

УДК 681.518:622.248:004.94

**СИСТЕМА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ПРИ КОНТРОЛІ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ****Р. Б. Вовк, В. І. Шекета, В. Д. Мельник**

Івано–Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, м. Івано–Франківськ, 76019, тел. (03422) 4–21–27, e-mail: [wolf@wolf.if.ua](mailto:wolf@wolf.if.ua)

*Досліджено технологію інтелектуальної підтримки прийняття рішень для керування технологічним процесом буріння нафтових і газових свердловин на основі наборів технологічних параметрів із заданими множинами обмежень. Представлено формальний опис функціональності інтелектуальної системи на основі обмежень, що дозволяє використовувати її як середовище підтримки прийняття технологічних рішень в умовах невизначеності при вирішенні оператором технологічних проблем у процесі буріння на основі інтелектуальних засобів виявлення і класифікації помилок та генерації зворотного зв'язку. Реалізовано інтелектуальну систему, яка відображає процес рішення нештатної аварійної ситуації об'єктом прийняття рішення та на основі його аналізу генерує відповідні експертні рекомендації щодо виконання необхідних технологічних дій для її усунення.*

*Ключові слова: нештатна аварійна ситуація, інтелектуальна система, прийняття рішень, технологічні обмеження, параметри процесу.*

*Исследовано технологию интеллектуальной поддержки принятия решений для управления технологическим процессом бурения скважин на основе наборов технологических параметров с заданными множествами ограничений. Представлено формальное описание функциональности интеллектуальной системы на основе ограничений, что позволяет использовать ее как среду поддержки принятия технологических решений в условиях неопределенности при решении оператором технологических проблем в процессе бурения на основе интеллектуальных средств обнаружения и классификации ошибок и генерации обратной связи. Создана интеллектуальная система, которая представляет процесс решения нештатной аварийной ситуации объектом принятия решения и на основе его анализа генерирует соответствующие экспертные рекомендации по выполнению необходимых технологических действий для ее устранения.*

*Ключевые слова: нештатная аварийная ситуация, интеллектуальная система, принятие решений, технологические ограничения, параметры процесса.*

*The technology of intelligent decision making is explored for technological process of oil and gas wells drilling control based on the sets of technological parameters with given sets of constraints. The formal descriptions of functionality for intelligible system based on constraints is outlined, what allows it using as an environment for technological solution support under conditions of uncertainty when operators try to solve technological problems in the course of well drilling based on intelligible means of selection and classification for errors occurring and related feedbacks generation. The intelligible system is developed, what allows covering the solutions process for unscheduled emergency situation by decision making object and based on subject analysis system generating corresponding expert advices related to necessary technological routines fulfillments for their elimination.*

*Keywords: unscheduled emergency situation, intelligible system, decision making, technological constraints, process parameters.*

Буріння нафтових і газових свердловин як об'єкт керування у загальному випадку є складним нестационарним технологічним процесом, що розвивається в часі і супроводжується виникненням нештатних аварійних ситуацій (ускладнення пов'язані з поглинанням технологічних речовин, флюїдопроявами, порушенням цілісності стінок

свердловини та прихопленням колони труб), на ліквідацію яких витрачається значна кількість коштів і часу, що, в свою чергу, впливає на загальну вартість буріння свердловин у цілому. 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.

Встановлено, що виникнення аварій та нештатних ситуацій як певного виду порушення регламентованого перебігу технологічного процесу має місце незалежно від засобів автоматизації та інтелектуалізації процесу буріння. Обґрунтовано послідовність формування процедури прийняття рішень при керуванні технологічним процесом на основі аналізу та виділення технологічних обмежень, порушення яких призводить до виникнення нештатних ситуацій у процесі буріння. Тому розроблення методу й алгоритмів системи інтелектуальної підтримки прийняття рішень для запобігання нештатних ситуацій має практичне значення, оскільки їх реалізація дає змогу зменшити витрати на попередження та ліквідацію аварій в процесі буріння нафтових і газових свердловин.

В ході аналізу виконано дослідження процесу буріння нафтових та газових свердловин (НГС), проаналізовано сучасні вітчизняні та зарубіжні розробки в області автоматизованих інтелектуальних систем та визначено особливості контролю та автоматизації процесів керування бурінням. Проблемам автоматизації керування процесом буріння НГС присвячено ряд теоретичних та прикладних досліджень [1–4]. 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. Однак залишається відкритим питання розробки системи інтелектуальної підтримки прийняття рішень для попередження та запобігання нештатних аварійних ситуацій в процесі буріння НГС.

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 технологій. Піонерами в даній області були технології таких фірм, як: Vocus Erie, Garner Denver, Marion. Результати впровадження даних систем описані в роботах [5,6]. Методики керування, що використовуються в даних системах, базуються на контролі порушень обмежень, на основі яких визначаються оптимальні 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.

Особливості сучасних автоматизованих систем керування технологічним процесом буріння НГС полягають в тому, що вони, маючи достатньо високий рівень апаратних та програмних ресурсів, можуть забезпечити рівень інтелектуальності при якому втручання людини є не обов'язковим. Це дозволяє системі в автономному режимі виконувати функції системи операторського керування процесом буріння, застосування засобів обробки та архівування інформації про хід процесу. Проте, оскільки процес буріння є складним та динамічним, повна автономність його інтелектуальних складових в автоматизованих системах процесу буріння не є доцільною і, як показує досвід, рівень їх функціональності та стійкості буде суттєво вищим у випадку, якщо така система включатиме доступ фахівця–експерта на етапі підтримки прийняття рішення, що дозволяє поєднувати обчислювальну ефективність системи з інтуїцією та знаннями людини. Існуючі автоматизовані системи керування технологічними процесами дозволяють ефективно вирішувати ряд задач: оброблення інформації в реальному часі; організація обміну даними для пристроїв зв'язку з технологічними об'єктами (контролерами, засобами вводу–виведення); підтримування стандартного програмного забезпечення; підтримкування бази технологічних даних; виведення повідомлень про нештатні ситуації; підготовки звітів про стан та перебіг технологічних процесів; підтримування мережевих з'єднань з використанням web–браузерів.

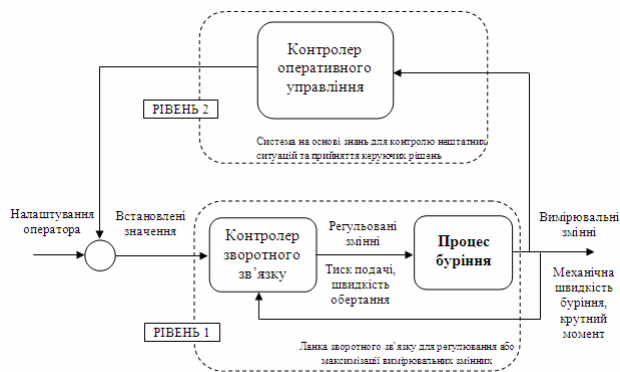
Таким чином, побудова інтелектуальних систем підтримки прийняття керуючих технологічних рішень при контролі технологічних параметрів з метою запобігання нештатним аварійним ситуаціям є однією з невирішених та практично значимих прикладних задач.

Метою даного дослідження є розроблення методу моделювання технологічного процесу буріння НГС засобами концепції представлення та задоволення обмежень для контролю технологічних параметрів та створення системи інтелектуальної підтримки прийняття рішень щодо запобігання нештатних аварійних ситуацій.

Для вирішення поставленої мети виконані формально–логічні дослідження з використанням базового апарату на основі обмежень для побудови розширення у вигляді формальних конструкцій представлення та використання знань про технологічний процес буріння, методи теорії чітких та нечітких множин, методи експертних оцінок та теорії ймовірності для опису множин, систем та ієрархій технологічних обмежень.

Аналіз досліджень даної проблеми, показав що причиною виникнення нештатної ситуації є існування певного виду невідповідності геологічних та геофізичних характеристик розрізу, опису та структуризації параметрів технологічного процесу буріння закладених на етапі створення технологічного регламенту. Нештатні ситуації приводять до часових та фінансових втрат і, відповідно, негативно впливають на техніко–економічні показники процесу буріння. Відомо, що процес буріння є найскладнішим і найбільш затратним процесом при будівництві свердловини і від його ведення згідно геолого–технологічного наряду та інших обмежень по технології залежить успіх буріння, а, значить, і здешевлення технологічного процесу в цілому.

На рис. 1 представлено процес декомпозиції керованого процесу буріння НГС в множину динамічних систем з часовими характеристиками в рамках більш загальної структури змінних дискретних подій, що визначає початкову стратегію керування у вигляді дворівневої структури.



**Рисунок 1 – Дворівнева стратегія керування технологічним процесом буріння**

Хоча розглядаються такі події, що відбуваються майже миттєво в зовнішньому контурі, вони все ж таки відбуваються з набагато меншою частотою, ніж варіація змінних у внутрішньому динамічному контурі. Таким чином, можна розглядати дану схему як внутрішній контур регулювання з високою пропускну здатністю, навколо якого розміщується система оперативного керування з

низькою пропускну здатністю. До внутрішнього контура регулювання застосовуються класичні рішення схем керування, а зовнішній контур з нижчою пропускну здатністю вимагає застосування деякої адаптивної методики на основі знань. Можливим є використання контуру оперативного регулювання для забезпечення 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 пропускну здатністю.*

На основі аналізу експериментальних даних можна сформулювати наступні правила:

1) тиск, який необхідний для помпування розчину в пласт є змінною величиною, що в основному впливає на механічну швидкість буріння та проходку за один оберт;

2) висока швидкість обертання своїм результатом має надмірні вібрації, в основному в сланцевих породах;

3) регулювання швидкості обертання долота буде впливати не тільки на механічну швидкість буріння, але і 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;

б) 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.

Дослідження [4] показують, що причиною виникнення технологічних проблем (нештатних аварійних ситуацій в процесі буріння НГС) є вихід певних технологічних параметрів за встановлені граничні значення (домени). Сутність такого процесу можна моделювати засобами теорії представлення та задоволення обмежень, де роль змінних відіграють технологічні параметри.

На формальному рівні задача задоволення обмежень 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. Обмеженням вважається відношення, яке задане на підмножині змінних  $\{v_{i_1}, \dots, v_{i_k}\}$  над їхніми доменами, тобто  $\{D_{i_1} \times \mathbf{L} \times D_{i_k}\} \supseteq c_i$ .

Основою функціонування інтелектуальної системи, що базується на накладенні множин, систем та ієрархій обмежень є контроль процесів їх порушення та задоволення. Опис функціонування системи інтелектуальної підтримки прийняття рішень на основі обмежень (СППРО) базується на формальному представленні технологічної проблеми (нештатної аварійної ситуації при бурінні НГС)  $TP$  ( $TP$ -Technological Problem) як виду початкового формулювання задачі задоволення обмежень з додатковими множинами обмежень і, відповідно, 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;  $C^R = \{c_1^r, c_2^r, \dots, c_n^r\}$  – множина релевантних обмежень;  $C^{UnR} = \{c_1^{unr}, c_2^{unr}, \dots, c_n^{unr}\}$  – множина нерелевантних обмежень.

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

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

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, впорядкована по одному з оціночних значень) для  $k$ -го стану технологічної проблеми;  $c_i, i_1 \in [1..n_i]$  – 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  $TP_j$ .

Технологічно причиною виникнення нештатних ситуацій є вихід певних технологічних параметрів за встановлені граничні значення (домени). Опис такого процесу можна представити у вигляді задачі задоволення обмежень [7], якщо її змінні представляти технологічними параметрами контролю процесу буріння, а саме:

$$V^1 = \{v_1^1, v_2^1, \dots, v_n^1\} = \{\text{витрата}_{\text{ бурового розчину }}_{\text{ на виході із свердловини, крутний момент }}_{\text{ на роторі, осьове зусилля на долото, зусилля на гаку, тиск на викиді насосів, швидкість обертання ротора, механічна швидкість}}.$$

Введення для набору змінних  $V^1$  множини доменів  $D^1$  та множини обмежень  $C^1$  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:

$$TP^1.TPS_{set}^1 = \{\text{обрив бурової колони, прихоплення бурильних і обсадних труб, падіння бурового інструменту і сторонніх предметів у свердловину, припікання інструменту}\}.$$

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 прихоплення бурової колони ( $TP^2$ ). Контроль даного процесу можна описувати набором технологічних параметрів, змінних:

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

Для множини  $V^2$  введемо множину обмежень

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

Згідно класичного означення, введеного в [8], 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 [8] отримаємо впорядковані системи обмежень по ступеню їх релевантності:

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

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

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

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 показує аналіз літературних джерел [9, 10] 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.

Досліджуючи представлення формальних метаструктур, можна вивести класи технологічних проблем на їх основі [11]. 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.

*Технологічні проблеми на основі нечітких обмежень  $TP^{fuzzy}$*  – 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”, “швидше за все”, “інколи”, “деколи” та ін.

*Технологічні проблеми на основі лексикографічних обмежень.* Класичні пошукові задачі на основі лексикографічних обмежень вперше введені в [12], як вид розширення пошукових задач на основі нечітких обмежень. Таке розширення може бути також побудоване і для пошукових задач на основі обмежень з можливими 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 із 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.

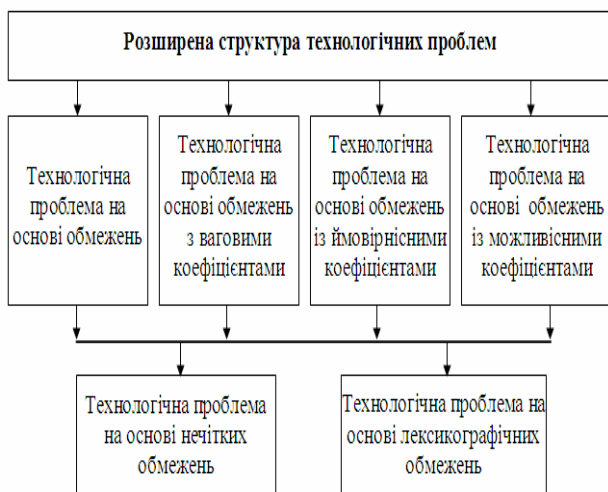


Рисунок 2 – Розширена класифікація технологічних проблем на основі обмежень

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 і визначає необхідність введення певного способу порівняння для систем обмежень технологічних проблем.

Введемо цільову функцію  $OF$  (objective function), яка розглядається як деяка функція задана 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. 3) 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.

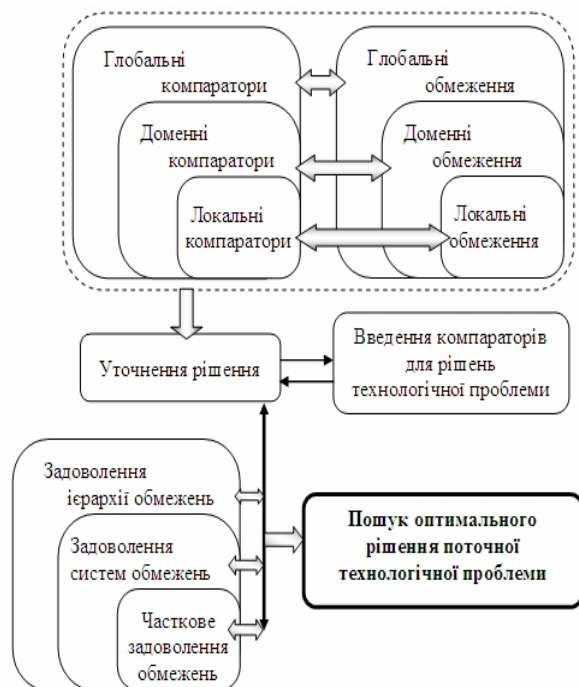


Рисунок 3 – Процедура пошуку оптимального рішення шляхом задоволення обмежень

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.

З точки зору функціонування СППРО, 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) [13]:

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

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 СППРО 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:

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

Процедура формування зворотного зв'язку для системи обмежень стану технологічної проблеми  $TPS_k$  матиме 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 в системі).

Проте очевидно, що буде порушуватись тільки деяка підмножина обмежень  $[ConstrSyst_{TPS_k}]^V \subseteq ConstrSyst_{TPS_k}$ . Тоді відповідно матимемо:

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

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:

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

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

При формуванні бази знань в СППРО 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

$$R_m = [rc_m : cf_m^{rc}] [sc_m : cf_m^{sc}].$$

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  $ConstrSyst_{TP_j}$ .

Розроблена СІППРО 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 вказує, 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.

Проведемо опис процесу формалізації для методу фіксації помилок та виділення множини релевантних до помилки обмежень.

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  $\{ConstrR_k\}_{k=1..K}$ , 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  $ConstrR_{set}^{TP^i.TS^j} = \{ConstrR_k\}_{k=1...K}$  буде приймати одну з двох форм: задоволене обмеження (*Satisfied Constraints*), порушене обмеження (*Violated Constraints*), а саме:

$$ConstrR_{set}^{TP^i.TS^j} = \{ConstrR_k\}_{k=1...K} = \{\{ConstrS_k\}_{k=1...K}, \{ConstrV_k\}_{k=1...K}\}.$$

4. При введеній множині обмежень кожний 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 кожний елемент множини релевантних обмежень є ранжованим, то запишемо формулу:

$$\left[ConstrR_{set}^{TP^i.TS^j}\right]^{Ranged} = \{ConstrR_k : CR_k\}_{k=1...K},$$

де  $CR_k \in [0...1]$ , причому 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  $Errors_{set}^{TP^i.TS^j}$ :

$$Errors_{set}^{TP^i.TS^j} = \{Error_m\}_{m=1...M},$$

де  $M$  – кількість задекларованих помилок в системі для  $j$ - стану  $i$  – тої технологічної проблеми.

6. Введемо в розгляд множину обмежень, порушення яких привело 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:

$$ConstrRErr_{set}^{Error_m} = \{ConstrRE_{k_1}\}_{k_1=1...K_1} = \{\{ConstrSE_{k_1}\}_{k_1=1...K_1}, \{ConstrVE_{k_1}\}_{k_1=1...K_1}\}.$$

7. При введеній множині обмежень до порушених помилок кожний 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:  $[ConstrRErr_{set}^{Error_m}]^{Ranged} = \{ConstrR_{k_1} : CRE_{k_1}\}_{k_1=1...K_1}$ .

8. Якщо джерелом помилки  $Error_m$  є деяка множина  $ConstrRErr_{set^1}^{Error_m}$ , то очевидно, що  $ConstrRErr_{set^1}^{Error_m} \subset ConstrRErr_{set}^{TP^i.TS^j}$ , а також  $ConstrRErr_{set}^{Error_m} = ConstrSErr_{set^1}^{Error_m} \cup ConstrVErr_{set^2}^{Error_m}$ , де  $set = set^1 \cup set^2$  і також очевидно, що  $ConstrSErr_{set^1}^{Error_m} = ConstrRErr_{set}^{Error_m} - ConstrVErr_{set^2}^{Error_m}$ .

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 задалегідь 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.

Функціональність розробленої системи інтелектуальної підтримки прийняття рішень 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. На рис. 4 представлена експертна оцінка розробленої системи по другому порушеному технологічному обмеженню.

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/см<sup>3</sup> для зниження обсипання нестійких відкладів”, а також генерує загальну експертну пораду по стану проблеми в цілому – “Прихоплення бурильного інструменту сталось

через інтенсивне осипання стінок свердловини, яке обумовлене складними геолого–технічними умовами буріння, а саме: схильністю стінок свердловини до осипів та обвалів, а також великим zenітним кутом викривлення стовбура, тому необхідно вибрати ефективну стратегію по відновленню циркуляції та збільшенню ваги бурового розчину”.

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 приводять до виникнення даних помилок та, відповідно, логічно обгрунтованої генерації експертних порад, які базуються на характеристиках адекватності та релевантності обмежень, накладених на технологічний процес буріння НГС.

**ВИСНОВКИ**

Створено метод моделювання технологічного процесу буріння нафтових і газових свердловин засобами концепції представлення та задоволення обмежень для контролю технологічних параметрів та побудовано систему інтелектуальної підтримки прийняття рішень для запобігання нештатних

аварійних ситуацій в процесі буріння свердловин. 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. 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.

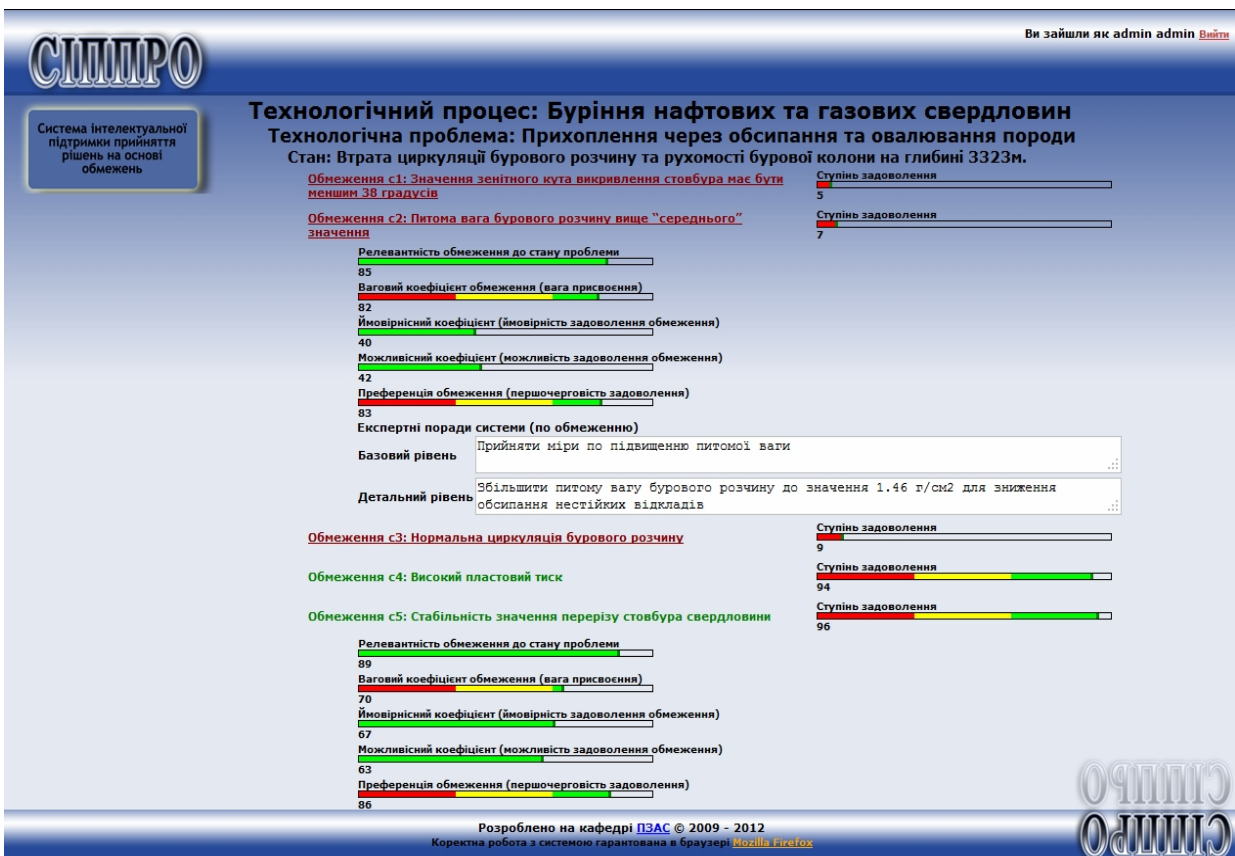


Рисунок 4 – Експертна оцінка системи по другому порушеному технологічному обмеженню

1. Семенцов Г.Н. Автоматизації технологічних процесів у нафтовій і газовій промисловості: [навчальний посібник] / Г.Н.Семенцов, Я.Р.Козуч, Я.В.Куровець, М.М.Дранчук. – Івано–Франківськ: ІФНТУНГ. – 2009. – 300с. 2. Галли І.М. Оптимізація нагрузки и скорости вращения для буров вращательного типа, предназначеных для бурения горных пород / И.М.Галли, Г.Б.Вудс // *API Drilling and Production Practice*, 1963. – P.48–73. 3. Горбійчук М.І. Оптимізація процесу буріння глибоких свердловин: [навч.посібник] / М.І.Горбійчук, Г.Н.Семенцов. – Івано–Франківськ: Факел. – 2003. – 493 с. 4. Ясов В.Г. Осложнения и аварии при бурении нефтяных и газовых скважин: [учебное пособие] / В.Г.Ясов. – Івано–Франковск: ИФДТУНГ, 2004. – 207с. 5. 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. 6. 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. 7. Barták Roman. Constraint programming: a survey of solving technology / Roman Barták *AIROnews*, IV(4), 1999. – P.7–11. 8. 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. 9. Лобанов В.А. Автоматизация технологических процессов бурения / В.А.Лобанов, А.В.Мнацаканов, Б.М.Муратов, А.М.Шубладзе. – М.: ВНИИЭгазпром, 1986. – 50 с. 10. Ветров А.К. Аварии в разведочном бурении и способы борьбы с ними / А.К.Ветров, А.В.Коломоец. – М.:Недра, 1969. – 256 с. 11. Вовк Р.Б. Автоматизована інтелектуальна система контролю нештатних ситуацій в бурінні / Р.Б.Вовк, В.І.Шекета // *Всеукраїнський науково–технічний журнал "Нафтогазова енергетика"*. – Наука і сучасні технології. – 2011. – № 3 (16). – С. 108 – 120. 12. 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. 13. Вовк Р.Б. Формальний опис процесу контролю задоволення та порушення обмежень в інтелектуальних системах / Р.Б.Вовк, В.П.Процюк, В.І.Шекета // *Вісник національного університету "Львівська політехніка"*. – 2011, № 694. – С. 189–199.

Поступила в редакцію 28.11.2012р.

Рекомендував до друку докт. техн. наук,  
проф. Юрчишин В. М.