

МЕТОДИКА РЕАЛІЗАЦІЇ КОНТРОЛЮ РІШЕНЬ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОБЛЕМ ПРОЦЕСУ БУРІННЯ В ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІЙ СИСТЕМІ**Р. Б. Вовк**Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, Україна. E-mail: wolf@wolf.if.ua

Представлена формальна модель структури та функціональності технологічних проблем на основі обмежень, що зводиться до сукупності правил виду: якщо умова релевантності з коефіцієнтом впевненості тоді умова задоволення з коефіцієнтом впевненості. Такий підхід дозволяє представляти процес прийняття технологічних рішень як послідовність кроків із виділенням шаблонів умов релевантності і шаблонів умов задоволення, співставлення шаблонів умов релевантності і шаблонів умов задоволення; співставлення шаблонів релевантності із відповідним станом проблеми; перевірка умови задоволення релевантних обмежень; перевірка задоволеності (порушення) обмеження, шляхом співставлення шаблону його умови задоволення стану проблеми. Запропоновано формально-логічний підхід до моделювання технологічного процесу буріння нафтових і газових свердловин на основі контролю множини потенційних помилок оператора.

Ключові слова: прийняття рішень, технологічна проблема, обмеження, помилка, процес буріння.**МЕТОДИКА РЕАЛІЗАЦІЇ КОНТРОЛЮ РЕШЕНИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ ПРОЦЕССА БУРЕНИЯ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ****Р. Б. Вовк**Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
ул. Карпатская, 15, г. Ивано-Франковск, 76019, Украина. E-mail: wolf@wolf.if.ua

Представлена формальная модель структуры и функциональности технологических проблем на основе ограничений, которая сводится к совокупности правил вида: если условие релевантности с коэффициентом уверенности тогда условие удовлетворения с коэффициентом уверенности. Такой подход позволяет представлять процесс принятия технологических решений как последовательность шагов с выделением шаблонов условий релевантности и шаблонов условий удовлетворения, сопоставление шаблонов условий релевантности и шаблонов условий удовлетворения; сопоставления шаблонов релевантности с соответствующим состоянием проблемы; проверка условия удовлетворения релевантных ограничений; проверка удовлетворенности (нарушение) ограничения, путем сопоставления шаблона его условия удовлетворения состояния проблемы. Предложено формально-логический подход к моделированию технологического процесса бурения нефтяных и газовых скважин на основе контроля множества потенциальных ошибок оператора.

Ключевые слова: принятия решений, технологическая проблема, ограничения, ошибка, процесс бурения.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Буріння нафтових і газових свердловин (НГС) як об'єкт керування у загальному випадку є складним нестационарним технологічним процесом, що розвивається в часі і супроводжується виникненням нештатних аварійних ситуацій, 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 НГС 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. В ході аналізу виконано дослідження процесу буріння нафтових та газових свердловин, проаналізовано сучасні вітчизняні та зарубі-

жні розробки в області автоматизованих інтелектуальних систем та визначено особливості контролю та автоматизації процесів керування бурінням. Проблема 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 методики контролю технологічних проблем процесу буріння в розумінні ширшому за аварійні та нештатні ситуації, оскільки інтелектуальна система підтримки прийняття рішень повинна забезпечувати достатню функціональність на усіх етапах перебігу технологічного процесу, в той час як існуючі системи напрямлені виключно на попередження аварійних ситуацій.

Таким чином, метою даної статті є побудова формально обґрунтованої методології для механізму контролю пошуку рішень технологічних проблем в процесі буріння НГС на основі концепції представлення та задоволення обмежень, що описують потенційні технологічні помилки оператора.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Як показує ряд досліджень [5–7] система інтелектуальної підтримки прийняття рішень (СІППР) дозволяє

реалізувати ряд суттєвих переваг прийняття рішень при бурінні НГС. Виконання даної задачі включає:

1. Визначення об'єкта підтримки прийняття рішень (ППР) (оператора технологічного процесу буріння НГС).
2. Аналіз та діагностику дій об'єкта ППР.
3. Створення та оновлення моделі об'єкта ППР.
4. Коректну генерацію повідомлень зворотного зв'язку.
5. Ведення інтелектуальних діалогів системи з об'єктом ППР.

Таким чином, основне завдання проекрованої системи інтелектуальної підтримки прийняття рішень на основі обмежень (СППРО) полягає в створенні середовища підтримки об'єкта ППР при вирішенні ним технологічних проблем, що виникають в процесі буріння на основі інтелектуальних засобів виявлення помилок і генерації зворотного зв'язку.

Основним джерелом помилок є невідповідність між множиною декларативних та процедурних знань, що представлено на рис. 1.

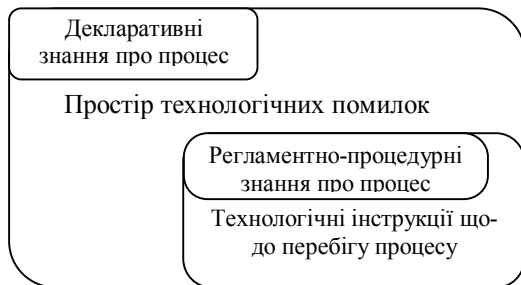


Рисунок 1 – Структура формування знань об'єкту ППР

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

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

$$Error \Rightarrow \{ProceduralKnowledges^{set}\} \cup \{ \{Rule^{viol}\} \text{ or } \{Rules_{set}^{viol}\} \}$$

Ідентифікація технологічних помилок дозволяє використовувати зворотний зв'язок для здійснення адекватних поточних, короткотривалих, довготривалих коректуючих впливів на основі виділення хибних (помилкових) знань про процес буріння в контексті аналізу помилок (рис. 2).

Моделювання на основі обмежень [8, 9] є підходом до моделювання об'єкта ППР, що базується на теорії вивчення технологічного процесу на основі помилок.

Основа даного підходу полягає в тому, що всі коректні рішення проблеми розглядаються як схожі (подібні). Їх схожість полягає в тому, що вони не порушують жодне обмеження в накладеній на домен множині обмежень $ConstrSet$. У даному підході розглядаються можливі послідовності станів в просторі проблеми (TPS - *TechnologicalProblem States*):

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

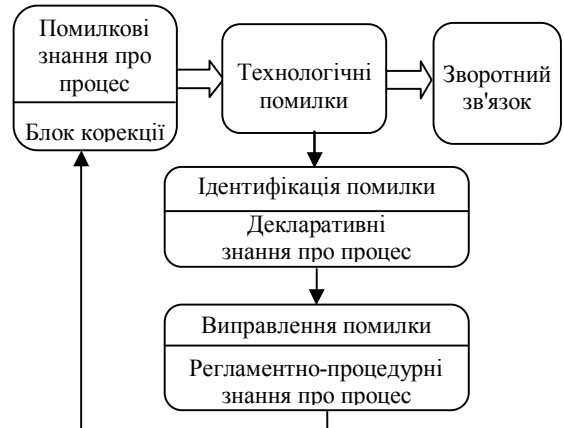


Рисунок 2 – Структура розпізнавання та виправлення помилок в СППРО

Виконуючи рішення технологічної проблеми [10], об'єкт ППР переміщується за певною послідовністю станів із множини можливих і кожного моменту часу знаходиться в певному виділеному стані. Накладання множини обмежень дозволяє виділити класи еквівалентностей для множини станів проблеми. В межах даного класу система використовує одну і ту саму структуру та наповнення зворотного зв'язку, тому всі стани проблеми в межах класу еквівалентності розглядаються як тотожні з точки зору формування процедури зворотного зв'язку:

$$\{Class_m^E\}_{m=1..m_{max}} ;$$

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

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

$$ConstrHrch_{TPF_j} = \bigcup_{j=1..j_{max}} ConstrSyst_{TPF_j} = \bigcup_{k=1..k_{max}} ConstrSet_{TPS_k} = \{c_1 : fb_1, \dots, c_n : fb_n\}_{k, n \in N}$$

Таким чином, модель домену можна розглядати як сукупність (множину) 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 переваги. У випадку $cf_1 = cf_2 = 1$ матимемо класичну інтерпретацію моделі домену в термінах абсолютної істинності та хибності.

Таким чином, якщо рішення запропоноване об'єктом ППР відноситься до стану проблеми, ви-

значеного умовою релевантності (абсолютно або з певним коефіцієнтом cf), то воно буде коректним (абсолютно або з певним коефіцієнтом cf) якщо воно також знаходиться в стані, що визначається умовою задоволення (абсолютно або з певним коефіцієнтом cf):

$$\begin{aligned} SubmittedSolution[TPS_{k_1}]^{rc:cf_1} &\Rightarrow \\ \Rightarrow SubmittedSolution[TPS_{k_2}]^{sc:cf_2}, & \\ k_1 = k_2 \text{ or } k_1 < k_2, \text{ iff } TPS_{k_1}, TPS_{k_2} \in Class_{m_1}^E; & \\ k_1, k_2 \in [1..k_{max}], m_1 \in [1..m_{max}] & \end{aligned}$$

де $rc:cf_1$ – умова релевантності, $sc:cf_2$ – умова задоволення.

Таким чином, моделі доменів визначатимуться відповідними множинами обмежень:

$$\begin{aligned} DomainModel_{TPS_k} &= \{ConstrSet_k\}_{k \in [1..k_{max}]} = \\ &= \{if[rc_i:cf_i] then [sc_i:cf_i]\}_{i, i_1, i_2 \in N}. \end{aligned}$$

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

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

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

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

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

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

На основі введених представлень виконується побудова поточної, короткотривалої та довготривалої моделей об'єкта ППР.

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

1. Реалізація функцій ППР у вигляді доменно та предметно незалежної інтелектуальної оболонки на основі інтерфейсної реалізації. Інтерфейс надає користувачу інформацію про домен предметної області і відповідно виконується як доменно залежний.

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

3. Підтримка рішення технологічних проблем на основі ведення контекстно залежних і релевантних діалогів із користувачем.

Декларативні знання є необхідною складовою організації процесу прийняття рішень, оскільки дозволяють об'єкту виконувати ідентифікацію помилок. Тому, якщо такі знання відсутні для певного домену предметної області або відповідно не є достатніми, то ідентифікація помилок об'єкту ППР буде ускладнюватись, оскільки об'єкт не зможе розрізняти хибні та релевантні знання і відповідно здійснювати ефективну корекцію власних помилок (рис. 3).

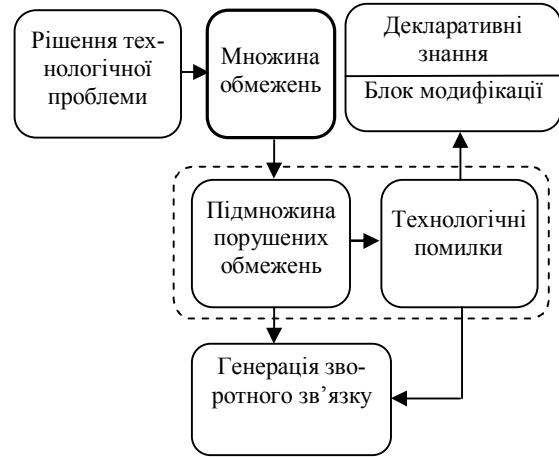


Рисунок 3 – Співвідношення множини помилок і множини обмежень

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 в діалог зворотного зв'язку, що формується. Таким чином, механізм функціонування СИПРО полягатиме в співставленні рішень об'єкта ППР із множинами (системами, ієрархіями) обмежень, що описують поточну технологічну проблему та відповідно дозволяють виконувати оцінку рішення об'єкта ППР.

Нехай маємо технологічну проблему TP_i із заданою кількістю станів TPS_k . Ініціалізована ієрархія обмежень ($CH^1 = ConstrHrch$) та відповідні системи обмежень ($CS^1 = ConstrSyst$) для технологічної проблеми, в даному випадку матиме вигляд:

$$CH_{TP_i}^1 = \left\{ \begin{array}{l} CS_{TPS_1}^1 = \{c_1^1 : rd_{1,1}^1 \xleftarrow{rd} \dots c_{n_1}^1 : rd_{n_1}^1\} \\ CS_{TPS_2}^1 = \{c_1^2 : rd_{1,1}^2 \xleftarrow{rd} \dots c_{n_2}^2 : rd_{n_2}^2\} \\ \dots \\ CS_{TPS_k}^1 = \{c_1^k : rd_{1,1}^k \xleftarrow{rd} \dots c_{n_k}^k : rd_{n_k}^k\} \\ \dots \\ CS_{TPS_{k_{max}}}^1 = \{c_1^{k_{max}} : rd_{1,1}^{k_{max}} \xleftarrow{rd} \dots c_{n_{k_{max}}}^{k_{max}} : rd_{n_{k_{max}}}^{k_{max}}\} \end{array} \right. ,$$

де $k = [1..k_{max}]$.

Відповідно до кожної системи обмежень можна обчислити середнє значення преференцій обмежень

$$rd_k = (rd_1^k + rd_2^k + \dots + rd_{n_k}^k) / n_k.$$

Середній крок зміни преференцій для системи обмежень $ConstrSyst_{TPS_k}$ визначатиметься формулою

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

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

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

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

де n_k – кількість обмежень в системі $ConstrSyst_{TPS_k}$, PDZ – зона найближчого розвитку об'єкта ППР.

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

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 в процесі буріння НГС) [11]:

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

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):

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

На етапі формування бази знань кожна технологічна проблема розглядається як деяка скінчена 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 $c_i, 1 \leq i \leq n$,

$$0 \leq \# fb_i^{set} \leq n_1, n_1 \in N.$$

Після введення впорядкування множини обмежень по ступеню релевантності до проблеми отримуємо 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:

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

де $rd_{i_1} \in [0..1], i_1 \in [0..l]$.

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

$$1. FB_{TPS_k}^{max} = \bigcup_{k=1..l} fb_k^{set}, 1 \leq k \leq l, \text{ де } FB_{TPS_k}^{max} \text{ – максимально можливий потік зворотного зв'язку для стану } TPS_k$$

(тобто для граничного випадку, що відповідає порушенню всіх обмежень в системі). Проте, очевидно що буде порушуватись тільки деяка підмножина обмежень $[ConstrSyst_{TPS_k}]^V \subseteq ConstrSyst_{TPS_k}$.

Тоді відповідно матимемо:

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

На рівні технологічної проблеми відповідно матимемо:

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

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

На рівні технологічного процесу:

$$FB_{TPr_{i_1}}^{max} = \bigcup_{j=1..j_{max}} FB_{TP_j}^{max}, FB_{TPr_{i_1}}^V = \bigcup_{j=1..j_{max}} FB_{TP_j}^V,$$

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

Пошук ефективних та оптимальних присвоєнь в деякому вузькому домені формальних формулювань не гарантує отримання послідовного рішення в домені фактичних формулювань технологічної проблеми TPF . Введемо формалізацію процесу присвоєння з максимальною ймовірністю в домені $TPF : Sol(TPF) \approx (\psi^{pos.})_{max} \in \Psi_{Err_{TP_j}^{Hrch.}}$.

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

Під ймовірністю того, що ψ є розв'язком для $TPF = (Err_{TP_j}^{Hrch.}, Err_{TP_j}^{Domain}, ConstrHrch_{TP_j}^R, ConstrHrch_{TP_j}^{unR})$ будемо розуміти ймовірність того, що обмеження які порушуються понад встановлену нижню грани-

цю $bound^{viol}$. необхідно належать множині нерелевантних обмежень:

$$dist^{\#} \left(\left[ConstrHrch_{TP_j}^R \right]^V, ConstrHrch_{TP_j}^{unR} \right) < \#set^{bound^{viol}}.$$

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

Рішенням ймовірнісної технологічної проблеми з накладеними обмеженнями TP_j^{Prb} є присвоєння ψ^* з максимальним значенням ймовірності того, що воно є рішенням фактичної технологічної проблеми TPF .

Якщо розглянути $TP_j^* = (Err_{TP_j}^{Hrch}, Err_{TP_j}^{Domain}, \{c_i^r \in \bigcup_{k=1..k_{max}} [ConstrSyst_{TP_j, TPS_k}^R = (c_1^r : l_1^{set^r}, \dots, c_{n_k}^r : l_{n_k}^{set^r})\}_k)$ при умові, що $\psi^* \models c_i^r$ то присвоєння ψ^* може інтерпретуватися як розв'язок однієї з максимально послідовних підпроблем $TP_j^{Sub} \subset TP_j^*$. З другого боку присвоєння ψ^* можна розглядати як рішення всієї множини підпроблем: $\{TP_j^{Sub_{\lambda}}\} \subseteq TP_j^*$. Що стосується фактичного формулювання технологічної проблеми, то в даному випадку його можна розглядати як відповідник однієї із підпроблем:

$$\left[Prb \left(TPF = \left\{ TP_j^{Sub_{\lambda}} \right\}_{\lambda=1..j_{max}^{sub}} \right) \subseteq TP_j^* \right] \neq Prb(TPF = TP_j^*).$$

Можливісною технологічною проблемою на основі обмежень TP_j^{μ} будемо вважати структуру:

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

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

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

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

$$\begin{aligned} TP_j &\rightarrow ConstrHrch_{TP_j}^R = \bigcup_{k=1..k_{max}} ConstrSyst_{TP_j, TPS_k}^R = \\ &= \bigcup_{k=1..k_{max}} \left(c_1^r : l_1^{set^r}, \dots, c_{n_k}^r : l_{n_k}^{set^r} \right) \end{aligned}$$

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

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

Відповідно дані субієрархії представлятимуться:

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

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

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

$$\begin{aligned} ConstrHrch_{TP_j}^S &\subseteq ConstrHrch_{TP_j}^S, \quad ConstrHrch_{TP_j}^V \subseteq \\ &\subseteq ConstrHrch_{TP_j}^V. \end{aligned}$$

Відповідно

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

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

З усієї множини міток l_i^{set} виведемо деяку універсальну мітку яку будемо вважати вагою обмеження (cw) і вимірювати її значеннями діапазону $[0..1]$. Таким чином, побудова оцінок для систем обмежень $(c_1^s : l_1^{set^s}, \dots, c_{n_k^s}^s : l_{n_k^s}^{set^s})$ і $(c_1^v : l_1^{set^v}, \dots, c_{n_k^v}^v : l_{n_k^v}^{set^v})$ зводиться до сумаризації вагових коефіцієнтів обмежень з відповідних систем на відповідних станах технологічної проблеми. Виходитимемо з того, що системи (множини) обмежень на відповідних рівнях фактичного рішення $Sol(TP_j)$ є повними або частковими переборами відповідних систем (множин) обмежень для *ідеального очікуваного рішення* $Sol^{ideal}(TP_j)$. Таким чином, можемо отримати наступні види оцінок:

1. Сумарна вагова оцінка по задоволених обмеженнях для проблеми TP_j :

$$Satisfied(TP_j) = \sum_{k=1}^{k_{max}} \sum_{m_1=1}^{n_k^s} (c_{m_1}^s : cw_{m_1}^s);$$

2. Сумарна вагова оцінка по порушених обмеженнях для проблеми TP_j :

$$violated(TP_j) = \sum_{k=1}^{k_{max}} \sum_{m_2=1}^{n_k^v} (c_{m_2}^v : cw_{m_2}^v);$$

3. Різниця по задоволених обмеженнях по відношенню до ідеального рішення:

$$dist(Sol^{ideal}(TP_j), Sol(TP_j))^{Sat.} = \sum_{k=1}^{k_{max}} \sum_{m_1=1}^{n_k^s} (c_{m_1}^s : cw_{m_1}^s) - \sum_{k=1}^{k_{max}} \sum_{m_1=1}^{n_k^s} (c_{m_1}^s : cw_{m_1}^s);$$

4. Різниця по порушених обмеженнях по відношенню до ідеального рішення:

$$dist(Sol^{ideal}(TP_j), Sol(TP_j))^{Viol.} = \sum_{k=1}^{k_{max}} \sum_{m_2=1}^{n_k^v} (c_{m_2}^v : cw_{m_2}^v) - \sum_{k=1}^{k_{max}} \sum_{m_2=1}^{n_k^v} (c_{m_2}^v : cw_{m_2}^v)$$

Таким чином, введені способи ранжування рішень технологічних проблем базуються на ступені переваги найбільш важливого порушеного обмеження, а відповідно, обмеження з ступенем переваги нижчим за ступінь непослідовності не враховуються.

Розглянемо тепер приклад фактичних даних (таблиця 1), які були використані при вирішенні нештатної аварійної ситуації під час буріння свердловини в Прикарпатському УБР (Долинський нафтопромисловий район).

Таблиця 1 – Фактичні дані по вирішенню нештатної ситуації по свердловині № 545

	Вибій	Аварія	Дії по усуненні	Наслідок дій
1.	3338 м	На глибині 3323 м утрачено циркуляцію бурового розчину та рухомість бурової колони (БК)	Проведено роботи по ліквідації прихоплення бурильного інструменту	Роботи по ліквідації не дали позитивних результатів
			Встановлено цементний міст в інтервалі 3028–3167 м і перебурено іншим стовбуром	Свердловину пробурено другим стовбуром до 3396 м
		На вибої 3396 м утрачено циркуляцію бурового розчину внаслідок осипання стінок		Протягом 4 год. відновлено циркуляцію
2.	3396 м	На 3396 м утрачено рухомість БК	Відстріл інструменту на глибині 3244 м	
3.			Забурювання нового стовбуру з глибини 2970 м після встановлення цементного мосту в інтервалі 2960–3210 м	Пробурено свердловину до 3440 м
4.	3440 м	Затяжка бурильного інструменту на глибині 3402 м	Розходження БК із промивкою	Втрачено циркуляцію та рух інструменту
		Втрачено циркуляцію та рух інструменту	Проведено відстріл бурильного інструменту на глибині 3193 м	
5.			Спущено та зацементовано 168 мм обсадну колону в інтервалі 2703–3170 м	
6.			Спущено та зацементовано 144 мм «хвостовик» в інтервалі 3067–3363 м	Пробурено стовбур долотом 98,4 мм до глибини 3470 м
7.			Обсаджено свердловину «хвостовиком-фільтром» 73 мм в інтервалі 3337–3470 м	Свердловина пробурена до глибини 3440 м новим стовбуром

Інтерпретація наведених табличних даних дозволяє виконання формального представлення приведенного фактичного опису вище поданої нештатної

Об'єкт: Свердловина № 545

Характеристика свердловини (технологічні параметри): $v_1(\text{вибій})=d_1^c=3338$

Технологічна проблема (Аварія):

$$TP_1(\underbrace{v_1^{TP_1}(\text{глибина})=d_1^{TP_1}=3323}_{\text{числові характеристики/ обмеження}}; \underbrace{v_2^{TP_1}(\text{циркуляція бурового розчину})=d_2^{TP_1}=\text{"втрачено"}; v_3^{TP_1}(\text{рухомість БК})=d_3^{TP_1}=\text{"втрачено"}}_{\text{лінгвістичні характеристики/ обмеження}})$$

Дія по усуненню (присвоєння змінних як можливе рішення):

ситуації (технологічної проблеми) в термінах представлення та задоволення обмежень.

$$\Psi_1^{TP_1} (\overbrace{v_1^{\psi} (\text{цементний_міст}) = "встановлено"}^{\text{лінгвістична характеристика/обмеження}} ; \overbrace{v_2^{\psi} (\text{інтервал}) = D_2^{\psi} = [3028..3167]}^{\text{числова характеристика/обмеження}} ; \overbrace{v_3^{\psi} (\text{перебурка_новим_стовбуром}) = "так"}^{\text{логічна характеристика/обмеження}})$$

Наслідок дії (зміни доменних значень): $v_1(\text{вибій}) = d_1^{c_1} = 3396$

Технологічна проблема/стан технологічної проблеми (Аварія):

$$TR_1.TPS_1 (\overbrace{v_1^{TPS_1} (\text{вибій}) = d_1^{TPS_1} = 3396}^{\text{числова характеристика/обмеження}} ; \overbrace{v_2^{TPS_1} (\text{циркуляція_бурового_розчину}) = d_2^{TPS_1} = "втрачено"}^{\text{лінгвістична характеристика/обмеження}}) \leftarrow \text{Rule 1}$$

$$\leftarrow \text{Rule 1} \left[\overbrace{v_3^{TPS_1} (\text{осипання_стінок}) = d_3^{TPS_1} = "так"}^{\text{логічна характеристика/обмеження}} \right]$$

Наслідок дії (зміни доменних значень):

$$\overbrace{v_4^{TPS_1} (\text{час_відновлення}) = d_4^{TPS_1} = 4}^{\text{числова характеристика/обмеження}} ; \overbrace{v_2^{TPS_1} (\text{циркуляція_бурового_розчину}) = d_2^{TPS_1} = "відновлено"}^{\text{лінгвістична характеристика/обмеження}}$$

Технологічна проблема/стан технологічної проблеми (Аварія):

$$TR_1.TPS_2 (\overbrace{v_1^{TPS_2} (\text{вибій}) = d_1^{TPS_2} = 3396}^{\text{числова характеристика/обмеження}} ; \overbrace{v_2^{TPS_2} (\text{втрата_рухомості_БК}) = d_2^{TPS_2} = "так"}^{\text{логічна характеристика/обмеження}})$$

Дія по усуненню (присвоєння змінних як можливе рішення):

$$\psi_2^{TPS_2} (\overbrace{v_4^{\psi} (\text{глибина}) = 3244}^{\text{числова характеристика/обмеження}} ; \overbrace{v_5^{\psi} (\text{відстріл_інструменту}) = "так"}^{\text{логічна характеристика/обмеження}})$$

$$\psi_3^{TPS_2} (\overbrace{v_6^{\psi} (\text{цементний_міст}) = "встановлено"}^{\text{лінгвістична характеристика/обмеження}} ; \overbrace{v_7^{\psi} (\text{інтервал}) = [2960..3210]}^{\text{числова характеристика/обмеження}} ; \overbrace{v_8^{\psi} (\text{глибина}) = 2970}^{\text{числова характеристика/обмеження}} ; \overbrace{v_9^{\psi} (\text{перебурка_новим_стовбуром}) = "так"}^{\text{логічна характеристика/обмеження}})$$

Наслідок дії (зміни доменних значень): $v_3^{TPS_2} (\text{глибина_свердловини}) = d_3^{TPS_2} = 3440$

Технологічна проблема/стан технологічної проблеми (Аварія):

$$TR_1.TPS_3 (\overbrace{v_1^{TPS_3} (\text{глибина}) = d_1^{TPS_3} = 3402}^{\text{числова характеристика/обмеження}} ; \overbrace{v_2^{TPS_3} (\text{затяжка_бурильного_інструменту}) = d_2^{TPS_3} = "так"}^{\text{логічна характеристика/обмеження}})$$

Дія по усуненню (присвоєння змінних як можливе рішення):

$$\psi_4^{TPS_3} (\overbrace{v_{10}^{\psi} (\text{розходження_БК}) = "так"}^{\text{логічна характеристика/обмеження}} ; \overbrace{v_{11}^{\psi} (\text{промивка}) = "так"}^{\text{логічна характеристика/обмеження}})$$

Наслідок дії (зміни доменних значень):

$$\overbrace{v_3^{TPS_3} (\text{циркуляція_розчину}) = d_3^{TPS_3} = "втрачено"}^{\text{лінгвістична характеристика/обмеження}} ; \overbrace{v_4^{TPS_3} (\text{рух_інструменту}) = d_4^{TPS_3} = "втрачено"}^{\text{лінгвістична характеристика/обмеження}}$$

Дія по усуненню (присвоєння змінних як можливе рішення):

$$\psi_5^{TPS_3} (\overbrace{v_{12}^{\psi} (\text{глибина}) = 3193}^{\text{числова характеристика/обмеження}} ; \overbrace{v_{13}^{\psi} (\text{відстріл_інструменту}) = "так"}^{\text{логічна характеристика/обмеження}})$$

$$\psi_6^{TPS_3} (\overbrace{v_{14}^{\psi} (\text{інтервал}) = [2703..3170]}^{\text{числова характеристика/обмеження}} ; \overbrace{v_{15}^{\psi} (\text{спуск_обсадної_колони_168мм}) = "так"}^{\text{логічна характеристика/обмеження}} ; \overbrace{v_{16}^{\psi} (\text{цементування_обсадної_колони_168мм}) = "так"}^{\text{логічна характеристика/обмеження}})$$

$$\psi_7^{TPS_3} (\underbrace{v_{17}^y(\text{інтервал})=[3067..3363]}_{\text{числова характеристика/обмеження}}; \underbrace{v_{18}^y(\text{спуск_хвостовика_144мм})=\text{"так"}}_{\text{логічна характеристика/обмеження}}; \underbrace{v_{19}^y(\text{цементування_хвостовика_144мм})=\text{"так"}}_{\text{логічна характеристика/обмеження}})$$

Наслідок дії (зміни доменних значень):

$$\underbrace{v_5^{TPS_3}(\text{застосування_долота_98.4мм})=d_5^{TPS_3}=\text{"так"}}_{\text{логічна характеристика/обмеження}}; \underbrace{v_6^{TPS_3}(\text{глибина_свердловини})=d_5^{TPS_3}=3470}_{\text{числова характеристика/обмеження}}$$

Дія з усунення (присвоєння змінних як можливе рішення):

$$\psi_8^{TPS_3} (\underbrace{v_{19}^y(\text{інтервал})=[3337..3470]}_{\text{числова характеристика/обмеження}}; \underbrace{v_{20}^y(\text{осадка_свердловини_хвостовиком-фільтром_73мм})=\text{"так"}}_{\text{логічна характеристика/обмеження}})$$

Наслідок дії (зміни доменних значень):

$$\underbrace{v_7^{TPS_3}(\text{перебурка_новим_стоббуром})=d_7^{TPS_3}=\text{"так"}}_{\text{логічна характеристика/обмеження}}; \underbrace{v_6^{TPS_3}(\text{глибина_свердловини})=d_5^{TPS_3}=3440}_{\text{числова характеристика/обмеження}}$$

ПРАВИЛО 1:

$$\underbrace{(v_{sum}^j(\text{осипання_стінок})=d_{v_{sum}^j}^1=\text{"так":}CF_{v_{sum}^j}^1)}_{\text{ймовірнісна складова}}] \underbrace{\Psi v_{sum}^2(\text{зенітний_кут})=d_{v_{sum}^2}^2=\text{"великий"}}_{\text{лінгвістична складова}} \xrightarrow{\text{RULE 1}} TP(v(\text{прихоплення_бурового_інструменту})=d_v^{TP}=\text{"так"})$$

За умов стислості викладу формальний опис завершується введенням тільки одного виділеного типу правила в базу знань СППРО, хоча насправді таких правил застосовується на порядок вища кількість для реалізації достатнього рівня функціональності системи.

ВИСНОВКИ. В даному дослідженні приведені методи контролю процесу вирішення технологічних проблем у системі інтелектуальної підтримки прийняття рішень на основі обмежень, які дозволяють класифікувати та аналізувати помилки і забезпечувати роботу механізму співставлення поточного технологічного рішення з закладеними в системі ієрархіями обмежень, що також забезпечує процес формування зворотного зв'язку. Ефективність процесу прийняття рішення при виникненні нештатної ситуації в процесі буріння НГС оцінюється шляхом наведення місця виникнення технологічної помилки, виконання її ідентифікації та класифікації, співвіднесення помилки до певної ієрархії, виділення її складових та можливих рівнів релевантності.

Темою подальших досліджень буде розробка механізму впорядкування рішень щодо оцінки складності, релевантності, оптимальності і т.п.

ЛІТЕРАТУРА

1. Оптимальне керування процесом механічного буріння / М.І. Горбійчук, В.Б. Кропивницька // Нафтова і газова промисловість. – 2008. – № 3. – С. 20–22.
2. Шавранський В.М. Система контролю параметрів для запобігання виникненню ускладнень при бурінні свердловин на нафту і газ // Нафтогазова

енергетика. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2011. – № 1 (14). – С. 91–98.

3. Оптимизация нагрузки и скорости вращения для буров вращательного типа, предназначенных для бурения горных пород / И.М. Галли, Г.Б. Вудс // API Drilling and Production Practice. – 1963. – PP. 48–73.

4. Горбійчук М.І. Інформаційне забезпечення адаптивної системи керування процесом буріння // Методи та прилади контролю якості. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2002. – № 8. – С. 86–89.

5. Mitrovic A. Experiences in Implementing Constraint-Based Modeling in SQL-Tutor: Proceedings of the 4th International Conference on Intelligent Tutoring, 1998, London. – London: Springer-Verlag, 1998. – PP. 414–423.

6. Tailoring Feedback by Correcting Student Answers: In Proceedings of Intelligent Tutoring Systems' 2000, Montreal / B. Martin, A. Mitrovic. – Montreal: Springer, 2000. – PP. 383–392.

7. Optimising ITS Behaviour with Bayesian Networks and Decision Theory / M. Mayo, A. Mitrovic // Artificial Intelligence in Education. – 2001. – Vol. 12, no. 2. – PP. 124–153.

8. Ohlsson S. The interaction between knowledge and practice in the acquisition of cognitive skills // In: A. Meyrowitz and S. Chipman (Eds.), Foundations of knowledge acquisition: Cognitive models of complex learning. – Norwell, MA: Kluwer, 1993. – PP. 147–208.

9. Ohlsson S. Constraint-based student modeling. In Student modeling: the key to individualized knowledge-based instruction, Springer. – 1994. – PP. 167–189.

10. Вовк Р.Б. Контроль пошуку рішень технологічних проблем процесу буріння, формалізованих накладанням ієрархії обмежень // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КрНУ, 2014. – Вип. 1/2014 (84). – С. 76–82.

11. Вовк Р.Б. Моделювання структури та функціональності технологічних проблем на основі обмежень // Науково-технічний журнал «Математичні машини та системи». – 2011. – № 2. – С. 153–161.

THE METHOD OF IMPLEMENTATION FOR THE SOLUTION CONTROL OF THE DRILLING TECHNOLOGICAL PROBLEMS BY THE MEANS OF INTELLIGIBLE SYSTEM

R. Vovk

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

vul. Karpatska, 15, Ivano-Frankivsk, 76019, Ukraine. E-mail: wolf@wolf.if.ua

The formal descriptions of the functionality for the intelligible decision support system based on constraints is outlined, which can be described as a medium of technological decision making support under the uncertainty by solving of technological problems by the operator under the way of drilling for oil and gas wells, using on the intelligent detection and classification of arising errors and generations of relevant user's feedback's communications. This workaround of decisions control by which the correct solution is considered as being the one that does not violate the constraints imposed on the domain in the form of hierarchy. By the solving of the technological problems decision making object moves in a sequence from the set of possible states and at the each time is located in the some state that is a subset of one of the technological problems that arise during drilling. Technologically feedback message is attached directly to the constraints on the level of the set, the system or the constraints hierarchy.

Key words: decision making, technological problem, constraints, error, drilling process.

REFERENCES

1. Horbiichuk, M.I., and Kropyvnytska, V.B. (2008), "The optimal control for the process of mechanical drilling", *Oil and Gas industry*, no. 3, pp. 20–22.

2. Shavransky, M.V. (2011), "The system of parameter control for preventing of possible complication by wells drilling for oil and gas", *Oil and Gas energy*, no.1(14), pp. 91–98.

3. Galle, E.M., and Woods, H.B. (1963), "The torque and rotation speed optimization for the drill of rotation type constructed for the drilling of rocks", *API Drilling and Production Practice*, pp. 48–73.

4. Horbiichuk, M.I. (2002), "Information providing for the adaptive system for drilling control", *The methods and devices for the quality control, Ivano-Frankivsk: IFNTUOG*, no. 8, pp. 86–89.

5. Mitrovic, A. (1998), "Experiences in Implementing Constraint-Based Modeling in SQL-Tutor", *Proceedings of the 4th International Conference on Intelligent Tutoring*, London, Springer-Verlag, pp. 414–423.

6. Martin, B., and Mitrovic, A. (2000), "Tailoring Feedback by Correcting Student Answers", *Proceedings of Intelligent Tutoring Systems'2000*, Montreal, Montreal: Springer, pp. 383–392.

7. Mayo, M., and Mitrovic, A. (2001), "Optimising ITS Behaviour with Bayesian Networks and Decision Theory", *Artificial Intelligence in Education*, vol. 12, no. 2, pp. 124–153.

8. Ohlsson, S., Meyrowitz, A., Chipman, S. (1993), "The interaction between knowledge and practice in the acquisition of cognitive skills", *Foundations of knowledge acquisition: Cognitive models of complex learning*, Norwell, pp. 147–208.

9. Ohlsson, S. (1994), "Constraint-based student modelling", *In Student modeling: the key to individualized knowledge-based instruction*, Springer, pp. 167–189.

10. Vovk, R.B. (2014), "The solution control for drilling technological problems formalized by means of imposed constraints hierarchies", *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, no. 1/(84), pp. 153–161.

11. Vovk, R.B. (2011), "The structure and functionality modelling for constraints-based technological problems", *Mathematical Machines and Systems*, no. 2, pp. 153–161.

Стаття надійшла 18.03.2015.