

687.518
B61

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
НАФТИ І ГАЗУ

Вовк Роман Богданович



+004.8(0
УДК 681.518:622.248:004.89

B61

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

Спеціальність 05.13.07 – автоматизація процесів керування

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Івано-Франківськ – 2012

Дисертацією є рукопис



Робота виконана в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України

Науковий керівник:

кандидат технічних наук, доцент
Шекета Василь Іванович
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
доцент кафедри програмного забезпечення автоматизованих систем

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Семенцов Георгій Никифорович
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
завідувач кафедри автоматизації технологічних процесів і моніторингу в екології

доктор технічних наук, доцент
Литвиненко Володимир Іванович
Херсонський національний технічний університет, професор кафедри інформатики та комп'ютерних технологій

Захист відбудеться **26 жовтня 2012р. о 14⁰⁰** годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 20.052.03 Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу за адресою: 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу за адресою: 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15.

Автореферат розісланий « 17 » вересня 2012 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 20.052.03,
кандидат технічних наук, професор

A handwritten signature in black ink, appearing to be the initials "MD" or similar, written in a stylized, cursive manner.

М. М. Дранчук



an2292

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

теми. Розвиток нафтової та газової промисловості останнім часом характеризується зростаючим обсягом 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 аналога 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).

У вищезазначених темах 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 завдання 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.

ан 2291 - ан 2292

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

- 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;
- формалізація постановки задачі моделювання технологічного процесу на основі обмежень, розробка методу її розв'язку;
- обґрунтування та дослідження технології інтелектуальної підтримки прийняття рішень для запобігання нештатних ситуацій у процесі буріння;
- синтез алгоритму функціонування системи інтелектуальної підтримки прийняття рішень;
- створення технології контролю процесу рішення нештатних технологічних ситуацій засобами розробленої інтелектуальної системи на основі обмежень;
- реалізація системи інтелектуальної підтримки прийняття рішень для запобігання нештатних ситуацій у процесі буріння;
- 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 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. Основні положення та результати дисертаційної роботи, які виносяться на захист, одержані автором особисто. У роботах, написаних у співавторстві, дисертанту належать: у роботі [1] – спосіб формалізації сумарної моделі об’єкта в інтелектуальній системі; [2] – ідея контролю станів технологічного процесу буріння на основі концепції обмежень; [4] – методологія представлення даних і знань предметної області; [5] – представлення формального опису процесу контролю задоволення та порушення обмежень в інтелектуальних системах; [7] – розробка методу моделювання класів технологічних проблем на основі множин і систем релевантних обмежень; [8] – розробка рівнів зворотного зв’язку в інтелектуальній системі на основі обмежень; [9] – введення формально-логічного підходу використання коефіцієнтів впевненості при оперуванні з обмеженнями; [10] – розробка формальної моделі інтелектуальної системи на основі обмежень із використанням механізму зворотного зв’язку; [13] – побудова формального підходу модуля адаптивного контролю інтелектуальної системи; [14] – формальне представлення моделі об’єкта підтримки прийняття рішень; [15] – визначення складових і дослідження зворотного зв’язку в

інтелектуальній системі; [17,18] – представлення нештатних ситуацій процесу буріння в формі технологічних обмежень.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідались, обговорювались і отримали позитивну оцінку на міжнародних конференціях “CSE-2009” (Львів, 2009р.); на XIII Міжнародному молодіжному форумі “Радиоелектроника и молодежь в XXI веке” (Харків, 2009р.); на XI Міжнародній науково-технічній конференції “Системний аналіз та інформаційні технології САІТ-2009” (Київ, 2009р.); IX міжнародній конференції “Інтелектуальний аналіз інформації ІАІ-2009” (Київ, 2009р.); XVI Всеукраїнській науковій конференції “Сучасні проблеми прикладної математики та інформатики СППМІ-2009” (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 (Львів, 2010р.); П’ятій науково-практичній конференції з міжнародною участю “Математичне та імітаційне моделювання систем МОДС’2010” (Київ, 2010р.); Сьомій міжнародній конференції “Інтернет-освіта-наука-2010 ІОН-2010” (Вінниця, 2010р.); VIII міжнародній конференції “Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем MPZIS-2010” (Дніпропетровськ, 2010р.); 3-тій науково-практичній конференції студентів і молодих учених “Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання” (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” (Івано-Франківськ, 2011р.).

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.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У *вступі* обґрунтовано актуальність дисертаційної роботи для нафтогазового комплексу України, сформульовано мету та задачі дослідження, наведено відомості щодо наукової новизни та практичного значення отриманих результатів для запобігання виникнення нештатних ситуацій у процесі буріння нафтових і газових свердловин (НГС), наведено відомості про апробацію та впровадження результатів роботи.

У *першому розділі* проведено аналіз сучасного стану досліджуваної проблеми, описано процес буріння НГС як об’єкт керування, проаналізовано сучасні вітчизняні та зарубіжні розробки в області інтелектуальних систем і визначено особливості контролю й автоматизації процесів керування бурінням. 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 і 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 у бурінні (ускладнення пов'язані з поглинанням технологічних речовин, флюїдопроявами, порушенням цілісності стінок свердловини та прихопленням колони труби).

Показано, що ефективність автоматизованих систем, які застосовуються для керування технологічним процесом буріння, визначається рівнем достовірності даних і знань щодо геологічних характеристик розрізу. Встановлено, що виникнення ускладнень як певного виду порушення регламентованого перебігу технологічного процесу має місце навіть у найбільш новітніх та інтелектуалізованих системах автоматизації процесу буріння. Аналіз досліджень даної проблеми показав, що причиною виникнення нештатної ситуації є існування певного виду невідповідності геологічних і геофізичних характеристик розрізу, опису та структуризації параметрів технологічного процесу буріння, закладених на етапі проектування та складання технологічного регламенту. Обґрунтовано, що нештатні ситуації призводять до часових і фінансових втрат і, відповідно, негативно впливають на техніко-економічні показники процесу буріння в цілому. Доведено, що виявлення можливих причин нештатних ситуацій та опис їх у формі обмежень, що накладаються на технологічний процес буріння, є важливою науково-практичною задачею, вирішення якої дозволяє формувати структури технологічних обмежень у базах знань систем інтелектуальної підтримки прийняття рішень.

Проведений аналіз дає підстави стверджувати, що сучасний стан теорії та практики створення систем інтелектуальної підтримки прийняття рішень (ППР) у процесі буріння НГС дозволяє визначити ряд недоліків, які не дають можливості застосовувати такі системи максимально ефективно. До таких недоліків слід віднести:

- недостатній розвиток базової теорії представлення знань і даних в інтелектуальних системах, відмінної від концепції правил (чітких, імовірнісних, нечітких тощо);

- обмежена функціональність існуючих систем ППР, які, в основному зосереджені на визначенні правильних способів виконання технологічних дій і нехтують оцінками помилкових дій, що суттєво знижує ефективне навчання персоналу на допущених технологічних помилках як причинах виникнення нештатних ситуацій у процесі буріння НГС.

Виконаний аналіз дозволив обґрунтувати вибір напрямку дослідження дисертаційної роботи.

Другий розділ роботи присвячено моделюванню нештатних аварійних ситуацій, що виникають у процесі буріння НГС засобами теорії обмежень. Показано, що причиною їх виникнення є вихід певних технологічних параметрів за встановлені граничні значення. Опис такого процесу представлено у вигляді задачі задоволення обмежень, де як змінні використано технологічні параметри.

На формальному рівні задача задоволення обмежень для процесу буріння НГС формулюється у вигляді кортежу $(V; D; C)$, де $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ – множина змінних

(параметрів) системи, зокрема такими змінними є зусилля на гаку, швидкість обертання ротора, тиск на викиді насосів, крутний момент на роторі, осьове зусилля на долото, механічна швидкість проходки, витрата бурового розчину на виході із свердловини; $D = \{D_1, D_2, \dots, D_n\}$ – множина доменів (областей визначення) кожної змінної; $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ – множина обмежень, тобто відношень, заданих на підмножині змінних $\{v_1, \dots, v_n\}$ над їхніми доменами $\{D_1 \times \dots \times D_n\} \supseteq C$.

Оскільки основою функціонування інтелектуальної системи є контроль процесів порушення та задоволення обмежень, то формальний опис пропонованої системи інтелектуальної підтримки прийняття рішень на основі обмежень (СІППРО) базується на формальному представленні технологічної проблеми (нештатної ситуації при бурінні НГС) 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, технологічна проблема на основі обмежень представляється кортежем $TP = \{V; D; C^R; C^{UnR}\}$, 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.

У випадку технологічних проблем основна ідея реалізації полягає в контролі множин порушених і задоволених обмежень, що на практиці вимагає присвоєння певного оціночного значення, що дозволяє задавати загальну преференцію обмежень.

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

$$\text{ConstrHrch}_{TP_j} = \bigcup_{i=1}^{k_{\max}} \text{ConstrSyst}_{TP_j} = \bigcup_{i=1}^{k_{\max}} \{c_1, c_2, \dots, c_n\}_{n \in N}, \quad (1)$$

де ConstrHrch_{TP_j} – ієрархія обмежень (сукупність систем обмежень по технологічних станах), накладена на j -ту технологічну проблему; ConstrSyst_{TP_j} – система обмежень (множина базових обмежень, упорядкована по одному з оціночних значень) для k -го стану технологічної проблеми; $c_i, i_i \in [1..n_i]$ – базове обмеження в множині накладених обмежень на стан технологічної проблеми для випадку k -го стану; $k \in [1..k_{\max}]$, де k_{\max} – максимальна регламентована кількість станів технологічної проблеми TP_j .

Для оперування з обмеженнями в формальних представленнях технологічних проблем використовуються наступні основні характеристики:

1. Ступінь релевантності (дійсності, валідності; rd – *relevancy degree*) – характеризує міру повноти опису обмеженням технологічної проблеми;

2. Ступінь задоволення (sd – *satisfaction degree*) – динамічна характеристика етапу виконання або етапу аналізу поточної технологічної проблеми. Значення $sd = 1$ відповідає повному задоволенню обмежень, а значення $sd = 0$ відповідає повному незадоволенню (порушенню) обмеження. Дані значення є граничними, тому, як правило, характеристика ступеня задоволення отримує значення з проміжку $[0; 1]$;

3. Вага обмеження (cw – *constraint weight*) – характеризує вагове значення обмеження.

Система оперує 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 виконується побудова комплексних обмежень 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 поділяються на локальні, доменні та глобальні. Таким чином, як *технологічна проблема TP* розглядається певна сутність предметної області яка містить задачу, що вимагає рішення, котре належить простору можливих рішень.

Ступінь релевантності обмеження c технологічній проблемі TP розглядається як міра відношення обмеження c до технологічної проблеми TP з точки зору повноти опису. Ступінь релевантності rd визначається значеннями з проміжку $[0; 1]$. Ступінь релевантності $rd = 1$ відповідно позначає абсолютну релевантність обмеження технологічній проблемі, а ступінь релевантності $rd = 0$ – абсолютну нерелевантність обмеження цій проблемі.

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

Ваговий коефіцієнт обмеження c представляється як міра повноти опису технологічної проблеми, що задається даним обмеженням. Ваговий коефіцієнт cw визначається значеннями з проміжку $[0; 1]$. Значення вагового коефіцієнта $cw = 1$ визначає абсолютну повноту опису обмеженням технологічної проблеми, а значення вагового коефіцієнта $cw = 0$ – повну відсутність опису технологічної проблеми в формулюванні обмеження. Ваговим коефіцієнтом присвоєння вважається характеристика важливості виконання присвоєння певного значення змінної. Найбільш зручним способом представлення вагових значень присвоєнь є їх використання в якості міток змінних. Множина обмежень із введеними ваговими коефіцієнтами має вигляд: $\{ConstrSet_i = \{c_i^j : cw^j\}_{j=1..m}\}_{i=1..n}$.

Імовірнісний коефіцієнт обмеження c представляється ступенем імовірності задоволення або порушення обмеження при вирішенні технологічної проблеми. Ймовірнісний коефіцієнт обмеження cpr визначається значеннями з проміжку $[0; 1]$. Значення ймовірнісного коефіцієнта $cpr = 1$ позначає абсолютну ймовірність задоволення (порушення) обмеження при вирішенні технологічної проблеми, а

значення ймовірнісного коефіцієнта $cpr = 0$ позначає абсолютне унеможливлення задоволення (порушення) обмеження при рішенні технологічної проблеми. Множина обмежень із введеними ймовірнісними коефіцієнтами має вигляд: $\{ConstrSet_i = \{c_i^j : cpr^j\}_{j=1..m}\}_{i=1..n}$.

Для значення ймовірності задоволення обмеження cpr^{sat} та значення ймовірності порушення cpr^{viol} має місце відношення: $cpr^{sat} = 1 - cpr^{viol}$.

Можливісний коефіцієнт обмеження c представляється можливісною мірою задоволення або порушення обмеження при вирішенні технологічної проблеми. Можливісний коефіцієнт обмеження cps визначається значеннями з проміжку $[0;1]$. Значення можливісного коефіцієнта $cps = 1$ позначає абсолютну можливість задоволення (порушення) обмеження при рішенні технологічної проблеми, а значення можливісного коефіцієнта $cps = 0$ – абсолютну неможливість задоволення (порушення) обмеження при рішенні проблеми. Множина обмежень із введеними можливісними коефіцієнтами має 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 має вигляд $\{ConstrSet_i = \{c_i^j : evc^j\}_{j=1..m}\}_{i=1..n}$.

Обмеження c із перевагами характеризується описом на основі коефіцієнта переваги pfc , $pfc \in [0;1]$, який є суб'єктивною оцінкою важливості (значимості) обмеження, що вказується оператором-бурильником, як експертом нафтогазової предметної області. Множина обмежень $ConstrSet_i$ із введеними перевагами має вигляд: $\{ConstrSet_i = \{c_i^j : pfc^j\}_{j=1..m}\}_{i=1..n}$.

Нечітке обмеження (*fuzzy constraint*) характеризується описом на основі лінгвістичних значень (lv), тобто значень типу “швидше за все”, “у більшості випадків”, “майже ніколи”, “майже завжди”, “завжди”, “дуже часто”, “часто”, “середньо”, “рідко”, “дуже рідко”, “ніколи”, “невідомо” і т.п. Множина обмежень із введеними лінгвістичними значеннями має вигляд: $\{ConstrSet_i = \{c_i^j : lv^j\}_{j=1..m}\}_{i=1..n}$.

Сумарна класифікаційна ієрархія видів обмежень представлена на рис. 1.

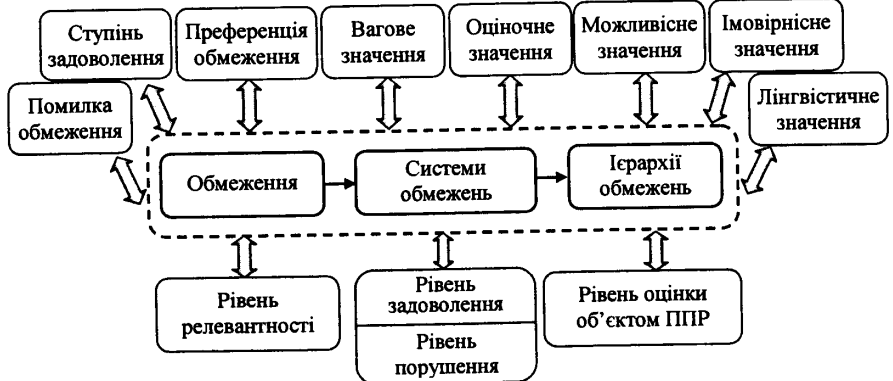


Рис. 1. Структура рівнів та атрибутів обмежень

У *третьому розділі* викладено результати теоретичних досліджень побудови структури СІППРО, що дозволило реалізувати основні переваги прийняття рішень при бурінні НГС на основі інтелектуальних засобів виявлення технологічних помилок і генерації зворотного зв'язку. Функціональність системи базується на контролі послідовності станів (*TPS – TechnologicalProblemStates*) у просторі проблеми:

$$\text{TechnologicalProblemSpace} = \{TPS_k\}_{k=1..k_{max}} = \{\dots TPS_{k_1} \dots TPS_{k_2} \dots\}_{k_1, k_2 \in [1..k_{max}]}, \quad (2)$$

де TPS_k – k -тий стан технологічної проблеми.

При рішенні технологічної проблеми об'єкт ППР переміщується по певній послідовності станів із множини можливих і в кожен момент часу знаходиться в певному поточному стані. Накладання множини обмежень забезпечує виділення класів еквівалентності $\{Class_m^E\}_{m=1..m_{max}}$ для множини станів проблеми. В межах класу еквівалентності система використовує однакову 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:

$$Class_m^E = \{\dots TPS_{m_1} \dots TPS_{m_2} \dots\}_{m_1 \in [1..m_{max}], m_2, m_3 \in [1..k_{max}]}. \quad (3)$$

На кожному з рівнів структуризації обмежень (множина обмежень *ConstrSet*, система обмежень *ConstrSyst*, ієрархія обмежень *ConstrHrch*) виконується прикріплення повідомлень зворотного зв'язку (*fb – feedback message*):

$$\text{ConstrHrch}_{TPR_i} = \bigcup_{j=1..j_{max}} \text{ConstrSyst}_{TP_j} = \bigcup_{k=1..k_{max}} \text{ConstrSet}_{TPS_k} = \{c_1 : fb_1, c_2 : fb_2 \dots c_n : fb_n\}_{k, n \in N}. \quad (4)$$

Сумарна модель розглядається як сукупність (множина) правил виду:

якщо < умова релевантності > істинна з коефіцієнтом cf_1

то < умова задоволення > 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 $cf_1 = cf_2 = 1$ отримується класична інтерпретація моделі домену в термінах абсолютної істинності та хибності.

Якщо рішення, запропоноване об'єктом ППР, відноситься до стану проблеми, що визначається умовою релевантності (абсолютно або з певним коефіцієнтом cf), то воно інтерпретується як коректне (абсолютно або з певним коефіцієнтом cf); якщо воно також знаходиться в стані, що визначається умовою задоволення (абсолютно або з певним коефіцієнтом cf):

$$\text{SubmittedSolution}[TPS_{k_1}]^{rc:cf_1} \Rightarrow \text{SubmittedSolution}[TPS_{k_2}]^{sc:cf_2}, \quad k_1 = k_2 \text{ або } k_1 <> k_2, \text{ якщо } TPS_{k_1},$$

$$TPS_{k_2} \in Class_{m_1}^E; k_1, k_2 \in [1..k_{max}], m_1 \in [1..m_{max}], \text{ де } rc:cf_1 - \text{ умова релевантності}$$

(абсолютна або відносна), $sc:cf_2$ - умова задоволення (абсолютна або відносна).

Таким чином, моделі доменів визначаються відповідними множинами обмежень:

$$\text{DomainModel}_{TPS_k} = \{ConstrSet_k\}_{k \in [1..k_{max}]} = \{if [rc_1 : cf_1] then [sc_1 : cf_1]\}_{k_1, k_2 \in N}. \quad (5)$$

Системи на основі обмежень виконують оцінку рішень, запропонованих об'єктом ППР, шляхом зіставлення їх із відповідною доменною моделлю: $\text{Match}(\text{SubmittedSolution}, \text{DomainModel})|_{ConstrSet}$, 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 з відповідним станом проблеми $Match([rc_{i_1} : cf_{i_1}].Pattern, TPS_k)_{i, k \in N}$;

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 $\models c_{m_1} \text{ iff } c_{m_1} \cdot [sc_{m_1} : cf_{m_1}] =_{Pattern} TPS_k$;

4. Обмеження вважається порушеним, якщо шаблон його умови задоволення не відповідає стану проблеми $\not\models c_{m_1} \text{ iff } c_{m_1} \cdot [sc_{m_1} : cf_{m_1}] \neq_{Pattern} TPS_k$.

Кожному обмеженню присвоюється одне або кілька наперед визначених повідомлень зворотного зв'язку, які використовуються при формуванні діалогів зворотного зв'язку як основи коректурних впливів системи при порушенні певних обмежень: $ConstrSet \rightarrow \{c_i : \{fb\}_i\}_{i=1..n_1, n_2=0..1..n_2, n_3, n_4 \in N}$, $FeedBack \leftarrow \{\{c_k\}_k\}_j^{Sys.} \}_{i}^{Hrch.}, i, j, k \in N$.

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

$$ConstrHrch_{TP_i} = \left\{ \begin{array}{l} ConstrSyst_{TPS_1} = \{c_1^1 : rd_1^1, c_2^1 : rd_2^1, \dots, c_{n_1}^1 : rd_{n_1}^1\} \\ ConstrSyst_{TPS_2} = \{c_1^2 : rd_1^2, c_2^2 : rd_2^2, \dots, c_{n_2}^2 : rd_{n_2}^2\} \\ \dots \\ ConstrSyst_{TPS_k} = \{c_1^k : rd_1^k, c_2^k : rd_2^k, \dots, c_{n_k}^k : rd_{n_k}^k\} \\ \dots \\ ConstrSyst_{TPS_{k_{max}}} = \{c_1^{k_{max}} : rd_1^{k_{max}}, c_2^{k_{max}} : rd_2^{k_{max}}, \dots, c_{n_{k_{max}}}^{k_{max}} : rd_{n_{k_{max}}}^{k_{max}}\} \end{array} \right. , \quad (6)$$

де $k = [1..k_{max}]$.

Для кожної системи обмежень середнє значення переважностей обмежень визначається як $rd_k = (rd_1^k + rd_2^k + \dots + rd_{n_k}^k) / n_k$. Відповідно, середній крок зміни переважностей для системи обмежень визначається: $ConstrSyst_{TPS_k} : rd_{step}^k = (rd_{n_k}^k - rd_1^k) / n_k$.

Обчислення зони найближчого розвитку об'єкту ППР (рівня експертної компетентності) для стану TPS_k виконується наступним чином. 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:

$$ConstrSyst_{TPS_k} = \overbrace{\{c_1^k : rd_1^k, \dots, c_{i_1}^k : rd_{i_1}^k, \dots, c_{n_k}^k : rd_{n_k}^k\}}^{PDZ_{TPS_k}^{max}} \text{ або } PDZ_{TPS_k}^{max} = \{ConstrSyst_{TPS_k} \setminus \{c_{i_1}^k : rd_{i_1}^k\}\}_{i_1=1..n_k}, (7)$$

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

Значення $PDZ_{TPS_k}^{max}$ інтерпретується як максимально повна зона найближчого розвитку для стану TPS_k . Відповідно, вводиться подібне обчислюване значення з інтерпретацією мінімально достатньої зони найближчого розвитку об'єкта ППР:

$$\begin{aligned} \text{ConstrSyst}_{TPS_k} &= \{c_1^k : rd_1^k, \dots, c_{i-1}^k : rd_{i-1}^k, \overbrace{c_i^k : rd_i^k, \dots, c_n^k : rd_n^k}^{PDZ_{TPS_k}^{min}}, \dots\}, \\ PDZ_{TPS_k}^{min} &= \{ \text{ConstrSyst}_{TPS_k} \setminus \{c_{i_3}^k : rd_{i_3}^k\}_{i_3=(1..i-1)} \cup \{c_{i_4}^k : rd_{i_4}^k\}_{i_4=(i..n_k)} \} \text{ або} \quad (8) \\ PDZ_{TPS_k}^{min} &= \{c_{i-1}^k : rd_{i-1}^k\}, \quad | = c_i. \end{aligned}$$

Значення $PDZ_{TPS_k}^{min}$ обчислюється також на основі середнього кроку зміни переважень: $PDZ_{TPS_k}^{min} = \{c_m^k\}_{m \in \{1..n_k\}}, rd_m^k = rd_{i_1}^k + rd_{step}^k, \quad | = c_i$. Шляхом об'єднання отриманих значень найближчого розв'язку для станів технологічної проблеми отримується значення для всієї технологічної проблеми та технологічного процесу відповідно:

$$\begin{aligned} PDZ_{TP_j}^{max} &= \bigcup_{k=1..k_{max}} PDZ_{TPS_k}^{max}, \quad PDZ_{TP_j}^{min} = \bigcup_{k=1..k_{max}} PDZ_{TPS_k}^{min}; \\ PDZ_{TP_i}^{max} &= \bigcup_{j=1..j_{max}} PDZ_{TP_j}^{max}, \quad PDZ_{TP_i}^{min} = \bigcup_{j=1..j_{max}} PDZ_{TP_j}^{min}. \end{aligned}$$

Порядок на рівнях ієрархії визначається шляхом об'єднання відповідних множин $TPR_i = \bigcup_{j=1..j_{max}} TP_j$, $TP_i = \bigcup_{k=1..k_{max}} TPS_k$.

Розглядаються дві основні категорії технологічних проблем: *статичні* технологічні проблеми етапу наповнення бази знань СИПРО та *динамічні* технологічні проблеми етапу функціонування системи. На етапі формування бази знань кожна технологічна проблема розглядається як деяка скінченна множина її станів. Кожен стан $TPS_i, i=1..k_{max}$, де k_{max} - максимальна кількість станів у проблемі TP_j - описується деякою множиною обмежень:

$$\text{ConstrSet}_k = \{c_1 : fb_1^{set}, c_2 : fb_2^{set}, \dots, c_n : fb_n^{set}\}_{n \in N}, \quad (9)$$

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

Після здійснення впорядкування множини обмежень по ступеню релевантності до проблеми отримується система обмежень для k -того стану технологічної проблеми $\text{ConstrSyst}_{TPS_k} = \{ \text{ConstrSet}_{TPS_k, \geq rd} \}_{rd \in [0..1]}$, яка також може бути представлена у вигляді: $\text{ConstrSyst}_{TPS_k} = \{c_1 : rd_1, c_2 : rd_2, \dots, c_l : rd_l\}_{l \in N}$, де $rd_i \in [0..1], i \in [0..l]$.

Процедура формування зворотного зв'язку для системи обмежень стану технологічної проблеми TPS_k має вигляд: $FB_{TPS_k}^{max} = \bigcup_{k=1..l} fb_k^{set}, 1 \leq k \leq l$, де $FB_{TPS_k}^{max}$ - максимально можливий потік зворотного зв'язку для стану TPS_k (тобто для граничного випадку, що відповідає порушенню всіх обмежень у системі). Проте, очевидно, що буде порушуватись тільки деяка підмножина обмежень $[\text{ConstrSyst}_{TPS_k}]^V \subseteq \text{ConstrSyst}_{TPS_k}$, тоді, відповідно, матимемо:

$$FB_{TPS_k}^V = \bigcup_{\forall k_i} fb_{k_i}^{set}, \forall k_i, | \neq c_{k_i}. \quad (10)$$

На рівні технологічної проблеми це означає, що:

$$FB_{TP_j}^{max} = \bigcup_{k=1..k_{max}} FB_{TPS_k}^{max}, \quad FB_{TP_j}^V = \bigcup_{k=1..k_{max}} FB_{TPS_k}^V, \quad (11)$$

де $FB_{TPS_k}^V \subseteq FB_{TPS_k}^{max}, k_1 = 1..k_{max}$.

Відповідно, на рівні технологічного процесу:

$$FB_{TP_i}^{max} = \bigcup_{j=1..j_{max}} FB_{TP_i}^{max}, FB_{TP_i}^V = \bigcup_{j=1..j_{max}} FB_{TP_i}^V, \quad (12)$$

де $FB_{TP_i}^V \subseteq FB_{TP_i}^{max}, j_1 = 1..j_{max}$.

При формуванні бази знань у СІППРО для кожного стану технологічної проблеми вказується множина помилок, яка може виникнути при вирішенні даного стану технологічної проблеми: $Err_k^{set} = \{err_1, err_2, \dots, err_n\}_{n \in N}$. Помилки розглядаються як нештатні ситуації процесу буріння НГС, виникнення яких є наслідком порушення певних обмежень, їх множин та ієрархій: $\{[ConstrSet_k]^V \neq \emptyset\} \Rightarrow [Err_k^{set} \neq \emptyset]$.

При внесенні помилок у базу знань вказуються їх вагові коефіцієнти (ew – error weight). Введення відношення впорядкування на множині помилок дозволяє отримати систему помилок: $Err_k^{Syst.} = (Err_k^{set})_{\geq ew}$ або $Err_k^{Syst.} = \{err_1 : ew_1, err_2 : ew_2, \dots, err_n : ew_n\}_{n \in N}$.

Відповідним чином отримується ієрархія помилок до технологічної проблеми:

$$Err_{TP_j}^{Hrch.} = \bigcup_{k=1..k_{max}} Err_k^{Syst.}. \quad (13)$$

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

$$TPS_k : Err_k^{Syst.} \rightarrow ConstrSyst_k, \begin{cases} \{err_1, err_2, \dots, err_n\} \\ \{c_1, c_2, \dots, c_{n_2}\} \end{cases}, \quad (14)$$

де $n_1, n_2 \in N$.

Відповідно, виконується ряд впорядкувань системи обмежень відносно ступеня їх релевантності помилкам:

$$\left\{ \begin{array}{l} err_1 : \{c_1 : rd_1^{err_1}, c_2 : rd_2^{err_1} \dots c_{n_2} : rd_{n_2}^{err_1}\} \\ \dots \\ err_n : \{c_1 : rd_1^{err_n}, c_2 : rd_2^{err_n} \dots c_{n_2} : rd_{n_2}^{err_n}\} \end{array} \right. \quad (15)$$

Статичною технологічною проблемою на основі обмежень вважається кортеж:

$$TP_j^{stat.} = (Err_{TP_j}^{Hrch.}, \bigcup_{k=1..k_{max}} TPS_k, ConstrHrch_{TP_j}), \quad (16)$$

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.

У режимі функціонування СІППРО, при вирішенні технологічних проблем, кожне з обмежень у відповідній системі обмежень задовольняється або порушується за умови, що всі обмеження в системі є релевантними. Тому для кожної системи обмежень у режимі функціонування отримуються відповідні підмножини задоволених і порушених обмежень: $[ConstrSet_k]^S = \{c_1, c_2, \dots, c_{m_1}\}_{m_1 \in N}$, $[ConstrSet_k]^V = \{c_1, c_2, \dots, c_{n_2}\}_{n_2 \in N}$.

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

$$[ConstrSyst_k]^S = \{c_1 : rd_1, c_2 : rd_2, \dots, c_{m_k} : rd_{m_k}\}_{m_k \in N}, \quad (17)$$

$$[ConstrSyst_k]^V = \{c_1 : rd_1, c_2 : rd_2, \dots, c_{n_k} : rd_{n_k}\}_{n_k \in N}, \quad (18)$$

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

Динамічна технологічна проблема на основі обмежень представляється як кортеж:

$$TP_j^{dyn} = (Err_{TP_j}^{Hrch}, \bigcup_{k=1..k_{max}} \overline{TPS_k, [ConstrHrch_j]^S, [ConstrHrch_j]^V}), \quad (19)$$

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.

При вирішенні стану технологічної проблеми TPS_k виникає певна кількість помилок, яка відповідає кортежу $(err_1, err_2, \dots, err_{k_i})$, де $k_i \in [0..n]$, n - кількість елементів у Err_k^{Syst} . Пропоноване рішення об'єктом ППП *SubmittedSolution* оцінюється СППРО з точки зору набору помилок, що міститься в даному рішенні:

$$SubmittedSolution \vdash Err_k^{sol} = (err_1, err_2, \dots, err_{k_i}). \quad (20)$$

Введена структура технологічної проблеми на основі обмежень інтерпретується графічно в деревовидній формі:

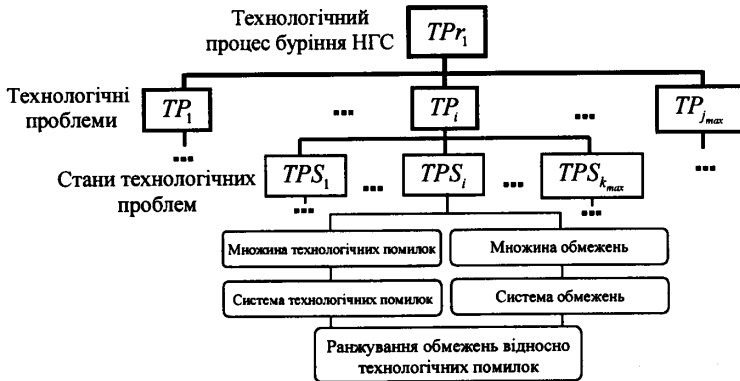


Рис. 2. Деревовидна структура технологічних проблем

У *четвертому розділі* реалізовано систему інтелектуальної підтримки прийняття рішень для запобігання нештатних ситуацій у процесі буріння НГС. Виконано представлення знань нафтогазової предметної області як множини обмежень станів технологічних проблем. Розроблена СППРО включає в себе моделювання на основі обмежень, тобто підхід, який використовує множину модульних правил для опису процесу буріння НГС. Реалізована інтелектуальна система проводить діагностування рішень технологічної проблеми (нештатної

ситуації в бурінні), запропонованої об'єктом ППР, і на основі такого аналізу генерує відповідний зворотний зв'язок. За допомогою інтерфейсів розробленої системи здійснюється підтримка рішення технологічної проблеми шляхом візуалізації її структури. При формуванні запиту користувача в СИПРО здійснюється синхронний пошук за допомогою введених ключових слів і висвітлюються релевантні помилки.

Розроблена система є програмним продуктом, призначеним для інтелектуальної підтримки процесу прийняття рішень технологічним персоналом при бурінні НГС. Тестування системи на предмет її функціональності здійснювалося на основі розробленого профілю – "Запобігання нештатних ситуацій при бурінні НГС", створеного шляхом аналізу досвіду професійної діяльності експертів буріння НГС. Таким чином, створена система дозволяє виконувати накопичення знань, умінь і навичок професійної та виробничої діяльності, організувати підтримку прийняття рішень на основі інтелектуальних методів. Наповнення бази знань системи запропоновано виконувати на основі досвіду експертів нафтогазової предметної області, яке здійснюється по деревовидній вкладеній структурі, що відображає технологічний процес, технологічні проблеми, пов'язані з ним, а також стани поточної технологічної проблеми. На технологічні проблеми та стани технологічних проблем накладаються обмеження, а до сформованих обмежень додають типові технологічні помилки, характерні для даного процесу.

Функціональність системи в режимі виконання представлена на прикладі вирішення технологічної проблеми "Прихоплення через обсипання та обвалювання породи" для стану "Втрата циркуляції бурового розчину та рухомості бурової колони на глибині 3323м.", на основі фактичних даних Прикарпатського УБР. Даний стан описується в системі наступними релевантними обмеженнями: c_1 - значення зенітного кута викривлення стовбура має бути меншим 38 градусів; c_2 - питома вага бурового розчину вище "середнього" значення; c_3 - нормальна циркуляція бурового розчину; c_4 - високий пластовий тиск; c_5 - стабільність значення перерізу стовбура свердловини. Виділений стан технологічної проблеми зумовлює наступні значення задоволення і порушення накладених обмежень: c_1 задовольняється на 5%, c_2 на 7%, c_3 на 9%, c_4 на 94 і c_5 на 96%. Система видає експертні поради по кожному з накладених обмежень, наприклад по обмеженню c_2 рекомендується "збільшити питому вагу бурового розчину до значення 1.46 г/см³ для зниження обсипання нестійких відкладів", а також генерує загальну експертну пораду по стану проблеми в цілому – "Прихоплення бурильного інструменту сталося через інтенсивне осипання стінок свердловини, яке обумовлене складними геолого-технічними умовами буріння, а саме: схильністю стінок свердловини до осипів та обвалів, а також великим зенітним кутом викривлення стовбура, тому необхідно вибрати ефективну стратегію по відновленню циркуляції та збільшенню ваги бурового розчину".

Архітектурне рішення для об'єкта ППР побудовано в формі системи взаємозв'язаних списків, елементами яких є технологічні процеси, технологічні операції, обмеження та помилки (рис.3). Також виконана побудова списків нештатних ситуацій, дій щодо усунення 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. 3. Алгоритмічна схема визначення нештатних технологічних ситуацій на основі обмежень у процесі буріння НГС

Кожна нештатна технологічна ситуація має свій список обмежень (множину, систему, ієрархію). Створена система дає змогу контролю помилок об'єкта ППР при вирішенні технологічних проблем і пошуку в базі знань, а також формування множини порушених обмежень, що призводять до виникнення даних помилок та, відповідно, логічно обґрунтованої генерації експертних порад, які базуються на характеристиках адекватності та релевантності обмежень, накладених на технологічний процес буріння НГС.

Виконано розрахунок значення ефективності розробленої інтелектуальної системи шляхом обчислення величини індексу стратегічної ефективності ($I_{стр} = 1,68$), що дозволяє стверджувати загальну доцільність і економічну ефективність впровадження системи.

У загальних висновках сформульовано наукові та практичні результати роботи.

У додатках наведені структуровані фактичні дані по свердловинах Прикарпатського УБР із виділеними аварійними (нештатними) ситуаціями, формальні представлення технологічних проблем на основі фактичних даних, функціональність розробленої інтелектуальної системи, а також акти про впровадження теоретичних і практичних результатів дисертаційних досліджень.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертації наведені теоретичне узагальнення та нове вирішення важливої науково-практичної задачі в галузі автоматизації процесів керування – розроблено метод і систему інтелектуальної підтримки прийняття рішень для запобігання

нештатних ситуацій у процесі буріння нафтових і газових свердловин шляхом контролю обмежень, накладених на технологічний процес, і отримано такі основні результати:

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 наслідок 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 переважень, 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 “Полтаванaftогаз”; 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 ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. 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 .
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. Вовк Р.Б. Дослідження структури зворотного зв'язку тьюторної системи на основі обмежень: матеріали XIII міжнародного молодіжного форуму «Радиоелектроника 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.

9. Вовк Р.Б. Інтелектуальна ґьюторна система на основі бази знань обмежень з мітками: матеріали III міжнародної конференції 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.

10. Вовк Р.Б. Формалізоване представлення моделі ґьюторної системи на основі концепції задоволення обмежень: матеріали IX міжнародної конференції «Інтелектуальний аналіз інформації ІАІ-2009», 19-22 травня, 2009., м.Київ / Р.Б.Вовк, В.І.Шекета. – Київ: Просвіта, 2009. – С. 48-54.

11. Вовк Р.Б. Модель навчальної системи на основі підходу задоволення обмежень: матеріали XI міжнародної науково-технічної конференції «Системний аналіз та інформаційні технології», 26-30 травня 2009р., м. Київ / Р.Б.Вовк. – К.:НТУУ «КПІ», 2009. – С. 276.

12. Вовк Р.Б. Аналіз формальних методів вирішення навчальних проблем в інтелектуальній ґьюторній системі на основі обмежень: матеріали XVI Всеукраїнської наукової конференції «Сучасні проблеми прикладної математики та інформатики», 8-9 жовтня 2009р., м. Львів / Р.Б.Вовк. – Львів: ЛНУ ім. І.Франка, 2009. – С. 56-57.

13. 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.

14. Вовк Р.Б. Побудова моделі об'єкта навчання в ґьюторній системі: матеріали п'ятої науково-практичної конференції з міжнародною участю (МОДС2010) «Математичне та імітаційне моделювання систем», 21 - 25 червня 2010, м.Київ / Р.Б. Вовк, В.І. Шекета. – Київ:ІПММС, 2010. – С. 192-194.

15. Вовк Р.Б. Засоби підвищення результативності зворотного зв'язку в ґьюторній системі: матеріали 7-ої міжнародної конференції «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.

16. Вовк Р.Б. Структурна реалізація інтелектуальної ґьюторної системи на основі обмежень: матеріали VIII міжнародної конференції « Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем (MPZIS-2010)», 10-12 листопада 2010р., м. Дніпропетровськ / Р.Б.Вовк. – Дніпропетровськ: ДНУ, 2010. – С. 51-52.

17. Вовк Р.Б. Аналіз нештатних ситуацій процесу буріння на основі фізичних параметрів в формі технологічних обмежень: збірник наукових праць по матеріалам 3-ої науково-практичної конференції 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.

18. Вовк Р.Б. Структуризація технологічних обмежень при вимірюванні фізичних параметрів процесу буріння: матеріали 6-ої міжнародної науково-технічної конференції 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.

АНОТАЦІЯ

Вовк Р.Б. Система інтелектуальної підтримки прийняття рішень для запобігання нештатних ситуацій в процесі буріння свердловин. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – автоматизація процесів керування. – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ, 2012.

Дисертацію присвячено розробці методу контролю технологічних помилок як базового елементу інтелектуальної системи для запобігання нештатних ситуацій у процесі буріння нафтових і газових свердловин на основі аналізу структури прийняття рішень на множині накладених технологічних обмежень.

На основі аналізу типових процедур прийняття технологічних рішень побудовано формальний підхід моделювання технологічних проблем засобами теорії представлення та задоволення обмежень, що використано як основну ідею розробки системи інтелектуальної підтримки прийняття рішень на основі обмежень. Розроблені формальні конструкції класифікації технологічних обмежень дозволяють контролювати перебіг технологічних проблем процесу буріння та виділяти на їх множині можливі нештатні ситуації, що утворює основу прийняття технологічних рішень в умовах неповної, неточної, невизначеної та розмитої інформації.

Запропоновано структуру, алгоритмічне та програмне забезпечення системи інтелектуальної підтримки прийняття рішень на основі обмежень для запобігання нештатних ситуацій у процесі буріння нафтових і газових свердловин.

Ключові слова: нештатна ситуація, технологічна проблема, моделювання на основі обмежень, система інтелектуальної підтримки прийняття рішень, буріння нафтових і газових свердловин.

АННОТАЦИЯ

Вовк Р.Б. Система интеллектуальной поддержки принятия решений для предотвращения нештатных ситуаций в процессе бурения скважин. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.07 – автоматизация процессов управления. – Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, Ивано-Франковск, 2012.

Диссертация посвящена разработке метода контроля технологических ошибок как базового элемента интеллектуальной системы для предотвращения нештатных ситуаций в процессе бурения нефтяных и газовых скважин на основе анализа структуры принятия решений на множестве заданных технологических ограничений.

Анализ технологического процесса бурения показал, что контроль такого процесса осуществляется посредством набора технологических параметров (переменных), для которых введены определенные множества ограничений. Основной задачей, в данном случае, является выделение такого множества основных технологических параметров, которое позволило бы описывать технологический процесс бурения путем введения систем ограничений и их ранжирования по степени релевантности, что позволяет представлять штатный ход технологических ситуаций (состояний технологических проблем) с точки зрения удовлетворения технологическими параметрами введенных множеств, систем и иерархий ограничений, а возможные проявления аварийных ситуаций (нештатного

хода технологических проблем и их состояний) с точки зрения нарушения технологическими параметрами релевантных ограничений. Построенная формальная структура, состоящая из наборов технологических параметров, множество доверительных интервалов (доменов) и множеств ограничений, позволяет описывать технологический процесс бурения нефтяных и газовых скважин в виде контроля технологических проблем и их состояний в соответствии с регламентом или в форме аварийных ситуаций.

Созданная структурная и функциональная модель системы интеллектуальной поддержки принятия решений на основе ограничений позволяет представлять процесс принятия технологических решений как последовательность шагов по выделению шаблонов условий релевантности и шаблонов условий удовлетворения, что на уровне практического применения позволяет фактически сопоставлять эти шаблоны с соответствующими состояниями технологических проблем бурения, в том числе и в форме нештатных аварийных ситуаций в условиях неполной, неточной, неопределенной и размытой информации о технологическом процессе. Предложена структура, алгоритмическое и программное обеспечение системы интеллектуальной поддержки принятия решений на основе ограничений для предотвращения нештатных ситуаций в процессе бурения нефтяных и газовых скважин.

Ключевые слова: нештатная ситуация, технологическая проблема, моделирование на основе ограничений, система интеллектуальной поддержки принятия решений, бурение нефтяных и газовых скважин.

ABSTRACT

Vovk R.B. The system of intelligible decisions support to prevent unscheduled situations during wells drilling. – Manuscript.

The thesis for a candidate of technical sciences degree on speciality 05.13.07 - automation of control processes. – Ivano-Frankivsk Technical National University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, 2012.

Dissertation is devoted to development of method for technological errors control, as a base feature for intelligible system for preventing of unscheduled situations arising in the process of drilling for oil and gas wells based on the analysis of the structure for decision taking support on the set of imposed technological constraints.

Based on the analysis of typical routines for technological decision taking support the formal approach for technological problems modeling by means of constraints based modeling and constraints satisfaction problem formalisms is presented, what is used as main idea for developing of the system for intelligible decisions support based on constraints. The developed formal constructions for classification of technological constraints allows controlling the flow of technological problems for current process and making it possible to select on the general set possibly unscheduled situations, what constitutes the common base for support of technological decision making under the conditions of incomplete, imprecise, uncertain and fuzzy information about the technological process.

The general structure, algorithms and software for the system of intelligible decisions support based on the constraints for preventing of unscheduled situations in the drilling of oil and gas wells were proposed and implemented.

Keywords: unscheduled situation, technological problem, constraints based modeling, system for intelligible decisions support, drilling of oil and gas wells.