УДК 519.876.2

ПАНКРАТОВА Н.Д., САВЧЕНКО І.Ю.

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ МОРФОЛОГІЧНОГО АНАЛІЗУ ДО ЗАДАЧ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПЕРЕДБАЧЕННЯ

Розглядаються способи застосування методу морфологічного аналізу до задач технологічного передбачення. Пропонуються два варіанти використання методу − для пошуку принципово нових або удосконалення існуючих соціально-економічних, організаційних або інших складних систем і для аналізу ситуації з деяким ступенем невизначеності. Наводиться приклад застосування методу морфологічного аналізу в задачі управління транспортною мережею великого міста.

Ways of application of morphological analysis method to technological foresight problems are considered. Two variants of usage of method are suggested − search of new or improvement of existing socio-economic, organizational or other complex systems and analysis of situations with high level of uncertainty. An example of application of morphological analysis method to the problem of transport system management for a big city is given.

У сучасних умовах світової глобалізації уряди усіх країн поступово змушені "втягуватися" у процес технологічного передбачення, тому що успішне використання досягнень науки й техніки в усе більшому ступені залежить від створення ефективних зв'язків між бізнесом, інноваціями, науковими та освітянськими закладами й галузями влади, відповідальними за технологічний розвиток суспільства. Технологічне передбачення є основою для встановлення та зміцнення подібних зв'язків, сприяючи узгодженню та реалізації національної та регіональних інноваційних систем, підвищуючи їхню ефективність. Технологічне передбачення пропонує механізм для досягнення подібної мети. Воно сприяє спілкуванню учасників системи, обговоренню проблем, що мають довгостроковий взаємний інтерес, координації відповідних стратегій та у деяких випадках – співробітництву. Таким чином, технологічне передбачення стає засобом активізації національної та регіональної систем інноваційного розвитку.

З'явилася практична потреба в якісно нових, системно погоджених принципах, підходах, методах виявлення можливостей й оцінювання перспектив і тенденцій розвитку як цивілізації та світової економіки в цілому, так і напрямків і перспектив інноваційного розвитку конкретної країни зокрема. Для вирішення таких завдань необхідно створювати та інтенсивно розвивати сучасний методологічний апарат якісного та кількісного оцінювання процесів різної природи, які визначають економічні

перспективи, технологічні властивості та виробничі можливості інноваційної діяльності.

В статті розглядаються способи використання методу морфологічного аналізу в задачах технологічного передбачення. Цей метод фактично є методом творчого пошуку, і використовується переважно для полегшення винаходження принципово нових систем. Однак цим застосування методу морфологічного аналізу не обмежується, він може бути використаним і для вирішення складних проблем, розв'язок яких залежить від великої кількості факторів в умовах невизначеностей та ризику.

1. Загальні особливості методу морфологічного аналізу

Ідея методу морфологічного аналізу полягає в знаходженні найбільшої кількості, а гранично й всіх можливих способів розв'язання поставленої проблеми шляхом комбінування основних структурних елементів систем або ознак рішень, що дає змогу обрати найбільш доцільний з них. Зі всіх цих варіантів обираються один або декілька цілісних варіантів, які є оптимальними відносно деякої функції цілі.

Методи морфологічного аналізу складних проблем в систематизованому вигляді були розроблені швейцарським астрономом Ф. Цвікі [1]. Найбільш розповсюдженим з методів морфологічного аналізу є метод морфологічної скрині [2, 3]. Цей метод поєднує два якісно різних етапи морфологічного дослідження. Перший етап (морфологічний аналіз) полягає в морфологічній класифікації множини систем і характеризується багатоаспектністю (багатократним класифікуванням однієї морфологічної множини по набору поділів об'ємів поняття) і продуктивністю (класифікування охоплює не тільки відомі, але й гіпотетичні системи, що належать даній множині). На другому етапі (морфологічний синтез) проводяться оцінювання описів різних систем класу, що досліджується, і вибір тих, які у тому чи іншому наближенні відповідають умовам задачі.

Цілями морфологічного аналізу і синтезу є:

- відбір критичних параметрів, які найбільше впливають на розв'язання поставленої задачі;
- системне дослідження всіх можливих варіантів розв'язання задачі, що випливають із завдання, закономірностей побудови і суперечливих вимог до створення об'єкта;
- реалізація сукупності операцій пошуку на морфологічній множині варіантів описів функціональних систем, що відповідають первісним вимогам.

Однією з основних переваг методу морфологічного аналізу є те, що він дозволяє розглядати не тільки існуючі об'єкти, але й за рахунок комбінування їх ознак створювати нові, гіпотетично можливі об'єкти.

У загальному вигляді процедура морфологічного аналізу має такі кроки:

1. Уточнене формулювання проблеми, що виникла. Визначення параметрів (класифікаційних ознак) F_i, від яких залежить розв'язання проблеми.
2. Поділ параметрів на їх значення (побудова множини значень кожного з параметрів).
3. Побудова морфологічної скрині, яка фактично являє собою N-вимірну матрицю (N – кількість параметрів). Кожний елемент цієї матриці є можливим варіантом розв'язання проблеми.
4. Оцінювання наявних варіантів. На цьому кроці також може будуватися матриця взаємної узгодженості значень параметрів (можливо, деякі пари значень параметрів несумісні).
5. Вибір з морфологічної скрині найкращого варіанту (альтернатив).

Приклад морфологічної скрині для задачі з трьома параметрами наведено на рис. 1, де $a_j^{(i)}$ являє собою j-у альтернативу і-го параметру.

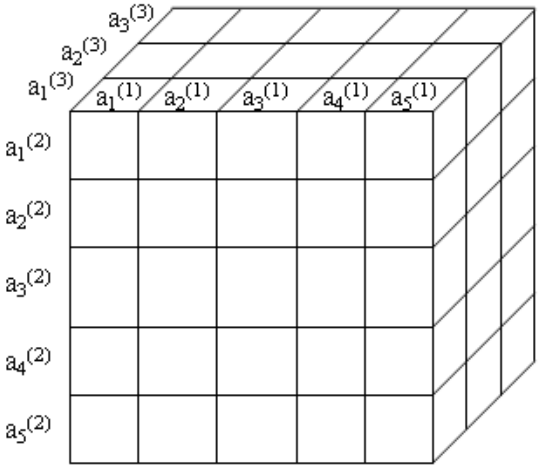

Рис. 1. Приклад морфологічної скрині

Оскільки задачі з більше, ніж трьома параметрами не можуть бути зображені за допомогою матриці, використовуються морфологічні таблиці. Табл. 1 являє собою морфологічну таблицю, що відповідає морфологічній скрині на рис. 1.

Таблиця 1

Характеризуючі параметри		
F_1	F_2	F_3
$a_1^{(1)}$	$a_1^{(2)}$	$a_1^{(3)}$
$a_2^{(1)}$	$a_2^{(2)}$	$a_2^{(3)}$
$a_3^{(1)}$	$a_3^{(2)}$	$a_3^{(3)}$
$a_4^{(1)}$		
$a_5^{(1)}$	$a_5^{(2)}$	

Морфологічний аналіз може мати декілька різних застосувань у залежності від того, що саме являють собою класифікаційні ознаки, як проводиться оцінювання і пошук найкращих варіантів.

2. Стратегія застосування і формалізація методу морфологічного аналізу

Метою досліджень є пошук способів застосування і формалізація методу для практичних задач технологічного передбачення. Одним із застосувань методу морфологічного аналізу є пошук принципово нових або удосконалення конкретних соціально-економічних, організаційних або інших складних систем. В такому випадку побудова морфологічної таблиці ґрунтується на проведенні функціонально-елементного аналізу систем. У результаті формується морфологічна скриня, що включає функції або узагальнені функціональні підсистеми й альтернативи, які реалізують відповідні функції.

Для розв'язання задач синтезу раціональних варіантів альтернативи оцінюються експертами за критеріями якості. Такими критеріями можуть бути, наприклад, надійність підсистем, їхня технологічність, вартість тощо. Оцінка проводиться методом порівняння з еталоном або методом попарного порівняння [4].

У табл. 2 наводиться приклад морфологічної скрині, в якій кожна з альтернатив оцінена по обраним критеріям якості. Значення критеріїв якості для *j*-ї альтернативи *i*-го параметру зведені в вектор $Q_j^{(i)}=\{q_{1j}^{(i)}, q_{2j}^{(i)}, \ldots, q_{uj}^{(i)}\}$.

Таблиця 2

Характеризуючі параметри		
F_1	F_2	F_3
$a_1^{(1)}$ $Q_1^{(1)}$	$a_1^{(2)}$ $Q_1^{(2)}$	$a_1^{(3)}$ $Q_1^{(3)}$
$a_2^{(1)}$ $Q_2^{(1)}$	$a_2^{(2)}$ $Q_2^{(2)}$	$a_2^{(3)}$ $Q_2^{(3)}$
$a_3^{(1)}$ $Q_3^{(1)}$	$a_3^{(2)}$ $Q_3^{(2)}$	$a_3^{(3)}$ $Q_3^{(3)}$
$a_4^{(1)}$ $Q_4^{(1)}$	$a_4^{(2)}$ $Q_4^{(2)}$	
$a_5^{(1)}$ $Q_5^{(1)}$	$a_5^{(2)}$ $Q_5^{(2)}$	

У більш складному випадку для кожної функціональної підсистеми розробляється функціональна класифікація, і альтернативи цієї функції описуються значеннями цих класифікаційних ознак. Опрацювання таких таблиць здійснюється методами кластерного аналізу.

Після отримання заповненої морфологічної таблиці здійснюється пошук найраціональнішого варіанту. Для цього існують різні групи методів [5, 6], серед яких можна виділити:

- методи пошуку (звуження морфологічної множини з відкиданням нераціональних варіантів; поступове просування в сторону поліпшення варіанту тощо);
- методи конструювання (деревовидний або лабіринтний синтез).

Слід зазначити, що морфологічний аналіз можна проводити з застосуванням ієрархічної структури (рис.2), в такому випадку варіанти систем, побудовані в ході розгляду морфологічної таблиці, будуть альтернативами одного з параметрів морфологічної таблиці більш високого рівня.

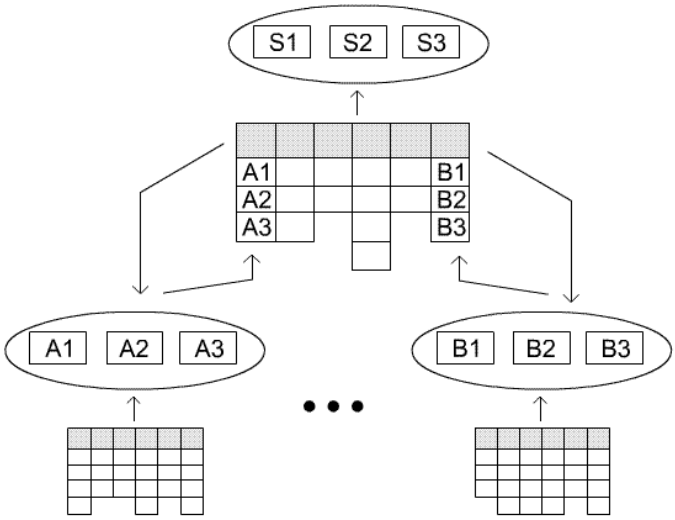

Рис. 2. Ієрархічний морфологічний аналіз

Інше застосування морфологічного аналізу пов’язане з аналізом ситуації з деяким ступенем невизначеності, найчастіше це розгляд стану деякої проблеми в майбутньому. Ця модифікація методу часто використовується в задачах технологічного передбачення, зокрема Шведським морфологічним товариством [7, 8, 9].

У такому випадку параметрами морфологічної таблиці будуть фактори, стан яких характеризує стан проблеми в цілому. Значеннями цих параметрів є альтернативні

стани, яких можуть набувати відповідні фактори. Побудова такої таблиці дає можливість проаналізувати всі варіанти розвитку подій для даної проблеми і виділити декілька найбільш вірогідних сценаріїв. У такому разі експерти оцінюють незалежну ймовірність настання кожної з альтернатив. Після цього будується матриця взаємної узгодженості, яка характеризує більшу чи меншу можливість появи певних пар альтернатив у сценарії, тобто показує вплив вибору певних пар альтернатив на ймовірність настання сценарію в цілому. Приклад матриці взаємної узгодженості представлено на рис. 3. У цій матриці негативні значення означають зменшення ймовірності одночасної появи відповідних альтернатив (–1 – неможливість їх одночасної появи); позитивні значення – збільшення ймовірності одночасної появи відповідних альтернатив (1 – поява однієї з альтернатив обов'язково призводить до появи іншої); пуста клітинка (нуль) – незалежність появи відповідних альтернатив.

При застосуванні морфологічного аналізу для синтезу систем також можна використовувати матрицю взаємної узгодженості, але в такому випадку треба враховувати вплив вибору пар альтернатив на кожний з критеріїв якості, тобто фактично будувати декілька матриць, а це є доволі трудомістким процесом.

		F_1			F_2		
		$a_1^{(1)}$	$a_2^{(1)}$	$a_3^{(1)}$	$a_1^{(2)}$	$a_2^{(2)}$	$a_3^{(2)}$
F_2	$a_1^{(2)}$		0,5				
	$a_2^{(2)}$						
	$a_3^{(2)}$						
F_3	$a_1^{(3)}$		–1	–1			
	$a_2^{(3)}$					–0,5	
	$a_3^{(3)}$						0,5

Рис. 3. Приклад матриці взаємної узгодженості

Оскільки з побудовою матриці взаємної узгодженості появи тих чи інших альтернатив вже перестають бути незалежними подіями, потрібно зробити перерахунок ймовірностей альтернатив за допомогою системи рівнянь Байєса. У випадку двох характеризуючих параметрів з двома альтернативами у кожного система має вигляд:

$$\begin{cases} P(a_1^{(1)}) = P(a_1^{(1)} \mid a_1^{(2)}) \cdot P(a_1^{(2)}) + P(a_1^{(1)} \mid a_2^{(2)}) \cdot P(a_2^{(2)}), \\ P(a_2^{(1)}) = P(a_2^{(1)} \mid a_1^{(2)}) \cdot P(a_1^{(2)}) + P(a_2^{(1)} \mid a_2^{(2)}) \cdot P(a_2^{(2)}), \\ P(a_1^{(2)}) = P(a_1^{(2)} \mid a_1^{(1)}) \cdot P(a_1^{(1)}) + P(a_1^{(2)} \mid a_2^{(1)}) \cdot P(a_2^{(1)}), \\ P(a_2^{(2)}) = P(a_2^{(2)} \mid a_1^{(1)}) \cdot P(a_1^{(1)}) + P(a_2^{(2)} \mid a_2^{(1)}) \cdot P(a_2^{(1)}), \\ P(a_1^{(1)}) + P(a_2^{(1)}) = 1, \\ P(a_1^{(2)}) + P(a_2^{(2)}) = 1. \end{cases}$$

Тут $P(a_i^{(j)})$ – ймовірність настання *i*-ї альтернативи *j*-го параметру, $P(a_i^{(j)} \mid a_{i'}^{(j')})$ – умовна ймовірність настання *i*-ї альтернативи *j*-го параметру за умови, що *j*`-й параметр

набув значення *i'*. Умовна ймовірність визначається за допомогою матриці взаємної узгодженості і апроксимується таким чином, щоб виконувались наступні умови:

$$P(P_{ij} \mid P_{i'j'}) = \begin{cases} 0, & a_{ij,i'j'} = -1, \\ p_{ij}, & a_{ij,i'j'} = 0, \\ 1, & a_{ij,i'j'} = 1, \end{cases}$$

де $a_{ij,i'j'}$ – значення в матриці взаємної узгодженості для *i*-ї альтернативи *j*-го параметру і *i'*-ї альтернативи *j'*-го параметру, p_{ij} – оцінена незалежна ймовірність появи *i*-ї альтернативи *j*-го параметру.

Отримана морфологічна система характеризує розглядувану проблему і дає змогу визначити групи найбільш ймовірних сценаріїв.

Однією із модифікацій методу морфологічного аналізу для використання в задачах технологічного передбачення є застосування його двічі – перший раз для аналізу неконтрольованих факторів, так званих факторів "зовнішнього світу", в результаті чого отримується декілька сценаріїв, які необхідно брати до розгляду. Друга ітерація морфологічного аналізу застосовується для синтезу стратегій, які описують реакцію на кожний з цих сценаріїв, в даному разі характеризуючими параметрами є фактори, на які можна в тій чи іншій мірі вплинути.

3. Використання методу в задачі управління транспортною мережею

Метод морфологічного аналізу було застосовано в задачі управління транспортною мережею великого міста, зокрема для розгляду способів зниження аварійності на вулично-дорожній мережі.

На першому етапі дослідження була проведена морфологічна класифікація аварійних ситуацій. В якості критичних були обрані наступні параметри:

1) характер аварійної ситуації: зіткнення з нерухомим об'єктом; зіткнення двох або більше транспортних засобів; наїзд на пішохода; відмова засобу пересування;
2) місце події: перехрестя; вузька дорога; широка дорога; тунель; міст; стоянка; двір;
3) час події: день (при природному освітленні); ніч (при штучному освітленні);
4) погодні умови: без опадів; дощ; сніг; ожеледиця; туман;
5) стан водія: нормальний; алкогольне сп'яніння;
6) що призвело до аварії: перевищення швидкості; виїзд за межі смуги або проїзжої частини; рух на червоне світло; поворот/розворот у не призначеному для цього місці; раптова зупинка або зупинка в непередбаченому місці; рух в місці, де це заборонено; не пов'язані з транспортним засобом фактори;
7) причина аварії: неуважність або помилка водія; втрата керування; свідоме порушення правил дорожнього руху; несправність засобу пересування; незалежні від водія фактори.

На основі обраних параметрів побудована морфологічна таблиця для аварійних ситуацій (табл. 3).

За допомогою методу попарного порівняння була оцінена незалежна ймовірність настання кожної з альтернатив критичних параметрів. Для врахування залежності між параметрами була побудована матриця взаємної узгодженості. Наведеним вище методом був зроблений перерахунок ймовірностей альтернатив параметрів. Таким чином визначено приблизний розподіл типів аварійних ситуацій. На його основі проводилось оцінювання ефективності різних методів боротьби з аварійними ситуаціями. Розглядувались дві групи методів:

Таблиця 3

Критичні параметри						
Характер аварійної ситуації	**Місце події**	**Час події**	**Погодні умови**	**Стан водія**	**Що призвело до аварії**	**Причина аварії**
1	2	3	4	5	6	7
Зіткнення з нерухомим об'єктом	Перехрестя	День	Без опадів	Нормальний	Перевищення швидкості	Неуважність або помилка
Зіткнення транспортних засобів	Вузька дорога	Ніч	Дощ	Сп'яніння	Виїзд за межі смуги або проїзжої частини	Втрата керування
Наїзд на пішохода	Широка дорога		Сніг		Рух на червоне світло	Свідоме порушення ПДР
Відмова засобу пересування	Тунель		Ожеледиця		Поворот/розворот	Несправність засобу пересування
	Міст		Туман		Зупинка	Незалежні фактори
	Стоянка				Рух в непередбаченому місці	
	Двір				Не пов'язані з транспортним засобом фактори	

1) методи запобігання аварійним ситуаціям: відеоспостереження з фотофіксацією порушень; автоматичні датчики швидкості; розмежувачі смуг на дорогах; уповільнювачі; пропаганда дотримання правил дорожнього руху;
2) методи ліквідації наслідків аварійних ситуацій: створення дорожніх бригад; керування світлофорами в ручному режимі; інформування інших учасників руху про аварію на ділянці дороги.

За допомогою матриці узгодженості була оцінена ефективність методів для окремих типів аварійних ситуацій. Враховуючи цю матрицю і оцінки ймовірності типів аварійних ситуацій, розрахована узагальнена ефективність методів боротьби з аварійними ситуаціями (табл. 4). Ці дані можуть бути використані для прийняття стратегічних рішень при створенні системи управління транспортом.

Таблиця 4

Методи запобігання аварійним ситуаціям		**Методи ліквідації наслідків аварійних ситуацій**	
	Оцінка		**Оцінка**
відеоспостереження з фотофіксацією порушень	0,339	керування світлофорами в ручному режимі	0,114
автоматичні датчики швидкості	0,228	створення дорожніх бригад	0,529
розмежувачі смуг на дорогах	0,134	інформування інших учасників руху про аварію на ділянці дороги	0,357
уповільнювачі	0,131		
пропаганда дотримання правил дорожнього руху	0,169		

Висновки

Метод морфологічного аналізу доцільно застосовувати в задачах технологічного передбачення як на етапі попереднього аналізу для обґрунтування мети дослідження та виявлення критичних технологій, так і на етапах якісного аналізу та створення альтернатив сценаріїв бажаного поводження систем або їхніх окремих елементів у майбутньому.

Цей метод може бути успішно застосованим для побудови стратегії прийняття рішень в складних системах різної природи, зокрема, в задачах створення нових складних технічних систем з урахуванням ситуації з деяким ступенем невизначеності та ризику.

Наведено приклад використання запропонованої реалізації методу морфологічного аналізу стосовно до задачі управління транспортною мережею великого міста з метою розгляду способів зниження аварійності на вулично-дорожній мережі.

ЛІТЕРАТУРА

1. Zwicky F., Wilson A.G. New Methods of Thought and Procedure. –Contributions to the Symposium on Methodologies, Pasadena, May 22-24, 1967.
2. Одрин В.М. Метод морфологического анализа технических систем. – М.: ВНИИПИ, 1989.
3. Катренко А.В. Системний аналіз об’єктів та процесів комп’ютеризації: Навчальний посібник. – Львів: “Новий світ – 2000”.
4. Згуровский М.З., Панкратова Н.Д. Технологическое предвидение. – К.: ІВЦ “Видавництво “Політехніка”, 2005.
5. Одрин В.М. Морфологический синтез систем: морфологические методы поиска. – Киев, 1986.
6. Одрин В.М. Морфологический синтез систем: постановка задачи, классификация методов, морфологические методы “конструирования”. – Киев, 1986.
7. Ritchey, T. Morphological Analysis – A general method for non-quantified modeling. – Adapted from a paper presented at the 16th Euro Conference on Operational Analysis, Brussels, July 1998. www.swemorph.com/pdf/gma.pdf.
8. Ritchey, T. Modeling Complex Socio-Technical Systems using Morphological Analysis. – Adapted from an address to the Swedish Parliamentary IT Commission, Stockholm, December 2002. www.swemorph.com/pdf/it-webart.pdf.
9. Ritchey, T. Futures Studies using Morphological Analysis. – Adapted from an article for the UN University Millennium Project: Futures Research Methodology Series, 2005. www.swemorph.com/pdf/futures.pdf.