процесі пошуку оптимального рішення  $Sol^{opt}$  технологічної проблеми  $TP$  присвоєння  $\psi$  будемо вважати більш прийнятним (преференційним) по відношенню до присвоєння  $\psi^1$  тоді коли значення цільової функції для нього менше ніж для присвоєння  $\psi^1$ , тобто  $OF(\psi) < OF(\psi^1)$ . Оптимальним рішенням технологічної проблеми на основі обмежень будемо вважати таке присвоєння  $\psi$ , яке є найбільш прийнятним (преференційним) із всіх можливих.



Рис. 2.7. Процедура пошуку оптимального рішення шляхом задоволення обмежень

Згідно введених означень, множину обмежень можна поділити на дві підмножини: підмножину абсолютних обмежень і підмножину відносних (преференційних) обмежень. На множині оцінювання присвоєнь  $OF(\Psi_v)$  у випадку якщо деяке присвоєння  $\psi$  порушує одне з абсолютних обмежень, то воно відповідно буде виключатись з процесу пошуку оптимального рішення. В той же час, порушення відносних преференційних обмежень не призводить до виключення поточного присвоєння, що їх порушує, а навпаки дозволяє оцінювати рішення (присвоєння) з точки зору його прийнятності і відповідно виконувати порівняння рішень присвоєнь по ступеню їх прийнятності. Преференції обмежень можна задавати в одній з вище описаних форм.

По аналогії з [104] дві технологічні проблеми  $TP=(V,D,C)$  і  $TP'=(V',D',C')$  будемо вважати *еквівалентними* тоді, коли в них однакові множини змінних і однакові множини розв'язків:

$$TP(V,D,C) \sim TP'(V',D',C') \text{ f } [V \equiv V'] \cap [Sol^{set}(V,D,C) \Leftrightarrow Sol^{set}(V',D',C')].$$

Технологічну проблему  $TP=(V,D,C)$  будемо називати *звуженою* до технологічної проблеми  $TP'=(V',D',C')$  якщо:

- 1) Проблеми  $TP$  та  $TP'$  еквівалентні;
- 2) Домен кожної змінної  $D'_i$  є підмножиною домену  $D_i$ ,  $D'_i \subset D_i$ ;
- 3) Множина обмежень  $C'$  в більшій, або в такій же мірі обмежує множину всіх можливих присвоєнь, як і множина  $C$ .

Оскільки обмеження є множиною можливих присвоєнь, то під звуженням задачі задоволення обмежень можна розуміти видалення із обмеження тих присвоєнь, які не беруть участі в жодному із кортежів розв'язку.

*Лишніми присвоєннями* в обмеженні будемо вважати обмеження, що не є проекцією жодного з кортежів розв'язків. Тобто, якщо

$$(s_1, \dots, s_{n_i}) \in Sol_i, i \in N \text{ то } \nexists \psi \in \Psi, p \downarrow_{\psi}^{Sol_i} \text{ f } p \in \Psi.$$

*Лишнім значенням* домену будемо називати таке значення, яке не є частиною жодного з кортежів розв'язків:

$$redundant(d_i \in D_j) \text{ f } d_i \notin \forall Sol_i, i, i_1, j \in N.$$

Присвоєння та значення, що інтерпретуються як “лишні”, можуть бути видалені із технологічної проблеми і що відповідно не вплине на множину розв'язків. Таким чином, звуження технологічної проблеми означатиме її перетворення в іншу еквівалентну проблему, шляхом видалення лишніх значень з доменів змінних та лишніх присвоєнь із обмежень:

$$\begin{aligned} Narrow(TP) \text{ f } & Del(\forall redundant(d_{i_1}), d_{i_1} \in D_{j_1}) \wedge \\ & \wedge Del(\forall redundant(\psi_{i_2}), \psi_{i_2} \in C_{j_2}, C_{j_2} \in ConstrHrch) \end{aligned}$$

Якщо домен будь-якої змінної або будь-яке обмеження шляхом звуження перетворюються в порожні множини, то можна зробити висновок про те, що проблема не має розв'язків в загальному випадку. Відповідно, звуження проблеми зменшуватиме кількість потенційних розв'язків і відповідно проблема буде простішою з точки зору пошуку можливих рішень.

Подібно до результату [113] технологічну проблему будемо вважати мінімальною, якщо жоден з її доменів не містить лишніх значень, а жодне обмеження не містить лишніх присвоєнь.

В загальному випадку, процес мінімізації технологічної проблеми може продовжуватись до тих пір, поки множина всіх можливих присвоєнь не звужиться до множини кортежів розв'язків. Даний результат можна досягнути шляхом створення простих обмежень для всіх потрібних комбінацій змінних і звуження кожного обмеження до множини присвоєнь які задовольняють кожне обмеження. В результаті залишиться тільки обмеження  $C_v$ , яке містить в собі всю множину змінних  $V$ , а множина всіх присвоєнь цього обмеження буде множиною всіх можливих кортежів розв'язків. Тому більшість алгоритмів застосовують звуження задачі тільки в тому випадку, якщо існують лишні присвоєння або змінні, пошук яких не є складним. Тільки в деяких окремих випадках можна знайти розв'язок задачі задоволення обмежень, використовуючи тільки її звуження. Тому існує велика кількість алгоритмів, які поєднують звуження задачі з методами пошуку [104].

Такі методи базуються на наданні значень певним змінним з подальшою перевіркою присвоєнь на сумісність з обмеженнями технологічної проблеми. Вибір такого значення не повинен бути випадковим, а має порівнюватись з присвоєннями виконаними до нього. Якщо виконується присвоєння значення першій змінній із множини, то відповідно необхідно виконувати перевірку кожного значення з її домену. Якщо виконане присвоєння порушує певні обмеження, то здійснюється вибір наступного значення для цієї змінної, якщо воно існує. Якщо не існує жодного значення для змінної, що не порушує жодного з обмежень, то здійснюється крок назад, і виконується

переприсвоєння змінної, значення якій було надане до присвоєння поточної змінної. Цей процес продовжується до того часу, поки не буде знайдено розв'язок, або доки всі комбінації присвоєнь змінних не будуть оцінені як помилкові. В такому випадку можна зробити висновок про несумісність технологічної проблеми (тобто її переобмеженість, що призводить до порожньої множини кортежів розв'язків).

Описаний вище, метод звуження технологічної проблеми зменшує розмір доменів та підсилює обмеження. Підсилення обмежень допомагає звужити простір пошуку на його кінцевих стадіях. Відповідно, метод звуження технологічної проблеми може бути застосований на будь-якому із етапів пошуку. Існує ряд стратегій поєднання пошуку зі звуженням технологічної проблеми різними способами [114], які є ефективними за певних умов.

Синтез розв'язків [105,115,116] розглядається як пошуковий алгоритм, який опрацьовує декілька гілок дерева пошуку одночасно. Також його можна інтерпретувати як метод звуження задачі, що задає обмеження на всю множину змінних (тобто,  $n$  - обмежень для технологічної проблеми з кількістю змінних  $n$ ), яке звужується до такого, що обмежує простір можливих міток настільки, що він міститиме тільки кортежі розв'язків.

При пошуку рішення, загальна модель управління яким представлена на рис. 2.8, в кожен момент часу розглядається тільки один частковий розв'язок (який є частковим присвоєнням). Часткове присвоєння розширюється шляхом задіяння нової змінної до того часу, поки не буде знайдено розв'язок, або поки не будуть перевірені всі часткові присвоєння. Основною ідеєю підходу є збирання множин усіх часткових присвоєнь, що не порушують обмеження, для зростаючої множини змінних. Для забезпечення коректності алгоритму виконується видалення часткових присвоєнь, які на певному кроці алгоритму порушують певне обмеження. Також для забезпечення повноти алгоритму виконується контроль видалення множини часткових присвоєнь, що не порушують обмеження.



Рис. 2.8. Управління процесом пошуку рішення технологічної проблеми

В даному дослідженні використовуються мітки для обчислення розв'язків в надобмежених технологічних проблемах  $TP^{over}$  і при пошуку оптимального рішення  $Sol^{opt}$  для технологічної проблеми. Методи вибору рішення з множини всіх присвоєнь будуть відображати можливі семантики анутовання змінних (задання змінним міток). Мітки визначатимуть спосіб

впорядкування змінних в рамках технологічних проблем на основі обмежень з перевагами і у випадку оптимізаційних проблем. Задання відображення міток на множину технологічних проблем з нечіткими обмеженнями і відображення на випадок ІО, дозволяють специфікувати процес пошуку рішення надобмежених проблем, базуючись на специфікаціях класичних формальних структур [117].

Мітки змінних можна поєднувати в процесі обчислення глобальних міток обмежень, а також у процесах визначення переваги для вибору рішення на основі мінімаксної оптимізації або шляхом введеної цільової функції. Альтернативний підхід до роботи з мітками, в порівнянні з нечітким підходом полягатиме в їх інтерпретації на основі ІО. В загальному випадку, така ієрархія будується над множиною міток обмежень з додатковим відношенням порядку, що накладається глобальними мітками обмежень в середині кожного рівня ієрархії. Оскільки ієрархічні мітки, можна розглядати як мітки змінних в більш широкому розумінні чим нечіткі мітки, то мітки на рівні ієрархії дозволяють більш повно представляти семантику міток в цілому. Слід взяти до уваги, більш повну стратегію рішень, що отримується в даному випадку в порівнянні з нечіткими мітками, що дозволяє показати відповідність між окремими множинами міток і технологічними проблемами на основі обмежень і технологічними проблемами на основі нечітких обмежень, а також з ІО в цілому.

Метою евристики впорядкування змінних в технологічних проблемах на основі обмежень є вибір тих змінних, які є найбільш "критичними" з точки зору їх підстановки. Основна ідея полягає в розгляді найбільш "критичних" наборів змінних з найбільш важливими перевагами. При першочерговій підстановці більш важливих змінних простішою стає задача присвоєння їм більш прийнятних значень.

Преваги змінних (мітки) дозволяють виражати переваги користувача разом з його очікуваннями щодо складності присвоєння змінних. Застосування такої методики дозволяє усунути складності, що виникають при



рішенні надобмежених проблем або проблем з великим простором рішень. Найбільш складні змінні є джерелом для процедури поширення обмежень, і їх початкова ініціалізація може дозволяти звузити простір рішень.

Для заданої системи обмежень з введеними мітками для змінних, впорядкування змінних обчислюється на основі глобальних міток змінних [102]. Такий спосіб впорядкування змінних належить до класу статичного впорядкування. Кінцеве обчислення впорядкування залежить від вибору анотаційних триплетів. При виборі підстановки для анотаційного триплету необхідно розглядати всі властивості заданої проблеми. Якщо бажаним є чітке розрізнення окремих змінних, тоді найкращим рішенням є розгляд присвоєнь на кожному рівні.

Доцільним є відображення за допомогою міток динамічної поведінки системи обмежень під час процедури оцінювання, тобто доменні змінні утворюються з констант шляхом присвоєння їм значень, тому задоволені обмеження у випадку надобмеженої проблеми можна видалити як частину процедури послаблення надобмежень. Приймаючи до уваги такі міркування доцільно здійснювати вибір змінної для присвоєння засобами динамічних глобальних міток змінних, що відповідають глобальним міткам змінних, які обчислюються після застосування поточного часткового присвоєння.

Ефективним методом побудови та рішення технологічних проблем на основі обмежень є застосування методики логічного програмування в обмеженнях [117]. Така реалізація складатиметься з кількох частин: перша частина міститиме визначення всіх змінних  $V$  технологічної проблеми з їхніми доменами  $D$ . Відповідно домени змінних  $V_i$  зменшуватимуться за рахунок обмежень  $C_i$ , які будуть встановлюватися на наступних кроках. Тому метод пошуку в просторі рішень описуватиметься через введення маркування *Labeling* для множини змінних або через введення перерахування для процесів генерації значень для окремих змінних доменів. В даному випадку дерево пошуку описуватиметься на основі евристики впорядкування значень та змінних, що застосовується до початку присвоєння значень шляхом виклику

процедур поширення обмежень. Процедура маркування може також бути використана для пошуку розв'язків оптимізаційної проблеми з введеною цільовою функцією.

Метод бінаризації обмежень [118] при його застосуванні як стратегії рішення технологічних проблем на основі обмежень, очікувано призводитиме до збільшення простору рішень, тому ефективність процедури пошуку рішення, в даному випадку, знижуватиметься. Для усунення такого недоліку в даному випадку доцільно використати спеціальні алгоритми поширення обмежень для розв'язання виділених підпроблем описаних на певній підмножині змінних за допомогою введення глобальних обмежень [119]. Моделювання проблеми через відповідні глобальні обмеження є однією з основних ідей логічного програмування в обмеженнях [117] з точки зору обчислювальної ефективності.

В такому застосуванні глобальні обмеження виражатимуть умову яка має бути необхідно задоволена. Зокрема, при використанні глобальних обмежень для надобмежених проблем, доцільним буде введення додаткових специфікаторів.

## **Висновки до другого розділу**

1. Виконані дослідження показали, що технологічний процес буріння, в загальному випадку, є надскладним та динамічним процесом, повна формалізація якого не дає очікуваних результатів в плані повноти та коректності. Контроль такого процесу пропонується здійснювати набором технологічних параметрів (змінних) для якого задається множина обмежень. На заключному етапі виділяється множина основних технологічних параметрів, що дозволяють повністю описувати технологічний процес буріння, шляхом побудови систем обмежень та їх ранжування по ступеню релевантності, що робить можливим аналіз нештатної ситуації як випадку

порушення технологічними параметрами накладених множин, систем та ієрархій обмежень.

2. Введена формальна структура, що складається з набору змінних (технологічних параметрів), множини доменів (довірчих інтервалів) та множини обмежень, що дозволяє описувати технологічний процес буріння нафтових і газових свердловин в термінах формально-логічних конструкцій представлення та задоволення обмежень для якого нештатні ситуації розглядаються як можливі стани.

3. Виконано оцінку можливих доменних компараторів для технологічних проблем, що виникають у процесі буріння, яка дозволяє сформулювати структуру побудови рішення для введеної ієрархії обмежень.

4. Введено спосіб оцінювання змінних (технологічних параметрів), що дозволяє представляти множини преференцій і виражати їх вплив на процес задоволення та порушення обмежень під час вирішення технологічних проблем. Вагові значення змінних дозволяють відображати часткові присвоєння з заданими мінімаксними функціями для сумарних вагових значень задоволених і порушених обмежень, що відповідно визначає структуру рішення технологічних проблем при бурінні нафтових і газових свердловин.

### РОЗДІЛ 3

## ОБГРУНТУВАННЯ ПОБУДОВИ СТРУКТУРИ СИСТЕМИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ НА ОСНОВІ ОБМЕЖЕНЬ

### 3.1. Реалізація системи інтелектуальної підтримки прийняття рішень на основі стратегій аналізу технологічних помилок

Як показує ряд досліджень [120-123] система інтелектуальної підтримки прийняття рішень (СІПІР) дозволяє реалізувати ряд суттєвих переваг прийняття рішень при бурінні НГС. Виконання даної задачі включає:

1. визначення об'єкта підтримки прийняття рішень (ППР) (оператора технологічного процесу буріння НГС);
2. аналіз та діагностику дій об'єкта ППР;
3. створення та оновлення моделі об'єкта ППР;
4. коректну генерацію повідомлень зворотного зв'язку;
5. ведення інтелектуальних діалогів системи з об'єктом ППР.

Таким чином, основне завдання проекрованої СІПІРО полягає в створенні середовища підтримки об'єкта ППР при вирішенні ним технологічних проблем, що виникають у процесі буріння на основі інтелектуальних засобів виявлення помилок та генерації зворотного зв'язку.

Основним джерелом помилок є невідповідність між множиною декларативних та процедурних знань, що представлено на рис. 3.1.

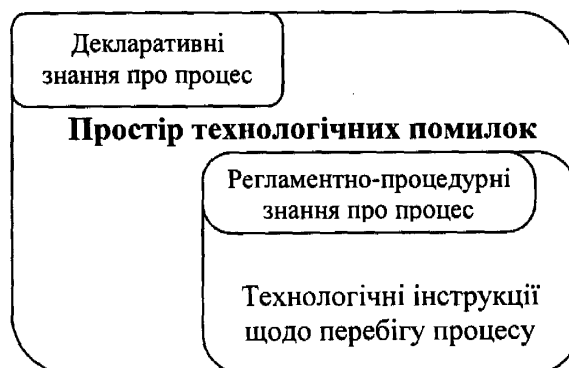


Рис. 3.1. Структура формування знань об'єкту ППР.

$$ErrorSpace = DeclarativeKnowledges \ ProceduralKnowledges = \{ Rules^{set} \}.$$

При рішенні технологічних проблем і виявленні помилки виконується модифікація (оновлення) процедурних знань шляхом включення порушеного правила, порушення якого є причиною виникнення помилки:

$$Error \Rightarrow \{ ProceduralKnowledges^{set} \} \cup [ \{ Rule^{viol.} \} or \{ Rules_{set}^{viol.} \} ].$$

Ідентифікація технологічних помилок дозволяє використовувати зворотний зв'язок для здійснення адекватних поточних, короткотривалих, довготривалих коректуючих впливів на основі виділення хибних (помилкових) знань про процес буріння в контексті аналізу помилок:

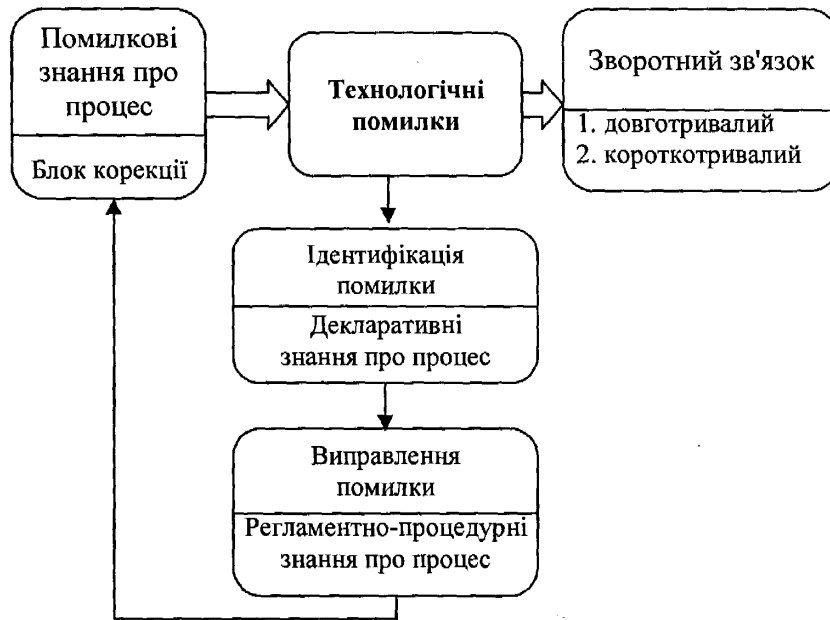


Рис. 3.2. Структура розпізнавання та виправлення помилок в СІППРО

Моделювання на основі обмежень [107, 120-123, 124] є підходом до моделювання об'єкта ППР, що базується на теорії вивчення технологічного процесу на основі помилок. Основа даного підходу полягає в тому, що всі коректні рішення проблеми розглядаються як схожі (подібні). Їх схожість полягає в тому, що вони не порушують жодне обмеження в накладеній на домен множині обмежень  $ConstrSet$ . В даному підході розглядаються можливі послідовності станів ( $TPS$  – *TechnologicalProblemStates*) в просторі проблеми:

$$TechnologicalProblemSpace = \{ TPS_k \}_{k=1..k_{max}} ; \{ \dots TPS_{k_1} \dots TPS_{k_2} \dots \}_{k_1, k_2 \in [1..k_{max}]}$$

Виконуючи рішення технологічної проблеми, об'єкт ППР переміщується по певній послідовності станів із множини можливих і в кожен момент часу знаходиться в певному виділеному стані. Накладання множини обмежень дозволяє виділити класи еквівалентностей для множини станів проблеми. В межах класу еквівалентності система використовує одну і ту саму структуру та наповнення зворотного зв'язку, тому всі стани проблеми в межах класу еквівалентності розглядаються як тотожні з точки зору формування процедури зворотного зв'язку:

$$\{Class_m^E\}_{m=1..m_{max}}; Class_{m_1}^E = \{\dots TPS_{m_2} \dots TPS_{m_3} \dots\}_{m_1 \in [1..m_{max}] m_2, m_3 \in [1..k_{max}]}$$

Тому доцільним є прикріплення повідомлень зворотного зв'язку (*fb* – *feedback message*) безпосередньо до обмежень на рівнях множини обмежень *ConstrSet*, системи обмежень *ConstrSyst* та ієрархії обмежень *ConstrHrch*:

$$\begin{aligned} ConstrHrch_{TPr_i} &= \bigcup_{j=1..j_{max}} ConstrSyst_{TP_j} = \bigcup_{k=1..k_{max}} ConstrSet_{TPS_k} = \\ &= \{c_1 : fb_1, c_2 : fb_2 \dots c_n : fb_n\}_{k,n \in N} \end{aligned}$$

Таким чином, модель домену можна розглядати як сукупність (множину) правил виду:

**якщо**  $\langle \text{умова\_релевантності} \rangle$  істинна з коефіцієнтом  $cf_1$ ,

**то**  $\langle \text{умова\_задоволення} \rangle$  істинна з коефіцієнтом  $cf_2$ ,

де  $cf_1, cf_2 \in [0..1]$  і, відповідно, виражають або коефіцієнт релевантності, або ваговий коефіцієнт, або ймовірнісний коефіцієнт, або можливісний коефіцієнт, або коефіцієнт переваги. У випадку  $cf_1 = cf_2 = 1$  матимемо класичну інтерпретацію моделі домену в термінах абсолютної істинності та хибності.

Тобто якщо рішення запропоноване об'єктом ППР відноситься до стану проблеми, визначеного умовою релевантності (абсолютно або з певним коефіцієнтом  $cf$ ), то воно буде коректним (абсолютно або з певним коефіцієнтом  $cf$ ) якщо воно також знаходиться в стані, що визначається умовою задоволення (абсолютно або з певним коефіцієнтом  $cf$ ):

$$SubmittedSolution[TPS_{k_1}]^{rc:cf_1} \Rightarrow SubmittedSolution[TPS_{k_2}]^{sc:cf_2},$$

$$k_1 = k_2 \text{ або } k_1 \neq k_2, \text{ якщо } TPS_{k_1}, TPS_{k_2} \in Class_{m_1}^E; k_1, k_2 \in [1..k_{max}], m_1 \in [1..m_{max}]'$$

де  $rc:cf_1$  - умова релевантності (абсолютна або відносна),  $sc:cf_2$  - умова задоволення (абсолютна або відносна).

Таким чином, моделі доменів визначатимуться відповідними множинами обмежень:

$$DomainModel_{TPS_k} = \{ConstrSet_k\}_{k \in [1..k_{max}]} = \{if [rc_i : cf_i] then [sc_i : cf_i]\}_{i, l_1, l_2 \in N}.$$

Системи на основі обмежень виконують оцінку рішень запропонованих об'єктом ППР, шляхом зіставлення їх з відповідною доменною моделлю:  $Match(SubmittedSolution, DomainModel)|_{ConstrSet}$ , що визначається накладеною множиною обмежень. Дана процедура виконується як послідовність ряду кроків:

0. Виділення шаблонів умов релевантності  $[rc_{i_1} : cf_{i_1}].Pattern$  і шаблонів умов задоволення  $[sc_{i_2} : cf_{i_2}].Pattern$  для  $i_1, i_2 \in N$ ;

1. Зіставлення шаблонів релевантності із відповідним станом проблеми  $Match([rc_{i_1} : cf_{i_1}].Pattern, TPS_k)_{i_1, k \in N}$ ;

2. Перевірка умови задоволення релевантних обмежень  $c_{m_1} \cdot [sc_{m_1} : cf_{m_1}], c_{m_1} \in ConstrSet_{TPS_k}$ ;

3. Обмеження вважається задоволеним, якщо шаблон його умови задоволення відповідає стану проблеми  $= c_{m_1} \text{ iff } c_{m_1} \cdot [sc_{m_1} : cf_{m_1}] =_{Pattern} TPS_k$ ;

4. Обмеження вважається порушеним, якщо шаблон його умови задоволення не відповідає стану проблеми  $\neq c_{m_1} \text{ iff } c_{m_1} \cdot [sc_{m_1} : cf_{m_1}] \neq_{Pattern} TPS_k$ ;

На основі введених представлень виконується побудова поточної моделі об'єкта ППР ( $CM - CurrentModel$ ), короткотривалої моделі ( $STM - Short-term model$ ) та довготривалої ( $LTM - Long-term model$ ).

Під поточною моделлю будемо розуміти певну послідовність порушених обмежень при вирішенні  $k$ -того стану технологічної проблеми в процесі

буріння НГС:  $CM_{TPS_k} = \{\dots c_i^y, c_{i+1}^y \dots\}_{i \in N}$ , де  $c_i^y \in [ConstrSet_{TPS_k}]^V$ . Під короткотривалою моделлю будемо розуміти об'єднання підмножини задоволених і підмножини порушених обмежень:

$$STM_{TPS_k} = [ConstrSet_{TPS_k}]^S \cup [ConstrSet_{TPS_k}]^V.$$

Під довготривалою моделлю об'єкта ППР будемо розуміти об'єднання короткотривалих моделей:

$$\begin{cases} LTM_{TP_j}^1 = \bigcup_{k=1..k_{max}} STM_{TPS_k} \\ LTM_{TP_j}^2 = \bigcup_{j=1..j_{max}} LTM_{TP_j}^1 \end{cases}.$$

Оскільки основним завданням є підтримка рішення технологічних проблем, то це здійснюється наступними способами:

1. Реалізація функцій ППР у вигляді доменно та предметно незалежної інтелектуальної оболонки на основі інтерфейсної реалізації. Інтерфейс надає користувачу інформацію про домен предметної області і відповідно виконується як доменно залежний;
2. Забезпечення підтримки рішення технологічних проблем засобами зворотного зв'язку із об'єктом ППР, що надає інтелектуальна система;
3. Підтримка рішення технологічних проблем на основі ведення контекстно залежних та релевантних діалогів з користувачем.

Декларативні знання є необхідною складовою організації процесу прийняття рішень, оскільки дозволяють об'єкту виконувати ідентифікацію помилок. Тому, якщо такі знання відсутні для певного домену предметної області або відповідно не є достатніми, то ідентифікація помилок об'єкту ППР буде ускладнюватись, оскільки об'єкт не зможе розрізняти хибні та релевантні знання і відповідно здійснювати ефективну корекцію власних помилок (рис.3.3).







Рис. 3.4. Структура представлення обмеження в СППО

2. Рівень II – використання методу прапорця помилок, для індикації місця виникнення помилки без виведення точного опису причини помилки;
3. Рівень III – виведення повідомлення про суть виділеної помилки, що є наслідком порушення певного обмеження;
4. Рівень IV – виведення частини правильного рішення;
5. Рівень V – виведення в якості зворотного зв'язку повного правильного рішення;
6. Рівень VI – виведення в якості зворотного зв'язку всіх помилок поточної сесії роботи з системою;
7. Рівень VII – візуалізація ієрархії помилок та візуалізація ієрархії порушених обмежень.

Як показують дослідження в даній області [120, 123, 125, 126], визначальним для побудови ефективного зворотного зв'язку є семантика та стилістика повідомлень, що будуть виводитися, їх доступність для розуміння поточним користувачам, тобто їх відповідність його зоні найближчого розвитку (*PDZ*). Очевидно, що в термінах задоволення та порушення

Обмежень, можемо розглядати концепцію очікуваної зони найближчого розвитку ( $PDZ^{exp}$ ):

$$PDZ^{exp} \cong [DomainModel = ConstrSet] \setminus [LTM = \bigcup_{i_2} \{STM = \bigcup_{i_1} \{CM\}_{i_1}\}_{i_2}].$$

Нехай маємо технологічну проблему  $TP_i$  із заданою кількістю станів  $TPS_k$ . ІО технологічної проблеми матиме вигляд:

$$ConstrHrch_{TP_i} = \left\{ \begin{array}{l} ConstrSyst_{TPS_1} = \{c_1^1 : rd_1^1, c_2^1 : rd_2^1, \dots, c_{n_1}^1 : rd_{n_1}^1\} \\ ConstrSyst_{TPS_2} = \{c_1^2 : rd_1^2, c_2^2 : rd_2^2, \dots, c_{n_2}^2 : rd_{n_2}^2\} \\ \dots \\ ConstrSyst_{TPS_k} = \{c_1^k : rd_1^k, c_2^k : rd_2^k, \dots, c_{n_k}^k : rd_{n_k}^k\} \\ \dots \\ ConstrSyst_{TPS_{k_{max}}} = \{c_1^{k_{max}} : rd_1^{k_{max}}, c_2^{k_{max}} : rd_2^{k_{max}}, \dots, c_{n_{k_{max}}}^{k_{max}} : rd_{n_{k_{max}}}^{k_{max}}\} \end{array} \right. ,$$

де  $k = [1..k_{max}]$ .

Відповідно до кожної системи обмежень можна обчислити середнє значення преференцій обмежень  $rd_k = (rd_1^k + rd_2^k + \dots + rd_{n_k}^k) / n_k$ .

Середній крок зміни преференцій для системи обмежень  $ConstrSyst_{TPS_k}$  визначатиметься формулою  $rd_{step}^k = (rd_{n_k}^k - rd_1^k) / n_k$ .

На даній основі, можна виконати обчислення зони найближчого розвитку об'єкту ППР для стану  $TPS_k$ . Нехай стану  $TPS_k$  відповідає система

обмежень  $ConstrSyst_{TPS_k} = \{c_1^k : rd_1^k, c_2^k : rd_2^k, \dots, c_{n_k}^k : rd_{n_k}^k\}$  і останнім задоволеним обмеженням є обмеження  $c_{i_1}^k : rd_{i_1}^k$ , тоді:

$$ConstrSyst_{TPS_k} = \overbrace{\{c_1^k : rd_1^k, \dots, c_{i_1}^k : rd_{i_1}^k, \dots, c_{n_k}^k : rd_{n_k}^k\}}^{PDZ_{TPS_k}^{max}} \text{ або}$$

$$PDZ_{TPS_k}^{max} = \{ConstrSyst_{TPS_k} \setminus \{c_{i_1}^k : rd_{i_1}^k\}_{i_2=1..n_k}\},$$

де  $n_k$  - кількість обмежень в системі обмежень  $ConstrSyst_{TPS_k}$ .

Значення  $PDZ_{TPS_k}^{max}$  інтерпретується як максимально повна зона найближчого розвитку для стану  $TPS_k$ . Відповідно можна ввести подібне обчислювальне значення з інтерпретацією мінімально достатньої зони найближчого розвитку об'єкту ППР:

$$ConstrSyst_{TPS_k} = \{c_1^k : rd_1^k, \dots, \overbrace{c_{i-1}^k : rd_{i-1}^k, c_i^k : rd_i^k}^{PDZ_{TPS_k}^{min}}, \dots, c_{n_k}^k : rd_{n_k}^k\};$$

$$PDZ_{TPS_k}^{min} = \{ConstrSyst_{TPS_k} \setminus \{c_{i_3}^k : rd_{i_3}^k\}_{i_3=\{1..i-1\}} \cup \{c_{i_4}^k : rd_{i_4}^k\}_{i_4=\{i..n_k\}}\} \text{ або}$$

$$PDZ_{TPS_k}^{min} = \{c_{i-1}^k : rd_{i-1}^k\}, \mid = c_i.$$

Значення  $PDZ_{TPS_k}^{min}$  може бути обчислене також на основі введеного означення для середнього кроку зміни переважності:

$$PDZ_{TPS_k}^{min} = \{c_m^k\}_{m \in \{1..n_k\}}, rd_m^k = rd_{i_1}^k + rd_{step}^k, \mid = c_i.$$

Шляхом об'єднання отриманих значень найближчого розвитку для станів технологічної проблеми, отримаємо значення для всієї технологічної проблеми і технологічного процесу відповідно:

$$PDZ_{TP_j}^{max} = \bigcup_{k=1..k_{max}} PDZ_{TPS_k}^{max}, \quad PDZ_{TP_j}^{min} = \bigcup_{k=1..k_{max}} PDZ_{TPS_k}^{min};$$

$$PDZ_{TP_i}^{max} = \bigcup_{j=1..j_{max}} PDZ_{TP_j}^{max}, \quad PDZ_{TP_i}^{min} = \bigcup_{j=1..j_{max}} PDZ_{TP_j}^{min}.$$

Таким чином, використання як основи побудови СІППРО систем обмежень для технологічних проблем дозволяє виконувати аналіз помилок об'єкта ППР, виконувати їх класифікацію та формувати відповідну інтелектуальність зворотного зв'язку, що неможливо без детального розуміння способу функціонування процесу задоволення та порушення обмежень.

### 3.2. Опис функціонування процесу задоволення та порушення обмежень в системі інтелектуальної підтримки прийняття рішень

З точки зору функціонування СІППРО, інтелектуальність якої полягає в наданні допомоги користувачу щодо вирішення певних технологічних

проблем, що представляються у вигляді сукупностей відповідних станів, а сам технологічний процес розглядається при цьому як сукупність технологічних проблем (нештатних ситуацій у процесі буріння НГС) [127]:

$$\{TPr_{i_1}, TP_{j_1}, TPS_{k_1}\}_{i_1, j_1, k_1 \in N},$$

де  $TPr_{i_1}$  (*Technological Process*) –  $i_1$  - тий технологічний процес,  $TP_{j_1}$  (*Technological Problem*) –  $j_1$  - та технологічна проблема,  $TPS_{k_1}$  (*Technological Problem State*) –  $k_1$  - тий стан технологічної проблеми.

Порядок на рівнях ієрархії визначається шляхом об'єднання відповідних сукупностей (множин):

$$TPr_{i_1} = \bigcup_{j_1=1..j_1^{max}} TP_{j_1}, TP_{j_1} = \bigcup_{k_1=1..k_1^{max}} TPS_{k_1}.$$

Необхідним є розгляд двох основних категорій технологічних проблем: *статичні* технологічні проблеми етапу наповнення бази знань СІППРО та *динамічні* технологічні проблеми етапу функціонування системи. На етапі формування бази знань кожна технологічна проблема розглядається як деяка скінченна множина її станів. Кожен стан  $TPS_{i_1}, i_1 = 1..k_{max}$ , де  $k_{max}$  - максимальна кількість станів в проблемі  $TP_{j_1}$ , описується деякою множиною обмежень:

$$ConstrSet_k = \{c_1 : fb_1^{set}, c_2 : fb_2^{set}, \dots, c_n : fb_n^{set}\}_{n \in N},$$

де  $fb_i^{set}$  - множина повідомлень зворотного зв'язку, які прив'язані до обмеження  $c_i, 1 \leq i \leq n, 0 \leq \# fb_i^{set} \leq n_i, n_i \in N$ .

Після введення впорядкування множини обмежень по ступеню релевантності до проблеми отримаємо систему обмежень для  $k$ -того стану технологічної проблеми:

$$ConstrSyst_{TPS_k} = \{ConstrSet_{TPS_k, \geq rd}\}_{rd \in [0..1]},$$

яка може також бути представлена у вигляді:

$$ConstrSyst_{TPS_k} = \{c_1 : rd_1, c_2 : rd_2, \dots, c_l : rd_l\}_{l \in N}, \text{ де } rd_i \in [0..1], i_1 \in [0..1].$$

Процедура формування зворотного зв'язку для системи обмежень стану технологічної проблеми  $TPS_k$  матиме вигляд:

1.  $FB_{TPS_k}^{max} = \bigcup_{k=1..l} fb_k^{set}, 1 \leq k \leq l$ , де  $FB_{TPS_k}^{max}$  - максимально можливий потік зворотного зв'язку для стану  $TPS_k$  (тобто для граничного випадку, що відповідає порушенню всіх обмежень в системі). Проте, очевидно що буде порушуватись тільки деяка підмножина обмежень  $[ConstrSyst_{TPS_k}]^V \subseteq ConstrSyst_{TPS_k}$ . Тоді відповідно матимемо:

$$2. FB_{TPS_k}^V = \bigcup_{\forall k_1} fb_{k_1}^{set}, \forall k_1, k_1 \neq c_{k_1}.$$

На рівні технологічної проблеми відповідно матимемо:

$$FB_{TP_j}^{max} = \bigcup_{k=1..k_{max}} FB_{TPS_k}^{max}, FB_{TP_j}^V = \bigcup_{k=1..k_{max}} FB_{TPS_k}^V, \text{ де } FB_{TPS_{k_1}}^V \subseteq FB_{TPS_{k_1}}^{max}, k_1 = 1..k_{max}.$$

На рівні технологічного процесу:

$$FB_{TP_j}^{max} = \bigcup_{j=1..j_{max}} FB_{TP_j}^{max}, FB_{TP_j}^V = \bigcup_{j=1..j_{max}} FB_{TP_j}^V, \text{ де } FB_{TP_{j_1}}^V \subseteq FB_{TP_{j_1}}^{max}, j_1 = 1..j_{max}.$$

При формуванні бази знань в СИПРО до кожного стану технологічної проблеми вказують множину помилок, яка може виникнути при вирішенні даного стану технологічної проблеми:

$$Err_k^{set} = \{err_1, err_2, \dots, err_n\}_{n \in N}.$$

В нашому випадку помилки розглядаються як нештатні ситуації процесу буріння НГС, виникнення яких розглядається як наслідок порушення певних обмежень, їх множин та ієрархій:

$$\{[ConstrSet_k]^V \neq \emptyset\} \Rightarrow [Err_k^{set} \neq \emptyset].$$

При введенні в базу знань, для помилок можуть вказуватись вагові коефіцієнти ( $ew$  – *error weight*). Введення відношення впорядкування на множині помилок дозволить отримати систему помилок:

$$Err_k^{Syst.} = (Err_k^{set}, \geq_{ew}) \text{ або}$$

$$Err_k^{Syst.} = \{err_1 : ew_1, err_2 : ew_2, \dots, err_n : ew_n\}_{n \in N}.$$

Відповідним чином можна отримати ієрархію помилок до технологічної проблеми:

$$Err_{TP_j}^{Hrch.} = \bigcup_{k=1..k_{max}} Err_k^{Syst.}.$$

При введенні помилок в базу знань і їх прив'язки до стану технологічної проблеми задається також їх прив'язка до системи обмежень накладеної на стан технологічної проблеми:

$$TPS_k : Err_k^{Syst.} \rightarrow ConstrSyst_k$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \{err_1, err_2, \dots, err_{n_1}\} \\ \{c_1, c_2, \dots, c_{n_2}\} \end{array} \right\},$$

де  $n_1, n_2 \in N$ .

Відповідно можна виконати ряд впорядкувань системи обмежень стосовно ступеня релевантності помилкам:

$$\left[ \begin{array}{l} err_1 : \{c_1 : rd_1^{err_1}, c_2 : rd_2^{err_1} \dots c_{n_2} : rd_{n_2}^{err_1}\} \\ err_2 : \{c_1 : rd_1^{err_2}, c_2 : rd_2^{err_2} \dots c_{n_2} : rd_{n_2}^{err_2}\} \\ \dots \\ err_{n_1} : \{c_1 : rd_1^{err_{n_1}}, c_2 : rd_2^{err_{n_1}} \dots c_{n_2} : rd_{n_2}^{err_{n_1}}\} \end{array} \right].$$

Нехай для обмеження  $c_m$  умовою релевантності є вираз  $rc_m : cf_m^{rc}$ , а умовою задоволення вираз  $sc_m : cf_m^{sc}$ . Тоді для обмеження  $c_m$  можна ввести додаткову мітку  $R_m = [rc_m : cf_m^{rc}] \vdash [sc_m : cf_m^{sc}]$ .

На рівні технологічної проблеми, множина правил матиме вигляд:

$$Rules_{TP_j}^{set} = \{R_m\}_{m=1..C_{max}},$$

де  $C_{max}$  - кількість обмежень в системі  $ConstrSyst_{TP_j}$ .

Статичною технологічною проблемою на основі обмежень будемо вважати кортеж:

$$TP_j^{stat.} = (Err_{TP_j}^{Hrch.}, \bigcup_{k=1..k_{max}} TPS_k, ConstrHrch_{TP_j}),$$

де  $Err_{TP_j}^{Hrch.}$  - ієрархія помилок до технологічної проблеми,  $TPS_k$  -  $k$ -тий стан технологічної проблеми,  $ConstrHrch_{TP_j} = \bigcup_{k=1..k_{max}} ConstrSyst_k$  - ієрархія обмежень

$j$ -тої технологічної проблеми,  $ConstrSyst_k$  - система обмежень для  $k$ -того стану.

В режимі функціонування, при вирішенні технологічних проблем, кожне з обмежень у відповідній системі обмежень буде або задовольнятися або порушуватися, оскільки всі обмеження в системах обмежень розглядаються як релевантні. Тому для кожної системи обмежень в режимі функціонування отримуватимемо підмножини задоволених і порушених обмежень:

$$[ConstrSet_k]^S = \{c_1, c_2, \dots, c_{m_k}\}_{m_k \in N}, [ConstrSet_k]^V = \{c_1, c_2, \dots, c_{n_k}\}_{n_k \in N}.$$

Застосування впорядкування  $\leq rd$  дозволить утворити відповідні системи задоволених і порушених обмежень:

$$[ConstrSyst_k]^S = \{c_1 : rd_1, c_2 : rd_2, \dots, c_{m_k} : rd_{m_k}\}_{m_k \in N},$$

$$[ConstrSyst_k]^V = \{c_1 : rd_1, c_2 : rd_2, \dots, c_{n_k} : rd_{n_k}\}_{n_k \in N},$$

де  $rd_t \in \{rd_i\}_{i=1..t}, t \in [1..m_k]$ .

Динамічною технологічною проблемою на основі обмежень будемо вважати кортеж:

$$TP_j^{dyn.} = (Err_{TP_j}^{Hrch.}, \bigcup_{k=1..k_{max}} \overline{TPS_k, [ConstrHrch_j]^S, [ConstrHrch_j]^V}),$$

де  $Err_{TP_j}^{Hrch.}$  - ієрархія помилок до технологічної проблеми,  $TPS_k$  -  $k$ -тий стан технологічної проблеми,  $[ConstrHrch_j]^S = \bigcup_{k=1..k_{max}} [ConstrSyst_k]^S$  - ієрархія задоволених обмежень для  $j$ -тої технологічної проблеми;  $[ConstrSyst_k]^S$  - система задоволених обмежень для  $k$ -того стану;  $[ConstrHrch_j]^V = \bigcup_{k=1..k_{max}} [ConstrSyst_k]^V$  - ієрархія порушених обмежень для  $j$ -тої технологічної проблеми;  $[ConstrSyst_k]^V$  - система порушених обмежень для  $k$ -того стану.

Введена структура технологічної проблеми на основі обмежень може бути графічно представлена у деревовидній формі:



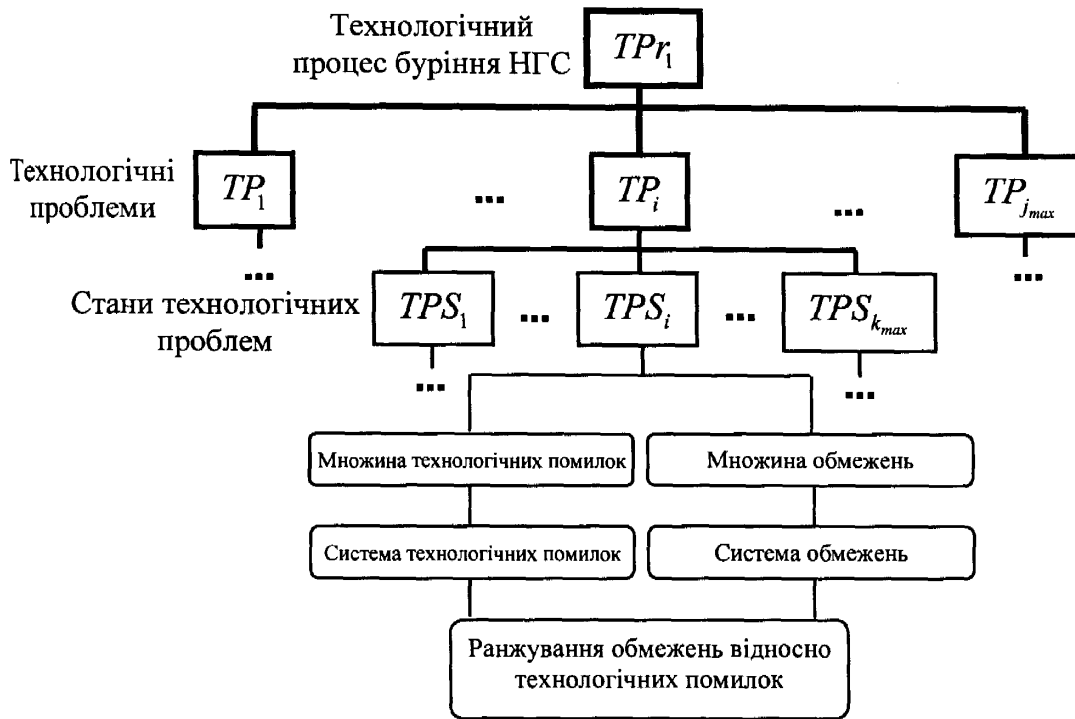


Рис. 3.5. Деревовидна структура технологічних проблем

Нехай при вирішенні стану технологічної проблеми  $TPS_k$  виникає певна кількість помилок яка відповідає кортежу  $(err_1, err_2, \dots, err_{k_1})$ , де  $k_1 \in [0..n]$ ,  $n$  - кількість елементів в  $Err_k^{Syst.}$ . Рішення запропоноване об'єктом ППР  $SubmittedSolution$  оцінюється СІППРО з точки зору набору помилок, що міститься в даному рішенні

$$SubmittedSolution \models Err_k^{sol.} = (err_1, err_2, \dots, err_{k_1}).$$

Розглянемо ієрархію обмежень для технологічної проблеми  $TP_j$ :

$$ConstrHrch_{TP_j} = \bigcup_{k=1..k_{max}} ConstrSyst_k = \begin{matrix} c_1, c_2, \dots, c_{n_1} \\ c_1, c_2, \dots, c_{n_2} \\ \dots \\ c_1, c_2, \dots, c_{n_k} \\ \dots \\ c_1, c_2, \dots, c_{n_{k_{max}}} \end{matrix}.$$

Кожне присвоєння  $\psi \in \Psi^{TP_j}$  задовольняє кожне обмеження  $c_m \in ConstrHrch_{TP_j}$  з деяким ступенем задоволення  $sd_{\psi}^{c_m}$ . Тоді можна обчислити

ступінь задоволення присвоєння всієї ієрархії обмежень технологічної проблеми:

$$sd_{\psi}^{ConstrHrch_{TP_j}} = \left( \sum_{k=1}^{k_{max}} sd_{\psi}^{ConstrSyst_k} \right) / k_{max},$$

$$\text{де } sd_{\psi}^{ConstrSyst_k} = \left( \sum_{m=1}^{n_k} sd_{\psi}^{c_m} \right) / n_k.$$

Рішення  $Sol_{Err^{set}}$  з множиною помилок  $Err^{set}$  вважатимемо коректним (правильним) рішенням технологічної проблеми  $TP_j$  із ступенем коректності  $sd = sd_{\psi}^{ConstrHrch_{TP_j}}$  якщо деяке присвоєння  $\psi \in \Psi^{TP_j}$ ,  $\psi \subseteq Err_{Sol}^{set}$  задовольняє всі обмеження із ступенем  $sd_{\psi}^{ConstrHrch_{TP_j}}$ .

Рішення технологічної проблеми із ступенем коректності  $cd = 1$  будемо вважати ідеальним рішенням. По аналогії з класичною теорією інформаційно-пошукових задач на основі обмежень, технологічну проблему, що немає жодного рішення будемо називати надобмеженою (переобмеженою, непослідовною). Відповідно технологічну проблему яка має більше одного рішення будемо називати недостатньо обмеженою.

Обмеження  $c_m \in ConstrHrch_{TP_j}$  технологічної проблеми  $TP_j$  вважається послабленим, якщо в нього додано додаткове правило  $R_m^{Add.} = [rc_m^{Add.} : cf_m^{RC^{Add.}}] \nabla [sc_m^{Add.} : cf_m^{SC^{Add.}}]$ , тобто стосовно виділеного обмеження йдеться про додавання додаткової умови релевантності ( $rc - relevancy condition$ ), та додаткової умови задоволення ( $sc - satisfaction condition$ ) з відповідними коефіцієнтами визначеності ( $cf - certainty factor$ ). Відповідно, якщо подібне правило можна видалити з обмеження, то тоді обмеження будемо вважати стиснутим.

Таким чином, контроль обмеженості технологічної проблеми дозволяє ефективно визначати її множину рішень в відповідному просторі станів, що також дає змогу оцінити структуру та функціональність технологічних проблем в цілому.

### 3.3. Структура та функціонування технологічних проблем на основі

#### обмежень

Для технологічних проблем на основі обмежень можна говорити про необхідність побудови деякої мінімаксної методики, що дозволяла би максимізувати кількість задоволених обмежень і відповідно мінімізувати кількість порушених обмежень, що дозволить формувати ефективні інтелектуальні стратегії в СІПРО [128].

Як релевантне обмеження з ваговим коефіцієнтом до стану технологічної проблеми  $TP.TPS$  будемо розглядати кортеж  $(c^r, weight(c^r))$ , де  $c^{relevant} = c^{satisfied} \vee c^{violated}$  задається в термінах базових означень для випадку статичних та динамічних технологічних проблем і  $weight(c^r) \in W^{set}$  задає ваговий коефіцієнт обмеження  $c^r$  у вигляді елемента впорядкованої множини вагових значень  $W^{set}$ . Як правило множина  $W^{set}$  представляється проміжком  $[0..1]$ . Відношення впорядкування  $\leq weight$  задає такий спосіб впорядкування множини  $W^{set}$  згідно якого менші вагові коефіцієнти представляють значення менш важливих обмежень. Очевидно, що для досягнення ефективної функціональності СІПРО доцільним є виділення вагових коефіцієнтів обмежень, що задовольняються  $weight(c^s)$  і вагових коефіцієнтів для обмежень, що порушуються  $weight(c^v)$ :

$$\begin{aligned} TP_j.TPS_k \rightarrow ConstrSet^{sat.} \rightarrow W^{sat.} &= \{weight(C_{l_1}^S)\}_{l_1 \in 1..n_1} \\ TP_j.TPS_k \rightarrow ConstrSet^{viol.} \rightarrow W^{viol.} &= \{weight(C_{l_2}^V)\}_{l_2 \in 1..n_2} \end{aligned}$$

Станом технологічної проблеми на основі обмежень з ваговими коефіцієнтами  $TP_j.TPS_k^{weight}$  будемо вважати формальну структуру, що складається з множини обмежень з ваговими коефіцієнтами, що задовольняються при вирішенні даного стану  $TP_j.TPS_k \rightarrow ConstrSet_{W^{sat.}}^{TP_j.TPS_k}$  і не призводять до виникнення помилок та множини обмежень з ваговими

коєфіцієнтами, що порушуються  $TP_j.TPS_k \rightarrow ConstrSet_{W^{viol.}}^{TP_j.TPS_k}$  і є причиною виникнення помилок з множини  $Err_{TP_j.TPS_k}^{Set}$ , що описує помилки які виникли при вирішенні стану технологічної проблеми:

$$TP_j.TPS_k^{weight} = (Err_{TP_j.TPS_k}^{Set}, Err_{TP_j.TPS_k}^{Domain}, \overline{ConstrSet_{W^{sat.}}^{TP_j.TPS_k} \cup ConstrSet_{W^{viol.}}^{TP_j.TPS_k}}),$$

де  $Err_{TP_j.TPS_k}^{Domain}$  – домен можливих помилок, що можуть виникнути при вирішенні стану технологічної проблеми  $TP_j.TPS_k$ .

Елементи множини  $Err_{TP_j.TPS_k}^{Set}$  можуть бути теж впорядковані на основі відношення  $\leq_{weight}$ , що дозволить ранжувати помилки по їх важливості (значимості). Впорядкування множини помилок дозволить отримати систему помилок  $Err_{TP_j.TPS_k}^{Syst.} = (Err_{TP_j.TPS_k}^{Set}, \leq_{weight^1})$ . Аналогічним чином (шляхом впорядкування по важливості на основі введення відношення з ваговими коєфіцієнтами) може бути побудована система обмежень, що задовольняються та систему обмежень, що порушуються для певного стану технологічної проблеми:

$$ConstrSyst_{W^{sat.}}^{TP_j.TPS_k} = (ConstrSet_{W^{sat.}}^{TP_j.TPS_k}, \leq_{weight^2}),$$

$$ConstrSyst_{W^{viol.}}^{TP_j.TPS_k} = (ConstrSet_{W^{viol.}}^{TP_j.TPS_k}, \leq_{weight^3}).$$

Технологічною проблемою на основі обмежень з ваговими коєфіцієнтами  $TP_j^{weight}$  будемо вважати формальну структуру:

$$TP_j^{weight} = (Err_{TP_j}^{Hrch}, Err_{TP_j}^{Domain}, \overline{ConstrHrch_{W^{sat.}}^{TP_j} \cup ConstrHrch_{W^{viol.}}^{TP_j}}),$$

де  $Err_{TP_j}^{Hrch} = \bigcup_{k=1..k_{max}} Err_{TP_j.TPS_k}^{Syst.}$  – ієрархія помилок для технологічної проблеми  $TP_j$ ,

$k_{max}$  – кількість станів технологічної проблеми;  $Err_{TP_j}^{Domain} = \bigcup_{k=1..k_{max}} Err_{TP_j.TPS_k}^{Domain}$  –

домен можливих помилок для технологічної проблеми  $TP_j$ , що утворюється

об'єднанням доменів можливих помилок для виділених станів технологічної

проблеми;  $ConstrHrch_{W^{sat.}}^{TP_j} = \bigcup_{k=1..k_{max}} ConstrSyst_{W^{sat.}}^{TP_j.TPS_k}$  – ієрархія задоволених

обмежень при вирішенні технологічної проблеми  $TP_j$ , утворена шляхом об'єднання відповідних систем обмежень для виділених станів технологічної проблеми;  $ConstrHrch_{W^{viol.}}^{TP_j} = \bigcup_{k=1..k_{max}} ConstrSyst_{W^{viol.}}^{TP_j.TPS_k}$  – ієрархія порушених

обмежень при вирішенні технологічної проблеми  $TP_j$ , утворена шляхом об'єднання відповідних систем обмежень для виділених станів технологічної проблеми.

Розглянемо технологічну проблему на основі обмежень з ваговими коефіцієнтами  $TP_j^{weight}$ . Ступенем задоволення  $sd$  для присвоєння  $\psi \in \Psi_{Err_{TP_j}^{Hrch}}$  будемо вважати різницю суми вагових коефіцієнтів всіх обмежень, що задовольняються і суми вагових коефіцієнтів всіх обмежень, що порушуються даним присвоєнням  $\psi$ , тобто:

$$\forall \psi \in \Psi_{Err_{TP_j}^{Hrch}} : sd(\psi) = \sum_{l_1=1}^{k_{max}} \left[ \sum_{l_2=1}^{l_1=n_1^1 \dots n_{k_{max}}^1} (weight(C_{l_2}^S)) \right]_{l_1} - \sum_{l_1=1}^{k_{max}} \left[ \sum_{l_2=1}^{l_1=n_1^2 \dots n_{k_{max}}^2} (weight(C_{l_2}^V)) \right]_{l_1}.$$

$$k_{max}, n_1^1, n_1^2, n_{k_{max}}^1, n_{k_{max}}^2 \in N.$$

Ступенем істинності  $Sol^{true}(TP_j^{weight})$  розв'язку технологічної проблеми на основі обмежень з ваговими коефіцієнтами  $TP_j^{weight}$  (що формується у вигляді присвоєння  $\psi$ ) є сума вагових коефіцієнтів обмежень, що задовольняються.

Ступенем хибності  $Sol^{false}(TP_j^{weight})$  рішення технологічної проблеми на основі обмежень з ваговими коефіцієнтами  $TP_j^{weight}$  (що формується у вигляді присвоєння  $\psi$ ) будемо вважати суму вагових коефіцієнтів обмежень, що порушуються.

Технологічною проблемою на основі обмежень з ймовірністю [111]  $TP_j^{Prb.}$  будемо вважати розширення класичного означення технологічної проблеми з введеною інтерпретацією ймовірності обмеження як ступеня його релевантності технологічній проблемі. Якщо всі обмеження в введених

множинах, системах та ієрархіях є гарантовано релевантними, то очевидно, що формулювання технологічної проблеми на основі обмежень з ймовірністю не буде відрізнятися від формулювань означень викладених вище. Розглянемо випадок коли не всі обмеження є гарантовано релевантними, тобто існує хоча б одне нерелевантне обмеження. Тоді

$$TP_j^{Prb.} = (Err_{TP_j}^{Hrch.}, \bigcup_{k=1..k_{max}} TPS_k, \overline{[Constr_j^{Hrch.}]_{Prb.}^S, [Constr_j^{Hrch.}]_{Prb.}^V}),$$

де  $Err_{TP_j}^{Hrch.}$  - ієрархія помилок до технологічної проблеми,  $TPS_k$  -  $k$ -тий стан технологічної проблеми,  $k_{max}$  - кількість станів технологічної проблеми;

$$[Constr_j^{Hrch.}]_{Prb.}^S = \bigcup_{k=1..k_{max}} [Constr_k^{Syst.}]_{Prb.}^S = \{c_1^1 : rd_{11}^{TPS_k}, c_2^1 : rd_{12}^{TPS_k} \dots c_{n_1}^1 : rd_{1n_1}^{TPS_k}\}_{k, n_1, 1n_1 \in N}$$

є ієрархія задоволених обмежень з введеними ймовірнісними коефіцієнтами релевантності для  $j$ -тої технологічної проблеми;  $[Constr_j^{Hrch.}]_{Prb.}^V =$

$$= \bigcup_{k=1..k_{max}} [Constr_k^{Syst.}]_{Prb.}^V = \{c_1^2 : rd_{21}^{TPS_k}, c_2^2 : rd_{22}^{TPS_k} \dots c_{n_2}^2 : rd_{2n_2}^{TPS_k}\}_{k, n_2, 2n_2 \in N} - \text{ієрархія}$$

порушених обмежень з введеними ймовірнісними коефіцієнтами релевантності для  $j$ -тої технологічної проблеми.

В загальному випадку ми можемо отримати три види фактичного формулювання технологічної проблеми з обмеженнями та ймовірністю:

$$1) TPF^1 = (Err_{TP_j}^{Hrch.}, \bigcup_{k=1..k_{max}} TPS_k, C_1^S) - \text{випадок коли всі релевантні}$$

обмеження задовольняються;

$$2) TPF^2 = (Err_{TP_j}^{Hrch.}, \bigcup_{k=1..k_{max}} TPS_k, C_2^V) - \text{випадок коли всі релевантні}$$

обмеження порушуються;

$$3) TPF^3 = (Err_{TP_j}^{Hrch.}, \bigcup_{k=1..k_{max}} TPS_k, C_3^{SUV}) - \text{випадок коли частина}$$

релевантних обмежень задовольняється, а частина порушується.

Тепер відповідно можна виконати обчислення ймовірнісних значень для деякого довільного виділеного обмеження  $c_i, i \in N$ :

$$1) Prb(c_i \in C_1^{TPF_1}) = Prb(c_i \in [Constr_j^{Hrch.}]_{Prb.}^S) = \\ = Prb(c_i \text{ in } \bigcup_{k=1..k_{max}} \{c_1^1 : rd_{11}^{TPS_k}, \dots, c_{n_1}^1 : rd_{1n_1}^{TPS_k}\}_{k, n_1, 1n_1 \in N});$$

$$2) Prb(c_i \in C_2^{TPF_2}) = Prb(c_i \in [Constr_j^{Hrch.}]_{Prb.}^V) = \\ = Prb(c_i \text{ in } \bigcup_{k=1..k_{max}} \{c_1^2 : rd_{21}^{TPS_k}, \dots, c_{n_2}^2 : rd_{2n_2}^{TPS_k}\}_{k, n_2, 2n_2 \in N});$$

$$3) Prb(c_i \in C_3^{TPF_3}) = Prb(c_i \in [Constr_j^{Hrch.}]_{Prb.}^S \cup [Constr_j^{Hrch.}]_{Prb.}^V) = \\ Prb(c_i \text{ in } \bigcup_{k=1..k_{max}} \{c_1^1 : rd_{11}^{TPS_k}, \dots, c_{n_1}^1 : rd_{1n_1}^{TPS_k}\} \cup \{c_1^2 : rd_{21}^{TPS_k}, \dots, c_{n_2}^2 : rd_{2n_2}^{TPS_k}\}_{k, n_1, n_2, 1n_1, 2n_2 \in N}).$$

З точки зору практичної імплементації, інтерес представляють ймовірності більші за нуль, що відповідає тому факту, що нерелевантні обмеження не включаються в представлення проблеми. З точки зору класичної теорії ймовірності, релевантність двох різних обмежень розглядається як дві незалежні ймовірнісні події, що дозволяє розглядати процес посилення та послаблення обмежень з множин тих, що задовольняються та тих, що порушуються незалежно від інших входжень даних множин. Оскільки фактичне формулювання технологічної проблеми з обмеженнями та ймовірністю може бути тільки одного з трьох видів, то відповідно для деяких двох обмежень  $c_i$  та  $c_j$  можна розглядати один з трьох видів ймовірнісної інтерпретації:

$$Prb((c_i \in C_1^{TPF_1}) \wedge (c_j \in C_1^{TPF_1})) = Prb(c_i \in C_1^{TPF_1}) \times Prb(c_j \in C_1^{TPF_1});$$

$$Prb((c_i \in C_2^{TPF_2}) \wedge (c_j \in C_2^{TPF_2})) = Prb(c_i \in C_2^{TPF_2}) \times Prb(c_j \in C_2^{TPF_2});$$

$$Prb((c_i \in C_3^{TPF_3}) \wedge (c_j \in C_3^{TPF_3})) = Prb(c_i \in C_3^{TPF_3}) \times Prb(c_j \in C_3^{TPF_3}).$$

Ймовірнісний підхід до технологічних проблем з накладеними обмеженнями дозволяє отримати опис структури процесу пошуку рішень у вигляді таких формулювань, що всі введені обмеження є гарантовано релевантними.

Розглянемо ймовірнісну технологічну проблему з накладеними

$$\text{обмеженнями } TP_j^{Prb.} = (Err_{TP_j}^{Hrch.}, \bigcup_{k=1..k_{max}} TPS_k, \overline{[Constr_j^{Hrch.}]_{Prb.}^S, [Constr_j^{Hrch.}]_{Prb.}^V}).$$

Нехай задано також деяке фактичне формулювання

$TPF_j = (Err_{TPF}^{Hrch.}, \bigcup_{k=1..k_{max}} \overline{TPS_k, [Constr_j^{Hrch.}]_{TPF}^S, [Constr_j^{Hrch.}]_{TPF}^V})$ . Очевидно, що

$$[[Constr_j^{Hrch.}]_{TPF}^S \cup [Constr_j^{Hrch.}]_{TPF}^V] = [Constr_j^{Hrch.}]_{TPF}^R \subset [Constr_j^{Hrch.}]_{Prb.}^S \cup$$

$\cup [Constr_j^{Hrch.}]_{Prb.}^V = [Constr_j^{Hrch.}]_{Prb.}^R$ , тобто гарантовано релевантні обмеження утворюють підмножину ймовірно релевантних обмежень, що може бути використано як основа для введення послаблень технологічної проблеми у вигляді підпроблем та посилень у вигляді надпроблем.

Визначення технологічної проблеми  $TP_j$  як фактичної  $TPF_j$  є можливим

у випадку коли всі обмеження в  $\bigcup_{k=1..k_{max}} [Constr_{TPS_k}^{Syst.}]_{TPF}^R$  є релевантними:

$$\begin{aligned} prb(TP_j) = Prob(TP_j = TPF_j) &= \left[ \prod_{k=1}^{k_{max}} \{rd_{i_1 j_1}^{TPS_k} \mid c_{j_1}^{i_1} \in [Constr_{TPS_k}^{Syst.}]_{TPF}^S\} \times \right. \\ &\times \left. \prod_{k=1}^{k_{max}} \{(1 - rd_{i_1 j_1}^{TPS_k}) \mid c_{j_1}^{i_1} \in ([Constr_{TPS_k}^{Syst.}]_{Prb.}^R \setminus [Constr_{TPS_k}^{Syst.}]_{TPF}^S)\} \right] \cup \\ &\cup \left[ \prod_{k=1}^{k_{max}} \{rd_{i_2 j_2}^{TPS_k} \mid c_{j_2}^{i_2} \in [Constr_{TPS_k}^{Syst.}]_{TPF}^V\} \times \right. \\ &\times \left. \prod_{k=1}^{k_{max}} \{(1 - rd_{i_2 j_2}^{TPS_k}) \mid c_{j_2}^{i_2} \in ([Constr_{TPS_k}^{Syst.}]_{Prb.}^R \setminus [Constr_{TPS_k}^{Syst.}]_{TPF}^V)\} \right], \end{aligned}$$

де  $rd_{i_1 j_1}^{TPS_k}$  – ймовірнісне значення релевантності обмеження  $c_{j_1}^{i_1}$ ,  $i_1, i_2, j_1, j_2 \in N$ .

Згідно класичного підходу, що застосовується в CSP [104] для технологічної проблеми  $TP_j$  можна виділити ряд підпроблем:

$[TP_j^{sub.}]_i \subset TP_j, i = 1..i_{max}$ . Оскільки для технологічної проблеми ми ввели також множину станів, то введені стани теж можна розглядати як множину підпроблем  $TP_j.TPS_k$ ,  $k = 1..k_{max}$ ,  $\{TPS_k\}_{k=1..k_{max}} \leq TP_j$ . Множину підпроблем (станів) будемо розрізняти по ступеню послідовності.



Послідовну підпроблему  $TP_j^{sub.}$  для технологічної проблеми  $TP_j$  будемо вважати максимально послідовною в  $TP_j$ , якщо кожна її надпроблема  $TP_j^{over} = [TP_j^{sub.}] \cup [c_m \in ConstrHrch_{TP_j}^R]_{m=1,2,\dots}$  буде непослідовною.

Згідно даного означення кожне рішення технологічної проблеми з накладеними обмеженнями  $Sol^1(TP_j, ConstrHrch_{TP_j}^R)$  буде відповідно рішенням для всіх її підпроблем та станів:

$$Sol^1 \cong \bigcup_{i=1..i_{max}} [Sol^2]; Sol^1 \cong \bigcup_{k=1..k_{max}} [Sol^3];$$

$$Sol^2 [TP_j^{sub.}]_i, i=1..i_{max}; Sol^3 [TPS_k]_k, k=1..k_{max}$$

де  $Sol_i^2$  – рішення для  $i$ -тої підпроблеми,  $Sol_k^3$  – рішення для  $k$ -го стану.

Якщо  $ConstrHrch_{TP_j}^R$  буде послідовною ІО, то тоді фактичне формулювання технологічної проблеми з даною ІО  $TPF_j^{ConstrHrch_{TP_j}^R}$  буде максимально послідовною. Проте, якщо ІО не є гарантовано послідовною, тоді ймовірність послідовності формулювання  $TPF_j$  можна визначити за формулою:

$$Prb( TPF_j^{consist.} ) = \sum_{i=1}^{i_{max}} \{ prb([TP_j^{sub}]_i | [TP_j^{sub}]_i^{consist.}) \};$$

$$Prb( TPF_j^{consist.} ) = \sum_{k=1}^{k_{max}} \{ prb(TP_j.TPS_k | TP_j.TPS_k^{consist.}) \}.$$

Інтерпретація формальної теорії Заде [129] та концепції можливісної логіки [130] дозволяють розглядати введені нами формалізми технологічних проблем на основі обмежень з точки зору імплементації степенів впевненості (преференцій) як можливісних міток для множин присвоєнь  $\Psi_{Err_{TP_j}^{Hrch.}}$ . В нашому випадку такий підхід дозволить отримати кількісні характеристики можливості та необхідності на множині обмежень та присвоєнь. Важливою перевагою даного підходу є також оцінка можливісного задоволення обмежень у процесі виконання присвоєнь.

Для заданої множини  $Err_{TP_j}^{Hrch.}$  та множини можливих присвоєнь  $\Psi_{Err_{TP_j}^{Hrch.}}$  можливісними розподілом є функція  $\mu : \Psi_{Err_{TP_j}^{Hrch.}} \rightarrow [0,1]$ . Значення можливісного розподілу визначатиме можливий рівень задоволення технологічної проблеми  $TP_j$ . Функцію  $\mu$  будемо вважати нормованою якщо існує таке присвоєння  $\psi$ , що  $\max_{\psi \in \Psi_{Err_{TP_j}^{Hrch.}}} \mu(\psi) = 1$ . Відповідно степінь субнормалізації для  $\mu$  визначимо як величину  $SND(\mu) = 1 - \max_{\psi \in \Psi_{Err_{TP_j}^{Hrch.}}} \mu(\psi)$ .

Нехай  $ConstrHrch_{TP_j}^{pos.}$  - множина всіх можливих обмежень стосовно деякої технологічної проблеми  $TP_j$ . Будемо виходити з припущення, що  $ConstrHrch_{TP_j}^{pos.} = ConstrHrch_{TP_j}^R \cup ConstrHrch_{TP_j}^{unR}$ , де  $ConstrHrch_{TP_j}^R$  - множина всіх релевантних обмежень,  $ConstrHrch_{TP_j}^{unR}$  - множина нерелевантних обмежень технологічній проблемі  $TP_j$ .

Мірою можливості  $PM_\mu$  для можливісного розподілу  $\mu$  будемо вважати функцію з  $ConstrHrch_{TP_j}^{pos.}$  в  $[0,1]$ , що визначається виразом:

$$PM_\mu(c) = \left[ \max_{(\psi \in \Psi_{Err_{TP_j}^{Hrch.}}) \wedge (\psi \models c, c \in ConstrHrch_{TP_j}^S)} (\mu(\psi), 0) \right] \vee \left[ \max_{(\psi \in \Psi_{Err_{TP_j}^{Hrch.}}) \wedge (\psi \models c, c \in ConstrHrch_{TP_j}^V)} (\mu(\psi), 0) \right].$$

Мірою необхідності  $NM_\mu$  для можливісного розподілу  $\mu$  будемо вважати функцію з  $ConstrHrch_{TP_j}^{pos.}$  в  $\langle 0,1 \rangle$ , що визначається виразом:

$$NM_\mu(c) = \left[ \min_{(\psi \in \Psi_{Err_{TP_j}^{Hrch.}}) \wedge (\psi \not\models c, c \in ConstrHrch_{TP_j}^S)} (1 - \mu(\psi), 1) \right] \vee \left[ \min_{(\psi \in \Psi_{Err_{TP_j}^{Hrch.}}) \wedge (\psi \not\models c, c \in ConstrHrch_{TP_j}^V)} (1 - \mu(\psi), 1) \right].$$

Таким чином, можна зробити висновок, що міра необхідності обмеження виражатиме степінь преференції задоволення або порушення обмежень (перший диз'юнкт визначає преференцію задоволення, другий – преференцію

порушення). Наприклад, якщо для деяких двох обмежень  $c_1, c_2 \in \text{ConstrHrch}_{TP_j}^{pos.}$  ми матимемо, що  $NM_{\mu}(c_1) > NM_{\mu}(c_2)$ , то це означатиме той факт, що задоволення (порушення) обмеження  $c_1$  є більш преференційним, ніж задоволення (порушення) обмеження  $c_2$ .

Таким чином, з точки зору ефективності реалізації СППРО доцільним є використання обмежень із ступенями преференції.

Для заданої множини обмежень  $\text{ConstrHrch}_{TP_j}^{pos.}$ , обмеженням із значенням необхідності будемо вважати пару  $(c, pd)$ , де  $c \in \text{ConstrHrch}_{TP_j}^S$  або  $c \in \text{ConstrHrch}_{TP_j}^V$  є обмеженням, а  $pd \in [0,1]$  є ступенем преференції.

Обмеженням з міткою для технологічної проблеми  $TP_j$  будемо вважати пару  $c:l$ , де  $c \in \text{ConstrHrch}_{TP_j}$ ,  $l$  – мітка, що визначає рівень обмеження в ієрархії.

В нашому випадку доцільним є розгляд трьох рівнів: рівень множини, рівень системи (як впорядкованої множини), рівень технологічної проблеми. Згідно введених формалізмів дані рівні є впорядкованими і їм можуть бути присвоєні імена: *StateSetLevel* – рівень множини міток для стану, *StateSysLevel* – рівень системи міток для стану,  $TP^{state\_Level}$  – рівень міток технологічної проблеми з введеними станами, *SubSetLevel* – рівень множини міток для підпроблеми, *SubSysLevel* – рівень системи міток для підпроблеми,  $TP^{sub\_Level}$  – рівень міток технологічної проблеми з введеними підпроблемами. Дані символічні імена можна позначати цілочисельними значеннями. Додатково мітки можна індексувати маркерами:  $l^{req.}$  – маркер обов'язкового рівня і  $l^{unreq.}$  – маркер необов'язкового рівня.

Ієрархією обмежень *constraint hierarchy (CH)* для технологічної проблеми  $TP_j$  є скінченна множина обмежень з введеними мітками над множиною  $Err_{TP_j}^{Hrch.}$  для ієрархії доменів  $Err_{TP_j}^{Domain}$ .

Позначатимемо таку ієрархію:

$$CH_{TP_j} = \left( \bigcup_{k=1..k_{max}} \{ \{c_i : rd_i^{TPS_k} \}^{i=1..i_k} \}_k, Err_{TP_j}^{Hrch.}, Err_{TP_j}^{Domain} \right).$$

Перед побудовою формального означення процесу рішення отриманої ІО дослідимо процес визначення складових рішення (присвоєння). Для цього задамо структуру присвоєння у вигляді набору змінних. Оскільки сама структура технологічної проблеми є ієрархічною, тобто такою, що складається з множини станів, то відповідно присвоєння теж буде багаторівневим:

$$\psi \in \Psi_{Err_{TP_j}^{Hrch.}} : \begin{bmatrix} (e_1^1, e_2^1, \dots, e_{n_1}^1) \\ (e_1^2, e_2^2, \dots, e_{n_2}^2) \\ \dots \\ (e_1^{k_{max}}, e_2^{k_{max}}, \dots, e_{n_{k_{max}}}^{k_{max}}) \end{bmatrix}.$$

Відповідно дане присвоєння буде оцінюватися з точки зору потенційно можливого рішення на основі ІО:

$$ConstrHrch_{TP_j}^R : \begin{bmatrix} (c_1^1, c_2^1, \dots, c_{r_1}^1) \\ (c_1^2, c_2^2, \dots, c_{r_2}^2) \\ \dots \\ (c_1^{k_{max}}, c_2^{k_{max}}, \dots, c_{r_{k_{max}}}^{k_{max}}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (c_1^1, c_2^1, \dots, c_{s_1}^1) \\ (c_1^2, c_2^2, \dots, c_{s_2}^2) \\ \dots \\ (c_1^{k_{max}}, c_2^{k_{max}}, \dots, c_{s_{k_{max}}}^{k_{max}}) \end{bmatrix} \cup \begin{bmatrix} (c_1^1, c_2^1, \dots, c_{v_1}^1) \\ (c_1^2, c_2^2, \dots, c_{v_2}^2) \\ \dots \\ (c_1^{k_{max}}, c_2^{k_{max}}, \dots, c_{v_{k_{max}}}^{k_{max}}) \end{bmatrix},$$

де  $k_{max}$  – кількість станів в технологічній проблемі,  $r_i, s_i, v_i, i = 1..k_{max}$  – відповідно кількість релевантних, задоволених і порушених обмежень. Після введення вагових коефіцієнтів, система обмежень набуде вигляду:

$$\left[ ConstrHrch_{TP_j}^R \right]^{weight} : \begin{bmatrix} (c_1^1 : sw_1^1, c_2^1 : sw_2^1, \dots, c_{s_1}^1 : sw_{s_1}^1) \\ (c_1^2 : sw_1^2, c_2^2 : sw_2^2, \dots, c_{s_2}^2 : sw_{s_2}^2) \\ \dots \\ (c_1^{k_{max}} : sw_1^{k_{max}}, c_2^{k_{max}} : sw_2^{k_{max}}, \dots, c_{s_{k_{max}}}^{k_{max}} : sw_{s_{k_{max}}}^{k_{max}}) \end{bmatrix} \cup \begin{bmatrix} (c_1^1 : vw_1^1, c_2^1 : vw_2^1, \dots, c_{v_1}^1 : vw_{v_1}^1) \\ (c_1^2 : vw_1^2, c_2^2 : vw_2^2, \dots, c_{v_2}^2 : vw_{v_2}^2) \\ \dots \\ (c_1^{k_{max}} : vw_1^{k_{max}}, c_2^{k_{max}} : vw_2^{k_{max}}, \dots, c_{v_{k_{max}}}^{k_{max}} : vw_{v_{k_{max}}}^{k_{max}}) \end{bmatrix},$$

оскільки згідно базового припущення, кількість рівнів та входжень на них для ІО є скінченною.

Виконання присвоєння призведе до процесу задоволення та порушення відповідних систем обмежень на рівнях технологічної проблеми. Даний процес можна оцінити по сумарних вагових значеннях порушених і задоволених обмежень на відповідних рівнях.

Рішенням для ІО  $CH_{TP_j}$  із заданими граничними значеннями порушених і задоволених обмежень  $Sol_{TP_j}^{ConstrHrch}(s\_weight, v\_weight)$ , є таке присвоєння  $\psi$  для  $Err_{TP_j}^{Hrch}$  з накладеною ІО  $ConstrHrch_{TP_j}^R$ , що задовольняє обмеження з сумарним ваговим значенням

$$s\_weight = \sum_{l_1=1}^{k_{max}} \left[ \sum_{l_2=1}^{l_1=s_1..s_{k_{max}}} (sw_{l_2}^{l_1}) \right]_{l_1} k_{max}, l_1, l_2, s_1, s_{k_{max}} \in N,$$

і порушує обмеження з сумарним ваговим значенням

$$v\_weight = \sum_{l_1=1}^{k_{max}} \left[ \sum_{l_2=1}^{l_1=v_1..v_{k_{max}}} (vw_{l_2}^{l_1}) \right]_{l_1} k_{max}, l_1, l_2, v_1, v_{k_{max}} \in N.$$

Будемо вважати, що рішення  $\psi$  є кращим в ІО  $CH_{TP_j}$ , якщо не існує присвоєння кращого ніж  $\psi$  по значеннях  $s\_weight$ ,  $v\_weight$  (тобто іншими словами присвоєння  $\psi^1$  будемо вважати кращим ніж присвоєння  $\psi^2$ , якщо  $\psi^1.s\_weight > \psi^2.s\_weight$  і  $\psi^1.v\_weight < \psi^2.v\_weight$ ).

Проте, на рівні практичної реалізації, доцільним є використання певної метрики порівняння присвоєнь, яка б дозволила визначити ступінь задоволення виділеним присвоєнням певного обмеження, множини, системи та ІО. Для побудови такої метрики ефективним методом є введення функції успішності, що відображає задоволення або порушення обмеження стосовно присвоєння  $\psi \in \Psi_{Err_{TP_j}^{Hrch}}$ .

Функцією успішності є функція  $SF : ConstrHrch_{TP_j}^R \times \Psi_{Err_{TP_j}^{Hrch}} \rightarrow R_+$ , де

$$SF(c\psi) = \begin{cases} \forall \psi \in \Psi_{Err_{TP_j}^{Hrch}} \forall c \in ConsrtHrch_{TP_j}^R : SF^s(c\psi) = sd_\psi^c, sd_\psi^c \in [0..1] \\ \forall \psi \in \Psi_{Err_{TP_j}^{Hrch}} \forall c \in ConsrtHrch_{TP_j}^R : SF^v(c\psi) = vd_\psi^c, vd_\psi^c \in [0..1] \end{cases},$$

де  $sd_\psi^c$  – ступінь задоволення обмеження  $c$  присвоєнням  $\psi$ ;

$vd_\psi^c$  – ступінь порушення обмеження  $c$  присвоєнням  $\psi$ .

Величини  $sd_\psi^c$  та  $vd_\psi^c$  можна вимірювати значеннями з проміжку  $[0..1]$  або у відсотках від 0 до 100. В подальшому викладі  $SF(c\psi)$  позначатиме успішність обмеження  $c$  по відношенню до присвоєння  $\psi$ . Особливістю застосування даної функції у випадку технологічних проблем на основі обмежень полягає в тому, що дана функція може бути застосована до всієї ієрархії доменів  $Err_{TP_j}^{Domain} = \bigcup_{k=1..k_{max}} Err_{TP_j, TPS_k}^{Domain}$ . Крім того у випадку граничних значень функції можна оперувати метрикою в якій розглядається тільки повне задоволення та повне порушення обмежень, що позначається відповідно значеннями 1 та 0.

Нехай маємо множину обмежень  $[Constr_{TPS_k}^{Set}]^R = \{c_1, c_2, \dots, c_{n_k}\}$ .

Успішність множини обмежень по відношенню до присвоєння  $\psi \in \Psi_{Err_{TP_j}^{Hrch}}$

будемо визначати наступним чином:

$$SF^{set}([Constr_{TPS_k}^{Set}]^R \psi) = \begin{cases} SF^s(c_1\psi), \dots, SF^s(c_{n_{k_1}}\psi) \\ SF^v(c_1\psi), \dots, SF^v(c_{n_{k_2}}\psi) \end{cases}.$$

Нехай маємо систему обмежень  $[Constr_{TPS_k}^{Syst.}]^R = \{c_1 : l_1^{TPS_k}, c_2 : l_2^{TPS_k}, \dots, c_{n_k} : l_{n_k}^{TPS_k}\}$ . Успішність системи обмежень по відношенню до присвоєння  $\psi \in \Psi_{Err_{TP_j}^{Hrch}}$  будемо визначати як кортеж:

$$SF^{Syst.}([Constr_{TPS_k}^{Syst.}]^R \psi) = \begin{cases} SF^s([c_1 : l_1^{TPS_k}] \psi), \dots, SF^s([c_{n_{k_1}} : l_{n_{k_1}}^{TPS_k}] \psi) \\ SF^v([c_1 : l_1^{TPS_k}] \psi), \dots, SF^v([c_{n_{k_2}} : l_{n_{k_2}}^{TPS_k}] \psi) \end{cases},$$

де  $l_i$  – коефіцієнт впорядкування множини обмежень, який може інтерпретуватись як:  $l_i | \{rd_i, cw_i, cpr_i, cps_i, pfc_i, nd_i\}$  – ступінь релевантності, ваговий коефіцієнт, ймовірнісний коефіцієнт, можливісний коефіцієнт, перевага обмеження, ступінь необхідності відповідно.

Нехай маємо ієрархію обмежень  $[Constr_{TP_j}^{Hrch}]^R = \bigcup_{k=1..k_{max}} [Constr_{TPS_k}^{Syst.}]^R = \bigcup_{k=1..k_{max}} \{\{c_i : l_i^{TPS_k}\}^{i=1..i_k}\}_k$ . Успішність ІО по відношенню до присвоєння  $\psi \in \Psi_{Err_{TP_j}^{Hrch}}$  будемо визначати як кортеж:

$$SF^{Hrch}([Constr_{TP_j}^{Hrch}]^R, \psi) = \left[ \begin{array}{l} \bigcup_{k=1..k_{max}} \{\{SF^s([c_i : l_i^{TPS_k}] \psi)\}^{i_1=1..i_{k1}}\}_k \\ \bigcup_{k=1..k_{max}} \{\{SF^v([c_i : l_i^{TPS_k}] \psi)\}^{i_2=1..i_{k2}}\}_k \end{array} \right]$$

В попередньому викладі було розглянуто різні представлення для міток множин обмежень, що вводяться для станів технологічних проблем. Для отримання максимальної ефективності на рівні програмної реалізації введемо представлення комплексної мітки  $c_i : l_i^{set}$ ,  $l_i^{set} = \{rd_i, cw_i, cpr_i, cps_i, pfc_i, nd_i\}$ . На рівні системи обмежень для стану технологічної проблеми матимемо представлення виду  $Constr_{TPS_k}^{Syst.} = (c_1 : l_1^{set}, c_2 : l_2^{set}, \dots, c_{n_k} : l_{n_k}^{set})$ , де  $n_k$  - кількість обмежень для  $k$ - стану технологічної проблеми з  $k_{max}$  в якості максимальної кількості станів (згідно початкового припущення – кількість станів є скінченною). Подібним чином можна отримати  $Constr_{TPS_k}^{Syst.} \cdot L_{TPS_k}^{set} = \bigcup_{i_1=1..n_k} l_{i_1}^{set}$ ,

$$Constr_{TP_j}^{Hrch} \cdot L_{TP_j}^{Hrch} = \bigcup_{i_2=1..k_{max}} Constr_{TPS_k}^{Syst.} \cdot L_{TPS_k}^{set}$$

Анотаційний кортеж будемо задавати у вигляді формальної структури  $(L_{TP_j}^{Hrch}, \leq, \oplus_{TP_j})$ , де  $L_{TP_j}^{Hrch}$  - ієрархія міток з елементами  $l_i^{set} \in L_{TP_j}^{Hrch}$ , що називаються комплексними мітками і підтримують доступ до входжень;  $\leq$  - операція впорядкування на множині виділених входжень для комплексних міток, що розглядається як операція дискретного впорядкування множин

числових міток;  $\oplus$  - з'єднувальна операція на  $L_{TP_j}^{Hrch.}$ . При роботі на рівні станів технологічної проблеми буде використовуватись модифікація з'єднувальної операції  $\oplus_{TP_j}$  у вигляді  $\oplus_{TP_j.TPS_k}$ .

Можна виділити 5 основних множин для впорядкування:  
 $RD_i^{set} = \{rd_i\}_i, CW_i^{set} = \{cw_i\}_i, CPr_i^{set} = \{cpr_i\}_i, CPs_i^{set} = \{cps_i\}_i, Pfc_i^{set} = \{pfc_i\}_i.$

Ю з мітками  $CH_{TP_j}^L$  будемо вважати формальну структуру утворену наступним чином:

$$(ConstrHrch_{TP_j}^R(L_{TP_j}^{Hrch.}, \leq, \oplus_{TP_j}), Err_{TP_j}^{Hrch.}, Err_{TP_j}^{Domain}).$$

Під час функціонування, система отримує на вхід підстановки змінних у вигляді присвоєнь  $\psi \in \Psi_{Err_{TP_j}^{Hrch.}}$ , що в тому числі можуть бути помилками і для входжень підстановок виду  $(e_1, e_2, \dots, e_n)$  користувач системи може задавати власні мітки до відповідних змінних, що по структурі відповідають міткам I типу. Класифікуємо два види міток, а саме будемо позначати експертні мітки (I типу) у вигляді  $el_i^{set} = \{rd_i^{el}, cw_i^{el}, cpr_i^{el}, cps_i^{el}, pfc_i^{el}, nd_i^{el}\}$ , а мітки користувача у вигляді  $ul_i^{set} = \{rd_i^{ul}, cw_i^{ul}, cpr_i^{ul}, cps_i^{ul}, pfc_i^{ul}, nd_i^{ul}\}$  (II типу) і нотацію  $l_i^{set} = \{rd_i, cw_i, cpr_i, cps_i, pfc_i, nd_i\}$  в загальному випадку.

Тоді можна ввести функцію  $l : ConstrHrch_{TP_j}^R \times Err_{TP_j}^{Hrch.} \rightarrow CH_{TP_j}^L$ , що дозволить задавати мітки для змінних в обмеженнях. Такі мітки будемо інтерпретувати як локальні мітки по відношенню до відповідних обмежень. Множину змінних для відповідного обмеження  $c$  будемо позначати як  $Err_c$ .

Розглядатимемо присвоєння  $\psi, \psi \in \Psi_{Err_{TP_j}^{Hrch.}}$  як відображення виду  $\psi : Err_{TP_j}^{Hrch.} \rightarrow Err_{TP_j}^{Domain}$ . Відповідно  $\Psi_{Err_{TP_j}^{Hrch.}}$  буде позначати множину всіх можливих присвоєнь для змінних (помилки) в  $Err_{TP_j}^{Hrch.}$ . Введених локальних міток робить можливим виконання обчислень систем та ієрархій обмежень шляхом побудови глобальних міток.



Для технологічної проблеми  $TP_j$  глобальною міткою змінної (помилки) будемо вважати поєднання її міток в усіх обмеженнях, де вона зустрічається (на рівні станів і на рівні всієї проблеми):

$$lg^{err} : Err_{TP_j}^{Hrch.} \rightarrow L_{TP_j}^{Hrch.}, \quad lg^{err}(e) = \bigoplus_{TP_j} \left[ \frac{\bigoplus_{TP_j, TPS_k} l(c, e)}{ConstrHrch_{TP_j}^R \left( (c \in Constr_{TP_j, TPS_k}^{Syst.}) \wedge (e \in Err_c) \right)} \right]_{k=1..k_{max}}.$$

Для технологічної проблеми  $TP_j$  міткою обмеження є поєднання міток змінних, що в нього входять (на рівні станів і на рівні всієї проблеми):

$$l^{Constr} : ConstrHrch_{TP_j}^R \rightarrow L_{TP_j}^{Hrch.},$$

$$l^{Constr}(c) = \bigoplus_{TP_j} \left[ \frac{\bigoplus_{TP_j, TPS_k} l(c_i, \overbrace{e_1^{c_i}, e_2^{c_i}, \dots, e_{m_k}^{c_i}}^{(e \in Err_c)})}{ConstrHrch_{TP_j}^R} \right]_{k=1..k_{max}}.$$

Для технологічної проблеми  $TP_j$  глобальною міткою обмеження будемо вважати поєднання глобальних міток змінних для всіх змінних в обмеженні (на рівні станів і на рівні всієї проблеми):

$$lg^{Constr} : ConstrHrch_{TP_j}^R \rightarrow L_{TP_j}^{Hrch.}, \quad lg^{Constr}(c) = \bigoplus_{TP_j} \left[ \frac{\bigoplus_{TP_j, TPS_k} lg^{err}(e)}{TPS_k \in TP_j \left( \overbrace{(e \in Err_c)} \right)} \right]_{k=1..k_{max}}.$$

Системою обмежень з нечіткими мітками  $CH_{TP_j}^{L\mu}$  будемо вважати систему обмежень з мітками, яка визначається кортежем  $(Err_{TP_j}^{Hrch.}, Err_{TP_j}^{Domain}, ConstrHrch_{TP_j}^R, (L_{TP_j}^{Hrch.})^R, l)$ , де  $(L_{TP_j}^{Hrch.})^R = (\langle 0, 1 \rangle \subseteq \mathbb{R}, \geq_{\mathbb{R}}, \oplus_{TP_j}^R)$ , де  $\oplus_{TP_j}^R$  є з'єднувальною функцією над множиною дійсних чисел на рівні проблеми  $TP_j$  і представляється в формі модифікації  $\oplus_{TP_j, TPS_k}^R$  на рівні станів технологічної проблеми.

Згідно початкового означення, функція успішності відображає ступінь задоволення обмеження (множини, системи, ієрархії обмежень) певним присвоєнням  $\psi \in \Psi_{Err_{TP_j}^{Hrch.}}$ . Успішність множини обмежень  $Constr_{TPS_k}^{Set}$  по відношенню до присвоєння  $\psi \in \Psi_{Err_{TPS_k}^{Set}}$ , буде визначатися наступним чином:

$$SCS(Constr_{TPSk}^{Set}, \psi) = \begin{cases} \max_{c \in Constr_{TPSk}^{Set}} [lg^{constr}(c) SF_s^{set}(c\psi)] \\ \min_{c \in Constr_{TPSk}^{Set}} [lg^{constr}(c) SF_v^{set}(c\psi)] \end{cases}'$$

де  $lg^{constr}(c)$  - глобальна мітка обмеження, а  $SF()$  - функція успішності.

Успішність системи обмежень  $Constr_{TPSk}^{Syst.}$ , по відношенню до присвоєння

$\psi \in \Psi_{Err_{TPSk}^{Syst.}}$ , буде визначатися наступним чином:

$$SCS(Constr_{TPSk}^{Syst.}, \psi) = \begin{cases} \max_{c \in Constr_{TPSk}^{Syst.}} [lg^{constr}(c) SF_s^{Syst.}(c\psi)] \\ \min_{c \in Constr_{TPSk}^{Syst.}} [lg^{constr}(c) SF_v^{Syst.}(c\psi)] \end{cases}'$$

де  $SF^{Syst.}()$  - функція успішності.

Успішність ієрархії обмежень  $Constr_{TPj}^{Hrch.}$ , по відношенню до присвоєння

$\psi \in \Psi_{Err_{TPj}^{Hrch.}}$ , буде визначатися наступним чином:

$$SCS(Constr_{TPj}^{Hrch.}, \psi) = \begin{cases} \max_{c \in Constr_{TPj}^{Hrch.}} [lg^{constr}(c) SF_s^{Hrch.}(c\psi)] \\ \min_{c \in Constr_{TPj}^{Hrch.}} [lg^{constr}(c) SF_v^{Hrch.}(c\psi)] \end{cases}'$$

де  $SF^{Hrch.}()$  - функція успішності.

Розв'язком ієрархії обмежень з нечіткими мітками

$CH_{TPj}^{L\mu} = (Err_{TPj}^{Hrch.}, Err_{TPj}^{Domain}, Constr_{TPj}^{Hrch.}, (L_{TPj}^{Hrch.})^R, I)$  буде кожне присвоєння

$\psi \in \Psi_{Err_{TPj}^{Hrch.}}$ , для яких значення функції успішності ієрархії обмежень

$SCS^s(Constr_{TPj}^{Hrch.}, \psi)$  буде максимальним, а значення функції успішності

ієрархії обмежень  $SCS^v(Constr_{TPj}^{Hrch.}, \psi)$  буде мінімальним.

Отже, введені види міток для обмежень задаються експертами на етапі проектування системи інтелектуальної підтримки прийняття рішень. Вони визначають характеристики які на думку експерта чи групи експертів дозволяють більш ефективно оперувати з обмеженнями, множинами обмежень,

системами та ієрархіями обмежень з точки зору їх значимості та відповідної пріоритетності чи другорядності імплементації, а також впливають на процес контролю рішення технологічних проблем в цілому.

### 3.4. Методи контролю рішення технологічних проблем в системі інтелектуальної підтримки прийняття рішень

Пошук ефективних та оптимальних присвоєнь в деякому вузькому домені формальних формулювань не гарантує отримання послідовного рішення в домені фактичних формулювань  $TPF$ . Введемо формалізацію процесу пошуку присвоєння з максимальною ймовірністю в домені  $TPF$ :

$$Sol(TPF) \approx (\psi^{pos.})_{max} \in \Psi_{Err_{TP_j}^{Hrch.}}$$

Присвоєння  $\psi \in \Psi_{Err_{TP_j}^{Hrch.}}$  будемо вважати рішенням фактичного формулювання технологічної проблеми з обмеженнями  $TPF$ , якщо ступінь задоволення  $SD(Constr_{TP_j}^{Hrch.})$  буде більшою деякого граничного значення  $bound^{sat.}$  і ступінь порушення обмежень  $VD(Constr_{TP_j}^{Hrch.})$  буде меншою деякого граничного значення  $bound^{viol.}$ .

Під ймовірністю того, що  $\psi$  є розв'язком для  $PF = (Err_{TP_j}^{Hrch.}, Err_{TP_j}^{Domain}, ConstrHrch_{TP_j}^R, ConstrHrch_{TP_j}^{unR})$  будемо розуміти ймовірність того, що обмеження які порушуються понад встановлену нижню границю  $bound^{viol.}$  необхідно належать множині нерелевантних обмежень:

$$\begin{aligned} dist^{\#} \left( \left[ ConstrHrch_{TP_j}^R \right]^Y, ConstrHrch_{TP_j}^{unR} \right) &< \# set^{bound^{viol.}}, \\ Prb(\psi^s \vDash ConstrHrch_{TP_j}^S) &= Prb \left( \psi^s \vDash \bigcup_{k=1..k_{max}} [ConstrSyst_{TP_j, TPS_k}^S]_k \right) = \\ &= \prod_i \left\{ 1 - Prb \left( (c_i^s \in ConstrHrch_{TP_j}^S) \mid \psi^s \vDash c_i^v \right) \right\} = \sum_{j_i} \{ Prb(TP_{j_i}) \mid TP_{j_i} = \\ &= (Err_{TP_{j_i}}^{Hrch.}, Err_{TP_{j_i}}^{Domain}, ConstrHrch_{TP_{j_i}}^S), \psi^s \vDash c_i^v \}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Prb(\psi^v \models ConstrHrch_{TP_j}^v) &= Prb\left(\psi^v \models \bigcup_{k=1..k_{max}} [ConstrSyst_{TP_j, TPS_k}^v]_k\right) = \\
&= \prod_i \left\{1 - Prb\left(\left(c_i^v \in ConstrHrch_{TP_j}^v\right) \mid \psi^v \models c_i^s\right)\right\} = \sum_{j_2} \{Prb(TP_{j_2}) \mid TP_{j_2} = \\
&= (Err_{TP_{j_2}}^{Hrch.}, Err_{TP_{j_2}}^{Domain}, ConstrHrch_{TP_{j_2}}^v), \psi^v \models c_i^s\}.
\end{aligned}$$

Ступенем задоволення ймовірнісної технологічної проблеми з накладеними обмеженнями  $TP_j^{Prb.}$  будемо вважати ймовірність того, що  $\psi$  є розв'язком  $TPF$ , тобто що  $SD(TP_j^{Prb.}) = Prb(\psi \models ConstrHrch_{TP_j}^R)$ .

Рішенням ймовірнісної технологічної проблеми з накладеними обмеженнями  $TP_j^{Prb.}$  є присвоєння  $\psi^*$  з максимальним значенням ймовірності того, що воно є рішенням фактичної технологічної проблеми  $TPF$ . Крім того  $\psi^*$  повинне задовольняти додаткові властивості:

$$\begin{aligned}
Prb(\psi^* \models ConstrHrch_{TP_j}^S) &= \max_{\psi \in Y_{Err_{TP_j}^{Hrch.}}} Prb(\psi \models \\
\bigcup_{k=1..k_{max}} [ConstrSyst_{TP_j, TPS_k}^S = (c_1^s : l_1^{set}, c_2^s : l_2^{set}, \dots, c_{n_{k_2}}^s : l_{n_{k_2}}^{set})]_k) &= \\
= \max_{\psi \in Y_{Err_{TP_j}^{Hrch.}}} \left(\prod_i \{1 - Prb(c_i^s : l_i^{set}) \mid \psi \models c_i^v\}\right); \\
Prb(\psi^* \models ConstrHrch_{TP_j}^V) &= \min_{\psi \in Y_{Err_{TP_j}^{Hrch.}}} Prb(\psi \models \\
\bigcup_{k=1..k_{max}} [ConstrSyst_{TP_j, TPS_k}^V = (c_1^v : l_1^{set}, c_2^v : l_2^{set}, \dots, c_{n_{k_2}}^v : l_{n_{k_2}}^{set})]_k) &= \\
= \min_{\psi \in Y_{Err_{TP_j}^{Hrch.}}} \left(\prod_i \{1 - Prb(c_i^v : l_i^{set}) \mid \psi \models c_i^s\}\right).
\end{aligned}$$

$Prb(\psi^* \models ConstrHrch_{TP_j}^R)$  можна розглядати як ступінь послідовності ймовірнісної технологічної проблеми з накладеними обмеженнями  $TP_j^{Prb.}$ .

Якщо розглянути  $TP_j^* = (Err_{TP_j}^{Hrch.}, Err_{TP_j}^{Domain}, \{c_i^r \in \bigcup_{k=1..k_{max}} [ConstrSyst_{TP_j, TPS_k}^R = (c_1^r : l_1^{set}, c_2^r : l_2^{set}, \dots, c_{n_k}^r : l_{n_k}^{set})]_k \mid \psi^* \models c_i^r\})$  то присвоєння  $\psi^*$  може інтерпретуватися як розв'язок однієї з максимально послідовних підпроблем

$TP_j^{Sub.} \subset TP_j^*$ . З другого боку присвоєння  $\psi^*$  можна розглядати як рішення всієї множини підпроблем:  $\{TP_j^{Sub.}\} \subseteq TP_j^*$ . Що стосується фактичного формулювання технологічної проблеми, то в даному випадку його можна розглядати як відповідник однієї із підпроблем:

$$[Prb(TPF = \{TP_j^{Sub.}\}_{j=1..j_{max}}) \subseteq TP_j^*] \neq Prb(TPF = TP_j^*).$$

Можливісною технологічною проблемою на основі обмежень  $TP_j^\mu$  будемо вважати формальну структуру:

$$TP_j^\mu = \left( Err_{TP_j}^{Hrch.}, Err_{TP_j}^{Domain}, \bigcup_{k=1..k_{max}} \left[ (c_i : l_i^{set} . nd_i)_{i=1..n_k} \right]_k \right).$$

Представлення обмежень із значеннями необхідності дозволяє задавати інтерпретацію процесу задоволення обмеження з точки зору необхідності, наприклад значення  $l^{set} . nd = 1$  представляє випадок необхідності абсолютного (повного) задоволення обмежень.

Обмеження із значенням необхідності  $c_i : l_i^{set} . nd_i$  будемо вважати таким, що задовольняється можливісним розподілом  $\mu \models (c_i : l_i^{set} . nd_i)$  коли міра необхідності  $NM_\mu$  спричинена розподілом  $\mu$  на

$ConstrHrch_{TP_j}^R = \bigcup_{k=1..k_{max}} \left[ (c_i^r : l_i^{set} . nd_i)_{i=1..n_k} \right]_k$  дозволяє виконувати верифікацію

відношення  $NM_\mu(c_i^r) \geq c_i : l_i^{set} . nd_i$ .

Розв'язком можливісної технологічної проблеми  $TP_j^\mu$  будемо вважати кожен такий можливісний розподіл  $\mu$ , який задовольняє всі обмеження із визначеними значеннями необхідності більшими за  $bound_{Sat.}^\mu$  і порушує всі обмеження із значенням необхідності меншим за  $bound_{Viol.}^\mu$ :

$$\begin{aligned} & \mu \models \{ \forall c_i^s : l_i^{set} . nd_i \mid nd_i > bound_{Sat.}^\mu \} \\ & \mu \models \{ \forall c_i^v : l_i^{set} . nd_i \mid nd_i < bound_{Viol.}^\mu \} \end{aligned}$$

Ступінь послідовності  $CD_{LP_j^\mu}$  можливісної технологічної проблеми із

обмеженнями  $TP_j^\mu$  визначатимемо як  $CD = \max_{\forall \mu, \mu \vdash \text{ConstrHrch}_{TP_j^\mu}^{\text{Pos.}}} [1 - \text{SND}(\mu)]$ .

Відповідно, ступінь непослідовності  $ICD$  будемо визначати як  $ICD = 1 - CD$ . З точки зору інтерпретації означатиме, що:

$$ICD = \max_{nd_i} \left[ \psi \not\vdash c_i : l_i \cdot nd_i, \forall \psi \in \Psi_{\text{Err}_{TP_j}^{\text{Hrch.}}} \right]_{i=1..n_k},$$

тобто ступінь непослідовності для  $TP_j^\mu$  дорівнює ступеню необхідності найбільш важливого обмеження, що не задовольняється в жодному з присвоєнь. Відповідно на рівні можливісних розподілів отримаємо:

$$ICD = \min_{nd_i} \left[ \left( \forall \mu \not\vdash c_i : l_i \cdot nd_i \right) \mid \forall \mu \vdash \text{ConstrHrch}_{TP_j^\mu}^{\text{Pos.}} \right]_{i=1..n_k}.$$

Для заданої можливісної технологічної проблеми  $TP_j^\mu = \left( \text{Err}_{TP_j}^{\text{Hrch.}}, \text{Err}_{TP_j}^{\text{Domain}}, \bigcup_{k=1..k_{\max}} \left[ (c_i : l_i^{\text{set}} \cdot nd_i)_{i=1..n_k} \right]_k \right)$ , максимальний можливісний розподіл  $\mu_{TP_j}^{*s}$  для задоволених обмежень на  $\Psi_{\text{Err}_{TP_j}^{\text{Hrch.}}}$  означимо як:

$$\forall \psi \in \Psi_{\text{Err}_{TP_j}^{\text{Hrch.}}} : \mu_{LP_j}^{*s}(\psi) = \min_{((c_i^s : l_i \cdot nd_i) \in \text{ConstrHrch}_{TP_j}^{\text{Pos.}}) \wedge (\psi \vdash c_i^s)} (1 - nd_i, 1).$$

Відповідно максимальний можливісний розподіл  $\mu_{TP_j}^{*v}$  для порушених обмежень на  $\Psi_{\text{Err}_{TP_j}^{\text{Hrch.}}}$  матиме вигляд:

$$\forall \psi \in \Psi_{\text{Err}_{TP_j}^{\text{Hrch.}}} : \mu_{TP_j}^{*v}(\psi) = \min_{((c_i^v : l_i \cdot nd_i) \in \text{ConstrHrch}_{TP_j}^{\text{Pos.}}) \wedge (\psi \not\vdash c_i^s)} (1 - nd_i, 1).$$

Введені представлення максимального можливісного розподілу для задоволених і порушених обмежень дозволяють оцінювати всі інші розподіли  $\mu$  як  $\mu \leq \mu_{TP_j}^{*s}$  в загальному випадку і  $\mu \leq \mu_{TP_j}^{*s}$ ,  $\mu \leq \mu_{TP_j}^{*v}$  в часткових випадках.

Для можливісної технологічної проблеми з накладеними обмеженнями  $TP_j^{\text{Pos.}}$  можна стверджувати, що  $CD(TP_j^{\text{Pos.}}) = 1 - \text{SND}(\mu_{TP_j}^*) = \max_{\psi \in \Psi_{\text{Err}_{TP_j}^{\text{Hrch.}}}} \mu_{TP_j}^*(\psi)$  та

$$ICD(TP_j^{\text{Pos.}}) = \text{SND}(\mu_{TP_j}^*) = 1 - \max_{\psi \in \Psi_{\text{Err}_{TP_j}^{\text{Hrch.}}}} \mu_{TP_j}^*(\psi).$$

Для всіх  $\psi_1 \in \Psi_{Err_{TP_j}^{Hrch.}}$ , для яких  $\mu(\psi_1) \leq \mu_{TP_j}^*(\psi)$  ступінь субнормалізації

для  $\mu_{TP_j}^*$  означимо як:

$$\mu_{TP_j}^* = \begin{cases} \min_{\mu} [\mu \vDash ConstrHrch_{TP_j}^S] \\ \min_{\mu} [\mu \vDash ConstrHrch_{TP_j}^V] \end{cases},$$

тобто мінімальним можливісним розподілом, що задовольняє відповідні множини обмежень.

Оптимальними присвоєннями для можливісної технологічної проблеми на основі обмежень  $TP_j^{Pos.}$  по задоволених і порушених обмеженнях будемо вважати такі присвоєння  $\psi_1, \psi_2 \in \Psi_{Err_{TP_j}^{Hrch.}}$  для яких  $\mu_{TP_j}^{*s}(\psi_1)$  є максимальним, а  $\mu_{TP_j}^{*v}(\psi_2)$  є мінімальним:

$$\mu_{TP_j}^{*s}(\psi) = \max_{\psi_1 \in \Psi_{Err_{TP_j}^{Hrch.}}} \mu_{TP_j}^{*s}(\psi_1); \quad \mu_{TP_j}^{*v}(\psi) = \min_{\psi_2 \in \Psi_{Err_{TP_j}^{Hrch.}}} \mu_{TP_j}^{*v}(\psi_2).$$

Проблеми знаходження оптимального присвоєння можна звести до вирішення наступних еквівалентних мінімаксних оптимізаційних проблем:

$$\left[ \begin{array}{l} CD\left(Err_{TP_j}^{Hrch.}, Err_{TP_j}^{Domain}, ConstrHrch_{TP_j}^S\right) = \\ \max_{\psi \in \Psi_{Err_{TP_j}^{Hrch.}}} \min_{((c_i; nd_i) \in ConstrHrch_{TP_j}^S) \wedge (\psi \vDash c_i^v)} (1 - nd_i, 1) \\ CD\left(Err_{TP_j}^{Hrch.}, Err_{TP_j}^{Domain}, ConstrHrch_{TP_j}^V\right) = \\ \max_{\psi \in \Psi_{Err_{TP_j}^{Hrch.}}} \min_{((c_i; nd_i) \in ConstrHrch_{TP_j}^V) \wedge (\psi \vDash c_i^v)} (1 - nd_i, 1) \\ ICD\left(Err_{TP_j}^{Hrch.}, Err_{TP_j}^{Domain}, ConstrHrch_{TP_j}^S\right) = \\ \min_{\psi \in \Psi_{Err_{TP_j}^{Hrch.}}} \max_{((c_i; nd_i) \in ConstrHrch_{TP_j}^S) \wedge (\psi \vDash c_i^s)} (nd_i, 0) \\ ICD\left(Err_{TP_j}^{Hrch.}, Err_{TP_j}^{Domain}, ConstrHrch_{TP_j}^V\right) = \\ \min_{\psi \in \Psi_{Err_{TP_j}^{Hrch.}}} \max_{((c_i; nd_i) \in ConstrHrch_{TP_j}^V) \wedge (\psi \vDash c_i^v)} (nd_i, 0) \end{array} \right.$$

В отриманій формулі важливим є саме випадок ієрархії порушених обмежень:  $\forall c_i \mid nd_i < bound_V^{nd}, c_i \notin ConstrHrch_{TP_j}^V$ , що означає, що всі обмеження

із значенням мітки меншим заданого граничного не будуть інтерпретуватись і відповідно не будуть впливати на ступінь можливості та вибір оптимального присвоєння.

Технологічною проблемою на основі нечітких обмежень  $TP_j^{fuzzy}$  будемо вважати формальну структуру, що складається з множини нечітких (лінгвістичних) обмежень  $ConstrSet^{fuzzy} = \{c_1^{lv}, \dots, c_m^{lv}\}$ , які обмежують значення змінних з множини  $Err_{TP_j^{fuzzy}}^{Hrch}$ , кожна з яких змінюється на скінченному домені  $Err_{TP_j^{fuzzy}}^{Domain}$ .

Розглянемо технологічну проблему на основі нечітких обмежень  $TP_j^{fuzzy}$  та відповідне деяке повне присвоєння  $\psi^{fuzzy} : (e_1^d, e_2^d, \dots, e_n^d)$  в  $TP_j^{fuzzy}$ . Степінь задоволення присвоєння кортежу  $(e_1^d, e_2^d, \dots, e_n^d)$  в  $TP_j^{fuzzy}$  будемо задавати через відповідну функцію належності  $SD(\psi^{fuzzy}) = mf_{\square ConstrHrch_{TP_j^{fuzzy}}}^{fuzzy}(e_1^d, e_2^d, \dots, e_n^d)$ .

Ступінь задоволення кортежу  $(e_1^d, e_2^d, \dots, e_n^d)$  будемо розглядати як ступінь їх належності доменам:

$$\left[ Err_{TP_j^{fuzzy}}^{Domain} \right]^1 \times \left[ Err_{TP_j^{fuzzy}}^{Domain} \right]^2 \times \dots \times \left[ Err_{TP_j^{fuzzy}}^{Domain} \right]^n.$$

Такий підхід дозволяє виділяти можливі рішення як спосіб введення відношення повного порядку на множині присвоєнь  $\Psi_{Err_{TP_j^{fuzzy}}^{Hrch}}$ .

Ступінь задоволення кортежу  $(e_1^d, e_2^d, \dots, e_n^d)$  в задачі  $TP_j^{fuzzy}$  будемо розглядати рівним ступеню задоволення обмеження, що найменше задовольняється кортежем  $(e_1^d, e_2^d, \dots, e_n^d)$ :

$$SD_{TP_j^{fuzzy}}(e_1^d, e_2^d, \dots, e_n^d) = SD(c_i^s) | (e_1^d, e_2^d, \dots, e_n^d) \Big|_{\min} c_i^s, c_i^s \in ConstrHrch_{TP_j^{fuzzy}}^{fuzzy}.$$

Розв'язком технологічної проблеми з нечіткими обмеженнями  $TP_j^{fuzzy}$  будемо вважати присвоєння змінних з максимальним ступенем задоволення:

$$\max_{(e_1^d, \dots, e_n^d) \in [Err_{TP_j^{fuzzy}}^{Domain}]^1 \times \dots \times [Err_{TP_j^{fuzzy}}^{Domain}]^n} mf_{\square ConstrHrch_{TP_j^{fuzzy}}^{fuzzy}}(e_1^d, \dots, e_n^d).$$



Ступінь послідовності для технологічної проблеми на основі нечітких обмежень  $CD(TP_j^{fuzzy})$  розглядатимемо наступним чином:

$$CD(TP_j^{fuzzy}) = \max_{(e_1^d, \dots, e_n^d) \in [Err_{TP_j^{fuzzy}}^{Domain}]^1 \times \dots \times [Err_{TP_j^{fuzzy}}^{Domain}]^n} mf_{\odot ConstrHrch_{LP_j}^{fuzzy}}(e_1^d, \dots, e_n^d).$$

Таким чином, у випадку технологічних проблем на основі нечітких обмежень, ступінь послідовності дорівнюватиме ступеню задоволення рішення:

$$CD(TP_j^{fuzzy}) = (e_1^d, \dots, e_n^d) \models Sol(TP_j^{fuzzy})_{\odot ConstrHrch_{TP_j}^{fuzzy}}.$$

Перевага використання операції проєкції  $\odot ConstrHrch_{LP_j}^{fuzzy}$  полягає в тому, що виконуючи контроль обчислювальної степені послідовності можна побудувати розширення деякого початкового присвоєння до рівня повного присвоєння яке задовольняє введену ієрархію нечітких обмежень:

$$\psi^{init.} \xrightarrow{\#CD} \psi^{full} \models ConstrHrch_{TP_j}^{fuzzy}.$$

Основна задача полягатиме, відповідно, в пошуку присвоєння з максимальним ступенем преференції для найменш задоволеного обмеження:

$$\exists \psi \in \Psi_{Err_{TP_j^{fuzzy}}^{Hrch}}, \max_{k=1..k_{max}} \left[ \max_{i_1=1..n_{k_1}} pfc_{i_1} \mid \left[ \min_{i_2=1..n_{k_2}} SD(c_{i_2} \in ConstrHrch_{TP_j}^{fuzzy}) \right]_{i_2} \right]_k.$$

Відповідно, задача розрізнення рішень та пошуку оптимального ускладнюється тим, що всі присвоєння які задовольняють технологічні проблеми з однаковим ступенем, з точки зору обчислення преференцій таких присвоєнь, не можуть бути прив'язані до показника кількості обмежень:

$$\begin{aligned} \forall c_i, nd_i < ICD(TP_j^{fuzzy}) \not\models Range(Solve^{set}); \\ \max[nd_i, c_i : l_i^{set} \cdot nd_i] \Rightarrow Range(Solve^{set}); \\ SD_{Sol_i}(TP_j^{fuzzy})_{i=1..i_{sol}} \not\models \#ConstrSyst_{TP_j^{fuzzy}.TPS_k^{fuzzy}}. \end{aligned}$$

Як простір технологічної проблеми на основі обмежень розглядається частково впорядкована множина  $(STP, \leq)$ , де  $STP$  – множина технологічних проблем з обмеженнями,  $\leq$  – відношення порядку.

Нехай  $TP_1$  і  $TP_2$  – технологічні проблеми, тоді матиме місце  $Sol^{set}(TP_1) \supseteq Sol^{set}(TP_2) \nmid TP_1 \leq TP_2$ . Якщо множини рішень не співпадають  $Sol^{set}(TP_1) \neq Sol^{set}(TP_2)$ , то у випадку  $TP_1 \leq TP_2$ , технологічну проблему  $TP_1$  будемо вважати слабшою за  $TP_2$ . Опишемо процес побудови рішень. Нехай технологічна проблема  $TP_j$  описується наступною ієрархією обмежень (і відповідно системами та множинами обмежень, що знаходяться на відповідних рівнях ієрархії):

$$TP_j \rightarrow ConstrHrch_{TP_j}^R = \bigcup_{k=1..k_{max}} ConstrSyst_{TP_j, TPS_k}^R = \bigcup_{k=1..k_{max}} \underbrace{(c_1^r : l_1^{set^r}, \dots, c_{n_k}^r : l_{n_k}^{set^r})}_{n_k=1..n_{k_{max}}}$$

Розкладемо початкову ієрархію на дві субієрархії – для обмежень, що очікувано задовольняються та очікувано порушуються при деякому рішенні, яке вважатимемо ідеальним  $Sol^{ideal}(TP_j)$ :

$$ConstrHrch_{TP_j}^R = ConstrHrch_{TP_j}^S \cup_{\oplus TP_j} ConstrHrch_{TP_j}^V$$

Відповідно дані субієрархії представлятимуться:

$$ConstrHrch_{TP_j}^S = \bigcup_{k=1..k_{max}} \underbrace{(c_1^s : l_1^{set^s}, \dots, c_{n_k^s}^s : l_{n_k^s}^{set^s})}_{n_k^s=1..n_{k_{max}}^s}$$

$$ConstrHrch_{TP_j}^V = \bigcup_{k=1..k_{max}} \underbrace{(c_1^v : l_1^{set^v}, \dots, c_{n_k^v}^v : l_{n_k^v}^{set^v})}_{n_k^v=1..n_{k_{max}}^v}$$

Після побудови фактичного рішення  $Sol(TP_j)$  (і введення його в ЛППРО) отримаємо фактичні ієрархії порушених і задоволених обмежень:

$$ConstrHrch_{TP_j}^S \subseteq ConstrHrch_{TP_j}^S, ConstrHrch_{TP_j}^V \subseteq ConstrHrch_{TP_j}^V$$

Відповідно

$$ConstrHrch_{TP_j}^S = \bigcup_{k=1..k_{max}} \underbrace{(c_1^s : l_1^{set^s}, \dots, c_{n_k^s}^s : l_{n_k^s}^{set^s})}_{n_k^s=1..n_{k_{max}}^s};$$

$$ConstrHrch_{TP_j}^V = \bigcup_{k=1..k_{max}} \underbrace{(c_1^v : l_1^{set^v}, \dots, c_{n_k^v}^v : l_{n_k^v}^{set^v})}_{n_k^v=1..n_{k_{max}}^v}$$

З усієї множини міток  $l_i^{set}$  виведемо деяку універсальну мітку яку будемо вважати вагою обмеження ( $cw$ ) і вимірювати її значеннями діапазону  $[0..1]$ .

Таким чином, побудова оцінок для систем обмежень  $(c_1^s : l_1^{set^s}, \dots, c_{n_k^s}^s : l_{n_k^s}^{set^s})$  і

$(c_1^v : l_1^{set^v}, \dots, c_{n_k^v}^v : l_{n_k^v}^{set^v})$  зводиться до сумаризації вагових коефіцієнтів

обмежень з відповідних систем на відповідних станах технологічної проблеми.

Виходитимемо з того, що системи (множини) обмежень на відповідних рівнях

фактичного рішення  $Sol(TP_j)$  є повними або частковими переборами

відповідних систем (множин) обмежень для ідеального очікуваного рішення

$Sol^{ideal}(TP_j)$ . Таким чином, можемо отримати наступні види оцінок:

1. Сумарна вагова оцінка по задоволених обмеженнях для проблеми

$TP_j$ :

$$satisfied(TP_j) = \sum_{k=1}^{k_{max}} \sum_{m_1=1}^{n_k^s} (c_{m_1}^s : cw_{m_1}^s);$$

2. Сумарна вагова оцінка по порушених обмеженнях для проблеми  $TP_j$ :

$$violated(TP_j) = \sum_{k=1}^{k_{max}} \sum_{m_2=1}^{n_k^v} (c_{m_2}^v : cw_{m_2}^v);$$

3. Різниця по задоволених обмеженнях по відношенню до ідеального рішення:

$$dist(Sol^{ideal}(TP_j), Sol(TP_j))^{Sat.} = \sum_{k=1}^{k_{max}} \sum_{m_1=1}^{n_k^s} (c_{m_1}^s : cw_{m_1}^s) - \sum_{k=1}^{k_{max}} \sum_{m_1=1}^{n_k^s} (c_{m_1}^s : cw_{m_1}^s);$$

4. Різниця по порушених обмеженнях по відношенню до ідеального рішення:

$$dist(Sol^{ideal}(TP_j), Sol(TP_j))^{Viol.} = \sum_{k=1}^{k_{max}} \sum_{m_2=1}^{n_k^v} (c_{m_2}^v : cw_{m_2}^v) - \sum_{k=1}^{k_{max}} \sum_{m_2=1}^{n_k^v} (c_{m_2}^v : cw_{m_2}^v)$$

Таким чином, введені способи ранжування рішень технологічних проблем базуються на ступені преференції найбільш важливого порушеного

■ обмеження, а відповідно, обмеження з ступенем преференції нижчим за ступінь непослідовності не враховуються.

### **Висновки до третього розділу**

1. Представлено формальний опис функціональності системи інтелектуальної підтримки прийняття рішень на основі обмежень, що дозволяє використовувати її як середовище підтримки прийняття технологічних рішень в умовах невизначеності при вирішенні оператором технологічних проблем у процесі буріння НГС на основі інтелектуальних засобів виявлення і класифікації помилок та генерації зворотного зв'язку.

2. Запропоновано формально-логічний підхід до моделювання технологічного процесу буріння НГС на основі контролю множини помилок. Відповідно коректні рішення розглядаються як такі, що не порушують обмежень в накладеній на домен ієрархії обмежень. При рішенні технологічної проблеми об'єкт прийняття рішень переміщується по певній послідовності станів із множини можливих і в кожен момент часу знаходиться в певному виділеному стані, що є підмножиною однієї з технологічних проблем, які виникають у процесі буріння НГС. Технологічно повідомлення зворотного зв'язку прикріплюється безпосередньо до обмежень на рівні множини, системи або ієрархії.

3. Представлена модель структури та функціональності технологічних проблем на основі обмежень, що зводиться до сукупності правил виду: якщо умова релевантності з коефіцієнтом впевненості тоді умова задоволення з коефіцієнтом впевненості. Такий підхід дозволяє представляти процес прийняття технологічних рішень як послідовність кроків із виділенням шаблонів умов релевантності і шаблонів умов задоволення, зіставлення шаблонів умов релевантності і шаблонів умов задоволення; зіставлення шаблонів релевантності із відповідним станом проблеми; перевірка умови задоволення релевантних обмежень; перевірка задоволеності

порушення) обмеження, шляхом зіставлення шаблону його умови задоволення стану проблеми.

4. Представлені методи контролю процесу рішення технологічних проблем в системі інтелектуальної підтримки прийняття рішень на основі обмежень дозволяють класифікувати та аналізувати помилки і забезпечувати роботу механізму зіставлення поточного технологічного рішення з складеними в системі ієрархіями обмежень, що також забезпечує процес формування зворотного зв'язку. Ефективність процесу прийняття рішення при виникненні нештатної ситуації в процесі буріння НГС оцінюється шляхом вказання місця виникнення технологічної помилки, виконання її ідентифікації та класифікації, співвіднесення помилки до певної ієрархії, виділення її складових та можливих рівнів релевантності.

## РОЗДІЛ 4

# РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ДЛЯ ЗАПОБІГАННЯ НЕШТАТНИХ СИТУАЦІЙ У ПРОЦЕСІ БУРІННЯ НАФТОВИХ І ГАЗОВИХ СВЕРДЛОВИН

### 4.1. Оцінка реалізації моделі об'єкта підтримки прийняття рішень в інтелектуальній системі

Основне завдання інтелектуальної системи полягає у вивченні технологічного процесу буріння та нештатних ситуацій, які виникають в даному процесі. Згідно класичної архітектури [120,123,125,126] інтелектуальна система повинна складатися з інтерфейсу, інтелектуального модуля, який визначає часові характеристики та наповнення коректуючих дій, а також блоку моделювання об'єкта ППР, який аналізує пропонувані рішення. Система містить теоретичні розділи, а також множину проблем та ідеальних рішень для них. Основне завдання яке вирішується на кожному з етапів роботи системи полягає в перевірці коректності рішення запропонованого об'єктом ППР: для цього система використовує доменні знання представлені в формі обмежень. На початку роботи система вибирає певну технологічну проблему з якою буде працювати об'єкт. Після того як об'єкт ППР відправляє рішення, інтелектуальний модуль перенаправляє її в блок моделювання об'єкта, який аналізує дане рішення, ідентифікує помилки і відповідно оновлює модель об'єкта ППР. На основі цієї моделі інтелектуальний модуль генерує відповідну дію (зворотній зв'язок). Після того, як поточна проблема є вирішеною або об'єкт ППР задає запит на нову проблему, інтелектуальний модуль вибирає відповідну проблему на основі поточного профілю з моделі об'єкта ППР [131].

Основні вимоги до реалізації інтерфейсу СІППРО це робастність, гнучкість і простота використання. Важливим фактом є те, що дослідження впроваджених інтелектуальних систем на основі обмежень показують, що

об'єкти ППР легко засвоюють матеріали стосовно ТП, технологічних операцій, що базується на основі зворотного зв'язку та контролю системи в формі обмежень. Об'єкти ППР мають кілька варіантів вибору технологічних проблем в СІППРО. Зокрема, вони можуть вибирати проблеми по наростаючій складності, натискаючи кнопку наступна проблема. Інша опція – це вибір проблеми системою. Такий вибір здійснюється на основі поточного профілю об'єкта в його моделі. Третім способом є задання незалежної стратегії вибору проблем, що базується на певних математичних моделях, наприклад – мережі Байеса [122]. Інтерфейс системи повинен відображати такі основні елементи – текст проблеми, структуру запиту, пояснення поточних концептів предметної області. Технологічні проблеми є релевантними до множини обмежень в приблизно рівних пропорціях. Хоча існує множина обмежень, яка релевантна до всіх проблем, а також деяка множина обмежень нерелевантних до жодної проблеми. Перед початком рішення всіх проблем система може видавати короткий тьюторинг щодо наявного функціоналу, а також по окремих розділах теорії в яких описується технологічна проблема. Розглядатимемо базу знань технологічного процесу СІППРО у вигляді деякої множини технологічних проблем  $TP_{set} = \{TP_i\}, i = 1...n_1$ , де кожна проблема  $TP_i$  має  $j$ - станів (рис. 4.1).

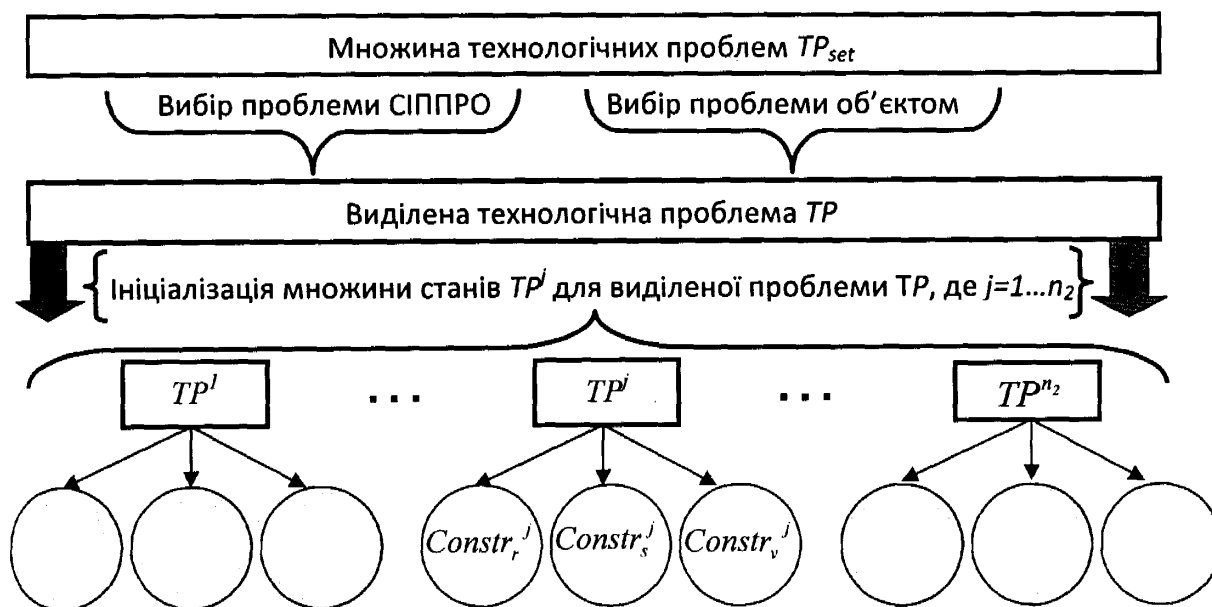


Рис. 4.1. Модель основних елементів архітектури СІППРО на основі підходу задоволення обмежень

Обмеженням для стану  $j$  проблеми  $TP_i$ ,  $TP_i^j$  будемо вважати впорядкований триплет  $[Constr_r^j, Constr_s^j, Constr_v^j]$ , де  $Constr_r^j$  є релевантним обмеженням із множини накладених обмежень  $Constr_{set}^{TP_i^j}$  на поточний стан проблеми,  $Constr_{set}^{TP_i^j} = \{Constr_k^{\{TP_i^j\}}\}$ ,  $k = 1 \dots n_{constr}$ , де  $n_{constr}$  - кількість накладених обмежень на множину рішень технологічних проблем  $Solution_{set}^{TP_{set}^j}$ ,  $Constr_s^j$  є обмеженням, що задовольняється і  $Constr_v^j$  - є обмеженням, що було порушене в поточній сесії [132,133].

Виконаємо представлення знань нафтогазової предметної області як множини обмежень стану проблеми  $Constr_{set}^{TP_i^j}$ , тобто обмежень, що інтерпретують множину еквівалентних станів проблеми  $[TP_i]_{set}^E$ , де  $E \leq J$ . Кожен з одержаних класів еквівалентності  $Class^{TP_{set}^E}$  ініціює в системі запуск однакових дій зворотного зв'язку  $\{f_i\}_{i=1 \dots 9}$ , де кожне з  $f_i$  прийматиме одне із значень: 1. індикація вірності чи невірності рішення, 2. повідомлення про помилку, 3. підказка, 4. детальна підказка, 5. вивід всіх помилок, 6. виведення рішення, 7. показ порушених обмежень, 8. показ задоволених обмежень, 9. показ релевантних обмежень. Тобто стани проблеми в класі еквівалентності є еквівалентними  $TP_i^{j_1} \equiv TP_i^{j_2}$ , де  $TP_i^{j_1}, TP_i^{j_2} \in Class^{[TP_i]_{set}^E}$  [134].

Відповідно  $Constr_r^j$  використовується для ідентифікації класу еквівалентності  $Class^E$  або класу станів проблеми  $ClassR^{\{TP_i^j\}}$  в якому обмеження  $Constr_r^j$  є релевантним (тобто має безпосереднє відношення до послідовності побудови коректних рішень,  $\{Solution_{set}^{Correct}\}_l \subset Solution_{set}^{TP_{set}^j}$ ), для  $l = 1 \dots n_3$ , і для деякого значення  $l$  існує співпадання  $\{Solution_{set}^{Correct}\}_l = \left[ Solution_{set}^{TP_i^j} \right]_{IDEAL}$  коректного рішення з ідеальним (оптимальним).  $Constr_s^j$  ідентифікує клас релевантних станів  $ClassS^{\{TP_i^j\}}$  в



якому  $Constr_s^j$  задовольняється, а  $Constr_v^j$  ідентифікує клас релевантних станів  $ClassV^{\{TP_i^j\}}$  в якому  $Constr_v^j$  порушується. Оскільки теоретичний принцип, що базується на теорії представлення та задоволення обмежень стверджує, що кожне релевантне обмеження повинне задовольнятися або порушуватися, то на множинному рівні матимемо  $ClassR^{\{TP_i^j\}} = ClassS^{\{TP_i^j\}} \cup ClassV^{\{TP_i^j\}}$ . З другого боку, для поточного стану проблеми  $TP_i^j$  існує деяка множина не релевантних обмежень (тобто таких, що не мають безпосереднього синтаксичного та семантичного відношення до поточного рішення проблеми), які утворюватимуть клас еквівалентності  $Class\bar{R}^{\{TP_i^j\}}$  в якому обмеження  $Constr_r^j$  є не релевантними [135, 136].

Кожне обмеження специфікує властивість нафтогазової предметної області яка повинна задовольнятися всіма коректними рішеннями  $Solution_{set}^{Correct}$ . Якщо  $Constr_r^j$  задовольняється в певному стані проблеми  $TP_i^j$ , то для того щоб даний стан проблеми був коректно-релевантним, він повинен також задовольняти  $Constr_s^j$  (тобто пропонувані об'єктом ППР рішення  $StudentSubmit^{TP_i^j} \subset Solution_{set}$  включають розгляд стану  $TP_i^j$ ).

Досягнення ефективності інтелектуальної системи та імплементація її інтелектуальності не можлива без адаптивного контролю поточного та патентного рівня знань об'єктів ППР і корекції дій системи в залежності від здібностей та потреб конкретного об'єкта. СППРО складається з статичних компонент: бази знань технологічних проблем, бази знань рішень і бази знань обмежень  $DSS^{st.} = [DB_{set}^{Probl.}, DB_{set}^{Sol.}, DB_{set}^{Constr.}]$  та динамічних: множина моделей об'єкта, що ініціалізує вибір коректуючого впливу  $DSS^{dyn.} = [OM_{set} \xrightarrow{CBM} CA_{set} = \{f_i\}_{i=1..9}]$  (рис.4.2). Процес вибору є визначальним в роботі системи та є складовою процесу моделювання на основі обмежень (CBM, Constraint-based modeling).

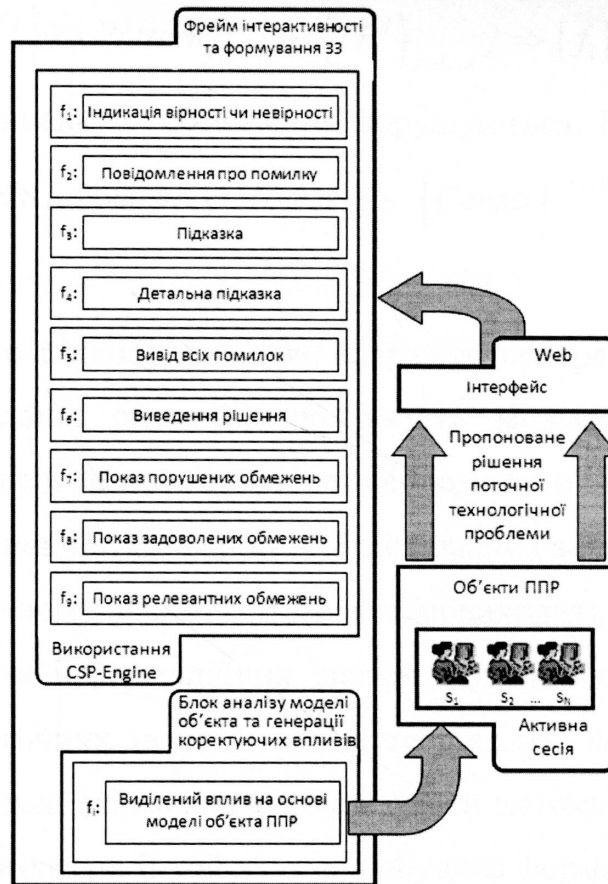


Рис. 4.2. Структура зворотного зв'язку СІППР на основі обмежень

Додатковою перевагою підходу *СВМ* є обчислювальна простота. Тобто можна не використовувати комплексні механізми логічного висновку оскільки моделювання об'єкта ППР можна звести до контролю відповідності шаблону. Виділені нами параметри  $Constr_r, Constr_s, Constr_v$  є комбінацією паттернів (шаблонів) і таким чином, можуть бути представлені в легко компільованій формі. На першому кроці всі релевантні до проблеми  $TP_i$  паттерни співставляються з станами проблеми:  $Pattern_{TP_i}^R \rightarrow \{TP_i^j\}_{j=1\dots J}$ , де  $J$  - кількість станів проблеми. На другому кроці компоненти контролю задоволеності для обмежень, що відповідають певному стану проблеми з першого кроку, тобто релевантні обмеження також співставляються  $\{ConstrR^{[TP_i^j]}\} \leftrightarrow Pattern_{TP_i}^R \leftrightarrow \{TP_i^j\}_{j=1\dots J}$ . Якщо шаблон задоволення відповідає стану проблеми тоді обмеження задовольняються і СІППРО не виконує кодних дій (коректуючих впливів  $f_i|_{i=0}$ ).

$$[\{ConstrS^{[TP^j]}\} \leftrightarrow Pattern_{[TP^j]}^S \leftrightarrow \{TP_i^j\}_{j=1...J}] \Rightarrow \{f_i\}_{i=0...9}$$

В протилежному випадку – обмеження порушуються. Модель об'єкта ППР складатиметься з усіх порушених обмежень  $\{ConstrV^{[TP^j]}\}$ , де  $i=1...I$ ,  $j=1...J$ .

Використання такого підходу дозволяє одержати програмну реалізацію веб-базованої інтелектуальної системи, що робить можливим створення середовища проблемно-орієнтованого аналізу технологічного процесу буріння.

Якщо виходити з основного завдання – моделювання знань об'єкта ППР в найбільш повному та точному обсязі, то така задача виходить за рамки теорії розробки комп'ютерних та інформаційних систем і повинна базуватися на фундаментальних математичних та когнітивних теоріях. В нашому випадку інтерес представляють моделі які можна формалізувати математичною мовою, оскільки їх легко запрограмувати. В той же час, побудова формальних моделей є перспективними темами незалежних досліджень в області прикладної математики. Виділяється значна ефективність неповних та неточних моделей об'єкта ППР з точки зору практичного застосування для інтелектуалізації систем. Така ідея спирається на величезний емпіричний досвід фахівців технологічного процесу, який говорить про те, що людина-фахівець в своїй діяльності часто спирається на неповні моделі і в той же час є ефективним керівником, що виконує поставлені цілі технологічного процесу. Цікавою є також думка про те, що найбільш ефективним способом зворотного зв'язку (*FeedBacks*) із об'єктом ППР є вказання інформативних повідомлень про помилки допущені при роботі із поточною проблемою. В той же час, виведення системою більш глибоких причин виникнення певних помилок які допустив об'єкт, базуючись на вказанні хибних концепцій в його розумінні матеріалу про технологічний процес, призводить до зниження його самооцінки та мотивації. Таким чином, основним завданням дослідження в області побудови адекватних моделей об'єктів ППР є зниження обчислювальної складності задачі. Одним з ефективних підходів даного напрямку є підхід на

основі обмежень [107, 124]. Підхід *CBM* (*Constraints Based Modelling*) базується на теоретичній концепції представлення та задоволення обмежень та теорії Олсона [124], як моделювання об'єкта на основі помилок виконання. В підході *CBM* як центральний елемент виділяє хибні знання об'єкта ППР. Проте, іншим аксіоматичним припущенням підходу є те, що виділених хибних знань є недостатньо для опису множини коректних знань, тобто ідеальна сумарна модель знань об'єкта не дорівнює формулі – хибні знання + коректні знання:

$$ObjectModel^{Sum} \neq InCorrectKnowledges + CorrectKnowledges .$$

Базовим припущенням є також те, що діагностична інформація не закладена в послідовності дій об'єкта ППР, а закладена в певній ситуації предметної області (наприклад, технологічна проблема  $TP^i$ , та її стан  $TPS^j$ ). Основне підтвердження даного факту полягає в тому, що не існує коректного рішення проблеми, що виходить за простір описаних станів проблеми  $Score^{\{TPS^j\}}$ , що порушує фундаментальні ідеї та концепції предметної області  $SubjectDomain = \{Conceptions_i\}$ . Таким чином, модель об'єкта ППР не представляє безпосередньо його дії, а в більшій мірі описує ефекти виконаних дій:

$$ObjectModel^{Sum} \neq \{ObjectActions_i\} \approx \{Actions Implications_i\} .$$

Даний підхід представляє знання предметної області як множину обмежень стану проблеми, тобто обмеження означають множину еквівалентних станів проблеми. Клас еквівалентності ініціює в системі запуск однакових дій, тобто стани проблеми в класі еквівалентності є еквівалентні. Зсі коректні рішення проблеми не порушують жодне з обмежень. Порушене обмеження сигналізує наявність помилки, яка відповідно є наслідком неповних і некоректних знань.

Згідно ідеї Олсона [124] модель об'єкта ППР розглядається як купність порушеним ним обмежень. Введемо інтерпретацію даного підходу на основі аналізу структури та функціонування СІППРО. Нехай під час сесії з

системою працює група з  $N$  об'єктів:  $S_1, S_2, \dots, S_N$  в якій зареєстровано  $L$ -технологічних процесів.  $\{TP_{r_l}\}_{l=1 \dots L}$  (рис.4.3).

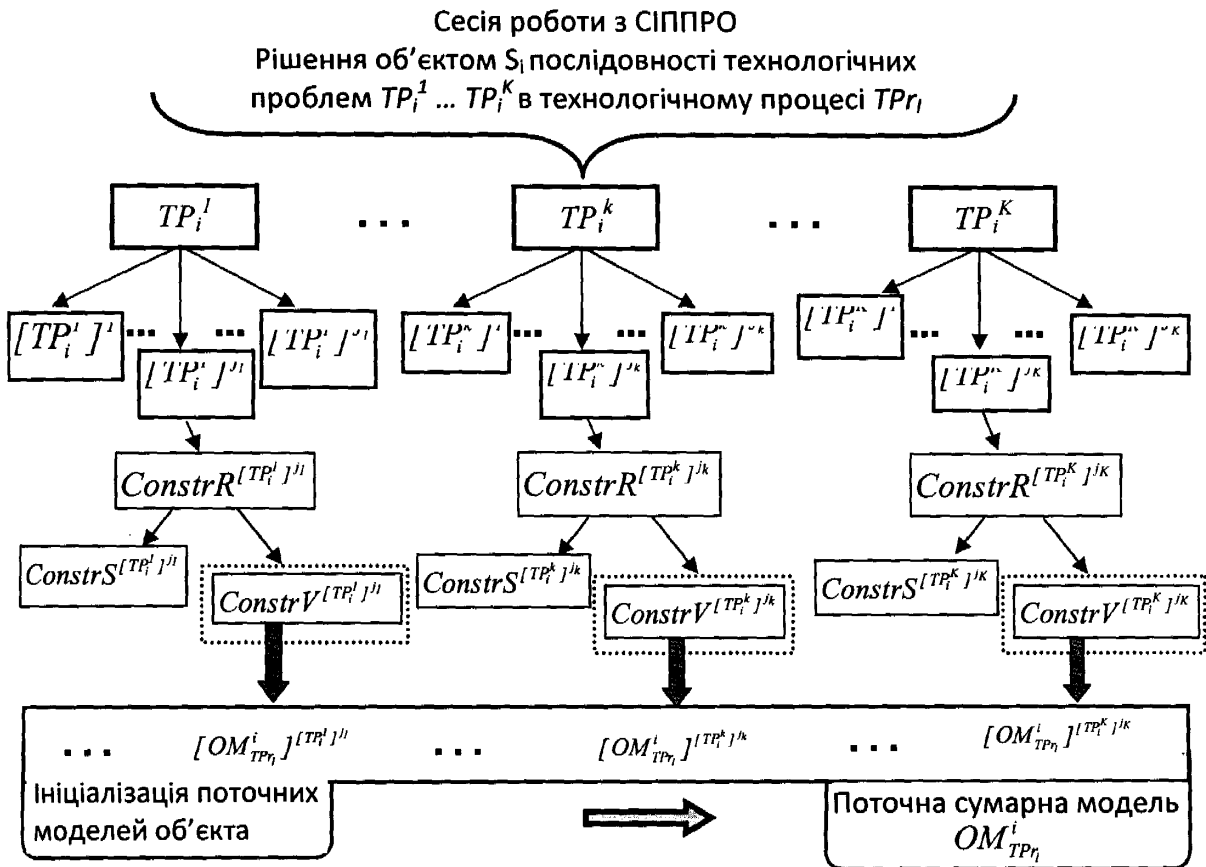


Рис. 4.3. Структурно-алгоритмічна схема формування поточної сумарної моделі об'єкта ППР

Нехай  $i$ -й об'єкт ППР під час сеансу роботи із СІППРО працює з технологічним процесом  $TP_{r_i}$  і вирішує в даному процесі послідовність технологічних проблем  $[TP_{TP_{r_i}}^1]_i, [TP_{TP_{r_i}}^2]_i, \dots, [TP_{TP_{r_i}}^K]_i$ , де  $[TP_{TP_{r_i}}^h]_i \subset TP_{TP_{r_i}}^{set}$ , де  $TP_{TP_{r_i}}^{set}$  - визначена множина технологічних проблем для технологічного процесу  $TP_{r_i}$ . В свою чергу, згідно початкової ідеї технологічна проблема  $TP_i^h$  розпадається на  $j$ - станів. При вирішенні  $j$ - стану технологічної проблеми  $[TP_{TP_{r_i}}^h]_i^j$  система вибирає певну множину релевантних обмежень  $ConstrR^{[TP_i^h]^j} \subset Constr_{set}^{TP_{set}}$ , де  $Constr_{set}^{TP_{set}}$  - загальна множина обмежень накладених на множину технологічних проблем  $TP_{set} = \{TP_i\}, i = 1 \dots n_i$ .

Оскільки кожне релевантне обмеження повинно задовольнятися або порушуватися, то для  $j$ - стану технологічної проблеми  $[TP_i^h]^j$  матимемо співвідношення  $ConstrR^{[TP_i^h]^j} = ConstrS^{[TP_i^h]^j} \cup ConstrV^{[TP_i^h]^j}$ . Тоді деяке виділене обмеження  $c \in ConstrR^{[TP_i^h]^j}$  прийматиме значення з двохелементної множини  $\{c^{satisf.}, c^{viol.}\}$ , де  $c^{satisf.} \in ConstrS^{[TP_i^h]^j}$ ,  $c^{viol.} \in ConstrV^{[TP_i^h]^j}$ .

Моделювання об'єкта ППР [137] інтерпретується як процес збору релевантної інформації для ідентифікації та представлення рівня знань об'єкта. В ідеальному випадку модель об'єкта ППР повинна відображати його знання та стратегії вивчення ТП, що найбільш підходять його індивідуальному профілю, інтересам, мотивації до прийняття рішення:

$$ObjectModel^{ideal} \cong ObjectKnowledges_{set} \cup \{TrainingStrategies_i\} \Big|_{ObjectProfile^{Active}}$$

На основі таких параметрів, система може вибирати оптимальну стратегію подання технологічного матеріалу (контенту) з використанням переваг та адекватного ступеня концентрації ресурсів в кожній сесії роботи з системою:

$$Session^j = \sum_i \{TrainingContent\}_i \Big|_{TrainingPreferences_{i_2}}$$

Задача побудови моделі об'єкта *ObjectModel* є складною і трудомісткою задачею у зв'язку з великою кількістю складових. Деякі дослідники [138] відзначають наявність елементів в емпіричній моделі об'єкта ППР які важко формалізуються математичними засобами. Зокрема, рекомендується одержувати інформацію необхідну для побудови моделі об'єкта в процесі інтерактивного діалогу, наприклад при першій сесії в процесі залогінення. Деякі дослідники [120-122] рекомендують виведення таких знань в системі на основі неявних ознак та запитань і одержання неявної моделі. Складним питанням є також питання верифікації одержаної моделі, перевірки її на несуперечливість. Важливим є також введення чіткого ранжування елементів та складових одержаної моделі по критерію їх практичної значимості.

Основна ідея яка лежить в необхідності побудови та підтримки моделі

Об'єкта ППР полягає в генерації системою коректуючих впливів на основі активних профілів одержаних з релевантних моделей:

$$ObjectModel_i^{relv.} \Rightarrow \{ActiveObjectProfile_{i_2}\} \Rightarrow \{CorrectiveActions_{i_3}\}.$$

При реєстрації нового об'єкта  $S_i$  в системі, блок моделювання об'єкта ППР присвоює йому деяку шаблонну прототипну модель, яка відповідає базовому рівню засвоєння попереднього технологічного матеріалу, що є необхідним для розуміння та успішного засвоєння матеріалів поточного технологічного процесу  $TPr_l$ ,  $l=1...L$ , де  $L$  - кількість технологічних процесів зареєстрованих та внесених в базу знань інтелектуальної системи. Таку початкову модель об'єкта можна розглядати як деяку ідеальну модель стосовно технологічного процесу  $TPr_l$ . Позначатимемо її як  $OM_{TPr_l}^{IDEAL}$ . Оскільки під час інтерактивного вивчення поточного технологічного процесу  $i$ -й об'єкт буде вирішувати деяку скінчену послідовність технологічних проблем  $TPr_l \rightarrow TP_i^1, TP_i^2 \dots TP_i^k$ , то доцільним є формування підсумкової моделі  $i$ -го об'єкта ППР як сукупності моделей по визначених вимірах: по технологічних процесах, по проблемах, що вирішуються в кожному технологічному процесі та по станах проблем із послідовності технологічних проблем виділеного процесу. Тобто, ми матимемо складену підсумкову модель  $i$ -го об'єкта  $OM_i^{sum}$  для технологічного процесу  $TPr_l - OM_{TPr_l}^i$  яка буде містити складові, що відповідають частковим моделям утвореним на основі досвіду об'єкта ППР, щодо вирішення списку поточних технологічних проблем  $[OM_{TPr_l}^i]^{TP_l}$ . В свою чергу кожна з таких складових міститиме підмоделі утворені на основі аналізу порушених обмежень при задоволенні виділених станів проблеми  $[OM_{TPr_l}^i]^{TP_l^j}$ . Кінцевий результат можна представити формулою:

$$OM_i^{sum} = \{OM_{TPr_l}^i\}_{l=1...L} = \left\{ \left\{ [OM_{TPr_l}^i]^{TP_k} \right\}_{k=1...K} \right\}_{l=1...L} = \left\{ \left\{ \left\{ [OM_{TPr_l}^i]^{TP_k^j} \right\}_{j=1...J} \right\}_{k=1...K} \right\}_{l=1...L},$$

де  $OM_i^{sum}$  - кінцева підсумкова модель  $i$ -го об'єкта ППР після успішного проходження послідовності технологічних процесів  $L$ ;

$OM_{TPr_i}^i$  - модель  $i$ -го об'єкта, одержана в результаті фіксації порушених обмежень при проходженні технологічного процесу  $l$ ;

$[OM_{TPr_i}^i]^{TP_k}$  - модель  $i$ -го об'єкта, одержана в результаті фіксації порушених обмежень при проходженні технологічного процесу  $TPr_i$ , шляхом вирішення технологічної проблеми  $TP_k$ ;

$[OM_{TPr_i}^i]^{TP_k^j}$  модель  $i$ -го об'єкта, одержана в результаті фіксації порушених обмежень при проходженні технологічного процесу  $TPr_i$ , шляхом вирішення  $j$ -стану технологічної проблеми  $TP_k$ .

Додатковою перевагою підходу *СВМ* є можливість уникнення деталізованого вивчення та класифікації помилок об'єктів ППР. Об'єкти ППР схильні до систематичного використання деякої єдиної процедури для вирішення поточних задач. Кожен об'єкт  $S_i$  застосовує одну з класу процедур, які можуть бути використані для певного класу задач і стратегії вибору процедур з відповідного класу еквівалентності та залежить від поточної задачі. Таким чином, об'єкт ППР може знати декілька процедур для вирішення поточної проблеми. Проте для системи, стратегія поведінки та мислення об'єкта немає особливого значення, оскільки ефективність стратегії вибраної об'єктом оцінюється системою з точки зору порушених обмежень на основі його підсумкової моделі.

#### **4.1.1. Аналіз формальних методів вирішення технологічних проблем в СІПРО**

Розроблена СІПРО включає в себе моделювання на основі обмежень, тобто підхід, який використовує множину модульних правил для представлення предметної області (буріння НГС).

Інтелектуальна система, що базується на обмеженнях проводить діагностування рішень технологічної проблеми (нештатної ситуації в бурінні) запропонованої об'єктом ППР і на основі такого аналізу генерує відповідний зворотній зв'язок. Зворотній зв'язок забезпечує переваги довгострокового і



короткострокового процесу прийняття рішень, шляхом перегляду помилкових знань про нафтогазову предметну область об'єкту ППР. За допомогою інтерфейсів здійснюється підтримка рішення технологічної проблеми шляхом візуалізації її структури. При формуванні запиту в СІППРО здійснюється синхронний пошук за допомогою введених ключових слів і висвітлюються помилки, в яких знайдені такі слова, таким чином об'єкту полегшується вибір помилки.

Моделювання на основі аналізу помилок об'єкта визначає, що для вивчення технологічного процесу буріння НГС, по значимості декларативні знання є основними. Об'єкт ППР може виявити помилку порівнюючи бажані результати виконаної дії з реальними, але якщо декларативні знання втрачені, то об'єкт не зможе виявити зробленої помилки, що є особливо важливим. Намагаючись підвищити продуктивність деяких навичок, він, звичайно, не планує допускати помилки, проте через відсутність досвіду та відповідних знань не в змозі цьому запобігти. Аналогічна проблема стосується коректованих знань: об'єкт ППР повинен переглянути помилкові знання, але він початківець і знає дуже мало по предметній області, тому при виправленні помилок стикнеться з труднощами у визначенні множини релевантних знань. Саме для таких випадків є доцільним застосування СІППРО, яка полегшує ППР шляхом визначення та висвітлення об'єкту допущених ним помилок і цим самим збільшує його декларативні знання. Інтелектуальні системи, що базуються на обмеженнях аналізують рішення об'єктів шляхом співставлення рішень з множинами обмежень, тобто множина порушених обмежень  $ConstrV_{set}$  відповідає помилкам і відповідно до них система може надати зворотній зв'язок [139].

Проведемо опис процесу формалізації для методу фіксації помилок та виділення множини релевантних до помилки обмежень [140].

1. Нехай  $i$  - та технологічна проблема *TechnologicalProblem*  $TP^i$  процесу буріння НГС має  $j$  - станів *TechnologicalStates*  $TS^j - TP^i.TS^j$ .

2. Нехай для деякого стану  $TP^i.TS^j$  маємо деяку релевантну множину обмежень  $\{ConstrR_k\}_{k=1\dots K}$ , де  $K$  – кількість обмежень в множині релевантних обмежень  $ConstrR_{set}^{TP^i.TS^j}$ .

3. Відповідно при рішенні об'єктом  $j$ - стану технологічної проблеми  $TP^i$  кожен елемент множини  $ConstrR_{set}^{TP^i.TS^j} = \{ConstrR_k\}_{k=1\dots K}$  буде приймати одну з двох форм: задоволене обмеження (*Satisfied Constraints*), порушене обмеження (*Violated Constraints*), а саме:

$$ConstrR_{set}^{TP^i.TS^j} = \{ConstrR_k\}_{k=1\dots K} = \{\{ConstrS_k\}_{k=1\dots K}, \{ConstrV_k\}_{k=1\dots K}\}.$$

4. При введеній множині обмежень, кожен елемент є ранжованим по релевантності до поточного стану технологічної проблеми (в даному випадку – релевантність – це ступінь контекстної логічної зв'язаності з поточним станом проблеми). Ступінь релевантності виражатимемо коефіцієнтом релевантності  $CR$  (*Relevance Coefficient*), по аналогії до коефіцієнту впевненості в експертних системах  $CF$  (*Certainty Factor*). Якщо кожен елемент множини релевантних обмежень є ранжованим, то запишемо формулу:

$$\left[ConstrR_{set}^{TP^i.TS^j}\right]^{Ranged} = \{ConstrR_k : CR_k\}_{k=1\dots K},$$

де  $CR_k \in [0\dots 1]$ , при чому значення 1 відповідає 100% релевантності, а значення 0 відповідає 0% релевантності або нерелевантності до стану технологічної проблеми.

5. Нехай при вирішенні  $j$ - стану  $i$  - тої технологічної проблеми може виникнути деяка кількість помилок, яку позначимо  $Errors_{set}^{TP^i.TS^j}$ :

$$Errors_{set}^{TP^i.TS^j} = \{Error_m\}_{m=1\dots M},$$

де  $M$  - кількість задекларованих помилок в системі для  $j$ - стану  $i$  - тої технологічної проблеми.

6. Введемо в розгляд множину обмежень, порушення яких призвело до виникнення даних помилок. Розглядатимемо дану множину як множину

релевантних до помилок обмежень і позначимо її як  $ConstrRErr_{set}^{TP^i.TS^j}$ .

Подальший розгляд повторюватиме попередні твердження:

$$ConstrRE_{set}^{Error_m} = \left\{ ConstrRE_{k_1} \right\}_{k_1=1\dots K_1} = \left\{ \left\{ ConstrSE_{k_1} \right\}_{k_1=1\dots K_1}, \left\{ ConstrVE_{k_1} \right\}_{k_1=1\dots K_1} \right\}.$$

7. При введеній множині обмежень до порушених помилок кожен елемент є ранжованим по релевантності до помилки поточного стану технологічної проблеми. Ступінь релевантності виражатимемо коефіцієнтом релевантності до помилки  $CRE$  (*Error Relevance Coefficient*). З того факту, що кожен елемент множини релевантних обмежень до помилки є ранжованим, запишемо формулу:  $[ConstrRE_{set}^{Error_m}]^{Ranged} = \{ ConstrR_{k_1} : CRE_{k_1} \}_{k_1=1\dots K_1}$ .

8. Якщо джерелом помилки  $Error_m$  є деяка множина  $ConstrRE_{set^1}^{Error_m}$ , то очевидно, що  $ConstrRE_{set^1}^{Error_m} \subset ConstrRErr_{set}^{TP^i.TS^j}$ , а також  $ConstrRE_{set}^{Error_m} = ConstrSE_{set^1}^{Error_m} \cup ConstrVE_{set^2}^{Error_m}$ , де  $set = set^1 \cup set^2$  і також очевидно, що  $ConstrSE_{set^1}^{Error_m} = ConstrRE_{set}^{Error_m} - ConstrVE_{set^2}^{Error_m}$ .

Таким чином, інтелектуальна система повинна передати об'єкту ППР релевантну частину знань предметної області, тобто, щоб повідомлення зворотного зв'язку було ефективним, воно повинно забезпечити користувача наступною інформацією: де саме допущена помилка; що є причиною помилки; основні поняття вірного рішення. Кожне обмеження в системі має одне або декілька заздалегідь визначених повідомлень зворотного зв'язку, які надаються об'єкту, коли обмеження порушується. Перелічені особливості визначають необхідність оцінки реалізованості функціональності проектованої інтелектуальної системи на кожному етапі.

#### 4.2. Оцінка реалізації функціональності системи інтелектуальної підтримки прийняття рішень на основі обмежень

Розроблена система є програмним продуктом призначеним для інтелектуальної підтримки процесу прийняття рішень технологічним

персоналом при бурінні НГС. Тестування системи на предмет її функціональності здійснювався на основі розробленого профілю – “Запобігання нештатних ситуацій при бурінні НГС”, який створений шляхом аналізу досвіду професійної діяльності експертів буріння свердловин на нафту і газ. Таким чином, система дозволяє виконувати накопичення знань, умінь та навичок професійної та виробничої діяльності, організувати ППР на основі інтелектуальних методів.

Створена СІППРО має наступні особливості:

1. Використання множин, систем та ієрархій обмежень для моделювання інтелектуальних функцій системи;
2. Введення правил для оперування з множинами, системами та ієрархіями обмежень;
3. Використання методики та структури архітектурних рішень експертних систем, які отримують описи технологічних помилок, що є результатом неправильних дій об’єкта ППР;
4. Побудова ієрархії контенту матеріалу про процес буріння НГС;
5. Побудова бази знань системи з таких складових, як помилки, обмеження та правила:  $KB^{AICO} = Rules^{set} \cup Errors^{set} \cup Constraints^{set}$ .

Множина всіх обмежень в базі знань  $Constraints^{set}$  розглядається як об’єднання множин обмежень, систем обмежень та ієрархій обмежень:

$$Constraints^{set} = \{ Constr_i^{set} \}_{i \in N} \cup \{ Constr_j^{syst.} \}_{j \in N} \cup \{ Constr_k^{Hrch.} \}_{k \in N}.$$

З точки зору способу побудови матимемо послідовність включень:

$$Constr^{Hrch.} \supset Constr^{Syst.} \supset Constr^{set};$$

6. Веб-орієнтованість та інтерактивність розробленої системи;
7. Реалізація архітектури СІППРО у вигляді предметно-незалежної оболонки на зразок технології оболонок експертних систем;
8. Підтримка інтелектуальної стратегії процесу прийняття рішень відповідно до концепції зони найближчого розвитку (*PDZ – ProximalDevelopmentZone*).

Наповнення бази знань системи запропоновано виконувати на основі досвіду фахівців-експертів предметної області, яке здійснюється по деревовидній вкладеній структурі (рис. 4.4): технологічний процес  $\{TechnologicalProcess_i\}_{i \in N}(TP_i)$ , проблеми  $\{TechnologicalProblems_j\}_{j \in N}(TP_j)$  пов'язані з конкретним процесом, а також стани  $\{TechnologicalStates_k\}_{k \in N}(TS_k)$ , які відносяться до конкретної технологічної проблеми, тобто  $\{TP_i\}_{i \in N} \subset \{TP_j\}_{j \in N} \subset \{TS_k\}_{k \in N}$ . На технологічні проблеми і стани технологічних проблем накладають обмеження.

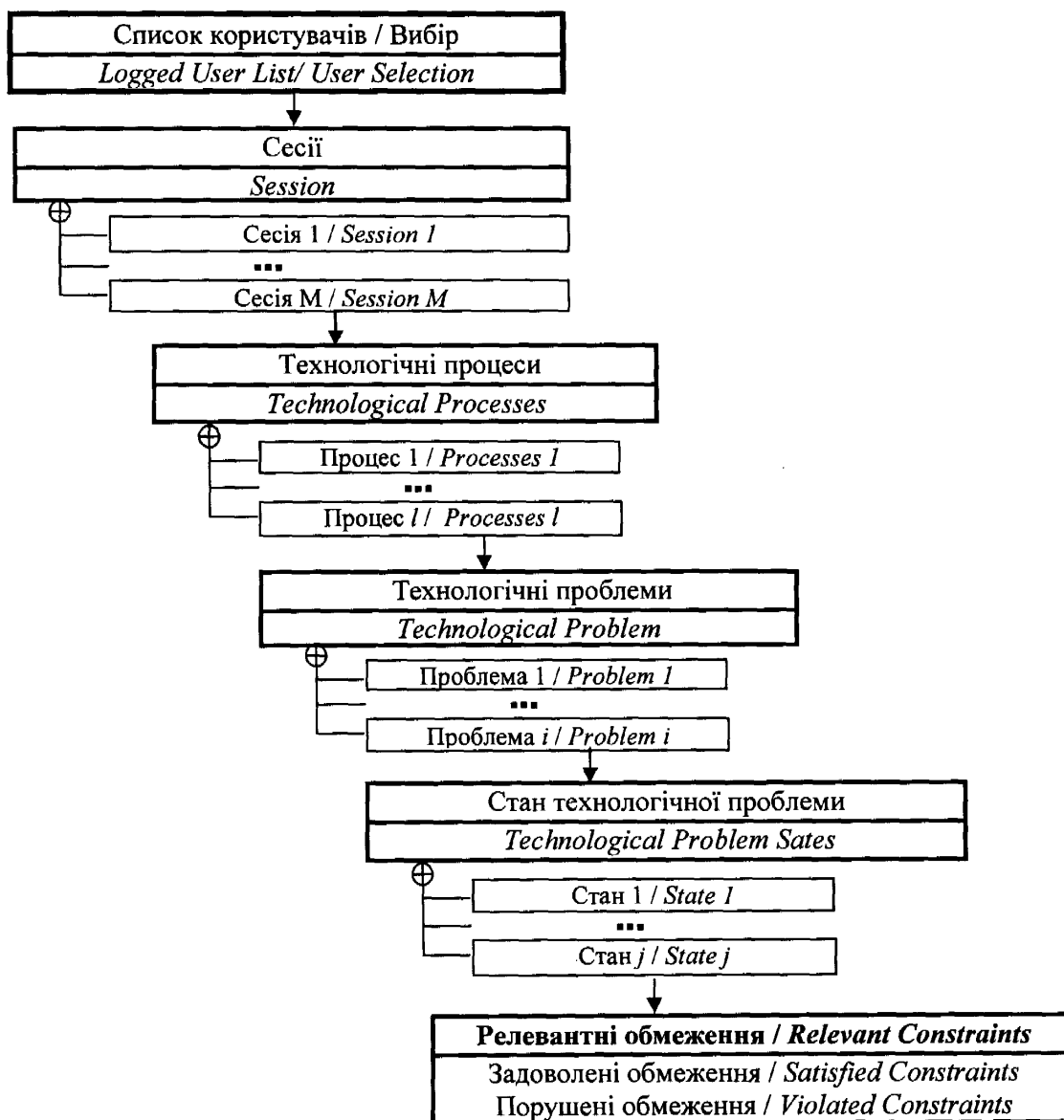


Рис. 4.4. Структурно-алгоритмічна схема формування контенту технологічного матеріалу

До сформованих обмежень додають типові технологічні помилки характерні для даного процесу (рис. 4.5).

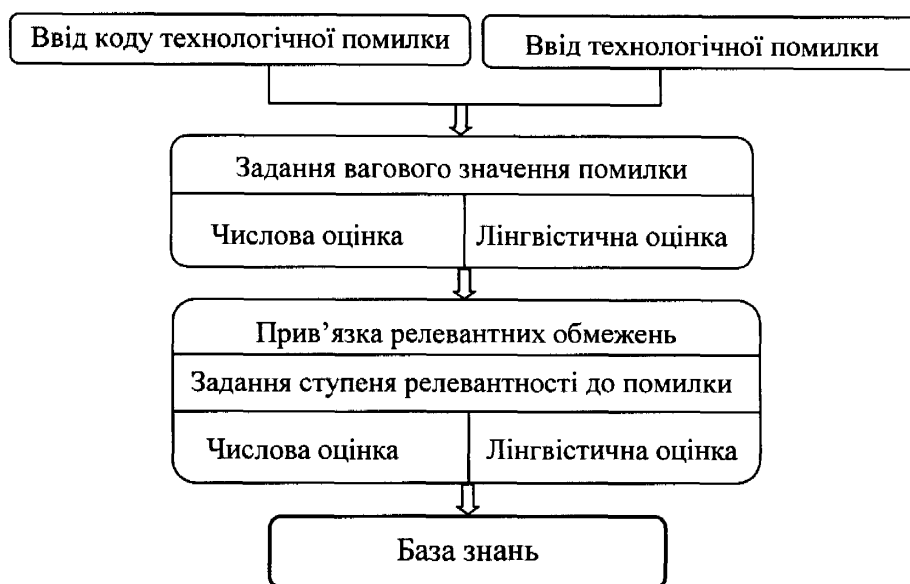


Рис. 4.5. Технологія додавання технологічних помилок до бази знань

Також, до обмежень додають два рівні експертних порад (початковий, розширений) щодо прийняття рішень для користувачів різних рівнів. Таким чином, формується база знань системи за допомогою якої відбуватиметься прийняття рішень. При проведенні технологічних тренінгів персоналу, інтелектуальна система генерує експертні поради, щодо вибраного типу та виду нештатної технологічної ситуації. Об'єкт ППР вводить код технологічної помилки або її опис через інтерфейс, система ідентифікує помилку, видає перелік порушених технологічних обмежень, що призвели до її виникнення, і до кожного з порушених технологічних обмежень видає перелік експертних порад ранжованих по рівнях складності та релевантності. Така організація ППР дозволяє підготовлювати персонал до управління технологічними процесами та для прийняття адекватних коректних рішень при виникненні нештатних (аварійних) ситуацій при бурінні НГС.

Як показує досвід виробничої галузі, причиною виникнення нештатної технологічної ситуації є порушення певних технологічних обмежень або множини таких обмежень. Введення множини технологічних обмежень дозволяє виконати їх ранжування по ступеню релевантності до нештатних

технологічних ситуацій. Відповідно, виконання необхідних технологічних дій по усуненню нештатної технологічної проблеми інтерпретується як процес задоволення певної множини обмежень (системи, ієрархії).

Проте, з точки зору технології буріння НГС, порушення певного обмеження ще не є необхідною умовою виникнення нештатної технологічної ситуації, тобто в реальних виробничих умовах настання нештатної ситуації розглядається як імовірно зумовлений процес. В той же час, на етапі формування бази знань технологічних обмежень та технологічних помилок експерти-виробничники часто оперують з лінгвістичними значеннями, такими як "швидше за все", в "більшості випадків" "інколи", "майже завжди" та ін.

Тому, з точки зору технологічного процесу видобутку нафти і газу, технологічні обмеження слід розглядати трьох видів: чіткі обмеження, ймовірнісні (можливісні) обмеження, нечіткі (фазі) обмеження.

Кожна нештатна технологічна ситуація матиме свій список обмежень (множину, систему, ієрархію). Відповідно, обмеження будуть релевантними до певних технологічних операцій на нижньому рівні і до процесів на верхньому рівні (рис. 4.6).

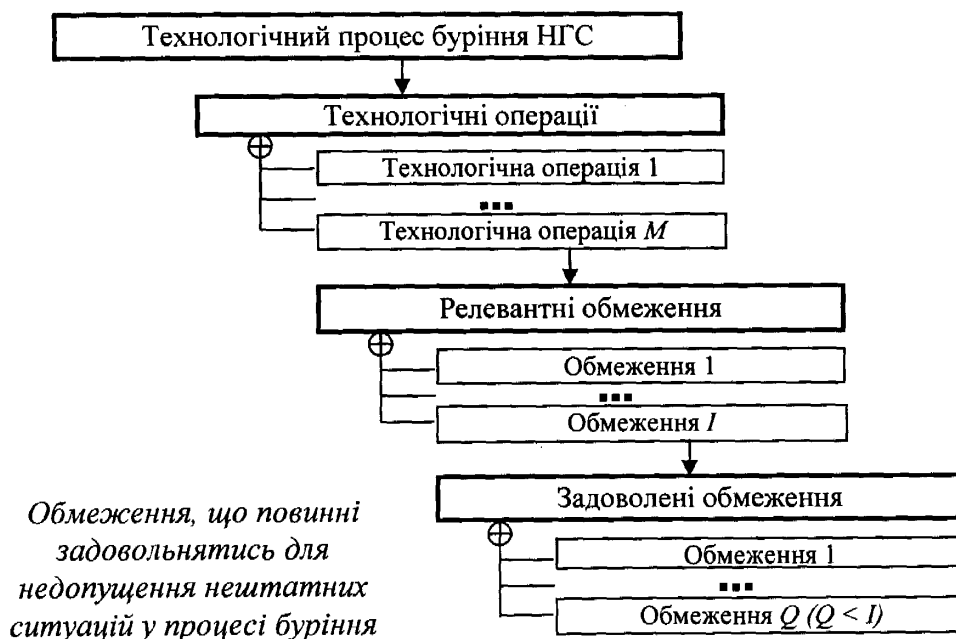


Рис. 4.6. Алгоритмічна схема структуризації технологічного процесу буріння НГС на основі обмежень

Суть архітектурного рішення для об'єкта ППР полягає в побудові системи взаємозв'язаних списків, елементами яких є технологічні процеси, технологічні операції, обмеження та помилки.

Також, система виконує побудову списків нештатних ситуацій, дій по усуненню і списків причин виникнення нештатних ситуацій, тобто виникнення нештатної технологічної ситуації розглядається як наслідок порушення певних технологічних обмежень і навпаки, процес усунення певної нештатної ситуації інтерпретується як процес задоволення певних множин, систем, ієрархій технологічних обмежень (рис. 4.7).

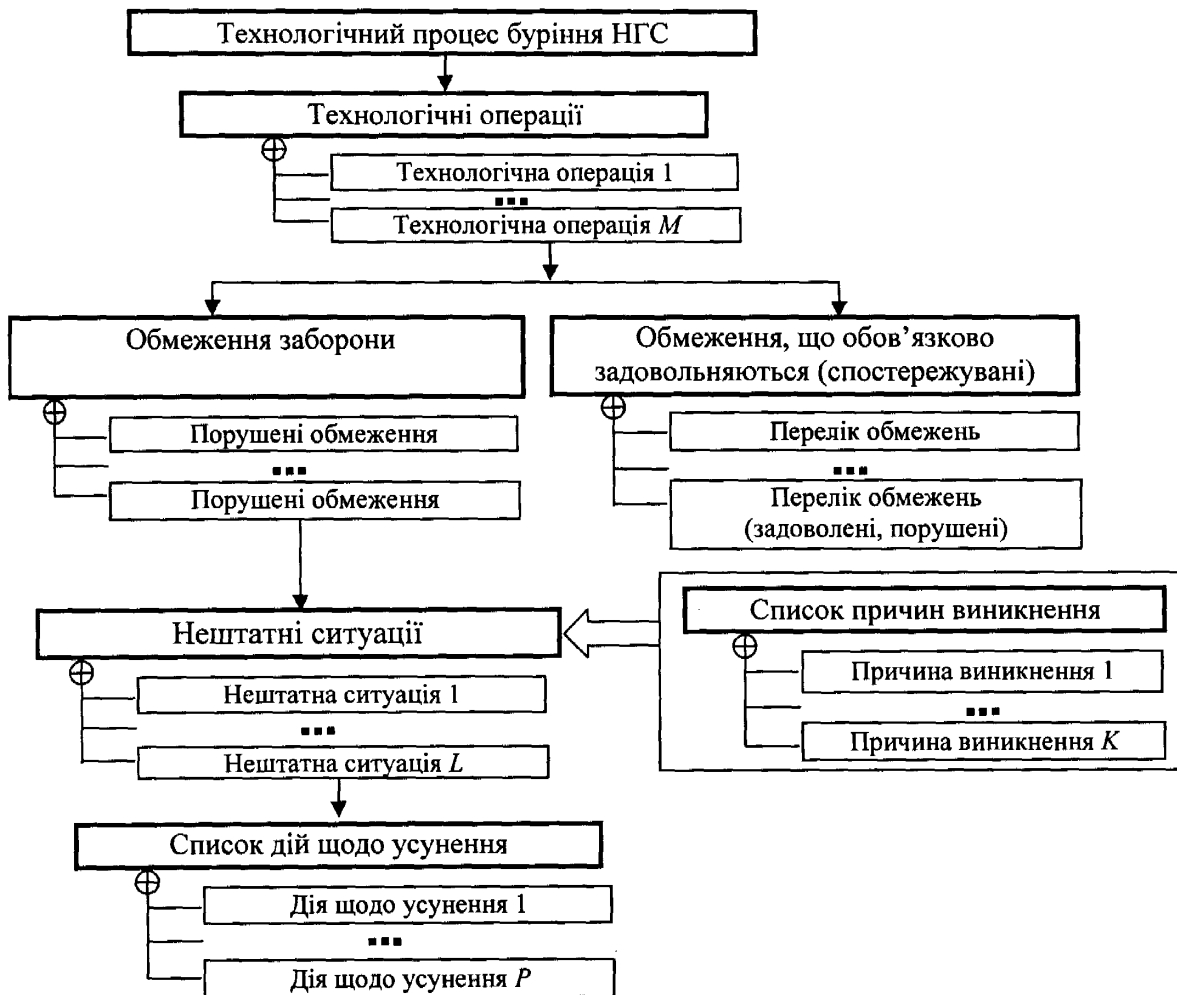


Рис. 4.7. Алгоритмічна схема визначення нештатних технологічних ситуацій на основі обмежень у процесі буріння НГС

На нечіткому рівні, ймовірність виникнення нештатної ситуації є залежною від ймовірності порушення певних обмежень і відповідно ймовірнісно усунення певної нештатної технологічної ситуації є ймовірнісно



зв'язаним з ймовірністю задоволення певних технологічних обмежень. Аналогічні формулювання ми отримаємо також і для випадку можливісних та нечітких (з лінгвістичними мітками) обмежень.

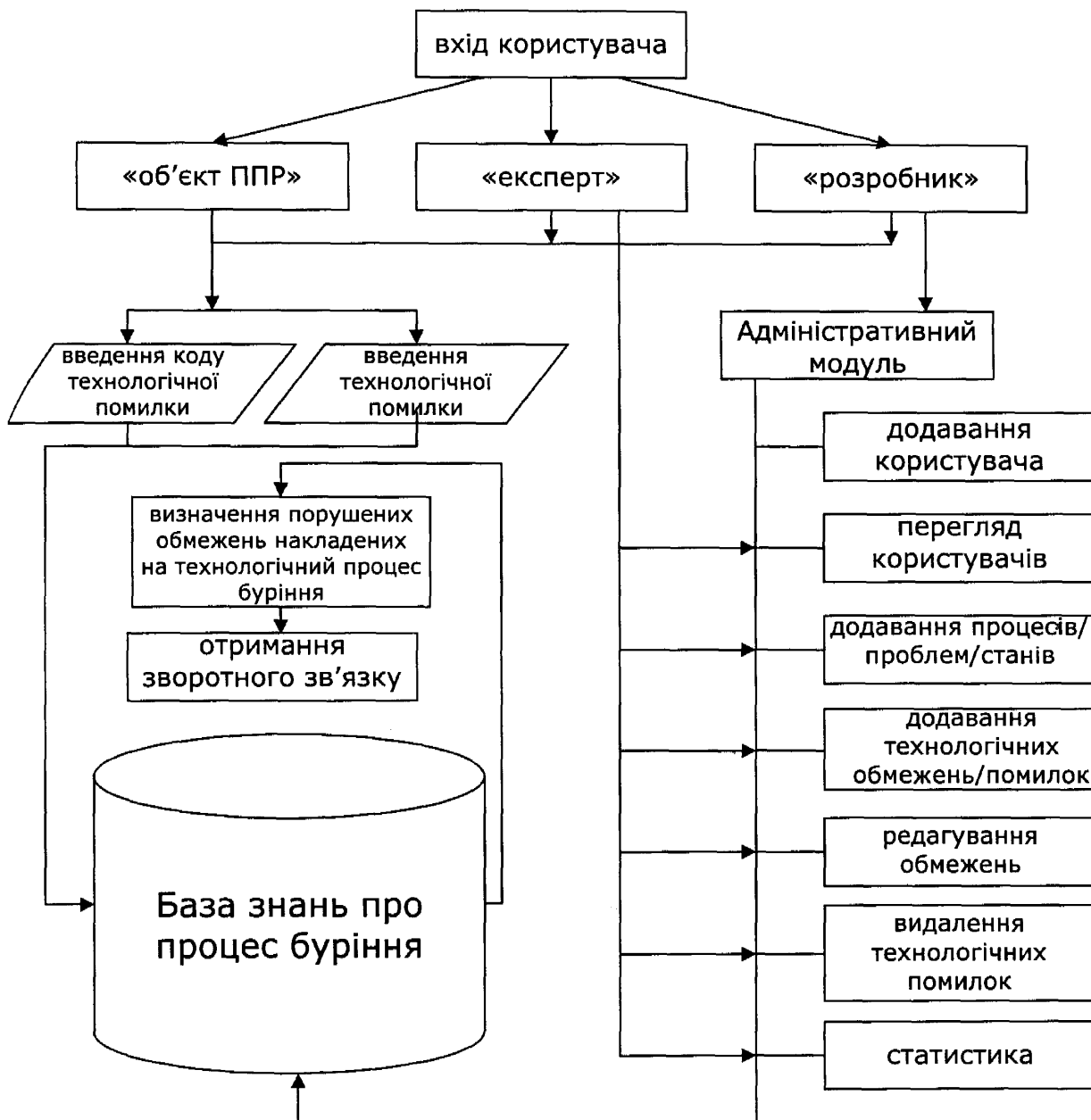


Рис. 4.8. Структурна схема функціонування СІППРО

Перевагою системи є можливість контролю помилок об'єкта ППР при вирішенні технологічних проблем і пошуку в базі знань та формування множини порушених обмежень, що призвели до виникнення даних помилок та, відповідно, логічно обгрунтованої генерації експертних порад, базуючись на характеристиках адекватності та релевантності обмежень накладених на

технологічний процес буріння НГС, що є основою СІППРО, структурна схема функціонування якої представлена на рис. 4.8 [141].

Реалізація інтелектуальної системи виконана без використання стандартної програмної оболонки, що дозволяє реалізовувати концепцію обмежень, оскільки існуючі реалізації, зосередженні на проблемі виведення в обмеженнях і не мають достатньої функціональності для рівня підтримки прийняття рішень, що реалізовується в даній системі. Тому було використано програмні засоби високого рівня, такі як PHP5, MySQL, XHTML, CSS2, JavaScript (jQuery), AJAX. З точки зору технічних параметрів, створена система є кросплатформенною з акцентом на використання мінімально необхідного об'єму пам'яті. Отримана система може застосовуватись на MES-рівні, хоча можлива також її інтеграція для SCADA-рівня управління технологічним процесом буріння НГС.

#### 4.2.1. Інтерпретація помилок в СІППРО

Робота СІППРО пов'язана з обробкою помилок. В проєктованій системі розглядається 4 типи помилок:

1. *Помилки користувача* (об'єкта ППР) - *UserErrors* розглядаються системою як наслідок процесу задоволення обмежень при рішенні технологічних проблем, що пропонується системою. Очевидно, що множина всіх помилок користувача визначається за формулою

$$UserErrors^{Set} = IdealSolution^{Set} \setminus SubmittedSolution^{Set},$$

де *IdealSolution*<sup>Set</sup> - множина ідеальних рішень технологічних проблем, *SubmittedSolution* - множина рішень запропонованих об'єктом ППР. Помилки користувача система обробляє наступним чином:

- ранжування помилок по значимості, для чого виконується побудова ранжованої множини помилок об'єкта ППР *RangedUserErrors*<sup>Set</sup>, елементами якої є індексовані помилки користувача з присвоєними ваговими коефіцієнтами:

$$RangedUserErrors^{Set} = \{UserError_i : ErrorWeight_i\}_{i \in N}, ErrorWeight_i \in [0;1];$$

– виконання системою ранжування помилок користувача дозволяє здійснювати більш точну підтримку профілю користувача *UserProfile*. Очевидно, що для деякого обмеження  $c_i$  вагове значення помилки пов'язане з його задоволенням визначається за формулою:

$$ErrorWeight_i^{c_i} = 1 - SD^{c_i},$$

де  $SD$  - ступінь задоволення обмеження  $SD \in [0;1]$ . Крім вагових коефіцієнтів помилок система використовує оціночні значення для помилок  $ErrEv_i \in [0;1]$ , які є значеннями, що задаються користувачем після завершення сеансу роботи з системою. Система використовує оціночні значення для оцінки поточного профілю користувача і його відповідність зоні найближчого розвитку об'єкта ППР. Оцінка користувачем власних помилок звичайно є суб'єктивною і система може виконувати порівняння оціночних значень  $ErrEv_i$  та вагових значень  $ErrorWeight_i$ , що містяться в базі знань системи.

**2. Помилки обмежень  $C\_Errors$ .** При описі технологічної проблеми  $TP$  користувач задає деяку множину обмежень  $C^{TP} = \{c_1, c_2 \dots c_n\}$ . При цьому кожному обмеженню  $c_i$  експерт задає деяке вагове значення  $RD_i$ , що виражає ступінь релевантності обмеження технологічній проблемі. Оскільки дане значення є суб'єктивним значення експерта, то позначатимемо його як  $RD^{exp}$ . Проте, після завершення сеансу роботи система зможе оцінити кожне обмеження з точки зору його фактичної релевантності, що дозволяє перехід від початкових експертних оцінок релевантності множини обмежень до множини фактичних значень:

$$C_{exp}^{LP} = \{C_i : RD_i^{exp}\}_{i=1 \dots n, n \in N} \rightarrow C_{fact.}^{TP} = \{C_i : RD_i^{fact.}\}_{i=1 \dots n, n \in N}.$$

В даному випадку, помилка обмеження визначається як:

$$C_i^{Err} = |RD_{C_i}^{exp} - RD_{C_i}^{fact.}|.$$

**3. Системою обмежень  $CS$**  будемо вважати множину обмежень  $C_i$  з введеним впорядкуванням по помилках обмежень  $CS = (C, \leq_{c^{Err}})$ . Помилки

системи обмежень  $CS\_Errors$  розглядаються як залежна характеристика на множині помилок обмежень.

4. *Ієрархію обмежень* будемо розглядати як багаторівневу формальну структуру на кожному рівні якої знаходиться певна систем обмежень:

$$CH = \{ Lev_i \{ CS_j \}_{j=1 \dots n_1} \}_{i=1 \dots n_2}; n_1, n_2 \in N,$$

де  $Lev_i$  -  $i$ -тий рівень ієрархії  $CH$ .

Помилки ієрархії обмежень  $CH\_Errors$  будемо розглядати як залежну характеристику від помилок систем обмежень на множині рівнів ієрархії.

Модуль отримання зворотного зв'язку дозволяє отримати інформацію про порушені обмеження в порядку рівня релевантності до введеної помилки:

$$CurrentError \rightarrow C^{viol.} \overset{RD^{Err}}{\leftarrow} (c_1, c_2, \dots, c_n)_{n \in N},$$

де  $RD^{Err}$  - рівень релевантності відповідного обмеження помилці, тобто кожне обмеження має певний рівень релевантності, а її множина є впорядкованою:

$$(c_1 : RD_1^{Err}, c_2 : RD_2^{Err}, \dots, c_n : RD_n^{Err});$$

$$((RD_1^{Err}, RD_2^{Err}, \dots, RD_n^{Err})_{\geq RD^{Err}}).$$

При введенні помилки задається також її ваговий (преференційний) коефіцієнт. На рис. 4.9. показано інтерфейсний елемент системи в якому виконується додавання нової помилки в СІППРО, що може виникнути при вирішенні певного стану технологічної проблеми.

Рис. 4.9. Додавання нової помилки

На етапі проектування, експерт передбачає, що при вирішенні  $j$ -того стану технологічної проблеми  $TP^i$  виникатиме певна множина помилок:

$$TP^i . TPS^j \rightarrow Err_{set}^{TPS^j} (err^1 : ew^1, err^2 ; ew^2, \dots, err^n ; ew^n)_{n \in N}.$$

Множину помилок  $j$ -того стану технологічної проблеми можна впорядкувати на основі введення міток в формі вагових коефіцієнтів для помилок, що представлено у верхній частині діалогу на рис. 4.9.

В другій частині діалогу, кожній введеній помилці задається обмеження, яке є релевантним до даної помилки, а також вказується ступінь такої релевантності:

$$\{err^k\}_{k \in [0..n]} \rightarrow \{C_j^{TPS^j} : RD_{C^j}^{err^k}\}_{j,k \in N}.$$

Таким чином, після відправлення даних система відобразить інформація по даній помилці. В даному контексті необхідно також розглянути реалізацію структурних елементів представлення знань про процес буріння з метою відображення обмежень, які порушуються помилкою у порядку спадання рівня релевантності.

### 4.3. Реалізація структурних елементів представлення знань про процес буріння нафтових і газових свердловин в інтелектуальній системі

Основними структурними одиницями [142] для наповнення системи є технологічні процеси, технологічні проблеми, технологічні обмеження, типові технологічні помилки, експертні поради. Модуль додавання технологічного процесу (рис. 4.10) містить три пункти: технологічний процес, технологічна проблема, стан технологічної проблеми. Для кожного вибору забезпечено додавання, видалення, коректування та вибір існуючих даних.

The screenshot shows a web application interface with the following sections:

- Технологічний процес:** A dropdown menu showing 'Буріння', a text input field for 'Новий процес', and buttons 'Скинути' and 'Додати'.
- Технологічна проблема:** A dropdown menu showing 'прихоплення буриньких і обсадних труб', a text input field for 'Нова технологічна проблема', and buttons 'Скинути' and 'Додати'.
- Стан технологічної проблеми:** A dropdown menu showing 'прихоплення під дією перепаду тиску', a text input field for 'Стан технологічної проблеми', and buttons 'Скинути' and 'Додати'.

At the bottom of the page, there is a footer: 'Розроблено на кафедрі ПЗАС © 2009 - 2012' and a logo for SIEMRO.

Рис. 4.10. Вікно додавання нового процесу/проблеми/стану

Даний модуль дозволяє здійснювати внесення в базу знань системи технологічні процеси, технологічні проблеми технологічних процесів та стани проблем. Ввід даних відбувається каскадно. Існує можливість введення тільки технологічного процесу, залишаючи пустими поля введення для технологічної проблеми і для стану технологічної проблеми. Технологічна проблема вводиться також незалежно. При відсутності нового технологічного процесу прив'язка буде до того процесу який є вибраним у переліку існуючих процесів. Як можна бачити з розділу 2.1. технологічні проблеми та їх параметри в технологічних процесах видобутку нафти і газу є тісно пов'язаними. Тому одна і та ж проблема та набір технологічних параметрів можуть входити в ряд взаємозалежних та незалежних технологічних процесів. Хоча, з точки зору фізичного опису процесів та явищ, технологічні процеси пов'язані з видобуванням нафти та газу можна розглядати в рамках єдиного комплексного процесу розробки надр та видобування вуглеводнів [143]. У випадку, якщо введено новий процес, то технологічна проблема буде прив'язана до останнього. За аналогічною схемою працює додавання станів технологічної проблеми. Якщо не введені процес і технологічна проблема, прив'язка нового стану технологічної проблеми відбудеться до вибраних технологічного

процесу і проблеми з переліку існуючих. Якщо необхідно внести декілька станів проблеми, технологічних проблем чи процесів, то передбачена опція “Додати ще один стан”, “Додати ще одну проблему”, “Додати ще один процес” відповідно, при якій введені дані додаються в контейнер. З контейнера дані можна видаляти, натискаючи на відповідну кнопку навпроти кожного пункту. При натисканні на кнопку “Додати” в базу заносяться дані з полів введення зі всіх контейнерів.

Зміна технологічного процесу автоматично змінює перелік технологічних проблем. В системі застосована технологія AJAX-запитів звернення до сервера, що дозволяє одержання необхідних даних та відображення їх у шаблоні без перевантаження сторінки. Аналогічні дії відбуваються зі станом при зміні технологічної проблеми. Даний алгоритм дозволяє швидко отримати необхідні дані, для коректного внесення нових даних у базу.

Також передбачена функція зміни процесів, проблем та станів. Після натискання на кнопку “змінити”, проти відповідного процесу/проблеми/стану, виконується перехід у поле введення і активуються кнопки редагування та видалення. Опції редагування та видалення деактивуються при очищенні поля введення.

Модуль Додавання обмежень і помилок поділяється на два розділи. В першому можна додавати обмеження релевантні до технологічної проблеми або стану технологічної проблеми (рис.4.11). Якщо обмеження релевантне до проблеми, стан технологічної проблеми не активується і відповідно при внесенні даних не враховується. Всі поля є обов’язковими для заповнення. Також, необхідно вказати релевантність обмеження до проблеми, ваговий коефіцієнт обмеження, ймовірнісний коефіцієнт обмеження, можливісний коефіцієнт обмеження та преференцію обмеження за допомогою бігунка у вигляді числового значення або за допомогою списку вибору для лінгвістичних значень оцінки.



**Б1. Блок опису обмежень до поточного стану поточної технологічної проблеми**

Технологічний процес:

Технологічна проблема:

Додати стан технологічної проблеми

Обмеження:

Релевантність обмеження до стану проблеми	Лінгвістична оцінка
82	Нормальна
Ваговий коефіцієнт обмеження (вага присвоєння)	Лінгвістична оцінка
60	Вище середнього
Ймовірнісний коефіцієнт (ймовірність задоволення обмеження)	Лінгвістична оцінка
72	Нормальний
Можливісний коефіцієнт (можливість задоволення обмеження)	Лінгвістична оцінка
80	Нормальний
Преференція обмеження (першочерговість задоволення)	Лінгвістична оцінка
98	Надвисока

Експертні поради системи

Базовий рівень:

Детальний рівень:

+ Додати ще одне обмеження

Розроблено на кафедрі ПЗАС © 2009 - 2012

Рис. 4.11. Додавання нового обмеження

Перш ніж додати обмеження, потрібно провести вибір технологічного процесу, технологічної проблеми та стану проблеми (якщо такий є). Далі здійснюється введення обмежень, із зазначенням ступеня релевантності до проблеми, та експертних порад системи відповідно до рівня знань та компетенції об'єкта ППР (початковий, розширений). В блоці додавання помилки вводиться код помилки та сама помилка, задається її ваговий коефіцієнт, а також вибираються обмеження з переліку обмежень релевантних до помилки і рівень релевантності.

Експертні поради генеруються для різного рівня знань об'єктів ППР, починаючи з найнижчого – деталізований опис виходу з нештатної технологічної ситуації, спосіб переведення нештатної технологічної ситуації в штатну, яка може скластися у випадку порушення даного обмеження і до найвищого – в якому тільки вказується на те в чому полягає проблема без деталізованого опису.

Існує можливість додавання декількох релевантних обмежень до стану проблеми за допомогою кнопки “Додати ще одне обмеження”. При цій дії всі обмеження додаються в контейнер і при відправленні на сервер заносяться в



базу. При коректному заповненні всіх полів даними або наявності хоч одного пункту у контейнері, активується кнопка “Додати”, яка по замовчуванню є неактивною.

Другий блок (рис. 4.9) по замовчуванню є прихованим і активується тільки після натискання на кнопку “Додати помилку”, розташовану внизу першого блоку. В другому блоці можна додати помилки, які є релевантними до стану проблеми. Список обмежень формується на основі вибраної технологічної проблеми або стану технологічної проблеми, змінюється відповідно при зміні вище вказаних. Проте список обмежень розглядається не як єдина формальна структура, а як багаторівнева, а саме:

1. Рівень 1 – введення множини обмежень для стану технологічної проблеми:

$$TP^i.TPS^j.Constr^{set} = \{C_k^j\}_{i,j,k \in N};$$

2. Рівень 2 – введення системи обмежень для стану технологічної проблеми, шляхом впорядкування множини обмежень, отриманої на рівні 1, на основі введення впорядкування (ранжування) обмежень по коефіцієнтах переваги ( $PfC$ ):

$$TP^i.TPS^j.Constr^{Syst.} = \{(c_1^j, c_2^j, \dots, c_k^j)\}_{i,j,k \in N}^{PfC};$$

3. Рівень 3 – введення ієрархії обмежень для технологічної проблеми, шляхом об'єднання (агрегації) систем обмежень заданих для відповідних рівнів (станів):

$$TP^i.Constr^{Hrch.} = \{(c_1^j, c_2^j, \dots, c_k^j)_{k \in N}^{TPS^j}\}_{j \in N}, i \in N;$$

4. Рівень 4 – введення ієрархії обмежень для технологічного процесу, шляхом агрегації ієрархії обмежень виділених технологічних проблем:

$$TPr.Constr^{Hrch.} = \{(c_1^j, c_2^j, \dots, c_k^j)_{k \in N}^{TPS^j}\}_{j \in N}^{TP^i}.$$

У випадку релевантності декількох обмежень до однієї помилки, існує опція додавання ще одного обмеження, яка додає його в систему і дозволяє

вибрати наступне обмеження зі списку. Експертні поради поділені на дві групи, залежно від рівня знань об'єкта ППР.

При додаванні обмеження до поточного стану технологічної проблеми експерт предметної області задає такі специфікації обмеження:

1. Ваговий коефіцієнт обмеження, який визначає вагу кожного присвоєння змінним відповідних значень;

2. Ймовірнісний коефіцієнт обмеження  $cpr$  задає ймовірність задоволення (порушення) обмеження. Дана характеристика є статистичною. Ймовірнісні значення задоволення і порушення обмеження зв'язуються формулою  $cpr^{sat.} = 1 - cpr^{viol.}$ ;

3. Можливісний коефіцієнт обмеження  $cps$  - виражає можливість задоволення (порушення) обмеження. Можливісні коефіцієнти можна розглядати як різновид ймовірнісних коефіцієнтів, проте вони базуються не на статистичній оцінці, а на оцінці на основі знань. Можливісні коефіцієнти значення задоволення і порушення обмеження є взаємозв'язаними і виражаються формулою  $cps^{sat.} = 1 - cps^{viol.}$ ;

4. Преференцію обмеження  $pfc$ , що виражає важливість першочерговості задоволення (порушення) обмеження при вирішенні технологічної проблеми. Очевидною тезою, є те що степінь преференції обмеження повинен бути прямо пропорційним ступеню її релевантності, проте точний опис такої залежності визначатиметься вибраною стратегією;

5. Ступінь релевантності  $rd$  обмеження стану технологічної проблеми;

6. Лінгвістичне значення обмеження  $LV$ .

Характеристики 1-5 в залежності від вибору користувача можуть задаватися у вигляді числових значень з діапазону [0-100], тобто у вигляді процентної характеристики або у вигляді лінгвістичного значення. Технологічно обидва види оцінок будуть переводитись в шкалу 0-1, що дозволяє уніфікувати процес виконання обчислень в механізмі висновку інтелектуальній системі.

При додаванні обмеження до  $j$ -того стану технологічної проблеми  $TP^i$  ми отримуємо деяку множину міток згідно формули

$$TP^i . TPS^j \rightarrow C^j (cw^j, cpr^j, cps^j, pfc^j, rd^j).$$

Множину міток  $C^j$  будемо позначати як  $L_{set}^{C^j}$ . Вхідження множини міток отримуватиметься з мультимножини виду  $L_{set}^{C^j} : \{\{0...100\}, LV_k^j\}_{k=1...5}\}$ .

В блоці 2 (рис.4.9) всі списки нижчі по ієрархії залежать від стану вище розміщених списків, тому зміна одного з вище розміщених списків (ієрархій), за допомогою AJAX-запитів, змінює всі нижче розміщені. Таким чином, при зміні технологічного процесу, відбувається зміна списків (ієрархій) технологічних проблем, станів проблем та обмежень.

Модуль редагування обмежень (рис. 4.12) за інтерфейсом схожий до інтерфейсу додавання обмежень.

Рис. 4.12. Модуль редагування обмеження

Список обмежень формується по технологічних проблемах або станах проблем. Після вибору обмеження стає доступною функція його зміни. При натисканні на кнопку “змінити” обмеження заноситься у поле введення для редагування, підвантажуються експертні поради до даного обмеження і заносяться у відповідні поля для редагування, а також активуються кнопки

“змінити” та “видалити”. Також доступні для редагування стають характеристики обмеження: релевантність обмеження до проблеми, ваговий коефіцієнт обмеження, ймовірнісний коефіцієнт обмеження, можливісний коефіцієнт обмеження та переваги обмеження. Кожен з об’єктів редагування дозволяє вносити модифіковані дані по даному обмеженню або видаляти обмеження, поради до нього і всі зв’язки пов’язані з ним.

Видалення помилок відбувається наступним чином: із випадуючого списку переліку всіх помилок вибирається необхідна помилка і після цього застосовується опція “видалити”. Відповідно дана помилка буде видалена і всі зв’язки пов’язані з нею також будуть знищені. У випадку, якщо не вибрана жодна помилка, опція “видалити” не буде виконувати ніяких дій при натисненні на неї.

Модуль статистики відображає інформацію про користувачів системи, а саме, веде облік порушених і задоволених обмежень користувачем (рис 4.13).

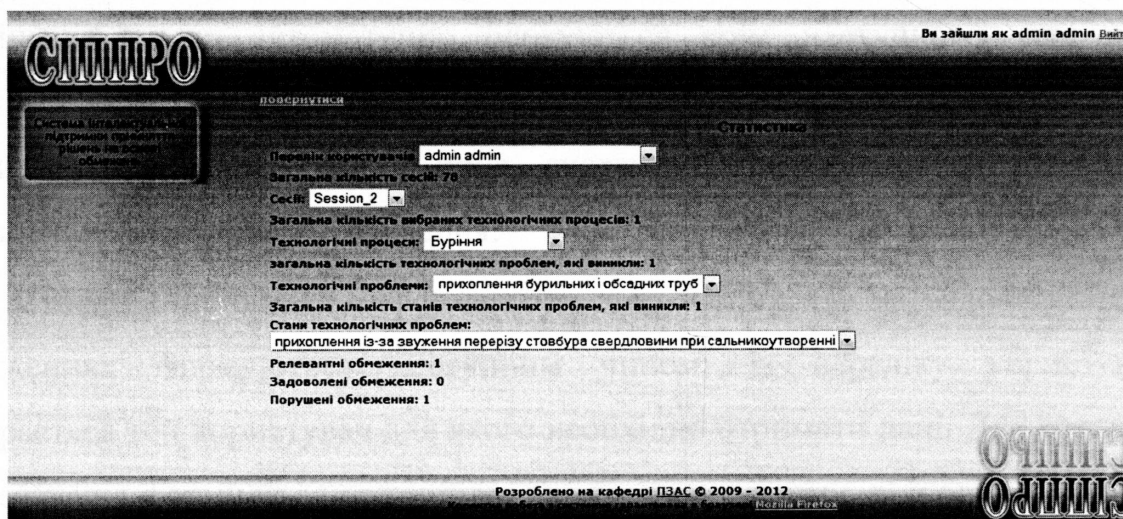


Рис. 4.13. Загальний вигляд вікна Статистики

Для того, щоб отримати необхідну інформацію, потрібно послідовно заповнити даними запропоновані випадуючі списки. Кожен попередній список підвантажує інформацію для наступного, якщо вона є в базі.

Перш за все вибирається тип користувача, “об’єкт ППР”, “експерт” чи “розробник”. Для об’єкта ППР вибирається його прізвище з списку зареєстрованих користувачів. Після виконання запиту висвітлюється кількість

сесій даного користувача і їх перелік. Після вибору певної сесії відображається кількість технологічних процесів, які вивчав користувач і їх перелік. Після вибору технологічного процесу пройденого користувачем висвітлюється кількість проблем, які вирішувались у даному процесі користувачем. Після вибору технологічної проблеми, висвітлюється кількість станів проблем у технологічному процесі їх перелік, а також підраховується кількість релевантних, задоволених і порушених обмежень для даної проблеми, оскільки стану проблема може не містити.

Вибираючи певний стан проблеми, отримуються дані про релевантні, задоволені, порушені обмеження для стану проблеми. По кожному з користувачів існує можливість перегляду статистичних даних по обмеженнях для вибраного технологічного процесу. Дана статистична інформація доступна тільки у випадку вибраного користувача.

У випадку зміни стану списку вище розміщеного у ієрархії всі нижче розміщені списки автоматично блокуються крім наступного, для нього відбувається пошук даних. Користувач у режимі отримання зворотного зв'язку вводить код помилки або її опис, система її ідентифікує та встановлює порушені користувачем обмеження.

Статистичні оцінки інформації по порушених  $C^V$  та задоволених  $C^S$  обмеженнях формуються наступним чином: із переліку користувачів вибирається той користувач для якого необхідно отримати дані. Для кожного з користувачів формується статистика входжень в систему, відповідно в кожній сесії ведуться облікові записи в базі даних про дії виконувані з системою, тобто порушення тих чи інших обмежень. Після вибору конкретної сесії для вибраного користувача, формується перелік технологічних процесів, обмеження яких були порушені в даній сесії. У випадку вибраного певного технологічного процесу, формується список технологічних проблем вибраного технологічного процесу, обмеження яких були порушені. Після вибору технологічної проблеми вибраного технологічного процесу відбувається формування станів технологічних проблем, які належать до вибраної

технологічної проблеми, обмеження яких були порушені у вибраній сесії, а також відбувається підрахунок релевантних  $C^R$ , порушених  $C^V$  та задоволених  $C^S$  обмежень для вибраної технологічної проблеми. У випадку вибору певного стану технологічної проблеми ведеться остаточний підрахунок релевантних, порушених і задоволених обмежень для вибраного стану технологічної проблеми.

Підрахунок обмежень ведеться за наступною схемою: визначається кількість релевантних і порушених обмежень. Їхня різниця становить кількість задоволених обмежень.

Таким чином, статистика релевантних обмежень визначається за відповідною формулою справа наліво згідно ієрархії “технологічний процес” – “технологічна проблема” – “стан технологічної проблеми” [144]:

$$\{TP_r, TP_j, TPS_k\}_{i,j,k \in N}.$$

Нехай для  $k$ -того стану  $TP_j$  технологічної проблеми ми маємо систему обмежень:

$$Constr_k^{syst.} = \{c_1 : rd_1, c_2 : rd_2, \dots, c_l : rd_l\}_{l \in N}, \text{ де } rd_i \in [0..1], i_1 \in [0..1].$$

Згідно означення системи обмежень, її входження ранжовані по ступеню релевантності. Очевидно, що після опрацювання  $k$ -того стану технологічної проблеми частина обмежень з накладеної системи обмежень  $Constr_k^{syst.}$  буде задоволена, а частина порушена, оскільки згідно означення всі обмеження є релевантними. Внаслідок чого отримаємо дві нові множини:

$$[Constr_k^{syst.}]^S = \{c_1^s : rd_1^s, c_2^s : rd_2^s, \dots, c_{m_k}^s : rd_{m_k}^s\}_{m_k \in N};$$

$$[Constr_k^{syst.}]^V = \{c_1^v : rd_1^v, c_2^v : rd_2^v, \dots, c_{n_k}^v : rd_{n_k}^v\}_{n_k \in N}.$$

Очевидно, що  $m < l, n < l, l = m + n$  згідно початкового припущення, про те, що кожне з релевантних обмежень, або задовольняється або порушується;  $k \in [1..k_{max}] k_{max}$  - максимальна кількість станів технологічної проблеми  $TP_j$ :

$$[Constr_k^{syst.}]^S \subset Constr_k^{syst.};$$

$$[Constr_k^{syst.}]^V \subset Constr_k^{syst.}.$$

Таким чином, після опрацювання всіх станів  $TP_j$  технологічної проблеми

отримаємо:  $TP_j.Satisfied = \sum_{p=1}^k m_k$ ,  $TP_j.Violated = \sum_{p=1}^k n_k$ , де  $TP_j.Satisfied$  -

загальна кількість задоволених обмежень при вирішенні технологічної проблеми  $TP_j$  (тобто загальна сума задоволених обмежень по всіх її станах),  $TP_j.Violated$  - загальна кількість порушених обмежень при вирішенні технологічної проблеми  $TP_j$  (тобто загальна сума порушених обмежень по всіх її станах).

Відповідно, до всього технологічного процесу отримаємо такі кількісні характеристики:

$$TPr_i.Satisfied = \sum_{p_1=1}^{j_{max}} TP_j.Satisfied; \quad TPr_i.Violated = \sum_{p_2=1}^{j_{max}} TP_j.Violated,$$

де  $j \in [1..j_{max}]$ ,  $j_{max}$  - максимальна кількість проблем в технологічному процесі,  $TPr_i.Satisfied$  - загальна кількість задоволених обмежень в технологічному процесі  $TPr_i$ ,  $TPr_i.Violated$  - загальна кількість порушених обмежень в технологічному процесі  $TPr_i$ .

Ступенем задоволення ( $sd$ ) стану технологічної проблеми  $TPS_k$  з накладеною системою обмежень  $Constr_k^{syst.} = \{c_1 : rd_1, c_2 : rd_2, \dots, c_l : rd_l\}_{l \in N}$  будемо вважати середнє арифметичне ступенів релевантності всіх задоволених обмежень в системі  $Constr_k^{syst.}$  при вирішенні стану технологічної проблеми  $TPS_k$ :

$$TPS_k.sd = \left( \sum_{t=1}^{m_k} rd_t \right) / m_k, m_k \leq l;$$

$$rd_t \in \{rd_i\}_{i=1..l}, t \in [1..m_k].$$

Ступенем незадоволення (порушення) ( $vd$  – violated degree) стану технологічної проблеми  $TPS_k$  з системою обмежень  $Constr_k^{syst.} = \{c_1 : rd_1, c_2 : rd_2, \dots, c_l : rd_l\}_{l \in N}$  будемо вважати середнє арифметичне

ступенів релевантності всіх порушених обмежень з накладеної множини  $Constr_k^{syst.}$  при вирішенні стану технологічної проблеми  $TPS_k$ :

$$TPS_k.vd = \left( \sum_{t_1=1}^{n_k} rd_{t_1} \right) / n_k, n_k \leq l,$$

$$rd_{t_1} \in \{rd_{t_2}\}_{t_2=1..l}, t_1 \in [1..n_k].$$

Ступенем задоволення технологічної проблеми  $TP_j$  з накладеною ієрархією обмежень  $Constr_j^{Hrch.} = \bigcup_{k=1..k_{max}} Constr_k^{Syst.}$  будемо вважати середнє арифметичне значення ступенів задоволення всіх станів технологічної проблеми:

$$TP_j.sd = \left( \sum_{r=1}^{k_{max}} TPS_k.sd \right) / k_{max},$$

де  $k_{max}$  - кількість станів в технологічній проблемі  $TP_j$ .

Ступенем порушення технологічної проблеми  $TP_j$  з накладеною ієрархією обмежень  $Constr_j^{Hrch.} = \bigcup_{k=1..k_{max}} Constr_k^{Syst.}$  будемо вважати середнє арифметичне значення ступенів незадоволення всіх станів технологічної

проблеми:  $TP_j.vd = \left( \sum_{r_1=1}^{k_{max}} TPS_k.vd \right) / k_{max}$ .

Ступенем задоволення технологічного процесу  $TPr_i$  з накладеною ієрархією обмежень  $Constr_i^{Hrch.} = \bigcup_{j=1..j_{max}} Constr_j^{Hrch.}$  будемо вважати середнє арифметичне значення ступенів задоволення всіх технологічних проблем в

рамках даного процесу  $TPr_i$ :  $TPr_i.sd = \left( \sum_{o=1}^{j_{max}} TP_j.sd \right) / j_{max}$ , де  $j_{max}$  - кількість

технологічних проблем  $TP_j$  в технологічному процесі  $TPr_i$ .

Ступенем порушення технологічного процесу  $TPr_i$  з накладеною ієрархією обмежень  $Constr_i^{Hrch.} = \bigcup_{j=1..j_{max}} Constr_j^{Hrch.}$  будемо вважати середнє



арифметичне значення ступенів незадоволення всіх технологічних проблем в рамках даного технологічного процесу  $TPr_i$ :  $TPr_i.vd = (\sum_{\alpha_1=1}^{j_{max}} TP_j.vd) / j_{max}$ .

Таким чином, введений спосіб оцінки перебігу технологічних проблем дозволяє оцінити ефективність застосування розробленої інтелектуальної системи на фактичних даних про нештатні ситуації, що виникають при бурінні НГС.

#### 4.4 Розрахунок значення ефективності від впровадження розробленої інтелектуальної системи

Впровадження інтелектуальної системи визначається рядом особливостей, що дозволяють виконати загальну оцінку ефективності впровадження. Використаємо методику оцінки ефективності представлену в [145], яка базується на обчисленні загальної оцінки шляхом її розкладу на складові прямого, якісного та стратегічного впливу.

Під прямим впливом розуміють пряму фінансову віддачу, що є наслідком впровадження системи інтелектуальної підтримки прийняття рішень на галузевому підприємстві нафтогазової промисловості. Основна особливість якісної складової оцінки полягає в її безпосередньому впливі на загальну дохідність підприємства. Стратегічна складова оцінки визначається в певному періоді (середньостроковий, довгостроковий), наприклад при аналізі аварійності на видобувному підприємстві – зменшенні затрат календарного часу на ліквідацію ускладнень, зменшення втрат проходки за рахунок ускладнень та аварій.

Для оцінки стратегічної ефективності від запровадження системи інтелектуальної підтримки прийняття рішень на основі обмежень (СІППРО) використаємо один із параметрів аналізу аварійності, яка мала місце на свердловинах Прикарпатського УБР у період з 2006 по 2010 рр., а саме,

фактичних параметрів затрат календарного часу на ліквідацію ускладнень та нештатних ситуацій.

Почнемо розгляд з введення параметрів затрат календарного часу на ліквідацію ускладнень і нештатних ситуацій по Охтирському і Долинському нафтопромислових районах (див. таблицю 4.1) на основі фактичних даних аналізу аварійності по свердловинах Прикарпатського УБР.

Таблиця 4.1.

Статистичні дані затрат календарного часу на ліквідацію ускладнень і нештатних ситуацій (2006-2010 рр.)

	Затрати календарного часу за роками, год.				
	2006	2007	2008	2009	2010
Охтирський нафтопромисловий район	9073	1580	387	2016	0
Долинський нафтопромисловий район	1941	0	115	316	1964
<b>Всього, год.</b>	<b>11014</b>	<b>1580</b>	<b>502</b>	<b>2332</b>	<b>1964</b>

Для представленої вибірки знайдемо основні числові характеристики:  $\bar{x}_B$  - вибірккову середню величину,  $D_B$  - дисперсію вибірки,  $S$  - середнє квадратичне відхилення вибірки, за відповідними формулами:

$$\bar{x}_B = \frac{\sum_i n_i \cdot x_i}{n}, \text{ де } n = 5 - \text{об'єм вибірки;}$$

$$D_B = \frac{\sum_i x_i^2 \cdot n_i}{n} - (\bar{x}_B)^2, S = \sqrt{\frac{n}{n-1} \cdot D_B}.$$

Зауважимо, що всі вищенаведені величини є важливими для знаходження довірчого інтервалу затрат календарних годин на ліквідацію ускладнень і нештатних ситуацій, а також для визначення індексу ефективності запровадження інтелектуальної системи.

Отже, за даними формулами і таблицею 4.1 знаходимо числові характеристики:

$$\bar{x}_B = \frac{11014 + 1580 + 502 + 2332 + 1964}{5} = 3478,4 \text{ год.}$$

$$D_B = \frac{11014^2 + 1580^2 + 502^2 + 2332^2 + 1964^2}{5} - (3478,4)^2 = 14571157,44.$$

$$S = \sqrt{\frac{5}{4} \cdot 14571157,44} = 4267,78 \text{ год.}$$

Оцінка ефективності та надійності роботи СІПРО після впровадження може бути обґрунтована базуючись на формальній основі системи, а саме методології ймовірнісного задоволення обмежень, що детально представлено в роботах [146-148]. Використаємо дану методологію для виведення коефіцієнта надійності  $\gamma$  як ймовірності рішення системою деякої виділеної випадковим чином технологічної проблеми. Тоді, в термінах формулювання технологічних проблем представлених в попередніх розділах матимемо, що  $TP_{prb} = (V, D, Constr^{prb})$ , де  $Constr^{prb} = \{(c_1, p_1), \dots, (c_n, p_n)\}$ .

На ймовірнісному розподілі можливих та фактичних технологічних проблем відповідно матимемо, що:  $prb(TP_j) = Pr b(TP_j = TPF) = \prod \{p_i | c_i \in Constr_{TP_j}^{set}\} \times \prod \{1 - p_i | c_i \in (Constr_{TP_j}^{prb} - Constr_{TP_j}^{set})\}$ .

Розглянемо один з найпростіших та найбільш поширених випадків згідно отриманих вище формальних результатів, а саме випадок ймовірнісного формулювання технологічної проблеми хоча би з двома змінними  $v_1 \in V_1$ ,  $v_2 \in V_2$  та відповідними доменами  $D_{V_1}$  та  $D_{V_2}$ . Введемо мінімальний набір з трьох обмежень  $\{(c_1, 0.5), (c_2, 0.6), (c_3, 0.7)\}$ . В результаті обчислимо відповідний ймовірнісний розподіл та оцінимо ймовірнісну надійність рішення

$$\gamma = Pr b(\Psi^{sol} \models ConstrSet^{TPF}) = [1 - Pr b((V, D, \{c_1, c_2, c_3\}) = TPF)] = [1 - (1 - p_1) \times p_2 \times p_3] = [1 - (1 - 0.5) \times 0.6 \times 0.7] = 0.79 \approx 0.8$$

На основі отриманого розрахунку та доступного розміру вибірки з якою оперуємо для оцінювання затрат календарного часу на усунення ускладнень і нештатних ситуацій при запровадженні розробленої інтелектуальної системи вважатимемо, що надійність цієї системи становить відповідно  $\gamma = 0,8$ .

Побудуємо довірчий інтервал для параметра “затрати календарного часу на ліквідацію ускладнень” на видобувних підприємствах на основі визначеної вибірки. Зауважимо, що для побудови цього інтервалу використовується випадкова величина:

$$t = \frac{\bar{x}_B - a}{\frac{S}{\sqrt{n}}}$$

де  $a$  – оцінюваний параметр (в нашому випадку – затрати календарного часу).

Зауважимо, що випадкова величина  $t$  має розподіл Стьюдента [149] з  $k = n - 1 = 5 - 1 = 4$  ступенями свободи. Тоді

$$\gamma = 0,8 = 2 \int_0^{t_\gamma} f(t) dt = P\left(\bar{x}_B - \frac{t_\gamma \cdot S}{\sqrt{n}} < a < \bar{x}_B + \frac{t_\gamma \cdot S}{\sqrt{n}}\right),$$

оскільки  $f(t)$  для розподілу Стьюдента є функцією парною. У вище наведеній формулі, величина  $P$  – це ймовірність знаходження оцінюваного параметра в знайденому довірчому інтервалі.

Обчисливши за даним статистичним розподілом  $\bar{x}_B$  та  $S$  і визначивши за таблицею розподілу Стьюдента значення  $t_\gamma$ , будемо мати довірчий інтервал

$$\bar{x}_B - \frac{t_\gamma \cdot S}{\sqrt{n}} < a < \bar{x}_B + \frac{t_\gamma \cdot S}{\sqrt{n}} \text{ для вибраного параметра } a.$$

Зауважимо, що для визначення довгострокової стратегічної ефективності при великих обсягах вибірки, а саме при  $n > 30$ , на підставі центральної граничної теореми теорії ймовірностей (теореми Ляпунова) [150] розподіл Стьюдента наближається до нормального закону розподілу. Тоді випадкова величина  $t_\gamma$  знаходиться за таблицею значень функції Лапласа [151].

Оскільки  $\gamma = 0,8$  і  $k = n - 1 = 5 - 1 = 4$  то з таблиці розподілу Стьюдента маємо, що  $t_\gamma = 1,533$ .

Обчислимо кінці довірчого інтервалу:

$$\bar{x}_B - \frac{t_\gamma \cdot S}{\sqrt{n}} = 3478,4 - \frac{1,533}{\sqrt{5}} \cdot 4267,78 = 552,5 \text{ год.},$$

$$\bar{x}_B + \frac{t_\gamma \cdot S}{\sqrt{n}} = 3478,4 + \frac{1,533}{\sqrt{5}} \cdot 4267,78 = 6404,3 \text{ год.},$$

Отже, на основі визначеного довірчого інтервалу можна зробити висновок, що з надійністю  $\gamma = 0,8$  розроблена інтелектуальна система при впровадженні її на видобувних підприємствах дозволить зменшувати затрати календарного часу на ліквідацію ускладнень і нештатних ситуацій та утримувати дану величину в межах від 552,5 год. до 6404,3 год. на протязі кожного року.

Зауважимо, що величина верхньої межі є досить великою (6404,3 год.), бо в проведеному дослідженні брався до уваги аналіз аварійності в 2006 році, коли затрати календарного часу на ліквідацію ускладнень склали 11014 год. Нижня межа довірчого інтервалу вказує на те, що з ймовірністю 0,8 можна вважати, що затрати календарного часу на усунення ускладнень та нештатних ситуацій (552,5 год.) при запровадженні на підприємстві інтелектуальної системи суттєво нижчі, за винятком 2008 року, ніж фактичні дані.

Обчислимо індекс стратегічної ефективності ( $I_{СТР}$ ) при запровадженні розробленої інтелектуальної системи на видобувних підприємствах Прикарпатського УБР. Отже,

$$I_{СТР} = \frac{\frac{2t_\gamma \cdot S}{\sqrt{n}}}{\bar{x}_B} = \frac{2 \cdot 1,533 \cdot 4267,78}{\sqrt{5} \cdot 3478,4} = \frac{5851,8}{3478,4} = 1,68.$$

Оскільки величина індексу  $I_{СТР} = 1,68$  є більшою за одиницю, то запровадження розробленої інтелектуальної системи на видобувних підприємствах Прикарпатського УБР є доцільним і економічно ефективним.

Зауважимо, що для оцінки ефективності впровадження інтелектуальної системи було використано лише дані одного параметра, а саме, затрат календарного часу на усунення ускладнень при виникненні аварійних ситуацій. Однак, навіть використання цього параметра при дослідженні показало, що запровадження системи є економічно ефективним в середньостроковій перспективі.

Фактичні розрахунки виконані на основі даних Бориславської експедиції Прикарпатського УБР та НГВУ “Полтаванафтогаз” дозволяють оцінити загальний очікуваний економічний ефекти від впровадження розробки приблизно 56 тис. грн. та 86 тис. грн. в рік для одного родовища відповідно.

### **Висновки до четвертого розділу**

1. Запропоновано формально-логічне обґрунтування та структуру системи інтелектуальної підтримки прийняття рішень на основі обмежень, що базується на доменних знаннях про процес буріння нафтових і газових свердловин, представлених у формі обмежень, що є основою процедур вирішення нештатних ситуацій які виникають в технологічному процесі.

2. Створена інтелектуальна система базується на обмеженнях та дозволяє проводити демонстрування рішень технологічної проблеми запропонованої об'єктом процесу прийняття рішення і на основі такого аналізу генерує відповідний зворотний зв'язок, що забезпечує виведення експертних рекомендацій по виконанню необхідних технологічних дій для усунення поточної нештатної технологічної ситуації, що інтерпретується системою як процес задоволення певної множини, системи або ієрархії обмежень, накладеної на процес буріння.

3. Базу знань створеної інтелектуальної системи на основі обмежень наповнено описами ходу технологічного процесу буріння, технологічних проблем, що виникають, станів технологічних проблем, технологічних помилок, обмежень та експертних порад системи, що дозволило створити середовище підтримки прийняття рішень щодо запобігання нештатних ситуацій в умовах невизначеності при управлінні процесом буріння нафтових і газових свердловин.

4. Виконано розрахунок значення ефективності розробленої інтелектуальної системи шляхом обчислення величини індексу стратегічної ефективності, що дозволяє стверджувати загальну доцільність і економічну ефективність впровадження системи.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз технологічного процесу буріння нафтових і газових свердловин як об'єкта керування в інтелектуальній системі шляхом визначення структури моделі процесу буріння свердловин роторним способом, що дозволило побудувати дворівневу стратегію керування процесом буріння з визначенням контуру на основі знань для контролю та запобігання нештатних ситуацій у процесі прийняття керуючих рішень. Проаналізовано існуючі автоматизовані системи керування технологічним процесом буріння шляхом визначення основних параметрів контролю в них, що дозволяє оцінити та порівняти функціональність таких систем і виділити в них елементи інтелектуальності. Обґрунтовано спосіб аналізу можливих нештатних ситуацій у процесі буріння шляхом виділення технологічних обмежень, порушення яких призводить до виникнення нештатних ситуацій, що дозволяє формувати процедури прийняття рішень при керуванні технологічним процесом.

2. Запропоновано формальний опис постановки задачі моделювання технологічного процесу буріння на основі обмежень через контроль множини помилок шляхом розгляду коректних рішень (дій операторів технологічного процесу) як таких, які не порушують технологічних обмежень, накладених на процес, що дозволяє при виникненні нештатної ситуації об'єкту прийняття рішень слідувати по послідовності станів із множини можливих у технологічній проблемі, котра виникає в технологічному процесі буріння, орієнтуючись за повідомленнями зворотного зв'язку, в яких система видає експертні рекомендації щодо прийняття правильних технологічних рішень.

3. Уперше обґрунтовано та досліджено технологію інтелектуальної підтримки прийняття рішень для керування технологічним процесом буріння на основі наборів технологічних параметрів із заданими множинами обмежень. Визначено множину базових технологічних параметрів, які описують процес буріння, шляхом побудови відповідних систем обмежень ранжованих по ступеню релевантності, що дозволяє, на відміну від існуючих інтелектуальних систем, ідентифікувати нештатну ситуацію технологічного процесу як

заслідок порушення контрольованими технологічними параметрами накладених множин, систем та ієрархій обмежень.

4. Синтезовано алгоритм функціонування системи інтелектуальної підтримки прийняття рішень при запобіганні нештатних технологічних ситуацій шляхом оцінювання технологічних параметрів у формі множин преференцій, що дає змогу визначати їх вплив на процес задоволення та порушення обмежень.

5. Розроблено технологію контролю процесу рішення нештатних технологічних ситуацій, які виникають у процесі буріння нафтових і газових свердловин засобами системи інтелектуальної підтримки прийняття рішень на основі обмежень, що дозволяє класифікувати й аналізувати помилки шляхом зіставлення поточного технологічного рішення з закладеними в системі ієрархіями обмежень, що регулюється діалогами зворотного зв'язку.

6. Реалізовано систему інтелектуальної підтримки прийняття рішень для запобігання нештатних ситуацій у процесі буріння, яка базується на знаннях про процес буріння нафтових і газових свердловин у формі обмежень. Система відображає процес рішення технологічної проблеми об'єктом прийняття рішення та на основі його аналізу генерує відповідні експертні рекомендації щодо виконання необхідних технологічних дій щодо усунення поточної нештатної технологічної ситуації, що інтерпретується розробленою інтелектуальною системою як задоволення технологічних обмежень, накладених на процес буріння в умовах невизначеності та неповноти інформації.

7. Розроблено методику запобігання нештатних ситуацій у процесі буріння нафтових і газових свердловин, яку впроваджено в Прикарпатському УБР та НГВУ "Полтаванафтогаз"; отримані результати дослідження також прийняті до впровадження підприємством "Мікрол" та "Івано-Франківським Спеціальним конструкторським бюро засобів автоматизації" м. Івано-Франківська 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 контролю технологічних помилок у формі обмежень може застосовуватись також для пошуково-розвідувального й експлуатаційного буріння нафтових і газових свердловин у формі предметно-незалежної інтелектуальної оболонки.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Про схвалення енергетичної стратегії України на період до 2030 року: розпорядження Кабінету Міністрів України від 15.03.2006р., № 145. – Режим доступу:  
<http://zakon.rada.gov.ua/cgi-bin/laws/main.cgi.nreg='45-2006%FO>.
2. Халявко М.П. Нафтогазовий комплекс України. Напрямки реалізації основних положень енергетичної стратегії до 2030 року / М.П. Халявко // Хімічна промисловість. – 2007.– №2. – С.3-10.
3. Saputelli L. Real-time decision-making for value creation while drilling : «SPE/IADC middle east drilling technology conference & exhibition», 20-22 October 2003, Abu Dhabi / L.Saputell, V.Kelessidis etc . – Abu Dhabi, 2003. - P.1-19.
4. Семенцов Г.Н. Автоматизація процесу буріння свердловин: [навч.посібник] / Г.Н.Семенцов. - Івано-Франківськ: ІФНТУНГ – 1997. – 300 с.
5. Семенцов Г.Н. Автоматизация и средства контроля при бурении скважин / Г.Н.Семенцов, Б.Н.Локотош, С.Ф.Кукурудз и др. - Ужгород: Карпаты. – 1975. – 135 с.
6. Currier R.G. Project Engineer Bucyrus-Erie Company / R.G.Currier // «Status Report on Automated Drills». Presented at the O.P.M.A. Electrical Division, Annual Meeting. June, 1972. – 86р.
7. Laswell, W.M. A three part series entitled: "The Pro's and Con's of Rotary Blasthole Drill Design" / W.M.Laswell , J.L.Laswell // Mining Engineering, vol. 30 (June, July, August 1978) No. 6,7,8. – P. 124-141.
8. Li T.M. Rotary drilling with automated controls - new force in open-pit blast hole production" / T.M.Li // Coal Age Operating Handbook of Coal Surface Mining and Reclamation, vol. 2(1974) Chironis, N,P, ed., McGraw-Hill Inc., New York. - P. 212-219.
9. Unique Well Identifier Format. – Режим доступу:

[http://earth.gov.bc.ca/royp-bin/phcgi.exe?PH\\_QKC=DOCUWI&PH\\_APP=RMSprodApp&PH\\_HTML=DOCUWI.htm](http://earth.gov.bc.ca/royp-bin/phcgi.exe?PH_QKC=DOCUWI&PH_APP=RMSprodApp&PH_HTML=DOCUWI.htm)

10. Weatherford Laboratories. – Technical papers. Режим доступу:  
<http://www.humble-inc.com>
11. Directional Drilling Data Sheets. Режим доступу:  
<http://www.halliburton.com/ps/Default.aspx%3Fnavid=18&pageid=48&folderid=MSE%253A%253A1039614541679204&pagenum=4&languageFilter=MSE:108076718619169>
12. Семенцов Г.Н. Автоматизації технологічних процесів у нафтовій і газовій промисловості: [навчальний посібник] / Г.Н.Семенцов, Я.Р.Когуч, Я.В.Куровець, М.М.Дранчук. - Івано-Франківськ: ІФНТУНГ. – 2009. – 300с.
13. Филиал ИПЦ "Геотест" ОАО НПФ "Геофизика". информационно-измерительные системы в бурении. - Режим доступу:  
<http://www.leuza.ru/>
14. Контроль параметров бурения КОНТУР-2: ООО НПФ "Геосфера" . - Режим доступу: <http://www.geosferatver.ru/control/kontur-2/kontur-2.php>
15. ЗАО "АМТ". Станция контроля. АМТ-121 Станция геолого-технологического контроля бурения и исследования скважин. - Режим доступу:  
<http://amt-s.spb.ru/amt121.html/>
16. Самарские горизонты. Научно-производственное предприятие. - Режим доступу:  
<http://sagor.ru/equipment/control/>
17. Сервисная компания "Тюменьпромгеофизика" (ТПГ). Геолого-технологические исследования и газовый каротаж. - Режим доступу:  
<http://www.tpg.ru/main.php?eng=&pid=7&id=37>
18. Івано-Франківське СКБ ЗА. Каталог продукції. Прилади контролю процесу буріння. - Режим доступу:  
[http://www.skbza.if.ukrtel.net/cat\\_14ua.htm](http://www.skbza.if.ukrtel.net/cat_14ua.htm)

19. ЗАО Московское СКБ "ОРЕОЛ". - Режим доступу:  
<http://www.skboreol.ru/Products/products1.htm>
20. Комплекс средств наземного контроля и управления процессом бурения КУБ-2. - Режим доступу:  
<http://www.geo.oilru.ru/catalog/group/product/?2193>
21. Горбійчук М.І. Оптимізація процесу буріння глибоких свердловин: [навч.посібник] / М.І.Горбійчук, Г.Н.Семенов. - Івано-Франківськ: Факел. – 2003. – 493 с.
22. Горбійчук М. І. Адаптивне керування процесом буріння глибоких свердловин: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук спец.: 05.13.07 – «Автоматизація технологічних процесів» / М.І.Горбійчук. – Львів: НУ «ЛПШ». – 1999. – 35 с.
23. Кропивницька В.Б. Оптимальне керування процесом буріння нафтових і газових свердловин з дискретно-неперервною зміною керувальних дій: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.13.07: «Автоматизація технологічних процесів» / В.Б.Кропивницька. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ – 2007. – 20 с.
24. Семенов Г.Н. Нечіткі моделі технологічних процесів і їх ідентифікація / Г.Н.Семенов, І.І.Чигур // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. Серія: Технічна кібернетика та електрифікація об'єктів паливно-енергетичного комплексу. – Івано-Франківськ: ІФДТУНГ.- 1996. Вип. 33(6). – С. 12-17.
25. Гуменюк Т.В. Метод ідентифікації станів бурової установки / Т.В.Гуменюк, В.Б.Кропивницька, Д.О.Ткачівський // Вісник Хмельницького національного університету. – Технічні науки, том 1. – 2010. – С. 94-97 .
26. Андреев Е.Б. SCADA-системы: взгляд изнутри / Е.Б.Андреев, Н.А.Куцевич, О.В.Синенко. - М.: Издательство «РТСофт». – 2004.– 176с. – Режим доступу :  
[http://bankknig.com/estesstv\\_nauki/57348-scada-sistemy-vzglyad-iznutri.html](http://bankknig.com/estesstv_nauki/57348-scada-sistemy-vzglyad-iznutri.html)

17. Пьявченко Т.А. Проектирование АСУТП в SCADA-системе / Т.А. Пьявченко. – Таганрог: Издательство «Технологический институт ЮФУ». – 2007. – 84с. – Режим доступа :  
<http://www.kodges.ru/65266-proektirovanie-asutp-v-scada-sisteme.html>
28. ООО «НПА Вира Реалтайм». Продукты: MOSCAD (Motorola). Применение системы MOSCAD в нефтегазовой промышленности. - Режим доступа:  
<http://www.rlt.ru/products/moscad/moscadoilgas.html>
29. Jan A. The new drilling control and monitoring system / A.Jan, M.Sokalski // Acta Montanistica Slovaca. – Rocnik, 9, cislo 3. – 2004. - P. 145-151. - Режим доступа:  
<http://actamont.tuke.sk/pdf/2004/n3/1artymiuk.pdf>
30. Bentec Drilling & Oilfield Systems: Система контроля параметров бурения InfoDRILL. - Режим доступа:  
<http://www.bentec.de/ru/produkcija/ehlektricheskie-pribory/sistema-kontrolja-parametrov-burenija-infodrill/index.html>
31. Le Tourneau. Drilling Systems. OEM Digital Drilling Control System(TM). - Режим доступа:  
[http://www.letourneautechnologies.com/drilling/OEM\\_equipment\\_digitaldrilling.php](http://www.letourneautechnologies.com/drilling/OEM_equipment_digitaldrilling.php)
32. TTS Group ASA. - Режим доступа:  
[http://www.ttsgroup.com/PageFiles/2955/TTS % 20 Energy\\_ Product\\_ 0411\\_ Russian.pdf](http://www.ttsgroup.com/PageFiles/2955/TTS%20Energy_Product_0411_Russian.pdf)
33. Jerome Schubert. Managed-Pressure Drilling: Kick Detection and Well Control. Section: "Kick Detection While Drilling", "Society of Petroleum Engineer- Journal of Petroleum Technology(JPT), Well control focus archived 2010/01/15". - Режим доступа:  
<http://www.spe.org/jpt/print/archives/2010/01/15WCFocus.pdf>
34. Technical Papers Schlumberger. – Режим доступа:  
[http://www.slb.com/resources/technical\\_papers.aspx](http://www.slb.com/resources/technical_papers.aspx)

35. Исакович Р.Я. Автоматизация производственных процессов нефтяной и газовой промышленности: [учебник для вузов] / Р.Я.Исакович, В.И.Логинов, В.Е.Попадько. - М.: Недра, 1985. - 424 с.
36. Семенцов Г.Н. Оптимальное управление процессом бурения нефтяных и газовых скважин: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук: спец. 05.13.07 - «Автоматизация технологических процессов и производств» / Г.Н.Семенцов. - М.: МУНГ им.Губкина. - 1990. - 44 с.
37. Бражников В.А. Информационное обеспечение оптимального управления бурением скважин / В.А.Бражников, А.А.Фурнэ. - М.: Недра. - 1989. - 208с.
38. Ситников Н.Б. Моделирование и оптимизация процесса бурения геологоразведочных скважин: автореф. дис. на здобуття наукового ступеня докт. техн. наук: спец.: 05.13.07 - «Автоматизация технологических процессов и производств» / Н.Б.Ситников. - Екатеринбург, 2000. - 41 с.
39. Петров И.П. Исследование режимов бурения и разработка методов и средств их оптимизации: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук спец.: 05.13.07 - «Автоматическое управление технологическими процессами в горной промышленности» / И.П.Петров. - Свердловск. - 1975. - 48 с.
40. Галли И.М. Оптимизация нагрузки и скорости вращения для буров вращательного типа, предназначенных для бурения горных пород / И.М.Галли, Г.Б.Вудс // API Drilling and Production Practive, 1963. - P.48-73.
41. Чупров В. Измерение параметров в процессе бурения вблизи от долота / В.Чупров, А.Бельков, А.Бикинеев, Ю.Мишин, Р.Шайхутдинов, С.Шибянов // Бурение и нефть. - 2004, №6. - С.22-23.
42. Булатов А.И. Справочник инженера по бурению / А.И.Булатов, А.Г.Аветисов. - М.:Недра, 1985. - 840 с.
43. Козловский Е.А. Автоматизация процесса геолого-разведочного бурения / Е.А.Козловский, Р.Х.Гафиятуллин. - М.:Недра, 1977. - 215 с.

14. Булатов А.И. Справочник инженера по бурению. Том 2 / А.И.Булатов, А.Г.Аветисов. - М.:Недра, 1985. – 191 с.
15. Семенцов Г.Н. Основы мониторингу технологичних об'єктів нафтогазової галузі: [навч.посібник] / Г.Н.Семенцов, М.М.Дранчук, О.В.Гутак, Я.Р.Когуч, М.І.Когутяк, Я.В.Куровець. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2010. – 808с.
46. Горбійчук М.І. Оптимальне керування процесом механічного буріння / М.І.Горбійчук, В.Б.Кропивницька // Нафтова і газова промисловість. – 2008, №3. – С.20-22.
47. Eronimi I.E. A dynamic model for rotary rock drilling / I.E.Eronimi, W.H.Somerton, D.M.Auslander // Trans. ASME, Vol.104, – June 1981, – P. 108-120.
48. Aboujaoude C.E. Modeling, simulation and control of rotary blasthole drills: Master Thesis / C.E.Aboujaoude // Department of Electrical Engineering. – MgGill University, Dec., 1991. – 116 p.
49. Cunningham R.A. An empirical approach for relating drilling parameters / R.A.Cunningham // Jour. Pet. Tech., July 1978. - P.987-991.
50. El-Hadidi M.S.M. The Study of Rock Properties for Prediction of Rock Drillability in Computerized Drilling Programs / M.S.M. El-Hadidi; thesis, University of California, Berkeley, 1970. – 168p.
51. Galle E.M. Best constant weight and rotary speed for lowest cost drilling / E.M.Galle , H.B. Woods // Oil and Gas Jour. - November, 1960. – P. 167-172.
52. Maurer W.C. The perfect cleaning theory of rotary drilling / W.C.Maurer // Jour. Pet. Tech., november, 1962, P.1270-1274.
53. Warren T.M. Drilling model for soft formation bits / T.M.Warren // Jour. Pet. Tech., june, 1981. - 33 p.
54. Wijk G. Atlas Copco AB. Rotary Drilling Prediction / G.Wijk // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.- 1991, vol. 28. - P.35-42.
55. Maurer W.C. The perfect cleaning theory of rotary drilling / W.C.Maurer // Jour. Pet. Tech., november, 1962, P.1270-1274.

56. Teale R. The Concept of Specific Energy in Rock Drilling / R.Teale // Intl. Jour. Rock Mech. Mining Sci. – 1964. – P.57-73.
57. Simon R. Discussion of a Laboratory Study of Rock Breakage by Rotary Drilling / R.Simon // Jour. Pet. Tech., dec., 1959. – P.78-80.
58. Simon R. Energy Balance in Rock Drilling / R. Simon // paper SPE 499 presented at the 1963 SPE Conference on Drilling and Rock Mechanics, Austin, TX, jan. 23-24. – 1963. – P.298-306
59. Somerton W.H. A Laboratory Study of Rock Breakage by Rotary Drilling / W.H.Somerton // Trans., AIME. – 1959. – P.92-97.
60. Teale R. The Concept of Specific Energy in Rock Drilling / R.Teale // Intl. Jour. Rock Mech. Mining Sci, №2. – 1965. – P.57-73.
61. Warren T.M. Factors Affecting Torque for a Tricone Bit / T.M.Warren // Jour. Pet. Tech., sept, 1984. - P.1500-1508.
62. Ясов В.Г. Осложнения и аварии при бурении нефтяных и газовых скважин: [учебное пособие] / В.Г.Ясов. – Ивано-Франковск: ИФДТУНГ, 2004. – 207с.
63. Коцкулич Я.С. Буріння нафтових і газових свердловин: [підручник] / Я.С.Коцкулич, Я.М.Кочкодан. – Коломия: Вік, 1999. - 504с.
64. Вовк Р.Б. Аналіз нештатних ситуацій процесу буріння на основі фізичних параметрів в формі технологічних обмежень: зб.наук.праць по матеріалам 3-ої наук.-практ. конф. студентів і молодих учених «Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання», 29-30 листопада 2011р. м.Івано-Франківськ / Р.Б.Вовк, Л.О.Бойчук, М.М.Демчина, Д.Р.Дзиндра. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2011 – С. 41-42.
65. Вовк Р.Б. Структуризація технологічних обмежень при вимірюванні фізичних параметрів процесу буріння: матеріали 6-ої міжнар. наук.-техн. конф. і виставки «Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання», 29 листопада - 2 грудня 2011р., м.Івано-Франківськ / Р.Б.Вовк, Л.О.Бойчук, В.М.Юрчишин М.М.Демчина.



– Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2011. – С. 263-267.

66. Maliverno A. Real-Time 3D Earth Model Updating while drilling a horizontal well: SPE77525 Annual Technical Conference and Exhibition, 29 September - 2 October 2002, San Antonio / A.Maliverno, B.Andrews, etc. – San Antonio, Texas, 2002 – P. 61-72.
67. Branch J. Real-time well construction monitoring – A case history of Sincor's Heavy Oil Project: SPE/IADC 67757 Drilling Conference, 27 February - 1 March 2001, Amsterdam / J.Branch, K.Andersen, etc. – Amsterdam, Netherlands. 2001. – P. 56-70.
68. Lah Zin Che. Real-Time data analysis while drilling provides risk management for both geological and geometric uncertainties in the Sotong K20 reservoir: SPE-64477 Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, 16-18 October 2000, Brisbane / Z. C. Lah, L.Scring, etc. – Brisbane, Australia, 2000 – P.68-79
69. Boyadjieff G. Design considerations and field performance of an advanced automatic driller: SPE/IADC Drilling Conference, 19-21 February 2003, Amsterdam / G.Boyadjieff, D.Murray, etc. – Amsterdam, The Netherlands, 2003. – P. 45-66
70. Noble engineering. - Режим доступу:  
<http://www.nobleeng.co.uk/>
71. Mansure A.J. A probabilistic reasoning tool for circulation monitoring based on flow measurements: Annual Technical Conference and Exhibition, 3-6 October 1999, Houston / A.J.Mansure, G.I.Whitlow, etc. – Houston, Texas, 1999. – P.13-26.
72. Dubinsky V. An interactive drilling dynamics simulator for drilling optimization and traing: SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 27-30 September 1998, New Orleans / V. Dubinsky et al. - New Orleans, Louisiana, 1998 – P.35-45.
73. Petersen J. Kick with lost circulation simulator, a tool for design of complex well control situations: Paper SPE 49956 presented at the SPE Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition, 12–14 October 1998, Perth / J. Petersen,

- R.Rommetveit, B. Tarr. – Perth, Australia, 1998. – P. 25-29.
74. Kelessidis V.C. A predictive model of mud removal efficiency using historical well data: 8<sup>th</sup> Petroleum Computer Conference, July 1993, New Orleans / V.C.Kelessidis, S.Chakravarthy, B.Ferreol, L.Prouvost, D.Zighed. – New Orleans, LA, 1993.– P. 1-8. – Режим доступу:  
<http://drillinglab.mred.tuc.gr/Publications/07.pdf>
75. Finch F.E. Using the G2 diagnostic assistant for real-time fault diagnosis: European conference on industrial applications of knowledge-based diagnosis, 17-18 October, 1991, Segrate (Milan) / F.E.Finch, G.M.Stanley, S.P.Fraleigh. – Segrate (Milan), Italy, 1991. – P. 1-15. – Режим доступу:  
<http://gregstanleyandassociates.com/whitepapers/cise-gda/cise-91paperwithheader.htm>
76. Алгоритм Мамдани в системах нечеткого вывода. – Режим доступу:  
<http://habrahabr.ru/blogs/algorithm/113020/>
77. Dashevskiy D. Application of neural networks for predictive control in drilling dynamics: SPE56442 Annual Technical Conference and Exhibition, 3-6 October 1999, Houston / D.Dashevskiy, V.Dubinsky, J.D.Macpherson. – Houston, Texas, 1999. – P. 1-8.
78. Brett P. Innovative technology advanced use of electromagnetic MWD offshore in southern North Sea: IADC/SPE81628 Underbalanced Technology Conference and Exhibition held in Houston, 25-26 March 2003, Houston / P.Brett, D.Weisbeck, R.Graham. – Texas, U.S.A, 2003. – P. 21-30.
79. Lurie P. Smart drilling with electric drill string: SPE/IADC Drilling Conference, 19-21 Feb. 2003 / P. Lurie, P. Head, J. Smith. – 2003. – P. 1-13.
80. Nikolaou M. Model predictive controllers: a critical synthesis of theory and industrial needs / M.Nikolaou. – Advances in chemical engineering series. – Academic Press. - 2001. – 50p. – Режим доступу:  
<http://pubs.chee.uh.edu/faculty/nikolaou/MPCtheoryRevised.pdf>
81. 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» / Шавранський Михайло Васильович. - Івано-Франківськ, 2003. - 168 с.

82. Лобанов В.А. Автоматизация технологических процессов бурения / В.А.Лобанов, А.В.Мнацаканов, Б.М.Муратов, А.М.Шубладзе. - М.: ВНИИЭгазпром, 1986. - 50 с.
83. Ветров А.К. Аварии в разведочном бурении и способы борьбы с ними / А.К.Ветров, А.В.Коломоец. - М.:Недра, 1969. - 256 с.
84. Идзинский В.П. Алгоритм распознавания аварий и осложнений при бурении глубоких скважин / В.П. Идзинский // Автоматиз. и телемеханиз. в нефт. пром-сти. отеч. опыт: ЭИ ВНИИОЭНГ, 1988. - № 5. - С. 7-10.
85. Липманович Я.Р. Интеллектуальные средства измерения для автоматизации объектов нефтяной и газовой промышленности / Я.Р.Липманович, М.М.Ширин, Г.О.Корсаков, В.А.Недурубов // Нов. исслед. автомат. - Киев, 1990. - С 74 - 77.
86. Аветисян Н.Г. Прогнозирование зон осыпей и обвалов при бурении в глинистых породах с АВПД / Н.Г.Аветисян, Н.Н.Кошелев, Н.А.Сидоров, Фролов Е.П. - М.:Обз. информ.ВНИИОЭНГ, Сер. Бурение. - 1980. - 54 с.
87. Аветисов А.Г. Прогнозирование, предупреждение и ликвидация прихватов с использованием статистических методов / А.Г.Аветисов, М.М.Ахмадулин, А.К.Самотой, И.А.Серенко, С.Р.Хлебников. - М.:Обз. информ./ВНИИОЭНГ; Сер. Бурение. - 1978. - 48с.
88. Пустовойтенко И.П. Предупреждение и ликвидация аварий в бурении / И.П.Пустовойтенко. -М.: Недра, 1988. - 279 с.
89. Пустовойтенко Н.И. Аварии при бурении скважин / Н.И.Пустовойтенко, О.П.Сельващук. - М.: Недра, 1988. - 279 с.
90. Семенцов Г.Н. Створення математичної моделі на принципах нечіткої логіки і її реалізація для прогнозування прихоплень бурильних труб в процесі поглиблення свердловин / Г.Н.Семенцов, М.В.Шавранський // Вісник технологічного університету Поділля. - 2002. - Том 1. - С.100-103.

1. Шавранський М.В. Особливості розробки експертних систем (ЕС) для прогнозування передаварійних ситуацій і ускладнень при бурінні свердловин / М.В.Шавранський // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. Серія: Технічна кібернетика та електрифікація об'єктів паливно-енергетичного комплексу. - Івано-Франківськ: Факел. - 1999. Вип. 36(6). - С. 60-64.
2. Barták Roman. Constraint programming: a survey of solving technology / Roman Barták AIRONews, IV(4), 1999. - P.7–11.
3. Marriott Kim. Programming with Constraints: An Introduction / Kim Marriott, Peter J. Stuckey. - MIT Press, 1998. – 483p.
4. Hentenryck Pascal Van. Constraint Satisfaction in Logic Programming / Pascal Van Hentenryck. - MIT Press, 1989. – 240p.
5. Ruttkay Zsófia. Constraint satisfaction – a survey. CWI Quaterly / Zsófia Ruttkay. 11(2&3), 1998. - P.123–161.
6. Smith Barbara M. A tutorial on constraint programming / Barbara M. Smith // Technical Report 95.14, University of Leeds, School of Computer Studies, 1995. – 21p. – Режим доступу:  
<http://citeseer.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.15.9886&rep=rep1&type=pdf>.
7. Vipin Kumar. Algorithms for constraint satisfaction problems: A survey / Vipin Kumar // AI Magazine, №13(1), 1992. – P.32–44.
8. Barták Roman. Constraint programming: In pursuit of the holy grail / Roman Barták // In Proceedings of Workshop of Doctoral Students'99, 1999. 10p. -  
Режим доступу:  
<http://citeseer.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.41.4450&rep=rep1&type=pdf>
9. Puget Jean-François. Constraint programming: A great AI success: 13th European Conference on Artificial Intelligence Proceedings, 1998 / Jean-François Puget. – John Wiley & Sons, Ltd., 1998. – P. 698-705.

100. Вовк Р.Б. Контроль станів технологічного процесу буріння на основі теорії задоволення обмежень / Р.Б.Вовк, В.І.Шекета, В.Р.Процюк // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – 2010. – № 3(25) - С. 138-144.
101. Вопияков В.А. Диспетчерское управление буровыми работами. / В.А. Вопияков, П.И. Колесников, Л.А.Афонин, П.И.Зозуля, А.Я.Небоженко.- М.:Недра, 1974.- 216 с.
102. Rudová H. Constraints with variables' annotations and constraint hierarchies: SOFSEM'98: Theory and Practice of Informatics, November 1998, Jasna, Slovakia / H.Rudová. – Jasna:Springer-Verlag LNCS 1521, 1998. – P.409–418.
103. Rudová Hana. Constraints with variables' annotations: 13th European Conference on Artificial Intelligence Proceedings, August 1998, Brighton, UK / Hana Rudová. – Brighton:John Wiley & Sons, Ltd., 1998. - P. 261-262.
104. E. Tsang. Foundations of Constraint Satisfaction. Academic Press. 1993. –  
Режим доступу:  
<http://www.brasil.net/edward/FCS.html>. ISBN 0-12-701610-4
105. Tsang E.P.K. Solution synthesis in the constraint satisfaction problem / E.P.K.Tsang, N.Foster // Technical Report CSM-142, DeptBibliography 401 of Computer Science, University of Essex, 1990. – 143p.
106. Rudová H. Constraints with variables' annotations / H. Rudová // Technical Report. FIMU-RS-98-04, Faculty of Informatics Masaryk University. – 1998. – 120p. – Режим доступу:  
<http://www.fi.muni.cz/~hanka/doc/phd.pdf>.
107. Ohlsson S. The interaction between knowledge and practice in the acquisition of cognitive skills / S.Ohlsson // In: A. Meyrowitz and S. Chipman (Eds.), Foundations of knowledge acquisition: Cognitive models of complex learning. Norwell, MA: Kluwer. - 1993. – P.147-208.
108. Вовк Р.Б. Моделювання класів технологічних проблем на основі обмежень / Р.Б.Вовк, Г.Я.Процюк // Збірник наукових праць Національного гірничого університету. – 2011. - № 36 (Т.2). – С. 130 – 138.

109. Fargier Hélène. Selecting preferred solutions in fuzzy constraint satisfaction problems / Hélène Fargier, Jérôme Lang, Thomas Schiex // In EUFIT'93, First European Congress on Fuzzy and Intelligent Technologies, volume 3, Augustinus Buchhandlung, 1993. - P.1128–1134.
110. Schiex Thomas. Possibilistic constraint satisfaction problems: In 8th International Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence, July 1992, Stanford / Thomas Schiex. – Stanford, CA, 1992. - P. 268–275.
111. Dubois Didier. Possibility theory in constraint satisfaction problems: Handling priority, preference and uncertainty / Didier Dubois, Hélène Fargier, Henri Prade // Applied Intelligence, 6, 1996. - P.287–309.
112. Hentenryck P.V. Constraint Satisfaction in Logic Programming / P.V.Hentenryck. - The MIT Press, 1989. - 240p.
113. Bowen J. The (Minimal) Specialization CSP: A basis for Generalized Interactive Constraint Processing / J.Bowen // Proc. CP-2001 Workshop on User-Interaction in Constraint Processing. - 2001. – P. 12-18.– Режим доступа: <http://www.cs.ucc.ie/j.bowen/cp01/minimal.pdf>
114. Dechter R. Constraint Processing / R. Dechter // Morgan Kaufmann Publishers, 2003. - 450p.
115. Freuder E.C. Synthesizing constraint expressions / E.C.Freuder // Communications ACM, Vol 21, No 11. – 1978. – P. 958-966.
116. Seidel R. A new method for solving constraint satisfaction problems: Proceedings 7th International Joint Conference on AI, 1981, Vancouver / R.Seidel . – Vancouver, 1981. – P. 338-342.
117. Братко И. Алгоритмы искусственного интеллекта на языке PROLOG / И.Братко. – Третье издание: Изд. Вильямс, 2004 . – 640с.
118. Pfahringer B. Constraint propagation in qualitative modelling: domain variables improve diagnostic efficiency: Proceedings Artificial Intelligence and Simulated Behaviour-91 Conference (AISB-91), April 1991, Leeds, UK / B.Pfahringer. – Leeds, UK, 1991. – P.129-135.

119. Dechter R. From local to global consistency: Proceedings of the eighth biennial conference of the Canadian Society for Computational Studies of Intelligence on CSCSI-90, July 1990, Ottawa / R.Dechter. – Ottawa: University of Ottawa, 1990. – P.231-237.
120. Mitrovic A. Experiences in Implementing Constraint-Based Modeling in SQL-Tutor: Proceedings of the 4th International Conference on Intelligent Tutoring, 1998, London / A. Mitrovic. – London: Springer-Verlag, 1998. – P. 414-423.
121. Martin, B. Tailoring Feedback by Correcting Student Answers: In Proceedings of Intelligent Tutoring Systems'2000, Montreal / B.Martin, A.Mitrovic. – Montreal:Springer, 2000 . – P. 383- 392
122. Mayo M. Optimising ITS Behaviour with Bayesian Networks and Decision Theory / M.Mayo, A.Mitrovic // Artificial Intelligence in Education, Vol. 12, No. 2, 124-153 (2001)
123. Mitrovic A. SQL-Tutor: a preliminary report. Technical Report No. TR-COSC 08.97. / A.Mitrovic // Christchurch, New Zealand: Computer Science Department, University of Canterbury. – 1997. –35p. – Режим доступу: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.32.8265&rep=rep1&type=pdf>
124. Ohlsson S. Constraint-based student modeling / S. Ohlsson // In Student modeling: the key to individualized knowledge-based instruction. – Springer. – 1994.- P.167-189.
125. Mitrovic A. NORMIT, a Web-enabled tutor for database normalization: Proceedings of the Int. Conf. on Computers in Education ICCE 2002, Los Alamitos / A. Mitrovic. – Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2002. – P.1276-1280.
126. Suraweera P. KERMIT: a Constraint-based Tutor for Database Modeling: Proc. 6th Int. Conf on Intelligent Tutoring Systems ITS 2002, Biarritz / P.Suraweera. – Biarritz, France: Springer-Verlag LCNS 2363, 2002. - P. 377-387.
27. Вовк Р.Б. Формальний опис процесу контролю задоволення та порушення обмежень в інтелектуальних системах / Р.Б.Вовк, В.Р.Процюк, В.І.Шекета

// Вісник національного університету “Львівська політехніка”. – 2011, № 694. – С. 189-199.

128. Вовк Р.Б. Моделювання структури та функціональності технологічних проблем на основі обмежень / Р.Б.Вовк // Науково-технічний журнал “Математичні машини та системи”. – 2011, № 2. – С.153-161.
129. Ruttkay Zsófia. Fuzzy constraint satisfaction: In Proceedings of the Third IEEE International Conference on Fuzzy Systems, 1994, Orlando / Zsófia Ruttkay. – Orlando: IEEE Press, 1994. – P. 1263–1268.
130. Dubois Didier. Propagation and satisfaction of flexible constraints / Didier Dubois, Hélène Fargier, Henri Prade // In Fuzzy Sets, Neural Networks and Soft Computing, Van Nostrand Reinhold, New York, 1994. – P. 166–187.
131. Вовк Р.Б. Засоби підвищення результативності зворотного зв'язку в тьюторній системі: матеріали 7-ої міжнар. конф. «Інтернет-освіта-наука-2010 (ІОН-2010)», 28 вересня – 3 жовтня, 2010р., м. Вінниця / Р.Б.Вовк, В.І.Шекета. – Вінниця: ВНТУ, 2010. – С.161-163.
132. Вовк Р.Б. Формалізоване представлення моделі тьюторної системи на основі концепції задоволення обмежень: матеріали ІХ між нар. конф. «Інтелектуальний аналіз інформації ІАІ-2009», 19-22 травня. 2009., м.Київ / Р.Б.Вовк, В.І.Шекета. – Київ: Просвіта, 2009. – С. 48-54.
133. Вовк Р.Б. Формалізація сумарної моделі студента в інтелектуальній тьюторній системі на основі обмежень / Р.Б.Вовк, В.І.Шекета // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки, том 2.– 2009. – С. 242-248 .
134. Вовк Р.Б. Модель навчальної системи на основі підходу задоволення обмежень: матеріали ХІ міжнар. наук.-техніч. конф. «Системний аналіз та інформаційні технології», 26-30 травня 2009р., м. Київ / Р.Б.Вовк. – К.:НТУУ “КПІ”, 2009. – С. 276.
135. Вовк Р.Б. Інтелектуальна тьюторна система на основі бази знань обмежень з мітками: матеріали ІІІ міжнар. конф. молодих вчених CSE-2009



- «Комп'ютерні науки та інженерія», 14-16 травня, 2009р., м. Львів / Р.Б. Вовк, В.І. Шекета. – Львів:НУ ЛП, 2009. – С. 45-48.
136. Melnyk V.D. Frame Based Approach to Construction of Intelligent System for Student Knowledge Control: Proceedings of the X International Conference TCSET'2010, February 23-27, 2010, Lviv-Slavske / V.D.Melnyk, R.B.Vovk, M.M. Demchyna. – Lviv-Slavske, Ukraine, 2010. – P. 287.
137. Вовк Р.Б. Побудова моделі об'єкта навчання в тьюторній системі: матеріали п'ятої наук.-практ. конф. з міжнар. участю (МОДС'2010) «Математичне та імітаційне моделювання систем», 21 - 25 червня 2010, м.Київ / Р.Б. Вовк, В.І. Шекета. – Київ:ПІММС, 2010. – С. 192-194.
138. Psocka J. Intelligent Tutoring Systems: Lessons Learned / J.Psocka, L.Massey, S.Mutter. -Lawrence Erlbaum Associates, 1988. – 552p.
139. Вовк Р.Б. Дослідження структури зворотного зв'язку тьюторної системи на основі обмежень: матеріали XIII междунар. молодежного форуму «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке», ч. 2., 30 марта - 1 апреля 2009г., г. Харьков / Р.Б.Вовк, Л.Р.Криль, В.М.Королик. – Х.: ХНУРЭ, 2009. – С.167.
140. Вовк Р.Б. Аналіз формальних методів вирішення навчальних проблем в інтелектуальній тьюторній системі на основі обмежень: матеріали XVI Всеукр. наук. конф. «Сучасні проблеми прикладної математики та інформатики», 8-9 жовтня 2009р., м. Львів / Р.Б.Вовк. – Львів: ЛНУ ім. І.Франка, 2009. – С. 56-57.
141. Вовк Р.Б. Реалізація інтерфейсних елементів інтелектуальної тьюторної системи на основі обмежень / Р.Б. Вовк // Вісник Кременчуцького державного університету імені Михайла Остроградського 2010., Вип. 1/2010 (60) частина 1., С. 39-43.
142. Вовк Р.Б. Представлення даних та знань предметної області для тьюторної системи на основі обмежень / Р.Б. Вовк, В.І. Шекета // Вісник Черкаського державного технологічного університету. Технічні науки – 2010., Вип. 2. - 2010. – С. 7-10.

143. Юрчишин В.М. Наукові основи застосування інформаційних технологій при управлінні процесами розробки нафтогазових родовищ: автореф. дис. д-ра техн. наук: спец.: 05.15.06 - «Розробка нафтових та газових родовищ» / В.М. Юрчишин. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2006. - 31 с.
144. Вовк Р.Б. Структурна реалізація інтелектуальної тьюторної системи на основі обмежень: матеріали VIII міжнар. конф. « Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем (MPZIS-2010)», 10-12 листопада 2010р., м. Дніпропетровськ / Р.Б.Вовк. – Дніпропетровськ: ДНУ, 2010. – С. 51-52.
145. Ефективність проектів впровадження інформаційних технологій. – Режим доступу: [http://www.unicyb.kiev.ua/~boiko/it/imp2\\_2\\_.htm](http://www.unicyb.kiev.ua/~boiko/it/imp2_2_.htm)
146. Shapiro L. Structural description and inexact matching: IEEE Transaction Pattern Analysis Machine Intelligence, September 1981 / L. Shapiro, Haralick R. – 1981. – Vol.3. – P. 504-519. – Режим доступу: <http://haralick.org/journals/04767144.pdf>
147. Freuder E. Partial constraint satisfaction / E. Freuder, R. Wallace // Jour. Artificial Intelligence, vol.58. – 1992. – P. 21-70. – Режим доступу: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.14.7954>
148. Fargier H. Uncertainty in constraint satisfaction problems: a probabilistic approach. European Conference on Symbolic and Quantitative Approaches to Reasoning and Uncertainty ECSQARU'93, 8-10 November 1993, Granada / H. Fargier, J. Lang. - Granada, Spain. 1993. – P. 97-104
149. Таблиці математичної статистики. – Режим доступу: [http://ef.donnu.edu.ua/pvd141048/Data/MdE/Distant/TVMS/MS\\_ua/Data/index\\_Dodatku.htm#d4](http://ef.donnu.edu.ua/pvd141048/Data/MdE/Distant/TVMS/MS_ua/Data/index_Dodatku.htm#d4)
150. Центральна гранична теорема – Вікіпедія. – Режим доступу: [http://uk.wikipedia.org/wiki/Центральна\\_гранична\\_теорема](http://uk.wikipedia.org/wiki/Центральна_гранична_теорема)
151. Таблица Лапласа, полная таблица значений функции Лапласа. – Режим доступу: [http://www.webmath.ru/poleznoe/table\\_laplasa.php](http://www.webmath.ru/poleznoe/table_laplasa.php)

## ДОДАТКИ

Структуровані фактичні дані по свердловинах Прикарпатського УБР з виділеними аварійними (нештатними) ситуаціями

Дата	Об'єкт	Характеристики свердловини	Характеристики бурового розчину	Аварія	Дії по усуненні	Наслідок дій
27.10.2002	Свердловина № 146 Рибальська	Вибій 2756 м. Глибина спуску: колона 324мм. – 1214м. Зенітний кут – на глибині 1600 м – 10.25 град. Магнітний азимут – глибині 1600 м – 112 град.	Густина – 1,20 – 1,21 г/см <sup>3</sup> Умовна в'язкість – 95-100 сек Водовіддача: 5-5,5 см <sup>3</sup> /30хв	Поглинання бурового розчину в об'ємі 20 м <sup>3</sup>	Піднімання бурильного інструменту в "башмак" Розходження та викручування інструменту Промивка свердловини + розходження та викручування Розвантаження на 22-25тн Піднімання бурильного інструменту в "башмак"	Отримано зтяжку на глибині 1922 м. Інструмент піднято до 1868м. і викликано циркуляцію Інструмент піднято до 1580 м. і отримано зтяжку Зтяжка збивається вниз, БК доходить до вибою Отримано зтяжку на глибині 1922 м.
16.12.2002	Свердловина № 146 Рибальська	Вибій 2805 м. Глибина спуску: колона 245мм – 2770м	Густина - 1,16 г/см <sup>3</sup> Умовна в'язкість – 50 сек; Водовіддача: 6 см <sup>3</sup> /30хв	Зростання механічної швидкості та поглинання бурового розчину в об'ємі 100м <sup>3</sup>	Припіднімання бурильного інструменту в "башмак" з використанням глинистого розчину з тирсою	Відновлення циркуляції з частковим поглинанням бурового розчину і досягнуто вибою 2950м.
24.11.2003	Свердловина № 545 Бугруватівська (формальне представлення подано в додатку Б)	Вибій 3338 м.		На глибині 3323м. втрачено циркуляцію бурового розчину та рухомість БК  На вибої 3396м. втрачено циркуляцію бурового розчину внаслідок осідання стінок свердловини  На вибої 3396м. втрачено рухомість бурильного інструменту	Проведено роботи по ліквідації прихоплення бурильного інструменту  Встановлено цементний міст в інтервалі 3028-3167м. і перебурено свердловину другим стовбуром	Роботи по ліквідації не дали позитивних результатів  Свердловину пробурено другим стовбуром до 3396 м.  Протягом 4 год. відновлено циркуляцію
		Вибій 3396 м.			Відстріл інструменту на глибині 3244 м.	

Дата	Об'єкт	Характеристика свердловини	Характеристика бурового розчину	Аварія	Дані по усученню	Вислідок дані
12.03.2004					Забурювання нового стовбуру з глибини 2970м. після встановлення цементного мосту в інтервалі 2960-3210м.	Пробурено свердловину до 3440м.
16.04.2004		Вибій 3440 м.		Заявська бурильного інструменту на глибині 3402м.	Розходження бурильної колони з промивкою	Втрачено циркуляцію та рух інструменту
19.04.2004				Втрачено циркуляцію та рух інструменту	Проведено відстріл бурильного інструменту на глибині 3193м.	
13.07.2004					Спущено та зацементовано 168мм обсадну колону в інтервалі 2703-3170м.	
3.10.2004					Спущено та зацементовано 144мм "хвостовик" в інтервалі 3067-3363м.	Пробурено стовбур свердловини долотом 98.4мм. до глибини 3470м.
					Обсаджено свердловину "хвостовиком-фільтром" 73мм. в інтервалі 3337-3470м.	Свердловина пробурена до глибини 3440м. новим стовбуром на 08.10.04.
Отже, прихоплення бурильного інструменту сталося через інтенсивне осипання стінок свердловини до осипів та обвалів, а також великий зенітний кут викривлення стовбура						
5.10.2004	Свердловина № 193 Північно - Долинська	Вибій 2884 м. Глибина спуску: 324мм. кондуктора - 150м. 245/219 мм тех. колони 2380м.	Густина - 1,16 г/см <sup>3</sup> Умовна в'язкість - 80 сек Водовіддача: 5 см <sup>3</sup> /30хв	Поглинання бурового розчину без виходу циркуляції на поверхню, внаслідок розкриття покладів Вигодського пісковика	Піднято бурильний інструмент, спущено "відкритий" кінець, знижено питому вагу бурового розчину до 1,15-1,16 г/см <sup>3</sup> та продуктивність бурових насосів з 22,4 л/с до 9 л/с.	Спостерігалось поглинання бурового розчину з інтенсивністю 2 м <sup>3</sup> за 1 год. при поглибленні свердловини до 2912м.
11.10.2004				Під час промивки на глибинах 2340/2620/2912 м спостерігалось поглинання бурового розчину. Свердловина поглинула 45 м <sup>3</sup> .	Проведені заключні каротажні роботи перед спуском експлуатаційної колони	Не дало позитивного результату
16.10.2004					Проведено промивку свердловини буровим розчином з наповнювачем (шкірволокно - 2 тн)	

Дата	Об'єкт	Характеристика свердловини	Характеристика бурового розчину	Аварія	Дія по усуненню	Характеристика
20.10.2004			Поглинання бурового розчину		Встановлено цементний міст в інтервалі 2912-2858 м	При промивці свердловини на глибині 2858 м на протязі 4-ох год поглинання бурового розчину не спостерігалось
15.08.2004	Свердловина № 185 Північно - Долинська (похило-спрямована)	Вибій - 2722м. Глибина спуску: 630 мм направлення - 18 м; 324 мм кондуктора - 152 м 45/219 мм тех.колони - 2302 м 146 мм експлуатаційна колона - 2716 м.	на глибині 2721 м допущено розклинку бурового інструменту та втрачено його рухомість		Інтенсивне розходження бурового інструменту при максимальній промивці, встановлення нафтової ванни та розходження бурової колони під час стоянки під ванною	Не дало позитивного результату
					Використання шнурової торпеди ДШУ-33. Проведено вибухові роботи над долотом при натягу колони бурових труб до 85 тн.	Інструмент звільнити не вдалось. Під час вибуху отримали заклинку каротажного кабелю. Після відкручування бурового інструменту "вліво" та підйому при допомозі уловлювача з тарілкою каротажного кабелю в свердловині залишили: долото, перехідник, ОБТ Ø105- 6,11 м.
					Застосування ловильних робіт на "лівому" буровому інструменті та розфрезерування ОБТ Ø105 мм	Не дало позитивного результату
					Забурка 2-го стовбуру свердловини. Встановлено та зацементовано "уіпсток"	Не вдалось прорізати 146 мм обсадну колону з "уіпстока"
					Проведено комплекс робіт по вирізанню ділянки колони за допомогою пристрою УВП в інтервалі 2638-2651 м	Встановлено цементний міст та забурено новий стовбур свердловини до глибини 2722м.
Отже, заклинка ОБТ Ø105мм сталась через випадання куска металу із елементів низу обсадної колони						
24.06.2004	Свердловина № 909	вибій - 3338 м, глибина спуску:	На глибині 3096м перед черговим		Проведення тривалого розходження БК	Не дало позитивного результату

Дата	Об'єкт	Характеристика свердловини	Характеристика бурового розчину	Характеристика	Дані про усучинення	Результат
24.08.2004	Пасічянська	630 мм направлення - 22м 426 мм кондуктора - 104 м 324 мм проміжна колона - 2171 м		нарощуванням відмічено зменшення ваги бурильного інструменту за показами ГІВ-6 на 12 ділень (28тн) та зниження тиску в нагітальній лінії на 25 атм внаслідок залишення КНБК та 180м. бурильних труб	Над "головою" залишеної частини бурового інструменту було встановлено "уіпсток"	Перебурено свердловину другим стовбуром до глибини 3338м.
Отже, причиною виникнення ускладнення стало: наявність в відкритому стовбурі свердловини порід схильних до осипання і обвалів та проластів солей схильних до вигучування, що стало причиною постійних проробок в даних інтервалах, які в умовах ускладненого профілю похило-спрямованої свердловини з різкими змінами азимута привели до відкучування, польоту та розклинки бурильного інструменту						
02.09.2004	Свердловина № 2 Богрівська (газова)	вибій - 1752 м, глибина спуску: 324 мм кондуктора - 99 м 245 мм проміжна колона - 678 м		Отримано посадку ВПТ на глибині 1091 м. після спуску пластовипробовувача	Даною компоновкою пройдено інтервал 933-1020 м	Даною компоновкою пройдено інтервал 933-1020 м
					спущено в свердловину КНБК №1: райбер Ø212 мм, ОБТ-178 - 100 м, бурильні труби	спущено в свердловину КНБК №2: дол. 215,9 СЗ-ГАУ R53, ОБТ178 - 100м, бурильні труби
					спущено в свердловину КНБК №1	спущено в свердловину КНБК №3: піка Ø203мм, ОБТ178-100 м, бурильні труби
					спущено в свердловину КНБК №1	спущено в свердловину КНБК №3: піка Ø203мм, ОБТ178-100 м, бурильні труби
28.12.2004					Перебурка свердловини новим стовбуром	Перебурено свердловину новим стовбуром до глибини 1752 м
Стовбур свердловини ускладнений жолобами та кавернами, а також різкими змінами просторового кута викривлення. Наявність жолобів та складний профіль не дали можливості ефективно регулювати жорсткість бурильної колони та її низу для забезпечення безперешкодного допуску інструменту до вибою та дотримання проектних параметрів режиму буріння.						
2005	Свердловина № 544 Бугруватівська (формальне)	вибій - 3635 м, глибина спуску: 426 мм направлення -		В процесі проробки стовбура виникло диференціальне прихилення (у	Встановлення нафтової ванни	Інструмент звільнено, але виділити нафту з розчину не вдалося через її велику кількість в самому розчині.

Дата	Об'єкт	Характеристики свердловини	Характеристики бурового розчину	Аварія	Дія по усуненню	виснажок дії
	представлено подано в додатку Б)	7 м 324 мм кондуктора - 1102 м 245 мм тех. колони - 3223 м.		відкладах нижнього карбону )	Спущена компоновка для проробки свердловини: долото Ø 215,9 мм + ОБТ Ø178 – 9 м + бурильні труби.	На відстані 10 м над вибоєм, отримано посадку інструменту
				Отримано посадку інструменту	Прокручування інструменту	Запресування долота
				Забруднення вибою свердловини	В два етапи прокачано високов'язкі пачки обваженого бурового розчину ( $\gamma = 1,36 \text{ г/см}^3$ , $T = \text{н. т.}$ )	При виході пачок із свердловини, на усті шлам не виявлено
				При нарощуванні бурового інструменту отримано посадку та запресування долота	Спустили буровий інструмент	пробурили 16 м (до вибою 3522 м)
				Під час підйому бурильної колони сталось прихоплення інструменту без втрати циркуляції.	Підняття густини бурового розчину до 1,26 г/см <sup>3</sup> при збереженні інших параметрів згідно проекту	Забезпечено рух інструменту до вибою та вгору при наявності циркуляції, а на устя винесена незначна кількість вибуреного шламу
22.11.2005					Встановлення трьох нафтових ванн з розходжуванням бурильної колони, а також роботи по струшуванню КНБК за допомогою шнурової торпеди	Не дало позитивного результату
					Використано шнурову торпеду на глибині (БК прихоплена нижче 3305м.) для відвороту бурильного інструменту.	Піднято частину інструменту і з'ясовано, що "голова" залишеного інструменту знесходиться на глибині 3135м.
					Використання "лівого" інструменту та калібра для підняття бурильного інструменту	В кілька прийомів підняли частину бурильного інструменту
					З'єднання з "головою" на глибині 3232,6 м	провести відворот не вдалося (бурильні труби нижче глибини 3232,6 м прихоплено)
				Використання шнурової торпеди, проворотом бурильної		Розкритілено інструмент. В свердловині залишено



Дата	Об'єкт	Характеристики свердловини	Характеристики бурового розчину	Аварія	Дію по усунувленню	Класифікація аварії
1.01.2006					<p>колони вправо</p> <p>Оббурювання прихоплених труб трубним фрезом Ø 193,7 мм та за допомогою "гладкого" колокола на "лівому" інструменті</p> <p>Використання "лівого" та "правого" бурильного інструменту із застосуванням дзвонів (оббурювання бурильних труб)</p>	<p>перехідник та калібр з "лівою" різьбою з'єднані з "головою" на глибині 3232,6 м.</p> <p>Частинами піднято залишені в свердловині бурильні труби. "Голова" залишеного інструменту знаходиться на глибині – 3232,6 м.</p> <p>Піднято з свердловини всі 170 м бурильних труб</p>
2006				<p>Прихоплений інструмент (долото + ОБТ Ø178 - 80 м) знаходиться на глибині 3305м</p>	<p>Спушено компоновку низу бурової колони (КНБК) – безпечний перехідник, ГУМ (гідрравлічний ударний механізм), ОБТ (обважені бурові труби), ТБПК</p> <p>Робота гідрравлічним ударним механізмом (82 удари)</p> <p>Відворот на безпечному перехіднику</p> <p>Проведено ловильні роботи та оббурювання залишеної в свердловині КНБК оббурювальним фрезом</p> <p>оббурка ОБТ трубними фрезами та робота гладкими дзвонами</p> <p>Оббурка трубним фрезом на глибині 3354м</p> <p>Здійснено припіднімання інструменту</p>	<p>З'єдналися з "головою" на глибині 3305м</p> <p>Позитивного результату не дало</p> <p>Відворот не вдався, відкрутилися по бурильній трубі – "голова" – 2773м</p> <p>Піднято з свердловини КНБК (з ГУМом). "Голова" – 3305,5м</p> <p>Піднято з свердловини частину ОБТ</p> <p>Зріс тиск</p> <p>Отримано з'язяску та втрачено рухомисть бурильної колони</p>

Дата	Об'єкт	Характеристики свердловини	Характеристики бурового розчину	Аварія	Дії по усуненні	Наслідок дії
					Розходжування бурильного інструменту	Позитивного результату не дало
					Проведено відворот бурильних труб "вліво" на глибині 2768м	з свердловини піднято 575,64 м бурильних труб ТБПК Ø127x9,19Л
					спущено відкритий кінець Кх.133 на бурильних трубах	відновити циркуляцію та звільнити інструмент не вдалося
					Відстріла бурильної колони	в свердловині залишилася слідоюча КНБК: долото; ОБТ Ø178 + п-к; трубний фрез Ø203; перехідник; ТБПК. "Голова", залишеної в свердловині КНБК знаходиться на глибині 3344м.
			$\gamma=1,20 \text{ г/см}^3$ , $T=36 \text{ сек.}$ , $\Phi=5 \text{ см}^3/30 \text{ хв.}$ , $СНЗ=12/36 \text{ дПа}$		встановлено цементний міст в інтервалі 3343-3232м, "голова" цементного мосту – 3232м. Проведена забурка нового стовбуру свердловини	При досягненні вибою 3472м, появились ознаки втрати стійкості стінок стовбуру свердловини, внаслідок чого почастішали проробки
			$\gamma=1,24 \text{ г/см}^3$ $T=85-115 \text{ сек.}$ , $\Phi=5 \text{ см}^3/30 \text{ хв.}$ , $СНЗ=80/110 \text{ дПа}$		Проведено кріплення свердловини експлуатаційною колоною Ø139,7x146x168мм	Поглиблено свердловину до вибою 3530м. Наявність проробок в інтервалі 3515-3530м та неможливість нарощування для подальшого поглиблення свердловини
					Питома вага бурового розчину поступово була збільшена до 1,32-1,34 г/см <sup>3</sup>	свердловина перебувала до глибини 3635 м новим стовбуром
Прихоплення бурильного інструменту сталось через складні геолого-технічні умови буріння, а саме: схильність відкладів нижнього карбону до диференційного прихоплення, а також великий зенітний кут викривлення стовбура.						
31.05.2005	Свердловина № 831 Долинська	вибій - 2642 м, глибина спуску: 426 мм направлення -	Густина – 1,18 г/см <sup>3</sup> в'язкість – 30-25 сек фільтрація -	під час буріння свердловини при вибої 2642 м різко підвищилась	Піднято інструмент в башмак проміжної колони	Почались затяжки та зріс тиск з 60 кгс/см <sup>2</sup> до 100-120 кгс/см <sup>2</sup>
					Відновлення промивки буровим насосом	Позитивного результату не дало

Дата	Об'єкт	Характеристика свердловини	Характеристика бурового розчину	Аварія	Дії по усуненні	Наслідок дій
		20 м 324 мм кондуктора - 151 м 245/219 мм тех. колони - 1682 м	14 см <sup>3</sup> /30 хв СНЗ - 60/100 мг/см <sup>2</sup>	водовіддача бурового розчину з 6 см <sup>3</sup> /30хв до 14 см <sup>3</sup> /30хв та знизилась умовна в'язкість з 60 сек до 25 сек	Застосування цементного агрегату	Відновлено циркуляцію та хід бурової колони, але на вібростігах появилась велика кількість шламу і в башмак проміжної колони відмічався перелив бурового розчину. Тиск на гирлі свердловини в затрубному просторі піднявся на 15 атм
			Густина - 1,20-1,24 г/см <sup>3</sup> в'язкість - 60-80 сек водовіддача - 6 см <sup>3</sup> /30 хв Густина - 1,46 г/см <sup>3</sup>		Поглиблення свердловини № 831 до проектної глибини на буровому розчині з іншими параметрами	Ліквідувати водопроявлення та відновити стовбур свердловини не вдалось
					Добб'яження глинистого розчину до 1,46 г/см <sup>3</sup> з проміжними промивками	Стовбур свердловини відновлено
14.06.2006	Отже, причиною ускладнення стало розкриття зони підвищених пластових тисків, непередбачених проектом на будівництво свердловини	Свердловина № 336 Бугруватівська	вибій - 3271/3324 м, глибина спуску: 426 мм направлення - 7 м 324 мм кондуктора - 1127 м	Під час калібрування стовбура свердловини на глибині 3273 м, було помічено падіння тиску в маніфольді, відсутність поглиблення та зменшення моменту на роторі.	Підйом інструменту	Виявлено, що під час буріння стався злам конуса різьби перехідника. В свердловині залишено: долото, КЛС; перехідник; ОБТ. "Голова" залишеного інструменту - 3261,2 м. Позитивного результату не дало
					Спуск мітчика МБУ + КЛС . Ловильні роботи.	Позитивного результату не дало
					Спуск мітчика + піднята труба. Ловильні роботи.	Позитивного результату не дало
					Почерговий спуск гладкого дзвону та мітчика. Ловильні роботи.	Позитивного результату не дало, оскільки не вдається надійно закріпитися за "голову"
25.06.					Спуск грубоного фрези. Робота	залишеної частини КНБК підняли залишену частину

2006					<p>фрезом в інтервалі 3261-3271 м. Спуск направляючої воронки з мітчиком. Ловильні роботи</p> <p>Відновлення ускладненого стовбура свердловини шляхом проробки з глибини 3258 м</p> <p>Спроба збити затяжку вниз</p>	<p>КНБК на поверхню</p> <p>Свердловину доведено до глибини 3324</p> <p>Отримано посадку</p>
			<p>Під час підриву долота на глибині 3278 м отримали затяжку</p>		<p>Встановлення двох нафтових ванн. Інтенсивне розходження бурильної колони в межах 50-160 тн</p>	<p>Позитивного результату не дало</p>
05.07.2006			<p>Інструмент втратив рухомість без втрати циркуляції. Глибина знаходження долота – 3278 м</p>		<p>струшування бурильної колони за допомогою торпеди типу ТШП-65 проти з'єднання "КЛС-ОБТ"</p>	<p>весь інструмент піднято на поверхню. Відновлено стовбур свердловини до глибини 3324 м</p>
02.05.2006	<p>Свердловина № 196 Північно-Долинська</p>	<p>вибій - 1915 м, глибина спуску: 530 мм</p> <p>направлення - 6 м</p> <p>324 мм</p> <p>кондуктора - 154 м</p>	<p>В процесі промивки було втрачено ізоляцію струмовідводу електробура.</p>	<p>Ускладнення виникло внаслідок низької стійкості стінок свердловини в інтервалі залягання карбонів відкладів Верхньовізейського ярусу, розкритих під кутом 36° та використання КНБК з високою жорсткістю згідно робочого проекту для підготовки стовбура свердловини перед спуском проміжної колони</p>	<p>пошук ізоляції</p> <p>Бурильний інструмент допустили до глибини 1901 м. Спроба відновлення циркуляції</p> <p>Припіднято бурильний інструмент із затяжками до глибини 1615 м</p> <p>Підйом бурильного інструменту із затяжками та розходженням в межах 20-130 тн до глибини 1494 м</p> <p>Підйом бурильного інструменту до 1200 м.</p>	<p>замінено 7 бурильних труб</p> <p>Позитивного результату не дало</p> <p>Відновити циркуляцію не вдалося</p> <p>відновити рухомість бурильної колони не вдалося</p> <p>обрив бурильного інструменту</p>

Дата	Об'єкт	Характеристики свердловини	Характеристики бурового розчину	Аварія	Дія по усуненню	Наслідок дії
				обрив бурильного інструменту на глибині 1200 м	приступлено до ловильних робіт	За допомогою спеціального "йорща", було піднято на поверхню залишену частину кабельної секції
				Залишена частина інструменту виявилась прихопленою через осипання гірської породи зі стінок свердловини	спуск "лівого дзвону" та "лівого калібру" на підігнутій S – подібній трубі	на поверхню підняли: зламану частину труби ЕБШ Ø127x10Д; труби ЕБШ Ø127x10Д; перехідник; ОБТØ178; частина ПКЛ. "Голова" залишеної частини КНБК знаходилась - на глибині 1469,02 м
					Приступлено до оббурки інструменту трубними фрезами Ø245 мм в інтервалі 1469-1480 м	періодичні різкі зростання тиску через осипання породи
					Застосування "лівого калібру" (РКх200) на підігнутій S – подібній трубі	на поверхню вдалося підняти частину ПКЛ та СТЕ
					спущено в свердловину "лівий" трубний фрез Ø273 мм для оббурки залишеного в свердловині електробура	Під час спуску фреза отримали посадку інструменту на глибині 780 м.
					Розходження	піднято фрез на поверхню
					1. прокалібровано стовбур свердловини в інтервалі 545-1479 м для забезпечення нормального проходження трубного фреза.	на поверхню вдалося підняти електробур та долото
					2. Трубними фрезами оббурено залишену частину КНБК в інтервалі 1479-1490 м	
					3. Спущено перехідник з різьбою М3х171, безпечний перехідник на підігнутій S – подібній трубі	
					відновлено стовбур свердловини	

19.07.

Дата	Об'єкт	Характеристики свердловини	Характеристики бурового розчину	Аварія	Дні по усуненні	Наслідок дії
2006					до глибини 1915 та продовжено її поглиблення	
<p>Причиною виникнення ускладнення стало зниження питомої ваги бурового розчину під час тривалих пошуків ізоляції струмовідводу електробура через відсутність баритового обважнювача. Зниження питомої ваги бурового розчину призвело до осипання нестійких воротищенських і поляницьких відкладів та ускладнення стовбура свердловини</p>						
30.04. 2006	Свердловина № 552 ГС Долинська	вибій - 1764 м, глибина спуску: 630 мм направлення - 10 м 426 мм кондуктора - 148 м 324 мм тех. колона - 1500 м		При вибою 1764м під час буріння тиск промивної рідини на стояку знизився із 80 атм до 50 атм та втрачено циркуляцію	Проведено відриві долота від вибою 1. В свердловину закачано 30м <sup>3</sup> бурового розчину при відсутності циркуляції на усті. 2. Інструмент піднято на поверхню. 3. спущено в башмак 324 мм проміжної колони наступну КНБК: направляючий конус бурильні труби ТБПК-127 4. Бурильний інструмент допустили до вибою, та закартали в свердловину 15м <sup>3</sup> високов'язкої суміші з наповнювачем (відходи шкряп, тирса) для ліквідації поглинання. 5. Відкачано 15 м <sup>3</sup> продавлювальної рідини	Отримано затяжку бурильного інструменту Відновилась циркуляція на усті, із свердловини виходив буровий розчин питомою вагою 1,30 г/см <sup>3</sup>
			$\gamma = 1,32 \text{ г/см}^3$ , $T = 110 \text{ сек}$ , $\Phi_{30} = 8 \text{ см}^3$ , $CH_3 = 107/185$ $\text{мгс/см}^2$ , $pH = 9$ .	На 18 - тому м <sup>3</sup> продавки - циркуляція припинилась	1. Бурильний інструмент піднято в башмак проміжної колони; 2. Закачано в три прийоми по 15 м <sup>3</sup> високов'язкої глинобентонітової суміші	Після закачування 3-ї порції свердловина перестала поглинати. Бурильний інструмент знаходиться на глибині 1750 м, циркуляція - нормальна, свердловина не поглинає.
<p>Причини ускладнення: При вибії 1764м свердловиною було розкрито пропластки пісковика в низах воротищенської свити. Відклади воротищенської свити складені в основному глинисто-аргілітовими породами, пористість яких - 1%, проникність - 1-2 мд, та пропластками пісковика пористістю - 7%, проникністю - 8 мд, що і стало причиною поглинання при розбурюванні даних пропластків пісковика на буровому розчині густиною 1,50 г/см<sup>3</sup></p>						

Дата	Об'єкт	Характеристики свердловини	Характеристики бурового розчину	Аварія	Дії по усуненні	Наслідок дій
14.07.2006	Свердловина № 552 ГС Долинська	вибій - 2272 м, глибина спуску: 630 мм; направлення - 10 м; 426 мм кондуктора - 148 м; 324 мм тех. колона - 1500 м; 219 мм тех. колона - 1342-2185 м	Густина - 1,22 кг/м <sup>3</sup> ; Умовна в'язкість - 55 сек; Водовіддача - 5 см <sup>3</sup> /30хв; СНЗ - 1/10 - 175/250 мг/см <sup>2</sup>	1. Осипання та обвалювання стінок свердловини внаслідок різкого пониження питомої ваги бурового розчину з 1,36 г/см <sup>3</sup> до 1,22 г/см <sup>3</sup> на глибині 2185-2272м 2. при проходженні до вибою 2272м з промивною через поломку КНБК в свердловині залишено долото 190,5 СЗ-ГВ та частину електробура довжиною 4,2м.	З метою шаблонування стовбура свердловини до «голови» залишеної частини електробура було зібрано та спущено в свердловину: дол. 190,5СЗ-ГВ+ЕБШØ127мм. та пророблено стовбур свердловини до глибини 2211м. Проводили проробку свердловини в інтервалі 2185-2218 м з вимиванням осипаної породи. Поступово збільшили питому вагу бурового розчину до 1,36 г/см <sup>3</sup> та продовжили проробку стовбура. На глибині 2223 м, з метою закріплення стінок свердловини через привійну зону прокачали пачку розчину з рідкого скла, довели питому вагу бурового розчину до 1,50 г/см <sup>3</sup>	Подальша проробка свердловини була ускладнена інтенсивними осипаннями та обвалами стінок  Відновлення стовбура шляхом проробки позитивного результату не дали  Стовбур свердловини вдалося відновити до глибини 2223 м. Під час проробки осипи та обвали стінок свердловини не припинялись  В свердловині відновлено стовбур до глибини 2272 м
10.08.2006	Свердловина № 348 Бугруватівська (брак в роботі)	вибій - 3040/3125 м, глибина спуску: 426 мм направлення - 29 м 324 мм кондуктора -	Густина - 1,50 кг/м <sup>3</sup> ; Умовна в'язкість - 90 сек; Водовіддача - 6 см <sup>3</sup> /30хв; СНЗ 1/10 > 300 мг/см <sup>2</sup>	Під час спуску компоновки з новим повномірним КЛС Ø295,3 над долотом, було допущено посадку інструменту на глибині 3095,4 м до 71 тн при власній вазі	1. Тривале розходжування; 2. Торпедування (відстріл на глибині 3092 м); 3. Робота кільцевими фрезами Ø274/222 мм в інтервалі (3092,4-3093,35) м; 4. Зарізка нового стовбура з глибини 3035 м	В свердловині ( стовбур №1) залишено: долото 295,3 С-ГАУ; КЛС295,3; перехідник Ø203 мм; ОБТØ203
Причиною виникнення ускладнення стало розкриття під великим зенітним кутом (41°) активної зони порушення гірських порід верхньомелітових відкладів, в якій після порушення гідродинамічної рівноваги (зменшення питомої ваги з 1,36 г/см <sup>3</sup> до 1,22 г/см <sup>3</sup> ) виникли активні деформаційні процеси у вигляді інтенсивних осипань та обвалів стінок свердловини						

Дата	Об'єкт	Характеристики свердловини	Характеристики бурового розчину	Аварія	Дії по усуненню	Наслідок дії
14.03.2006		1095 м		95 тн, що привело до розклинки та втрати рухомості бурильної колони	Забурка другого стовбура свердловини	По свердловині досягнуто вибою 3125 м другим стовбуром та продовжено буріння до глибини 3189 м
21.03.2006				При калібруванні стовбура свердловини на глибині 3172 м отримали різке падіння моменту на роторі, тиск на стояку при цьому знизився від 65 атм до 50 атм, вага інструменту знизилась 17,3 тн.	Після підйому встановлено, що сталась поломка ніпельної частини ОБТ по першій нитці	В свердловині залишено: долото 295,3 МС-ГВ; КЛС293,6; перехідник Ø203 мм; труба НВ 168/127; ОБТØ203.
13.05.2006					1. З'єднання різьбовим мітчиком із залишеною компоновкою. 2. Тривале розходжування. 3. Розходжування під нафтовою ванною. 4. Торпедування (відстріл на глибині 3044 м); 5. Зарізка нового стовбура №3 з глибини 2760 м.	В свердловині (стовбур №2) залишено: долото 295,3 МС-ГВ; КЛС293,6; перехідник Ø203 мм; труба НВ 168/127; ОБТØ203; МБУ (74x110); ТБПК 127x9,19 G <sub>105</sub>
07.06.2006	Свердловина № 336 Бугруватівська. (брак в роботі)	вибій - 3271/3324 м, глибина спуску: 426 мм направлення - 7 м 324 мм кондуктора - 1127 м	Причиною є те, що з глибини 2994,6/3070 м розкрито відклади С <sub>1</sub> <sup>S</sup> , які схильні до осипання при великих zenithних кутах	Під час калібрування стовбура свердловини на глибині 3256 м КНБК з двома калібраторами, було помічено падіння тиску в маніфольді та зменшення моменту на роторі.	Забурка третього стовбура свердловини	По свердловині досягнуто вибою 3189 м третім стовбуром
08.06.2006					1. Спуск калібра Мзх152. 2. Ловильні роботи.	В свердловині залишено: долото Ø295,3 мм; КЛС Ø295,3 мм; перехідники; ОБТ Ø203 мм. "Голова" залишеного інструменту – 3243,72 м.  піднято залишену частину інструменту на поверхню.
20.09.2006	Свердловина № 336 Бугруватівська. (брак в роботі)	вибій - 3271/3324 м, глибина спуску: 426 мм направлення -	Причиною браку в роботі є те, що під час буріння стався відворот частини КНБК нижче верхнього КЛС	Під час буріння було помічено падіння тиску в циркуляційній системі на 10-15 атм.	Переконавшись в справності бурових насосів та маніфольда, приступили до підйому.	В свердловині залишено: долото 215,9 СЗ-ГВ R162; перехідники; ОБТ Ø 178 мм. "Голова" залишеного інструменту знаходилася на



Дата	Об'єкт	Характеристики свердловини	Характеристики бурового розчину	Аварія	Дію по усуненню	Результат дії
		7 м 324 мм кондуктора - 1127 м 245 мм тех. колона - 3316 м			Спуск різьбового мітчика. Ловильні роботи. Підйом з розходженням в межах 190-164 тн при власній вазі 164 тн. Повторний спуск різьбового мітчика. Ловильні роботи. Підйом з розходженням.	глибині 3877,61 м і представлена залишеною частиною конуса різьби від ОБТ Ø 178 мм (злам по першій нитці) На третій свічі від вибою мітчик зірвався. Підйом на поверхню – без результату.
					1. Спуск долота до "голови". Промивка з обробкою бурового розчину. Підйом. 2. Спуск гладкого дзвону. Ловильні роботи.	Під час підйому стався злам верхньої мітчика. Підйом на поверхню – без результату. Не вдалось надійно закріпитися за "голову" залишеного інструменту.
27.09. 2006					Спуск гладкого дзвону (180x170/Гроб =360 мм). Ловильні роботи. Підйом.	залишену частину КНБК піднято на поверхню
Причина: поломка конуса різьби ОБТ						
	Свердловина № 337 Бугруватівська. ( брак в роботі)	вбій - 2289/2293 м, глибина спуску: 426 мм направлення - 29 м 324 мм кондуктора - 1085 м		під час буріння ділянки набору кривизни при вибої 2429м – було помічено падіння тиску з 105 атм до 85 атм.	Підйом інструменту	В свердловині залишено: долото 295,3 МХ-09; КЛС Ø292,6; ДР-240 (1,09 град.); перехідники; зворотній клапан Ø127; "ГУОБИТ – С". При підйомі затяжка та зрив дзвону з "голови" обіраного інструменту При підйомі затяжка та зрив дзвону з "голови" обіраного інструменту.
21.04. 2006					1. Спуск з калібруванням до "голови" КНБК: долото, КЛС, ОБТ, бурильні труби. Обробка	обіраний інструмент піднято на поверхню (свердловину виведено з браку).

					глинистого розчину. 2. Спуск "шліпсової труболівки", довильні роботи.				
Причиною падіння тиску є поломка телеметричної системи (10 см нижче зварного шва)									
17.02. 2006	Свердловина № 74 Сахалінська (брак в роботі)	вибій - 2900 м, глибина спуску: 426 мм направлення - 25 м 324 мм кондуктора - 357 м 245 мм тех. колона - 2850 м			При вибої 2900 м під час спуску компоновки на набір кривизни розколовся та впав в свердловину сувар з клина ПКР. при доходженні до вибою з прокручуванням на глибині 2890 м долото законтролило.	Після підйому бурильного інструменту - в свердловину спущено: долото 215,9 С-ГВ R192; ОБТØ178; бурильні труби.			
21.02. 2006					Проробка інтервалу 2890-2894 м	Інтервал 2890-2894 м проробили за 1 год з постійними проконструваннями та затяжками			
						Підйом долота оскільки при досягненні глибини 2898 м проконстрування посилюлись	виявлено, що одна шарошка з частиною лапи залишені в свердловині		
						Повторно спустили нове долото до глибини 2898 м. При спробі пройти нижче з прокручуванням - долото конгрить	Підйом долота. На долоті були сліди роботи по металу.		
						Спустили магнітний фрез для очищення вибою від металу	фрезом піднято 6 кг металу		
24.02. 2006						продовжено поглиблення свердловини з інтервалі 2900-2910 м	Закінчення браку. Свердловину поглиблено до 2910 м.		
13.07. 2006	Свердловина № 1 Витодсько-Витвицька (брак в роботі)	вибій - 2306 м, глибина спуску: 630 мм направлення - 20 м 426 мм кондуктора - 137 м			При вибої 2306 м в процесі буріння з використанням відхилюючої КНБК, перестала працювати телесистема	Підйом інструменту	Виявлено, що в свердловині залишено шарошка та частина (вершина конусу) другої шарошки долота 1 1/8 ETS-61		
16.07. 2006						спущено магнітний фрез для очищення вибою від металу	підняли на поверхню 250 грам металу		
						Робота торцевим (сферичним) фрезом	Повна очистка вибою від металу. Приступлено до		

Дата	Об'єкт	Характеристики свердловини	Характеристики бурового розчину	Аварія	Дії по усуненню	Наслідок дій
26.12.2006	Свердловина № 832 Долинська (брак в роботі)	324 мм тех. колона - 1750 м вибій - 2306 м, глибина спуску: 630 мм направлення - 20 м; 426 мм кондуктора - 137 м; 324 мм тех. колона - 1750 м		під час спуску приладу для проведення індукційного каротажу на глибині 2646 м отримали посадку	Спроба припідняти прилад вгору 1. Розходжування каротажного приладу. 2. Обрив каротажного кабелю таліями. Ловильні роботи за допомогою "йорша" + тарілка Ø 175 мм Відворот інструменту вліво	Не дало позитивних результатів Не дало позитивних результатів Після 5-ти рейсів піднято 55м. кабелю В свердловині залишилось: "йорш" + тарілка Ø176 мм; перехідники; бурильні труби ББШ-127; "Голова" залишеного інструменту знаходилась на глибині 16,6 м і представлена Кз х 127 (мілка різьба)
30.12.2006				Спуск до "голови" залишеного інструменту наступної КНБК: калібр Мз х 127 (мілка різьба); ОБТ Ø146 мм ; ведуча труба.	Зднались з "головою" та з розходжуванням і проворотом ротором вправо підняли залишений інструмент + 30 м каротажного кабелю на поверхню	Здалились з "головою" та з розходжуванням і проворотом ротором вправо підняли залишений інструмент + 30 м каротажного кабелю на поверхню
20.09.2007	Свердловина № 553 Бугруватівська	вибій - 3324 м, конструкція свердловини (по стовбуру):	буровий розчин типу "ФЛЮЛ-ПРО-СН-ТИ" фірми "МІ"	1. Під час підйому бурильного інструменту на глибині 3303м	підйом інструменту	в свердловині, внаслідок відвороту, залишено частину КНБК, а саме: долого 215,9 МХЛ-18; гвинтовий двигун

Дата	Об'єкт	Характеристики свердловини	Характеристики бурового розчину	Аварія	Дні по усуненні	Наслідок днів
		направлення Ø 426 мм x 30 м кондуктор Ø 324 мм x 1095 м проміжна колона Ø 245 мм x 3237 м	SWAKO"	отримано затяжку 10 тн понад власну вагу бурильної колони 2. відмічено зростання тиску в циркуляційній системі з 110 атм до 125 атм, і далі до 147 атм. Одночасно із зростанням тиску, бурильна колона повернулася вліво на декілька обертів. При цьому тиск знизився на 35 атм.		(1,5°); зворотній клапан; нижній перехідник геонавігаційного приладу
			$\gamma = 1,20 \text{ г/см}^3$ , $T = 38 \text{ сек}$ , $\Phi_{30} = 4 \text{ см}^3$ , $CH_{3/10} = 15/21 \text{ дПа}$ .		Спуск в свердловину наступної КНБК: долото 215,9 МХЛ; КЛС Ø196,86 мм; НВ 168/127; діамантне ОБТ Ø127 мм; Яс; НВ 168/127; бурильні труби. приступили до проробки	Дану КНБК спустили до глибини 3301 м, отримали посадку
			$\gamma = 1,28 \text{ г/см}^3$ , $T = 43 \text{ сек}$ , $\Phi_{30} = 4,5 \text{ см}^3$ , $CH_{3/10} = 24/65 \text{ дПа}$		Проробка до глибини 3111 м.	3 проробкою дійшли до глибини 3311 м. Рух КНБК в інтервалі (3301-3311) м супроводжувався затяжками та посадками
			$\gamma = 1,30-1,31 \text{ г/см}^3$ , $T = 51 \text{ сек}$ , $\Phi_{30} = 5 \text{ см}^3$ , $CH_{3/10} = 36/75 \text{ дПа}$		Підйом КНБК до глибини 3223 м. Обробка та обважнення бурового розчину. Спуск КНБК дообважнення розчину	Свердловина почала "підсипати". Вільного проходження інструменту інтервалу проробки нема. "Голову" залишеної частини КНБК зустріли на глибині 3315,1 м.
					Спуск в свердловину наступної КНБК: гладкий колокол (Øзовн.=198 мм, Øроб. = 182/174 мм, Лроб. = 330 м); КЛС Ø196,86 мм; НВ 168/127; діамантне ОБТ Ø127 мм; Яс; НВ 168/127; бурильні труби. Проведення ловильних робіт.	Вдалося закріпитись за "голову" залишеної частини КНБК. При відриві 3 м від вибою колокол зірвався. На внутрішній поверхні колокола видно сліди роботи по "голові" та повздовжні тріщини по тілу.
					Спуск в свердловину наступної КНБК: піскоподібне долото Ø200 мм; перехідник; КЛС	Проробка в інтервалі (3310-3315) м

Дата	Об'єкт	Характеристики свердловини	Характеристики бурового розчину	Аварія	Дія по усуненні	вислідок дії
			$\gamma = 1,32 \text{ г/см}^3$ $T = 56 \text{ сек, } \Phi_{30} = 6,3 \text{ см}^3$ $\text{СНЗ}_{1/10} = 17/21 \text{ дПа}$		$\text{Ø}196,86 \text{ мм; HW } 168/127$ ; діамагнітне ОБТ $\text{Ø}127 \text{ мм; Яс; HW } 168/127$ ; бурильні труби. дообваження розчину	Вільне проходження КНБК до "голови". Підйом КНБК на поверхню.
					Спуск в свердловину наступної КНБК: "овершот" $\text{Ø}207 \text{ мм; КЛС } \text{Ø}196,86 \text{ мм; HW } 168/127$ ; діамагнітне ОБТ $\text{Ø}127 \text{ мм; Яс; HW } 168/127$ ; бурильні труби. Ловильні роботи.	Не вдалося захопити залишену частину КНБК. Підйом КНБК на поверхню.
					Спуск в свердловину наступної КНБК: гладкий колокол ( $\text{Øзовн.} = 208 \text{ мм, Øроб.} = 185/175 \text{ мм, Лроб.} = 350 \text{ м}$ ); викривлена бурильна труба $\text{Ø}127 \text{ мм; КЛС } \text{Ø}196,86 \text{ мм; HW } 168/127$ ; діамагнітне ОБТ $\text{Ø}127 \text{ мм; Яс; HW } 168/127$ ; бурильні труби. Проведення ловильних робіт.	Не вдалося закріпитись за "голову" залишеної частини КНБК. Підйом КНБК на поверхню
03.10.2007					Спуск в свердловину наступної КНБК: овершот" $\text{Ø}207 \text{ мм; КЛС } \text{Ø}196,86 \text{ мм; HW } 168/127$ ; діамагнітне ОБТ $\text{Ø}127 \text{ мм; Яс; HW } 168/127$ ; бурильні труби. Ловильні роботи.	Підйом КНБК на поверхню. Весь інструмент піднято на поверхню. Ускладнення ліквідовано. Приступили до поглиблення свердловини під експлуатаційну колону.
<b>Причини ускладнення</b> : Самовільне відкручування КНБК, внаслідок повертання бурильної колони вліво з одночасним підконтроюванням відхилюючої КНБК.						
25.10.2007	Свердловина № 553 Бугруватівська	вибій - 3465 м, конструкція свердловини (по стовбуру): направлення	густина - $1,32 \text{ г/см}^3$ ; в'язкість - 50 сек фільтрація - $4,4 \text{ см}^3/30 \text{ хв}$ СНЗ - $15/21 \text{ мг/см}^2$	при вибої 3465 м, в процесі орієнтованого буріння відхиляючою КНБК з гвинтовим двигуном (кут	Переконавшись в справності бурових насосів та маніфольда, приступили до підйому.	Після закінчення підйому виявлено, що внаслідок поломки конуса різьби перехідника над гвинтовим двигуном (злам по третій

		свердловини	бурового розчину		ЛАН ІНЖ. УСЛУГИ	КОНСТРУКТОРСЬКІ ЛАНИ
		<p>Ø 426 мм x 30 м кондуктор Ø 324 мм x 1095 м проміжна колона Ø 245 мм x 3237 м</p>		<p>перекосу – 1,5°) було помічено падіння тиску в циркуляційній системі з 105 атм до 75 атм.</p>		<p>нитці різьби), в свердловині залишено частину КНБК, а саме: долото 215,9 МХЛ- 30Н №6055337; гвинтовий двигун А675М457ОХР (кут перекосу 1,5°).</p>
				<p>“Голова” залишеної частини КНБК знаходиться на глибині 3456,69 м та представлена муфтою вийного двигуна з залишеною в ній частиною ніпеля різьби запобіжного перехідника.</p>	<p>Спроби з’єднатись та підняти залишену частину КНБК на поверхню за допомогою “овершота” та шліпсової труболовки</p>	<p>Позитивного результату не дало.</p>
					<p>Спуск мігчика МСЗх133 з підрізаним торцем під кутом 45° на підігнутій трубі до “голови” залишеної частини КНБК. Ловильні роботи.</p>	<p>Не вдалося закріпитись за “голову”.</p>
					<p>Спуск шліпсової труболовки. Зупинка на глибині 3386 м. Допуск інструменту до вибою без промивки. Ловильні роботи.</p>	<p>Викликали промивку. Тиск в циркуляційній системі – 75 атм. Підйом на три ключі. Без результату.</p>
					<p>Спуск долота до “голови” залишеної частини КНБК. Шаблювання стовбура свердловини. Зборка та спуск “овершота”. Ловильні роботи.</p>	<p>Без результатів.</p>
					<p>Почерговий спуск вкороченого мігчика та гладкого колокола. Ловильні роботи.</p>	<p>Всі спроби підняти залишену частину КНБК позитивного результату не дали</p>
04.12. 2007				<p>Напряцювання уступу. Перебурка свердловини другим стовбуром з глибини 3392 м</p>		<p>свердловину перебурено другим стовбуром до глибини 3465 м та виведено з ускладнення</p>
<b>Причини ускладнення : поломка перехідника гвинтового двигуна фірми “Schlumberger”</b>						
04.12. 2007	Свердловина № 553	вибій - 3465 м, конструкція		під час буріння в інтервалі 3462-3465 м	Промивка свердловини. Підйом інструменту	Під час підйому на глибині 3418 м отримали затяжку

Дата	Об'єкт	Характеристики свердловини	Характеристики бурового розчину	Аварія	Дні по усуненні	Наслідок дій
	Бутруватівська	свердловини (по стовбуру): направлення Ø 426 мм x 30 м кондуктор Ø 324 мм x 1095 м проміжна колона Ø 245 мм x 3237 м		механічна швидкість знизилась до 3 м/год, з'явилися посадки та затяжки інструменту при доходженні до вибою.	Розходжування та робота ясом	Вдалось звільнити інструмент та продовжити підйом
					В свердловину було слущено наступну КНБК: пікоподібне долого Ø 210 мм; перехідник Ø 203 мм; КЛС Ø 209; ОБТ178; НВ 168/127; Яс 165,1; НВ 168/127; Яс - акселератор 165,1; НВ 168/127; БТ 127x9,2 Л.	Під час допуску інструменту на глибині 3325 м отримали посадку. Без промивки інструмент вниз не пішов.
					Інструмент було допущено до глибини 3222 м та проведено обробку бурового розчину з приведенням параметрів до вимог ГТН по циклу	Добилися вільного проходження компоновки без циркуляції.
					Викликали промивку (тиск 76-78 атм., продуктивність 25 л/с) та з включеним ротором пройшли на всю довжину ведучої труби декілька разів.	На глибині 3387 м отримали посадку до 20 тн.
					Продовжили допуск інструменту	При черговому під'їзді, для перевірки проходимості компоновки, отримали затяжку 20 тн понад власну вагу інструменту ( вага інструменту 105 тн) на глибині 3444 м.
					Починаючи з глибини 3382 м до 3460 м проводили проробку стовбура. Характер проробки - "тугий".	Зріс тиск до 140 атм. На ситах спостерігався інтенсивний винос породи, представленої аргілітом голчастої форми, пісковиком та уламків вугілля розміром 2x3 см.
					Розходжування інструменту з роботою яса	

Дата	Об'єкт	Характеристики свердловини	Характеристики бурового розчину	Аварія	Дії по усуненні	Наслідок дій
					Розходжування без роботи яса з меншою продуктивністю бурових насосів.	З промивкою та розходжуванням припідняли інструмент до 3434 м.
					На глибині 3434 м продовжили розходжування з роботою яса.	Після звільнення інструменту (при ударі яса вгору) з незначними посадками дійшли до глибини 3459 м.
					припідняли інструмент до глибини 3448 м та приступили до проробки. Проробку проводили в інтервалі 3448-3462 м декілька разів	Вільного проходження інструменту не добилися. Під час руху інструменту в інтервалі 3448-3462 м мали місце затяжки та посадки 20-25 тн понад власну вагу.
					Винос породи припинився. Приступили до підйому інструменту. Припідняли з промивкою та відкріпили ведучу трубу.	Під час підйому першої свічі на глибині 3430 м отримали затяжку 20-25 тн понад власну вагу
					Спроби збити затяжку вниз.	Затяжку збити не вдалось. Втрачено рухомість інструменту без втрати циркуляції
				Втрата рухомості інструменту без втрати циркуляції	Розходжування інструменту з роботою яса в межах 45-150 тн.	Без результату.
					Установка кислотної ванни. Стоянка під ванною. Розходжування інструменту з роботою яса	Без результату. Вимив ванни.
					Геофізичні роботи по визначенню місця прихоплення бурильного інструменту. За результатами прихватаміра – прихоплена частина КНБК від верхнього КЛС до піки. Спроба звільнити інструмент методом струшування за допомогою	Без результату



Дата	Об'єкт	Характеристики свердловини	Характеристики бурового розчину	Аварія	Дні по усуненні	Наслідок дій
					шнурової торпеди (3 шнури по 16 м) в інтервалі 3404-3420 м	Без результату
					Промивка з розходжуванням бурильної колони в межах 40-150 тн з роботою яса. Геофізичні роботи – МЛМ. Спуск фугасної торпеди ТШТ-43. Спроба відстрілу інструменту з розходжуванням на глибині 3416 м – 2 рази	
					Повторна спроба відстрілу на глибині 3378м з розходжуванням.	Підйом звільненої частини бурильної колони на поверхню
					Відстріл проведено по тілу бурильної труби ТЫПК-127x9,19Л.	Внаслідок проведення торпедування в свердловині залишено: пікоподібне долото Ø 210 мм; перехідник Ø 203 мм; КЛС Ø 209; ОБТ178; НВ 168/127; БТ 127x9,19Л. "Голова" залишеного інструменту знаходиться на глибині 3377,4м.
Станом на 31 грудня 2007 року свердловина перебуває в консервації в стані ускладнення. Ускладнення перехідне в 2008 рік. Ускладнення виникло внаслідок низької стійкості стінок свердловини в інтервалі залегання карбонових відкладів Верхньовізейського ярусу, розкритих під великим зенітним кутом.						
19.04.2007	Свердловина № 352 Бугруватівська. (брак в роботі )	вибій - 3059 м, конструкція свердловини (по стовбуру): направлення Ø 426 мм x 94 м кондуктор Ø 324 мм x 1235м проміжна колона Ø 245 мм x 2894м		в процесі буріння (при вибої 3059 м) було помічено падіння тиску в маніфольді від 60 атм до 45 атм. Бурові насоси - справні.	Спроба розкріпити ведучу трубу підйом інструменту	отримано скачок інструменту та втрату ваги бурильної колони Після підйому інструменту стало очевидним, що причиною падіння тиску та зменшення ваги бурильної колони є поломка бурильної труби нижче замка по заводському зварному шву на глибині 365 м
					Спуск „лівого” різьбового	Надійно закріпити дзвін не

Дата	Об'єкт	Характеристики свердловини	Характеристики бурового розчину	Аварія	Дії по усуненні	Наслідок дій
21.04.2007					<p>дзвону 134/113 мм, Гроб.= 340 мм, Ізаг.= 630 мм. Ловильні роботи. „Голова” інструменту знаходиться на глибині 379 м</p> <p>Відвернення нижче „голови” залишеного інструменту вліво</p> <p>Відворот інструменту за допомогою шнурової торпеди ДШУ-33 (2 шнури по 25 м). Підйом інструменту.</p> <p>Спуск відкритого кінця. Ловильні роботи. Підйом інструменту на поверхню з УЗД.</p>	<p>вдалося – повертається весь інструмент</p> <p>не вдається – інструмент відвертається над дзвоном „Голова” залишеної частини на глибині 490 м.</p> <p>Відбраковано 15 шт бурильних труб.</p> <p>Весь інструмент піднято на поверхню.</p>
20.12.2007	Свердловина № 344 Бугруватівська. ( брак в роботі №1 )	вибій - 3775 м, конструкція свердловини (по стовбуру): направлення Ø 426 мм x 92 м кондуктор Ø 324 мм x 1077 м проміжна колона Ø 245 мм x 2380 м		<p>Під час буріння на глибині 3775 м було помічено падіння тиску в циркуляційній системі з 80 атм до 65 атм.</p>	<p>Після перегляду стану бурових насосів приступили до підйому. Підйом проходив без затяжок. При підйомі 10 свічі (всього було піднято 382 м труб) відбувся порив інструменту та „стрибок” талевого блоку.</p> <p>Ремонт талевої системи та підйом бурильного інструменту</p>	<p>Внаслідок різкого „стрибка” (динамічного поштовху вгору) талевого блоку в крон-блоці зіскочили дві струни талевої системи. Продовжити підйом стало неможливим</p> <p>Після підйому виявлено, що внаслідок розмиву, обрив стався по тілу труби над зварним швом замка. „Голова” залишеного інструменту знаходиться на глибині 698,51 м.</p>
					<p>Спуск різьбового колокола до „голови” залишеного інструменту. Ловильні роботи. Відворот на глибині 725 м</p> <p>Спуск „відкритого кінця” до „голови” залишеного інструменту. Ловильні роботи.</p>	<p>Відвернули дві трубки по різьбовому з'єднанні</p> <p>З'єдналися з залишеним інструментом. Викликали промивку не вдалося.</p>

Дата	Об'єкт	Характеристики свердловини	Характеристики бурового розчину	Аварія	Дії по усуненні	Наслідок дій
25.12.2007					Підйом з розходжуванням через шурф.	На глибині 3645 м вдалося відновити промивку. Підйом. Весь інструмент піднято на поверхню.
					проведення позачергової опресовки та дефектоскопії бурильної колони	Продовжено поглиблення свердловини під експлуатаційну колону
31.12.2007	Свердловина № 344 Бугруватівська. (брак в роботі №2 перехідний в 2008 рік )	вибій - 3830 м, конструкція свердловини (по стовбуру): направлення Ø 426 мм x 92 м кондуктор Ø 324 мм x 1077 м проміжна колона Ø 245 мм x 2380 м		під час буріння на глибині 3825 м було помічено падіння тиску в циркуляційній системі на 7 атм	Після перегляду стану бурових насосів приступили до підйому. Замінили трубу з розмитотою різьбою та продовжили поглиблення свердловини.	При підйомі на переході з 18 свічі до 19 свічі було виявлено розмив різьбового з'єднання. Під час буріння при вибої 3830 м було помічено падіння тиску в циркуляційній системі на 10атм.
					Для визначення причини падіння тиску приступили до підйому. Під час набору бурового розчину на долив перед підйомом, періодично розходжували бурильний інструмент.	При знаходженні долота 14 м над вибоєм стався обрив бурильної колони ( на ГІВ вага знизилась до 8 поділок).
					Закінчення підйому інструменту	Встановлено, що злам стався по тлі труби 25-27 см нижче замкової муфти. Всього підняли на поверхню 767,67 м бурильних труб, "голова" залишеного інструменту знаходилась на глибині 770,59м.
					Спуск різьбового колокола. Ловильні роботи.	Не вдалося закріпитись.
					Спуск різьбового колокола з завідним зубом. Ловильні роботи.	Відворот на глибині 440 м.
					Спуск відкритого кінця.	Відворот на глибині 283 м.

Дата	Об'єкт	Характеристики свердловини	Характеристики бурового розчину	Аварія	Дії по усуненню	Наслідок дій	
					Ловильні роботи. Спуск калібра МСЗ-133 на лівому бурильному інструменті Ø127мм. Ловильні роботи. Спуск калібра МСЗ-133 на лівому бурильному інструменті Ø127мм. Ловильні роботи. Спуск калібра МСЗ-133 на лівому бурильному інструменті Ø127мм – 36 м та Ø140мм – решта. Ловильні роботи. Спуск гладкого колокола на лівому бурильному інструменті Ø140мм. Ловильні роботи. Відворот інструменту за допомогою шнурової торпеди (2 шнури по 15 м на глибині 880м). Спуск відкритого кінця. Ловильні роботи.		Відвернулись на глибині 427 м. Відвернулись на глибині 574 м. Не вдалося закріпитись за "голову" залишеного інструменту. Закріпились за "голову".
07.01.2008					Підйом інструменту. Відвернулись на глибині 890 м по неробочому з'єднанні. Підйом інструменту з розходженням. Весь інструмент піднято на поверхню. В результаті руйнування та польоту бурильної колони виявлено деформацію частини бурильних труб: Ø127 мм – 18 шт, Ø114 мм – 11 шт, HW-168/127 – 6 шт, в свердловині залишено три шаршки від долота 215,9 MXL-20G		
17.07.2008	Свердловина № 507 Бугруватівська	вибій - 1010 м, конструкція свердловини (по стовбуру): Ø 426 мм x 88 м		під час буріння при вибої 1010м з'явилися ознаки підконтрлювання та вібрація бурильної колони. Після грюх	Підйом бурильної колони	Після підйому бурильної колони стало очевидним, що внаслідок зламу по муфтовому з'єднанню верхнього ЦЛСØ393,7, в свердловині залишено частину КНБК:	

Дата	Об'єкт	Характеристики свердловини	Характеристики бурового розчину	Аварія	Дні по усуненні	Наслідок дій
				спроб відриву і повторного доходження до вибою було відмічено падіння тиску з 40 – 42 атм до 36 – 38 атм та зменшення ваги інструменту на 2 ділення по ГІВ (5–6 тн)	Ловильні роботи з використанням МБУ 74x120. Розходжування інструменту в межах 40–60 тн.	Долото 393,7СЦ - ГВУ R 357 № 1610907; перехідник Ø 203 мм №141; ЦЛС Ø 393,7 №40; ОБТ229; ЦЛС Ø 393,7 №38. "Голова" залишеного інструменту на глибині 997 м.
					При черговому з'єднанні метчиком продовжили розходжування бурильної колони. Для зниження коефіцієнту тертя кірки та полегшення звільнення залишеної частини КНБК було встановлено нафтову ванну.	в процесі розходжування інструменту під час стоянки під нафтовою ванною в межах 40–180 тн, внаслідок звільнення і різкого переміщення бурильної колони та талевої системи вгору, пройшов обрив талевого канату зі сторони „мертвого” кінця з наступним падінням колони бурильних труб на вибій
					переоснастка талевої системи та підйом бурильного інструменту	Встановлено, що в результаті польоту бурильної колони після обриву талевого канату виведено з ладу ( погнута ): бурильні труби ТБПК 127x9,19Л; ведуча бурильна труба 133 x 133
26.07.2008				Установка цементного мосту і підготовка до перебурки свердловини другим стовбуром	Здійснено підйом інструменту	В інтервалі 940-1010 м. свердловину перебурено новим стовбуром
30.09.2008	Свердловина № 507 Бугруватівська. ( брак в роботі	вибій - 3095 м, конструкція свердловини (по стовбуру):		під час буріння при вибої 3095 м було помічено різке падіння тиску в циркуляційній		Встановлено, що злам стався по тілу труби 66-72 см нижче торця муфти замка. Зламана труба: ТБПК-127x9,19Л № 254.

Дата	Об'єкт	Характеристики свердловини	Характеристики бурового розчину	Аварія	Дії по усуненні	Наслідок дій
	№2 )	направлення Ø 426 мм x 88 м кондуктор Ø 324 мм x 1050 м		системі. Під час зупинки ротора стався обрив бурильної колони (на ГІВ вага знизилась від 44 до 20 поділок).		В свердловині залишено: долото 295,3 SS-3 LRGP; перехідники; ОБТØ203; КЛС295,3; ТБПК 127x9,19 G <sub>105</sub> та ін.. “Голова” залишеного інструменту знаходиться на глибині 1375 м.
					Спуск різьбового колокола. Ловильні роботи.	Не вдалося закріпитись.
02.10. 2008					Спуск різьбового колокола 135/90-390 з завідним зубом. Ловильні роботи. Відворот за допомогою шнурової торпеди ДШУ-33М (2 шнури по 15 м) на глибині 1509 м. Спуск відкритого кінця. Ловильні роботи.	Підйом всього інструменту на поверхню.
08.11. 2008	Свердловина № 507	вибій - 3350 м, конструкція		під час поглиблення свердловини під експлуатаційну колону долотом 215,9 С-ГВ R192 №0730307 було помічено зростання моменту на роторі з 22-24 до 24-26 ділень (при умовному нулі - 15 ділень) з ознаками підконтролювання колони бурильних труб.	Подальше поглиблення	Момент на роторі зріс до 28 ділень.
09.11. 2008	Бугруватівська. ( брак в роботі №3 )	свердловини (по стовбуру): направлення Ø 426 мм x 88 м кондуктор Ø 324 мм x 1050 м проміжна колона Ø 245 мм x 3284 м			приступили до підйому бурильного інструменту	після закінчення підйому виявлено, що в свердловині залишено три шарошки. Всього долото відпрацювало на вибої 24 год та пробурило 43 м
					Робота торцовими фрезами та долотом з шламауловлювачем	Очищення вибою від металу в свердловині
28.11. 2008	Свердловина № 190 Пн. Долинська.	вибій - 3161 м, конструкція свердловини (по		в процесі буріння, при вибої 3161 м, після чергового	З метою пошуків ізоляції приступили до підйому бурильного інструменту	Після закінчення підйому виявлено, що внаслідок розкріплення корпусу

Дата	Об'єкт	Характеристики свердловини	Характеристики бурового розчину	Аварія	Дії по усуненні	Наслідок дій
	( брак в роботі)	стовбуру): кондуктор Ø 324 мм x 155м проміжна колона Ø 245/219 мм x 2257 м		нарощування було втрачено струмопідвід (ізоляцію).		електробоура по різьбі МК-150, в свердловині залишено: долото 190,5 СЗ-ГВ Д65; перехідник; частина електробоура Ø 164 мм. “Голова” залишеного інструменту знаходиться на глибині 3151,67м і представлена валом електробоура Ø 50 мм.
03.12. 2008					Спуск перехідника з муфтою МК-150 на обсадній трубі Ø 146 мм. Ловильні роботи. Спуск шліпсової труболітки. Ловильні роботи.	Без результату. Весь інструмент піднято на поверхню
07.02. 2009	Свердловина № 507 Бугруватівська	вибій - 4150/4212 м, конструкція свердловини (по стовбуру): направлення Ø 426 мм x 88 м кондуктор Ø 324 мм x 1052м проміжна колона Ø 245 мм x 3284м		при вибої 4212 м при черговому відриві долота в процесі буріння, було отримано затяжку до 162 тн (при власній вазі інструменту 152 тн) та втрачено рухомість бурильної колона без втрати циркуляції.	Оскільки при роботі насоса УНБТ- 950 не було змоги розходжувати інструмент ( на ділянці де розташована бурова є обмеження від РЕС по використанню електроенергії через низьку напругу) – бурильник вимкнув промивку та повторив спробу відриву долота від вибою.	Результату не отримали
					перейшли на насос УНБ-600 та викликали промивку перевіши насос на два клапани з робочим тиском 120 атм. Подальше розходжування бурильної колони в межах 152-190 тн.	Позитивного результату не дало. В свердловині знаходилось: долото 215,9 С-34 LRGSP СТ-679; КЛС Ø213,8; перехідники; гвинтовий двигун ДЗМ-172 №23; зворотний клапан; НВ-168/127; ТБПК 127х9,19 Л; ТБПК 127х9,19 Г <sub>105</sub> ; ТБПК 127х9,19 S <sub>135</sub> .
					За результатами ГДС	Вдалося підняти частину

Дата	Об'єкт	Характеристики свердловини	Характеристики бурового розчину	Аварія	Дії по усуненні	Наслідок дій
					(прихватомір) встановлено, що бурильні труби не прихоплено. Проведення струшування інструменту в інтервалі 4200-4185 м за допомогою шнурової торпеди ДШТ-25 ( 2 шнури по 15 м) та промивки з розходжуванням	інструменту на поверхню. Після підйому виявлено, що внаслідок зламу верхнього конуса різьби перехідника К <sub>3</sub> -117 на віддалі 2 см від його корпусу в свердловині залишено частину КНБК: долото 215,9 С-34 LRGSP СТ-679; КЛС Ø213,8; перехідник (К <sub>3</sub> -117 x К <sub>3</sub> -117)
					Строби підняти залишену частину КНБК з використанням гладкого „колокола”	позитивного результату не дали
					приступили до забурювання нового стовбура свердловини з глибини 4164 м	Роботи по зарізці нового стовбура з глибини 4164 м без встановлення цементного моста позитивного результату не дали.
13.05.2009					Встановлення цементного моста в інтервалі 4211-4150 м з метою повторного забурювання нового стовбура. Підбурили цементний міст до глибини 4121 м. Забурка нового стовбура турбінним способом з використанням відхилюючих КНБК та телеметричної системи.	Свердловину перебурено новим стовбуром до глибини 4212 м та введено з ускладнення
За результатами проведених досліджень встановлено, що ускладнення виникло внаслідок зламу верхнього конуса різьби перехідника К <sub>3</sub> -117 на віддалі 2 см від його корпусу в процесі буріння свердловини під експлуатаційну колону.						
14.11.2009	Свердловина № 534 Бугруватівська	вибій - 3460/3489 м, конструкція свердловини (по		при вибої 3489м в процесі промивки перед нарощуванням зафіксовано	Зупинка бурових насосів	спостерігався перелив бурового розчину на гирлі свердловини з інтенсивністю 8 л/с
				Бурильний інструмент	При закритому превенторі тиск	



Дата	Об'єкт	Характеристики свердловини	Характеристики бурового розчину	Аварія	Дні по усуненні	Наслідок дії
		стовбуру): направлення Ø 426 мм x 90 м кондуктор Ø 324 мм x 1050м; проміжна колона Ø 245 мм x 2308м; викривлення свердловини.		збільшення об'єму розчину в приймальних ємностях	приїжджали до глибини 3473 м та закрили превентор	становив 35 кгс/см <sup>2</sup> і застабілізувався на протязі 4 год на величині 42 кгс/см <sup>2</sup> В свердловині знаходилось: долого 215,9 НТТ-547GL; перехідники; ОБТ Ø 178; КЛС Ø214; ОБТ Ø 178; ТБПК 114 x 8,56 Л; захід ведучої труби та ін., загальною довжиною 3489м.
					Герметизація гирла свердловини та заготовка обважненого розчину. Закачування 8 м <sup>3</sup> обважненого розчину крейдою густиною $\gamma = 1,40 \text{ г/см}^3$ з протитиском на дроселі до 70атм	Отримали на виході розрахований розчин $\gamma = 1,12$ г/см <sup>3</sup> , на початку закачки, та розраховану воду $\gamma = 0,87 \text{ г/см}^3$ в кінці закачки.
17.11. 2009					Заготовили 138 м <sup>3</sup> розчину обважненого баритом $\gamma = 1,34$ г/см <sup>3</sup> та приступили до глушіння свердловини шляхом закачки важкого розчину в труби з протитиском на дроселі 68-72 атм. (при об'ємі свердловини 121 м <sup>3</sup> ).	В процесі глушіння з свердловини виходила солена розрахована вода в'язкістю 20- 22 сек: (на початку $\gamma = 1,12$ г/см <sup>3</sup> ; в середині $\gamma = 1,03 \text{ г/см}^3$ ; в кінці $\gamma = 1,13 \text{ г/см}^3$ ). В кінці закачки спостерігався вихід мутної соленої води без ознак присутності бариту. Водопроявлення було ліквідовано, переливу на гирлі не спостерігалось.
					Розходжуванням інструменту в межах 80-170 тн, при власній вазі 110 тн	Розвантаженням вниз вдалося відновити рухомість бурильної колони та приїжджати її вище башмака 245 мм технічної колони до глибини 2245 м.
					Заготовили 120 м <sup>3</sup> обважненого	після проробки інтервалу 3450-

Дата	Об'єкт	Характеристики свердловини	Характеристики бурового розчину	Аварія	Дії по усуненні	Наслідок дій
					розчину $\gamma = 1,34 \text{ г/см}^3$ та приступили до заміни бурового розчину в інтервалі 0 – 2245 м. Після приведення параметрів розчину до вимог ГТН по циклу, приступили до спуску інструменту з періодичними промивками та обробками розчину до вибою.	3489 м протягом 7 год 45 хв досягнуто попереднього вибою та виведено свердловину зі стану ускладнення
Імовірною причиною виникнення ускладнення (газоводопроявлення) є вплив роботи нагнітальної свердловини №20 через яку ведеться закачка води в горизонт В-18 з метою підтримки пластових тисків в ІV блоці						
14.09.2009	Свердловина № 534 Бугруватівська. ( брак в роботі №1 )	вибій - 2495 м, конструкція свердловини (по стовбуру): направлення Ø 426 мм x 90 м кондуктор Ø 324 мм x 1050 м проміжна колона Ø 245 мм x 2308 м		В процесі буріння при вибої 2495 м перед черговим нарощуванням ( <i>приводились роботи по затягуванню трубки в бурову</i> ) внаслідок прилипання було втрачено рухомість бурильної колони без втрати циркуляції.	Тривале розходження інструменту в межах 45-170 тн	Позитивного результату не дало. В свердловині знаходилось: долото 215,9 НА 217; КЛС Ø215,9 мм; перехідники; ОБТ-178; КЛС Ø215,9 мм. Долото на глибині - 2493,16 м.
15.09.2009					З метою звільнення бурильного інструменту було встановлено нафтову ванну (25 м <sup>3</sup> ).	Через 2 год стоянки під ванною інструмент вдалося звільнити та виведено свердловину зі стану браку.
30.10.2009	Свердловина № 534 Бугруватівська. ( брак в роботі №2 )	вибій - 3210 м, конструкція свердловини (по стовбуру): направлення Ø 426 мм x 90 м кондуктор Ø 324 мм x 1050 м проміжна колона Ø 245 мм x 2308 м		в процесі буріння при вибої 3210 м було помічено падіння тиску в циркуляційній системі з 60-65 атм до 35 атм та зменшення ваги інструменту з 107 тн до 59 тн.	Підйом інструменту	Після закінчення підйому, стало очевидним, що в результаті зламу бурильної труби по тілу на 25 см нижче муфти в свердловині залишено: долото 215,9 С34 LRGSP ; перехідники; ОБТ-178; КЛС Ø215,9 мм; ОБТ-178; загальною довжиною 186,38 м. «Голова» залишеного інструменту знаходиться на глибині – 1986м
					Спуск різьбового колокола К-	Не вдалося надійно

Дата	Об'єкт	Характеристики свердловини	Характеристики бурового розчину	Аварія	Дні по усуненні	Наслідок дій
01.11.2009					135x113 (L=0,63 м, Dзовн.=176 мм) до «голови» залишеного інструменту. Ловильні роботи. Повторний спуск різьбового колокола К-135x113 (L=0,64 м, Dзовн.=170 мм). Ловильні роботи. Відворот інструменту на глибині 2096 м за допомогою шнурової торпеди типу ДШУ-33 (2 шнури по 15 м). Спуск відкритого кінця. Ловильні роботи.	Весь інструмент піднято на поверхню та виведено свердловину зі стану браку
19.08.2009	Свердловина № 77 Пн. Долинська. (брак в роботі)	вибій - 3006 м, глибина забурки нового стовбура – 1804 м конструкція свердловини (по стовбуру): кондуктор Ø 324 мм х 153 м проміжна колона Ø 245/219 мм х 2291 м		при вибої 3006 м в процесі поглиблення свердловини при черговому підриві долота було втрачено рухомість бурильної колони.	Тривале розходжуваням бурильного інструменту в межах 60-120 тн з промивкою	Ліквідувати прихоплення не вдалося. Ротором інструмент не перевірявся. В свердловині знаходилось: долото Ø 190,5 мм; електробур Е 164/8 (прямий); ПКІ-164; ОБТ-146 (ЕБШ); ЕБШ-127x10,0 Д,Е,Л; захід ведучої труби
20.08.2009					З метою звільнення бурильного інструменту було встановлено нафтову ванну (16 м <sup>3</sup> ). Густина бурового розчину - 1,37 г/см <sup>3</sup> . Нафтову ванну встановити в інтервалі - 3006-2458 м	Через 4 год стоянки під ванною інструмент вдалося звільнити та виведено свердловину зі стану браку
07.04.2009	Свердловина № 148 Пн. Долинська. (брак в роботі №1)	вибій - 2480 м, глибина забурки нового стовбура – 1884 м конструкція свердловини (по стовбуру): кондуктор		під час проведення робіт по відновленню проходимості другого стовбура в зоні прорізаного вікна в технічній колоні (інтервал 1884 - 1887 м) стався злам різьби	Після спуску долота встановлено, що „голова” залишеної частини КНБК знаходиться на глибині 1929 м. Спуск МБУ-58/94 до „голови” залишеної частини КНБК. Ловильні роботи.	Без результату. Під час спуску долота з періодичними промивками, без посадок, (залишена частина КНБК опустилась нижче попереднього місяця) - з глибини 2000 м відмічено падіння питомої ваги розчину з 1,56

		перехідника та політ частини КНБК в свердловину. В свердловині залишено: ІСМ-180; перехідники; ОБТС-146; оправка Ø190 мм. Злам стався по конусу різьби Кз-133.	Під час проведення робіт по відновленню проходимості другого стовбура в зоні прорізаного вікна в технічній колоні (інтервал 1884 - 1887 м) стався злам конуса різьби колонної оправки та політ частини КНБК в свердловину. В свердловині залишено: конус - райбер Ø 70/170 мм; перехідник; ОБТС-146.	Після ОГР з проробками та промивкою в інтервалі 2000–2025 м протягом 7 год, продовжили спуск з періодичними промивками до глибини 2458,6 м (місцезнаходження „голови” залишеного інструменту). Почерговий спуск різьбового колокола Ø183 мм та МБУ-58/94	Після проведення лувильних робіт за допомогою МБУ-53/86, вдалося підняти залишену частину КНБК на поверхню та виведено свердловину зі стану браку.	г/см <sup>3</sup> до 1,50 г/см <sup>3</sup> та умовної в'язкості та спостерігався інтенсивний виніс породи. позитивного результату не дали
18.04.2009				Проведення лувильних робіт за допомогою МБУ-58/94	вдалося підняти залишену частину КНБК на поверхню та виведено свердловину зі стану браку	
25.04.2009	Свердловина № 148 Пн. Долинська. ( брак в роботі №2 )	Ø 324 мм х 309 м проміжна колона Ø 245/219 мм х 2377 м	Під час проведення робіт по відновленню проходимості другого стовбура в зоні прорізаного вікна в технічній колоні (інтервал 1884 - 1887 м) стався злам конуса різьби колонної оправки та політ частини КНБК в свердловину. В свердловині залишено: конус - райбер Ø 70/170 мм; перехідник; ОБТС-146.	Після проведення лувильних робіт за допомогою МБУ-53/86, вдалося підняти залишену частину КНБК на поверхню та виведено свердловину зі стану браку.	Після проведення лувильних робіт за допомогою МБУ-53/86, вдалося підняти залишену частину КНБК на поверхню та виведено свердловину зі стану браку.	г/см <sup>3</sup> до 1,50 г/см <sup>3</sup> та умовної в'язкості та спостерігався інтенсивний виніс породи. позитивного результату не дали

	№ скв.	Характеристика свердловини	Характеристика бурового розчину	Аварія	Дія по усуненні	Наслідок дії
11.02.2010	Свердловина № 835 Долинська	вибій - 2663 м, конструкція свердловини (по стовбуру): кондуктор Ø 324 мм x 151 м проміжна колона Ø 245 мм x 1815 м		при вибої 2663 м провели підйом бурильного інструменту з пошуками ізоляції. Після заміни ПКД, накрутили 1 свічу ОБТЕ Ø 146 – 25 м, перевірили наявність ізоляції та продовжили спуск. При повторній перевірці - ізоляцію було втрачено.	Пристипили до підйому КНБК з пошуками ізоляції.	Піднявши 1 свічу ОБТЕ Ø 146, стало очевидним, що в результаті зламу по тілу конуса різьби 3-133 перехідника ПКІ – в свердловині залишено частину КНБК: долото 7 ½ BSZ1 CGH; електробур E-164/8 пр.ред.; частина ПКІ-164. «Голова» залишеної частини КНБК представлена зламаним по тілу конусом різьби 3-133, що вкручений в нижню частину ПКІ з якого виступає 35 см обрваного електрокабеля.
					Для визначення місця знаходження «голови» залишеної частини інструменту, в свердловину було спущено КНБК №1 [долото Ø190,5 мм + перехідник + ОБТЕ Ø146 – 28 м + бурильні труби ТБЕ Ø127]	Посадку отримали на глибині 1885,4 м.
					Розвантаження колони труб на 8-10 тн та повертання долота з навантаженням з/н з швидкістю обертання ротора 20 -30 об/хв	Пройти місце посадки не вдалося. Після підйому КНБК №1 слідів роботи долота по металу не видно. Зроблено припущення, що «голова» залишеної частини КНБК знаходиться на глибині 1885,4м.
					Спуск КНБК №2 [різбовий колокол + бурильні труби ТБЕ Ø127]	Під час спуску отримали посадку на глибині 1856,7 м.
					З промивкою та з крученням дійшли до глибини 1857,74 м протягом 1,5 год.	Інструмент зупинився. Підйом на поверхню. Слідів роботи по металу на внутрішній поверхні колокола не виявлено.

Дата	Об'єкт	Характеристики свердловини	Характеристики бурового розчину	Аварія	Дії по усуненні	Наслідок дій
					Повторний спуск КНБК №1	Отримали посадку на глибині 1860 м. Пройшли з крученням інтервал 1860-1861 м за 1 год. Нижче глибини 1861 м поглибитись не вдалося.
					Підйом КНБК №1 на поверхню. Спуск КНБК №3 [долото Ø190,5 мм + Е-164/8 пр.ред. + ПКІ-164 + ОБТЕ Ø146 – 25 м + бурильні труби ТБЕ Ø127] до глибини 1860 м. З періодичними промивками з включенням електробуром та з проробками в місцях посадок продовжили спуск інструменту.	Враховуючи фактичний вибір свердловини та довжину залишеної частини КНБК, стало очевидним, що «голова» знаходиться на глибині 2649,5м.
					Спуск КНБК №4 [гладкий колокол + безпечний перехідник + ОБТЕ Ø146 – 26 м + бурильні труби ТБЕ Ø127]	не вдалось надійно закріпитись за «голову». підняти залишену частину КНБК
					Спуск КНБК №5 [різбовий колокол + безпечний перехідник + ОБТЕ Ø146 – 26 м + бурильні труби ТБЕ Ø127];	не вдалось надійно закріпитись за «голову». підняти залишену частину КНБК
					Спуск КНБК №6 [різбовий мітчик з воронкою + безпечний перехідник + ОБТЕ Ø146 – 26,0м + бурильні труби ТБЕ Ø127]	не вдалось надійно закріпитись за «голову». підняти залишену частину КНБК
					Через неможливість підняти залишену частину КНБК, було установлено цементний міст та визначення його «голови» - на глибині 2565 м, приступили до перебудови свердловини другим стовбуром з використанням	В процесі зарізки нового стовбура даною КНБК не вдалося напрацювати якісну полицку та відійти від основного стовбура.

Дата	Об'єкт	Характеристики свердловини	Характеристики бурового розчину	Аварія	Дні по усуненні	Наслідок дій
					<p>наступних відхиляючих КНБК з СТЕ: <b>КНБК №7</b> [долото 7 ½ BSZ1 CGHL + E-164/8 ред.(МВ-1,5°) + СТЕ-164 + ПКІ-164 + ОБТЕ Ø 146 – 25,2 м + бурильні труби ТБЕ Ø127].</p> <p>За допомогою <b>КНБК №7</b> провели напрацювання полічки та спробу зарізки нового стовбура при встановленні відхилювача проти кривизни в період з 01.03.10 по 05.03.10 року в інтервалі 2570-2605 м протягом 47,5 год.</p>	
					<p>Використання <b>КНБК №8</b> [долото 7 ½ BSZ1 CGHL + E-164/8 ред.(МВ-1°х1°) + СТЕ-164 + ПКІ-164 + ОБТЕ Ø 146 – 25,2 м + бурильні труби ТБЕ Ø127].</p> <p>За допомогою <b>КНБК №8</b> провели повторну спробу напрацювання полічки та зарізки нового стовбура при встановленні відхилювача проти кривизни в період з 06.03.10 по 11.03.10 року в інтервалі 2586-2633 м протягом 82,5 год.</p>	<p>В процесі зарізки нового стовбура даною <b>КНБК</b> не вдалося напрацювати якісну полічку та відійти від основного стовбура.</p>
					<p>Використання <b>КНБК №9</b> [долото 187,3/80 ТКЗ + E-164/8 ред.(МВ-1°х1°) + СТЕ-164 + ПКІ-164 + ОБТЕ Ø 146 – 25,2 м + бурильні труби ТБЕ Ø127].</p> <p>За допомогою <b>КНБК №9</b> провели спробу напрацювання полічки та</p>	<p>В процесі зарізки нового стовбура даною <b>КНБК</b> не вдалося напрацювати якісну полічку та відійти від основного стовбура.</p>

Дата	Об'єкт	Характеристики свердловини	Характеристики бурового розчину	Аварія	Дії по усуненні	Наслідок дій
					зарізки нового стовбура при встановленні відхилювача проти кривизни в період з 13.03.10 по 14.03.10 року в інтервалі 2611-2627 м протягом 16,25 год. Використання <b>КНБК №8</b> [долото 7 ½ BSZ1 CGHL + E-164/8 ред.(МВ-1°х1°) + СТЕ-164 + ПКІ-164 + ОБТЕ Ø 146 – 25,2 м + бурильні труби ТБЕ Ø127]. За допомогою <b>КНБК №8</b> проводили напрацювання полочки та зарізки нового стовбура при встановленні відхилювача проти кривизни в період з 14.03.10 по 17.03.10 року в інтервалі 2611-2649,5 м протягом 35,75 год.	В процесі зарізки нового стовбура даною КНБК дійшли до «голови» залишеної частини інструменту. З метою скорочення витрат та ліквідації ускладнення, було прийнято рішення про проходження залишеної частини КНБК без повторного встановлення цементного мосту за допомогою відхиляючих КНБК з використанням доліт ІНМ
16.04.2010					Використання <b>КНБК №10</b> [долото ІНМ Ø 186 + E-164/8 ред.(МВ-1°х1°) + СТЕ-164 + ПКІ-164 + ОБТЕ Ø 146 – 25,2 м + бурильні труби ТБЕ Ø127] ... <b>КНБК №17</b> [ІНМ Ø 188,9/80Т(б/в Ø 186 мм) + E-164/8 ред.(МВ-1°х1°) + СТЕ-164 + ПКІ-164 + ОБТЕ Ø 146 – 25,2 м + бурильні труби ТБЕ Ø127]	Після розширення інтервалу 2660-2663 м протягом 7,75 год сферичним фрезом ФС-190 в компоновці з прямим редукторним буром, приступили до поглиблення свердловини новим стовбуром Свердловину перебурено новим стовбуром в інтервалі 2565 - 2663 м, досягнуто попереднього вибою та виведено свердловину зі стану ускладнення
Ускладнення виникло внаслідок зламу по тілу конуса різьби 3-133 перехідника ПКІ – 164 в процесі проведення СПО з пошуками ізоляції						
20.04.2010	Свердловина № 835 Долинська. ( брак в роботі) стовбуру):	вибій - 2685 м, конструкція свердловини (по стовбуру):		при вибої 2685 м, в процесі буріння різко зріс реактивний момент на долоті ( з	Проведення підйому інструменту	стало очевидним, що в свердловині залишено дві шарошки від долота: 7 ½ BSZ1 CGHL №0151.



дата	Об'єкт	характеристики свердловини	характеристики бурового розчину	Аварія	дні по усуненні	Наслідок дій
		кондуктор Ø 324 мм x 151 м проміжна колона Ø 245/219 мм x 1815 м		80 ампер до 100 ампер)		Буріння велося наступною КНБК: долото 7 ½ BSZ1 CGHL №0151; електробур E-164/8 пр.ред.; ПКІ-164; ОБТЕØ146; ТБЕØ127 x 10 Е,Л
23.04. 2010					Спуск магнітного фреза МФ- 185. Ловильні роботи. Спуск та робота торцевим фрезом ФЗ-187	Підняли металеву стружку.  <i>Очищено</i> вибій від залишків металу та виведено свердловину зі стану браку

Формальне представлення технологічних проблем на основі фактичних даних додатку А (для виділених елементів)

Дата 24.11.2003р.

Об'єкт: Свердловина № 545 Бугруватівська

Характеристика свердловини (технологічні параметри):  $v_1$  (вибій) =  $d_1^c$  = 3338

Технологічна проблема (Аварія):

$$\overbrace{TP_1(v_1^{TP}, \text{глибина}) = d_1^{TP}; v_2^{TP} (\text{циркуляція}_\text{ бурового\_розчину}) = d_2^{TP}; v_3^{TP} (\text{рухомість\_БК}) = d_3^{TP}}^{\text{лінійні характеристики / обмеження}} = \overbrace{v_3^{TP} (\text{рухомість\_БК}) = d_3^{TP}}^{\text{логічна характеристика / обмеження}} = \text{"втрачено"})$$

Дія по усуненню (присвоєння змінних як можливе рішення):

$$\overbrace{\psi_1^{TP} (\text{цементний\_міст}) = \text{"встановлено"}; v_2^W (\text{інтервал}) = D_2^W = [3028..3167]; v_3^W (\text{перебурка\_новим\_стовбуром}) = \text{"так"}}^{\text{лінійні характеристики / обмеження}} \leftarrow \overbrace{v_3^{TP_1} (\text{осипання\_стінок}) = d_3^{TP_1}}^{\text{логічна характеристика / обмеження}} = \text{"так"})$$

Наслідок дії (зміни доменних значень):  $v_1$  (вибій) =  $d_1^c$  = 3396

Технологічна проблема/стан технологічної проблеми (Аварія):

$$\overbrace{TP_1, TPS_1 (v_1^{TPS_1} (\text{вибій})) = d_1^{TPS_1} = 3396; [v_2^{TPS_1} (\text{циркуляція}_\text{ бурового\_розчину}) = d_2^{TPS_1} = \text{"втрачено"}]}^{\text{лінійні характеристики / обмеження}} \leftarrow \overbrace{v_3^{TPS_1} (\text{осипання\_стінок}) = d_3^{TPS_1}}^{\text{логічна характеристика / обмеження}} = \text{"так"})$$

Наслідок дії (зміни доменних значень):  $v_4^{TPS_1} (\text{час\_відновлення}) = d_4^{TPS_1} = 4; v_2^{TPS_1} (\text{циркуляція}_\text{ бурового\_розчину}) = d_2^{TPS_1} = \text{"відновлено"})$

Технологічна проблема/стан технологічної проблеми (Аварія):

$$\overbrace{TP_1, TPS_2 (v_1^{TPS_2} (\text{вибій})) = d_1^{TPS_2} = 3396; v_2^{TPS_2} (\text{втрата\_рухомості\_бурового\_інструменту}) = d_2^{TPS_2} = \text{"так"}}^{\text{лінійні характеристики / обмеження}}$$

Дія по усуненню (присвоєння змінних як можливе рішення):  $\psi_2^{TPS_2} (\text{глибина}) = 3244; v_4^W (\text{відстріл\_інструменту}) = \text{"так"})$

$\psi_3^{TPS_3}$  ( $v_6^W$  (цементний \_ міст) = "встановлено";  $v_7^W$  (інтервал) = [2960..3210]);  $v_8^W$  (глибина) = 2970;  $v_9^W$  (перебурка \_ новим \_ стовбуром) = "так")

Наслідок дії (зміни доменних значень):  $v_3^{TPS_3}$  (глибина \_ свердловини) =  $d_3^{TPS_3}$  = 3440

Технологічна проблема/стан технологічної проблеми (Аварія):

$TP_1, TPS_3$  ( $v_1^{TPS_3}$  (глибина) =  $d_1^{TPS_3}$  = 3402;  $v_2^{TPS_3}$  (затяжка \_ бурильного \_ інструменту) =  $d_2^{TPS_3}$  = "так")

Дія по усуненню (присвоєння змінних як можливе рішення):  $\psi_4^{TPS_3}$  ( $v_{10}^W$  (розходження \_ БК) = "так";  $v_{11}^W$  (промивка) = "так")

Наслідок дії (зміни доменних значень):  $v_3^{TPS_3}$  (циркуляція \_ розчину) =  $d_3^{TPS_3}$  = "втрачено";  $v_4^{TPS_3}$  (рух \_ інструменту) =  $d_4^{TPS_3}$  = "втрачено"

Дія по усуненню (присвоєння змінних як можливе рішення):  $\psi_5^{TPS_3}$  ( $v_{12}^W$  (глибина) = 3193;  $v_{13}^W$  (відстріл \_ інструменту) = "так")

$\psi_6^{TPS_3}$  ( $v_{14}^W$  (інтервал) = [2703..3170];  $v_{15}^W$  (спуск \_ обсадної \_ колони \_ 168 мм) = "так";  $v_{16}^W$  (цементування \_ обсадної \_ колони \_ 168 мм) = "так")

$\psi_7^{TPS_3}$  ( $v_{17}^W$  (інтервал) = [3067..3363];  $v_{18}^W$  (спуск \_ ' хвостовика' \_ 144 мм) = "так";  $v_{19}^W$  (цементування \_ ' хвостовика' \_ 144 мм) = "так")

Наслідок дії (зміни доменних значень):  $v_5^{TPS_3}$  (застосування \_ долота \_ 98.4 мм) =  $d_5^{TPS_3}$  = "так";  $v_6^{TPS_3}$  (глибина \_ свердловини) =  $d_5^{TPS_3}$  = 3470

Дія по усуненню (присвоєння змінних як можливе рішення):

$\psi_8^{TPS_3}$  ( $v_{19}^W$  (інтервал) = [3337..3470];  $v_{20}^W$  (осадка \_ свердловини \_ ' хвостовиком \_ фільтром' \_ 73 мм) = "так")

Наслідок дії (зміни доменних значень):

$v_7^{TPS_3}$  (перебурка \_ новим \_ стовбуром) =  $d_7^{TPS_3}$  = "так";  $v_6^{TPS_3}$  (глибина \_ свердловини) =  $d_5^{TPS_3}$  = 3440

**ПРАВИЛО 1:**  $(v_{sum}^i \text{ (осипання \_ стінок)} = d_{v_{sum}}^i = [ \text{"так"} : CF_{sum}^i ] \wedge v_{sum}^2 \text{ (зенітний \_ кут)} = d_{v_{sum}}^2 = \text{"великий"}) \xrightarrow{\text{RULE\_1}}$

$TP(v \text{ (прихоплення \_ бурового \_ інструменту)}) = d_v^{TP} = \text{"так"})$

Дата 2005 р.

Об'єкт: Свердловина № 544 Бугруватівська

Характеристика свердловини (технологічні параметри):  $v_1 \text{ (вибій)} = d_1^{C_1} = 3338; v_2 \text{ (глибина \_ направлення \_ (глибина \_ стуску))} = d_2^{C_2} = 7;$

$v_3 \text{ (324мм \_ кондуктора \_ (глибина \_ стуску)} = d_3^{C_3} = 1102); v_4 \text{ (245мм \_ техн. \_ колона(глибина \_ стуску))} = d_4^{C_4} = 3223$

Технологічна проблема (Аварія):  $TP_2(v_1^{TP_2} \text{ (глибина)} = d_1^{TP_2} = 3506; v_2^{TP_2} \text{ (диференційне \_ прихоплення)} = d_2^{TP_2} = \text{"так"})$

Дія по усуненню (присвоєння змінних як можливе рішення):  $\Psi_1^{TP_2} (v_1^w \text{ (нафтова \_ ванна)} = \text{"встановлено"})$

Наслідок дії (зміни доменних значень):  $v_1^{TP_2} \text{ (Інструмент \_ звільнено)} = d_3^{TP_2} = \text{"так"};$

$[v_2^{TP_2} \text{ (виділення \_ нафти \_ 3 \_ розчину)} = d_4^{TP_2} = \text{"ні"}] \xleftarrow{\text{Rule\_2}} [v_3^{TP_2} \text{ (кількість \_ нафти \_ в \_ розчині)} = d_5^{TP_2} = \text{"велика"}]$

Дія по усуненню (присвоєння змінних як можливе рішення):

$\Psi_2^{TP_2} (v_2^w \text{ (стуск \_ компонівки \_ (долото} \varnothing 215.9 \_ ОБТ\varnothing 178)) = \text{"так"}; v_3^w \text{ (проробка \_ свердловини)} = \text{"так"})$

Наслідок дії (зміни доменних значень):  $v_4^{TP_2} \text{ (глибина)} = d_6^{TP_2} = 3625; v_5^{TP_2} \text{ (посадка \_ інструменту)} = d_7^{TP_2} = \text{"так"}$

Технологічна проблема/стан технологічної проблеми (Аварія):

$TP_2.TPS_1(v_1^{TPS_1} \text{ (вибій)} = d_1^{TPS_1} = 3625; v_2^{TPS_1} \text{ (посадка \_ інструменту)} = d_2^{TPS_1} = \text{"так"})$

Дія по усуненню (присвоєння змінних як можливе рішення):  $\psi_3^{TPS_1} (v_4^{\psi} (\text{прокручування\_інструменту}) = \text{"так"})$

логічна характеристика / обмеження

Наслідок дії (зміни доменних значень):  $v_3^{TPS_1} (\text{запресування\_долота}) = d_3^{TPS_1} = \text{"так"}$

логічна характеристика / обмеження

Технологічна проблема/стан технологічної проблеми (Аварія):  $TP_2, TPS_2 (v_1^{TPS_2} (\text{забруднення\_вибою\_шлямом}) = d_1^{TPS_2} = \text{"так"})$

Дія по усуненню (присвоєння змінних як можливе рішення):

логічні характеристики / обмеження

$\psi_4^{TPS_2} (v_5^{\psi} (\text{обваження\_бурового\_розчину}) = \text{"так"}; v_6^{\psi} (\text{прокачка\_свердловини}) = \text{"так"})$

логічна характеристика / обмеження

Наслідок дії (зміни доменних значень):  $v_2^{TPS_2} (\text{шлам\_на\_усті}) = d_2^{TPS_2} = \text{"ні"}$

логічна характеристика / обмеження

Дія по усуненню (присвоєння змінних як можливе рішення):  $\psi_5^{TPS_2} (v_7^{\psi} (\text{спуск\_бурового\_інструменту}) = \text{"так"})$

числова характеристика / обмеження

Наслідок дії (зміни доменних значень):  $v_3^{TPS_2} (\text{глибина}) = d_3^{TPS_2} = 16; v_4^{TPS_2} (\text{буріння\_свердловини}) = d_4^{TPS_2} = \text{"так"};$

Технологічна проблема/стан технологічної проблеми (Аварія):

логічні характеристики / обмеження

$TP_2, TPS_3 (v_1^{TPS_3} (\text{нарощування\_інструменту}) = d_1^{TPS_3} = \text{"так"}; v_2^{TPS_3} (\text{посадка\_інструменту}) = d_2^{TPS_3} = \text{"так"}; v_3^{TPS_3} (\text{запресування\_долота}) = d_3^{TPS_3} = \text{"так"})$

Дія по усуненню (присвоєння змінних як можливе рішення):

логічна характеристика / обмеження

$\psi_6^{TPS_3} (v_8^{\psi} (\text{підняття\_густини\_бурового\_розчину}) = \text{"так"}; v_9^{\psi} (\text{густина\_бурового\_розчину}) = 1.26)$

Наслідок дії (зміни доменних значень):

логічна характеристика / обмеження

$v_4^{TPS_3} (\text{рух\_інструменту}) = d_4^{TPS_3} = \text{"так"}; v_5^{TPS_3} (\text{циркуляція}) = d_5^{TPS_3} = \text{"так"}; v_6^{TPS_3} (\text{нааяність\_шляму\_на\_усті}) = d_6^{TPS_3} = \text{"мало"}$

**Технологічна проблема/стан технологічної проблеми (Аварія):**

$TP_2, TPS_4 (v_1^{TPS_4}, \text{підйом\_БК}) = d_1^{TPS_4} = \text{"так"}; v_2^{TPS_4}, \text{(циркуляція)} = d_2^{TPS_4} = \text{"так"}; v_3^{TPS_4}, \text{(прихоплення\_інструменту)} = d_3^{TPS_4} = \text{"так"};$

**Дія по усуненню (присвоєння змінних як можливе рішення):**

$\psi_7^{TPS_4}, (v_9^{\psi}, \text{встановлення\_нафтових\_ван}) = \text{"так"}; v_{10}^{\psi}, \text{(кількість\_нафтових\_ван)} = 3; v_{11}^{\psi}, \text{(розходження\_БК)} = \text{"так"};$

$v_{12}^{\psi}, \text{(використання\_шнурової\_торпеди)} = \text{"так"}; v_{13}^{\psi}, \text{(струшування\_КНБК)} = \text{"так"};$

**Наслідок дії (зміни доменних значень):**  $v_4^{TPS_4}, \text{(рухомість\_БК)} = d_4^{TPS_4} = \text{"ні"}$

**Дія по усуненню (присвоєння змінних як можливе рішення):**

$\psi_8^{TPS_4}, (v_{14}^{\psi}, \text{використання\_шнурової\_торпеди}) = \text{"так"}; v_{15}^{\psi}, \text{(відворот\_бурильного\_інструменту)} = \text{"так"};$

**Наслідок дії (зміни доменних значень):**

$v_5^{TPS_4}, \text{(підняття\_інструменту)} = d_5^{TPS_4} = \text{"мало"}; v_6^{TPS_4}, \text{(глибина\_де\_залишено\_інструмент)} = d_6^{TPS_4} = 3135$

**Дія по усуненню (присвоєння змінних як можливе рішення):**

$\psi_9^{TPS_4}, (v_{16}^{\psi}, \text{використання\_лівого\_інструменту}) = \text{"так"}; v_{17}^{\psi}, \text{(використання\_калібра)} = \text{"так"};$

**Наслідок дії (зміни доменних значень):**  $v_6^{TPS_4}, \text{(підняття\_інструменту)} = d_6^{TPS_4} = \text{"трохи"}$

**Дія по усуненню (присвоєння змінних як можливе рішення):**  $\psi_{10}^{TPS_4}, (v_{18}^{\psi}, \text{глибина}) = 3232.6; v_{19}^{\psi}, \text{(з'єднання\_з\_головою\_інструменту)} = \text{"так"};$

**Наслідок дії (зміни доменних значень):**

$$\underbrace{[v_{7}^{TPS_4}(\text{відворот\_інструменту}) = d_{7}^{TPS_4} = \text{"ні"}]}_{\text{логічна характеристика / обмеження}} \xrightarrow{\text{Rule 3}} \underbrace{[v_{8}^{TPS_4}(\text{прихоплення\_інструменту}) = d_{8}^{TPS_4} = \text{"так"}]}_{\text{логічна характеристика / обмеження}};$$

$$\underbrace{v_{9}^{TPS_4}(\text{глибина\_прихоплення\_інструменту}) = d_{9}^{TPS_4} > 3232.6}_{\text{числова характеристика / обмеження}}$$

**Дія по усуненню (присвоєння змінних як можливе рішення):**

$$\underbrace{\psi_{11}^{TPS_4}(v_{20}^w(\text{використання\_шнурової\_торпеди}) = \text{"так"}; v_{21}^w(\text{проворот\_бурильної\_колони\_вправо}) = \text{"так"})}_{\text{логічна характеристика / обмеження}}$$

**Наслідок дії (зміни доменних значень):**  $v_{10}^{TPS_4}(\text{розкріплення\_інструменту}) = d_{10}^{TPS_4} = \text{"так"}$

**Дія по усуненню (присвоєння змінних як можливе рішення):**

$$\underbrace{\psi_{12}^{TPS_4}(v_{22}^w(\text{оббурювання\_трубним\_фрезом}) = \text{"так"}; v_{23}^w(\text{діаметр\_трубного\_фреза}) = 193.7; v_{24}^w(\text{використання\_гладкого\_колокола}) = \text{"так"})}_{\text{логічна характеристика / обмеження}}$$

**Наслідок дії (зміни доменних значень):**  $v_{11}^{TPS_4}(\text{підняття\_інструменту}) = d_{11}^{TPS_4} = \text{"трохи"}$

**Дія по усуненню (присвоєння змінних як можливе рішення):**

$$\underbrace{\psi_{13}^{TPS_4}(v_{25}^w(\text{використання\_лівого\_бурильного\_інструменту}) = \text{"так"}; v_{26}^w(\text{використання\_правого\_бурильного\_інструменту}) = \text{"так"})}_{\text{логічна характеристика / обмеження}}$$

$$\underbrace{v_{27}^w(\text{використання\_дзвонів}) = \text{"так"}; v_{28}^w(\text{оббурювання\_бурильних\_труб}) = \text{"так"})}_{\text{логічна характеристика / обмеження}}$$

**Наслідок дії (зміни доменних значень):**

$$\underbrace{v_{12}^{TPS_4}(\text{повне\_підняття\_бурильних\_труб}) = d_{12}^{TPS_4} = \text{"так"}; v_{13}^{TPS_4}(\text{довжина\_піднятих\_труб}) = d_{13}^{TPS_4} = 170}_{\text{числова характеристика / обмеження}}$$

**технологічна проблема/стан технологічної проблеми (Аварія):**

$\psi_{14}^{TPS_5} (v_1^{TPS_5}(\text{прихоплення\_інструменту}[\text{долото\_ОБТ } J] = d_1^{TPS_5}, v_2^{TPS_5}(\text{глибина\_прихоплення}) = d_2^{TPS_5} = 3305;$

$v_3^{TPS_5}(\text{діаметр\_ОБТ}) = d_3^{TPS_5} = 178; v_4^{TPS_5}(\text{довжина\_ОБТ}) = d_4^{TPS_5} = 80)$

**Дія по усуненню (присвоєння змінних як можливе рішення):**

$\psi_{14}^{TPS_5} (v_{29}^w(\text{спуск\_компоновки\_низу\_бурової\_колонии}[\text{перехідники\_ГУМ - 162\_ОБТ\_ТБПК } J] = \text{"так"})$

**Наслідок дії (зміни доменних значень):**  $v_5^{TPS_5}(\text{з'єднання\_із\_залишеним\_інструментом}) = d_5^{TPS_5} = \text{"так"}; v_{31}^{TPS_5}(\text{глибина}) = d_2^{TPS_5} = 3305$

**Дія по усуненню (присвоєння змінних як можливе рішення):**  $\psi_{15}^{TPS_5} (v_{30}^w(\text{використання\_ГУМ}) = \text{"так"}; v_{31}^w(\text{кількість\_ударів\_ГУМ}) = 82$

**Наслідок дії (зміни доменних значень):**  $v_6^{TPS_5}(\text{підняття\_інструменту}) = d_6^{TPS_5} = \text{"ні"}$

**Дія по усуненню (присвоєння змінних як можливе рішення):**  $\psi_{16}^{TPS_5} (v_{32}^w(\text{відворот\_на\_безпечному\_перехіднику}) = \text{"так"}$

**Наслідок дії (зміни доменних значень):**

$v_7^{TPS_5}(\text{відкручення\_голови\_по\_бурильній\_трубі}) = d_7^{TPS_5} = \text{"так"}; v_8^{TPS_5}(\text{глибина\_відкручення}) = d_8^{TPS_5} = 2773$

**Дія по усуненню (присвоєння змінних як можливе рішення):**

$\psi_{17}^{TPS_5} (v_{33}^w(\text{повільні\_роботи}) = \text{"так"}; v_{34}^w(\text{використання\_оббурюючого\_фрезу\_Ø203}) = \text{"так"}; v_{35}^w(\text{оббурювання\_КНБК}) = \text{"так"}$

**Наслідок дії (зміни доменних значень):**  $v_9^{TPS_5}(\text{підняття\_КНБК}) = d_9^{TPS_5} = \text{"так"}; v_{10}^{TPS_5}(\text{підняття\_ГУМ}) = d_{10}^{TPS_5} = \text{"так"}$

логічна характеристика / обмеження

числова характеристика / обмеження

числові характеристики / обмеження

логічні характеристики / обмеження

логічна характеристика / обмеження

числова характеристика / обмеження

логічна характеристика / обмеження

числова характеристика / обмеження

логічна характеристика / обмеження

логічна характеристика / обмеження

логічна характеристика / обмеження

числова характеристика / обмеження

логічні характеристики / обмеження

логічні характеристики / обмеження



Дія по усуненню (присвоєння змінних як можливе рішення):

$$\psi_{18}^{TPS_5} (v_{36}^w(\text{оббурка\_ОБТ\_трубними\_фрезами}) = "так"; v_{37}^w(\text{використання\_гладких\_дзвонів}) = "так")$$

Наслідок дії (зміни доменних значень):  $v_{11}^{TPS_5}(\text{підняття\_ОБТ}) = d_{11}^{TPS_5} = "так"$ ;  $v_{12}^{TPS_5}(\text{довжина\_ОБТ}) = d_{12}^{TPS_5} = 46.1$

Дія по усуненню (присвоєння змінних як можливе рішення):  $\psi_{19}^{TPS_5}(v_{38}^w(\text{оббурка\_ОБТ\_трубними\_фрезами}) = "так"; v_{39}^w(\text{глибина}) = 3354)$

Наслідок дії (зміни доменних значень):  $v_{13}^{TPS_5}(\text{зростання\_тиску}) = d_{13}^{TPS_5} = "так"$

Дія по усуненню (присвоєння змінних як можливе рішення):  $\psi_{20}^{TPS_5}(v_{40}^w(\text{приднімання\_інструменту}) = "так")$

Наслідок дії (зміни доменних значень):  $v_{14}^{TPS_5}(\text{отримана\_затяжка}) = d_{14}^{TPS_5} = "так"$ ;  $v_{15}^{TPS_5}(\text{рухомість\_бурової\_колонни}) = d_{14}^{TPS_5} = "ні"$

Дія по усуненню (присвоєння змінних як можливе рішення):  $\psi_{21}^{TPS_5}(v_{41}^w(\text{розходжування\_бурильного\_інструменту}) = "так")$

Наслідок дії (зміни доменних значень):  $v_{16}^{TPS_5}(\text{рухомість\_бурової\_колонни}) = d_{16}^{TPS_5} = "ні"$

Дія по усуненню (присвоєння змінних як можливе рішення):  $\psi_{22}^{TPS_5}(v_{42}^w(\text{відворот\_бурильних\_труб\_вліво}) = "так"; v_{43}^w(\text{глибина}) = 2768)$

Наслідок дії (зміни доменних значень):

$v_{17}^{TPS_5}(\text{підняття\_бурильних\_труб\_ТБПК\_\text{ТБПК\_}\text{Ø127} \times 9.19\text{Л}) = d_{17}^{TPS_5} = "так"$ ;  $v_{18}^{TPS_5}(\text{довжина\_бурильних\_труб}) = d_{18}^{TPS_5} = 575.64$

Дія по усуненню (присвоєння змінних як можливе рішення):

$\psi_{23}^{TPS_5} (v_{44}^W (\text{спуск\_відкритого\_кінця\_} K_3 \times 133 \text{ на\_бурильних\_трубах}) = \text{"так"}; v_{45}^W (\text{з'єднання\_із\_залишеним\_трубним\_фрезом}) = \text{"так"})$

логічна характеристика / обмеження

Наслідок дії (зміни доменних значень):  $v_{19}^{TPS_5} (\text{циркуляція}) = d_{19}^{TPS_5}; v_{20}^{TPS_5} (\text{звільнення\_інструменту}) = d_{20}^{TPS_5}; \text{"ні"})$

логічна характеристика / обмеження

Дія по усуненню (присвоєння змінних як можливе рішення):  $\psi_{24}^{TPS_5} (v_{46}^W (\text{відстріл\_бурильної\_колони}) = \text{"так"})$

Наслідок дії (зміни доменних значень):

логічна характеристика / обмеження

$v_{21}^{TPS_5} (\text{інструмент\_в\_свердловині} [ \text{долото\_ОБТ\_трубний\_фрез\_ТБПК} ] = d_{21}^{TPS_5}; \text{"так"}; v_{22}^{TPS_5} (\text{глибина}) = d_{22}^{TPS_5}; 3344)$

числова характеристика / обмеження

Дія по усуненню (присвоєння змінних як можливе рішення):

лінійна характеристика / обмеження

$\psi_{25}^{TPS_5} (v_{47}^W (\text{цементний\_міст}) = \text{"встановлено"}; v_{48}^W (\text{інтервал}) = D_{48}^W = [3343..3232]; v_{49}^W (\text{перебурка\_новим\_стовбуром}) = \text{"так"}; )$

логічна характеристика / обмеження

числова характеристика / обмеження

$v_{50}^W (\text{параметри\_бурового\_розчину} [ v_{50}^W (\gamma) = 1.20; v_{50}^W (T) = 36; v_{50}^W (\Phi) = 5; v_{50}^W (CH3) = 12 / 36 ])$

Наслідок дії (зміни доменних значень):

логічна характеристика / обмеження

$v_{23}^{TPS_5} (\text{глибина}) = d_{23}^{TPS_5}; [ v_{24}^{TPS_5} (\text{втрата\_зносостійкості\_стінок}) = d_{24}^{TPS_5}; \text{"так"} ] \xrightarrow{\text{Rule 4}} [ v_{25}^{TPS_5} (\text{проробки}) = d_{25}^{TPS_5}; \text{"так"} ]$

логічна характеристика / обмеження

логічна характеристика / обмеження

Дія по усуненню (присвоєння змінних як можливе рішення):  $\psi_{26}^{TPS_5} (v_{51}^W (\text{кріплення\_свердловини\_експлуатаційною\_колоною}) = \text{"так"}; )$

логічна характеристика / обмеження

$v_{52}^W (\text{продовження\_буріння}) = \text{"так"}; v_{53}^W (\text{параметри\_бурового\_розчину} [ v_{53}^W (\gamma) = 1.24; v_{53}^W (T) = [85..110]; v_{53}^W (\Phi) = 5; v_{53}^W (CH3) = 80 / 110 ])$

числова характеристика / обмеження

Наслідок дії (зміни доменних значень):

числова характеристика / обмеження  $v_{26}^{TPS_5}(\text{глибина}) = d_{23}^{TPS_5} = 3530; v_{27}^{TPS_5}(\text{проробки}) = d_{25}^{TPS_5} = \text{"так"}; v_{28}^{TPS_5}(\text{інтервал\_проробки}) = D_{28}^{TPS_5} = [3515..3530];$

лінійна характеристика / обмеження  $v_{29}^{TPS_5}(\text{винос\_вибуреної\_породи}) = d_{29}^{TPS_5} = \text{"низький"};$

логічна характеристика / обмеження **Дія по усуненню (присвоєння змінних як можливе рішення):**  $\psi_{27}^{TPS_5}(v_{54}^w(\text{збільшення\_питомої\_ваги\_розчину}) = \text{"так"};$

числова характеристика / обмеження  $v_{55}^w(\text{питома\_вага\_бурового\_розчину\_}\gamma) = [1.32..1.34]$

логічна характеристика / обмеження **Наслідок дії (зміни доменних значень):**  $v_{30}^{TPS_5}(\text{глибина\_вибій}) = d_{30}^{TPS_5} = 3635; v_{31}^{TPS_5}(\text{закінчення\_буріння}) = d_{31}^{TPS_5} = \text{"так"};$

**ПРАВИЛО 2:**

лінійна складова  $(v_{sum}^3(\text{геолого-технічні\_умови}) = d_{sum}^3 = \text{"складні"}); -$

ймовірнісна складова  $:- v_{sum}^4(\text{схильність\_відкладів\_нижнього\_карбону\_до\_диференційного\_прихоплення}) = d_{sum}^4 = [\text{"так"} : CF] \wedge$

лінійна складова  $v_{sum}^5(\text{зенітний\_кут}) = d_{sum}^5 = \text{"великий"} \xrightarrow{\text{RULE 2}} TP(v(\text{прихоплення\_бурового\_інструменту}) = d_v^{TP} = \text{"так"})$

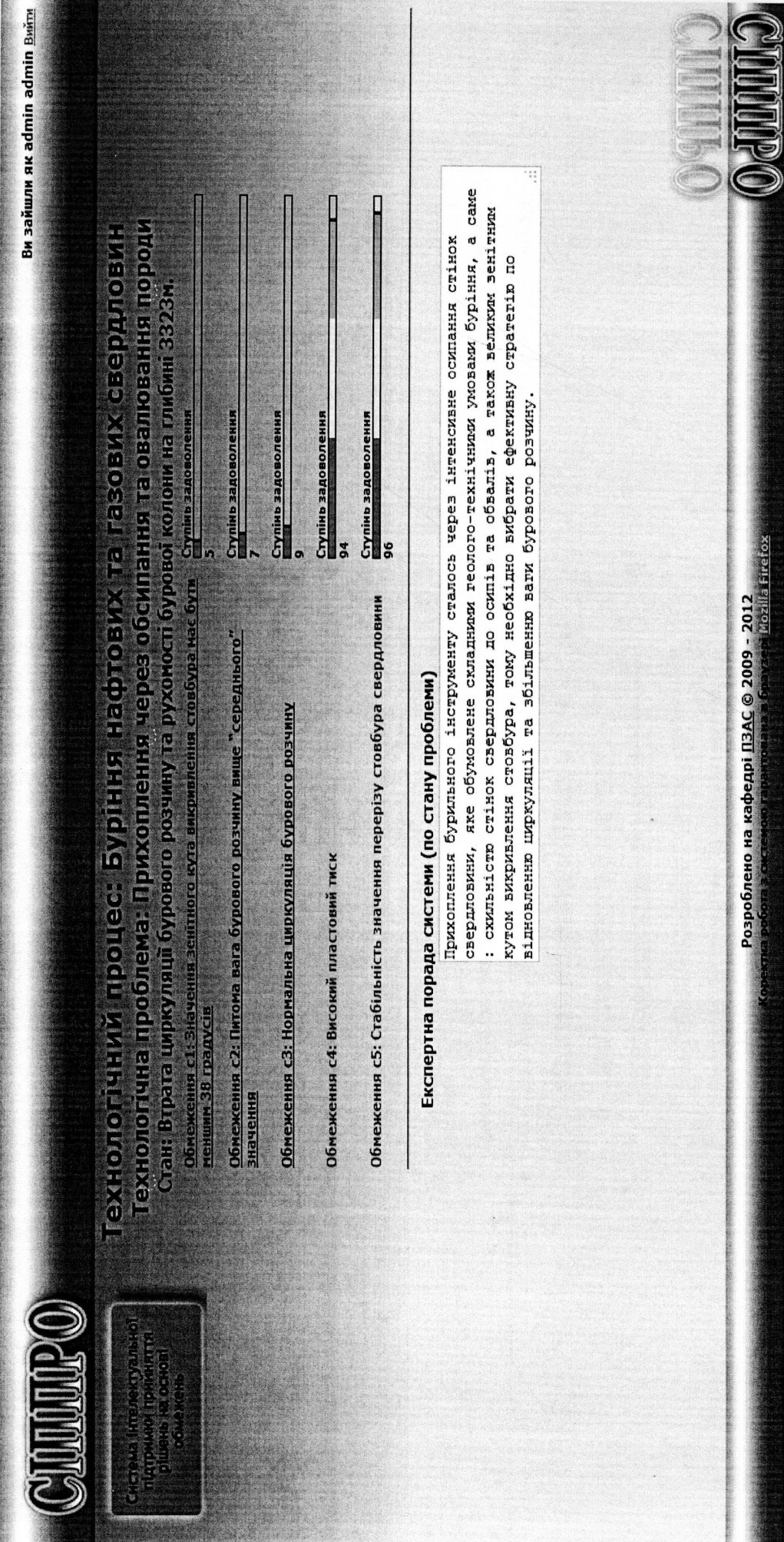


Рис. В.1. Експертна оцінка системи по стану технологічної проблеми



# Технологічний процес: Буріння нафтових та газових свердловин

## Технологічна проблема: Прихоплення через обсипання та овалювання породи

### Стан: Втрата циркуляції бурового розчину та рухомості бурової колони на глибині 3323м.

Обмеження c1: Значення зенітного кута викривлення стовбура має бути меншим 38 градусів

Ступінь задоволення 5

Релевантність обмеження до стану проблеми

90

Ваговий коефіцієнт обмеження (вага присвоєння)

85

Імовірнісний коефіцієнт (ймовірність задоволення обмеження)

50

Можливісний коефіцієнт (можливість задоволення обмеження)

48

Преперенція обмеження (першочерговість задоволення)

87

Експертні поради системи (по обмеженню)

Провести роботи по зменшенню зенітного кута

Базовий рівень

Детальний рівень

Встановити цементний міст в інтервалі 3029-3167 м. і перебувати свердловину другим стовбуром із значенням зенітного кута викривлення стовбура 20-25 градусів

Обмеження c2: Питома вага бурового розчину вище "середнього" значення

Ступінь задоволення 7

Обмеження c3: Нормальна циркуляція бурового розчину

Ступінь задоволення 9

Обмеження c4: Високий пластовий тиск

Ступінь задоволення 94

Релевантність обмеження до стану проблеми

95

Ваговий коефіцієнт обмеження (вага присвоєння)

80

Імовірнісний коефіцієнт (ймовірність задоволення обмеження)

60

Можливісний коефіцієнт (можливість задоволення обмеження)

63

Преперенція обмеження (першочерговість задоволення)

80

Експертні поради системи (по обмеженню)

Дане релевантне обмеження не порушено (в межах регламенту)

Розроблено на кафедрі ПЗАС © 2009 - 2012

Курсова робота з системи управління в буровій технології

Рис. В.2. Експертна оцінка системи по першому порушеному технологічному обмеженню

# СІПІРО

Система інтелектуальної  
підтримки прийняття  
рішень на основі  
обмежень

## Технологічний процес: Буріння нафтових та газових свердловин

### Технологічна проблема: Прихоплення через обсипання та овалювання породи

Стан: Втрата циркуляції бурового розчину та рухомості бурової колони на глибині 3323м.

Обмеження c1: Значення зенітного кута виконання стовбура має бути меншим 38 градусів

Ступінь задоволення

5

Обмеження c2: Питома вага бурового розчину вище "середнього" значення

Ступінь задоволення

7

Релевантність обмеження до стану проблеми

85

Ваговий коефіцієнт обмеження (вага присвоєння)

82

Імовірнісний коефіцієнт (ймовірність задоволення обмеження)

40

Можливісний коефіцієнт (можливість задоволення обмеження)

42

Пreferенція обмеження (першочерговість задоволення)

83

Експертні поради системи (по обмеженню)

Базовий рівень

Прийняти міри по підвищенню питомої ваги

Детальний рівень

Збільшити питому вагу бурового розчину до значення 1.46 г/см2 для зниження обсипання нестійких відкладів

Обмеження c3: Нормальна циркуляція бурового розчину

Ступінь задоволення

9

Обмеження c4: Високий пластовий тиск

Ступінь задоволення

94

Обмеження c5: Стабільність значення перерізу стовбура свердловини

Ступінь задоволення

96

Релевантність обмеження до стану проблеми

89

Ваговий коефіцієнт обмеження (вага присвоєння)

70

Імовірнісний коефіцієнт (ймовірність задоволення обмеження)

67

Можливісний коефіцієнт (можливість задоволення обмеження)

63

Пreferенція обмеження (першочерговість задоволення)

86

# СІПІРО

Розроблено на кафедрі ПЗАС © 2009 - 2012

Консультації з системи: [Саратимович В. В.](#), [Бурдука С. М.](#), [Козіла І. В.](#)

Рис. В.3. Експертна оцінка системи по другому порушеному технологічному обмеженню





Система інтелектуальної підтримки прийняття рішень на основі обмежень

## Технологічний процес: Буріння нафтових та газових свердловин

### Технологічна проблема: Прихоплення через обсипання та овалювання породи

#### Стан: Втрата циркуляції бурового розчину та рухомості бурової колони на глибині 3323м.

Обмеження С1: Значення зенітного кута викомлення стовбура має бути меншим 38 градусів

Обмеження С2: Питома вага бурового розчину вище "середнього" значення

Обмеження С3: Нормальна циркуляція бурового розчину

Релевантність обмеження до стану проблеми

95

Ваговий коефіцієнт обмеження (вага присвоєння)

90

Ймовірнісний коефіцієнт (ймовірність задоволення обмеження)

60

Можливісний коефіцієнт (можливість задоволення обмеження)

63

84

84

84

84

84

84

84

84

84

84

84

84

84

84

84

84

84

84

84

84

84

84

84

84

84

84

84

84

84

84

84

84

84

84

84

84

84

84

84

84

84

84

84

84

Ступінь задоволення

5

Ступінь задоволення

7

Ступінь задоволення

9

Експертні поради системи (по обмеженню)  
Провести роботи по відновленню циркуляції за допомогою припідняття бурильного інструменту

Детальний рівень  
Здійснити припідняття бурильного інструменту в "Башмак" з використанням титанистого розчину з тиском і провести розхоження бурильної колони з промивкою

Ступінь задоволення

94

Обмеження С4: Високий пластовий тиск

Релевантність обмеження до стану проблеми

95

Ваговий коефіцієнт обмеження (вага присвоєння)

80

Ймовірнісний коефіцієнт (ймовірність задоволення обмеження)

60

Можливісний коефіцієнт (можливість задоволення обмеження)

63

84

84

84

84

84

84

84

84

84

84

84

84

84

84

84

84

84

84

84

84

84

84

84

Експертні поради системи (по обмеженню)  
Дане релевантне обмеження не порушено (в межах регламенту)

Розроблено на кафедрі ПЗАС © 2009 - 2012

Користання роботи з системою гарантовано в браузері Mozilla Firefox

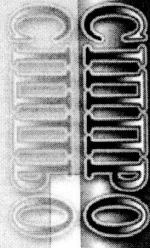


Рис. В.4. Експертна оцінка системи по третньому порушеному технологічному обмеженню

## Технологічний процес: Буріння нафтових та газових свердловин

### Технологічна проблема: Прихоплення через обсягання та овалювання породи

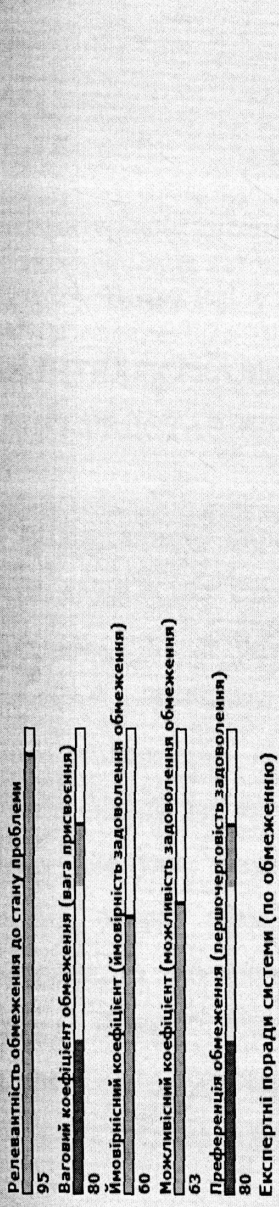
#### Стан: Втрата циркуляції бурового розчину та рухомості бурової колони на глибині 3323м.

Обмеження c1: Значення зенітного кута викривлення стовбура має бути меншим 38 градусів

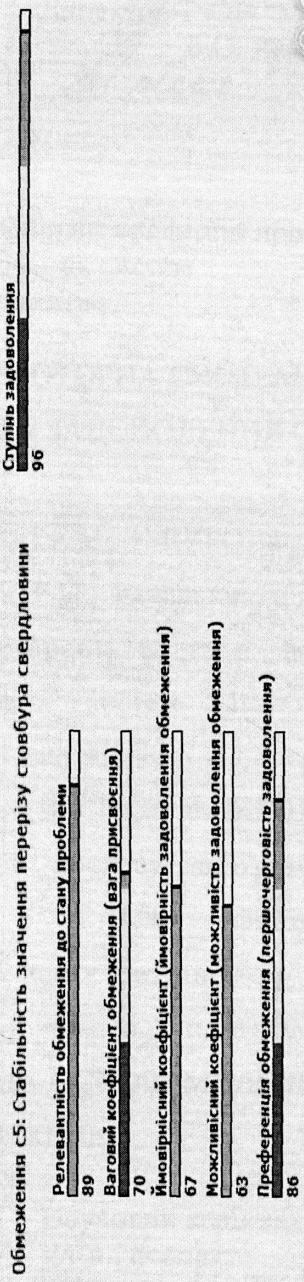
Обмеження c2: Питома вага бурового розчину вище "середнього" значення

Обмеження c3: Нормальна циркуляція бурового розчину

Обмеження c4: Високий пластовий тиск



Дане релевантне обмеження не порушено (в межах регламенту)

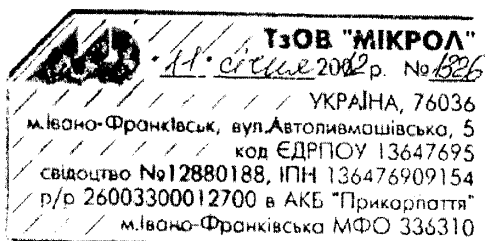


Дане релевантне обмеження не порушено (в межах регламенту)

Рис. В.5. Приклад експертної оцінки системи по задоволених технологічних обмеженнях



## Додаток Г



ЗАТВЕРДЖУЮ:  
 Директор ТзОВ "Мікрол"  
 Б.С. Демчина  
 11 січня 2012 р.

## АКТ

про впровадження матеріалів дисертації аспіранта кафедри програмного забезпечення автоматизованих систем  
 Вовка Р.Б. у виробництво

«АВТОМАТИЗОВАНА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА ТЮТОРНА СИСТЕМА НА ОСНОВІ  
 МОДЕЛЕЙ І МЕТОДІВ ПРЕДСТАВЛЕННЯ ТА ЗАДОВОЛЕННЯ ОБМЕЖЕНЬ»

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 Вовк Р.Б. з другої сторони склали цей акт про те, що ТзОВ «МІКРОЛ» прийняло до впровадження прототип модуля візуалізації процесу підтримки прийняття технологічних рішень на основі обмежень в SCADA – системах (в формі алгоритмічного та програмного забезпечення), що є результатом дисертаційного дослідження аспіранта Вовка Р.Б. за темою «АВТОМАТИЗОВАНА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА ТЮТОРНА СИСТЕМА НА ОСНОВІ МОДЕЛЕЙ І МЕТОДІВ ПРЕДСТАВЛЕННЯ ТА ЗАДОВОЛЕННЯ ОБМЕЖЕНЬ»

Директор  
 ТзОВ "Мікрол"  
 Демчина  
 Головний інженер  
 ТзОВ "Мікрол"  
 Слободян Р.Й.

Науковий керівник  
 к.т.н., доцент  
 Шекета В.І.

Аспірант  
 Вовк Р.Б.

Начальник АСУ ТП  
 ТзОВ "Мікрол"  
 Парасюк Р.М.

## Додаток Д



ЗАТВЕРДЖУЮ:

Директор ТОВ «СКБ ЗА»

В.С. Вощинський

12. 01. 2012 р.

## АКТ

про впровадження матеріалів дисертації аспіранта  
кафедри програмного забезпечення автоматизованих систем  
Вовка Р.Б. у виробництво

**«Автоматизована інтелектуальна тьюторна система на основі моделей і  
методів представлення та задоволення обмежень»**

Ми, що нижче підписалися, директор ТОВ «Івано-Франківське Спеціальне конструкторське бюро засобів автоматизації» к.т.н. Вощинський В.С. 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 Вовк Р.Б. з другої сторони, склали цей акт про те, що ТОВ «СКБ ЗА» прийняло до впровадження програмне та алгоритмічне забезпечення автоматизованої інтелектуальної системи на основі обмежень для запобігання нештатним ситуаціям технологічного процесу, що є результатом дисертаційного дослідження аспіранта Вовка Р.Б., і яка може бути інтегрована в систему контролю процесом буріння у вигляді інтелектуального модуля.


від ТОВ «СКБ ЗА»

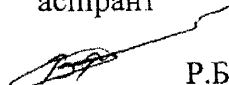
Директор, к.т.н.

 В.С. Вощинський

від ІФНТУНГ

к.т.н., доцент

 В.І. Шекета  
аспірант

 Р.Б. Вовк

## Додаток Е

### ЗАТВЕРДЖУЮ:

Проректор з науково-педагогічної роботи  
Івано-Франківського  
національного технічного  
університету нафти і газу  
д.ф.м.н. проф.

 М.О.Галушак


12.01.2012 р.

### АКТ

Про впровадження матеріалів дисертації аспіранта кафедри  
програмного забезпечення автоматизованих систем  
Вовка Р.Б. 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 Вовк Р.Б., склали цей акт у тому, що матеріали дисертації «АВТОМАТИЗОВАНА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА ТЬЮТОРНА СИСТЕМА НА ОСНОВІ МОДЕЛЕЙ І МЕТОДІВ ПРЕДСТАВЛЕННЯ ТА ЗАДОВОЛЕННЯ ОБМЕЖЕНЬ», розроблені аспірантом Вовком Р.Б. впроваджені у навчальний процес при вивченні дисциплін “Методологічні основи наукових досліджень в нафтогазовій галузі” студентами спеціальності 6.050103 – програмна інженерія (Модуль М2, змістовний модуль ЗМ2 «Інформаційний опис процесів розробки родовищ вуглеводнів на основі теорії обмежень») та “Проектування програмного забезпечення для спеціалізованих автоматизованих систем” студентами спеціальності 8.050103 – програмне забезпечення систем (Модуль М1, змістовний модуль ЗМ3, навчальний елемент НЕБ «Розробка алгоритмічних та програмних елементів автоматизованих інтелектуальних систем на основі обмежень»)


Начальник навчального відділу  
к.т.н., доцент

 Б.В. Сверида

Завідувач кафедри ПЗАС  
д.т.н., професор

 В.М. Юрчишин

Аспірант

 Р.Б. Вовк

## Додаток Ж

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Проректор з наукової  
роботи ІФНТУНГ  
проф. Карпаш О.М.  
26.06 2012 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Начальник  
Прикарпатського УБР  
Гуць А.Ю.  
25.06 2012 р.

## АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи аспіранта кафедри програмного забезпечення автоматизованих систем Вовка Романа Богдановича

«СИСТЕМА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ДЛЯ  
ЗАПОБІГАННЯ НЕШТАТНИХ СИТУАЦІЙ В ПРОЦЕСІ БУРІННЯ  
СВЕРДЛОВИН»

Ми, які підписалися нижче, склали даний акт про те, що результати дисертаційної роботи **Вовка Романа Богдановича** «Система інтелектуальної підтримки прийняття рішень для запобігання нештатних ситуацій в процесі буріння свердловин» у вигляді методики та програмного забезпечення «Система інтелектуальної підтримки прийняття рішень на основі обмежень» (СІППРО) передані і впроваджені в Бориславській експедиції Прикарпатського УБР та дозволяють зменшення затрат календарного часу на ліквідацію ускладнень і нештатних ситуацій та втрат проходки внаслідок виникнення нештатних ситуацій. Очікуваний економічний ефект від впровадження розробки складає близько 53 тис. грн. в рік для одного родовища.

Науковий керівник  
к.т.н., доцент  
Шекета В.І.

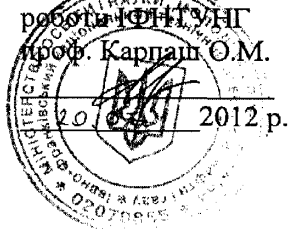
Аспірант  
Вовк Р.Б.

Головний інженер  
Бориславської експедиції  
Прикарпатського УБР  
Баранчук В.П.

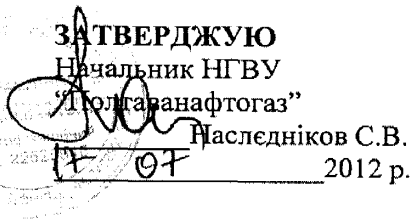


## Додаток 3

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Проректор з наукової  
роботи ІФНТУНГ  
проф. Карпаш О.М.



ЗАТВЕРДЖУЮ  
Начальник НГВУ  
"Полтаванафтогаз"  
Наследніков С.В.




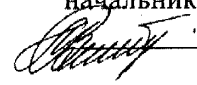
## АКТ

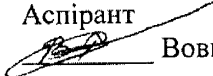
впровадження результатів дисертаційної роботи аспіранта кафедри програмного забезпечення автоматизованих систем Вовка Романа Богдановича

«СИСТЕМА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ДЛЯ  
ЗАПОБІГАННЯ НЕШТАТНИХ СИТУАЦІЙ В ПРОЦЕСІ БУРІННЯ  
СВЕРДЛОВИН»

Ми, які підписалися нижче, склали даний акт про те, що результати дисертаційної роботи **Вовка Романа Богдановича** «Система інтелектуальної підтримки прийняття рішень для запобігання нештатних ситуацій в процесі буріння свердловин» у вигляді методики та програмного забезпечення «Система інтелектуальної підтримки прийняття рішень на основі обмежень» (СІППРО) передані і впроваджені в НГВУ «Полтаванафтогаз» та дозволяють зменшення затрат календарного часу на ліквідацію ускладнень і нештатних ситуацій та втрат проходки внаслідок виникнення нештатних ситуацій. Очікуваний економічний ефект від впровадження розробки складає близько 86 тис. грн. в рік для одного родовища.

Науковий керівник  
к.т.н., доцент  
 Шекета В.І.

Головний інженер -  
перший заступник  
начальника управління  
 Венгльовський М.М.

Аспірант  
 Вовк Р.Б.



d445