

## АВТОМАТИЗОВАНА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА КОНТРОЛЮ НЕШТАТНИХ СИТУАЦІЙ В БУРІННІ

Р.Б. Вовк, В.І. Шекета

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42127,  
e-mail: wolf@wolf.if.ua

*Дослідження присвячено розробці методу контролю технологічних помилок як базового елемента інтелектуальної системи з метою запобігання виникненню нештатних ситуацій в процесі буріння нафтових та газових свердловин на основі аналізу структури прийняття рішень на множині накладених технологічних обмежень.*

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

*Створено інтелектуальну систему, що базується на обмеженнях та уможливіє візуалізацію рішень технологічної проблеми як частину процесу прийняття рішень і генерування відповідного зворотного зв'язку для забезпечення експертних порад щодо виконання необхідних технологічних дій з метою усунення поточної нештатної технологічної ситуації, що інтерпретується системою як процес задоволення певної множини, системи або ієрархії обмежень, накладеної на процес буріння нафтових та газових свердловин.*

*Ключові слова: технологічна проблема, зворотній зв'язок, моделювання на основі обмежень, релевантність, прийняття рішень.*

*Исследование посвящено разработке метода контроля технологических ошибок, как базового элемента интеллектуальной системы с целью предотвращения возникновения нештатных ситуаций в процессе бурения нефтяных и газовых скважин на основе анализа структуры принятия решений на множестве заданных технологических ограничений.*

*По результатам анализа существующих процедур принятия технологических решений построен формальный подход моделирования технологических проблем посредством теории представления и удовлетворения ограничений, положенной в основу разработки автоматизированной интеллектуальной системы на базе ограничений. Разработаны формальные конструкции для классификации технологических ограничений, что позволяет контролировать ход технологических проблем процесса и выделять на их множестве возможные нештатные ситуации, что позволит создать основу принятия технологических решений в условиях неполной, неточной, неопределенной и размытой информации.*

*Создана интеллектуальная система, формальная конструкция которой базируется на идее ограничений, позволяющая визуализацию решений технологической проблемы как части процесса принятия решений и генерацию соответствующей обратной связи для обеспечения экспертных рекомендаций по выполнению необходимых технологических действий с целью устранения текущей нештатной технологической ситуации, что интерпретируется системой как процесс удовлетворения определенного множества, системы или иерархии ограничений, наложенных на процесс бурения нефтяных и газовых скважин.*

*Ключевые слова: технологическая проблема, обратная связь, моделирование на основе ограничений, релевантность, принятие решений.*

*The research covers the development of method for technological errors control as a base element of intelligible system for preventing unscheduled situations arising in the process of drilling oil and gas wells based on the analysis of the structure of decision-making process on the set of imposed technological constraints.*

*On the basis of the analysis of typical procedures for technological decision-making process the formal approach is formed for technological problems modeling by means of constraints presentation and satisfaction theory that is used as a main idea for developing an automated constraints-based intelligible system. The developed formal constructions for classification of technological constraints allow controlling the flow of technological problems of a current process and making it possible to select possible unscheduled situations on their set that forms the common base of technological decisions taking under the conditions of incomplete, imprecise, uncertain and fuzzy information.*

*The constraints-based intelligible system is created, which allows to visualize the solutions to a technological problem as a part of decision-making process and to generate an adequate feedback to provide expert pieces of advice concerning performing necessary technological actions to overcome a routine unscheduled situation that is interpreted by a system as a process of satisfaction of a certain constraints set, system or hierarchy, imposed on the process of drilling oil and gas wells.*

*Keywords: technological problem, feedback, modeling by means of constraints, relevance, decisions taking.*

Згідно з енергетичною стратегією України на період до 2030 року, в умовах обмежених енергетичних ресурсів та конкурентної глобальної економіки і екологічних вимог останніх

років процес буріння слід розглядати як такий, що повинен задовольняти не тільки експлуатаційним (технологічним) очікуванням, але також вимогам щодо вартості, продуктивності та еко-

логічної безпеки. Особливості новітніх оцінок процесу буріння свердловин, в основному зводяться до оцінки їх економічної ефективності в рамках певної компанії, регіону, країни і т.п. Такі оцінки визначають їх інвестиційну привабливість, а також задають відповідне ранжування за економічним значенням і очікуваним ризикам виникнення нештатних ситуацій.

В ході аналізу сучасного стану проблеми виконано дослідження процесу буріння нафтових та газових свердловин (НГС) як об'єкта керування, 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 [1-6]. Результати даних досліджень дозволяють описувати процес буріння на рівні формальних та математичних моделей, що є основою для створення систем автоматизованого керування процесом, в тому числі з елементами інтелектуального керування. Однак, залишається відкритим питання розробки інтелектуальних автоматизованих систем керування процесом буріння, які б дозволяли запобігати виникненню нештатних ситуацій в ньому.

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, застосовувати засоби 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 свідчить досвід, рівень їх функціональності та стійкості буде суттєво вищим у випадку, якщо така система включатиме доступ фахівця-експерта на етапі підтримки прийняття рішення, що дасть змогу поєднувати обчислювальну ефективність системи з інтуїцією та знаннями людини. Існуючі автоматизовані системи керування технологічними процесами дозволяють ефективно вирішувати ряд задач: обробка інформації в реальному часі; організація обміну даними для пристроїв зв'язку з технологічними об'єктами (контролерами, засобами вводу-виведення); підтримка стандартного програмного забезпечення; підтримка бази технологічних даних; виведення повідомлень про нештатні ситуації; підготовка звітів про стан та перебіг технологічних процесів; підтримка мережевих з'єднань з використанням web-браузерів.

Актуальність даного напряму досліджень визначається загальними задачами інтелектуалізації людино-машинних інтерфейсів в автоматизованих системах керування технологічним процесом буріння, з основним акцентом на

необхідності створення інтелектуальних процедур запобігання виникненню нештатних ситуацій як наслідку помилкових рішень оператора технологічного процесу.

Таким чином, побудова автоматизованих інтелектуальних систем підтримки прийняття керуючих технологічних рішень з метою запобігання виникненню нештатних аварійних ситуацій є однією з невирішених та значущих прикладних задач.

**Метою даного дослідження** є розроблення методу та інтелектуальної системи запобігання виникненню нештатних ситуацій в процесі буріння нафтових та газових свердловин, шляхом контролю обмежень, накладених на технологічний процес.

Для вирішення поставленої мети у роботі проведено теоретичні дослідження з використанням системного підходу (для визначення сутності нештатних ситуацій); формально-логічних досліджень з використанням базового апарату на основі обмежень для побудови розширення у вигляді формальних конструкцій подання та використання знань про технологічний процес буріння; методів теорії множин для моделювання функціональності складових систем; методів нечітких множин та теорії ймовірності для опису множин, систем та ієрархій обмежень, помилок технологічних проблем та їх станів, а також опису процесу прийняття рішень та побудови процедур зворотного зв'язку як базових інтелектуальних функцій системи; методів експертних оцінок при роботі операторів технологічного процесу буріння з інтелектуальною системою.

Тенденції щодо розвитку автоматизованих систем керування як комплексів програмних та технічних засобів, призначених для автоматизації задач керування технологічним процесом буріння полягає в створенні комплексних інтелектуальних систем, які не тільки забезпечують автоматизацію процесу, але й надають відповідну інтелектуальну підтримку при прийнятті рішень, особливо в умовах невизначеної, неповної та слабоструктуризованої інформації про процес буріння. Показано, що ефективність автоматизованих систем, які застосовуються для керування технологічним процесом буріння, визначається рівнем достовірності даних та знань щодо геологічних характеристик розрізу. Показано, що виникнення ускладнень як певного виду порушення регламентованого перебігу технологічного процесу має місце навіть в найбільш новітніх та інтелектуалізованих системах автоматизації процесу керування бурінням. 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 проектування та складання технологічного регламенту. Нештатні ситуації призводять до часових та фінансових втрат і, відповідно, негативно впливають на техніко-економічні показники процесу буріння. Доведено, що виявлення мо-

жливих причин нештатних ситуацій та опис їх в формі обмежень, що накладаються на технологічний процес буріння, є важливою науково-практичною задачею, вирішення якої дозволяє формувати формалізовані структури технологічних обмежень в базах знань автоматизованих інтелектуальних системах керування.

Дослідження [6] показує, що причиною виникнення технологічних проблем (нештатних аварійних ситуацій) є вихід певних технологічних параметрів за встановлені граничні значення (домени). Сутність такого процесу можна моделювати засобами теорії представлення та задоволення обмежень, де в якості змінних слід підставити 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;  $D = \{D_1, D_2, \dots, D_n\}$  – множина доменів (областей визначення) кожної змінної;  $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$  – множина обмежень. Обмеженням називається відношення, задане на підмножині змінних  $\{v_{i_1}, \dots, v_{i_k}\}$  над їхніми доменами:  $\{D_{i_1} \text{ г } L \text{ г } D_{i_k}\} \text{ К } c_i$ .

Основою функціонування інтелектуальної системи, що базується на накладенні множин, систем та ієрархій обмежень, є контроль процесів їх порушення та задоволення. Опис функціонування автоматизованої інтелектуальної системи на основі обмежень (АІСО) базується на формальному представленні технологічної проблеми (нештатної ситуації при бурінні НГС)  $TP$  ( $TP$ -Technological Problem) як виду початкового формулювання задачі задоволення обмежень з додатковими множинами обмежень  $C^R = C^S \text{ И } C^V$ ,  $C^{UnR}$ , 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 зображається 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 та задоволених обмежень, що на практиці вимагає присвоєння певного оціночного

значення, що дає змогу задавати загальну перевагу обмежень.

Введення впорядкованої множини  $Ev^{set}$  необхідно для подання різних рівнів порушення та задоволення обмежень. Спосіб побудови структури оцінювання визначає залежність оціночних значень від множин порушених та задоволених обмежень. Комутативність та асоціативність введеної операції дозволяє обчислювати сумарні значення оцінок для множин  $ConstrSet$ , систем  $ConstrSyst$  та ієрархій  $ConstrHrch$  порушених та задоволених обмежень. Для оціночної функції  $evf \text{ O } (Ev^{set}, \#_{TP}, f_c, T, \wedge)$  на основі властивостей монотонності матимемо, що

$$\begin{aligned} & \text{Й} \text{ К } evf(\psi) \text{ \# } ConstrSet \text{ Ю } evf(\psi) \text{ \# } ConstrSet', \\ & \text{К} \text{ \# } ConstrSet' \text{ M } \# ConstrSet \\ & \text{К} \text{ К } evf(\psi) \text{ \# } ConstrSyst \text{ Ю } evf(\psi) \text{ \# } ConstrSyst', \\ & \text{К} \text{ \# } ConstrSyst' \text{ M } \# ConstrSyst \\ & \text{К} \text{ К } evf(\psi) \text{ \# } ConstrHrch \text{ Ю } evf(\psi) \text{ \# } ConstrHrch', \\ & \text{К} \text{ \# } ConstrHrch' \text{ M } \# ConstrHrch \end{aligned}$$

На основі введеної структури оцінювання обмежень можна визначити очікувані класи технологічних проблем [7]:

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

– для множин:

$$ConstrSet = ConstrSet^R \cup ConstrSet^{unR} \text{ – підмножини релевантних та нерелевантних обмежень;}$$

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

– для систем:

$$ConstrSyst = ConstrSyst^R \cup ConstrSyst^{unR} \text{ – підсистеми релевантних та нерелевантних обмежень;}$$

$$ConstrSyst^R = ConstrSyst^S \cup ConstrSyst^V \text{ – підсистеми задоволених та порушених релевантних обмежень;}$$

– для ієрархій:

$$ConstrHrch = ConstrHrch^R \cup ConstrHrch^{unR} \text{ – субієрархії релевантних та нерелевантних обмежень;}$$

$$ConstrHrch^R = ConstrHrch^S \cup ConstrHrch^V \text{ – субієрархії задоволених та порушених релевантних обмежень}$$

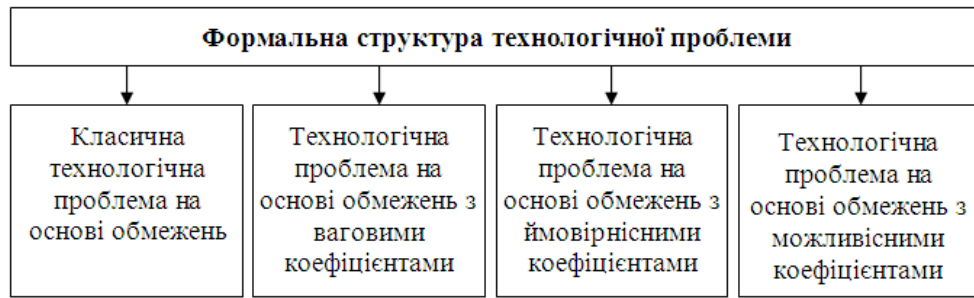


Рисунок 1 – Класифікація технологічних проблем з обмеженнями

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

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

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

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

3. Технологічні проблеми на основі обмежень з ймовірнісними коефіцієнтами можуть подаватися формальними структурами виду  $TP^{prb} = ([0,1], D_{prb}, <, 0,1)$ . В даному випадку ймовірнісний коефіцієнт визначатиме ймовірність релевантності обмеження фактичній технологічній проблемі  $TPF$ , оскільки при побудові присвоєнь, важливим є порушення чи задоволення тільки релевантних обмежень. Для функції оцінювання присвоєнь  $evf(\psi)$  та для деякого присвоєння  $\psi$ ,  $\psi \in \Psi_v$  із припущення про незалежність обмежень в множині (системі, ієрархії) можемо отримати оціночне значення для присвоєння  $\psi$  у вигляді:

$$evf_{TP^{prb}}(\psi) = \prod_{(c_i \in ConstrSet^R) \cap \psi \in \Psi^1 \cap ConstrSet^{UnR}} (1 - prb(c_i)),$$

де  $prb(c_i)$  – ймовірність релевантності обмеження  $c_i$ ,  $c_i \in ConstrSet^R$  в фактичній технологічній проблемі  $TPF^{prb}$ . Для заданої множини (системі, ієрархії) обмежень слід обчислити сумарне значення ймовірнісних оцінок, і в якості рішення технологічної проблеми  $Sol(TPF^{prb})$  вибрати присвоєння з максимальним оціночним значенням ймовірнісної релевантності, оскільки саме таке рішення максимально відповідатиме очікуванню автоматизованої інтелектуальної системи.

4. Технологічні проблеми на основі обмежень з можливісними коефіцієнтами можуть бути подані формальною структурою  $TP^{posbl} = (\emptyset, lc, max, >, 1,0)$ . Дана формальна структура дозволяє виконувати оцінювання можливої необхідності задоволення чи порушення множини (системі, ієрархії) накладених обмежень при побудові присвоєнь в процесі пошуку рішення технологічної проблеми. Пошук оптимального присвоєння з введеною функцією мінімізації за сумарними значеннями переваг множини порушених та введеною функцією максимізації за сумарними значеннями переваг множини задоволених обмежень розглядається як основна складова процесу пошуку рішень. Введення переваг в даному випадку дозволяє виконати ранжування множини релевантних обмежень  $ConstrSet^R$  за ступенем важливості.

Ведена класифікація відображена на рис. 1.

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

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

де:  $ConstrHrch_{TP_j}$  – ієрархія обмежень (сукупність систем обмежень за технологічними станами), накладена на  $j$ -ту технологічну проблему;  $ConstrSyst_{TP_j}$  – система обмежень (множина базових обмежень, впорядкована за одним з оціночних значень) для  $k$ -го стану технологічної проблеми;  $c_i, i \in [1..n_i]$  – 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 обмеженнями в формальних представленнях технологічних проблем використовуються такі основні характеристики:

1) ступінь релевантності (ступінь дійсності, ступінь валідності  $rd$  - relevancy degree) – характеризує міру повноти опису обмеженням технологічної проблеми;

2) ступінь задоволення ( $sd$  - satisfaction degree) – динамічна характе-

ристика етапу виконання або етапу аналізу точної технологічної проблеми. Значення  $sd = 1$  відповідає повному задоволенню обмежень, а значення  $sd = 0$  відповідає повному незадоволенню (порушенню) обмежень. 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 одиничними обмеженнями (відповідно з ваговими або оціночними значеннями), так і 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 або частково з певним ступенем задоволення  $sd$ .

На множині введених обмежень виконується побудова комплексних обмежень на основі об'єднання та перетину існуючих множин та систем обмежень, а також на основі кон'юнкції, диз'юнкції та заперечення одиничних обмежень. Обмеження згідно області застосування (рівня активності) поділяються на локальні, доменні та глобальні.

Таким чином, технологічна проблема  $TP$  розглядається як певна сутність предметної області, яка містить задачу, що вимагає розв'язку, який належить простору можливих рішень.

Ступінь релевантності обмеження  $s$  технологічній проблемі  $TP$  розглядається як міра відношення обмеження  $s$  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  $TP_i$  з множини  $\{TP_i\}_{i=1..n}$ , що описується власною множиною обмежень  $ConstrSet_i = \{c_i^j\}_{j=1..m}$ ,  $m, n \in \mathbb{N}$ , множина обмежень з введеним ступенем релевантності має вигляд  $\{ConstrSet_i = \{c_i^j : rd^j\}_{j=1..m}\}_{i=1..n}$ .

Ваговий коефіцієнт обмеження  $s$  подається 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 змінній. Найбільш зручним способом подання

вагових значень присвоєнь є їх використання як міток змінних. Множина обмежень з введеними коефіцієнтами має вигляд  $\{ConstrSet_i = \{c_i^j : cw^j\}_{j=1..m}\}_{i=1..n}$ .

Ймовірнісний коефіцієнт обмеження  $s$  подається мірою ймовірності 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 розв'язанні технологічної проблеми, а значення ймовірнісного коефіцієнта  $cpr = 0$  позначає абсолютну виключність задоволення (порушення) обмеження при рішенні технологічної проблеми. Множина обмежень з 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  $s$  подається 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 розв'язанні технологічної проблеми, а значення можливісного коефіцієнта  $cps = 0$  – абсолютну неможливість задоволення (порушення) обмеження при розв'язанні проблеми. Множина обмежень з введеними можливісними коефіцієнтами має вигляд  $\{ConstrSet_i = \{c_i^j : cps^j\}_{j=1..m}\}_{i=1..n}$ .

Обмеження  $s$  з оцінкою характеризується описом на основі оціночного значення  $evc$ ,  $evc \in [0;1]$ , яке є суб'єктивною оцінкою значущості обмеження, що вказується об'єктом підтримки прийняття рішень (ППР). Множина обмежень  $ConstrSet_i$  з введеними оціночними значеннями має вигляд  $\{ConstrSet_i = \{c_i^j : evc^j\}_{j=1..m}\}_{i=1..n}$ .

Обмеження  $s$  з преференціями характеризується описом на основі коефіцієнта преференції  $pfc$ ,  $pfc \in [0;1]$ , який є суб'єктивною оцінкою важливості (значущості) обмеження, на що вказується експертом нафтогазової предметної області. Множина обмежень  $ConstrSet_i$  з введеними преференціями 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”, “в більшості випадків”, “майже ніколи”,

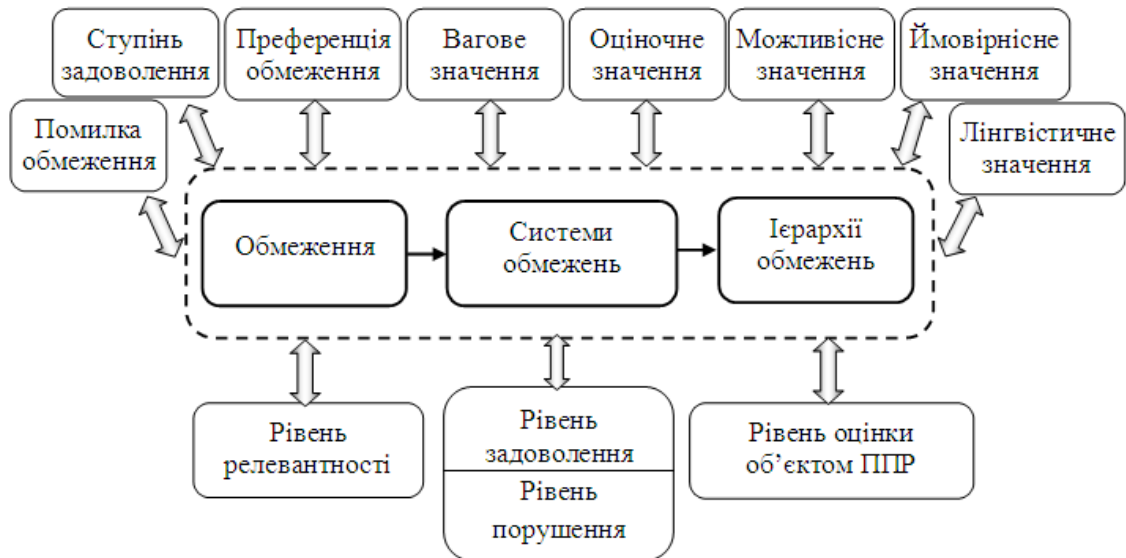


Рисунок 2 – Структура рівнів та атрибутів обмежень

“майже завжди”, “завжди”, “дуже часто”, “часто”, “середньо”, “рідко”, “дуже рідко”, “ніколи”, “невідомо” і т.п. Множина обмежень з введеними лінгвістичними значеннями має вигляд  $\{ ConstrSet_i = \{ c_i^j : lv^j \}_{j=1..m} \}_{i=1..n}$ .

Сумарна класифікаційна ієрархія видів обмежень зображена на рис. 2.

Функціональність інтелектуальної системи базується на контролі послідовності станів [8] в просторі проблеми (TPS - *TechnologicalProblemStates*):

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

де  $TPS_k$  – k-тий стан технологічної проблеми.

При розв'язанні 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:

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

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

$$ConstrHrch_{TP_i} = \bigcup_{j=1..j_{max}} ConstrSyst_{TP_j} = \bigcup_{k=1..k_{max}} ConstrSet_{TP_k} = \{ c_1 : fb_1, c_2 : fb_2 \dots c_n : fb_n \}_{k \in ON}$$

Сумарна модель домену 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 коефіцієнт релевантності або ваговий коефіцієнт або ймовірнісний коефіцієнт, або можливісний коефіцієнт, або коефіцієнт преференції. 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  $cf$ ):

$$SubmittedSolution[TPS_{k_1}]^{rc:cf_1} \text{ Ю}$$

$$\text{Ю } SubmittedSolution[TPS_{k_2}]^{sc:cf_2}$$

$$k_1 = k_2 \text{ à } k_1 < k_2, \text{ è } k_1 > k_2$$

$$TPS_{k_1}, TPS_{k_2} \in Class_{m_1}^E; k_1, k_2 \in [1..k_{max}], m_1 \in [1..m_{max}]$$

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

Таким чином, моделі доменів визначаються відповідними множинами обмежень:

$$DomainModel_{TPS_k} = \{ ConstrSet_k \}_{k \in [1..k_{max}]} = \{ if [rc_1 : cf_1] then [sc_1 : cf_1] \}_{l_1, l_2 \in ON}$$

Системи на основі обмежень оцінюють рішення запропонованих об'єктом ППР шляхом зіставлення їх з відповідною доменною моделлю:

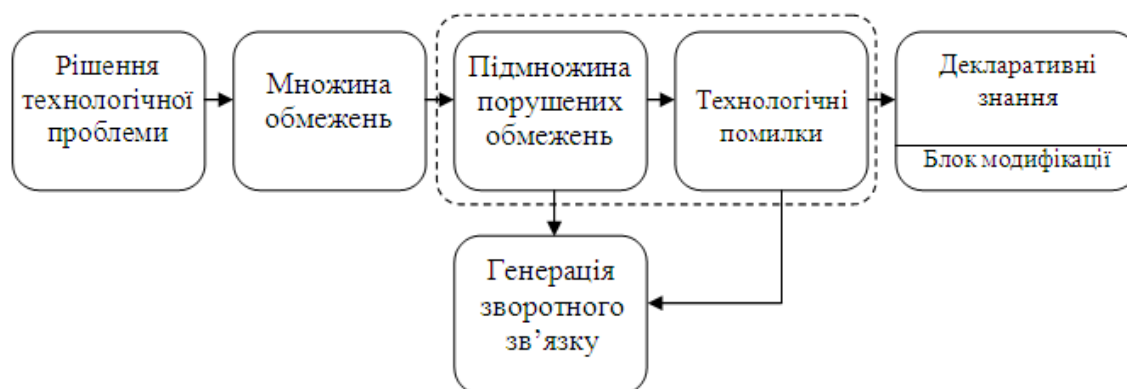


Рисунок 3 – Співвідношення між множиною помилок і множиною обмежень

$Match(SubmittedSolution, DomainModel) |_{ConstrSet}$ , що визначається накладеною множиною обмежень. Дана процедура виконується як послідовність ряду кроків:

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

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

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

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

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

1. реалізація функцій ППР у вигляді доменно та предметно незалежної інтелектуальної оболонки на основі інтерфейсної реалізації – інтерфейс надає користувачу інформацію про домен предметної області і, відповідно, виконується як доменнозалежна;

2. забезпечення підтримки рішення технологічних проблем засобами зворотного зв'язку із об'єктом ППР, що надає система;

3. підтримка рішення технологічних проблем шляхом ведення контекстозалежних та релевантних діалогів з користувачем.

Декларативні знання як необхідна складова організації процесу прийняття рішень уможливує виконання об'єктом ідентифікації помилок. Тому, якщо такі знання відсутні для певного домену предметної області або відповідно не є достатніми, то ідентифікація помилок об'єкта ППР буде ускладнюватись, оскільки об'єкт не зможе розрізнити хибні та релевантні знання і, відповідно, не здійснюватиме ефективну корекцію власних помилок (рис. 3).

Використання в АІСО систем обмежень для технологічних проблем дозволяє виконувати аналіз помилок, класифікувати їх та формувати відповідні коректуючі впливи зворотного зв'язку, що забезпечує ефективне та адекватне розширення множини декларативних знань об'єкта ППР. Як видно з рис.3, порушені обмеження (множина порушених обмежень) є джерелом генерації зворотного зв'язку, оскільки відповідні повідомлення зворотного зв'язку прив'язуються безпосередньо до обмежень, порушення яких вказує системі на необхідність включення даних повідомлень до діалогу зворотного зв'язку, що формується. Таким чином, механізм функціонування АІСО полягатиме в зіставленні рішень об'єкта ППР з множинами (системами, ієрархіями) обмежень, що описують поточну технологічну проблему та відповідно дозволяють виконувати оцінку рішення об'єкта ППР.

Кожному обмеженню присвоюється одне або кілька наперед визначених повідомлень зворотного зв'язку, які використовуються при формуванні діалогів зворотного зв'язку як основи коректуючих впливів системи при порушенні певних обмежень:

$$ConstrSet \otimes \{c_{i_1} : \{fb\}_{j_1}\}_{i_1=1,2,\dots,n_1, j_1=0,1,\dots,n_2, n_1, n_2 \in ON}$$

$$FeedBack \neg \{ \{c_k^y\}_{j_k}^{set} \}_{j_k}^{Syst.} \}_{i_k}^{Hrech.}, i, j, k \in ON$$

АІСО, як правило, забезпечують визначену кількість рівнів зворотного зв'язку. Найбільш живчими та ефективними рівнями є:

1. рівень I – зворотний зв'язок виду "так", "ні", "вірно", "хибно", "так:cf", "ні:cf", "вірно:cf", "хибно:cf", де  $cf \in [0..1]$ ,  $cf \otimes$  {релевантність, вагове значення, імовірнісне значення, можливісне значення, преференція} (рис. 4);

2. рівень II – використання методу прапорця помилок, для індикації місця виникнення помилки без виведення точного опису причини помилки;

3. рівень III – виведення повідомлення про суть виділеної помилки, що є наслідком порушення певного обмеження;

4. рівень IV – виведення частини правильного рішення;

5. рівень V – виведення в якості зворотного зв'язку повного правильного рішення;

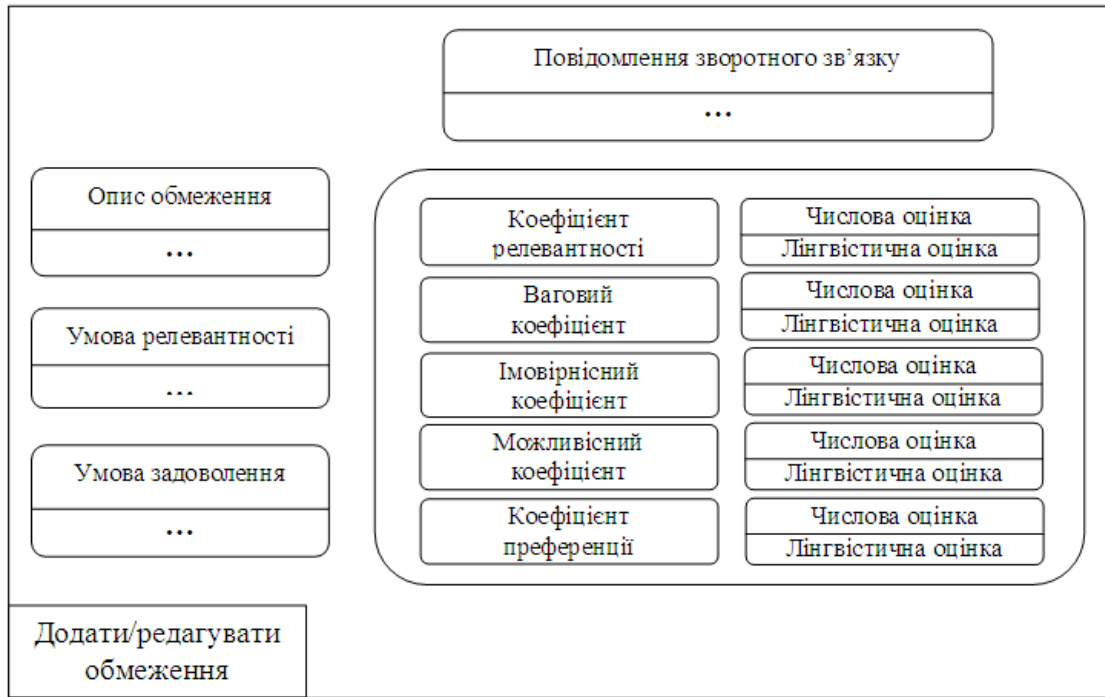


Рисунок 4 – Структура подання обмеження в АІСО

6. рівень VI – виведення в якості зворотного зв'язку всіх помилок поточної сесії роботи з системою;

7. рівень VII – візуалізація ієрархії помилок та візуалізація ієрархії порушених обмежень.

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

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

де  $k = [1..k_{max}]$ .

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

$$ConstrSyst_{TPS_k} : rd_{step}^k = (rd_{n_k}^k - rd_1^k) / n_k.$$

Обчислення зони найближчого розвитку об'єкта ППР (рівня експертної компетентності) для стану  $TPS_k$  виконується наступним чином. Нехай, стану  $TPS_k$  відповідає система обме-

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

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

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

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 обчислювальне значення з інтерпретацією мінімально достатньої зони найближчого розвитку об'єкта ППР:

$$ConstrSyst_{TPS_k}^{min} = \{c_1^k : rd_1^k, \dots, c_{i_3}^k : rd_{i_3}^k, \dots, c_{n_k}^k : rd_{n_k}^k\},$$

$$PDZ_{TPS_k}^{min} = \{ConstrSyst_{TPS_k} \setminus \{c_{i_3}^k : rd_{i_3}^k\}_{i_3=1..i_1-1}\} \text{ И}$$

$$\text{И} \{c_{i_4}^k : rd_{i_4}^k\}_{i_4=(i_1..n_k)}$$

$$\text{або } PDZ_{TPS_k}^{min} = \{c_{i_1-1}^k : rd_{i_1-1}^k\}, \neq c_{i_1}^k.$$

Значення  $PDZ_{TPS_k}^{min}$  обчислюється також на основі середнього кроку зміни переваги:

$$PDZ_{TPS_k}^{min} = \{c_m^k\}_{m \in [1..n_k]}, rd_m^k = rd_{i_1}^k + rd_{step}^k, \neq c_{i_1}^k.$$

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



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

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

Порядок на рівнях ієрархії визначається шляхом об'єднання відповідних множин

$$TP_{r_i} = \bigcup_{j=1..j_{max}} TP_j, \quad TP_{j_i} = \bigcup_{k=1..k_{max}} TPS_{k_i}.$$

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

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

де  $fb_i^{set}$  – множина повідомлень зворотного зв'язку, які прив'язані до обмеження  $c_i, 1 \leq i \leq n, 0 \leq n \leq n_1, n_1 \in ON$ .

Після введення впорядкування множини обмежень за ступенем релевантності до проблеми отримується система обмежень для  $k$ -того стану технологічної проблеми  $ConstrSyst_{TPS_k} = \{ConstrSet_{TPS_k} \cap rd\}_{rd \in [0..1]}$ , яка може також подаватися у вигляді:

$$ConstrSyst_{TPS_k} = \{c_1 : rd_1, c_2 : rd_2, \dots, c_l : rd_l\}_{lON},$$

де  $rd_i \in [0..1], i \in [1..l]$

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

$$FB_{TPS_k}^{max} = \bigcup_{k=1..l} fb_k^{set}, 1 \leq k \leq l, \text{ де } FB_{TPS_k}^{max} - \text{максимально}$$

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  $[ConstrSyst_{TPS_k}]^V \cap ConstrSyst_{TPS_k}$ . Тоді відповідно матимемо:

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

На рівні технологічної проблеми це означає що:

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

де  $FB_{TPS_{k_1}}^V \cap FB_{TPS_{k_1}}^{max}, k_1 = 1..k_{max}$ .

Відповідно на рівні технологічного процесу:

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

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

При формуванні бази знань в АІСО до кожного стану технологічної проблеми вказується

множина помилок, яка може виникнути при вирішенні даного стану технологічної проблеми:  $Err_k^{set} = \{err_1, err_2, \dots, err_n\}_{nON}$ . Помилки розглядаються як нештатні ситуації процесу буріння НГС, виникнення яких є наслідком порушення певних обмежень, їх множин та ієрархій:

$$\{[ConstrSet_k]^V \cap c_k\} \cup [Err_k^{set} \cap c_k].$$

При внесенні помилок в базу знань вказуються їх вагові коефіцієнти ( $ew$  - error weight). Введення відношення впорядкування на множині помилок дозволяє отримати систему помилок:

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

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

Відповідним чином отримується ієрархія 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:

$$TPS_k : Err_k^{Syst.} \otimes ConstrSyst_k, \begin{cases} \{err_1, err_2, \dots, err_{n_1}\} \\ \{c_1, c_2, \dots, c_{n_2}\} \end{cases},$$

де  $n_1, n_2 \in ON$ .

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

$$\begin{cases} \{err_1 : \{c_1 : rd_1^{err_1}, c_2 : rd_2^{err_1} \dots c_{n_2} : rd_{n_2}^{err_1}\} \\ \dots \\ \{err_{n_1} : \{c_1 : rd_1^{err_{n_1}}, c_2 : rd_2^{err_{n_1}} \dots c_{n_2} : rd_{n_2}^{err_{n_1}}\} \end{cases}.$$

Статичною технологічною проблемою на основі обмежень вважається кортеж:

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

де:  $Err_{TP_j}^{Hrch.}$  – ієрархія помилок до технологічної проблеми,  $TPS_k$  –  $k$ -тий стан технологічної проблеми,  $ConstrHrch_{TP_j} = \bigcup_{k=1..k_{max}} ConstrSyst_k$  – ієрархія обмежень  $j$ -тої технологічної проблеми,  $ConstrSyst_k$  – система обмежень для  $k$ -того стану.

В режимі функціонування АІСО, при вирішенні технологічних проблем, кожне з обмежень у відповідній системі обмежень задовольняється або порушується при умові, що всі обмеження в системі є релевантними. Тому для кожної системи обмежень в режимі функціонування отримуються відповідні підмножини задоволених та порушених обмежень:

$$[ConstrSet_k]^S = \{c_1, c_2, \dots, c_{m_k}\}_{m_k ON},$$

$$[ConstrSet_k]^V = \{c_1, c_2, \dots, c_{n_k}\}_{n_k ON}.$$

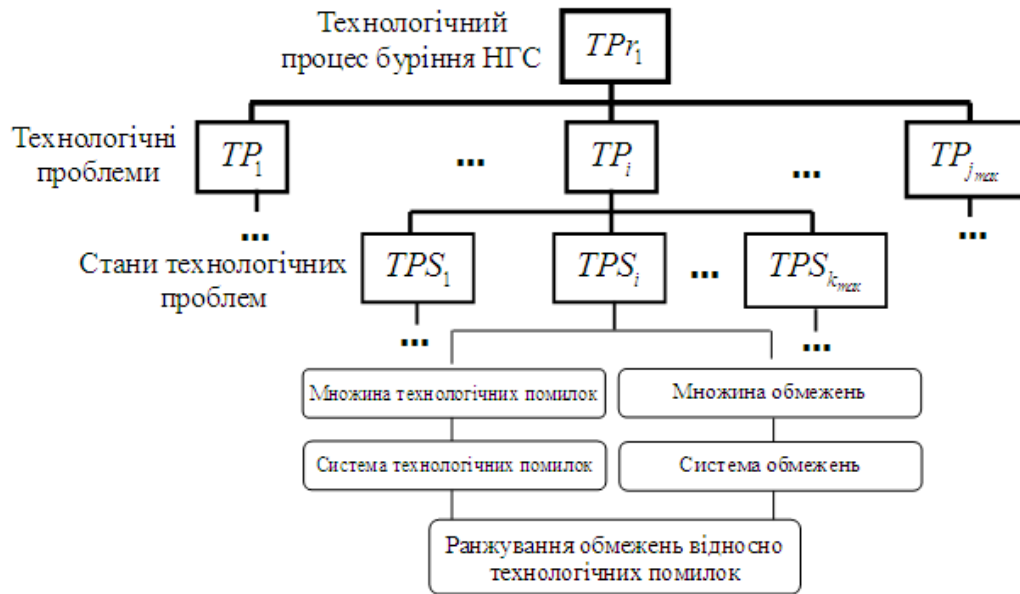


Рисунок 5 – Деревоподібна структура технологічних проблем

Застосування впорядкування  $rd$  дозволяє утворити відповідні системи задоволених та порушених обмежень:

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

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

де  $rd_i \in \{rd_{i_j}\}_{j=1..l}, t \in O[1..m_k]$ .

Динамічна технологічна проблема на основі обмежень представляється як кортеж:

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

де:  $Err_{TP_j}^{Hrch}$  – ієрархія помилок до технологічної проблеми,

$TPS_k$  –  $k$ -тий стан технологічної проблеми,

$$[ConstrHrch_j]^S = \bigcup_{k=1..k_{max}} [ConstrSyst_k]^S$$

– ієрархія задоволених обмежень для  $j$ -тої технологічної проблеми;  $[ConstrSyst_k]^S$  – система задоволених обмежень для  $k$ -того стану;

$[ConstrHrch_j]^V = \bigcup_{k=1..k_{max}} [ConstrSyst_k]^V$  – ієрархія порушених обмежень для  $j$ -тої технологічної проблеми;  $[ConstrSyst_k]^V$  – система порушених обмежень для  $k$ -того стану.

При вирішенні стану технологічної проблеми  $TPS_k$  виникає певна кількість помилок, яка відповідає кортежу  $(err_1, err_2, \dots, err_{k_1})$ , де  $k_1 \in O[0..n]$ ,  $n$  – кількість елементів в  $Err_k^{Syst}$ .

Пропоноване рішення об'єктом ППР  $SubmittedSolution$  оцінюється АІСО з точки зору набору помилок, що міститься в даному рішенні:

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

Введена структура технологічної проблеми на основі обмежень інтерпретується графічно в деревовидній формі (рис. 5).

Створення автоматизованої інтелектуальної системи запобігання виникненню нештатних ситуацій в процесі буріння НГС вимагає подання знань нафтогазової предметної області у вигляді множини обмежень станів технологічних проблем. На формальному рівні розроблена АІСО базується на моделюванні на основі обмежень, тобто підходу, який використовує множину модульних правил для опису процесу буріння НГС. Реалізована АІСО проводить діагностування рішень технологічної проблеми (нештатної ситуації в бурінні) запропонованої об'єктом підтримки прийняття рішень 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 АІСО здійснюється синхронний пошук за допомогою введених ключових слів і висвітлюються релевантні помилки.

Розроблена АІСО є програмним продуктом, призначеним для інтелектуальної підтримки процесу прийняття рішень персоналу нафтогазовидобувної галузі. Для спроектованої системи розроблено профіль – "Запобігання нештатних ситуацій при бурінні НГС", який створений на основі аналізу досвіду професійної діяльності експертів буріння нафти і газу. Таким чином, створена система дозволяє виконувати накопичення знань, умінь та навичок професійної та виробничої діяльності, організувати підтримку прийняття рішень на основі інтелектуальних методів.

Створена система має наступні особливості:

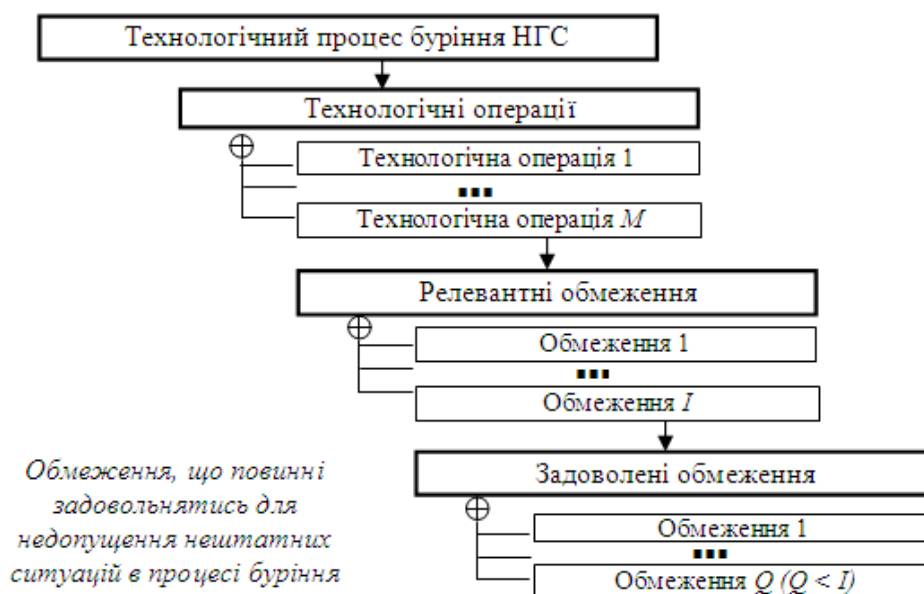


Рисунок 6 – Алгоритмічна схема структуризації технологічного процесу буріння на основі обмежень

1) використання множин, систем та ієрархій обмежень для моделювання інтелектуальних функцій системи;

2) введення правил для оперування з множинами, системами та ієрархіями обмежень;

3) використання методики та структури архітектурних рішень експертних систем, які в якості цілей отримують описи технологічних помилок, що є результатом неправильних дій об'єкта ППР;

4) побудова ієрархії контенту матеріалу про процес буріння;

5) побудова бази знань системи з таких складових, як помилки, обмеження та правила. Множина всіх обмежень в базі знань розглядається як об'єднання множин обмежень, систем обмежень та ієрархій обмежень:

$$Constraints^{set} = \{ Constr_i^{set} \}_{i \in ON} \text{ И}$$

$$\text{И} \{ Constr_j^{syst.} \}_{j \in ON} \text{ И} \{ Constr_k^{Hrch.} \}_{k \in ON};$$

6) реалізація архітектури системи у вигляді предметно незалежної оболонки на зразок технологічної оболонки експертних систем.

Фахівці-експерти предметної області наповнюють базу знань системи по деревовидній вкладеній структурі, що відображає технологічний процес, технологічні проблеми пов'язані з ним, а також стани поточної технологічної проблеми. На технологічні проблеми і стани технологічних проблем накладаються обмеження, а до сформованих обмежень додають типові технологічні помилки, характерні для даного процесу. Аналіз досвіду виробничої галузі показав, що причиною виникнення нештатної технологічної ситуації є результат порушення певних технологічних обмежень або множини таких обмежень. Введення множини технологічних обмежень дозволило виконати їх ранжування за ступенем релевантності до нештатних технологічних ситуацій. Відповідно виконання

необхідних технологічних дій щодо усунення нештатної технологічної операції інтерпретується як процес задоволення певної множини обмежень (системи, ієрархії). Введена множина технологічних обмежень дозволяє виконати ранжування за ступенем релевантності до нештатних технологічних ситуацій.

Архітектурне рішення для об'єкта ППР побудовано в формі системи взаємозв'язаних списків, елементами яких є технологічні процеси, технологічні операції, обмеження та помилки. Також виконана побудова списків нештатних ситуацій, дій для 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.

Кожна нештатна технологічна ситуація матиме свій список обмежень (множину, систему, ієрархію). Відповідні обмеження будуть релевантними до певних технологічних операцій на нижньому рівні і до процесів на верхньому рівні.

Робота АІСО пов'язана з обробкою помилок. В проєктованій системі ми виділяємо 4 типи помилок:

1. Помилки користувача (об'єкта ППР) – *UserErrors* розглядається системою як наслідок процесу задоволення обмежень при розв'язанні технологічних проблем, що пропонується системою. Очевидно, що множина всіх помилок користувача визначатиметься за формулою

$$UserErrors^{Set} = IdealSolution^{Set} \setminus SubmittedSolution^{Set},$$

де: *IdealSolution<sup>Set</sup>* – множина ідеальних рішень технологічних проблем,

*SubmittedSolution* – множина рішень запропонованих об'єктом ППР. Помилки користувача система обробляє наступним чином:

– Ранжування помилок за значущістю, для чого виконується побудова ранжованої множини помилок об'єкта ППР  $RangedUserErrors^{Set}$ , елементами якої є індексовані помилки користувача з присвоєними ваговими коефіцієнтами:

$$RangedUserErrors^{Set} = \{UserError_i : ErrorWeight_i\}_{i \in ON},$$

$$ErrorWeight_i \in [0;1].$$

– Виконання системою ранжування помилок користувача дозволяє більш точну підтримку профілю користувача. Очевидно, що для деякого обмеження  $c_i$  вагове значення помилки, пов'язане з його задоволенням, визначатиметься формулою:  $ErrorWeight_i^{c_i} = 1 - SD^{c_i}$ , де  $SD$  – ступінь задоволення обмеження  $SD \in [0;1]$ . Крім вагових коефіцієнтів помилок система використовує оціночні значення для помилок  $ErrEv_i \in [0;1]$ , які є значенням, що задаються користувачем після завершення сеансу роботи з системою. Система використовує такі оціночні значення для аналізу поточного профілю користувача і його відповідність зоні найближчого розвитку об'єкта ППР. Оцінка користувачем власних помилок звичайно є суб'єктивною, і система може виконувати порівняння оціночних значень  $ErrEv_i$  та вагових значень  $ErrorWeight_i$ , що містяться в базі знань системи.

2. Помилки обмежень  $C\_Errors$ . При описі технологічної проблеми  $TP$  користувач задає деяку множину обмежень  $C^{TP} = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ . При цьому кожному обмеженню  $c_i$  експерт задає деяке вагове значення  $RD_i$ , що виражає ступінь релевантності обмеження технологічній проблемі. Оскільки дане значення є суб'єктивним значенням, внесеним експертом, то позначатимемо його через  $RD^{exp}$ . Проте після завершення сеансу роботи система зможе оцінити кожне обмеження з точки зору його фактичної релевантності, що дозволить перейти від початкових експертних оцінок релевантності множини обмежень до множини їх фактичних значень:

$$C_{exp}^{LP} = \{C_i : RD_i^{exp}\}_{i=1..n, n \in ON} \textcircled{R}$$

$$\textcircled{R} C_{fact.}^{TP} = \{C_i : RD_i^{fact.}\}_{i=1..n, n \in ON},$$

тому помилку обмеження визначимо як  $C_i^{Err} = |RD_{C_i}^{exp} - RD_{C_i}^{fact.}|$ .

3. Систему обмежень  $CS$  будемо вважати множиною обмежень  $C_i$  з введеним впорядкуванням за помилками обмежень  $CS = (C_i)_{c_{Err}}$ . Помилки системи обмежень  $CS\_Errors$  розглядається як залежна характеристика на множині помилок обмежень.

4. Ієрархію обмежень будемо розглядати як багаторівневу формальну структуру, на кожному рівні якої знаходиться певна систем обмежень

$$CH = \{Lev_i\{CS_j\}_{j=1..n_i}\}_{i=1..n_2; n_1, n_2 \in ON},$$

де  $Lev_i$  –  $i$ -тий рівень ієрархії  $CH$ .

Помилки ієрархії обмежень  $CH\_Errors$  розглядатимемо як залежну характеристику від помилок систем обмежень на множині рівнів ієрархії.

Модуль отримання зворотного зв'язку дозволяє отримати інформацію про порушені обмеження в порядку рівня релевантності до введеної помилки:

$$CurrentError \textcircled{R} C^{viol.} (c_1, c_2, \dots, c_n)_{n \in ON},$$

де  $RD^{Err}$  – рівень релевантності відповідного обмеження помилці, тобто кожне обмеження має певний рівень релевантності, а множина є впорядкованою:

$$(c_1 : RD_1^{Err}, c_2 : RD_2^{Err}, \dots, c_n : RD_n^{Err});$$

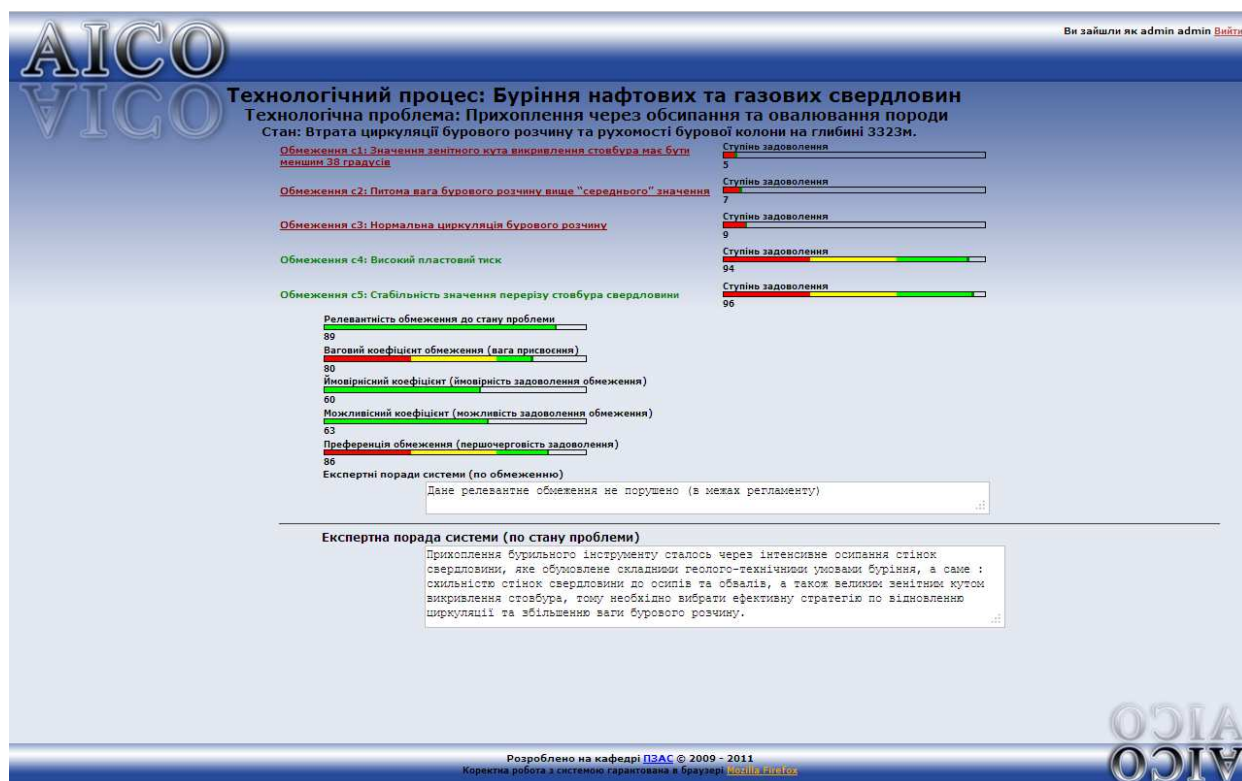
$$((RD_1^{Err}, RD_2^{Err}, \dots, RD_n^{Err})_{i, RD^{Err}}).$$

При введенні помилки задається також її ваговий (преференційний) коефіцієнт. Основними структурними одиницями для наповнення системи є технологічні процеси, технологічні проблеми, технологічні обмеження, типові технологічні помилки, експертні поради. Модуль додавання технологічного процесу містить три пункти: технологічний процес, технологічна проблема, стан технологічної проблеми. Для кожного вибору забезпечено додавання, видалення, коректування та вибір існуючих даних.

Експертні поради генеруються для різного рівня знань об'єктів ППР, починаючи з найнижчого – деталізований опис виходу з нештатної технологічної ситуації, спосіб переведення нештатної технологічної ситуації в штатну, яка може скластися у випадку порушення даного обмеження і до найвищого – в якому тільки вказується на те, в чому полягає проблема (без деталізованого опису).

Створена система дає можливість контролювати помилки об'єкта ППР при вирішенні технологічних проблем, здійснювати пошук в базі знань та формувати множини порушених обмежень, що призводять до виникнення даних помилок та, відповідно, логічно обґрунтованої генерації експертних порад, що базуються на характеристиках адекватності та релевантності обмежень, накладених на технологічний процес буріння НГС.

**Висновки.** Обґрунтовано та реалізовано технологію інтелектуального 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 за ступенем релевантності, що дозволяє, на відміну від існуючих інтелектуальних систем, ідентифікувати нештатну ситуацію технологічного процесу як наслідок порушення контролюваними технологічними параметрами накладених множин, систем та ієрархій обмежень. Запропоновано формаль-



**Рисунок 7 – Функціональність розробленої інтелектуальної системи в режимі контролю задоволення та порушення технологічних обмежень**

но-логічний підхід до моделювання технологічного процесу буріння на основі контролю множини помилок, у межах якого коректні рішення (дії операторів технологічного процесу) розглядаються як такі, що не порушують технологічних обмежень, накладених на процес. Розроблено технологію контролю процесу рішення нештатних технологічних ситуацій, що виникають в процесі буріння нафтових та газових свердловин, засобами автоматизованої інтелектуальної системи на основі обмежень, що дає змогу класифікувати та аналізувати помилки шляхом зіставлення поточного технологічного рішення з закладеними в системі ієрархіями обмежень, що регулюється діалогами зворотного зв'язку.

### Література

- Семенцов Г.Н. Автоматизація процесу буріння свердловин: навч. посібник / Г.Н.Семенцов. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 1997. – 300 с.
- Семенцов Г.Н. Автоматизації технологічних процесів у нафтовій і газовій промисловості: навчальний посібник / Г.Н.Семенцов, Я.Р.Когуч, Я.В.Куровець, М.М.Дранчук. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2009. – 300 с.
- Горбійчук М.І. Оптимізація процесу буріння глибоких свердловин: [навч.посібник] / М.І.Горбійчук, Г.Н.Семенцов. – Івано-Франківськ: Факел, 2003. – 493 с.
- Шавранський М.В. Система контролю для запобігання прихопленню 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.

5 Галли І.М. Оптимізація нагрузки і швидкості вращення для буров вращательного типа, предназначеных для бурения горных пород / И.М.Галли, Г.Б.Вудс // API Drilling and Production Practice, 1963. – P.48-73.

6 Ясов В.Г. Осложнения и аварии при бурении нефтяных и газовых скважин: [учебное пособие] / В.Г.Ясов. – Івано-Франковск: ІФДТУНГ, 2004. – 207 с.

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. 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.

Стаття надійшла до редакційної колегії  
 23.11.11  
 Рекомендована до друку професором  
**Р. А. Мельником**