

А.В. КУПЧИН

Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України, Київ, Україна, e-mail: *kupchyn.artem@ukr.net*.

В.С. КОМАРОВ

Центральний науково-дослідний інститут Збройних Сил України, Київ, Україна, e-mail: *komarvlad@ukr.net*.

І.В. БОРОХВОСТОВ

Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України, Київ, Україна, e-mail: *borohvostov@icloud.com*.

О.М. КУПРІНЕНКО

Національна академія Сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів, Україна, e-mail: *Kuprinenko@ukr.net*.

В.В. СОТНИК

Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України, Київ, Україна, e-mail: *Sotvladislav@gmail.com*.

М.О. БЛОКУР

Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України, Київ, Україна, e-mail: *nikolas200578@gmail.com*.

В.В. ОЛЕКСІЮК

Центральний науково-дослідний інститут Збройних Сил України, Київ, Україна, e-mail: *voleksiyk@ukr.net*.

МОДЕЛЬ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ФОРСАЙТУ НА ОСНОВІ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

Анотація. Розроблено модель технологічного прогнозування, в якій межі критичності технологій не визначаються експертом, а розраховуються на основі запропонованих еквідистантних точок. Показано вплив застосування різних функцій належності на оцінку критичності. Проведено порівняння із сучасною методикою технологічного форсайту.

Ключові слова: критичні технології, нечітка логіка, визначення функції належності, технологічний форсайт.

ВСТУП

Прогнозні дослідження у технологічній галузі (технологічний форсайт), безперечно, є одним із найважливіших інструментів розвитку економіки країни. Визначивши ключові науково-технологічні напрями та здійснивши їхнє дослідження, розвиток і впровадження, передові країни побудували успішні економічні моделі. У більшості країн світу найперспективніші напрями у технологічній галузі називають критичними технологіями (КТ) [1].

У теорії бізнесу впродовж двох останніх десятиліть все частіше говорять про проривні технології, які є революційними та руйнують сучасну систему цінностей у технологічній галузі. У 2020 році навіть організація НАТО з питань науки та технологій опублікувала доповідь «Science & Technology Trends 2020–2040», де визначено нові (emerging) та проривні технології (НПТ) у галузі оборони [2]. Незважаючи на те, що перелік НПТ досить тісно корелюється з переліками КТ, він є набагато вужчим.

У цій статті розглянуто проблему вдосконалення прогнозного дослідження, яке можна застосувати як для КТ, так і для НПТ, тому надалі оперуватимемо лише поняттям КТ.

Зазвичай основою форсайтів є експертні оцінки, отримані із застосуванням того чи іншого методу [3–6]. Цю проблематику розглянуто у численних наукових роботах і публікаціях. Методи, що ґрунтуються на експертних опитуваннях, завжди мають певну суб'єктивну похибку, тоді як застосування об'єктивних математичних розрахунків надає змогу її мінімізувати.

Метою статті є зменшення суб'єктивної складової у прийнятті рішення щодо формування переліку КТ шляхом застосування науково-методичного апарату теорії нечіткої логіки.

Нині практичне застосування нечіткої логіки покладено в основу моделювання різноманітних процесів майже в усіх галузях життєдіяльності людини, від роботи побутових приладів до функціонування систем навігації, штучного інтелекту, роботизованих комплексів та навіть у діагностуванні захворювань [7–9].

У разі застосування математичного апарату нечіткої логіки завжди актуальним є визначення функції належності. У цій роботі запропоновано визначити функцію належності не на основі експертних оцінок, а спираючись на певні математичні розрахунки.

1. АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРИ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Аспекти застосування технологічного форсайту розглянуто у численних працях як вітчизняних, так і закордонних науковців.

У роботах [10–13] описано основні та найбільш поширені методи форсайту, а саме метод Делфі, експертні панелі, бібліометричний та патентний аналіз, SWOT-аналіз тощо. Прогнозування здійснюється з використанням комплексу методів експертного оцінювання, зокрема, методу Делфі [3–5, 14, 15].

Проблематика у галузі розвитку і впровадження КТ є предметом досліджень багатьох вчених. Зокрема, у [16] відображено нинішню ситуацію з формування переліку КТ, у роботах [10, 13, 16] наведено огляд підходів до визначення поняття «критичні технології» та описано процес формування переліку КТ у різних країнах.

Аналіз робіт [10–16] свідчить про те, що ідеального методу немає, оскільки основою кожного є цілеспрямоване використання знань експертів. Зазначені роботи безумовно становлять науковий інтерес. Однак, варто зауважити, що публікації мають методологічний характер та зосереджені на концептуальних та аналітичних питаннях. Незважаючи на значний обсяг виконаних досліджень, у цих публікаціях немає аналізу жодних методів об'єктивного оцінювання. Вони містять розгляд лише всім відомих експертних методів. До того ж, не відображено проблематику процесу прогнозування як такого.

Поряд з цим, досить широкої популярності набуло застосування апарату нечіткої логіки для розв'язання низки прикладних задач у прогнозних дослідженнях.

Наприклад, у роботі [17] описано процес прогнозування запасів продукції на складах на основі FIS та ANFIS моделей. Результати цих досліджень свідчать про те, що модель на базі нечіткої логіки забезпечує кращі показники загальної економії запасів. Вони перевищують більше ніж на 75 % значення показників, отриманих за допомогою застосованої раніше стохастичної моделі.

У роботі [18] описано прогнозування програмних несправностей в ІТ-галузі, у [19] здійснено прогнозування розвитку економіки та фінансів. Нечітка логіка використовується навіть для виявлення ефективних інновацій у галузі вищої освіти [20].

Поза сумнівом, роботи [17–20] становлять значний інтерес, оскільки в них запропоновано до розгляду нові підходи у прогнозуванні. Проте всі важливі для нечіткої логіки процедури описані поверхово, або не показані взагалі. Зокрема, не обґрунтовано вибір вхідних змінних, незрозумілим залишається і процес визначення функцій належності.

Безумовно, перелік прогнозних досліджень із використанням нечіткої логіки не є вичерпним. Однак, авторам цієї статті на цей час не відомо про застосування нечіткої логіки у технологічному форсайті. На нашу думку, форсайт-проекти з визначення переліку КТ, описані у [10–16], не мають принципової відмінності один від одного та є застарілими.

Зазвичай остаточний перелік КТ визначає експертна рада шляхом голосування. Проте рішення, ухвалені на основі суб'єктивної думки експертів, не завжди є правильним. Проаналізовані наукові джерела не розкривають дієвого механізму зменшення суб'єктивізму у прийнятті рішення. В умовах, коли відсутні чіткі границі відбору технологій, цю проблему досить вдало можна розв'язати із застосуванням апарату нечіткої логіки.

Широке обговорення в наукових колах доцільності та необхідності розвитку КТ є достатньо красномовним свідченням актуальності порушеної в цій статті проблеми.

2. РОЗРОБЛЕННЯ МОДЕЛІ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕННЯ В ТЕХНОЛОГІЧНОМУ ФОРСАЙТІ

На початку 2021 року авторами цієї статті було проведено опитування експертів щодо визначення найбільш вагомих критеріїв відбору технологій до переліку критичних. У результаті визначено п'ять найважливіших критеріїв (табл. 1). Детальний опис проведеного опитування та його результатів не наведений у цій статті, оскільки згодом буде предметом окремої публікації.

Відповідно до сучасної методики [21], попередній перелік технологій оцінює експертна група і за результатами формує список з відповідними оцінками за кожним критерієм. Далі експертна рада вирішує, які саме технології слід вважати критичними, а які ні.

У цій роботі запропоновано зменшити суб'єктивність у прийнятті цього рішення шляхом визначення математично обґрунтованого мінімально задовільного рівня критичності. Для цього рекомендовано використовувати модель прийняття рішення із застосуванням нечіткої логіки.

По суті, запропонована модель є системою нечіткого виведення (далі — система), на вхід якої подають оцінки технологій за критеріями, а виходом є визначення критичності технологій.

Розглянемо запропоновану модель прийняття рішення поетапно.

Визначення функцій належності вхідних та вихідних лінгвістичних змінних. Зазвичай функції належності (ФН) визначають, спираючись на думку експертів або суб'єктивну думку дослідника [22, 23]. У цій роботі описано новий принцип побудови ФН, який надає змогу на основі математичних розрахунків визначати межі критичності. Запропонований варіант розв'язання цієї задачі складається з трьох кроків.

Апроксимація розподілу технологій за критерійними оцінками їхньої критичності. Розмістивши по осі абсцис технології в порядку зростання оцінки за певним критерієм, можна знайти наближену (апроксимувальну) функцію, яка відображає критерійну оцінку критичності для кожної технології.

У результаті численних розрахунків автори статті дійшли висновку, що найбільш достовірними апроксимувальними функціями є поліноми 3-го та вищого степеня [21]. У табл. 2 наведено різні види апроксимувальних функцій із

Таблиця 1. Критерії визначення критичності технологій

№	Критерій	Ваговий коефіцієнт
1	Масштаб застосування	0,14
2	Перспективність	0,232
3	Науково-технічний потенціал	0,175
4	Економічна доцільність	0,208
5	Ефективність	0,245

Таблиця 2. Достовірності апроксимувальних функцій

№	Вид апроксимувальної функції	Вигляд апроксимувальної функції	Достовірність апроксимації (R^2)
1	Логарифмічна	$y = 5,311\ln(x) - 0,528$	0,811
2	Степенева	$y = 2,267x^{0,688}$	0,897
3	Експоненціальна	$y = 3,035e^{0,123x}$	0,945
4	Лінійна	$y = 1,014x + 1,238$	0,967
5	Поліноміальна 2-го степеня	$y = 0,007x^2 + 0,899x + 1,563$	0,968
6	Поліноміальна 3-го степеня	$y = -0,009x^3 + 0,223x^2 - 0,533x + 3,774$	0,983
7	Поліноміальна 4-го степеня	$y = -0,001x^4 + 0,021x^3 - 0,100x^2 + 0,710x + 2,494$	0,986
8	Поліноміальна 5-го степеня	$y = -0,0001x^5 + 0,003x^4 - 0,049x^3 + 0,347x^2 - 0,457x + 3,397$	0,986

відповідними коефіцієнтами детермінації. Для розрахунків вибрано вхідні оцінки за критерієм «Масштаб застосування», про що йтиметься у розд. 3.

З наведених у табл. 2 даних чітко видно, що найвищу достовірність апроксимації мають поліноміальні функції 3-го, 4-го та 5-го степенів. Водночас приріст значення коефіцієнта детермінації, отриманий із застосуванням поліномів 3-го та 4-го степеня, є несуттєвим та становить 0,03 %, у разі застосування поліномів 4-го та 5-го степеня цього приросту взагалі немає.

Авторами запропоновано визначати мінімальний рівень критичності за апроксимувальною функцією для критерію з найменшим ваговим коефіцієнтом, а максимальний — за апроксимувальною функцією для критерію з найвищим ваговим коефіцієнтом. У такий спосіб буде забезпечено максимальний діапазон нечіткості. До того ж, визначені межі мають бути єдиними для всіх критеріїв.

Диференціювання апроксимувальної функції та знаходження еквідистантних точок. Як відомо, в околі точки, де похідна дорівнює одиниці, приріст функції та приріст аргументу однакові [24]. Ця точка не має загальноприйнятої назви, тому запропоновано ввести термін «еквідистантна точка похідної» (від англ. equidistant — рівновіддалений) [25, 26].

Якщо апроксимувальну функцію представити у вигляді полінома 3-го степеня, то еквідистантних точок буде дві: x_1, x_2 (похідна від функції 3-го степеня матиме 2-й степінь, тому це квадратичне рівняння може мати два розв'язки).

Є два варіанти представлення апроксимувальної функції. У першому варіанті на проміжках $x < x_1$ та $x > x_2$ приріст функції є значно більшим, ніж приріст аргументу, а на проміжку $x_1 < x < x_2$ приріст функції є несуттєвим порівняно з приростом аргументу. У другому варіанті ситуація протилежна — на проміжках $x < x_1$ та $x > x_2$ приріст функції є значно меншим, ніж приріст аргументу, а на проміжку $x_1 < x < x_2$ — значно більшим.

Іншими словами, якою б не була апроксимувальна функція, її зміна завжди матиме два характерних інтервали. На цьому і ґрунтується принцип визначення меж чіткості. На рис. 1 наведено варіант побудови функції належності на основі еквідистантних точок.

Оскільки на осі абсцис розміщено перелік технологій у порядку зростання їхньої критичності, можна дійти логічного висновку, що технології до точки x_1 матимуть найнижчу критичність, а технології після точки x_2 — найвищу. Проміжок між цими точками запропоновано вважати нечітким інтервалом (рис. 1, б).

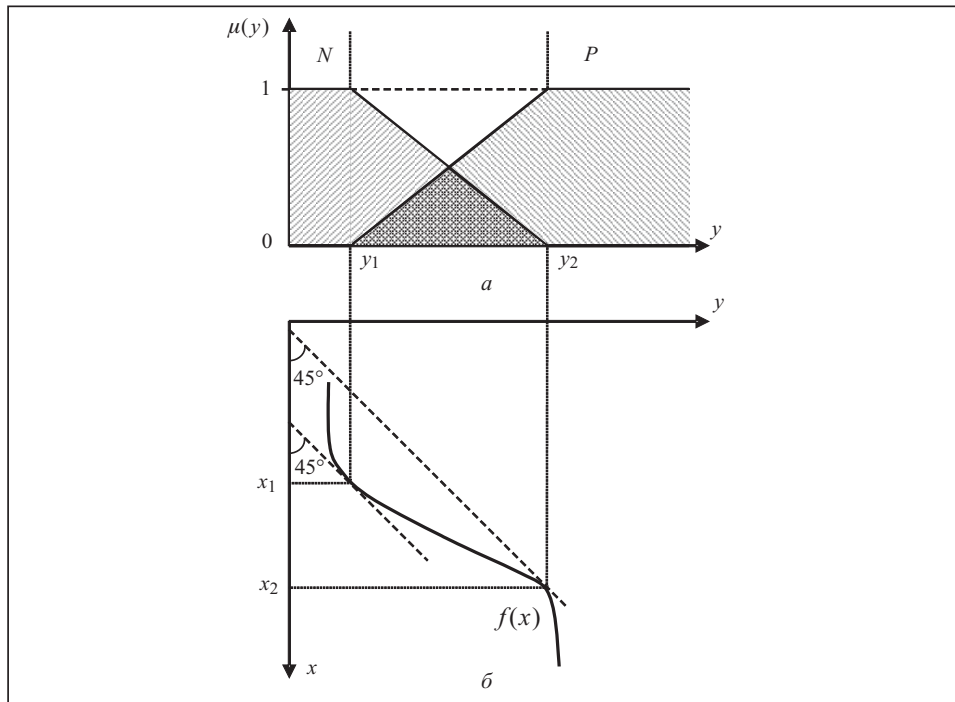


Рис. 1. Побудова функції належності на основі еквідистантних точок

У разі використання нечіткої логіки зазначені інтервали формують дві нечіткі множини, що становлять інтерес і характеризують ступінь критичності технологій (рис. 1, а):

1 — множина некритичних технологій, для якої є справедливими вирази $\mu(y)=1 \forall y \in (0; y_1)$ та $\mu(y)=0 \forall y \in (y_2; y_n)$;

2 — множина критичних технологій, для якої є справедливими вирази $\mu(y)=0$ для $\forall y \in (0; y_1)$ та $\mu(y)=1$ для $\forall y \in (y_2; y_n)$, де $\mu(y)$ — функція належності до нечіткої множини; y_1, y_2 — значення критичності в еквідистантних точках; y_n — максимальна оцінка критичності досліджуваних технологій.

Значення y_1, y_2 знаходимо шляхом підстановки відповідних аргументів у рівняння апроксимувальної функції.

Зауважимо, що у статті розглянуто варіант, коли дискримінант продиференційованої (квадратичної) функції є більшим за нуль. Отримати дві еквідистантні точки можна не завжди, однак, якщо це можливо, то запропонований варіант визначення інтервалів функції є досить вдалим. Визначення об'єктивних інтервалів зміни функції в умовах відсутності еквідистантних точок є напрямом подальших досліджень.

Побудова функцій належності. Теорія нечітких множин не зобов'язує абсолютно чітко або точно обирати вид функції належності [22, 23]. Його можна уточнити під час дослідження на основі результатів розв'язання задачі. У розробленій моделі будуть застосовані трикутні та трапецієвидні ФН.

Попередньо визначені інтервали нечітких множин є базою для побудови ФН вхідних лінгвістичних змінних (ЛЗ). Отримавши еквідистантні точки, будемо відповідні ФН термів (див. рис. 1). Водночас точка мінімального значення терму N є точкою максимального значення терму P і навпаки.

На рис. 1, б зображено апроксимувальну функцію $f(x)$ з еквідистантними точками x_1, x_2 та відповідними значеннями критичності за певним критерієм y_1, y_2 . Вісь ординат апроксимувальної функції $f(x)$ є віссю абсцис для ФН $\mu(y)$. На рис. 1, а зображено ФН для двох термів N (negative) та P (positive).

Побудова ФН для вихідної ЛЗ дещо відрізняється. Запропоновано застосовувати також трикутну та трапецієвидну функцію, але з іншими межами критичності.

Спочатку визначимо універсум вихідної ЛЗ. Припустимо, що максимальне значення вихідної ЛЗ (β) дорівнює одиниці, а мінімальне — нулю. До того ж, максимальна оцінка за критерієм відповідає його ваговому коефіцієнту. Тоді, за умови максимальних оцінок за всіма критеріями певна технологія матиме $\beta = 1$, а у випадку мінімальних — $\beta = 0$.

Найменшим значенням критичності, за якого технологію можна вважати задовільно критичною, є те, що дорівнює сумі вагових коефіцієнтів двох найбільш вагомих критеріїв:

$$\beta_{CR} = \omega_1 + \omega_2, \quad (1)$$

де β_{CR} — мінімально задовільний рівень критичності; ω_1, ω_2 — вагові коефіцієнти двох найбільш вагомих критеріїв.

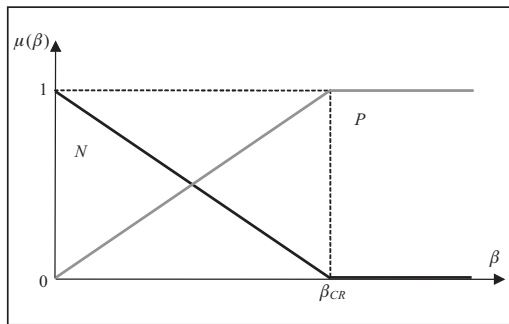


Рис. 2. Функція належності для терм-множини вихідної лінгвістичної змінної

Отже, ФН вихідної ЛЗ (для терму «positive») набудуватиме таких значень:

$$\mu(\beta) = \begin{cases} 1, & \beta \geq \beta_{CR}, \\ 0, & \beta = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Відповідно для терму «negative» ФН набудуватиме таких значень: 1 для $\beta = 0$ та 0 для $\beta \geq \beta_{CR}$. Графічне представлення ФН для терм-множини вихідної ЛЗ наведено на рис. 2.

Формування бази знань.

Лінгвістичні змінні та їхні терм-множини наведено у табл. 3. У цьому випадку вхідними ЛЗ будуть усі критерії визначення критичності технологій, а вихідною змінною буде власне критичність. Для зручності запису терм-множин застосуємо загальноприйняті скорочення $\{P, N\}$ (negative, positive) [23].

Базу правил сформовано за класичним принципом. Якщо більшість вхідних ЛЗ набувають позитивного (негативного) терм-значення, то і вихідна ЛЗ набуває пози-

Таблиця 3. Лінгвістичні змінні системи нечіткого виведення

Вхідні ЛЗ	Терм-множина вхідної ЛЗ		Вихідна ЛЗ	Терм-множина вихідної ЛЗ	
α_1 — масштаб застосування	«великий», «малий»	$P,$ N	β — критичність	«задовільна», «незадовільна»	$P,$ N
α_2 — перспективність	«значна», «незначна»	$P,$ N			
α_3 — науково-технічний потенціал	«достатній», «недостатній»	$P,$ N			
α_4 — економічна доцільність	«доцільно», «недоцільно»	$P,$ N			
α_5 — ефективність	«висока», «низька»	$P,$ N			

тивного (негативного) терм-значення. Загалом застосовують 32 правила. Водночас вагові коефіцієнти критеріїв вже мають бути враховані до входу в систему. Тому вагомість правил вважатимемо однаковою та такою, що дорівнює одиниці.

Визначення алгоритму нечіткого виведення. Проектування системи здійснено за допомогою програми MATLAB. Класичним та найбільш поширеним є алгоритм Мамдані [23], який застосовано у цій роботі. Алгоритм Сугено, який також представлений у програмі, не можна використати у запропонованій моделі, оскільки він на виході забезпечує лінійні функції або одиничні множини [22, 23].

У результаті дефазифікації для кожної технології буде отримано конкретне значення критичності. Технологія вважатиметься задовільно критичною, якщо її критичність перевищить пороговий рівень β_{CR} (розраховується за виразом (1)).

Розроблену модель прийняття рішення щодо визначення критичності технологій запропоновано розглянути на прикладі.

3. РЕЗУЛЬТАТИ НЕЧІТКОГО ОЦІНЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ (ПРИКЛАД)

У межах технологічного форсайту щодо визначення переліку критичних технологій проведено експертне опитування. Кожну з 15 технологій оцінено за п'ятьма критеріями. У табл. 4 наведено узагальнені оцінки з врахуванням критерійної ваги. Ці оцінки для зручності помножено на 1000.

Верхню межу критичності визначатимемо за апроксимувальною функцією для критерію «ефективність», нижню межу — за апроксимувальною функцією для критерію «масштаб застосування». Ці критерії мають найвищу та найнижчу вагу відповідно.

Розмістимо на шкалі абсцис технології в порядку зростання оцінки за критерієм «ефективність». Шкалу ординат відповідно визначено як шкалу оцінки рівня ефективності. Далі здійснюємо апроксимацію сформованого графіка до поліноміальної функції третього степеня. Апроксимувальну функцію (крива 1) за критерієм «ефективність» та достовірність апроксимації (крива 2) зображено на рис. 3.

За аналогічним принципом будуємо апроксимувальну функцію (крива 1) та достовірність апроксимації (крива 2) за критерієм «масштаб застосування» (рис. 4).

Далі диференціюємо апроксимувальну функцію за критерієм «ефективність», знаходимо еквідистантні точки та відповідні значення функції в них:

$$y'_{\text{ефект}} = 0,01x^3 - 0,257x^2 + 3,118x + 2,285 \Leftrightarrow y'_{\text{ефект}} = 0,03x^2 - 0,514x + 3,118;$$

$$y'_{\text{ефект}} = 1 \Leftrightarrow \begin{cases} x_1 = 6,9, \\ x_2 = 10,2 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} y_1 = 14,85, \\ y_2 = 17,96. \end{cases} \quad (3)$$

Таблиця 4. Узагальнені оцінки критичності технологій

Критерій	Узагальнені оцінки														
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15
Масштаб застосування	15,39	10,26	6,84	13,68	5,13	11,97	6,84	3,42	15,39	6,84	3,42	3,42	8,55	13,68	15,39
Перспективність	14,53	17,44	23,25	20,34	5,81	8,72	14,53	20,34	11,62	26,16	8,72	17,44	23,25	14,53	5,81
Науково-технічний потенціал	17,04	12,78	10,65	8,52	17,04	12,78	6,39	12,78	19,18	17,04	14,91	8,52	10,65	2,13	4,26
Економічна доцільність	19,11	7,17	14,33	21,50	11,94	9,55	19,11	16,72	7,17	4,78	19,11	21,50	7,17	9,55	19,11
Ефективність	24,47	12,24	15,30	6,12	24,47	15,30	18,35	9,18	18,35	27,53	21,41	15,30	6,12	12,24	18,35

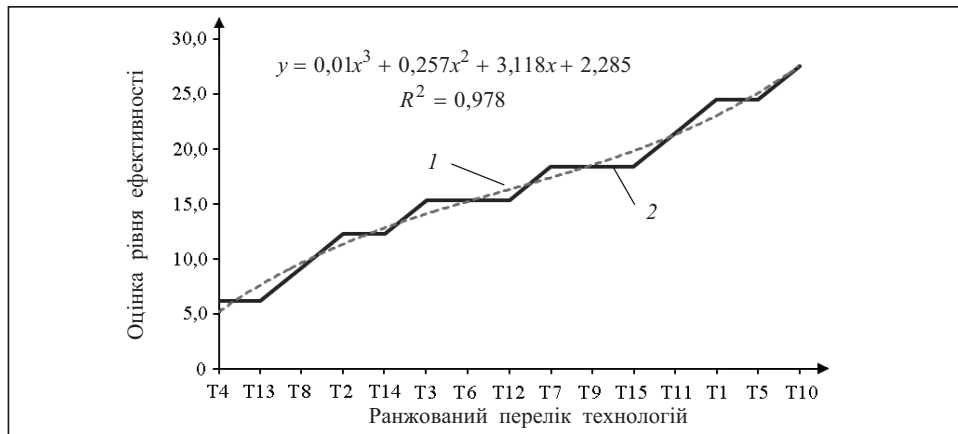


Рис. 3. Апроксимувальна функція за критерієм «ефективність»

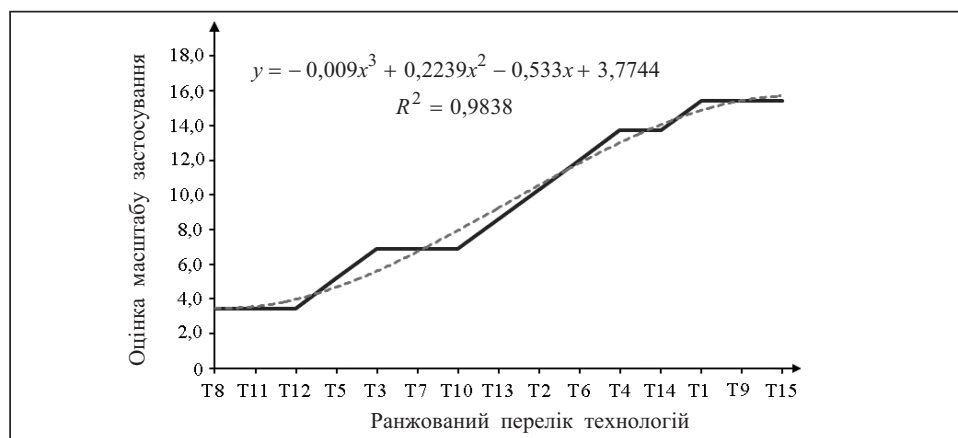


Рис. 4. Апроксимувальна функція за критерієм «масштаб застосування»

З виразу (3) отримуємо дві еквідистантні точки x_1, x_2 . У результаті підстановки їх у рівняння для $y_{\text{ефект}}$ знаходимо відповідні значення критичності y_1, y_2 за критерієм «ефективність».

Аналогічні операції здійснюємо для апроксимувальної функції за критерієм «масштаб застосування»:

$$y_{\text{масштаб}} = -0,009x^3 + 0,223x^2 - 0,533x + 3,774 \Leftrightarrow y'_{\text{масштаб}} = -0,027x^2 + 0,446x - 0,533; \quad (4)$$

$$y'_{\text{масштаб}} = 1 \Leftrightarrow \begin{cases} x_1 = 4,89, \\ x_2 = 11,63 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} y_1 = 5,45 \\ y_2 = 13,58. \end{cases}$$

За результатами застосування виразу (3) вибираємо максимальне значення, а за результатами застосування виразу (4) — мінімальне.

Отже, знайдено межі критичності технологій, які далі буде застосовано для побудови терм-множин вхідних лінгвістичних змінних

$$y_{\min} = 5,45; \quad y_{\max} = 17,96. \quad (5)$$

Функцію належності для вхідних лінгвістичних змінних, побудовану на основі еквідистантних точок, представлено на рис. 5.

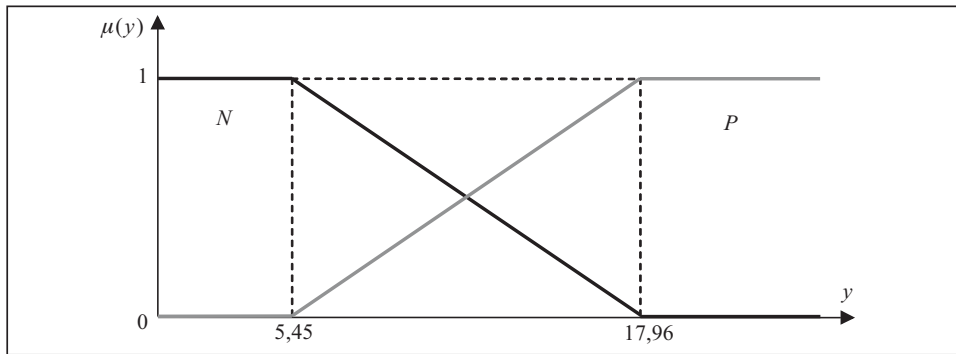


Рис. 5. Функція належності вхідних лінгвістичних змінних

Таблиця 5. Результати фазифікації

Вхідні лінгвістичні змінні	Терми	Значення функції належності														
		T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15
Масштаб застосування	P	0,79	0,38	0,11	0,66	0	0,52	0,11	0	0,79	0,11	0	0	0,25	0,66	0,79
	N	0,21	0,62	0,89	0,34	1	0,48	0,89	1	0,21	0,89	1	1	0,75	0,34	0,21
Перспективність	P	0,73	0,96	1	1	0,03	0,26	0,73	1	0,49	1	0,26	0,96	1	0,73	0,03
	N	0,27	0,04	0	0	0,97	0,74	0,27	0	0,51	0	0,74	0,04	0	0,27	0,97
Науково-технічний потенціал	P	0,93	0,59	0,42	0,25	0,93	0,59	0,08	0,59	1	0,93	0,76	0,25	0,42	0	0
	N	0,07	0,41	0,58	0,75	0,07	0,41	0,92	0,41	0	0,07	0,24	0,75	0,58	1	1
Економічна доцільність	P	1	0,14	0,71	1	0,52	0,33	1	0,9	0,14	0	1	1	0,14	0,33	1
	N	0	0,86	0,29	0	0,48	0,67	0	0,1	0,86	1	0	0	0,86	0,67	0
Ефективність	P	1	0,54	0,79	0,05	1	0,79	1	0,3	1	1	1	0,79	0,05	0,54	1
	N	0	0,46	0,21	0,95	0	0,21	0	0,7	0	0	0	0,21	0,95	0,46	0

Для побудови ФН вихідної ЛЗ розрахуємо за виразом (1) мінімально задовільний рівень критичності:

$$\beta_{CR} = \omega_2 + \omega_5 = 0,232 + 0,245 = 0,477. \quad (6)$$

Графічне представлення ФН для терм-множини вихідної ЛЗ наведено вище (див. рис. 2).

Лінгвістичні змінні, їхні терм-множини та принципи формування бази правил описано у розд. 2.

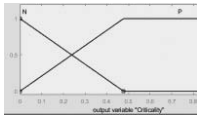
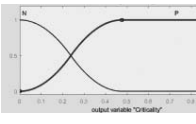
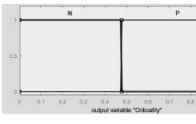
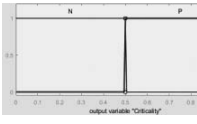
Відповідно до наведених вище розрахунків будуюмо систему нечіткого виведення у програмі MATLAB. Для цього застосуємо алгоритм Мамдані.

Почергово вводимо оцінки критичності оцінки критичності технологій за всіма критеріями з табл. 4 до системи нечіткого виведення. Отримані в результаті фазифікації відповідні ступені належності вхідних ЛЗ до термів представлено у табл. 5.

Результати роботи спроектованої системи нечіткого виведення (результати дефазифікації) наведено у стовпці табл. 6, позначеному сірим кольором.

У розрахованому прикладі лише одна технологія є некритичною (T13), оскільки рівень її критичності становить 0,401 і є меншим за граничний рівень, що становить 0,477. Решта технологій (загалом 14) є критичними.

Таблиця 6. Результати дефазифікації

№ технології	Оцінка критичності технологій залежно від вихідної функції належності			
1	0,581	0,591	0,698	0,704
2	0,515	0,515	0,521	0,522
3	0,547	0,55	0,583	0,585
4	0,55	0,55	0,578	0,579
5	0,507	0,507	0,509	0,509
6	0,508	0,508	0,511	0,511
7	0,566	0,567	0,611	0,614
8	0,529	0,529	0,543	0,543
9	0,547	0,555	0,604	0,606
19	0,598	0,603	0,705	0,712
11	0,571	0,573	0,624	0,627
12	0,576	0,578	0,637	0,641
13	0,401	0,402	0,396	0,398
14	0,515	0,515	0,521	0,522
15	0,58	0,582	0,644	0,648
Вигляд вихідної ФН	 Межа критичності 0,477	 Межа критичності 0,477	 Межа критичності 0,477	 Межа критичності 0,5

4. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Адекватність моделі зазвичай перевіряють оцінюванням відхилень передбачених значень від експериментально знайдених, усереднених за числом повторень тощо. Однак, запропонована модель не є стохастичною, тому не надає змоги для перевірки адекватності оперувати набором випадкових величин. Такі форсайти здійснюють один раз на декілька років, тому вихідні дані не мають стохастичного характеру.

Технологічне прогнозування по суті є задачею класифікації, під час розв'язання якої здійснюють віднесення технологій до класу критичних, проривних або некритичних. За цих умов адекватність розробленої моделі можна перевірити за збіжністю результатів різних вимірювань.

Для цього застосовано чотири різні вихідні ФН з різними пороговими рівнями критичності. Результати вимірювань наведено у табл. 6 та на рис. 6.

У результаті дослідження встановлено, що розроблена модель показала збіжність результатів чотирьох вимірювань. Некритичною технологією є Т13. При цьому були використані як розрахована межа критичності (0,477), так і класична (0,5). Загальний вигляд вихідних ФН наведено у нижньому рядку табл. 6 (трапецевидна, S-Z-подібна та прямокутна).

На рис. 7 для порівняння наведено діаграму з узагальненими сумарними оцінками технологій (узагальнена оцінка є сумою оцінок усіх експертів за всіма критеріями з відповідним врахуванням вагового коефіцієнта). У сучасній методиці

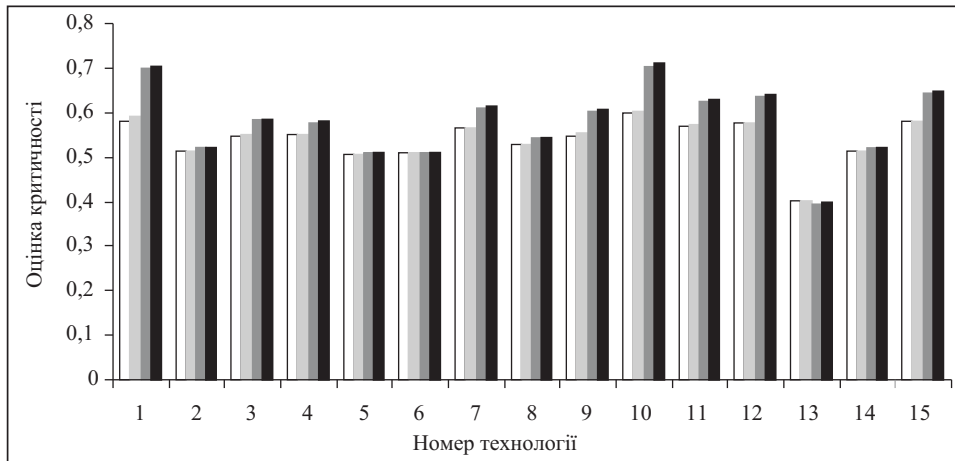


Рис. 6. Оцінка критичності технологій з використанням різних функцій належності

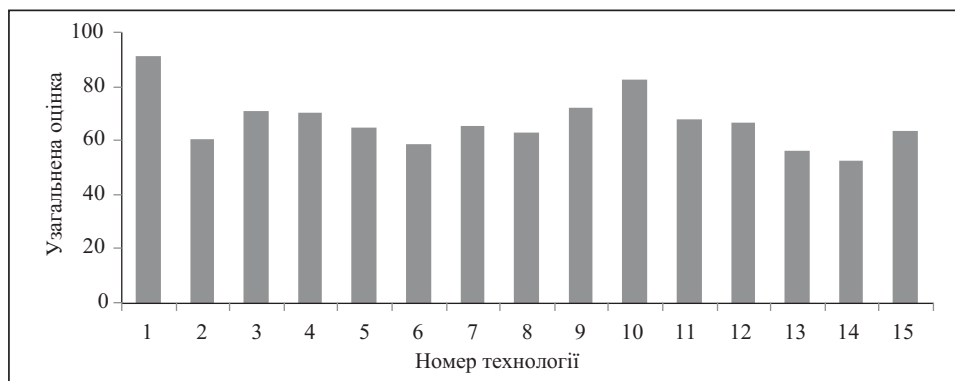


Рис. 7. Сумарна узагальнена оцінка критичності технологій

формування переліку КТ ці оцінки використовують для складання рейтингу технологій. Спираючись на оцінки, експертна рада приймає рішення про включення певної технології до переліку КТ шляхом голосування. На відміну від системи нечіткого виведення, запропонованої у цій роботі, у рейтинговому принципі формування переліку КТ враховано лише узагальнену сумарну оцінку технології. Не взято до уваги правила, за якими технологію можна використати у найкращий спосіб, або мінімально задовільні показники критичності за критеріями.

Найнижчу сумарну оцінку має технологія Т14. На основі сучасної методики, ймовірно, було б прийнято рішення про виключення технології Т14 з переліку. Проте з табл. 5 видно, що технологія Т14 має задовільні показники за трьома критеріями, а технологія Т13 — лише за одним. Іншими словами, Т13 лише за перспективністю є критичною, а за всіма іншими критеріями — ні. На відміну від неї, технологія Т14 є критичною за масштабом застосування, перспективністю та ефективністю.

Такі прорахунки навіть щодо однієї технології можуть призвести до багатомільйонних марних витрат бюджету. А скільки таких прорахунків може бути, коли мова йде про перелік КТ з декількох десятків чи навіть сотень технологій?!

Першим недоліком розробленої моделі є унеможливлення побудови ФН до моменту отримання вхідних оцінок, оскільки саме на основі вхідних даних визначають чіткі (нечіткі) інтервали. Другим недоліком і власне напрямом подаль-

ших досліджень є неможливість визначення об'єктивних інтервалів зміни функції в умовах відсутності еквідистантних точок.

ВИСНОВКИ

Запропонована модель технологічного прогнозування надає змогу швидко та об'єктивно сформулювати перелік КТ. За допомогою апарату нечіткої логіки встановлюють чітку межу критичності технологій без участі людини. Завдяки автоматизації процесу зменшується час, витрачений на прийняття рішення, оскільки не потрібно проводити засідання експертної ради. У нечіткому оцінюванні беруть до уваги не лише оцінки за критеріями, а й мінімально задовільні рівні критичності.

Запропоновано новий спосіб визначення ФН на основі еквідистантних точок, що надає змогу отримати математично обґрунтовані інтервали для побудови функції.

Проведено порівняння розробленої моделі з наявною, що ґрунтується на голосуванні експертів на основі сумарних оцінок. За відповідними результатами можна дійти висновку, що розроблена модель є адекватною та ефективною.

Завдяки використанню розробленої моделі можна уникнути прорахунків у технологічних прогнозах та визначити найперспективніші технології для подальшого їхнього розвитку.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ:

1. Сотник В.В., Купчин А.В. Розвиток критичних технологій — важливий крок у майбутнє України. *Наука та наукознавство*. 2020. № 1 (107). С. 34–48. <https://doi.org/10.15407/sofs2020.01.034>.
2. Слюсар В.І., Сотник В.В., Купчин А.В., Шостак В.Г. Проривні технології в оборонній сфері України. *Озброєння та військова техніка*. 2020. № 4 (28). С. 13–23.
3. Calof J., Meissner D., Vishnevskiy K. Corporate foresight for strategic innovation management: the case of a Russian service company. *Foresight*. 2020. Vol. 22, N 1. P. 14–36. <https://doi.org/10.1108/FS-02-2019-0011>,
4. Gavigan J.P., Scapolo F. A comparison of national foresight exercises. *Foresight*. 1999. Vol. 1, N 6. P. 495–517. <https://doi.org/10.1108/14636689910802368>.
5. Wonglimpiyarat J. Technology foresight: creating the future of Thailand's industries. *Foresight*. 2006. Vol. 8, N 4. P. 23–33. <https://doi.org/10.1108/14636680610682012>.
6. Kovářiková L., Grosová S., Baran D. Critical factors impacting the adoption of foresight by companies. *Foresight*. 2017. Vol. 19, N 6. P. 541–558. <https://doi.org/10.1108/FS-02-2017-0009>.
7. Omrane H., Masmoudi M.S., Masmoudi M. Fuzzy logic based control for autonomous mobile robot navigation. *Computational Intelligence and Neuroscience*. 2016. Vol. 2016. Article ID 9548482. P. 1–10. <http://doi.org/10.1155/2016/9548482>.
8. Jaafari A., Zenner E.K., Panahi M., Shahabi H. Hybrid artificial intelligence models based on a neuro-fuzzy system and met heuristic optimization algorithms for spatial prediction of wildfire probability. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2019. Vol. 266–267. P. 198–207. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.12.015>.
9. Govinda K., Singlaand K., Jain K. Fuzzy based uncertainty modeling of Cancer Diagnosis System. 2017. *Proc. 2017 International Conference on Intelligent Sustainable Systems (ICISS) (7–8 Dec. 2017, Palladam, India)*. Palladam, 2017. P. 740–743, <https://doi.org/10.1109/ISS1.2017.8389272>.
10. Паладченко О.Ф., Молчанова І.В. Сучасні підходи і методи проведення прогнозних досліджень: світовий досвід і можливість його використання в Україні. *Наука, технології, інновації*. 2018. № 2 (6). С. 23–32.
11. Горбулін В.П., Шеховцов В.С., Шевцов А.І. Проблемні питання визначення і впровадження критичних технологій у сфері виробництва озброєння. *Вісник НАН України*. 2018. № 2. С. 3–9.
12. Romanowski M., Nadolny K. Technological foresight — characterisation of research methods used in prospective analysis. *Journal of Mechanical and Energy Engineering*. 2018. Vol. 2, N 2. P. 101–108. <https://doi.org/10.30464/jmee.2018.2.2.101>.

13. Gibson E., Daim T., Garces E., Dabic M. Technology foresight: a bibliometric analysis to identify leading and emerging methods. *Foresight and STI Governance*. 2018. Vol. 12, N 1. P. 6–24. <https://doi.org/10.17323/2500-2597.2018.1.6.24>.
14. Bühring J., Liedtka J. Embracing systematic futures thinking at the intersection of Strategic Planning, Foresight and Design. *Journal of Innovation Management*. 2018. Vol. 6, N 3. P. 134–152. https://doi.org/10.24840/2183-0606_sub_006-003_sub_0006.
15. Довгополий А.С., Сотник В.В., Томчук В.В. та ін. Пріоритетний розвиток критичних технологій — запорука зміцнення обороноздатності та економічного зростання держави. *Озброєння та військова техніка*. 2019. № 1 (21). С. 15–21. [https://doi.org/10.34169/2414-0651.2019.1\(21\).15-21](https://doi.org/10.34169/2414-0651.2019.1(21).15-21).
16. Купчин А., Сотник В. Критичні технології в оборонній сфері. Новий погляд. *Озброєння та військова техніка*. 2019. Т. 22, № 2. С. 35–41. [https://doi.org/10.34169/2414-0651.2019.2\(22\).35-41](https://doi.org/10.34169/2414-0651.2019.2(22).35-41).
17. Aengchuan P., Phruksaphanrat B. Comparison of fuzzy inference system (FIS), FIS with artificial neural networks (FIS + ANN) and FIS with adaptive neuro-fuzzy inference system (FIS + ANFIS) for inventory control. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2018. Vol. 29, Iss. 4. P. 905–923. <https://doi.org/10.1007/s10845-015-1146-1>.
18. Erturk E., Sezer E.A. Software fault prediction using Mamdani type fuzzy inference system. *International Journal of Data Analysis Techniques and Strategies*. 2016. Vol. 8, N 1. P. 14–28. <https://doi.org/10.1504/ijdatas.2016.075971>.
19. Hussain H.I., Slusarczyk B., Kamarudin F., Thaker H.M.T., Szczepańska-Woszczyna K. An investigation of an adaptive neuro-fuzzy inference system to predict the relationship among energy intensity, globalization, and financial development in major ASEAN economies. *Energies*. 2020. Vol. 13, Iss. 4. P. 1–17. <https://doi.org/10.3390/en13040850>.
20. García J.S., Álvarez C.A.A., Gómez J.M.C., Toro J.J.A. Measuring organizational capabilities for technological innovation through a fuzzy inference system. *Technology in Society*. 2017. Vol. 50. P. 93–109. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2017.05.005>.
21. Сотник В.В., Расстригин О.О., Купчин А.В. Методика відбору критичних технологій. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. 2020. Т. 37, № 1. С. 67–76. <http://doi.org/10.33099/2311-7249/2020-37-1-67-76>.
22. Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. Москва: Горячая линия-Телеком, 2007. 288 с.
23. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 736 с.
24. Алексеева І.В., Гайдей В.О., Диховичний О.О., Федорова Л.Б. Математика в технічному університеті. Т. 2. Київ: Вид. дім «Кондор», 2019. 504 с.
25. Žlepalo M.K., Jurkin E. Equidistant sets of conic and line. *Proc. 18th International Conference on Geometry and Graphics (3–7 August 2018, Milan, Italy)*. Milan, 2018. P. 277–289. https://doi.org/10.1007/978-3-319-95588-9_sub_22.
26. Slyusar V. et al. Method for determining membership function based on equidistant points. *Proc. International conference of specialized and multidisciplinary scientific researches (11 December 2020, Amsterdam, the Netherlands)*. Amsterdam, 2020. Vol. 2. P. 27–30. <http://doi.org/10.36074/11.12.2020.v2.07>.

**A. Kupchyn, V. Komarov, I. Borokhvostov, A. Kuprinenko,
V. Sotnyk, M. Bilokur, V. Oleksiuk**

TECHNOLOGY FORESIGHT MODEL BASED ON FUZZY LOGIC

Abstract. The developed technology foresight model allows eliminating the human from decision-making. The criticality limits of technologies are not determined by an expert, but are calculated on the basis of the proposed equidistant points. The paper shows the influence of different membership functions on the criticality assessment. A comparison with the existing method of technology foresight is made.

Keywords: critical technologies, fuzzy logic, membership function determination, technology foresight.

Надійшла до редакції 05.05.2021