

ФОРМАЛІЗАЦІЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОСТОРУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОБЛЕМ БУРІННЯ НА ОСНОВІ ОЦІНОЧНИХ ФУНКЦІЙ

В даному дослідженні на основі аналізу типових процедур прийняття технологічних рішень побудовано формальний підхід моделювання технологічних проблем засобами теорії представлення та задоволення обмежень, що використано як основну ідею розробки інтелектуальної системи на основі обмежень для запобігання нештатних ситуацій в процесі буріння. Виконано оцінку повноти та комплексності формальних представлень технологічних проблем буріння шляхом побудови проєкції ієрархії обмежень відносно систем та множин обмежень із заданими лінгвістичними мітками на множину класів можливісних та нечітких технологічних проблем. Представлено спосіб рішення технологічних проблем на основі обмежень з ієрархічними мітками через обчислення функції успішності для локальних обмежень, розміщення яких по рівнях ієрархії стосовно коефіцієнтів їх міток може бути довільним або впорядкованим у випадку, коли обмеження з більш високими ваговими мітками знаходяться у відповідних рівнях, що забезпечують введення впорядкування ієрархії обмежень по індексах її рівнів. Введено представлення міток технологічних проблем дозволяє виконувати з'єднання міток змінних в усіх обмеженнях, де вони зустрічаються, при цьому початкова технологічна проблема характеризується відповідно невпорядкованою системою міток, невпорядкованими доменами змінних та обмежень, а також введеною з'єднувальною функцією для обмежень з невпорядкованими мітками.

Ключові слова: технологічні проблеми, оціночні функції, буріння, локальні обмеження.

Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок із важливими практичними завданнями. Аналіз останніх досліджень і публікацій. 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 галузі автоматизованих інтелектуальних систем та визначено особливості контролю та автоматизації процесів керування бурінням. Проблема автоматизації керування процесом буріння НГС, в тому числі шляхом створення автоматизованих та інтелектуальних систем присвячено ряд теоретичних та прикладних досліджень [1–3]. 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 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, за якого втручання людини є не обов'язковим. Це дозволяє системі в автономному режимі виконувати функції системи операторського керування процесом буріння, застосування засобів обробки та архівування інформації про хід процесу. Проте оскільки процес буріння є складним та динамічним, повна автономність його інтелектуальних складових в автоматизованих системах процесу буріння не є доцільною і, як показує досвід, рівень їх функціональності та стійкості буде суттєво вищим у випадку, якщо така система включатиме доступ фахівця-експерта на етапі підтримки прийняття рішення, що дозволяє поєднувати обчислювальну ефективність системи з інтуїцією та знаннями людини. Існуючі автоматизовані системи керування технологічними процесами дозволяють ефективно вирішувати ряд завдань: 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 напрямку досліджень визначається загальними завданнями 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 помилок оператора технологічного процесу.

Таким чином, побудова інтелектуальних систем підтримки прийняття керуючих рішень в просторі технологічних проблем з метою запобігання нештатних аварійних ситуацій є однією з **невирішених** та практично значущих прикладних задач.

Метою даного дослідження є розроблення формального методу оцінювання в просторі технологічних проблем (нештатних ситуацій в процесі буріння) шляхом контролю множин, систем та ієрархій обмежень, накладених на технологічний процес.

Виклад основного матеріалу. Дослідження [4] показує, що причиною виникнення технологічних проблем при бурінні НГС є вихід певних технологічних параметрів за встановлені граничні значення (домени). В загальному випадку як основні керовані технологічні параметри розглядаються: осьове зусилля на долото $F(t)$; швидкість обертання долота $n(t)$; витрата промивної рідини $Q(t)$; густина промивної рідини, її в'язкість та вміст піску в промивній рідині. Типовими технологічними проблемами, що виникають в процесі буріння, є поглинання технологічних речовин, флюїдопрояви, порушення цілісності стінок свердловини, прихоплення колони труб та ряд інших. Особливість поглинання технологічних речовин полягає в повному та частковому поглинанні; флюїдопрояви поділяються на газові, нафтові та водопрояви з можливими переливами, викидами та фонтануваннями, які можуть бути відкритими та закритими. Порушення цілісності стінок свердловини полягає в розширенні або звуженні ствола свердловини внаслідок обсіпання чи обвалювання породи. Прихоплення колони труб виникає внаслідок заклинювання колони стороннім предметом, через обсіпання та обвалювання породи та внаслідок перепаду тиску. Виникнення технологічних проблем призводить до часових та фінансових втрат і відповідно негативно впливає на техніко-економічні показники процесу буріння в цілому. Тому виявлення можливих причин нештатних ситуацій та опис їх в формі обмежень, що накладаються на технологічний процес буріння, є важливим завданням, вирішення якого дозволяє утворювати формалізовані структури технологічних обмежень в базах знань інтелектуальних систем керування та систем підтримки прийняття раціональних та оптимальних рішень щодо перебігу процесу [5, 6].

Сутність процесу встановлення значень керованих змінних можна моделювати засобами теорії представлення та задоволення обмежень [7–10], де як змінні виконуються підстановка технологічних параметрів [6].

На формальному рівні задача задоволення обмежень формулюється у вигляді кортежу $(V; D; C)$, де $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ – множина змінних (керованих параметрів процесу буріння) системи; $D = \{D_1, D_2, \dots, D_n\}$ – множина доменів (областей визначення) кожної змінної; $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ – множина обмежень, тобто відношень, заданих на підмножині змінних $\{v_{i_1}, \dots, v_{i_k}\}$ над їхніми доменами: $\{D_{i_1} \times \dots \times D_{i_k}\} \supseteq c_i$.

Основою функціонування інтелектуальної системи, що базується на накладенні множин, систем та ієрархій обмежень є контроль процесів їх порушення та задоволення. Опис функціонування системи інтелектуальної підтримки прийняття рішень на основі обмежень (СППРО) базується на формальному представленні технологічної проблеми (нештатної ситуації при бурінні НГС) TP (*Technological Problem*), як виду початкового формулювання задачі задоволення обмежень з додатковими множинами обмежень $C^R = C^S \cup C^V$, C^{UnR} , де C^R – множина релевантних обмежень (*Relevant Constraints*) до технологічної проблеми TP , C^S – множина обмежень, що задовольняється (*Satisfied Constraints*) при вирішенні технологічної проблеми, C^V – множина обмежень, що порушується (*Violated Constraints*) при вирішенні технологічної проблеми, C^{UnR} – множина не релевантних обмежень до технологічної проблеми.

Таким чином, технологічна проблема на основі обмежень представляється кортежем $TP = \{V; D; C^R; C^{UnR}\}$, де $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ – множина змінних; $D = \{D_1, D_2, \dots, D_n\}$ – множина доменів (областей визначення) кожної змінної; $C^R = \{c_1^1, c_2^1, \dots, c_n^1\}$ – множина релевантних обмежень; $C^{UnR} = \{c_1^2, c_2^2, \dots, c_n^2\}$ – множина нерелевантних обмежень.

В роботах [5, 6] було обгрунтовано також спосіб моделювання технологічних проблем у вигляді підвиду інформаційно-пошукових задач на основі обмежень. Тому для них справедливим буде введення концепції часткових рішень подібно до тих, що виконуються у випадку класичного формулювання [9].

Під технологічною проблемою на основі обмежень з частковими рішеннями будемо розуміти кортеж $TP_j^{partial} = \langle TP, (STP, \leq), Mt, Sol^{ideal}, Sat(), Viol() \rangle$, де TP – початкова задача на основі обмежень,

STP – її простір, Mt – метрика введена на даному просторі, Sol^{ideal} – ідеальне вирішення для технологічної проблеми, $Sat()$ – функція обчислення вагових значень по задоволених обмеженнях, $Viol()$ – функція обчислення вагових значень по порушених обмеженнях. За допомогою ідеальної функції та функції обчислення вагових значень виконується контроль базової задачі та її простору, що на фактичному рівні STP буде містити послаблення $weak(TP)$ та посилення $strong(TP)$ початкової проблеми:

$$STP = \langle weak^i(TP_j), strong^i(TP_j) \rangle_i. \quad (1)$$

Як необхідне часткове рішення технологічної проблеми на основі обмежень $TP_j^{partial}$ слід розглядати задачу TP' із простору проблем STP , разом з її рішенням $Sol'(TP')$, де метрична відстань $dist()$ визначається формулою:

$$Mt^o(TP', TP) < dist^o(|[Viol(TP')] - [Viol(TP)]|). \quad (2)$$

Часткове рішення технологічної проблеми будемо вважати достатнім якщо:

$$Mt^o(TP', TP) < dist^o(|[Sat(TP')] - [Sat(TP)]|). \quad (3)$$

Часткове рішення будемо вважати оптимальним якщо метрична відстань між технологічними проблемами мінімальна:

$$Sol_{optimal}^{partial}(TP_j^{partial}) = \min_{STP} Mt(TP', TP). \quad (4)$$

Крім того, матимемо наступні характеристики для ступеня задоволення $SD(Sol^{partial}) = Mt(TP', TP)$ і ступеня послідовності часткового рішення $CD(Sol^{partial}) = SD(Sol_{optimal}^{partial}) = \min_{STP} Mt(TP', TP)$, тобто за ступінь задоволення задачі $TP_j^{partial}$ можна розглядати значення функції метричної відстані, а за ступінь послідовності – ступінь задоволення оптимального рішення.

Обмеженням з оцінкою для технологічної проблеми будемо вважати кортеж $(c_i, evf(c_i))$, де c_i – обмеження з ієрархії $ConstrHrch_{TP_j}^R$, а evf – функція оцінки обмежень, $evf : ConstrHrch_{TP_j}^R \rightarrow EvSet = ExpertEv \cup UserEv$, де $EvSet$ – загальна множина оцінок, $ExpertEv$ – множина оцінок експерта нафтогазової предметної області, $UserEv$ – множина оцінок користувача системи інтелектуальної підтримки прийняття рішень.

Наведені вище формальні описи технологічних проблем процесу буріння є видом прямих представлень, що базуються на введенні систем, множин та ієрархій обмежень для керованих змінних. В той же час, очевидно, що виникнення технологічної проблеми (нештатної ситуації) є безпосереднім наслідком певної технологічної помилки (Err_{TP}), що виникає при встановленні деякої, хоча б однієї керованої змінної (параметра технологічного процесу) недопустимого значення, тобто такого, яке порушує хоча б одне з накладених обмежень. Таким чином, початковий шаблон представлення технологічної проблеми вигляду “змінні–домени–обмеження” можна без втрати загальності переписати у вигляді “помилки Err – домени помилок Err^{Domain} – обмеження”.

Технологічну проблему з накладеними обмеженнями з оцінками TP_j^{Ev} визначимо як формальну структуру:

$$TP_j^{Ev} = (Err_{TP_j}^{Hrch}, Err_{TP_j}^{Domain}, ConstrHrch_{TP_j}^R, (EvSet, \otimes, \succ), evf), \quad (5)$$

де $Err_{TP_j}^{Hrch}, Err_{TP_j}^{Domain}$ – ієрархічно впорядковані помилки з релевантними доменами технологічної проблеми TP_j , \otimes – операція поєднання оцінок обмежень, \succ – операція впорядкування на множині оцінювань $EvSet$.

Для заданої технологічної проблеми з накладеними обмеженнями з оцінками TP_j^{Ev} та деякого присвоєння (потенційного рішення технологічної проблеми) $\psi \in \Psi_{Err_{TP_j}^{SubHrch}}$, де $Err_{TP_j}^{SubHrch} \subseteq Err_{TP_j}^{Hrch}$, оцінювання присвоєння ψ по відношенню до TP_j^{Ev} визначимо як:

$$Ev_{TP_j^{Ev}}(\psi) = \left[\begin{array}{c} (c_i^s, c_i^v \in ConstrHrch^R) \wedge (c_i^{var} \in Err_{TP_j}^{SubHrch}) \wedge \{\psi \models c_i^v \vee \psi \models c_i^s\} \wedge ConstrHrch^{unR} = \emptyset \\ \vdash_{i \in [1..k_{max}..1..n_k]} evf(c_i^r) \end{array} \right], \quad (6)$$

де c_i^{var} – множина змінних обмеження, $ConstrHrch^{unR}$ – ієрархія нерелевантних обмежень.

Таким чином, оцінювання присвоєння здійснюється шляхом поєднання оцінок окремих обмежень, що дозволяє здійснювати відбір рішень на основі оцінки ступеня задоволення присвоєнь:

$$Ev(Sol^{potential}) \vdash \left[SD(\psi) \mid Ev_{TP_j^{Ev}}(\psi) \right]. \quad (7)$$

Присвоєння $\psi^* \in Err_{TP_j}^{Hrch}$ будемо вважати рішенням технологічної проблеми з накладеними обмеженнями з оцінками TP_j^{Ev} якщо воно має мінімальне оціночне значення по відношенню до операції впорядкування оцінювань \succ :

$$Sol(TP_j^{Ev}) = \psi^* | \min_{\succ} Ev_{TP_j^{Ev}}(\psi^*). \quad (8)$$

Оцінка технологічної проблеми TP_j^{Ev} дорівнює ступеню її послідовності і відповідає мінімальному оціночному значенню:

$$Ev(TP_j^{Ev}) = CD(TP_j^{Ev}) = \min_{\succ} Ev_{TP_j^{Ev}}(\psi), \psi \in Err_{TP_j}^{Hrch}. \quad (9)$$

Спосіб виконання пошуку оціночних значень дозволяє визначити верхній і нижній елемент на множині оцінювання наступним чином:

$$\min_{\succ} Ev_{TP_j^{Ev}}(\psi) \Rightarrow \begin{cases} \perp \rightarrow \bigotimes_{i \in [1..k_{\max}, 1..n_k]} c_i^s, \psi \models \forall c_i^s, c_i^s \in ConstrHrch_{TP_j^{Ev}}^S \\ \top \rightarrow \bigotimes_{i \in [1..k_{\max}, 1..n_k]} c_i^v, \psi \models \exists c_i^v, c_i^v \in ConstrHrch_{TP_j^{Ev}}^V \end{cases}. \quad (10)$$

Нехай TP_j^{Ev} – технологічна проблема з накладеними обмеженнями з оцінками, тоді послабленням технологічної проблеми TP_j^{Ev} , будемо вважати технологічну проблему TP_j за умови, що $ConstrHrch_{TP_j}^S \subset ConstrHrch_{TP_j^{Ev}}^S$ і $ConstrHrch_{TP_j}^V \subset ConstrHrch_{TP_j^{Ev}}^V$, $TP_j \cong weak(TP_j^{Ev})$. Для технологічної проблеми з накладеними обмеженнями з оцінками TP_j^{Ev} і деякого її послаблення TP_j^1 , оцінку значення послаблення будемо виконувати наступним чином:

$$Ev_{TP_j^{Ev}}(TP_j^1) = \left[\bigotimes_{\forall c_i \in ((ConstrHrch_{TP_j^1}^R) \cup (ConstrHrch_{TP_j^1}^R \cup ConstrHrch_{TP_j^1}^{unR}))} evf(c_i) \right]_{i \in [1..k_{\max}, 1..n_k]}. \quad (11)$$

Для заданої технологічної проблеми з накладеними обмеженнями з оцінками TP_j^{Ev} та двох її послаблень TP_j^1 та TP_j^2 матимемо, що:

$$\begin{aligned} [ConstrHrch_{TP_j^1}^R \cup ConstrHrch_{TP_j^1}^{unR}] \subset [ConstrHrch_{TP_j^2}^R \cup ConstrHrch_{TP_j^2}^{unR}] \Rightarrow \\ \Rightarrow Ev_{TP_j^{Ev}}(TP_j^1) \succ Ev_{TP_j^{Ev}}(TP_j^2) \end{aligned}. \quad (12)$$

Присвоєння $\psi \in \Psi_{Err_{TP_j}^{Hrch}}$ вважатимемо розв'язком технологічної проблеми з накладеними обмеженнями з оцінками TP_j^{Ev} , якщо:

$$[\psi \rightarrow Sol(TP_j^{Ev})] \models [\psi \rightarrow Sol(TP_j^1)] | \min Ev_{TP_j^{Ev}}(TP_j^1), \quad (13)$$

де $TP_j = weak^{consist}(TP_j^{Ev})$.

Таким чином, технологічну проблему з накладеними обмеженнями з оцінками TP_j^{Ev} можна розглядати як технологічну проблему з частковими рішеннями $TP_j^{partial}$, якщо виконати наступні дії:

1) для кожного обмеження $c_i^f \in ConstrHrch_{TP_j}^R$ ввести деякий домен, що відповідатиме його простору $SpaceDomain^{c_i^f}$;

2) побудувати метричну функцію для просторів обмежень Mt^{Space} , $Mt^{Space} \rightarrow \bigoplus_{k=1..k_{\max}}^{Space} \{SpaceDomain^{c_i^f}\}_{i=1..n_k}$, де \bigoplus^{Space} – з'єднувальна функція просторів обмежень;

3) структурувати послаблення (посилення) як метричну різницю між відповідними ієрархіями обмежень.

Нехай ми маємо множину всіх можливих послаблень $Weak_{TP_j^{Ev}}^{Set}$ та множину всіх можливих посилень $Strong_{TP_j^{Ev}}^{Set}$ для технологічної проблеми TP_j^{Ev} . На їх основі можемо отримати впорядковані множини:

$$\left(Weak_{TP_j^{Ev}}^{Set}, \{ConstrSet_{i_1}^{del}\}_{i_1=1,2,\dots}, \succ \right), \left(Strong_{TP_j^{Ev}}^{Set}, \{ConstrSet_{i_2}^{add}\}_{i_2=1,2,\dots}, \succ \right). \quad (14)$$

Виконаємо побудову послідовного послаблення з максимальною множиною обмежень $TP_j^1 = weak^{consist}(TP_j^{Ev}) | ConstrSet_{TP_j^1}^{\max}$, де $ConstrSet_{TP_j^1}^{\max} = \max[ConstrHrch_{TP_j^{Ev}}^R \setminus ConstrHrch_{TP_j^1}^R]$.

Також можна виконати порівняння відмінностей між послабленою (посиленою) та початковою проблемами з точки зору множин їх рішень, а саме:

$$dist_{\min}^{M^{LP}}(TP_j^{Ev}, TP_j^1) \Rightarrow dist_{\min}^{M^{Sol}}(Sol(TP_j^{Ev}), Sol(TP_j^1)). \tag{15}$$

Крім того, можна виконати перевпорядкування множин послаблень та посилень на основі обчислення ступеня задоволення початкових оцінок:

$$\left(Weak_{TP_j^{Ev}}^{Set}, \{Ev_{TP_j^{Ev}}(TP_{j_1}^{i_1})\}_{i_1, j_1=1, 2, \dots, \gamma}\right), \left(Strong_{TP_j^{Ev}}^{Set}, \{Ev_{TP_j^{Ev}}(TP_{j_2}^{i_2})\}_{i_2, j_2=1, 2, \dots, \gamma}\right), \tag{16}$$

де $TP_{j_1}^{i_1} \in Weak_{TP_j^{Ev}}^{Set}, TP_{j_2}^{i_2} \in Strong_{TP_j^{Ev}}^{Set}$.

Введені способи перевпорядкувань є частиною механізму імплементації процесу пошуку рішення (в тому числі і часткового рішення) для технологічної проблеми в проектованій інтелектуальній системі на основі обмежень.

Для дослідження повноти та комплексності технологічних проблем на основі обмежень як окремого підкласу інформаційно-пошукових задач на основі обмежень (CSP – constraints satisfaction problem), доцільним побудова проєкції ієрархії обмежень (відповідно систем та множин обмежень) з лінгвістичними мітками на класи можливісних та нечітких технологічних проблем: $[ConstrHrch^{\mu} \rightarrow TP^{\mu}, ConstrHrch^{fuzzy} \rightarrow TP^{fuzzy}]$.

Визначимо можливісну задачу TP_j^{μ} як кортеж $TP_j^{\mu} = (Err_{TP_j}^{Hrch}, Err_{TP_j}^{Domain}, \{c_i, gl_i^{Constr}(c_i) | c_i \in ConstrHrch_{TP_j^{\mu}}^R\})$, де ієрархія обмежень містить глобальні мітки gl , що визначаються на основі оцінок необхідності задоволення та їх ступенів преференцій: $gl_i^{Constr}(c_i) \vdash c_i[nd_i : pfc_i]$.

Для деякого присвоєння $\psi \in \Psi_{Err_{TP_j^{\mu}}^{Hrch}}$ визначимо, що ψ є оптимальним присвоєнням для TP_j^{μ} , якщо ψ є рішенням для ієрархії $ConstrHrch_{TP_j^{\mu}}^R$ з максимальною функцією успішності $SF()$:

$$[\psi^{optimal} \rightarrow TP_j^{\mu}] \vdash \left(\psi = Sol(ConstrHrch_{TP_j^{\mu}}^R) \mid \max_{SF} [SF(ConstrHrch_{TP_j^{\mu}}^R, \psi)] \right). \tag{17}$$

В той же час функцію успішності можна розглядати як ступінь послідовності для TP_j^{μ} .

Визначимо технологічну проблему з нечіткими обмеженнями TP_j^{fuzzy} як кортеж $(Err_{TP_j}^{Hrch}, Err_{TP_j}^{Domain}(c_{L_{TP_j^{fuzzy}}^1}, \dots, c_{L_{TP_j^{fuzzy}}^m}))$, де $C_{L_{TP_j^{fuzzy}}}^{Set}$ – множина нечітких обмежень. Відповідно кожне нечітке обмеження $c_{L_{TP_j^{fuzzy}}^i}$ і звичайне обмеження c^i визначимо над деякою скінченною множиною змінних $\{e_{i_1}, \dots, e_{i_k}\}$. Введемо нечітке відношення виду:

$$mf_{c_{L_{TP_j^{fuzzy}}^i}}^{e_{i_1}, \dots, e_{i_k}} = SF(c_i^s(e_{i_1}^{dom}, \dots, e_{i_k}^{dom})) \oplus_{TP_j^{fuzzy}} gl^{Constr}(c_i^s), \tag{18}$$

де $e_{i_j}^{dom} \leftarrow e_{i_j}$ – відображення змінних на домени їх значень, $mf()$ – відповідна їм функція належності.

Присвоєння $\psi \in \Psi_{Err_{L_{TP_j^{fuzzy}}}^{LP}}$ буде рішенням технологічної проблеми TP_j^{fuzzy} виду $Sol \rightarrow \bigwedge_{i=1..m} \left[\bigoplus_{L_{TP_j^{fuzzy}}} c_i \in C_{L_{TP_j^{fuzzy}}}^{Set} \right]$ якщо ψ є рішенням для $[TP_{L_{TP_j^{fuzzy}}}^{Hrch}]_j^{\mu}$, $\psi = Sol([TP_{L_{TP_j^{fuzzy}}}^{Hrch}]_j^{\mu})$ та $SF(C_{L_{TP_j^{fuzzy}}}^{Set}, \psi) = CD(TP_j^{fuzzy})$.

Технологічною проблемою з обмеженнями з ієрархічними мітками будемо вважати формальну структуру:

$$TP_j^{Hrch} = (Err_{TP_j}^{Hrch}, Err_{TP_j}^{Domain}, ConstrHrch_{TP_j}^R, ([0..1] \subseteq R, \geq, \oplus_{L_{TP_j^{fuzzy}}}^{set}), I_{Hrch}^{set}), \tag{19}$$

де I_{Hrch}^{set} – ієрархічна мітка, $\oplus_{L_{TP_j^{fuzzy}}}^{set}$ – з'єднувальна функція для ієрархічних міток.

Верхня межа значень міток може обмежуватись значенням “1” на рівнях ієрархії або, що найбільш зручно, значеннями $\langle 0, r \rangle, r \in R$ для всієї ієрархії.

Розглянемо випадок, коли ієрархія міток має n -рівнів. Відповідно кожен з рівнів представляється системами обмежень, що не перетинаються:

$$ConstrHrch = (ConstrSyst_1 = (ConstrSet_1, \geq_R), \dots, ConstrSyst_n = (ConstrSet_n, \geq_R)); \tag{20}$$

$$ConstrHrch = ConstrSyst_1 \cup, \dots, \cup ConstrSyst_n; \tag{21}$$

$$\text{ConstrSyst}_i \cap \text{ConstrSyst}_j = \emptyset, \forall i, j \in [1..n]. \quad (22)$$

Доцільно також ввести впорядкування ієрархії обмежень по індексах її рівнів:

$$\text{ConstrHrch} = \{\text{ConstrSyst}_i, \prec_{\text{index}}\}; \quad (23)$$

$$\text{ConstrSyst}_i \prec_{\text{index}} \text{ConstrSyst}_j \iff i < j; i, j \in [1..n]. \quad (24)$$

Природнім буде також введення впорядкування по вагових коефіцієнтах:

$$\text{ConstrHrch} = \{\text{ConstrSyst}_i, \prec_{\text{weight}}\}; \quad (25)$$

$$\text{ConstrSyst}_i \prec_{\text{weight}} \text{ConstrSyst}_j \iff \text{Weight}(\text{ConstrSyst}_i) < \text{Weight}(\text{ConstrSyst}_j), \quad (26)$$

для $\text{Weight}(\text{ConstrSyst}_i) = \sum_{k=1}^{k_{\max}} cw_k$, де k_i – кількість обмежень в системі на i -му рівні, ConstrSyst_i – система обмежень i -го рівня.

Нехай задано присвоєння $\psi \in \Psi_{\text{Err}_{TP_j^{\text{Hrch}}}}^{\text{Hrch}}$. Оцінку даного присвоєння можна виконати наступним чином:

$$SD(\psi) = \sum_{i=1}^{k_{\max}} \left[\sum_{k=1}^{k_i} SD(c_k) \right]_i = \sum_{i=1}^{k_{\max}} \sum_{k=1}^{k_i} [SF(c_k)]_i, \text{ тобто розглядати рівень задоволення присвоєння через сумаризацію рівнів задоволення обмежень на основі функції успішності і таким чином отримати, що } \{SF(c_k) \cup gl^{\text{Constr}}(c_k)\}_{k=1..k_i} \models \{SF(\text{ConstrSyst}_i)\}_{i=1..k_{\max}} \models SD(\psi).$$

Успішність системи обмежень ConstrSyst_i^1 по відношенню до присвоєння $\psi \in \Psi_{\text{Err}_{TP_j^{\text{Hrch}}}}^{\text{Hrch}}$ будемо розглядати як відображення:

$$SF(\text{ConstrSyst}_i^1 \subset \text{ConstrSyst}_i) |_{\psi \in \Psi_{\text{Err}_{TP_j^{\text{Hrch}}}}^{\text{Hrch}}} : \Psi_{\text{Err}_{TP_j^{\text{Hrch}}}}^{\text{Hrch}} \rightarrow (W_1 \leq_w). \quad (27)$$

Для технологічної проблеми з обмеженнями з ієрархічними мітками TP_j^{Hrch} та ієрархії обмежень з мітками $[\text{ConstrHrch}_{TP_j^{\text{Hrch}}}]_{\text{set}}^{\text{Hrch}} = \text{ConstrSyst}_1^{\text{Hrch}} \cup \dots \cup \text{ConstrSyst}_n^{\text{Hrch}}$, успішність ієрархії по відношенню до присвоєння ψ будемо визначати як:

$$SF(\text{ConstrHrch}_{TP_j^{\text{Hrch}}} \psi) = [SF(\text{ConstrSyst}_1^{\text{Hrch}} \psi) \oplus_{SF} \dots \oplus_{SF} SF(\text{ConstrSyst}_n^{\text{Hrch}} \psi)], \quad (28)$$

де \oplus_{SF} – з'єднувальна функція для значень функції успішності.

Рішенням для технологічної проблеми з ієрархічними мітками TP_j^{Hrch} будемо вважати таке присвоєння ψ , що значення кожної функції успішності $SF^i(\text{ConstrSyst}_i \psi)_{i=1..k_{\max}}$ є максимальним:

$\forall \psi^1 \in \Psi_{\text{Err}_{TP_j^{\text{Hrch}}}}^{\text{Hrch}} \exists i_1$ таке, що:

$$\begin{aligned} \forall i < i_1 : [SF(\text{ConstrSyst}_i \psi) \leq_w SF(\text{ConstrSyst}_i \psi^1)] \wedge \\ \wedge [SF(\text{ConstrSyst}_i \psi) <_w SF(\text{ConstrSyst}_i \psi^1)], i, i_1 = 1..k_{\max} \end{aligned} \quad (29)$$

Згідно з введеними впорядкуваннями рівень ConstrSyst_1 логічно вважати найбільш важливим, а його ступінь задоволення найбільш максимальним:

$$SD(\text{ConstrSyst}_1) \rightarrow [\forall c_k, c_k \in \text{ConstrSyst}_1, \psi \models c_k, k = 1..i_k]. \quad (30)$$

Таким чином успішність присвоєнь можна оцінювати по рівнях ієрархії:

$$SF(\text{ConstrSyst}_{TP_j^{\text{Hrch}}}^{\text{Hrch}} \psi) = \oplus_{SF} SF[\text{ConstrSyst}_i \psi]_{i=1..k_{\max}}. \quad (31)$$

Згідно з наведеними вище функціями успішності отримуватиме додаткові інтерпретації, а саме:

1) успішність по вагових сумах:

$$SF(\text{ConstrHrch}_{TP_j^{\text{Hrch}}}^1 \psi) = \sum_{c_i \in \text{ConstrHrch}_{TP_j^{\text{Hrch}}}^1} [gl^{\text{Constr}}(c_i) SF(c_i \psi)]_{i=1..i_{\max}}. \quad (32)$$

2) успішність в найгіршому випадку:

$$SF(\text{ConstrHrch}_{TP_j^{\text{Hrch}}}^1 \psi) = \min_{c_i \in \text{ConstrHrch}_{TP_j^{\text{Hrch}}}^1} [gl^{\text{Constr}}(c_i) SF(c_i \psi)]_{i=1..i_{\max}}. \quad (33)$$

Виконаємо оцінку успішності окремих (виділених) обмежень на основі введеної ідеї глобальних міток $(gl^{Constr}(c), SF(c\psi))$: $SF(ConstrHrch_{TP_j}^1 \psi) = [(gl^{Constr}(c_1)SF(c_1\psi)), \dots, (gl^{Constr}(c_i)SF(c_i\psi))]$ для $ConstrHrch_{TP_j}^1 = \{c_1, \dots, c_i\}_{i=1..k_{max}} \subseteq ConstrHrch_{TP_j}^{Hrch}$.

Отримані результати дозволяють вводити рішення технологічної проблеми на основі обмежень з ієрархічними мітками шляхом обчислення функції успішності для локальних обмежень:

$$\begin{aligned} Sol(TP_j^{Hrch}) &= [(l_1^{set}, err_1), \dots, (l_k^{set}, err_k)] <_{l^{set}} [(l_1^{set'}, err_1'), \dots, (l_k^{set'}, err_k')] \equiv \\ &\equiv (\exists i_1 : err_{i_1} < err_{i_1}') \wedge (\forall i_2 : l_{i_2}^{set} \geq_R l_{i_2}^{set'} \Rightarrow err_{i_2} \leq err_{i_2}') \end{aligned} \quad (34)$$

Таким чином, контроль пар значень $(gl^{Constr}(c_i), SF(c_i\psi))$ дозволяє також виконувати контроль задоволених обмежень присвоєнням ψ :

$$[gl^{Constr}(c_i), SF(c_i\psi)] | SF(c_i\psi) = 0 \Big|_{\forall i, i=1..k_{max}} \vdash [\psi \vdash ConstrSyst_{TP_j}^i]. \quad (35)$$

За аналогією з існуючою відповідністю між множинами нечітких міток та технологічними проблемами на основі нечітких обмежень: $L_{set}^{fuzzy} \xleftarrow{def} [TP_j^{fuzzy}]^{set}$ можна описати відповідність між ієрархічними мітками та ієрархіями обмежень для технологічних проблем $L_{set}^{Hrch} \xleftarrow{def} ConstrHrch_{TP_j}$.

Для технологічної проблеми з ієрархічними мітками $TP_j^{Hrch} = (Err_{TP_j}^{Hrch}, Err_{TP_j}^{Domain}, ConstrHrch_{TP_j}^R, ([0..1] \subseteq R, \geq, \oplus_{l_{Hrch}^{set}}, l_{Hrch}^{set}))$ і заданою ієрархією обмежень $ConstrHrch_{TP_j} = \bigcup_{i=1}^{k_{max}} ConstrSyst_i$, присвоєння $\psi \in \Psi_{Err_{TP_j}^{Hrch}}$ з функцією $gl^{Constr}(c_i)$ як функції обчислення вагових значень обмежень, можна розглядати як рішення технологічної проблеми TP_j^{Hrch} для класу з функцією успішності для вагових сум та класу “краще рішення по вагових сумах”.

Нехай задано технологічну проблему з неупорядкованою системою міток $TP_j^{L^{set}} = (Err_{TP_j}^{L^{set}}, Err_{TP_j}^{Domain}, ConstrSyst_{TP_j}^U, (L^{set}, <, \oplus_{c,c_j}^{i \neq j}), l)$, де $Err_{TP_j}^{L^{set}}$ і $ConstrSyst_{TP_j}^U$ – неупорядковані домени змінних та обмежень, $l \in L^{set}$ – представлення міток, $\oplus_{c,c_j}^{i \neq j}$ – з'єднувальна функція для обмежень з неупорядкованими мітками. Введемо динамічну глобальну мітку змінної $dgl_W^{Constr}(err)$ – яка виконуватиме з'єднання міток змінної в усіх обмеженнях $ConstrSyst_{TP_j}^U \psi$ де вона зустрічається:

$$dgl_W^{Constr}(err_i) : \Psi_W \rightarrow L^{set}, \quad dgl_W^{Constr}(err_i \psi) = \bigoplus_{(c \in ConstrSyst_{TP_j}^U) \wedge (err_i \in W \psi_{(c,\psi)})} l(c_i, err_i). \quad (36)$$

В процесі пошуку рішення для присвоєння $\psi : (e_1, e_2, \dots, e_n)$ на кожному кроці множина змінних e впорядкованою згідно з виконаними присвоєннями $\overbrace{(e_1, e_2, \dots, e_k, e_{k+1}, \dots, e_n)}^{sat.}$, тому саме використання динамічних міток дозволяє впорядковувати решту змінних, яким ще не були присвоєнні значення.

Висновки. Розроблено технологію контролю процесу рішення нештатних технологічних ситуацій, що виникають в процесі буріння нафтових та газових свердловин засобами інтелектуальної системи на основі обмежень, шляхом формалізації та дослідження отриманого простору технологічних проблем на основі оціночних функцій, що дозволяє класифікувати та аналізувати помилки, шляхом зіставлення поточного технологічного рішення з закладеними в системі ієрархіями обмежень, що регулюється діалогами зворотного зв'язку. Запропоновано представлення технологічної проблеми з частковим рішеннями базується на основі таких складових як простір технологічної проблеми, метрика простору, ідеальне рішення, вагові значення по задоволених обмеженнях, вагові значення по порушених технологічних обмеженнях. За допомогою введеної ідеальної функції та функції обчислення вагових значень виконується контроль процесів послаблення та посилення формулювань початкової технологічної проблеми в її просторі. Показано, що технологічну проблему з накладеними обмеженнями з оцінками можна розглядати як технологічну проблему з частковими рішеннями, якщо для кожного обмеження можна ввести певний домен, що відповідатиме його простору та виконати побудову метричної функції для просторів обмежень на основі базової з'єднувальної функції для введених просторів задавши структуру механізму послаблення або посилення формулювання технологічної проблеми як метричної різниці між відповідними ієрархіями.

Список використаної літератури:

1. Семенцов Г.Н. Автоматизація процесу буріння свердловин : навч. посібник / Г.Н.Семенцов. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 1997. – 300 с.
2. Автоматизації технологічних процесів у нафтовій і газовій промисловості : навч. посібник / Г.Н. Семенцов, Я.Р. Козуч, Я.В. Куровець, М.М. Дранчук. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2009. – 300 с.
3. Горбійчук М.І. Оптимізація процесу буріння глибоких свердловин : навч. посібник / М.І. Горбійчук, Г.Н. Семенцов. – Івано-Франківськ : Факел, 2003. – 493 с.
4. Ясов В.Г. Осложнения и аварии при бурении нефтяных и газовых скважин : учебн. пособие / В.Г. Ясов. – Івано-Франковск : ИФДТУНГ, 2004. – 207 с.
5. Вовк Р.Б. Система інтелектуальної підтримки прийняття рішень при контролі технологічних параметрів / Р.Б. Вовк, В.І. Шекета, В.Д. Мельник // *Методи і прилади контролю якості*. – 2012. – № 29. – С. 119–129.
6. Вовк Р.Б. Подання та оброблення технологічних знань про процес буріння на основі обмежень / Р.Б. Вовк, В.Д. Мельник, Л.М. Гобир // *Науковий вісник Івано-Франківського нац. тех. ун-ту нафти і газу*. – 2013. – № 1 (34) – С. 73–81.
7. Tsang E. Foundations of Constraint Satisfaction / Tsang E. // Academic Press. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.brazil.net/edward/FCS.html>.
8. Kumar V. Algorithms for Constraint-Satisfaction Problems / Kumar V. // *AI Magazine*. – 1992. – Pp. 32–44 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.aaai.org/ojs/index.php/ai-magazine/article/view/976/894>.
9. Hirayama K. Distributed partial constraint satisfaction problem. Principles and Practice of Constraint Programming-CP97/ Hirayama K., Yokoo M. – Vol. 1330. – 1997. – Pp. 222–236 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.103.5350&rep=rep1&type=pdf>.
10. Schiex T. Valued constraint satisfaction problems / Schiex T., Fargier H., Verfaillie G. // *Proc. of the 14-th int. conf. on AI*. – Pp. 631–637. – August 20–25, 1995. – Montreal, Canada [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.51.8165&rep=rep1&type=pdf>.

ВОВК Роман Богданович – кандидат технічних наук, доцент кафедри програмного забезпечення автоматизованих систем Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

Наукові інтереси:

– інтелектуальні системи, системи підтримки прийняття рішень в процесі буріння нафтових і газових свердловин з використанням концепції представлення та задоволення обмежень (CSP).

Тел.: +38(097)753–90–22.

Email: wolf@wolf.if.ua.

Стаття надійшла до редакції 27.09.2013