

**МЕТОДОЛОГІЧНЕ І МАТЕМАТИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ ПЕРЕДБАЧЕННЯ
НА ОСНОВІ МОДИФІКОВАНОГО МЕТОДУ
МОРФОЛОГІЧНОГО АНАЛІЗУ**

І.О. САВЧЕНКО

Запропоновано системний підхід до дослідження задач, що виникають у процесі технологічного передбачення, за допомогою модифікованого методу морфологічного аналізу (ММА). Наведено формалізований математичний апарат застосування методу для їх розв'язання. Розглянуто одноетапну та двоетапну варіації ММА на основі експертного оцінювання, а також процедуру методу за наявності фіксованих параметрів морфологічної таблиці.

ВСТУП

У сучасному світі прогресивні технології відіграють основну роль у забезпеченні конкурентноздатності економіки. Здатність передбачити розвиток певних галузей або ринків є суттєвим фактором успішності як окремих підприємств, так і міст або держав. Крім того, враховуючи швидкоплинність подій у сучасному техногенному світі, під час планування стратегій на майбутнє необхідно враховувати не лише існуючі на даний момент проблеми, але й ті, які потенційно можуть виникнути. Це викликає постійну необхідність прийняття рішень для складних систем з людським фактором щодо їх можливої поведінки в майбутньому. Такий процес прийняття рішень формується за допомогою методології сценарного аналізу, що зводиться до застосування окремих методів якісного аналізу в певній послідовності зі встановленням чітко визначених взаємозв'язків між ними [1]. Складність задач, які виникають у цьому процесі, постійно збільшується, отже, методологічний апарат технологічного передбачення необхідно постійно вдосконалювати. Одним із потужних методів якісного аналізу з недостатньо розкритим потенціалом є ММА.

Методи морфологічного аналізу складних проблем у систематизованому вигляді були розроблені швейцарсько-американським астрофізиком і фахівцем з аерокосмонавтики Ф. Цвікі [2], як методи для впорядкування та дослідження повного набору відношень у багатовимірних комплексах задач, які не піддаються розрахунку. У подальшому метод був розширений і найчастіше використовувався різними дослідниками для створення та вдосконалення технічних систем [3–5]. Однак існують роботи, що використовують метод у галузі сценарного аналізу і вивчення майбутнього [6–11], зокрема, оцінювання підготовленості до катастроф, пов'язаних із небезпечними матеріалами [7]; аналіз геополітичної ситуації у світі через деякий проміжок часу [8]; дослідження терористичних загроз на атомній електростанції [9, 10] тощо.

Варто зазначити, що під час використання ММА для розв'язання задач передбачення практично не залучався математичний апарат, тобто кількісні процедури для оцінки елементів методу; відсутня чітка формалізація ММА для розв'язання задач технологічного передбачення; у задачах, що розглядались за допомогою ММА, раніше не враховувались ризики і параметр часу. Тому було вирішено розробити методологічне та математичне забезпечення використання модифікації ММА в задачах технологічного передбачення.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Запропонована така постановка задачі для застосування ММА в процесі технологічного передбачення:

Дано:

- множина альтернативних описів об'єкта (проблеми), що відрізняються за своєю структурою;
- множина альтернатив рішень, які доцільно враховувати в умовах проблеми, яка розглядається.

Потрібно:

- розробити методологічне і математичне забезпечення побудови моделі об'єкта з урахуванням зв'язків між його структурними елементами, ризиків, що виникають при різних реалізаціях об'єкта та змін, які відбуваються в об'єкті з часом;
- розробити формалізований апарат оцінювання результативності альтернатив рішень в умовах невизначеності та ризиків різної природи.

Для розв'язання поставленої задачі запропоновано системний підхід, структурна схема якого наведена на рисунку.

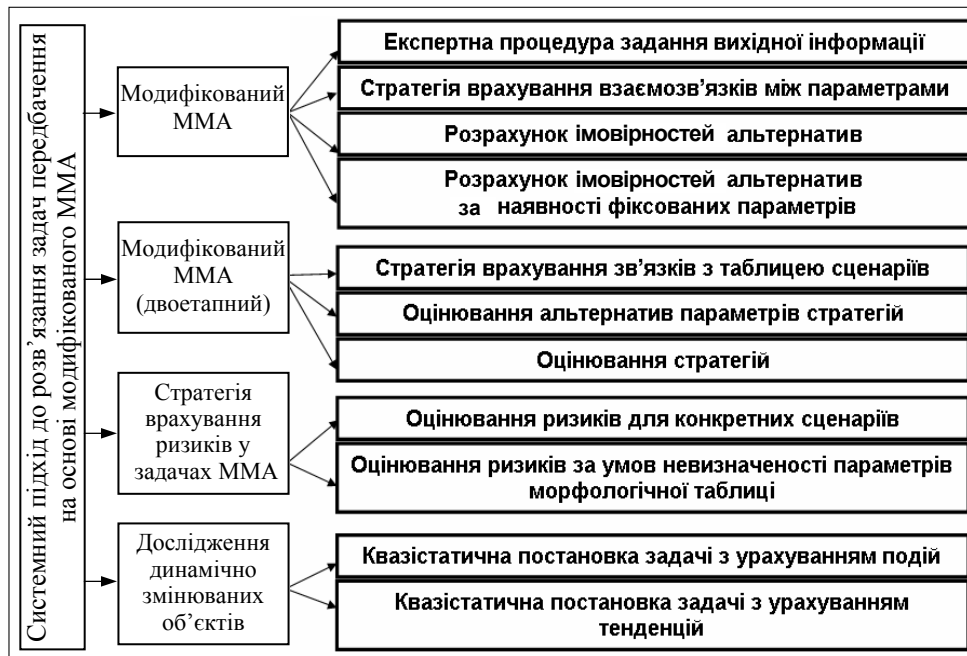


Рисунок. Структурна схема системного підходу до розв'язання задач передбачення на основі модифікованого ММА

Метою модифікованого ММА є оцінка всіх альтернатив параметрів морфологічної таблиці з урахуванням зв'язків між ними на основі експертного оцінювання. Ця інформація може бути використана в процесі технологічного передбачення [12]. При окремому застосуванні модифікованого ММА можна використовувати двохетапну процедуру для оцінювання засобами методу стратегій впливу на об'єкт, що розглядується. Крім того, структурованість методу дозволила розробити спеціальні підходи до оцінювання ризиків [13] і врахування параметра часу.

ЕКСПЕРТНА ПРОЦЕДУРА ЗАДАННЯ ВХІДНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

Основним об'єктом ММА є морфологічна таблиця. Вона складається з N характеристичних параметрів F_i , $i \in \overline{1, N}$. Кожному характеристичному параметру F_i відповідає множина альтернатив $a_j^{(i)}$, $j \in \overline{1, n_i}$. Конфігурацією морфологічної таблиці назвемо вектор $\{a_{j_1}^{(1)}, a_{j_2}^{(2)}, \dots, a_{j_N}^{(N)}\}$, що складається з альтернатив кожного характеристичного параметра таблиці. Вигляд морфологічної таблиці представлено в табл. 1.

Під час застосування ММА в задачах технологічного передбачення характеристичними параметрами, як правило, є фактори, стан яких характеризує стан проблеми в цілому; альтернативами характеристичних параметрів є альтернативні стани відповідних факторів, конфігурацією морфологічної таблиці є сценарій. Для деякої конкретної проблеми структура морфологічної таблиці визначається спеціалістами з технологічного передбачення, можливо, на основі даних, отриманих на етапі попереднього вивчення проблеми.

Таблиця 1. Морфологічна таблиця

F_1	F_2	...	F_N
$a_1^{(1)}$	$a_1^{(2)}$	...	$a_1^{(N)}$
$a_2^{(1)}$	$a_2^{(2)}$	...	$a_2^{(N)}$
...
$a_{n_1}^{(1)}$	$a_{n_2}^{(2)}$	...	$a_{n_N}^{(N)}$

альтернативами характеристичних параметрів є альтернативні стани відповідних факторів, конфігурацією морфологічної таблиці є сценарій. Для деякої конкретної проблеми структура морфологічної таблиці визначається спеціалістами з технологічного передбачення, можливо, на основі даних, отриманих на етапі попереднього вивчення проблеми.

Важливою вимогою до множини альтернатив кожного з параметрів є повнота, тобто альтернативи мають охоплювати всі можливі стани відповідного параметра. Наявність неврахованих альтернатив може призвести до спотворення результатів дослідження через наявність прихованих зв'язків між такими альтернативами та рештою параметрів морфологічної таблиці. Якщо набором альтернатив неможливо охопити всі стани, або передбачається, що їх множина може з часом змінитись, варто додати допоміжну альтернативу для залишку потенційних станів параметра, наприклад «Інші».

Для подальших розрахунків необхідно отримати початкові наближення $p_j^{(i)}$ для ймовірностей альтернатив характеристичних параметрів. В ідеалі це мають бути незалежні ймовірності, однак для реальних задач виконання цієї умови практично неможливе, тому для отримання цих величин пропонується застосувати експертне оцінювання [14]. Розглядаються такі способи отримання початкових наближень:

Для подальших розрахунків необхідно отримати початкові наближення $p_j^{(i)}$ для ймовірностей альтернатив характеристичних параметрів. В ідеалі це мають бути незалежні ймовірності, однак для реальних задач виконання цієї умови практично неможливе, тому для отримання цих величин пропонується застосувати експертне оцінювання [14]. Розглядаються такі способи отримання початкових наближень:

1. Рівномірний розподіл. У випадку, якщо неможливо апріорно отримати адекватні оцінки ймовірності, або використання експертної процедури для цього не є раціональним через значну невизначеність оцінок або через їх близькість, можна всім альтернативам надати однакових значень $p_j^{(i)} = 1/n_i$. Тоді результат роботи модифікованого ММА буде базуватись на використанні матриці взаємної узгодженості.

2. Пряме експертне оцінювання. Для кожної альтернативи $a_j^{(i)}$, $j \in \overline{1, n_i}$ параметра F_i , $i \in \overline{1, N}$ експертами надається оцінка $\tilde{p}_j^{(i)}$ за шкалою Міллера (табл. 2).

Таблиця 2. Шкала Міллера для оцінювання альтернатив морфологічної таблиці

Номер рівня s	Якісна характеристика s -го рівня	Кількісна характеристика s -го рівня
1	Практично неможливо	$[0 \div 0,1]$
2	Дуже мала ймовірність	$[0,1 \div 0,25]$
3	Мала ймовірність	$[0,25 \div 0,4]$
4	Середня ймовірність	$[0,4 \div 0,6]$
5	Велика ймовірність	$[0,6 \div 0,75]$
6	Дуже велика ймовірність	$[0,75 \div 0,9]$
7	Практично гарантовано	$[0,9 \div 1]$

Отримані оцінки альтернатив для кожного параметра нормують:

$$p_j^{(i)} = \tilde{p}_j^{(i)} / \sum_{j=1}^{n_i} \tilde{p}_j^{(i)}.$$

3. Експертне оцінювання попарними порівняннями. Для кожного параметра F_i , $i \in \overline{1, N}$ експерти оцінюють кожну пару його альтернатив з точки зору переваги однієї альтернативи над іншою. Для пари альтернатив $a_j^{(i)}$, $a_k^{(i)}$ дається оцінка $m_{jk}^{(i)}$ згідно з табл. 3.

Таблиця 3. Шкала визначення оцінки переваги

Кількісна оцінка переваги	Якісна характеристика переваги
1	Однакова ймовірність
3	Помірна перевага
5	Суттєва перевага
7	Дуже сильна перевага
9	Абсолютна перевага
2, 4, 6, 8	Проміжні значення

Якщо оцінка $m_{jk}^{(i)}$ подана на основі порівняння j -ї та k -ї альтернатив, то оцінка $m_{kj}^{(i)}$ має обернене значення: $m_{kj}^{(i)} = 1/m_{jk}^{(i)}$. Тоді оцінки ймовірності альтернатив мають вигляд:

$$p_j^{(i)} = \frac{\sum_{k=1}^{n_i} m_{jk}^{(i)}}{\sum_{j=1}^{n_i} \sum_{k=1}^{n_i} m_{jk}^{(i)}}.$$

Кількість питань до експертів під час прямого оцінювання становить $\sum_{i=1}^N n_i$, у випадку оцінювання попарними порівняннями — $\sum_{i=1}^N \frac{n_i(n_i - 1)}{2}$.

Метод попарних порівнянь має найбільшу точність серед розглянутих, однак він має також і більшу кількість питань для експертів. Метод отримання початкових наближень обирають у залежності від того, наскільки важливим це є для задачі, що розглядається. Чим більше залежностей між параметрами морфологічної таблиці, тим менше результат залежить від початкових наближень і, відповідно, можна обирати менш трудомісткі методи. Для більшості задач достатньо прямого експертного оцінювання.

СТРАТЕГІЯ ВРАХУВАННЯ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКІВ МІЖ ПАРАМЕТРАМИ

Для врахування зв'язків між параметрами морфологічної таблиці пропонується використовувати числову матрицю взаємної узгодженості. Відповідно до розробленої стратегії кожній парі альтернатив $a_{j_1}^{(i_1)}$, $a_{j_2}^{(i_2)}$ різних параметрів F_{i_1} , F_{i_2} присвоюється оцінка $c_{i_1 j_1, i_2 j_2} \in [-1, 1]$ згідно з табл. 4.

Таблиця 4. Пояснення оцінок матриці взаємної узгодженості

Оцінка	Пояснення
-1	Альтернативи повністю неузгоджені; конфігурація з цією парою альтернатив неможлива
(-1;0)	Альтернативи неузгоджені; вибір однієї з них певною мірою зменшує ймовірність вибору іншої
0	Альтернативи незалежні; вибір однієї з них не впливає на вибір іншої
(0;1)	Альтернативи узгоджені; вибір однієї з них певною мірою збільшує ймовірність вибору іншої
1	Альтернативи повністю узгоджені; вибір однієї з них тягне за собою вибір іншої

Таблиця 5. Шкала експертних оцінок матриці взаємної узгодженості

Відповідь експерта	Числове значення
Абсолютно невірно	-1
В цілому невірно	-0,7
Скоріше «ні», ніж «так»	-0,3
Частково вірно, частково невірно	0
Скоріше «так», ніж «ні»	0,3
В цілому вірно	0,7
Абсолютно вірно	1

Для заповнення матриці взаємної узгодженості експертам пропонуються питання щодо узгодженості кожної пари альтернатив різних характеристик параметрів. Кількість питань можна зменшити завдяки виключенню очевидних питань. Форма питань може бути різною, зручно ставити питання у формі оцінки правомірності висловлювання, що пов'яже відповідні альтернативи. Відповіді експертів переводяться в числову форму за шкалою (табл. 5).

У результаті цієї процедури формується матриця взаємної узгодженості, як показано в табл. 6. Вважається, що параметри в парі однаково впливають один на одного, тому, як правило, наводять тільки половину матриці.

Таблиця 6. Матриця взаємної узгодженості

Параметри морфологічної таблиці		F_1				...	F_{N-1}			
		$a_1^{(1)}$	$a_2^{(1)}$	...	$a_{n_1}^{(1)}$		$a_1^{(N-1)}$	$a_2^{(N-1)}$	...	$a_{n_{N-1}}^{(N-1)}$
F_2	$a_1^{(2)}$	$c_{11,21}$	$c_{12,21}$	...	$c_{1n_1,21}$	...	$c_{(N-1)1,N1}$	$c_{(N-1)2,N1}$	...	$c_{(N-1)n_{N-1},N1}$
	$a_2^{(2)}$	$c_{11,22}$	$c_{12,22}$	...	$c_{1n_1,22}$					
					
	$a_{n_2}^{(2)}$	$c_{11,2n_2}$	$c_{12,2n_2}$	...	$c_{1n_1,2n_2}$					
...
F_N	$a_1^{(N)}$	$c_{11,N1}$	$c_{12,N1}$	...	$c_{1n_1,N1}$	...	$c_{(N-1)1,N2}$	$c_{(N-1)2,N2}$	...	$c_{(N-1)n_{N-1},N2}$
	$a_2^{(N)}$	$c_{11,N2}$	$c_{12,N2}$	...	$c_{1n_1,N2}$					
					
	$a_{n_N}^{(N)}$	c_{11,Nn_N}	c_{12,Nn_N}	...	c_{1n_1,Nn_N}					
...
...	$a_{n_N}^{(N)}$	c_{11,Nn_N}	c_{12,Nn_N}	...	c_{1n_1,Nn_N}	...	$c_{(N-1)1,Nn_N}$	$c_{(N-1)2,Nn_N}$	...	$c_{(N-1)n_{N-1},Nn_N}$

РОЗРАХУНОК ІМОВІРНОСТЕЙ АЛЬТЕРНАТИВ

Оскільки з побудовою матриці взаємної узгодженості вибори тих чи інших альтернатив параметрів вже перестають бути незалежними подіями, потрібно знайти ймовірності $p_j^{(i)}$ вибору кожної альтернативи $a_j^{(i)}$, $j \in \overline{1, n_i}$, $i \in \overline{1, N}$, враховуючи вплив матриці взаємної узгодженості на оцінки альтернатив параметрів. Для цього розв'язують систему рівнянь Байеса:

$$\left\{ \begin{aligned}
 p_1^{(1)} &= \sum_{i_2=1}^{n_2} \sum_{i_3=1}^{n_3} \dots \sum_{i_N=1}^{n_N} P(a_1^{(1)} | a_{i_2}^{(2)}, a_{i_3}^{(3)}, \dots, a_{i_N}^{(N)}) \prod_{j=2}^N p_{i_j}^{(j)}, \\
 &\dots \\
 p_{n_1}^{(1)} &= \sum_{i_2=1}^{n_2} \sum_{i_3=1}^{n_3} \dots \sum_{i_N=1}^{n_N} P(a_{n_1}^{(1)} | a_{i_2}^{(2)}, a_{i_3}^{(3)}, \dots, a_{i_N}^{(N)}) \prod_{j=2}^N p_{i_j}^{(j)}, \\
 &\dots \\
 p_1^{(N)} &= \sum_{i_1=1}^{n_1} \sum_{i_2=1}^{n_2} \dots \sum_{i_{N-1}=1}^{n_{N-1}} P(a_1^{(N)} | a_{i_1}^{(1)}, a_{i_2}^{(2)}, \dots, a_{i_{N-1}}^{(N-1)}) \prod_{j=1}^{N-1} p_{i_j}^{(j)}, \\
 &\dots \\
 p_{n_N}^{(N)} &= \sum_{i_1=1}^{n_1} \sum_{i_2=1}^{n_2} \dots \sum_{i_{N-1}=1}^{n_{N-1}} P(a_{n_N}^{(N)} | a_{i_1}^{(1)}, a_{i_2}^{(2)}, \dots, a_{i_{N-1}}^{(N-1)}) \prod_{j=1}^{N-1} p_{i_j}^{(j)}, \\
 \sum_{i=1}^{n_1} p_i^{(1)} &= 1, \\
 &\dots \\
 \sum_{i=1}^{n_N} p_i^{(N)} &= 1.
 \end{aligned} \right. \tag{1}$$

Вирази вигляду $P(a_j^{(i)} | \dots)$ означають імовірність вибору альтернативи $a_j^{(i)}$ за умови, що інші параметри набули певних альтернатив, перерахованих після вертикальної риски. Значення умовної ймовірності апроксимуються, виходячи з таких умов:

$$P(a_j^{(i)} | V) = \begin{cases} 0, & (c_{ij,V_1} = -1) \vee \dots \vee (c_{ij,V_{N-1}} = -1), \\ p_j^{(i)}, & (c_{ij,V_1} = 0) \wedge \dots \wedge (c_{ij,V_{N-1}} = 0), \\ 1, & (c_{ij,V_1} = 1) \wedge \dots \wedge (c_{ij,V_{N-1}} = 1). \end{cases}$$

Тут V — набір альтернатив, набутих усіма параметрами, крім i -го, у зазначеній конфігурації; c_{ij,V_k} — значення матриці взаємної узгодженості для j -ї альтернативи i -го параметра й альтернативи V_k ; $p_j^{(i)}$ — оцінка для j -ї альтернативи i -го параметра, отримана від експертів.

У системі рівнянь (1) $\sum_{i=1}^N m_i$ невідомих та $\sum_{i=1}^N m_i + N$ рівнянь. Для кожного параметра одне з рівнянь є надлишковим. Після виключення цих рівнянь кількість рівнянь і змінних збігатиметься.

Система рівнянь (1) є нелінійною, найефективнішими для її розв'язання є ітераційні методи, оскільки система легко зводиться до необхідного вигляду, і початкові наближення є достатньо близькими до розв'язку.

Розв'язавши систему (1), отримуємо морфологічну таблицю, що містить імовірності вибору альтернатив з урахуванням взаємозв'язків між параметрами морфологічної таблиці. Ці значення можуть бути використані для визначення найбільш важливих станів параметрів об'єкта, що розглядається, ранжування цих станів за ймовірністю виникнення, вибору найбільш імовірних конфігурацій, а також в якості вхідних даних для подальших методів, зокрема для другого етапу двохетапної процедури морфологічного аналізу.

РОЗРАХУНОК ІМОВІРНОСТЕЙ АЛЬТЕРНАТИВ ЗА НАЯВНОСТІ ФІКСОВАНИХ ПАРАМЕТРІВ

У розглянутій задачі вважалося, що стани всіх параметрів морфологічної таблиці є невизначеними. Однак під час розгляду деяких проблем може бути корисним дослідити характеристики об'єкта при конкретних значеннях певних його параметрів. Таким чином, створюється модель виводу «what-if» («що буде, якщо»). Гнучкість ММА дозволяє зафіксувати будь-який параметр або параметри й отримати розподіли ймовірностей альтернатив інших параметрів.

Нехай існує підмножина параметрів $F' \subset F$, стан яких зафіксовано, тобто вважається, що поява однієї з альтернатив є гарантованою. Позначимо множину індексів фіксованих параметрів B , тоді $F' = \{F_i | i \in B\}$. Кожному фіксованому параметру F_i відповідає індекс b_i його фіксованої альтернати-

ви $a_{b_i}^{(i)}$. Для цієї альтернативи $p_{b_i}^{(i)} = p_{b_i}'^{(i)} = 1$, для інших альтернатив фіксованого параметра $p_j^{(i)} = p_j'^{(i)} = 0, j \in \overline{1, n_i}, j \neq b_i$.

Це означає, що потрібно змінити систему рівнянь (1) для розрахунку ймовірностей альтернатив параметрів і виключити з неї рівняння, що відповідають фіксованим параметрам:

$$\left\{ \begin{array}{l} \left\{ p_l'^{(k)} = \sum_{i_m, m \in \overline{1, N \cap B}, m \neq k} P(a_l^{(k)} | \{a_{i_m}^{(m)} | m \in \overline{1, N \cap B}, m \neq k\}) \prod_{j \in \overline{1, N \cap B}, j \neq k} p_{i_j}'^{(j)}, \right. \\ \left. k \in \overline{1, N \cap B}, l \in \overline{1, n_k}, \right. \\ \left. \left\{ \sum_{i=1}^{n_k} p_i'^{(k)} = 1 \right\}, k \in \overline{1, N \cap B}. \right. \end{array} \right.$$

Розв'язком системи будуть імовірності альтернатив нефіксованих параметрів при обраних альтернативах фіксованих параметрів.

ДВОХЕТАПНИЙ МОДИФІКОВАНИЙ МОРФОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ

У процесі технологічного передбачення часто буває доцільним застосування двохетапної процедури ММА. При цьому на першому етапі здійснюється аналіз неконтрольованих факторів, так званих факторів «зовнішнього світу» для об'єкта, проблеми або явища, що розглядається. Другий етап дослідження полягає в синтезі стратегій, які найефективніше враховувати в умовах сукупності можливих реалізацій об'єкта, визначених на першому етапі.

Так само, як і на першому етапі, на другому етапі морфологічного дослідження будується морфологічна таблиця, у цьому випадку для стратегій, які будуть розглядатися з точки зору впливу на ситуацію, описану в результатах роботи методу на першому етапі. Відмінність процедури ММА на другому етапі полягає в тому, що параметри морфологічної таблиці другого етапу залежать від зовнішніх даних, у цьому випадку — від параметрів морфологічної таблиці першого етапу. Для врахування цих зв'язків пропонується використовувати матрицю узгодженості, схожу на матрицю взаємної узгодженості першого етапу морфологічного дослідження, однак зв'язок між параметрами в цьому випадку є одностороннім.

Відповідно до розробленої стратегії кожній парі альтернатив $a_{j_1}^{(i_1)}, a_{j_2}^{(i_2)}$ параметрів F_{i_1}, F_{i_2} таблиць першого та другого етапів присвоюється оцінка $c_{i_1 j_1, i_2 j_2} \in [-1, 1]$ згідно з табл. 7.

Матриця заповнюється експертами за допомогою процедури, аналогічної до заповнення матриці взаємної узгодженості.

Таким чином, на основі результатів розрахунку першого етапу морфологічного дослідження та матриці узгодженості необхідно розрахувати:

- оцінки результативності $E_j^{(i)}$ кожної з альтернатив параметрів стратегій $a_j^{(i)}$;

- оцінки результативності $E\{S_l\}$ стратегій S_l , заданих конфігураціями морфологічної таблиці стратегій.

Таблиця 7. Пояснення оцінок матриці узгодженості

Оцінка	Пояснення
-1	Альтернатива параметра стратегії є повністю неефективною під час вибору відповідної альтернативи параметра сценарію
(-1;0)	Вибір відповідної альтернативи параметра сценарію певною мірою зменшує ефективність альтернативи параметра стратегії
0	Ефективність альтернативи параметра стратегії ніяк не залежить від вибору відповідної альтернативи параметра сценарію
(0;1)	Вибір відповідної альтернативи параметра сценарію певною мірою збільшує ефективність альтернативи параметра стратегії
1	Альтернатива параметра стратегії є повністю ефективною під час вибору відповідної альтернативи параметра сценарію

Для кожного з параметрів стратегії вибір найефективнішої альтернативи фактично є прийняттям рішення в умовах ризику. Значення очікуваної ефективності можна виразити таким співвідношенням:

$$E\{a_j^{(N+i)}\} = \sum_k P(a_j^{(N+i)} | V^{(k)})P(V^{(k)}),$$

де $a_j^{(N+i)}$ — j -а альтернатива $(N+i)$ -го параметра стратегії; $V^{(k)} = \{a_{i_k,1}^{(1)}; \dots; a_{i_k,N}^{(N)}\}$ — вектор сценарію, що складається з альтернатив кожного параметра сценарію; $P(a_j^{(N+i)} | V^{(k)})$ — результативність альтернативи $a_j^{(N+i)}$ за умов сценарію $V^{(k)}$, яка апроксимується, виходячи зі значень матриці узгодженості для цієї альтернативи параметра стратегії та заданих вектором $V^{(k)}$ альтернатив параметрів сценарію; $P(V^{(k)})$ — імовірність сценарію, яка розраховується на основі даних, отриманих на першому етапі морфологічного дослідження.

Альтернативна оцінка результативності стратегій або елементів стратегій полягає у визначенні відстані до гіпотетичної «ідеальної» стратегії, в якій для кожного сценарію обираються найефективніші альтернативи характеристичних параметрів.

$$\begin{aligned} W\{a_j^{(N+i)}\} &= \sum_k (P(a_{\max_k}^{(N+i)} | V^{(k)}) - P(a_j^{(N+i)} | V^{(k)}))P(V^{(k)}) = \\ &= E_{\max}^{(N+i)} - E\{a_j^{(N+i)}\}, \end{aligned}$$

де $E_{\max}^{(N+i)} = \sum_k P(a_{\max_k}^{(N+i)} | V^{(k)})P(V^{(k)})$ — результативність гіпотетичної «ідеальної» стратегії, в якій для кожного можливого сценарію обирається найефективніша альтернатива.

Величина $W\{a_j^{(N+i)}\}$ показує очікуване зменшення результативності елемента стратегії з урахуванням можливості появи несприятливого сценарію.

Способи оцінювання альтернатив, які було розглянуто, стосуються всієї сукупності сценаріїв з відповідним розподілом імовірності. Однак, у деяких дослідженнях можуть виникнути інші задачі, пов'язані з вибором стратегії при фіксованих значеннях одного або декількох параметрів сценарію. Такі задачі характерні, якщо шукається не одна універсальна стратегія, а декілька стратегій реакції на різні варіанти сценаріїв; або необхідно позбутися окремих, найбільш небажаних альтернатив параметрів сценарію. В такому випадку один або декілька параметрів сценарію фіксуються в якості вхідних, і результативність елементів стратегії розглядається для сценаріїв, що містять відповідні альтернативи фіксованих параметрів:

$$E\{a_j^{(N+i)} | a_{j_{in}}^{(in)}\} = \sum_k P(a_j^{(N+i)} | \tilde{V}^{(k)} \cup a_{j_{in}}^{(in)})P(\tilde{V}^{(k)} | a_{j_{in}}^{(in)}),$$

де $a_{j_{in}}^{(in)}$ — фіксоване значення вхідного параметра сценарію; $\tilde{V}^{(k)} = \{a_{j_{k,1}}^{(1)}, \dots, a_{j_{k,in-1}}^{(in-1)}, a_{j_{k,in+1}}^{(in+1)}, \dots, a_{j_{k,N}}^{(N)}\}$ — вектор альтернатив усіх інших параметрів сценарію.

У найпростішому випадку, якщо параметри стратегії не пов'язані між собою, оцінку результативності всієї стратегії $S_l = \{a_{j_1}^{(1)}, a_{j_2}^{(2)}, \dots, a_{j_{N'}}^{(N')}\}$ можна отримати способом, аналогічним до оцінювання результативності окремих її параметрів:

$$E\{S_l\} = \sum_k \left(\prod_{i=N+1}^{N+N'} P(a_{j_i}^{(i)} | V^{(k)}) \right) P(V^{(k)}),$$

де N' — кількість параметрів таблиці стратегій. У випадку, якщо параметри стратегії пов'язані між собою матрицею взаємної узгодженості, потрібно виконати перерахунок оцінок результативності альтернатив параметрів стратегій за допомогою процедури, аналогічної першому етапу ММА, використовуючи отримані значення ефективності як початкові наближення. Слід зазначити, що представлення результатів у вигляді значень ефективності окремих альтернатив параметрів є інформативнішими, оскільки кількість стратегій росте експоненційно зі збільшенням кількості параметрів, тому використання оцінок стратегій у цілому доцільно за необхідності порівняти або проранжувати невеликий набір стратегій.

ВИСНОВКИ

Створений системний підхід до використання модифікованого ММА в задачах технологічного передбачення має суттєві переваги: він дозволяє перетворити заплутану проблему в чітко структуровану задачу; одночасно розглянути дуже велику кількість різних реалізацій об'єкта та подати об'єкт у наглядному, зручному для розуміння вигляді. Крім того, створена модель є гнучкою — будь-який параметр може бути заданим в якості вхідного, після чого можна прослідкувати поведінку інших параметрів. Певним недоліком є велика кількість необхідної експертної інформації, тому є сенс шукати способи зменшення кількості експертних питань або, якщо метод використовується паралельно з іншими методами якісного аналізу, використовувати запропоновані експертні форми для декількох методів.

Розроблене математичне та методологічне забезпечення ММА дозволяє створити модель досліджуваного об'єкта (проблеми), основу на його структурі; базуючись на цій структурі, оцінити ймовірність реалізації різних його конфігурацій або певних окремих характеристик; спостерігати поведінку об'єкта, фіксуючи певні його характеристики; ранжувати за ефективністю елементи стратегій в умовах сукупності реалізацій досліджуваного об'єкта; оцінювати ризики для об'єкта, заданого морфологічною таблицею.

ЛІТЕРАТУРА

1. Згуровский М.З., Панкратова Н.Д. Технологическое предвидение. — Киев: ІВЦ «Вид-во «Політехніка»», 2005. — 156 с.
2. Zwicky F., Wilson A. New methods of thought and procedure / Contributions to the symposium on methodologies, May, 22–24. — Pasadena. — 1967. — P. 273–297.
3. Одрин В.М. Метод морфологического анализа технических систем. — М.: ВНИИПИ, 1989. — 312 с.
4. Одрин В.М. Морфологический синтез систем: постановка задачи, классификация методов, морфологические методы «конструирования». — Киев: Ин-т кибернетики им. В.М. Глушкова, 1986. — 37 с.
5. Mark Sh. Levin, Roman O. Vishnitskiy. Towards Morphological Design of GSM Network // Информационные процессы. — 2007. — Т. 7, № 2. — С. 183–190.
6. Ritchey T. Futures studies using morphological analysis // Adapted from an article for the UN University Millennium Project: Futures Research Methodology Series, 2005. — 14 p.
7. Ritchey T., Stenström M., Eriksson H. Using morphological analysis for evaluating preparedness for accidents involving hazardous materials // Adapted from an article presented at the 4-th International conference for local authorities, November, 2002— Shanghai. — 6 p.
8. Eriksson T., Ritchey T. Scenario development using computerised morphological analysis // Adapted from papers presented at the cornwallis and winchester international OR conferences. — England, 2002. — 8 p.
9. Ritchey T. Strategic decision support using computerised morphological analysis // 9-th International command and control research and technology symposium, September, 2004. — Copenhagen. — 8 p.
10. Ritchey T. Nuclear Facilities and Sabotage: Using morphological analysis as a scenario and strategy development laboratory // Adaptation of a paper delivered to the 44-th annual meeting of the institute of nuclear materials management, July, 2003. — Phoenix. — Arizona. — 6 p.
11. Ritchey T. Morphological Analysis — a general method for non-quantified modeling / Adapted from a paper presented at the 16-th euro conference on operational analysis, July, 1998. — Brussels. — 11 p.
12. Панкратова Н.Д., Савченко І.О. Стратегія застосування методу морфологічного аналізу в процесі технологічного передбачення // Наук. вісті НТУУ «КПІ». — 2009. — № 2. — С. 35–44.
13. Панкратова Н.Д., Савченко І.О. Оцінювання багатofакторних ризиків в стратегії розв'язання задач технологічного передбачення // Доп. НАН України. — 2010. — № 8. — С. 36–42.
14. Zgurovsky M.Z., Pankratova N.D. System analysis: Theory and Applications. — Springer. — 2007. — 475 p.

Надійшла 14.12.2010