

DOI <https://doi.org/10.15407/csc.2021.05-06.035>  
УДК 519.816

**О.В. БАБАК**, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Міжнародний науково-навчальний центр інформаційних технологій та систем НАН та МОН України, 03187, м. Київ, просп. Академіка Глушкова, 40, Україна, [dep115@irtc.org.ua](mailto:dep115@irtc.org.ua), [babak@irtc.org.ua](mailto:babak@irtc.org.ua)

**О.Е. ТАТАРИНОВ**, науковий співробітник, Міжнародний науково-навчальний центр інформаційних технологій та систем НАН та МОН України, 03187, м. Київ, просп. Академіка Глушкова, 40, Україна, [dep115@irtc.org.ua](mailto:dep115@irtc.org.ua); [al.ed.tatarinov@gmail.com](mailto:al.ed.tatarinov@gmail.com)

## КОГНІТИВНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СТАНУ ОБ'ЄКТА НА ОСНОВІ УЯВНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ

---

*У запропонованій статті показана одна з можливостей створення технологічного рішення задачі прогнозування стану деякого об'єкта в майбутньому за неповними і нечіткими даними. Робота має концептуальний характер і не зачіпає практичну сторону питання детальної побудови схеми когнітивного моделювання. В її основу покладено один з можливих методів уявного повного факторного експерименту, який використовує метод експериментальних збурень і завдяки якому при когнітивному аналізі можливе отримання нових знань про об'єкт. Для організації процесів аналізу і прогнозування в схему технологічного рішення «вбудований» експерт, який може як намітити хід досліджень, так й здійснити експертне оцінювання його результатів.*

**Ключові слова:** когнітивне моделювання, уявний повний факторний експеримент, метод експериментальних збурень, лінійна модель, метод найменших квадратів, експертне оцінювання.

### Вступ

На сучасному рівні розвитку досліджень в галузі штучного інтелекту він визначається як «комплекс технологічних рішень, що дозволяють імітувати когнітивні функції, отримуючи результати, зіставні з результатами інтелектуальної діяльності людини» [1]. У зв'язку з цим подані в цій статті підсумки дослідження, що має концептуальний характер, показують можливість створення елементів технології, яка імітує когнітивні функції аналізу стану об'єктів при зміні умов їх функціонування за допомогою уявного експерименту. При цьому під об'єктом будемо розуміти будь-яку частину навколишньої дійсності (процес, явище, предмет), що сприймається людиною як одне ціле.

У загальному випадку об'єкти моделювання — широке поняття, вони містять об'єкти живої та неживої природи і супроводжують їхні процеси та явища. Отже, моделі можуть мати фізичний і нефізичний вміст. Перші називаються натурними моделями, а другі — інформаційними. Тому створення моделей другого типу може бути пов'язано з прогнозуванням можливого стану об'єктів у різних задачах екологічного, технічного, соціального, політичного та іншого характеру. Особливість їхнього рішення полягає в тому, що доводиться, як правило, відновлювати невизначені, іноді непіддатливі кількісному аналізу залежності та закономірності. Оскільки натурні експерименти в зазначених предметних областях часто є неможли-

вими, а іноді дуже дорогі й навіть небезпечні, єдиним методом досліджень стає уявний експеримент при експериментальних збуреннях або «провокації» стану об'єкта. Зауважмо, що поняття «експериментальна провокація» увів у науковий обіг відомий соціолог Г. Гарфінкель [2]. Під цим вдалим терміном розуміють пізнавальний метод, що використовує дії, які порушують рівновагу того чи іншого об'єкта, перетворюючи його з метою отримати необхідні знання. Тут потрібно зазначити, що вказаний метод є до певної міри відомим, оскільки не лише в соціології, а й у багатьох галузях науки та техніки, особливо під час діагностики об'єктів, давно є прийоми (медицина, агрономія тощо), які мають усі формальні ознаки експериментальної провокації. Яскравою ілюстрацією цьому є, наприклад, імпульсний метод, наведений у [3], який виводить досліджувану технічну систему з рівноваги з метою отримання нових знань про її особливості. По суті, метод «експериментальної провокації» є одним із видів уявного експерименту й у технічних науках його слід називати методом експериментальних збурень. По суті, будь-яка математична модель об'єкта, створена в умовах повноти інформації про число та зміну факторів, і відповідно, функції відгуку, має когнітивні властивості. Проте в нашому розумінні для створення когнітивної моделі необхідно використовувати уявний експеримент. Відповідно, під когнітивним моделюванням на основі уявного експерименту будемо розуміти розв'язування задач когнітивного аналізу, до яких насамперед належать задачі оцінювання стану об'єкта за неповними та нечіткими даними. До їхнього числа входять також і некоректно поставлені задачі. У загальному випадку рішення їх містить такі елементи: розробка (композиція, декомпозиція) когнітивної моделі оцінювання, сценарний аналіз, прогнозування, пошук оптимальних умов, прийняття рішення експертом (експертами), і, відповідно, підтримка за допомогою програмних засобів.

Тому нами запропоновано процедуру побудови когнітивної інформаційної моделі оцінювання якості об'єкта будь-якої природи

на основі уявного повного факторного експерименту (УПФЕ) [4] та застосування методу експериментальних збурень. Складовими частинами моделі є множина факторів, значення яких вибираються в залежності від досліджуваної ситуації, і відповідна їй множина значень інтегральних показників якості інформації про стан об'єкта. Основний напрям когнітивного аналізу, розглянутий у статті, — прогноз стану об'єкта, яким може бути процес або явище. Під прогнозом, отриманим за допомогою когнітивної моделі, будемо розуміти можливий стан об'єкта в модельованому майбутньому та можливі тенденції його розвитку при гіпотетичних змінах факторів або їхніх сполучень. По суті в роботі розглядається тільки один із можливих напрямів прогнозу і зовсім не зачіпаються його моменти, пов'язані з характеристиками, що використовуються в науці прогностика. Таке прогнозування радше можна назвати науковим передбаченням — відповіддю на запитання: «А що буде, якщо ...?» [3]. При цьому головними факторами є не лише інтуїція та знання експерта при інтерпретації інтегральних показників якості інформації про стан об'єкта, але й оцінювання поставленої задачі прогнозу.

### Постановка задачі

Нехай при дослідженні деякого об'єкта виникає необхідність побудови процедури, яка оцінює стан (поведінку) його в теперішній або передбачуваній у майбутньому ситуації, можливо, небажаній або навіть небезпечній. Отже, необхідно зіставити і порівняти результати оцінювання прогнозу, отриманих статистичними методами на основі варіантів можливого стану об'єкта.

Нехай відомо число  $n$  значущих факторів  $x_j$ ,  $j = 1..n$ , а також функція відгуку  $y_i$ ,  $i = 1..l$ ,  $l < n + 1$ , де  $l$  — число натуральних дослідів. При цьому відома формула штучної характеристики функції відгуку  $y' = f(x)$  при  $l > n + 1$  —  $y' = a_0 + \sum a_j x_j$ .

Потрібно на основі методу експериментальних збурень при УПФЕ розробити евристичну процедуру побудови «реальної» когнітивної

моделі  $y' = f(x)$  та принципів когнітивного аналізу стану об'єкта, здійснюючи її етапи за наступною схемою:

- композиція штучної статичної прогнозної моделі, використовуючи кількісну (числову) за  $x$  і  $y$  та якісну за  $y$  інформацію, і, за необхідності (невідповідність бажаної точності оцінювання або будь-яких інших вимог) її декомпозиція;
- композиція «реальної» когнітивної моделі;
- розробка принципів стратегії побудови варіантів оцінювання стану об'єкта і прогнозу його стану в майбутньому;
- аналіз результатів оцінювання теперішнього і майбутнього стану об'єкта за допомогою експерта (групи експертів).

### Розв'язок задачі

При когнітивному підході розробка когнітивної моделі зазвичай починається з побудови когнітивної карти — знакового орієнтованого графа. Його створення можливе на підставі теоретичних уявлень про предметну область і за використання різних експертних методів [3].

Однак з точки зору обліку особливості людського мислення та його впливу в багатьох практичних випадках на якість досягнутих результатів, когнітивний підхід у ширшому розумінні може не прив'язуватися до поняття когнітивної карти. Крайня позиція тут полягає в тому, щоб розглядати когнітивні методи просто як різновид методів математичного моделювання [5]. Особливо не обов'язковою стає прив'язка до когнітивних карт, якщо кількість факторів є невеликою ( $n < 10$ ) і когнітивний підхід здебільшого залежить від суб'єктивного бачення ситуації, цілей, мотивації та інших особливостей мислення. З іншого боку, відомо, що під час планування та здійснення будь-якої діяльності людина у своїй свідомості вибудовує можливі варіанти поведінки досліджуваних об'єктів, програючи на них майбутні результати їхніх станів, оскільки їх можна передбачити заздалегідь. Іншими словами, уявне (когнітивне) моделювання — це, по суті, створення штучних моделей, які відтворюють

певні властивості досліджуваних об'єктів, іноді нездійсненних у реальних умовах [6, 7].

З огляду на викладене спочатку перейдемо до найважливішого першого етапу розробки процедури оцінювання ситуацій, тобто побудови статичної прогнозної когнітивної моделі.

Перш ніж знайти «реальну» модель об'єкта

$$y' = f(x), \quad (1)$$

припустимо, що є гіпотетична можливість побудови лінійних математичних моделей об'єкта за допомогою повного факторного експерименту (ПФЕ),  $N = 2^n$ , де  $N$  — число дослідів,

$$y = a_0 + \sum_{j=1}^n a_j x_j^k, \text{ тобто } y = f(x_j^k). \quad (2)$$

При цьому маємо  $a_0, a_j$  — оцінки коефіцієнтів і  $x_j^k = (\pm 1)$  — кодовані значення факторів. Спробуємо встановити (2) при побудові також за допомогою УПФЕ,  $N = 2^n$  лінійної моделі при штучному збуренні факторів  $x_j$ . Штучна модель має вигляд

$$y' = a'_0 + \sum_{j=1}^n a'_j (x_j \pm \Delta x_j)^k,$$

тобто  $y' = f[(x_j \pm \Delta x_j)^k]$ , (3)  
де  $y'$  — штучна функція відгуку, отримана в результаті збурення факторів,  $a'$  — оцінки коефіцієнтів.

Зауважимо, що модель (3) по суті є відображенням моделей (2).

Нагадаємо, що вибір процедури ПФЕ і УПФЕ дає змогу розв'язати проблему мультиколінеарності факторів внаслідок ортогональності матриці планування.

Для того, щоб приступити до розроблення, вірніше її композиції, вочевидь потрібно насамперед використовувати наявну числову інформацію про фактори з метою встановлення меж їхніх змін, оскільки умовою проведення УПФЕ є знання максимальних і мінімальних значень факторів. З поставленої задачі випливає, що інформація, яка міститься у вибірці, є неповною і тому зберігає в собі невизначеність. Тому висновки на підставі таких даних мають ймовірнісний характер і результати аналізу стану об'єкта заздалегідь є оціночними. Таким чином, оцінювання максимального і мінімального значення факторів  $x$  за умови

$l < n + 1$  може виявитися помилковим заняттям. Виходом з такого становища може бути метод експериментальних збурень, який подумки порушує стан об'єкта. Сутність запропонованого прийому полягає в наступному.

Вважаємо, що об'єкт перебуває, «образно» кажучи, в стані рівноваги і в умовах неповноти інформації значення факторів  $x$  та функції відгуку  $y$  можуть бути подані у виді середніх значень  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$ . Припустимо, що відбулися деякі однакові збурювальні впливи на фактори  $x_j$ , які порушують рівновагу об'єкта  $\pm x_j$ . Таким чином, формально маємо, відповідно, максимальні та мінімальні значення факторів

$$[(x_j + \Delta x_j), (x_j - \Delta x_j)], j = 1 \dots n, \quad (4)$$

і тоді модель (3) може бути подана у виді

$$y' = f[(x_j \pm \Delta x_j)^k]. \quad (5)$$

Нехай значення такого збурення в процентному відношенні становить величину  $\varepsilon$ , тоді маємо

$$|\Delta x_j| = \frac{x_j \varepsilon}{100}. \quad (6)$$

Зауважимо, що ця величина встановлюється на евристичному рівні за допомогою експерта і може відрізнитися залежно від впливу того чи іншого фактора та характеру його змінювання.

Залишається вирішення найважливішого питання, а саме, вирішення проблеми вибору якісної характеристики функції відгуку  $y'_j$ . За УПФЕ будемо вважати, що функцією відгуку може бути інтегральна характеристика кожного уявного експерименту, в основу якої покладено плідну ідею Харрінгтона [8] побудови узагальненого показника, названого ним функцією бажаності або, інакше кажучи, «образу» якості об'єкта

$$D = \left( \prod_{u=1}^n d_u \right)^{\frac{1}{n}}, \quad (7)$$

де  $d_u$  — часткова функція бажаності.

Відзначимо, що  $d_u$  є деякими змінними, що характеризують окремі значення якості, а вираз (7) є його інтегральною характеристикою. Отже, якщо змінні  $x$  знаходять своє відображення в функції відгуку  $y'$ , являючи собою в

певному сенсі «образ» стану об'єкта [4, 8], то вона за аналогією з виразом (7) може бути подана у вигляді

$$v_j = \left( \prod_{j=1}^n x_j^{p_j} \right)^{\frac{1}{n}}, \quad (8)$$

де  $p_j = \pm 1$ , причому знак  $\pm$  відповідає знаку відповідної складової градієнта лінійної функції (3). Зауважимо, що питання про знак при  $p_j$  може бути вирішено, якщо поведінка функції (3) (спадання, зростання від зміни  $x_j$ ) стала відомою експериментальним шляхом або встановлена на евристичному рівні. Однак при постановці даної задачі з огляду на неповноту даних така можливість не передбачається. Якщо  $p_j = 1$ , то вираз (8) за формою збігається з (7). Окремо зазначимо, що «образ» функції відгуку також може мати вигляд

$$v_j = \sum_{j=1}^n x_j^{p_j}.$$

Зупинимось на визначенні  $l$  числа значень

$\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i$  (5). Очевидно, що воно збігається

з величиною  $N = 2^n$ . Значення  $y'_{ij}$ , яке визначається за формулою (5), перебуває у відповідності з розташуванням у кожному рядку матриці УПФЕ кодованих значень  $x_j^k \pm 1$  з урахуванням натуральних значень  $x_j$ , які приймають вид (4). Значення величин стовпця  $y'_j$  в зазначеній матриці знаходяться шляхом комбінаторного перебору поєднань у формулі (8) значень  $x_j$ , що відповідають їхнім кодованим значенням в рядках  $x_j^k$ .

Для того щоб оцінити натуральні значення  $y_j$  за значенням  $y'_j$  (3), необхідно врахувати наступну обставину. При гіпотетичній побудові

моделі (2) зауважимо, що нульовий рівень  $y_0 = a_0$  приймає значення  $\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i$ . Цілком природним стає припущення, що його оцінка лінійно пов'язана з нульовим рівнем моделі

$y'_0 = a'_0$ , одержаної при збуреннях  $\Delta x_j$ , тобто (3).

Таким чином, якщо маємо  $a_0 = \alpha a'_{0i}$  і множини значень  $y'_j$ , то з'являється можливість встановити вигляд імовірної когнітивної моделі (3),

використовуючи, наприклад, критерій

$$\Delta_t = \min (a_0 - a'_{0t}), t = \forall \overline{1, N}, \quad (9)$$

де  $t$  — варіант моделі.

Однак у кожному конкретному випадку остаточно розв'язати це важливе питання можна тільки за допомогою експерта. Важливим він є не тільки тому, що дає змогу визначити структуру лінійної моделі (3), а й, знаючи оцінки  $a'_j$ , може вказати значущі фактори, впорядковуючи їх за характером зменшення значень  $a'_j$ .

Таким чином, для розробки когнітивної моделі оцінювання при уявному експерименті створено всі необхідні умови, а саме, визначено межі зміни факторів  $x$ , відповідні їм значення функції відгуку  $y'$ . Цілком природно, що єдиним раціональним способом (композиція) з'єднання факторів є побудова ортогональної матриці планування уявного експерименту  $N = 2^n$ , в якому реалізуються всі можливі поєднання рівнів факторів [9]. З урахуванням невідомих коефіцієнтів  $a'$  та значень  $y'$  можна перейти до системи нормальних рівнянь методу найменших квадратів (МНК)

$$X^T \cdot X \cdot A = X^T \cdot Y \quad (10)$$

і знайти їхні оцінки

$$A = (X^T \cdot X)^{-1} \cdot Y. \quad (11)$$

Зауважимо, що МНК, як будь-який статистичний метод, можна застосовувати лише при певних припущеннях. Найголовніше з них полягає в тому, що синтезовані значення лінійної функції відгуку є випадковими величинами з нормальним законом розподілу. Вирішити, чи справедливо це припущення в умовах УПФЕ, вочевидь неможливо і доводиться приймати його на віру. Серйозне порушення цього при-

пущення насамперед позначиться на точності моделі. З огляду на те, що адекватність моделі зі зрозумілих причин не можна встановити за критерієм Фішера, питання, наскільки отримана лінійна модель є придатною для когнітивного аналізу та прогнозування, можна вирішити лише за допомогою експерта. При цьому він може орієнтуватися лише на значення дисперсії адекватності. Викладене доцільно розглянути на дуже простому прикладі.

Нехай є вибірка  $\{x_{jp}, y_i\}$ ,  $j = \overline{1, n}$ ,  $i = \overline{1, l}$ , причому  $l < (n + 1)$ , і потрібно відновити лінійну функцію (1). Таким чином, внаслідок неповноти даних маємо некоректно поставлену задачу, тому що при побудові когнітивної моделі маємо недовизначену систему лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР), число рішень яких є нескінченним. Така задача не відповідає одній із трьох умов коректності за Ж. Адамаром [9], згідно з якою розв'язання має бути єдиним. У нашому випадку для того, щоб отримати розумне єдине розв'язання задачі, необхідно її «довизначити», додавши, зокрема, з допомогою експерта, деяку апріорну інформацію. Розглянемо як приклад випадок, коли  $n = 2$ ,  $l = 2$ , і відомі середні значення  $x_j$ , наприклад:  $\bar{x}_1 = 3, \bar{x}_2 = 5$  і  $\bar{y} = 10$ . Для розв'язання поставленої задачі використаємо метод експериментальних збурень. При цьому модель (3) з урахуванням збурювальних впливів  $\pm \Delta \bar{x}_j$  (5) і відповідно,  $\bar{x}_j \pm \Delta x_j$ , тобто максимальних і мінімальних значень факторів (4) має вигляд (6). Якщо  $|\Delta \bar{x}_1| = 1$  і  $|\Delta \bar{x}_2| = 2$ , то знаходимо:

$$\begin{aligned} x_{1\max} &= 4; & x_{2\max} &= 7; \\ x_{1\min} &= 2; & x_{2\min} &= 3. \end{aligned} \quad (12)$$

За допомогою формули (8) визначимо всі поєднання деякої множини  $x_1, x_2, x_1^{-1}, x_2^{-1}$ :

Таблиця. Матриця УПФЕ  $N = 2^n$

N	$x_0^k$	$x_1^k$	$x_2^k$	$v_1 = x_1 \cdot x_2$	$v_2 = x_1 \cdot x_2^{-1}$	$v_3 = x_1^{-1} \cdot x_2$	$v_4 = x_1^{-1} \cdot x_2^{-1}$	$y'_{3i}$	$(\Delta y'_3)_i$
1	+1	+1	+1	28	0,6	1,8	0,04	2,05	0,625
2	+1	-1	+1	14	0,3	3,5	0,1	3,5	0,625
3	+1	+1	-1	12	1,3	0,8	0,1	0,8	0,625
4	+1	-1	-1	6	0,7	1,5	0,2	1,75	0,625

$$\underline{x_1 \cdot x_2}, \underline{x_1 \cdot x_1^{-1}}, \underline{x_1 \cdot x_2^{-1}}, \underline{x_2 \cdot x_1^{-1}}, \underline{x_2 \cdot x_2^{-1}}, \underline{x_1^{-1} \cdot x_2^{-1}}$$

Вочевидь, що з них тільки підкреслені мають сенс і можуть бути використані як варіанти при визначенні величини (8), тобто  $v_1 = x_1 \cdot x_2, v_2 = x_1 \cdot x_2^{-1}$  тощо. Складаємо матрицю УПФЕ (Табл.).

Знаходимо згідно з (9) варіанти моделей:

1.  $y'_1 = 15 + 5 \cdot x_1^k + 6 \cdot x_2^k, \Delta_1 = -5;$
2.  $y'_2 = 0,73 + 0,23 \cdot x_1^k + 0,28 \cdot x_2^k, \Delta_2 = 9,27;$
3.  $y'_3 = 1,9 - 0,6 \cdot x_1^k + 0,75 \cdot x_2^k, \Delta_3 = 8,1;$
4.  $y'_4 = 0,11 - 0,04 \cdot x_1^k + 0,04 \cdot x_2^k, \Delta_4 = 9,89.$

Зауважимо, що модель 1 виключається з розгляду, оскільки не відповідає реальному стану об'єкта, тобто  $a_0 < a'_{01}$  ( $a_0 = 10, a'_{01} = 15$ ).

З огляду на (9) найбільш придатна модель відображена рівнянням 3, оскільки  $\Delta_3 = 8,1$  (тобто  $\Delta_3 < \Delta_2$  і  $\Delta_3 < \Delta_4$ ). Нагадаємо, що відображення «реальної» моделі  $y = f(x)$  в штучну  $y' = f(x_j^k)$  передбачає відповідність їхньої структури, що виражається в збігу знаків перед коефіцієнтами  $a_j$  і  $a'_j$  і однаковим характером упорядкування їх значень.

У нашому випадку структура моделі  $y = f(x)$  також включає в себе  $(-a_1, +a_2)$  і  $(|a_2| > |a_1|)$ . При цьому залишається лише оцінити значення цих коефіцієнтів. Іншими словами, ідеться про те, щоб за відображенням  $y' = f(x_j^k)$  знайти подібну «реальну» модель  $y = f(x)$ . І така можливість, як показано далі, може бути реалізована на основі властивості ортогональної матриці ПФЕ [9]. Нагадаємо, що наслідком множення матриці значень функції відгуку на будь-яке раціональне число  $\alpha$ , тобто  $\alpha \cdot Y'$  (10), є і відповідна зміна матриці значень оцінок коефіцієнтів  $\alpha \cdot A'$  (11). Модель (2), гіпотетично знайдена за ПФЕ, і модель, отриману в результаті УПФЕ (3), об'єднує одна дуже важлива характеристика, а саме, нульовий рівень функції відгуку  $\bar{y}$ . Природно, що якщо структури (2) і (3) співпадають, то стає справедливим припущення, що  $\bar{y} = \alpha \cdot \bar{y}'$  і відтак  $a_0 = \alpha \cdot a'_0$ .

Отже, знаходимо

$$\alpha = \frac{10}{1,9} \approx 5,26.$$

При цьому «реальна» когнітивна модель (1) приймає вид  $f(x_j^k) = \alpha \cdot f'(x_j^k)$ , тобто

$$f(x_j^k) = 10 - 3,16 \cdot x_1^k + 3,95 \cdot x_2^k. \quad (13)$$

Аналіз результатів розв'язання поставленої в прикладі задачі буде неповним без визначення дисперсії адекватності  $S_{ад}^2$ , якщо відомі значення  $\Delta y_i^2$  і число ступенів свободи  $f_1$  ( $f_1 = 1$ ). Оскільки  $(\Delta y_3^2)_i'$  (див. Табл.) зміниться і буде для «реальної» моделі  $\Delta y_{3i}^2 = (\Delta y_3^2)_i' = 1,74$ , то

$$S_{ад}^2 = \frac{1}{f_1} \cdot \sum_{i=1}^N \Delta y_i^2 = 6,96.$$

Слід зазначити, що наявність результатів  $y'_3$ , що різко відхиляються, свідчить про порушення закону нормального розподілу (див. Табл.,  $y'_3 = 3,5$ ).

На закінчення зауважимо, що це не є випадковістю і пояснюється однаковим характером підбору випадкових даних (6). У разі врахування на евристичному рівні характеру зміни факторів, тобто  $\varepsilon$  не дорівнює одній і тій самій величині, результат буде іншим. Однак у цьому окремому випадку експерт може погодитися з неадекватністю моделі, оскільки головну мету досягнуто, одержано модель (13), яка дає змогу здійснювати когнітивне оцінювання.

У випадку, якщо експерт висловить сумніви про точність моделі, то необхідно збільшити її за рахунок зменшення значення дисперсії адекватності  $S_{ад}^2$  і відтак приступити до декомпозиції моделі. Є два добре відомі у моделюванні гарантованих розв'язання цього питання: зміна меж зміни значень факторів і кусково-лінійна апроксимація. Оскільки перший спосіб розв'язання не становить особливих труднощів, але іноді є неможливим або небажаним, то зупинимося на другому. Відомо, що результатом кусково-лінійної апроксимації є кусково-лінійна функція, яка визначена на множині дійсних чисел, лінійна в кожному з інтервалів, що становлять область визначення. В нашому випадку відомі межі зміни множини факторів  $X^k$  і формально шукану функцію за-

дають на кожному з інтервалів, число яких задано, дорівнює  $k$ , тобто  $(x_{j\min}^k, x_{j1}^k); (x_{j1}^k, x_{j2}^k); \dots (x_{jk}^k, x_{j\max}^k)$ , формулою:

$$f(x) = \begin{cases} f_1(x) = \hat{y}'_1, & x_{j\min}^k < x^k < x_{j1}^k \\ f_2(x) = \hat{y}'_2, & x_{j1}^k < x^k < x_{j2}^k \\ \dots \\ f_k(x) = \hat{y}'_k, & x_{jk}^k < x^k < x_{j\max}^k \end{cases}$$

При цьому кожному інтервалу відповідає своя ортогональна матриця і система нормальних рівнянь (10), результатом розв'язання якої є  $\hat{y}'_i, i = \overline{1, k}$ . Отже, на кожному інтервалі можна визначити дисперсію адекватності  $S_{ад}^2$ . При цьому її середнє значення  $S_{ад i}^2, i = \overline{1, k}$ , природно, зменшиться.

Попри простоту наведеного прикладу, його можна узагальнити на більш складний випадок, наприклад, коли число значущих факторів  $n = 5$ . Відтак, маємо множину  $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_1^{-1}, x_2^{-1}, x_3^{-1}, x_4^{-1}, x_5^{-1}$ , що включає 10 елементів, і необхідно знайти число поєднань  $C_{10}^5 = 252$ . У цьому разі слід використовувати відомі в комбінаториці способи і програми генерації всіх можливих варіантів поєднань за винятком тих, що містять пари  $x_k, x_k^{-1}, \forall k = \overline{1, 5}$ . Маємо ортогональну матрицю УПФЕ із застосуванням дробових реплік  $2^{5-1} (N=16)$ , в графах якої  $y'$  (див. Табл.) розташовані його результати, що представляють собою добутки отриманих поєднань. У кожному стовпці таблиці знаходиться  $\frac{1}{4} \sum_{i=1}^{16} y'_i$ , отже, стає відомим  $a'_{0i}$ . При цьому для множини варіантів отриманих поєднань визначається  $\Delta_n$  (9) і встановлюється оптимальний варіант. Відповідно до нього знаходять значення  $a'_j, j = \overline{1, 5}$  і функцію  $y' = f(x^k)$ .

Отже, можна підбити такі підсумки. В результаті застосування методу експериментальних збурень нам вдається отримати такі знання про досліджуваній об'єкт:

- визначити структуру лінійної моделі, тобто знаки при оцінках коефіцієнтів, використовуючи якісні значення функції відгуку;

- встановити ступінь значущості факторів за значущістю оцінок коефіцієнтів;
- здійснити перехід від моделі, отриманої в режимі збурень до гіпотетичної «реальної» моделі.

Слід особливо наголосити, що йдеться тільки про експертне оцінювання характеристик реальної моделі об'єкта.

Таким чином, можна перейти до останніх етапів схеми когнітивного аналізу, який полягає в стратегії побудови варіантів оцінювання й аналізу теперішнього і майбутнього стану об'єкта.

*Перший варіант.* Якщо є математична модель, отримана в результаті уявного експерименту (1), то може бути розроблений план дослідження стану об'єкта, тобто функції відгуку  $\hat{y}'$  за певною варіацією факторів у заданих межах. Мабуть, при підготовці такого плану потрібно враховувати і знання експерта (експертів). Результатами реалізації такого плану є прогноз бажаного (небажаного) стану об'єкта, якщо відбулася передбачувана зміна значень факторів. Таким чином, дослідник може розв'язати пряму задачу прогнозу, а саме, змінюючи значення факторів встановити поведінку об'єкта, що його цікавить, на множині значень функції відгуку. Вочевидь, дана реалізація описаного варіанту сценарію є доцільною на стадії вивчення поведінки об'єкта і тому не потребує серйозної комп'ютерної підтримки навіть тоді, коли виникає необхідність встановити нові межі зміни факторів. Якщо об'єкт достатньо вивчений, тобто межі зміни факторів і бажане значення функції відгуку встановлено, іноді може виникнути необхідність розв'язати зворотну задачу прогнозу. Сформулювати її можна так. За відомим значенням функції відгуку на множині значень факторів  $X$ , що існують в заданих межах, знайти їхні значення відповідно до встановленої функції  $\hat{y}' = f(x)$ . Природно, при цьому є безліч розв'язань задачі. Встановити одне з них, відповідне до знань про природу об'єкта, можна методом підбору за допомогою експерта. У найпростіших випадках, коли  $n \leq 3$ , знайти таке рішення можна шляхом нескладних обчислень. Зі збільшенням

факторів розв'язання задачі ускладнюється і вимагає включення в процес генератор його випадкових чисел, за допомогою якого можна подивитися значне число ситуацій на множині  $X$  і знайти шукану.

*Другий варіант.* Якщо лінійна модель (1) є адекватною, то може виникнути питання визначення точки її оптимуму. Тут можливі три ситуації: 1) точка існує в межах зміни факторів, 2) вона перебуває за їхніми межами близько до них, і 3) немає інформації про її стан (невизначена ситуація). Вочевидь, що знову йдеться про прогноз можливого стану об'єкта, а також про прийняття рішення, обов'язково спираючись на знання експерта. У двох останніх випадках розв'язання є однаковим — рух за градієнтом (спуск або підйом). Найменш цікавим є перший випадок, оскільки точка оптимуму може бути встановлена шляхом підбору (див. перший варіант) або ж під час обговорення моделі. Що стосується випадків пошуку оптимальних умов шляхом руху за градієнтом, то вони доволі добре описані у відповідних літературних джерелах, наприклад, у [10].

Автори усвідомлюють, що в роботі відсутній критерій якості одержуваних моделей і чисельні експерименти для розмірності факторів більше двох, а також що варто було б показати працездатність запропонованого підходу на типових прикладах некоректних задач. Однак зазначене слід розглядати як область подальших досліджень.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Каляев И. А., Заборовский В. С. Искусственный интеллект: от метафоры к техническим решениям. Control Engineering. Россия, СПб.: ООО «Электроникс Паблицинг», 2019. 5 (83). С. 26–31. URL: [https://controleng.ru/wp-content/uploads/CE\\_0583.pdf](https://controleng.ru/wp-content/uploads/CE_0583.pdf) (дата звернення: 17.03.2021).
2. Гарфинкель Г. Исследования по этнометодологии. СПб.: Питер. 2007. 335 с.
3. Горелова Г. В., Мельник Э. В., Коровин Я. С. Когнитивный анализ, синтез, прогнозирование развития больших систем в интеллектуальных РИУС. Искусственный ин-теллект. 2010. 3. С. 61–72. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/56170/07-Gorelova.pdf?sequence=1>.
4. Бабак О. В., Суровцев І. В., Татарінов О. Е., Галімова В. М. Спосіб побудови психофізичної шкали оцінювання станів досліджуваного об'єкта. Control Systems and Computers. 2019. 5. С. 70–78. DOI: <https://doi.org/10.15407/csc.2019.05.065>.
5. Абрамова Н. А. Человеческие факторы в когнитивном подходе. Управление большими системами. Выпуск 16. М.: ИПУ РАН, 2007. С. 5–25. URL: <http://www.mtas.ru/Library/uploads/1168452403.pdf>.
6. Горелова Г. В., Мельник Э. В., Радченко С. А., Каляев А. И. Планирование эксперимента при исследовании новых методов и алгоритмов организации распределенных вычислений. Вестник компьютерных и

#### Висновки

У запропонованій статті показано одну з можливостей створення технологічного розв'язання задачі прогнозування стану деякого об'єкта в майбутньому за неповними і нечіткими даними. Робота має концептуальний характер, оскільки вона тільки до певної міри стосується проблеми прийняття рішень у зазначеній непростій ситуації і не зачіпає практичну сторону питання детальної побудови схеми когнітивного моделювання.

Проте в її основу покладено одну з можливих методологій УПФЕ, завдяки якій при когнітивному аналізі можливим є отримання нових знань про об'єкт. Для організації процесів аналізу та прогнозування в цю схему «вбудовано» експерта, оскільки він не тільки може окреслити перебіг досліджень, а й здійснити оцінювання його результатів. Оскільки воно певною мірою може мати суб'єктивний характер, то, на нашу думку, в складних випадках слід використовувати принцип колективного прийняття рішень [11].

Важливо зазначити, що на сучасному рівні розв'язувати задачі когнітивного моделювання можна лише за підтримки наявних програмних засобів або таких, що ще розробляються. І нарешті, в статті йдеться про прогнозування і, як уже зазначалося, абсолютно не зачіпаються основні поняття прогностики як науки, що вивчає загальні принципи та шляхи можливого розвитку об'єктів будь-якої природи, а також закономірностей процесу розробки прогнозів.



- информационных технологий. 2007. 10. С. 49–56.
7. Альбертин С. В. Когнитивное моделирование как способ научного познания и творчества. Гуманитарные научные исследования. 2016. 8. С. 20–228. URL: <http://human.snauka.ru/2016/08/16289> (дата звернення: 03.03.2021).
  8. Harrington E. C. The Desirability Function. *Industrial Quality Control*. 1965. 21 (10). P. 494–498.
  9. Тихонов А. Н., Арсенин В. О. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1986. 287 с.
  10. Адлер Ю. В., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий: монография. М.: Наука, 1976. 280 с. URL: <https://techliter.ru/load/0-0-1-2759-20> (дата звернення: 17.03.2021).
  11. Пристрій для вибору оптимальних рішень: пат. 111567 Україна; МПК (2016.01), G06F 17/00, G06F 17/16 (2006.01). № а201507034; заявл. 25.11.15, Бюл. № 22; опубл. 20.05.16, Бюл. № 9.

Надійшла 08.07.2021

## REFERENCES

1. Kalyayev I. A., Zaborovskiy V. S., 2019. “Iskusstvennyy intellekt: ot metafory k tekhnicheskim resheniyam” [“Artificial intelligence: from metaphor to technical solutions”], *Control Engineering, Electronics Publishing LLC, SPb, Russia*, 5 (83), pp. 26–31. [online] Available at: [https://controleng.ru/wp-content/uploads/CE\\_0583.pdf](https://controleng.ru/wp-content/uploads/CE_0583.pdf) (Last accessed: 17.03.2021). (In Russian).
2. Garfinkel H., 2007. *Issledovaniya po etnometodologii* [Studies in ethnomethodology]. Piter, SPb., 335 p. (in Russian).
3. Gorelova G. V., Melnik E. V., Korovin Ya. S., 2010. “Kognitivnyy analiz, sintez, prognozirovaniye razvitiya bolshikh sistem v intellektualnykh RIUS” [“Cognitive analysis, syn-thesis, forecasting of development of large systems in intelligent RIUS”], *Arts. intelligence*, 3, pp. 61–72. [online] Available at: <http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/56170/07-Gorelova.pdf?sequence=1> (Last accessed: 17.03.2021). (In Russian).
4. Babak O. V., Surovtsev I. V., Tatarinov A. E., Galimova V. M., 2019. “The Method of Psychophysical Scale Constructing for Assessing the Conditions of the Studied Object”, *Control Systems and Computers, IRTC, Kyiv*, 5, pp. 70–78. DOI: 10.15407/csc.2019.05.065. (In Ukrainian).
5. Abramova N. A., 2007. “Chelovecheskiye faktory v kognitivnom podkhode” [“Human factors in the cognitive approach”], *Large-Scale Systems Control, Vypusk 16, IPU RAN, Mos-cow*, pp. 5–25. (In Russian).
6. Gorelova G. V., Melnik E. V., Radchenko S. A., Kalyayev A. I., 2007. “Planirovaniye eksperimenta pri issledovanii novykh metodov i algoritmov organizatsii raspredelennykh vychisleniy” [“Planning an experiment in the study of new methods and algorithms for organiz-ing distributed computing”], *Vestnik kompyuternykh i informatsionnykh tekhnologiy*, 10, pp. 49–56. (In Russian).
7. Albertin S. V., 2016. “Kognitivnoye modelirovaniye kak sposob nauchnogo poznaniya i tvorchestva” [“Cognitive modeling as a way for scientific creativity”], *Electronic scientific & practical journal «Humanitarian scientific research»*, 8, pp. 20–228. [online] Available at: <http://human.snauka.ru/2016/08/16289> (Accessed 03.03.2021). (In Russian).
8. Harrington E. C. The Desirability Function. *Industrial Quality Control*, 1965, 21 (10), pp. 494–498.
9. Tikhonov A. N., Arsenin V. O., 1986. *Metody resheniya nekorrektnykh zadach* [Methods for solving ill-posed problems], Science, Moscow, 287 p. (In Russian).
10. Adler Yu. V., Markova Ye. V., Granovskiy Yu. V., 1976. *Planirovaniye eksperimenta pri poiske optimalnykh usloviy* [Planning an experiment when searching for optimal conditions], Monograph, Nauka, Moscow, 280 p. [online] Available at: <https://techliter.ru/load/0-0-1-2759-20> (Accessed 17.03.2021). (In Russian).
11. Osypenko V. V., Babak O. V., Stepashko V. S., 2016. *Prystriy dlya vyboru optymalnykh rishen* [Device for the selection of optimal solutions], Ukraine, Patent 111567. (In Ukrainian)

Received 08.07.2021

O.V. Babak, PhD in Techn. Sciences, Senior Researcher,  
International Research and Training Centre of Information Technologies  
and Systems of the NAS and MES of Ukraine,  
Glushkov avenue, 40, Kiev, Ukraine, 03187,  
dep115@irtc.org.ua, babak@irtc.org.ua

O.E. Tatarinov, Researcher,  
International Research and Training Centre of Information Technologies  
and Systems of the NAS and MES of Ukraine,  
Glushkov av., 40, Kiev, Ukraine, 03187,  
dep115@irtc.org.ua; al.ed.tatarinov@gmail.com

## COGNITIVE MODELLING OF THE STATE OF AN OBJECT BASED ON A THOUGHT EXPERIMENT

**Introduction.** At the current level of the research in the field of artificial intelligence, it is defined as a set of technological solutions that allow simulating cognitive functions, obtaining results comparable to the results of human intellectual activity. In this regard, the problem of creating a technology that imitates the cognitive functions of analyzing the state of objects is arisen when the conditions of their functioning are changed. Analysis of the status of objects in the different problems of environmental, technical, social, political and other nature is carried out mostly on the information models. The peculiarity of their solution lies in the fact that it is necessary, as a rule, to restore indefinite, sometimes not amenable to quantitative analysis, dependencies and patterns. Since full-scale experiments in these subject areas are often impossible, and sometimes very expensive and even dangerous, the only research method in this case is a thought experiment using the method of experimental perturbations of the state of an object.

**Purpose.** The purpose of the article is to create a method of cognitive modelling based on a thought experiment for the problem of assessing the state of an object from incomplete and fuzzy data.

**Methods.** To implement the method of cognitive modelling based on a thought experiment, the method of a mental complete factor experiment is applied using the method of experimental perturbations.

**Results.** To implement the method of cognitive modelling based on a mental experiment, a procedure has been created that evaluates the state (behaviour) of an object in a present or anticipated future situation based on the method of a mental complete factor experiment using the method of experimental perturbations. The developed procedure makes it possible to obtain the solutions to the problem of predicting the state of a certain object in the future using in-complete and fuzzy data and by means of an expert "built in" to evaluate the forecasting results.

**Conclusion.** The results of the research presented in this article are conceptual in nature, show the possibility of creating elements of technology that imitate the cognitive functions of analyzing the state of objects when changing the conditions of their functioning using a thought experiment. The developed method can be used to solve the problems of assessing the state of various objects when creating the intelligent information analysis systems in order to obtain new knowledge about the object.

**Keywords:** *cognitive modelling thought full factorial experiment, experimental perturbation method, linear model, least square method, expert assessment.*