

МОДЕЛЮВАННЯ СТРУКТУРИ ТА ФУНКЦІОНАЛЬНОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОБЛЕМ НА ОСНОВІ ОБМЕЖЕНЬ

***Анотація.** Представлено формальне обґрунтування означень технологічної проблеми з ваговими, ймовірнісними, можливісними коефіцієнтами та введеною мірою необхідності, що дозволяє оперувати з характеристиками ступеня задоволення та відношень впорядкування по вагових коефіцієнтах для виділеної множини станів технологічної проблеми з накладеною ієрархією обмежень. Описано процедуру побудови утворення фактичного формулювання технологічної проблеми на множині її потенційно недообмежених або надобмежених підпроблем.*

***Ключові слова:** технологічна проблема, обмеження, вагові коефіцієнти, ступінь задоволення, ймовірність, міра можливості.*

***Аннотация.** Представлено формальное обоснование определений технологической проблемы с весовыми, вероятностными, возможностью коэффициентами и введенной мерой необходимости, что позволяет оперировать с характеристиками степени удовлетворения и отношений упорядочивания по весовым коэффициентам для выделенного множества состояний технологической проблемы с иерархией ограничений. Описана процедура построения фактической формулировки технологической проблемы на множестве ее потенциально недостаточно ограниченных или сверхограниченных подпроблем.*

***Ключевые слова:** технологическая проблема, ограничения, весовые коэффициенты, степень удовлетворения, вероятность, мера возможности.*

***Abstract.** Formal substantiation of definitions of a technological problem with weight, probability and possibility coefficients and introduced necessity measure is presented, which allows us to operate with satisfaction degree characteristics and ordering relations on weights for selected technological problem states with imposed constraints hierarchy. A procedure of actual formulation of a technological problem on the set of its potential under-constrained or over-constrained sub-problems is described.*

***Keywords:** technological problem, constraints, weights, satisfaction degree, probability, possibility.*

1. Вступ

Однією з актуальних проблем штучного інтелекту та інтелектуальних систем є проблема інформаційно-пошукових задач на основі обмежень [1–3]. В дослідженнях теорії та практики методів та засобів представлення й задоволення обмежень на сьогоднішній день розвинуто ряд ефективних методик і технік, найбільш важливими з яких є метод вагових коефіцієнтів; метод вартісних коефіцієнтів; методи на основі оптимізаційних технік. З точки зору базового формалізму задач CSP (constraints satisfaction problem), дані методики працюють шляхом звуження відповідних доменів, максимізації або мінімізації значень для кортежів присвоєнь у введених множинах, системах та ієрархіях обмежень. Також деякі методики дозволяють контролювати кількість задоволених та порушених обмежень. У даному випадку концепція рішення вводиться як інтерпретація виконаного присвоєння з точки зору його достатності або оптимальності. В дослідженнях [4–6] інтерпретація рішення виконується через деякий клас присвоєнь на основі центрального елемента – помилок, що виникають у процесі рішення, тобто, такий спосіб реалізації дозволяє зв'язувати правила та обмеження. Основне завдання, яке вирішувалося при формальному обґрунтуванні побудованого розширення, полягає в дослідженні можливості реалізації інтелектуальних функцій системи, можливості реалізації системи на основі обмежень у вигляді інтелектуальної системи на основі правил. Тому отримане формальне представлення слід класифікувати як представлення гібридної інтелектуальної системи на основі обмежень та правил. Сильною стороною використання правил є можливість привнесення в систему

класичних методів інтелектуалізації. Відповідно сильною стороною використання обмежень є можливість організації бази знань у формі представлень з природно-мовною інтерпретацією. Тому в досліджуваному випадку цікавим є також введення ступеня зв'язаності (послідовності) рішення технологічної проблеми (нештатні ситуації при бурінні нафти і газу) [7] у вигляді певного способу оцінювання простору оптимальних присвоєнь з накладеними обмеженнями. Для технологічних проблем на основі обмежень можна говорити про необхідність побудови деякої мінімаксної методики, що дозволяла б максимізувати кількість задоволених обмежень і відповідно мінімізувати кількість порушених обмежень, що дозволить формувати ефективні інтелектуальні стратегії автоматизованої системи.

Проте невирішеною задачею є дослідження структури та функціонування технологічних проблем на основі обмежень і побудови відповідних ймовірнісних та можливісних інтерпретацій.

2. Обґрунтування формальної структури обмежень та вагових коефіцієнтів для технологічних проблем

Метою даної статті є представлення формально-логічної структури технологічних проблем на основі обмежень з введеними ваговими коефіцієнтами.

Введення концепції ступеня задоволення (*sd – satisfaction degree*) для випадку технологічних проблем виконується з тією ж метою, що і у випадку класичних інформаційно-пошукових задач – забезпечення можливості порівняння та оцінки присвоєнь виділених класів. Аналіз технологічних проблем на рівні пошукових задач зводиться до виділення множини технологічних помилок, класифікації їх у вигляді систем та ієрархій і встановлення відповідних обмежень, множин, систем та ієрархій обмежень, порушення яких є джерелом виникнення нештатних технологічних ситуацій. Також у пропонованому підході розширена інтерпретація рішення для випадку технологічних проблем, оскільки завдання інтелектуальної системи полягає не стільки в пошуку рішення технологічної проблеми на основі методології обмежень та хибних рішень [8, 9], а в більшій мірі в забезпеченні контролю процесу формування рішення на основі виділення й аналізу помилок оператора.

Означення 1. Як релевантне обмеження з ваговим коефіцієнтом до стану технологічної проблеми $TP.TS$ будемо розглядати кортеж $(c^r, weight(c^r))$, де $c^{relevant} = c^{satisfied} \vee c^{violated}$ задається в термінах базових означень для випадку статичних та динамічних технологічних проблем і $weight(c^r) \in W^{set}$ задає ваговий коефіцієнт обмеження c^r у вигляді елемента впорядкованої множини вагових значень W^{set} . Як правило, множина W^{set} представляється проміжком $[0..1]$. Відношення впорядкування J $weight$ задає такий спосіб впорядкування множини W^{set} , згідно з яким менші вагові коефіцієнти представляють значення менш важливих обмежень. Очевидно, що для досягнення ефективної функціональності інтелектуальної системи доцільним є виділення вагових коефіцієнтів обмежень, що задовольняються $weight(c^s)$, і вагових коефіцієнтів для обмежень, що порушуються $weight(c^v)$:

$$TP_j.TS_k \rightarrow ConstrSet^{sat.} \rightarrow W^{sat.} = \{ weight(C_{l_1}^S) \}_{l_1 \in 1..n_1},$$

$$TP_j.TS_k \rightarrow ConstrSet^{viol.} \rightarrow W^{viol.} = \{ weight(C_{l_2}^V) \}_{l_2 \in 1..n_2}.$$

Означення 2. Станом технологічної проблеми на основі обмежень з ваговими коефіцієнтами $TP_j.TS_k^{weight}$ будемо вважати формальну структуру, що складається з множини обмежень з ваговими коефіцієнтами, які задовольняються при вирішенні даного стану $TP_j.TS_k \rightarrow ConstrSet_{W^{sat.}}^{TP_j.TS_k}$ і не призводять до виникнення помилок та множини обмежень з

ваговими коефіцієнтами, які порушуються $TP_j.TS_k \rightarrow ConstrSet_{W^{viol}}^{TP_j.TS_k}$ і є причиною виникнення помилок з множини $Err_{TP_j.TS_k}^{Set}$, що описує помилки, які виникли при вирішенні стану технологічної проблеми:

$$TP_j.TS_k^{weight} = (Err_{TP_j.TS_k}^{Set}, Err_{TP_j.TS_k}^{Domain}, ConstrSet_{W^{sat}}^{TP_j.TS_k} \cup ConstrSet_{W^{viol}}^{TP_j.TS_k}),$$

де $Err_{TP_j.TS_k}^{Domain}$ – домен можливих помилок, які можуть виникнути при вирішенні стану технологічної проблеми $TP_j.TS_k$.

Елементи множини $Err_{TP_j.TS_k}^{Set}$ можуть бути теж впорядковані на основі відношення \leq_{weight} , що дозволить ранжувати помилки їх важливості (значимості). Впорядкування множини помилок призведе до утворення системи помилок $Err_{TP_j.TS_k}^{Syst.} = (Err_{TP_j.TS_k}^{Set}, \leq_{weight^1})$. Аналогічним чином (шляхом впорядкування по важливості на основі введення відношення з ваговими коефіцієнтами) може бути отримано систему обмежень, що задовольняються, та систему обмежень, що порушуються, для виділеного стану технологічної проблеми:

$$ConstrSyst_{W^{sat}}^{TP_j.TS_k} = (ConstrSet_{W^{sat}}^{TP_j.TS_k}, \leq_{weight^2}),$$

$$ConstrSyst_{W^{viol}}^{TP_j.TS_k} = (ConstrSet_{W^{viol}}^{TP_j.TS_k}, \leq_{weight^3}).$$

Означення 3. Технологічною проблемою на основі обмежень з ваговими коефіцієнтами LP_j^{weight} будемо вважати формальну структуру, утворену таким чином:

$$TP_j^{weight} = (Err_{TP_j}^{Hrch}, Err_{TP_j}^{Domain}, ConstrHrch_{W^{sat}}^{TP_j} \cup ConstrHrch_{W^{viol}}^{TP_j}),$$

де $Err_{TP_j}^{Hrch} = \bigcup_{k=1..k_{max}} Err_{TP_j.TS_k}^{Syst.}$ – ієрархія помилок для технологічної проблеми TP_j , k_{max} – кількість станів технологічної проблеми; $Err_{TP_j}^{Domain} = \bigcup_{k=1..k_{max}} Err_{TP_j.TS_k}^{Domain}$ – домен можливих помилок для технологічної проблеми TP_j , що утворюється об'єднанням доменів можливих помилок для виділених станів технологічної проблеми; $ConstrHrch_{W^{sat}}^{TP_j} = \bigcup_{k=1..k_{max}} ConstrSyst_{W^{sat}}^{TP_j.TS_k}$ – ієрархія задоволених обмежень при вирішенні технологічної проблеми TP_j , утворена шляхом об'єднання відповідних систем обмежень для виділених станів технологічної проблеми; $ConstrHrch_{W^{viol}}^{TP_j} = \bigcup_{k=1..k_{max}} ConstrSyst_{W^{viol}}^{TP_j.TS_k}$ – ієрархія порушених обмежень при вирішенні технологічної проблеми TP_j , утворена шляхом об'єднання відповідних систем обмежень для виділених станів технологічної проблеми.

Означення 4. Розглянемо технологічну проблему на основі обмежень з ваговими коефіцієнтами $TP_j^{weight} = (Err_{TP_j}^{Hrch}, Err_{TP_j}^{Domain}, ConstrHrch_{W^{sat}}^{TP_j} \cup ConstrHrch_{W^{viol}}^{TP_j})$. Ступенем задоволення sd для присвоєння $\psi \in \Psi_{Err_{TP_j}^{Hrch}}$ будемо вважати різницю суми вагових коефіцієнтів всіх обмежень, що задовольняються, і суми вагових коефіцієнтів всіх обмежень, що порушуються даним присвоєнням ψ , тобто,

$$\forall \psi \in \Psi_{Err_{TP_j}^{Hrch}} : sd(\psi) = \sum_{l_1=1}^{k_{max}} \left[\sum_{l_2=1}^{l_1=n_1^1 \dots n_{k_{max}}^1} (weight(C_{l_2}^S)) \right]_{l_1} - \sum_{l_1=1}^{k_{max}} \left[\sum_{l_2=1}^{l_1=n_1^2 \dots n_{k_{max}}^2} (weight(C_{l_2}^V)) \right]_{l_1},$$

$$k_{max}, n_1^1, n_1^2, n_{k_{max}}^1, n_{k_{max}}^2 \in N.$$

Означення 5. Ступенем істинності $Sol^{true}(TP_j^{weight})$ розв'язку технологічної проблеми на основі обмежень з ваговими коефіцієнтами TP_j^{weight} (що формується у вигляді присвоєння ψ) будемо вважати суму вагових коефіцієнтів обмежень, які задовольняються (в термінах означення 4).

Означення 6. Ступенем хибності $Sol^{false}(TP_j^{weight})$ розв'язку технологічної проблеми на основі обмежень з ваговими коефіцієнтами TP_j^{weight} (що формується у вигляді присвоєння ψ) будемо вважати суму вагових коефіцієнтів обмежень, які порушуються.

Застосування ймовірнісного підходу [10] для введеного формального представлення технологічних проблем на основі обмежень дає можливість кількісної оцінки релевантності виділених обмежень поточній технологічній проблемі. Такий підхід характеризуватиметься введенням невизначеності нового типу по відношенню до невизначеності, сформульованої в означеннях 1 – 6, яка описувалась формальним підходом на основі вагових коефіцієнтів, що дозволяє моделювати процес порушення та задоволення обмежень на рівні множин, систем та ієрархій.

Означення 7. Технологічною проблемою на основі обмежень і імовірністю TP_j^{Prb} будемо вважати розширення класичного означення технологічної проблеми з введеною інтерпретацією ймовірності обмеження як ступеня його релевантності технологічній проблемі. Якщо всі обмеження у введених множинах, системах та ієрархіях є гарантовано релевантними, то очевидно, що формулювання технологічної проблеми на основі обмежень з імовірністю не буде відрізнятися від формулювань означень, викладених вище. Розглянемо випадок, коли не всі обмеження є гарантовано релевантними, тобто існує хоча б одне нерелевантне обмеження. Тоді

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

де $Err_{TP_j}^{Hrch}$ – ієрархія помилок до технологічної проблеми, TPS_k – k -тий стан технологічної проблеми, k_{max} – кількість станів технологічної проблеми, $[Constr_j^{Hrch}]_{Prb}^S = \bigcup_{k=1..k_{max}} [Constr_k^{Syst}]_{Prb}^S = \{c_1^1 : rd_{11}^{TPS_k}, c_2^1 : rd_{12}^{TPS_k} \dots c_{n_1}^1 : rd_{1n_1}^{TPS_k}\}_{k, n_1, 1n_1 ON}$ – ієрархія задоволених обмежень з введеними ймовірнісними коефіцієнтами релевантності для j технологічної проблеми, $[Constr_j^{Hrch}]_{Prb}^V = \bigcup_{k=1..k_{max}} [Constr_k^{Syst}]_{Prb}^V = \{c_1^2 : rd_{21}^{TPS_k}, c_2^2 : rd_{22}^{TPS_k} \dots c_{n_2}^2 : rd_{2n_2}^{TPS_k}\}_{k, n_2, 2n_2 ON}$ – ієрархія порушених обмежень з введеними ймовірнісними коефіцієнтами релевантності для j -тої технологічної проблеми.

У загальному випадку ми можемо отримати три види фактичного формулювання технологічної проблеми з обмеженнями та ймовірністю:

$$1) TP_j^1 = (Err_{TP_j}^{Hrch}, \bigcup_{k=1..k_{max}} TPS_k, C_1^S) - \text{випадок, коли всі релевантні обмеження задоволюються;}$$

2) $\mathcal{TPF}^2 = (Err_{\mathcal{TP}_j}^{Hrch.}, \bigcup_{k=1..k_{max}} \mathcal{TPS}_k, C_2^V)$ – випадок, коли всі релевантні обмеження пору-

шуються;

3) $\mathcal{TPF}^3 = (Err_{\mathcal{TP}_j}^{Hrch.}, \bigcup_{k=1..k_{max}} \mathcal{TPS}_k, C_3^{S \cup V})$ – випадок, коли частина релевантних обмежень

задовольняється, а частина порушується.

Тепер, відповідно, можна виконати обчислення ймовірнісних значень для деякого довільного виділеного обмеження $c_i, i \in N$:

$$\begin{aligned} 1) Prb(c_i \in C_1^{\mathcal{TPF}_1}) &= Prb(c_i \in [Constr_j^{Hrch.}]_{Prb.}^S) = \\ &= Prb(c_i \text{ in } \bigcup_{k=1..k_{max}} \{c_1^1 : rd_{11}^{TPS_k}, \dots, c_{n_1}^1 : rd_{1n_1}^{TPS_k}\}_{k, n_1, 1n_1 \in N}); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 2) Prb(c_i \in C_2^{\mathcal{TPF}_2}) &= Prb(c_i \in [Constr_j^{Hrch.}]_{Prb.}^V) = \\ &= Prb(c_i \text{ in } \bigcup_{k=1..k_{max}} \{c_1^2 : rd_{21}^{TPS_k}, \dots, c_{n_2}^2 : rd_{2n_2}^{TPS_k}\}_{k, n_2, 2n_2 \in N}); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 3) Prb(c_i \in C_3^{\mathcal{TPF}_3}) &= Prb(c_i \in [Constr_j^{Hrch.}]_{Prb.}^S \cup [Constr_j^{Hrch.}]_{Prb.}^V) = \\ &= Prb(c_i \text{ in } \bigcup_{k=1..k_{max}} \{c_1^1 : rd_{11}^{TPS_k}, \dots, c_{n_1}^1 : rd_{1n_1}^{TPS_k}\} \cup \{c_1^2 : rd_{21}^{TPS_k}, \dots, c_{n_2}^2 : rd_{2n_2}^{TPS_k}\}_{k, n_1, n_2, 1n_1, 2n_2 \in N}). \end{aligned}$$

З точки зору практичної імплементації, інтерес представляють ймовірності, більші за нуль, що відповідає тому факту, що нерелевантні обмеження не включаються в представлення проблеми. З точки зору класичної теорії ймовірності, релевантність двох різних обмежень розглядається як дві незалежні ймовірнісні події, що дозволяє аналізувати процес посилення та послаблення обмежень для множин, які задовольняються, та множин, що порушуються незалежно від інших входжень даних множин. Оскільки фактичне формулювання технологічної проблеми з обмеженнями та ймовірністю може бути тільки одного з трьох видів, то, відповідно, для деяких двох обмежень C_i та C_j можна розглядати один з трьох видів ймовірнісної інтерпретації:

$$Prb((c_i \in C_1^{\mathcal{TPF}_1}) \wedge (c_j \in C_1^{\mathcal{TPF}_1})) = Prb(c_i \in C_1^{\mathcal{TPF}_1}) \times Prb(c_j \in C_1^{\mathcal{TPF}_1}),$$

$$Prb((c_i \in C_2^{\mathcal{TPF}_2}) \wedge (c_j \in C_2^{\mathcal{TPF}_2})) = Prb(c_i \in C_2^{\mathcal{TPF}_2}) \times Prb(c_j \in C_2^{\mathcal{TPF}_2}),$$

$$Prb((c_i \in C_3^{\mathcal{TPF}_3}) \wedge (c_j \in C_3^{\mathcal{TPF}_3})) = Prb(c_i \in C_3^{\mathcal{TPF}_3}) \times Prb(c_j \in C_3^{\mathcal{TPF}_3}).$$

Ймовірнісний підхід до технологічних проблем з накладеними обмеженнями дозволяє отримати фактичне представлення структури процесу пошуку рішень у вигляді множин та систем гарантовано релевантних обмежень.

Розглянемо ймовірнісну технологічну проблему з накладеними обмеженнями $TP_j^{Prb.} = (Err_{TP_j}^{Hrch.}, \bigcup_{k=1..k_{max}} TPS_k, [Constr_j^{Hrch.}]_{Prb.}^S, [Constr_j^{Hrch.}]_{Prb.}^V)$. Нехай задано також деяке

фактичне формулювання $\mathcal{TPF}_j = (Err_{\mathcal{TPF}_j}^{Hrch.}, \bigcup_{k=1..k_{max}} \mathcal{TPS}_k, [Constr_j^{Hrch.}]_{\mathcal{TPF}_j}^S, [Constr_j^{Hrch.}]_{\mathcal{TPF}_j}^V)$. Оче-

видно,

що

$$[Constr_j^{Hrch.}]_{\mathcal{TPF}_j}^S \cup [Constr_j^{Hrch.}]_{\mathcal{TPF}_j}^V = [Constr_j^{Hrch.}]_{\mathcal{TPF}_j}^R$$

$M[Constr_j^{Hrch.}]_{Prb.}^S \text{ И } [Constr_j^{Hrch.}]_{Prb.}^V = [Constr_j^{Hrch.}]_{Prb.}^R$, тобто гарантовано релевантні обмеження утворюють підмножину ймовірно релевантних обмежень, що може бути використа-

но як основа для введення послаблень технологічної проблеми у вигляді підпроблем та посилень у вигляді надпроблем.

Означення 8. Визначення технологічної проблеми TP_j як фактичної \mathcal{TPF}_j є можливим у випадку, коли всі обмеження в $\bigcup_{\tilde{k}=1..k_{\max}} [Constr_{\mathcal{TPS}_{\tilde{k}}}^{Syst.}]_{\mathcal{TPF}}^R$ є релевантними:

$$\begin{aligned} prb(TP_j) = Prb(TP_j = \mathcal{TPF}_j) = & \left[\prod_{k=1}^{k_{\max}} \{ rd_{i_1 j_1}^{TPS_k} / c_{j_1}^{i_1} \in [Constr_{TPS_k}^{Syst.}]_{\mathcal{TPF}}^S \} \times \right. \\ & \times \left. \prod_{k=1}^{k_{\max}} \{ (1 - rd_{i_1 j_1}^{TPS_k}) / c_{j_1}^{i_1} \in ([Constr_{TPS_k}^{Syst.}]_{Prb}^R \setminus [Constr_{TPS_k}^{Syst.}]_{\mathcal{TPF}}^S) \} \right] \cup \\ & \cup \left[\prod_{k=1}^{k_{\max}} \{ rd_{i_2 j_2}^{TPS_k} / c_{j_2}^{i_2} \in [Constr_{TPS_k}^{Syst.}]_{\mathcal{TPF}}^V \} \times \right. \\ & \left. \times \prod_{k=1}^{k_{\max}} \{ (1 - rd_{i_2 j_2}^{TPS_k}) / c_{j_2}^{i_2} \in ([Constr_{TPS_k}^{Syst.}]_{Prb}^R \setminus [Constr_{TPS_k}^{Syst.}]_{\mathcal{TPF}}^V) \} \right], \end{aligned}$$

де $rd_{i_1 j_1}^{TPS_k}$ – ймовірнісне значення релевантності обмеження $c_{j_1}^{i_1}$, $i_1, i_2, j_1, j_2 \in N$.

Згідно з класичним підходом, який застосовується в CSP [1] для технологічної проблеми TP_j , можна виділити ряд підпроблем: $[TP_j^{sub}]_i \subset TP_j, i = 1..i_{\max}$. Оскільки для технологічної проблеми ми ввели також множину станів, то введені стани теж можна розглядати як множину підпроблем $TP_j.TPS_k, k = 1..k_{\max}, \{TPS_k\}_{k=1..k_{\max}} \leq TP_j$. Множину підпроблем (станів) будемо розрізняти за ступенем послідовності.

Означення 9. Послідовну підпроблему TP_j^{sub} для технологічної проблеми TP_j будемо вважати максимально послідовною в TP_j , якщо кожна її надпроблема $TP_j^{over} = [TP_j^{sub}] \cup [c_m \in ConstrHrch_{TP_j}^R]_{m=1,2..}$ буде непослідовною.

Згідно з даним означенням, кожне рішення технологічної проблеми з накладеними обмеженнями $Sol^1(TP_j, ConstrHrch_{TP_j}^R)$ буде відповідно рішенням для всіх її підпроблем та станів:

$$Sol^1 \cong \bigcup_{i=1..i_{\max}} [Sol^2]; Sol^1 \cong \bigcup_{k=1..k_{\max}} [Sol^3]; Sol^2 [TP_j^{sub}]_i, i = 1..i_{\max}; Sol^3 [TPS_k]_k, k = 1..k_{\max},$$

де Sol_i^2 – рішення для i -тої підпроблеми, Sol_k^3 – рішення для k -го стану.

Якщо $ConstrHrch_{TP_j}^R$ буде послідовною ієрархією обмежень, то тоді фактичне формулювання технологічної проблеми з даною ієрархією обмежень $\mathcal{TPF}_j^{ConstrHrch_{TP_j}^R}$ буде максимально послідовним. Проте, якщо ієрархія обмежень не є гарантовано послідовною, тоді ймовірність послідовності формулювання \mathcal{TPF}_j можна визначити за формулами:

$$\begin{aligned} Prb(\mathcal{TPF}_j^{consist.}) &= \sum_{i=1}^{i_{\max}} \{ prb([TP_j^{sub}]_i | [TP_j^{sub}]_i^{consist.}) \}, \\ Prb(\mathcal{TPF}_j^{consist.}) &= \sum_{k=1}^{k_{\max}} \{ prb(TP_j.TPS_k | TP_j.TPS_k^{consist.}) \}. \end{aligned}$$

Формальна теорія Заде та концепції можливісної логіки [11] дозволяють розглядати введені нами формалізми технологічних проблем на основі обмежень з точки зору імплементації ступенів впевненості (преференцій) як можливісних міток для множин присвоєнь $\Psi_{Err_{TP_j}^{Hrch}}$. В нашому випадку такий підхід дозволить отримати кількісні характеристики можливості та необхідності на множині обмежень та присвоєнь. Важливою перевагою даного підходу є також оцінка можливісного задоволення обмежень у процесі виконання присвоєнь.

Означення 10. Для заданої множини $Err_{TP_j}^{Hrch}$ та множини можливих присвоєнь $\Psi_{Err_{TP_j}^{Hrch}}$ можливісним розподілом будемо вважати функцію $\mu : \Psi_{Err_{TP_j}^{Hrch}} \rightarrow [0,1]$.

Значення можливісного розподілу визначатиме можливий рівень задоволення технологічної проблеми TP_j .

Означення 11. Функцію μ будемо вважати нормованою, якщо існує таке присвоєння ψ , що $\max_{\psi \in \Psi_{Err_{TP_j}^{Hrch}}} \mu(\psi) = 1$. Відповідно ступінь субнормалізації для μ визначимо як величину $SND(\mu) = 1 - \max_{\psi \in \Psi_{Err_{TP_j}^{Hrch}}} \mu(\psi)$.

Нехай $ConstrHrch_{TP_j}^{pos}$ – множина всіх можливих обмежень стосовно деякої технологічної проблеми TP_j . Будемо виходити з припущення, що $ConstrHrch_{TP_j}^{pos} = ConstrHrch_{TP_j}^R \cup ConstrHrch_{TP_j}^{unR}$, де $ConstrHrch_{TP_j}^R$ – множина всіх релевантних обмежень, $ConstrHrch_{TP_j}^{unR}$ – множина нерелевантних обмежень до технологічної проблеми TP_j .

Означення 12. Мірою можливості PM_μ для можливісного розподілу μ будемо вважати функцію з $ConstrHrch_{TP_j}^{pos}$ в $[0,1]$, що визначається таким виразом:

$$PM_\mu(c) = \left[\max_{(\psi \in \Psi_{Err_{TP_j}^{Hrch}}) \wedge (\psi \models c, c \in ConstrHrch_{TP_j}^S)} (\mu(\psi), 0) \right] \vee \left[\max_{(\psi \in \Psi_{Err_{TP_j}^{Hrch}}) \wedge (\psi \models c, c \in ConstrHrch_{TP_j}^V)} (\mu(\psi), 0) \right].$$

Означення 13. Мірою необхідності NM_μ для можливісного розподілу μ будемо вважати функцію з $ConstrHrch_{TP_j}^{pos}$ в $[0,1]$, що визначається виразом:

$$NM_\mu(c) = \left[\min_{(\psi \in \Psi_{Err_{TP_j}^{Hrch}}) \wedge (\psi \not\models c, c \in ConstrHrch_{TP_j}^S)} (1 - \mu(\psi), 1) \right] \vee \left[\min_{(\psi \in \Psi_{Err_{TP_j}^{Hrch}}) \wedge (\psi \not\models c, c \in ConstrHrch_{TP_j}^V)} (1 - \mu(\psi), 1) \right].$$

На основі означень 12 і 13 можна зробити висновок, що міра необхідності обмеження виражатиме ступінь преференції задоволення або порушення обмежень (оскільки формули в означеннях є двоїстими: перший диз'юнкт визначає преференцію задоволення, другий – преференцію порушення). Наприклад, якщо для деяких двох обмежень $c_1, c_2 \in ConstrHrch_{TP_j}^{pos}$ ми матимемо $NM_\mu(c_1) > NM_\mu(c_2)$, то це означатиме, що задоволення (порушення) обмеження c_1 є більш преференційним, ніж задоволення обмеження c_2 .

Таким чином, з точки зору ефективності реалізації інтелектуальної системи, доцільним є використання обмежень зі ступенями преференції.

Означення 14. Для заданої множини обмежень $ConstrHrch_{TP_j}^{pos.}$ обмеженням зі значенням необхідності будемо вважати пару (c, pd) , де $c \in OConstrHrch_{TP_j}^S$ або $c \in OConstrHrch_{TP_j}^V$ є обмеженням, а $pd \in [0,1]$ є ступенем преференції.

3. Висновки

У даній статті виконано побудову формальної структури технологічної проблеми на основі обмежень з ваговими коефіцієнтами. Введені обмеження поділяються на множину обмежень з ваговими коефіцієнтами, які задовольняються при вирішенні поточного стану і не призводять до виникнення помилок, та на множину обмежень з ваговими коефіцієнтами, що порушуються і є причиною виникнення помилок. Застосування ймовірнісного підходу до отриманого формального представлення технологічних проблем на основі обмежень дає можливість кількісної оцінки релевантності виділених обмежень поточної технологічної проблеми, що дозволяє моделювати процес порушення та задоволення обмежень на рівні їх множин, систем та ієрархій. Інтерпретація ймовірності обмеження задається як ступінь його релевантності до технологічної проблеми. Формалізми технологічних проблем на основі обмежень, з точки зору імплементації ступенів впевненості преференцій як можливісних міток для множин присвоєнь, дозволяють отримати кількісні характеристики можливості та необхідності на множині обмежень і присвоєнь. Введення можливісного розподілу дає можливість визначати рівні задоволення технологічної проблеми.

Таким чином, міра необхідності обмеження виражатиме ступінь преференції задоволення або порушення обмежень. Тому, з точки зору ефективності реалізації інтелектуальної системи, доцільним є використання обмежень зі ступенями преференцій. Використання вагових коефіцієнтів дозволяє реалізацію формальної структури технологічних проблем у вигляді ієрархії помилок з використанням домену можливих помилок та ієрархії задоволених і порушених обмежень. З точки зору практичної цінності спроектованої системи, важливим є розгляд процесу задоволення обмежень на основі введеного ступеня, що обчислюється, як різниця суми вагових коефіцієнтів всіх обмежень, які задовольняються, та суми вагових коефіцієнтів всіх обмежень, що порушуються.

Подальші дослідження у даному напрямі будуть зосереджені на питаннях програмної реалізації отриманої формальної структури технологічних проблем, особливо з точки зору імплементації систем та ієрархій обмежень.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Tsang E. Foundations of Constraint Satisfaction / Tsang E. – London and San Diego: Academic Press, 1993. – 421 p.
2. Barták R. Constraint Processing / R. Barták, R. Dechter. – Morgan Kaufmann Publisher, 2003. – 210 p.
3. Випасняк Л.І. Графова інтерпретація інформаційних систем на основі баз даних та знань у рамках концепції задоволення обмежень та правил / Л.І. Випасняк, В.І. Шекета // Математичні машини та системи. – 2010. – № 4. – С. 82 – 88.
4. Вовк Р.Б. Формалізація сумарної моделі студента в інтелектуальній тьюторній системі на основі обмежень / Р.Б. Вовк, В.І. Шекета // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2009. – Т. 2. – С. 242 – 248.
5. Вовк Р.Б. Модель навчальної системи на основі підходу задоволення обмежень / Р.Б. Вовк // Системний аналіз та інформаційні технології: матеріали XI міжнар. наук.-техн. конф., (Київ, 26–30 травня 2009). – К.: НТУУ “КПІ”, 2009. – С. 276.

6. Melnyk V.D. Frame Based Approach to Construction of Intelligent System for Student Knowledge Control/ V.D. Melnyk, R.B. Vovk, M.M. Demchyna // Proc. of the X International Conf. TCSET'2010. – Lviv-Slavske, Ukraine, 2010. – P. 287.
7. Шавранський М.В. Система контролю для запобігання прихоплень бурильної колони в процесі буріння: дис. ... канд. техн. наук: 05.11.13 / Шавранський Михайло Васильович. – Івано-Франківськ, 2003. – 168 с.
8. Ohlsson S. Constraint-Based Knowledge Representation for Individualized Instruction / S. Ohlsson, A. Mitrovic. – University of Illinois at Chicago, 1998. – 22 p.
9. Mitrovic A. Experiences in Implementing Constraint-Based Modeling in SQL-Tutor / A. Mitrovic // Proc. of ITS'98. – Christchurch (New Zealand), 1998. – P. 414 – 423.
10. Fargier H. Uncertainty in constraint satisfaction problems: a probabilistic approach / H. Fargier, J. Lang // Symbolic and Quantitative Approaches to Reasoning and Uncertainty. European Conf. ECSQARU'93. – Granada, Spain, 1993. – P. 97 – 104.
11. Dubois D. Possibilistic logic / D. Dubois, J. Lang, H. Prade // Toulouse Institute of Computer Science Research. – New York: Oxford University Press, 1992. – 76 p.

Стаття надійшла до редакції 21.02.2011