УДК 519.8.816

**А. О. Азарова, О. М. Роїк, А. В. Поплавський,
П. В. Павловський, А. П. Ткачук**
Вінницький національний технічний університет
Хмельницьке шосе, 95, 21021 Вінниця, Україна

Метод формалізації процесу прийняття рішення на базі теорії порогових елементів

Проведено дослідження та обґрунтовано можливість використання теорії порогових елементів для формалізації процесу прийняття складних неструктурованих рішень, а також розроблено відповідний метод класифікації різних об'єктів на основі математичного апарату порогових елементів.

Ключові слова: *прийняття рішення, система підтримки прийняття рішення, формалізація процесу, математичний метод, порогові елементи.*

Вступ

Друга половина XX століття характеризувалась активним розвитком теорії прийняття рішень. На початку 70-х років інтенсивно проводилися роботи з автоматизації прийняття управлінських рішень, що і слугувало поштовхом для побудови систем підтримки прийняття рішень. Вони стали окремою галуззю обчислювальної техніки та потужним інструментарієм зростання продуктивності управлінської праці. Побудова та впровадження систем підтримки прийняття рішення (СППР) перетворилися за кордоном у галузь бізнесу, що швидко розвивається.

Складність розв'язуваних задач, спектр галузей їхнього застосування зростали в часі, а отже і відбувалася трансформація змісту цього терміну. Спочатку застосовували так звані ідеальні зразки структури СППР. Потім виникла проблема еластичного функціонування цього типу систем, що призвело до змінення відповідних внутрішніх структур. Врешті-решт, бурхливий розвиток засобів штучного інтелекту та експертних систем створив новітні інструменти, методи та можливості для розроблення систем комп'ютеризованої підтримки рішень.

Серед дослідників, праці яких набули вагомого значення для розвитку математичного апарату теорії прийняття рішення, необхідно зазначити таких дослідників як Р. Кіні, Х. Райфа, В.Ф. Ситніка, І.В. Сергієнка, Дж. Неймана, О. Моргенштерна, Т. Сааті, С. Беленсона, Л.В. Канторовича, Л.В. Гнеденка, М.П. Бусленка, І.І. Ляшка, М.М. Моісеєва, В.Л. Волковича, Д.Б. Юдіна, О.В. Мертенса, Ю.М. Єрмольєва, О.І. Ларичева, С.В. Ємельянова, І.В. Єрьоміна, О.І. Ястремського та багатьох ін. [1–3].

Процедура прийняття рішення тісно пов'язана з поняттям ієрархічності, що пояснюється потребою вирішення такої дилеми: воно повинно здійснюватися доволі часто в умовах обмеженості часового терміну, разом із цим неможливо прогнозувати всі наслідки щодо різних альтернативних дій. Крім того, недостатньою є інформація щодо наявних кореляційних зв'язків. Це унеможливлює повний і чіткий формалізований опис об'єкта дослідження, який є необхідним для адекватного віднесення його до певного класу.

Розглянута проблема виникає під час прийняття рішення у різних галузях людської діяльності, зокрема, медицині, бізнесі, менеджменті, штучному інтелекті, виборчих системах, промисловому керуванні тощо.

Ієрархічність у прийнятті рішення не тільки є засобом розв'язання вищерозглянутої дилеми, але й характеризує природу ситуаційного аспекту. Зокрема, проблемі прийняття кінцевого раціонального рішення передує розв'язання цілої низки послідовно розташованих простіших підпроблем. Такий декомпозиційний підхід до прийняття рішень є єдино можливим за необхідності врахування потужних масивів слабоструктурованої інформації, а, отже, і великої кількості різноякісних параметрів впливу на об'єкт, що потребує на віднесення до певного класу за відповідними критеріями.

Постановка задачі та метод дослідження

У багатьох задачах прийняття рішення необхідно здійснити розбиття множини досліджуваних об'єктів на підмножини, тобто вирішити класичну задачу класифікації об'єктів, а отже відсортувати за певних умов. Наступною може виникати потреба оптимізації створених підмножин об'єктів згідно із галуззю її застосування.

Формалізовано у загальному вигляді можна проблему прийняття рішення представити у такому вигляді:

$$\mathbf{PR} = \{\mathbf{O}, \mathbf{X}^*, \mathbf{X}, \mathbf{Q}, \mathbf{K}, \mathbf{F}_1, \mathbf{F}_2, \mathbf{F}_3\}, \tag{1}$$

де $\mathbf{O} = \{o_m\}$ — множина досліджуваних об'єктів, $m = \overline{1, M}$;

$\mathbf{X}^* = \{x^*_c\}$ — множина первинних вхідних параметрів, $c = \overline{1, t}$;

$\mathbf{X} = \{x_i\}$ — множина оцінювальних параметрів, $i = \overline{1, n}$;

$\mathbf{Q} = \{q_k\}$ — множина вихідних параметрів, $k = \overline{1, l}$;

$\mathbf{K} = \{k_j\}$ — множина критеріїв, за якими здійснюється сортування, $j = \overline{1, S}$;

$\mathbf{F}_1$: $\mathbf{X}^* \to \mathbf{X}$ — функція перетворення оцінювальних параметрів;

$\mathbf{F}_2$: $\mathbf{O}^* \to \mathbf{O}_j$ — функція сортування;

$\mathbf{F}_3$ — функція оптимізації.

Для отримання остаточного результату **Q** під час прийняття рішення, виходячи з множини первинних вхідних параметрів $\mathbf{X}^*$, необхідно реалізувати вищевказані функції у такій послідовності:

$$\mathbf{X}^* \xrightarrow{\mathbf{F_1}} \mathbf{X} \xrightarrow{\mathbf{F_2}} \mathbf{O} = \{\mathbf{O_j}\} \xrightarrow{\mathbf{F_3}} \mathbf{Q}. \qquad (2)$$

Отже, процес прийняття оптимального рішення полягає у виконанні 3 етапів, кожен з яких призначений для реалізації відповідної функції.

Кожна з описаних функцій має змінними множини первинних вхідних параметрів $\mathbf{X}^*$ та оцінювальних параметрів $\mathbf{X}$. Для отримання остаточного результату $\mathbf{Q}$ необхідно реалізувати послідовність функцій $\mathbf{F_1}\ldots\mathbf{F_3}$.

На основі вищеописаної математичної моделі прийняття рішення (1) пропонується такий загальний підхід до формалізації процесу прийняття рішення.

1. Формулювання мети прийняття рішення.

2. Визначення множини оцінювальних параметрів $\mathbf{X}$ (вона може мати складні оцінювальні параметри, які, у свою чергу, визначаються на базі множини первинних вхідних параметрів $\mathbf{X}^*$ та функції $f_{1c} \in \mathbf{F}_1$, що пов'язує x^*_c та x_i, $c = \overline{1,t}$, $i = \overline{1,n}$).

3. Формування множина вихідних параметрів $\mathbf{Q}$ згідно мети прийняття рішення.

4. Визначення критеріїв k_j, $j = \overline{1,S}$, на базі яких відбуватиметься сортування об'єктів множини $\mathbf{O} = \{o_m\}$, $m = \overline{1,M}$.

5. Побудова функції оптимізації.

Під час прийняття рішення для об'єктів, що характеризуються кількісними оцінювальними параметрами, традиційно застосовують лінійні моделі зважених сум і порядкові шкали. При цьому відсутні підходи, що дозволяють визначати вагові коефіцієнти. Таким чином, виникає проблема у розробленні відповідного методу, що може формалізувати процеси згортання великої кількості параметрів впливу на досліджуваний об'єкт для віднесення його до певного класу. Це і зумовлює потребу в застосуванні саме апарату порогових елементів для вирішення задач, які поставлені у статті.

Отже, основною задачею дослідження є вирішення проблеми класифікації об'єктів за різними ознаками (критеріями) на основі теорії порогових елементів, що базується на розробленні відповідного методу формалізації процесу прийняття рішення для складних об'єктів або систем, які описуються кількісними параметрами, з підвищеною швидкістю оброблення інформації і можливістю адаптації до швидкоплинного зовнішнього середовища.

Розроблення концептуальних засад побудови методу формалізації процесу прийняття рішення на базі теорії порогових елементів

Пороговий елемент (ПЕ) в автоматиці та обчислювальній техніці — це пристрій (схема) з кількома входами і одним виходом, сигнал на якому з'являється лише тоді, коли вплив вхідних сигналів перевищує деякий рівень, що називають порогом спрацювання [4]. ПЕ призначено, головним чином, для порівняння значень вхідних величин (сигналів) із заданою величиною (еталонним сигналом). Пороговий елемент для порівняння двох вхідних сигналів називають нуль-органом. Вихідний сигнал y може набувати лише одне зі значень — логічний 0 або 1 і пов'язаний з вхідними сигналами x_i співвідношенням [5]:

$$y = \begin{cases} 1, \ \textit{якщо} \ \sum_{i=1}^{n} \lambda_i x_i \ge \lambda_0, \\ 0, \ \textit{якщо} \sum_{i=1}^{n} \lambda_i x_i < \lambda_0, \end{cases}$$

де y — змінна, що характеризує стан виходу (за виглядом вихідні сигнали бувають імпульсні, частотні, фазові, амплітудні); x_i — змінна, що характеризує стан i-го входу; λ_i — ваговий коефіцієнт i-го входу (i = 1, 2, ..., n) (i = 1, 2, ..., n); λ_0 — поріг спрацювання (значення функції від вхідних сигналів, за яким скачкоподібно змінюється вихідна величина y) [6].

Порогові елементи застосовуються: в моделях перцептрона, нейронних мережах [7]; пристроях управління як «диспетчери», які видають управлінські вихідні сигнали за умови досягнення порогового значення функції від вхідних сигналів; приборах, які реєструють або сигналізують про змінення напруги, що контролюється, сигналу; в реле часу (таймерах), температури і т.п.

Порогові пристрої, що називають також компараторами, застосовують в аналого-цифрових перетворювачах, генераторах імпульсів. Частковий випадок порогових елементів — мажоритарні елементи, що працюють за «принципом більшості», тобто, якщо на більшість входів елемента подано сигнал 1, то на виході схеми з'являється сигнал 1 [6].

Специфіка розв'язуваної задачі полягає у віднесенні об'єкта до відповідного класу, за умови досягнення його порогового значення, та визначає кількість S підмножин $\mathbf{O}_j$. Віднесення об'єкта до відповідної підмножини здійснюється за певним критерієм d_j, $j = \overline{1, S}$. Розглянемо для цього двоїстий критерій, який складається з таких компонент [8]:

1) відповідність значення оцінювального параметра певному діапазону його змінення;

2) впливовість цього параметра на результат прийнятого рішення.

Нехай кожний елемент o_m з множини $\mathbf{O}$ характеризується деякими параметрами x_i, $i = \overline{1, n}$. Необхідно визначити діапазон змінення $\left[x_{i\min}, x_{i\max}\right]_j$ цих параметрів згідно з критеріями d_j, $j = \overline{1, S}$, які мають однозначно та прозоро уможливлювати віднесення елемента o_m до однієї з підмножин $\mathbf{O}_j$.

Опишемо відповідність значення параметра x_i діапазону $\left[x_{i\min}, x_{i\max}\right]_j$ логічною змінною y_i, значення якої знаходиться за таким правилом [9]:

$$y_i = \begin{cases} 0, \ \textit{якщо} \ x_i \notin \left[x_{i\min}, x_{i\max}\right]_j, \\ 1, \ \textit{якщо} \ x_i \in \left[x_{i\min}, x_{i\max}\right]_j. \end{cases} \tag{3}$$

Отже, вектор $\mathbf{Y}_{dj} = [y_{1,j},..., y_{n,j}]$ логічних значень будується на основі значень параметрів x_i елемента o_m за критерієм d_j, $j = \overline{1, S}$.

Впливовість певного оцінювального параметра має враховуватись у функції вибору, що будується окремо для кожного критерію d_j. Використаємо як функцію вибору логічну функцію, яку називатимемо надалі логічною функцією вибору

$F(y_1,..., y_n)$. Якщо елемент o_m належить до підмножини $\mathbf{O}_j$ на векторі $\mathbf{Y}_{dj}$, то така функція $F(y_1,..., y_n)$ набуває одиничного значення.

Опишемо процес побудови логічної функції вибору. Для початку виділимо набори параметрів, що мають рівний вплив на віднесення елемента o_m до відповідної підмножини $\mathbf{O}_j$. Цю задачу кваліфіковано можуть виконати експерти в галузі знань, в якій приймається рішення. Згідно зі ступенем впливу, кожному з наборів відповідає свій ранг. Найвпливовіший набір параметрів характеризується рангом $r = 1$. Кількість R цих наборів визначає кількість рангів. Розподіл параметрів x_i за наборами породжує розбиття множини $\mathbf{Y} = [y_1,..., y_n]$ на підмножини $\mathbf{Y}_r = \{y_{l,\,r}\}$, $l = \overline{1, p_r}$, де p_r — кількість логічних змінних r-го рангу.

Логічна функція вибору $F(y_1,..., y_n)$ будується за таким алгоритмом. Вона набуває одиничного значення, якщо значення всіх логічних змінних 1-го рангу дорівнюють одиниці або коли значення всіх логічних змінних 1-го рангу, крім однієї, дорівнюють одиниці, і усі змінні 2-го рангу мають одиничне значення; або, у свою чергу, одна з логічних змінних 2 рангу може мати нульове значення і т.д. Отже, принцип побудови функції вибору полягає у заміні нульового значення певної змінної R-го рангу одиничними значеннями усіх логічних змінних $(R - 1)$-го рангу.

Таким чином, логічна функція вибору $F(y_1,..., y_n)$ набуде такого вигляду:

$$F(y_1,...,y_n) = f_1(f_2(...(f_i(...(f_{R-1}(f_R))...))...)) , \tag{4}$$

де $f_i = \bigwedge_{l=1}^{p_i} y_{l,i} \vee (\bigvee_{l=1}^{p_i-1} (y_{l,i}(\bigvee_{m=1}^{p_i-l} y_{l+m,i})$, $(i = \overline{1, R-1})$ та $f_R = \bigwedge_{l=1}^{p_R} y_{l,R}$.

Залежність (4) характеризує мінімальну форму, яка не є зручною для практичного застосування. Зрозуміло, що більш зручною є мінімальна диз'юнктивна нормальна форма (МДНФ). Її пошук спричиняє потребу у визначенні кількості простих імплікант, які би мала ця форма функції. Для вирішення цієї проблеми сформулюємо таку теорему [8].

Теорема. *Нехай R — кількість рангів змінних* y_i, $i = \overline{1, n}$ *, логічної функції вибору* $F(y_1,..., y_n)$, *а* p_r *— кількість логічних змінних r-го рангу* ($r = \overline{1, R}$), *тоді МДНФ функції* $F(y_1,..., y_n)$ *має таку кількість q простих імплікант:*

$$q = 1 + \sum_{j=1}^{R-1} \left(\prod_{l=1}^{j} p_l \right) . \tag{5}$$

Доведення. Логічна функція вибору містить одну імпліканту, що має всі змінні 1-го рангу. Крім того, до неї також належить p_1 імпліканта, що описується відсутньою однією з логічних змінних 1-го рангу, проте наявними всіма змінними 2-го рангу. До того ж, функція вибору має імпліканти, що описуються однією відсутньою логічною змінною 1-го рангу і однією з логічних змінних 2-го рангу, проте наявними усіма змінними 3-го рангу. Кількість цих імплікант становитиме p_1p_2. Крім того, до цієї функції належать імпліканти, в яких є відсутньою одна зі змінних 1-го, 2-го, 3-го рангів, але наявними — усі змінні 4-го рангу. Отже, кількість цих імплікант складає $p_1p_2p_3$.

Продовжуючи аналогічним чином ці міркування, визначимо, що загалом функція має імпліканти, в яких є відсутніми одна з логічних змінних 1-го рангу, 2-го рангу,…, (R – 1)-го рангу та присутніми — усі змінні R-го рангу. Кількість таких імплікант дорівнює $p_1p_2\ldots p_{R-1}$.

Підбиваючи підсумок щодо усіх описаних вище імплікант, отримаємо вираз (5), що й необхідно було довести.

За умови великих масивів елементів o_m практичне застосування МДНФ функції $F(y_1,..., y_n)$ та критеріїв k_j є достатньо громіздким і незручним. Наприклад, для n = 20, R = 5, p_1 = 6, p_2 = 5, p_3 = 4, p_4 = 3, p_5 = 2, використовуючи (5), отримаємо 517 простих імплікант у МДНФ такої функції. За умови 20 елементів o_m та 10 S критеріїв k_j, необхідно обробити понад 100 000 простих імплікант.

Отже, для спрощення такого процесу пропонується використовувати порогову функцію такого вигляду:

$$H(y_1,...,y_n)=\sum_{i=1}^{n} w_i y_i\ , \tag{6}$$

де w_i — ваги елемента y_i, $i=\overline{1,n}$.

За умови, якщо $H(y_1,..., y_n) \geq G$, де G — поріг, то вектор значень $\mathbf{Y}_{kj}$ відповідає критерію k_j. А, якщо $H(y_1,..., y_n) < G$, то він відповідає іншому критерію.

Застосування виразу (6) уможливлює значне зменшення громіздкості обчислень. Розглянемо складність розрахунку за вищенаведеними умовами: слід обробити 10 сум за виразом (6) для кожного з 20-ти елементів o_m, тобто всього потрібно виконати 200 операцій за залежністю (6), що у 500 разів менше, ніж за залежністю (5).

Для переходу від логічної функції вибору $F(y_1,..., y_n)$ до порогової $H(y_1,..., y_n)$ слід дотримуватися наступного алгоритму [9].

1. Визначити МДНФ інверсної функції $\overline{F}(y_1,...,y_n)$, використовуючи закон де Моргана та застосовуючи правила поглинання та склеювання.

2. Розрахувати характеристичні параметри h_i для усіх y_i. Характеристичний параметр h_i логічної змінної y_i — це кількість імплікант ДДНФ (досконала диз'юнктивна нормальна форма) функції $F(y_1,..., y_n)$ з (одиничною) змінною y_i, на яких вона набуває одиничного значення.

3. Визначити співвідношення між вагами w_i логічних змінних y_i, $i=\overline{1,n}$, за такою залежністю:

$$\begin{cases} Якщо\ h_i(F) > h_j(F),\ то\ \ w_i > w_j\ , \\ Якщо\ h_i(F) = h_j(F),\ то\ \ w_i = w_j\ . \end{cases} \tag{7}$$

4. Побудувати систему нерівностей для ваг змінних.

Така система має дві компоненти. Перша визначається функцією $F(y_1,..., y_n)$. Кожна з імплікант функції $F(y_1,..., y_n)$ утворює нерівність. Нехай імпліканта набуває вигляду $y_{k1}, y_{k2},\ldots, y_{kr}$. Тоді будь-яка логічна змінна має відповідну вагу $y_{ki} \to w_{ki}$. Отже, ця імпліканта породжуватиме нерівність вигляду:

$$w_{k1} + w_{k2} + ... + w_{kr} \geq G. \tag{8}$$

Друга компонента визначається на основі імплікант функції $\overline{F}(y_1,...,y_n)$. При цьому для імпліканти $y_{l1}, y_{l2},\ldots, y_{lS}$ маємо нерівність

$$w_{m1} + w_{m2} + ... + w_{mt} < G, \tag{9}$$

де $m_1, m_2, ..., m_t$ — індекси змінних, що не містяться у розглянутій імпліканті.

5. Спростити систему нерівностей. Спрощення здійснюється з урахуванням таких міркувань, що $w_{1,r} = w_{2,r} = ... = w_{p_r,r}$, а ваги змінних r-го рангу більші за ваги змінних $(r + i)$-го, $i = \overline{1, R-r}$, $w_{l,r} > w_{j,r+i}$ $l = \overline{1, p_r}$, $j = \overline{1, p_{r+i}}$, $\forall l, j$.

Нехай, наприклад, маємо таке співвідношення між вагами змінних $w_1 < w_2 = w_3 < w_4 < w_5$ та систему нерівностей:

$$\begin{cases} w_1 + w_2 + w_4 + w_5 \geq G, \\ w_1 + w_3 + w_4 + w_5 \geq G. \end{cases}$$

Оскільки $w_2 = w_3$, то ці дві нерівності еквівалентні, і в подальшому достатньо використовувати лише одну з них.

6. Переписати скорочену вище систему нерівностей, що отримана на попередньому етапі, з урахуванням таких міркувань.

Співвідношення $w_{l,r} > w_{j,r+i}$ можна записати у вигляді рівності

$$w_{l,r} = w_{S,R} + \sum_{i=1}^{R-r} \delta_i\ , \quad S = \overline{1, p_R}\ , \tag{10}$$

де δ_i — цілі додатні числа, що є більшими за нуль. Вважатимемо $S = 1$, тобто базовою буде вага першої змінної R-го рангу.

7. Обчислити величину порогу G та значення w_i, які задовольняють системі нерівностей, що отримана на етапі 5, та дають мінімум лінійної форми

$$R = G + \sum_{i=1}^{n} w_i\ . \tag{11}$$

Виходячи з вищенаведеного, пропонується такий підхід для переходу від логічної функції вибору $F(y_1,..., y_n)$ до порогової $H(y_1,..., y_n)$, що полягає у виконанні наступних етапів [9].

1. Сформувати МДНФ інверсної логічної функції $\overline{F}(y_1,...,y_n)$.
2. Побудувати систему нерівностей вигляду (8) і (9) для ваг змінних.
3. Здійснити спрощення визначеної системи нерівностей.
4. Перетворити систему нерівностей із застосуванням виразу (10).
5. Обчислити ваги w_i та поріг G.
6. Зафіксувати порогову функцію $H(y_1,..., y_n)$, як визначено виразом (6).

Інколи, виходячи зі специфіки задачі та умов моделювання, можуть виникати випадки, коли порогові функції вибору не будуть забезпечувати віднесення елемента o_m до жодної з підмножин $\mathbf{O}_j$. Це зумовлюється тим, що експерти не спроможні передбачити всі можливі варіанти віднесення елементів до відповідних підмножин і практично можуть бути не враховані функціонально незмістовні елементи, які є теоретично можливими.

Для усунення таких випадків розглянемо наступний підхід. Скористаємося концепцією коефіцієнта наближення q до порогу G. Застосовуючи раціональні міркування, зауважимо, що q повинен задовольняти умові $0{,}5 < q < 1$. Величина q визначається рівнем точності, з якою слід отримати результат, тому зростання потреби в точності зумовлює зростання значення q.

Для елемента o_m обчислюються $\delta_j = \dfrac{H_{d_j}}{G_{d_j}}$, $j = \overline{1, S}$. Серед значень δ_j обирається максимальне $\delta_k = \max\ \{\delta_j\}$, $j = \overline{1, S}$. Якщо $\delta_k \geq q$, то елемент o_m належить до підмножини $\mathbf{O}_k$. В іншому випадку o_m належить підмножині O_{s+1} функціонально незмістовних елементів, що далі не розглядаються.

Таким чином, пропонується такий метод формалізації процесу прийняття рішення на базі математичного апарату порогових елементів, що полягає у виконанні наступних етапів [10].

1. Сформувати множину $\mathbf{Q}$ вихідних параметрів.
2. Побудувати множину $\mathbf{X}$ оцінювальних параметрів x_i, $i = \overline{1, n}$.
3. Визначити множину $\mathbf{X}^*$ та функції $f_{1c} \in F_1$, що пов'язують x^*_c та x_i, $c = \overline{1, t}$, $i = \overline{1, n}$.
4. Сформувати функцію оптимізації.
5. Визначити логічні функції вибору $F(y_1,..., y_n)_j$, $j = \overline{1, S}$.
6. Перетворити логічні функції вибору на порогові вигляду (6).
7. Обрати коефіцієнт наближення q.

Прийняття рішення при такому підході будемо здійснювати за описаною нижче процедурою.

1. Визначити вектори $\mathbf{Y}_{dj} = [y_{1,j},..., y_{n,j}]$ для кожного елемента o_m множини $\mathbf{O}$.
2. Розрахувати H_{dj} для векторів $\mathbf{Y}_{dj}$, $j = \overline{1, S}$.
3. Оцінити належність елемента o_m до відповідної підмножини.
4. Оптимізувати обрані підмножини.

Належність елемента o_m до відповідної підмножини визначається за таким алгоритмом:

1) якщо $H_{dj} \geq G_{dj}$, то елемент o_m належить до підмножини $\mathbf{O}_j$;

2) якщо $H_{dj} < G_{dj}$, для усіх j, то визначаються δ_j. Якщо знаходиться найбільше за значенням $\delta_k \geq q$, то елемент o_m належить до підмножини $\mathbf{O}_k$.

3) якщо $\delta_k < q$, тоді цей елемент належить до функціонально незмістовної підмножини O_{s+1}.

Для оптимізації сформованої підмножини можна використовувати інші відомі математичні апарати [10–12].

Висновки

Сформовано концептуальні засади та здійснено теоретичне обґрунтування особливостей застосування математичного апарату порогових елементів для прийняття складних класифікаційних рішень. Це уможливлює значне спрощення процедури формалізації СППР для об'єктів з кількісними оцінювальними параметрами.

Запропоновано метод формалізації процесу прийняття рішення на базі теорії порогових елементів для об'єктів з кількісними оцінювальними параметрами, що, на відміну від існуючих підходів, зокрема методики лінійних зважених сум, дає можливість обґрунтовано визначати ваги оцінювальних параметрів. Це уможливлює прийняття чіткого та однозначного рішення за умови неповного перебору комбінацій значень оцінювальних параметрів.

Розроблено алгоритм прийняття рішення в процесі застосування описаного вище методу, особливістю якого є те, що він чітко та кардинально описаний і доволі просто реалізується із застосуванням сучасної комп'ютерної техніки.

1. Кини Р.Л., Райфа Х. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения. Москва: Радио и связь, 1981. С. 18–20.
2. Сытник В.Ф. Математическое моделирование управления предприятиями. Київ: Вища школа, 2015. 312 с.
3. Sergienko I.V., Hulianytskyi L.F., Sirenko S.I. Classification of applied methods of combinatorial optimization. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2013. **45**(5). P. 732–741.
4. Большая российская энциклопедия: пороговый элемент. URL: https://bigenc.ru/technology and technique/text/3159531
5. Инютин С.А. Синтез схем на пороговых элементах. Москва, 2017.
6. Пухальский Г.И. Цифровые устройства. Санкт-Петербург, 2016.
7. Галушкин А.И. Нейроные сети: основы теории. Москва, 2016.
8. Азарова А.О., Юхимчук С.В. Математичні моделі ризику для систем підтримки прийняття рішень: монографія/Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2003. 188 с.
9. Азарова А.О. Розробка системи прийняття рішення на порогових елементах. *Вісник ВПІ*. 1999. № 4. С. 44–47.
10. Азарова А.О., Лужецький В.А. Розробка структурних моделей та алгоритмів формалізації багатоешелонної СППР. *Вісник Чернігівського технологічного інституту*. 2000. № 10. С. 182–191.
11. Azarova A.O., Moroz O.V., Zhalin Y.O. The mathematical model of enterprises innovation attractiveness on the basis of fuzzy logic theory. *Science and education: Collection of scientific articles*. Verlag SWG imex GmbH, Nürnberg, Deutschland, 2017. P. 277–280.
12. Азарова А.О., Присяжнюк М.В. Обґрунтування вибору оптимального програмного продукту управління збутом на підприємстві засобами лінійної моделі зважених сум. Глобальні та національні проблеми економіки. *Вісник Миколаївського національного університету імені В.О. Сухомлинського*. 2018. Вип. 22. С. 1019–1022.

Надійшла до редакції 05.09.2018