

DOI 10.33099/2618-1614-2023-23-4-29-40

УДК 355.4:004.8

С. В. Свешніков,*кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник,
провідний науковий співробітник центру
воєнно-стратегічних досліджень,
Національний університет оборони України,***В. П. Бочарніков,***доктор технічних наук, професор,
головний науковий співробітник центру
воєнно-стратегічних досліджень,
Національний університет оборони України*

Використання методів штучного інтелекту для розв'язання наукових задач у сфері оборони

У статті автори на рівні концептуальних моделей демонструють можливості застосування методів штучного інтелекту для розв'язання прикладних наукових задач, які постають у сфері безпеки та оборони.

Ключові слова: штучний інтелект, нечіткі множини, нечіткі міри, нейронні мережі, оцінювання, класифікація, кластеризація, прогнозування.

Унаслідок швидкого поширення інформаційних технологій значно ускладнюються взаємозв'язки між об'єктами реального світу, зокрема ті, що стосуються сфери оборони в широкому розумінні. Поведінка об'єктів стає складнішою та непередбачуванішою. Потреба вивчення взаємозв'язків між об'єктами лише зростає й ускладнюється. На цьому тлі стає дедалі важче забезпечити адекватність наукових рекомендацій за допомогою добре відомих та відпрацьованих методів досліджень. Тому сьогодні рельєфніше проявляється суперечність між спроможностями відомих методів, таких як дослідження операцій, і властивостями сучасних досліджуваних систем та об'єктів. Оскільки ускладнення останніх є об'єктивною та неминучою реальністю, висновок єдиний – це розробка й апробація нових наукових методів і технік, зокрема методів штучного інтелекту, застосування яких останнім часом поширюється для вирішення наукових завдань у різних сферах.

Досвід спілкування в середовищі науковців свідчить, що сьогодні має місце певна недооцінка й навіть нерозуміння спроможностей методів штучного інтелекту з вирішення наукових завдань у сфері оборони. Тому в цій статті автори **мають на меті** на рівні концептуальних моделей продемонструвати можливість розв'язання прикладних наукових задач, які постають у сфері безпеки та оборони, методами штучного інтелекту. Звісно, кількість таких задач досить велика, і показати навіть логіку розв'язання їх усіх у межах статті неможливо. Тому далі використаний такий спосіб розкриття питання: спочатку буде продемонстровано, що більшість наукових задач, у тому числі у сфері оборони, можна типізувати, тобто привести до невеликої кількості формальних типів задач, а потім будуть наведені деякі техніки розв'язання типових наукових задач методами штучного інтелекту.

Одразу зазначимо, що єдиного визначення терміна «штучний інтелект» не існує. Але більшість людей розуміють штучний інтелект як науковий напрям і технологію створення інтелектуальних систем, тобто систем, спроможних розв'язувати насамперед складні задачі подібно до того, як їх розв'язує людина, а саме застосовуючи «м'які, не визначені точно» дані й відповідні методи одержання результату, зокрема навчання. Класифікація цих методів також не є загальноприйнятою. Одним з її варіантів може бути така: нечітка логіка (нечіткі множини, нечіткі міри), нейронні мережі, засновані на знаннях системи (експертні системи), еволюційне моделювання (генетичні алгоритми, багатоагентні системи), методи «BigData» (вивчення великих обсягів даних, пошук невідомих раніше закономірностей).

Звичайно, методів штучного інтелекту на сьогодні існує безліч, та охопити їх у рамках однієї статті неможливо. Тому далі розглядаються найпоширеніші, перевірені на практиці методи.

Типізація наукових задач у сфері оборони

Виходячи з того, що кількість наукових задач у сфері оборони є практично неосяжною, поділимо їх за ознакою характеру досліджуваних у задачах об'єктів, як показано в *таблиці 1*. Цей поділ є досить умовним, але він охоплює більшу частину наукових задач.

Таблиця 1

Поділ наукових задач за характером досліджуваних об'єктів

Група наукових задач	Характер досліджуваних об'єктів
Задачі воєнно-політичного аналізу (безпекові задачі)	Держави та інші воєнно-політичні сили
Задачі стратегічного рівня	Збройні сили, великі стратегічні угруповання
Задачі оперативного рівня	Оперативні угруповання
Задачі тактичного рівня	Військові підрозділи, частини та з'єднання
Задачі інформаційно-психологічних впливів та кібербезпеки	Людина, група людей, інформаційно-керуючі системи
Задачі військової техніки та озброєння	Технічні пристрої
Задачі оборонного планування	Збройні сили, їхні спроможності

Розглянемо далі кілька прикладів наукових задач із кожної групи і надамо їхню коротку характеристику відповідно до класифікації [1] аналітичних задач. Частина наукових задач у прямій постановці сформульована в роботі авторів [1]. Інші наукові задачі сформульовані як такі, що випливають з аналізу наукових праць, опублікованих у провідному відкритому виданні – збірнику наукових праць Центру воєнно-стратегічних досліджень Національного університету оборони України. Найчастіше в цих працях представлено або науково-методичний підхід, або концептуальну модель розв'язання наукових задач. Кількісні рішення, як правило, представлені не часто. Але далі ми покажемо, як це можна зробити із застосуванням методів штучного інтелекту. У *таблиці 2* представлені приклади наукових задач та їхня коротка характеристика.

Аналіз свідчить, що найпоширенішим типом наукових задач є задачі оцінювання. Крім того, наявні також задачі вибору, класифікації (віднесення до заздалегідь визначених класів), прогнозування, кластеризації, а також чисельних розрахунків. Розглянемо концептуальні схеми розв'язання цих типових наукових задач, а також техніки розв'язання на основі методів штучного інтелекту.

Розв'язання задач оцінювання

Головною загальною метою розв'язання задач оцінювання є розрахунок оцінок альтернатив у термінах корисності або некорисності. Оцінювання альтернатив

Таблиця 2

Приклади наукових задач та їхня коротка характеристика

Наукова задача	Характеристика наукової задачі
Задачі воєнно-політичного аналізу (безпекові задачі)	
Оцінювання альтернативних варіантів національної політики України щодо формування її статусу відносно міжнародного оточення і структур колективної безпеки [2]	Задача оцінювання. Вхідні дані: варіанти національної політики. Результати розв'язання: оцінки варіантів з погляду критеріїв безпеки
Прогнозування конфліктів на основі вивчення великих обсягів даних з багатьох сфер життєдіяльності (національної безпеки) [3]	Задача прогнозування, яка розв'язується як задача кластеризації майбутніх конфліктів. Вхідні дані: всі дані, які можуть бути пов'язані з виникненням воєнних конфліктів. Результати розв'язання: оцінки можливості виникнення воєнного конфлікту між певними державами в майбутньому
Прогнозування напруженості світової та регіональної воєнно-політичної обстановки [1]	Задача прогнозування. Вхідні дані: проблеми міждержавних відносин, параметри воєнної могутності і потенційної агресивності держав. Результати розв'язання: прогноз напруженості воєнно-політичної обстановки
Прогнозування можливості виникнення внутрішнього збройного конфлікту [1]	Задача прогнозування. Вхідні дані: інтереси і цілі соціальних груп, проблеми внутрішніх відносин. Результати розв'язання: прогноз можливості й умов переростання внутрішніх суперечностей у збройний конфлікт

Продовження таблиці 2

Наукова задача	Характеристика наукової задачі
Визначення структури потенційних воєнно-політичних блоків [1]	Задача кластеризації. Вхідні дані: інтереси і цілі держав, позиції держав за проблемами відносин. Результати розв'язання: можливість утворення воєнно-політичних блоків визначеного складу
Класифікація намірів і дій воєнно-політичних союзів та окремих держав [1]	Задача класифікації. Вхідні дані: наміри та дії держав (союзів) та їхні характеристики. Результати розв'язання: можливість відповідності намірів та дій певним визначеним класам
Задачі стратегічного рівня	
Оцінювання спільних спроможностей об'єднаних сил, інтегрованих у декількох доменах [4]	Задача оцінювання. Вхідні дані: параметри спільних спроможностей об'єднаних сил. Результати розв'язання: оцінки відповідності спроможностей вимогам з боку воєнних конфліктів або стосовно заданого рівня спроможностей
Вибір способу дій коаліційних сил спеціальних операцій [5]	Задача вибору. Вхідні дані: множина способів дій коаліційних сил спеціальних операцій та їхні параметри. Результати розв'язання: оцінки способів дій
Задачі оперативного рівня	
Оцінювання відповідності системи управління міжвидового угруповання вимогам з боку багатодомених операцій під час конфлікту високої інтенсивності [6]	Задача оцінювання. Вхідні дані: параметри системи управління та критерії, що відображають вимоги. Результати розв'язання: оцінки рівня відповідності параметрів системи управління критеріям
Оцінювання ефективності дій міжвидового угруповання в багатодомених операціях [6]	Задача оцінювання. Вхідні дані: параметри міжвидового угруповання та їхніх дій. Результати розв'язання: оцінка ефективності дій, умови досягнення заданого рівня ефективності
Задачі тактичного рівня	
Розрахунок кількості та складу мобільних протидиверсійних резервів під час оперативного розгортання військ [7]	Задача чисельних розрахунків. Вхідні дані: характеристики своїх підрозділів та підрозділів противника, оперативної побудови. Результати розв'язання: оцінки кількості та складу мобільних протидиверсійних резервів
Оцінювання рівня зниження ефективності системи управління військами противника в результаті ракетного удару [8]	Задача оцінювання. Вхідні дані: варіанти розподілу засобів ураження за об'єктами системи управління. Результати розв'язання: оцінки рівня зниження ефективності системи управління військами противника за варіантами
Оцінювання можливості досягнення потрібного ефекту координації вогневого ураження противника в операції [9]	Задача оцінювання. Вхідні дані: об'єкти противника, бойовий склад своїх сил, вимоги до ураження об'єктів. Результати розв'язання: найраціональніший варіант розподілу сил та засобів за об'єктами
Задачі інформаційно-психологічних впливів та кібербезпеки	
Оцінювання рівня інформаційно-психологічного впливу противника в інтересах інформаційної операції Збройних Сил України [10]	Задача чисельних розрахунків. Вхідні дані: параметри інформаційно-психологічного впливу. Результати розв'язання: узагальнена оцінка рівня інформаційно-психологічного впливу противника
Оцінювання можливості появи і наслідків реалізації ризику безпеки інформації [11]	Задача оцінювання. Вхідні дані: параметри інформаційної системи, параметри зовнішнього інформаційного середовища. Результати розв'язання: оцінки можливості появи і можливості наслідків реалізації ризиків

Продовження таблиці 2

Наукова задача	Характеристика наукової задачі
Оцінювання захищеності інформаційної інфраструктури за кількома ознаками і показниками [12]	Задача оцінювання. Вхідні дані: параметри інформаційної інфраструктури, критерії оцінювання. Результати розв'язання: оцінка рівня захищеності
Виявлення та прогноз інтенсивності інформаційних впливів на світобачення населення [1]	Задача прогнозування. Вхідні дані: потік інформаційних повідомлень, структура уподобань населення. Результати розв'язання: можливість цілеспрямованого інформаційного впливу
Задачі військової техніки та озброєння	
Вибір варіантів конструкторських рішень щодо побудови автоматизованих систем в інтересах оборони на основі дата-центричного підходу з використанням хмарних технологій [13]	Задача вибору. Вхідні дані: перелік і параметри рішень, критерії оцінювання. Результати розв'язання: оцінки ефективності рішень
Аналіз графіків кардіографічної активності людини для визначення психофізіологічного стану воїнів Сил оборони України за допомогою мініатюрних кардіографічних засобів [14]	Задача оцінювання. Вхідні дані: характеристики графіків. Результати розв'язання: оцінки психофізіологічного стану
Задачі оборонного планування	
Оцінювання рівня корупції в Міністерстві оборони України [15]	Задача оцінювання. Вхідні дані: ознаки корупційних дій. Результати розв'язання: оцінки рівня корупції
Оцінювання спроможностей зенітних ракетних комплексів (ЗРК) щодо оборони військ та об'єктів від ударів нестратегічних балістичних ракет [16]	Задача оцінювання. Вхідні дані: тактико-технічні характеристики ЗРК. Результати розв'язання: оцінки ефективності застосування ЗРК

дає змогу визначити одну або кілька найкращих альтернатив і на цій основі зробити вибір.

Альтернативи описуються кількома параметрами, які можуть мати різну природу. Наприклад, значення параметра можуть завдаватися на безперервній або дискретній множині, вони можуть бути чіткими або нечіткими (розмитими). Як правило, задачі оцінювання є багатокритеріальними, тобто оцінювання відбувається за кількома критеріями. Природа критеріїв також може бути різною. Умовно кажучи, існують два способи розв'язання задач оцінювання: відносний та абсолютний.

Відносний спосіб заснований на порівнянні альтернатив між собою за параметрами з урахуванням важливості параметрів. Цей спосіб реалізований у добре відомому методі аналізу ієрархій Сааті [17]. У зарубіжній науковій літературі цей метод називається «Analytical hierarchy process». Концептуальна схема розв'язання найпростішої задачі оцінювання за допомогою методу аналізу ієрархій наведена на *рисунку 1*.

На *рисунку 1* позначено: c_{Σ} – головний (узагальнений) критерій оцінювання; $O = \{o_i, i = \overline{1,3}\}$ – множина альтернатив, що оцінюються; $P = \{p_j, j = \overline{1,2}\}$ – множина параметрів альтернатив. Схема алгоритму оцінювання полягає у виконанні послідовних кроків:

1. Альтернативи порівнюються між собою за кожним параметром з P у шкалі переваг, у результаті чого одержують матриці парних порівнянь у вигляді: $M^j = \|m_{kl}^j\|$, де $\forall k, l = \overline{1,3}$, $m_{kl}^j = \pi(o_k \gtrsim o_l) \in L$ – елемент матриці M^j , який визначає перевагу $\gtrsim$ альтернативи o_k над альтернативою o_l у шкалі переваг $\pi(\cdot) \in L$. Для методу аналізу ієрархій Сааті $L = (1,9)$. При цьому якщо $\pi(o_k \gtrsim o_l) = x \in L$, тоді $\pi(o_l \gtrsim o_k) = \frac{1}{x}$, $\pi(o_l \gtrsim o_k) = 1$.

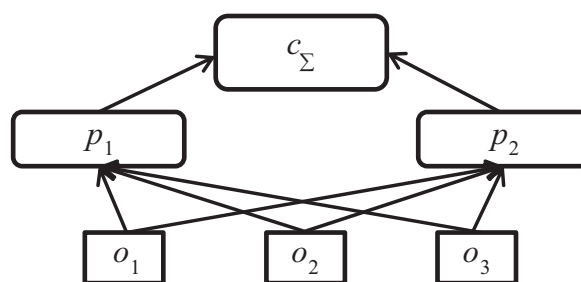


Рис. 1. Концептуальна схема розв'язання задач оцінювання за допомогою методу аналізу ієрархій

2. Одержані матриці M^j об'єднуються в середньозважену матрицю з урахуванням важливості параметрів: $M_\Sigma = \sum_{j=1}^2 b_j M^j$, де b_j – нормована до одиниці вага j -го параметра.

3. Визначається власний вектор $E = \{e_i, i = \overline{1,3}\}$ матриці M_Σ , який відповідає її максимальному власному числу. Власний вектор E містить оцінки узагальненої переваги між альтернативами з множини.

Оскільки на практиці в будь-якій задачі присутня невизначеність, вона має бути врахована в алгоритмі, інакше одержане рішення втрачає адекватність. Сьогодні відомо досить багато напрацювань щодо модернізації методу аналізу ієрархій для врахування нечіткості. Зокрема, середньозважену матрицю можна одержати за допомогою операторів обчислення відстані між двома функціями, наприклад за допомогою дивергенції Кульбака-Лейблера [18] або метрики на декартовому добутку нечітких мір [19]. Іншим варіантом модернізації [20] є використання нечітких аналогів числових оцінок M_{kl}^j , а також ваги b_j . У цьому разі всі перетворення оцінок здійснюються за допомогою алгоритмів нечіткої арифметики [21].

Абсолютний спосіб заснований на порівнянні альтернатив з певним заздалегідь сформованим еталоном (ідеальною альтернативою, яка може бути сформована в явному чи неявному вигляді). Концептуальна схема розв'язання задач оцінювання цим способом наведена на *рисунку 2*, де продемонстрований той самий найпростіший приклад, поданий на *рисунку 1*.

На *рисунку 2* позначено: $Imp = \{Imp_j, j = \overline{1,2}\}$ – множина важливостей критеріїв з $C = \{c_j, j = \overline{1,2}\}$, $Et_j, j = \overline{1,2}$ – еталонні значення параметра p_j , що можуть мати нечіткий характер, $Cur_{i,j}$ – поточне значення параметра p_j альтернативи o_i . Інші позначення такі самі, що й вище. Схема алгоритму оцінювання полягає у виконанні таких кроків:

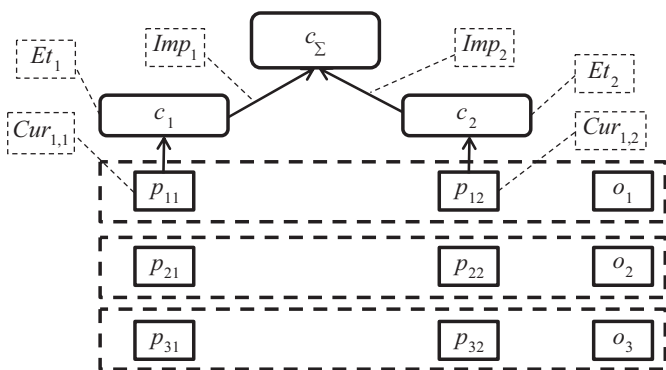


Рис. 2. Концептуальна схема розв'язання найпростішої задачі оцінювання абсолютним способом

1. Визначаються значення важливості Imp_j критеріїв. У загальному випадку ці значення можуть визначатися на основі вимірювань приладами, оброблення статистичних даних або оцінювання експертами.

2. Визначаються еталонні значення Et_j . Ці значення можуть визначатися аналогічно до того, як указано в кроці 1.

3. Визначаються поточні значення параметрів $Cur_{i,j}$ для кожної альтернативи o_i .

4. Для кожної альтернативи o_i поточні значення параметрів $Cur_{i,j}$ послідовно порівнюються з еталонними значеннями Et_j . Порівняння здійснюється за допомогою певного оператора $\simeq$, який у результаті розраховує оцінку відповідності поточного значення еталонному:

$Cor_{i,j} = Cur_{i,j} \simeq Et_j, \forall j = \overline{1,2}$. Вибір виду оператора $\simeq$ має обґрунтовуватися для кожної задачі, виходячи з вимог забезпечення адекватності розрахунків.

5. Для кожної альтернативи o_i оцінки $Cor_{i,j}$ зважуються з урахуванням важливості критеріїв. У результаті розраховується оцінка альтернативи $Est_i = Cor_{i,j} \oplus Imp_j$, де $\oplus$ – позначення оператора зважування. Вибір виду оператора $\oplus$ також має обґрунтовуватися для кожної конкретної задачі. Оцінки Est_i надаються особі, яка приймає рішення.

Звернімо увагу на те, що множину критеріїв, їхні ваги, еталонні значення параметрів альтернатив, а також оператори $\simeq$ та $\oplus$ у сукупності можна розглядати як неявний еталон найкращої альтернативи, оскільки присвоєння оцінкам $Cur_{i,j}$ найкращих значень даватиме найвище значення оцінки альтернативи Est_i . Отже, оцінювання зводиться до порівняння значень параметрів наявних альтернатив з неявним еталоном (ідеальною альтернативою) відповідно до ієрархії критеріїв, рухаючись від критеріїв нижнього рівня до узагальненого критерію. В зарубіжних дослідженнях цю схему часто називають технікою TOPSIS (The Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) [22]. Як бачимо, в цій схемі невизначеність присутня в кількох місцях, зокрема це значення параметрів альтернатив і значення важливості критеріїв оцінювання.

Слід також зазначити, що для коректного розв'язання задач оцінювання і відносним, і абсолютним способами необхідно приділяти максимальну увагу дотриманню таких умов:

- критерії оцінювання мають бути придатними для порівняння між собою, щоб можна було визначити їхні ваги;
- рівень невизначеності початкових даних, потрібних для оцінювання параметрів альтернатив, має давати можливість зробити хоч би приблизне визначення, тобто висунення приблизних припущень стосовно початкових значень параметрів;

- параметри альтернатив можуть бути задані на неперервній чи дискретній множині, числовій або номінальній, за допомогою слів або чисел;

- у разі залежності (взаємодії) критеріїв між собою (внаслідок, як правило, нечіткого формулювання) слід використовувати відповідний математичний апарат або спеціальні методи компенсації систематичних помилок.

Кажучи строго, дотримання цих умов має бути доведене для забезпечення адекватності розв'язання задачі оцінювання.

На сьогодні відомо багато методів реалізації концептуальної схеми розв'язання задачі оцінювання абсолютним способом. Коротко розглянемо їх.

1. Адитивні методи [23], засновані на використанні адитивних мір, зокрема міри ймовірності. Ці методи передбачають визначення Cor_{ij} як відхилення від математичного очікування (Et_j), а також розрахунок Est_i як середньозважених оцінок. Раніше ці методи дуже широко використовувалися.

2. Таксономічні методи [24], засновані на застосуванні різних метричних відстаней, найчастіше відстаней Хеммінга чи Мінковського. У таких методах еталонною оцінкою є точка з $Cor_{ij} = 1, \forall j = \overline{1, 2}$, а оператор $\oplus$ визначає відстань до цієї точки. Залежно від особливостей задачі можуть використовуватися різні типи відстаней [25].

3. Методи штучного інтелекту.

Головним недоліком адитивних і таксономічних методів залишається компенсація одних оцінок іншими, тобто альтернатива може одержати високу оцінку, попри значну кількість параметрів з невисокими оцінками. Це також є причиною невисокої вибірковості методів – у разі, коли альтернативи мають 9–10 параметрів, узагальнена оцінка майже не чутлива до зміни одного з параметрів. Деякі конструкції узагальнення неможливо реалізувати за допомогою цих методів, наприклад логічне «І». Цей перелік недоліків можна продовжити, але їхня природа виходить з невідповідності аксіоматики (властивостей) методів властивостям задач.

На відміну від зазначених методів, методи штучного інтелекту не цілком, але певним чином позбавлені цих недоліків. Вони передбачають опис оцінок та важливості критеріїв за допомогою спеціальних математичних конструкцій, які не вимагають забезпечення умови адитивності оцінок (відстаней). Послаблення аксіоматичного базису завжди додає досліднику новий ступінь свободи і нові можливості. Слід зазначити, що методи штучного інтелекту теж мають складності в застосуванні, пов'язані переважно зі складністю виявлення знань і задавання вхідних оцінок.

На сьогодні існує величезна кількість методів штучного інтелекту. Серед них на практиці найпоширеніші такі.

Методи нечітких множин передбачають, що оцінки альтернатив у критеріях і ваги критеріїв описані

функціями належності нечітких множин, а як оператори порівняння $\simeq$ та узагальнення $\oplus$ використовуються Т-норми та/або Т-конорми [26]. Якщо позначити як $\{Cor_{ij} = 1, \forall j = \overline{1, 2}\}$ множину оцінок альтернативи o_i в критеріях із множини C , то функція належності нечіткої множини оцінок у критеріях може бути описана як: $g_i(c_j): C \rightarrow [0, 1]$. Аналогічно функція належності нечіткої множини вагів критеріїв може бути описана як: $h_i(c_j): C \rightarrow [0, 1]$.

Найпоширенішим випадком оператора узагальнення є оператор максиміну. Наприклад, така операція розраховує узагальнену оцінку альтернативи o_i :

$$o_i: Est_i = \max_j \min (Cor_{ij}, Imp_j) .$$

Можуть бути застосовані також параметризовані Т-норми та/або Т-конорми, в яких певний параметр може змінювати властивості оператора узагальнення.

Методи нечітких мір передбачають, що оцінки альтернатив у критеріях описуються функцією належності, заданої на множині критеріїв: $g_i(c_j): C \rightarrow [0, 1]$, а ваги критеріїв описуються нечіткою мірою, заданою також на множині критеріїв: $f(\cdot): 2^C \rightarrow [0, 1]$, де позначення 2^C використане для опису множини всіх підмножин множини C .

У випадку нечітких мір як оператор узагальнення використовується нечіткий інтеграл Сугено або Шоке. Відмінності між ними детально проаналізовані в роботі авторів [27]. Вони полягають у тому, що інтеграл Сугено використовує базис операторів логіки, а інтеграл Шоке – базис арифметичних операцій. Інтеграл Сугено має певну перевагу, яка полягає в тому, що він дає змогу визначити підмножину критеріїв, яка вплинула на результат інтегрування і таким чином пояснити одержану оцінку альтернативи. Крім того, інтеграл Сугено може моделювати поріг нечутливості, наявність якого природно притаманна складним системам.

Використання нечітко-інтегрального числення має кілька переваг.

По-перше, нечітка міра задана на множині всіх підмножин множини критеріїв, що забезпечує можливість моделювання залежностей і взаємодій між критеріями, а також синергетичних ефектів [28]. У цьому разі не потрібні спеціальні процедури для врахування міжкритеріальних кореляцій, які застосовуються в адитивних методах. Крім того, інші методи, які базуються на представленні множини визначення (базис міркувань) у вигляді традиційної множини з окремих елементів у принципі не можуть безпосередньо описати синергетичні ефекти, оскільки синергія породжується в результаті поєднання та взаємодії окремих елементів.

По-друге, нечітка міра має параметр нормування $\lambda \in [-1, \infty]$, який ще називають семантичним параметром. Він відображає семантику (значення, смисл) або модальність нечіткої міри, яка розглядається як відношення до дійсності змісту оцінок, описаних цією мірою. Для пояснення розглянемо приклад підкидання монети

і ставлення дослідника до результату. Якщо дослідник поставить собі запитання: «Яка можливість ($\lambda = 1$) випадання решки?», відповідь буде «одиниця», оскільки принципово ніщо не може завадити появі цього результату. Якщо поставити запитання: «Яка необхідність ($\lambda \rightarrow 0$) випадання решки?», відповіддю буде «нуль», оскільки жодних гарантій появи цього результату не існує. Як бачимо, сума оцінок двох несумісних подій може дорівнювати двом у випадку модальності «можливість» і нулю – у випадку модальності «необхідність». Між ними розташовані безліч відтінків модальності, в тому числі «ймовірність» ($\lambda = 0$), що підкреслює той факт, що нечітку міру можна розглядати параметричним розширенням міри ймовірності [26]. Таким чином, нечітка міра, на відміну від інших математичних конструкцій, додатково відображає відношення оцінок до дійсності, тобто забезпечує більшу адекватність оцінок тому смислу, який закладає людина у схему оцінювання.

По-третє, λ -параметр нечіткої міри налагоджує нечіткий інтеграл на певну логіку обчислення узагальненої оцінки. Наприклад, значення $\lambda = 1$ призводить до того, що результат нечіткого інтегрування стає аналогічним операції «АБО», а значення $\lambda \rightarrow 0$ – операції «І». Тобто якщо міркувати в термінах логічних операцій, нечіткий інтеграл можна розглядати як універсальну процедуру нечіткої логіки для обчислення результату.

По-четверте, з погляду філософії розв'язання наукових задач методами штучного інтелекту застосування адитивних методів не є коректним, оскільки штучний інтелект моделює розумові процеси людини, але ці процеси не є адитивними.

Нейронні мережі є, мабуть, найпоширенішою технікою розв'язання задач оцінювання. На сьогодні відомо багато видів нейронних мереж, які є ефективними в різних особливих випадках, але класичною нейронною мережею залишається перцептрон Розенблатта, логічна схема якого показана на *рисунку 3*.

На вхід перцептрона надходить сигнал, який фіксується сенсорами. Вихідний сигнал сенсора може вимірюватись у шкалі $[0;1]$ або $[0,1]$. Ці сигнали передаються нейронам асоціативного шару. Кожний із цих нейронів має суматор і функцію порогу, яка моделює нечутливість до слабких сигналів (шумів) і призначена для придушення шумів. Далі сигнали, які пройшли поріг нечутливості, подаються на реагуючий нейрон та обробляються в аналогічному порядку.

Звернімо увагу, що ця схема дуже схожа з описаною вище концептуальною схемою на *рисунку 2*. Якщо в схемі на *рисунку 2* відобразити дискретні множини, на яких визначаються параметри альтернатив, то логічна схема перцептрона Розенблатта буде цілком еквівалентна концептуальній схемі розв'язання найпростішої задачі оцінювання. Крім того, якщо як передавальну функцію асоціативних і реагуючих нейронів використати нечіткий інтеграл, то й описаний вище порядок розв'язання задачі оцінювання буде еквівалентним порядку роботи нейрон-

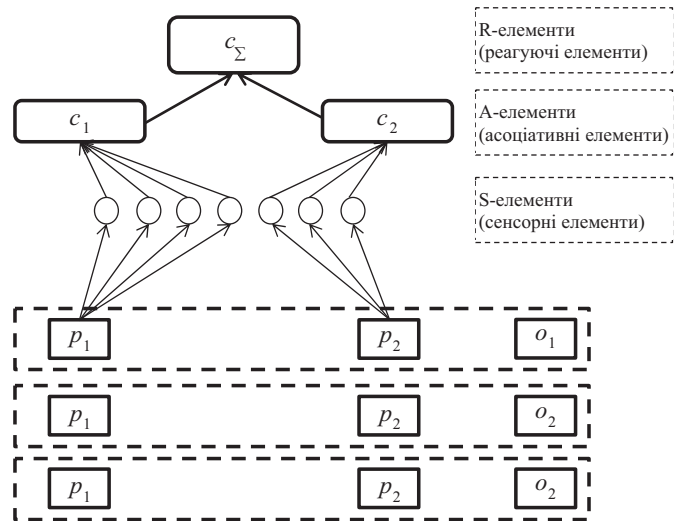


Рис. 3. Логічна схема перцептрона Розенблатта з одним виходом

ної мережі. Подібний приклад на основі використання нечіткого інтеграла Шоке описаний у роботі [29].

Таким чином, нейронні мережі можна вважати інструментами, певним чином еквівалентними методами техніки TOPSIS. Але щодо нейронних мереж особливий інтерес можуть мати алгоритми їхнього навчання, засновані на обробці досить великих масивів статистичних даних.

Розв'язання задач класифікації

Задача класифікації розглядається як оцінювання відповідності альтернативи опису певного класу. У такій постановці задача класифікації зводиться до кількох задач оцінювання, відповідно до кількості класів. Як і в задачі оцінювання, альтернативи описуються параметрами, а класи – еталонами, які можуть бути задані явно або неявно.

Головною особливістю класифікації є формулювання і властивості класів. Зокрема, класи можуть бути сформульовані як такі, що:

- цілком не схожі один з одним (чіткі класи);
- дещо схожі між собою (нечіткі класи);
- деякі класи є повністю вкладеними в інші класи (вкладені класи).

У разі використання одиної шкали в першому випадку оцінки альтернативи дорівнюють або 1, або 0. При цьому оцінка 1 має зустрічатися лише один раз. Рішенням задачі буде той клас, де оцінка відповідності дорівнюватиме 1. У другому випадку оцінки набувають значень з діапазону $[0,1]$. Як рішення виступатиме той клас, у якому оцінка буде максимальною. При цьому максимальне значення оцінки також має зустрічатися лише один раз. У випадку вкладених класів оцінки альтернативи також набувають значень з діапазону $[0,1]$, але можуть бути максимальними в кількох класах.

Техніка розв'язання задачі класифікації для кожного класу цілком аналогічна концептуальній схемі розв'язання задач оцінювання, показаній на *рисунку 2*. Відмінність полягає лише в тому, що для кожного класу формується свій критерій верхнього рівня $c_{\Sigma}^{\text{class } \#...}$.

Аналогічно до того, що задача оцінювання може бути розв'язана на підставі різних методів (адитивних, таксономічних, нечітко-інтегрального числення тощо), задача класифікації також може бути розв'язана по-різному. Але існує одна ключова відмінність – задача класифікації вимагає того, щоб метод забезпечував достатню розрізненість (вибірковість) між класами, інакше класи будуть «зливатися». Як свідчить досвід розв'язання аналітичних задач на практиці, таку розрізненість краще забезпечують методи нечітких мір і нейронні мережі.

Розв'язання задач кластеризації

Задача кластеризації розглядається як задача розподілення множини альтернатив за класами еквівалентності. Задача виникає, коли кілька альтернатив потрібно згрупувати на основі значень їхніх параметрів. Розв'язання задачі передбачає виконання таких кроків: визначення відношення схожості і потім на його основі – відношення еквівалентності на множині альтернатив. Далі здійснюється формування кластерів.

У загальному випадку існують багато методів кластеризації, огляд яких наданий у дослідженні [30]. Найпоширенішим алгоритмом кластеризації є «C-Means», який передбачає поділ множини альтернатив на основі значень їхніх параметрів. Але в різних контекстах (ситуаціях) параметри альтернатив можуть розглядатися по-різному. Наприклад, в одному випадку виделка може розглядатися як елемент множини столового начиння, в іншому – множини знарядь убивства. Тому така кластеризація вимагає додавання в задачу категорії контексту.

Зазвичай це робиться шляхом відбору множини параметрів окремо в кожному конкретному випадку. Але це можна зробити, якщо значення параметрів альтернатив узагальнити за допомогою розв'язання задачі оцінювання [31]. Представлена на *рисунку 2* ієрархічна структура за сутністю описує неявний еталон, а оцінки є оцінками подібності цьому еталону. Еталон для альтернатив є контекстом їхньої оцінки. Змінюючи ваги критеріїв, ми змінюватиме контекст і можемо одержати безліч поділів. Методи штучного інтелекту тут застосовані для розв'язання задачі одержання оцінок подібності альтернатив.

Але останнім часом набули розвитку методи нечіткої кластеризації [32]. Вони спрямовані на розв'язання задач визначення так званих кластерних ансамблів – комбінацій чисельних поділів, одержаних на основі окремих розв'язків задач кластеризації, в кінцевий консенсусний поділ. Ці методи розглядаються як техніка одержання нових знань на підставі обробки великих масивів даних («BigData»). Показовим прикладом такої задачі є

визначення сегментації груп людей на підставі різних критеріїв: релігійних уподобань, потреб, демографії тощо.

Розв'язання задач вибору

У класифікації аналітичних задач [1] задача вибору належить до задач управління. Це багатоактні задачі (оптимального, сценарного чи ігрового управління), в яких вибір здійснюється в результаті виконання багатьох кроків, а також одноактні, зокрема задачі власне вибору і впорядкування. На найзагальнішому рівні концептуальну схему задачі управління можна подати як послідовність задачі оцінювання і задачі вибору з множини оцінених альтернатив з використанням додаткового критерію вибору.

Наприклад, досить поширеною є двокрокова техніка розв'язання багатокритеріальних задач вибору за допомогою методу Еджворта-Парето [33]. Спочатку одержують оцінки альтернатив в обраних критеріях вищого рівня узагальнення. Потім використовують певне правило регуляризації для одержання результуючих оцінок альтернатив. Як правило, цю техніку застосовують тоді, коли критерії важко порівняти між собою, щоб одержати відношення переваги. Але тут побудова відношення переваг на множині критеріїв де-факто замінена апріорним правилом регуляризації.

Однією з особливостей задач управління є унікальність структури, послідовності розв'язання і комбінування критеріїв, що продиктовано особливостями природи об'єкта управління і середовища його функціонування. Щоб продемонструвати таку особливість розглянемо приклад розв'язання задачі вибору найраціональнішого варіанта дій держави на воєнно-політичному рівні. Схожі задачі наявні серед багатьох задач стратегічного, оперативного і тактичного рівнів.

Нехай на поточний момент держава, виходячи з оцінки своїх ресурсів, спроможностей і політичної доцільності, сформувала множину варіантів дій $Z = \{z_1, z_2\}$. Здійснення зазначених дій у результаті може призвести до кількох ситуацій з множини $X = \{x_1, \dots, x_4\}$. Кожна із ситуацій може бути оцінена з погляду сприятливості, тобто відповідності національним інтересам, у певній впорядкованій множині оцінок $Y = \{y_1 = \text{«низька»}, y_2 = \text{«середня»}, y_3 = \text{«висока»}\}$.

Нехай у разі вибору варіанта дій z_1 є можливою поява ситуацій з підмножини $A \subseteq X = \{x_1, x_3\}$, а в разі вибору варіанта дій z_2 – ситуацій з підмножини $B \subseteq X = \{x_2, x_4\}$. Нехай також у результаті розв'язання задачі оцінювання визначені ступені сприятливості ситуацій, описані такою умовною нечіткою мірою:

$$\sigma_x(\cdot|y) = \begin{matrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{matrix} \begin{bmatrix} 1 & 0.8 & 0.1 & 0.1 \\ 0.2 & 1 & 0.7 & 0.4 \\ 0.1 & 0.2 & 0.3 & 1 \end{bmatrix} \begin{matrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{matrix}.$$

Задача полягає у виборі варіанта дій, який би забезпечив сприятливість ситуації, не нижче за «середню».

Звернімо увагу на структуру задачі. Напрошується запитання: чи можна спростити задачу й оцінювати одразу варіанти дій на відповідність національним інтересам. Відповідь: ні, не можна, оскільки послідовність «дія – ситуація – оцінка ступеня сприятливості» існує саме в такому вигляді та її спрощення призведе до викривлення природи задачі. Це є головною особливістю природи цієї задачі.

Розв'язання задачі передбачає розв'язання двох підзадач:

Підзадача 1. Одержати розподіл упевненості у сприятливості ситуації в разі реалізації варіанта дій.

Скористаймося властивістю умовних нечітких мір. Зокрема, для будь-якої підмножини $E \subseteq X$ умовна нечітка міра $\sigma_x(\cdot | y)$ є функцією належності на просторі Y : $\sigma_x(E | y): Y \rightarrow [0,1]$. З іншого боку, для будь-якого елемента $y \in Y$ умовна нечітка міра $\sigma_x(\cdot | y)$ є нечіткою мірою на просторі X : $\sigma_x(E | y): 2^X \rightarrow [0,1]$.

Розгляньмо нечіткі міри $\forall y_i, i = \overline{1,3}$, $\sigma_x(\cdot | y): 2^X \rightarrow [0,1]$. Оскільки виконується умова $\forall y_i, i = \overline{1,3}, \sup_{x \in X} \sigma_x(x | y_i) = 1$, то для кожного

$\forall y_i, i = \overline{1,3}$ нечітка міра є мірою можливості. Отже, виконується умова:

$$\forall i \in I, A \subseteq X, Poss(\bigcup_{i \in I} A_i) = \sup_{i \in I} \{Poss(A_i)\}.$$

Тоді для варіанта $z_1, A \subseteq X = \{x_1, x_3\}$ маємо:

$$\begin{aligned} y_1 \in Y &\Rightarrow \sigma_X(\{x_1, x_3\} | y_1) = \\ &= \sigma_X(\{x_1\} | y_1) \vee \sigma_X(\{x_3\} | y_1) = 1 \vee 0.1 = 1; \\ y_2 \in Y &\Rightarrow \sigma_X(\{x_1, x_3\} | y_2) = 0.2 \vee 0.7 = 0.7; \\ y_3 \in Y &\Rightarrow \sigma_X(\{x_1, x_3\} | y_3) = 0.1 \vee 0.3 = 0.3. \end{aligned}$$

Аналогічно для варіанта $z_2, B \subseteq X = \{x_2, x_4\}$ маємо:

$$\begin{aligned} y_1 \in Y &\Rightarrow \sigma_X(\{x_2, x_4\} | y_1) = 0.8 \vee 0.1 = 0.8; \\ y_2 \in Y &\Rightarrow \sigma_X(\{x_2, x_4\} | y_2) = 1 \vee 0.4 = 1; \\ y_3 \in Y &\Rightarrow \sigma_X(\{x_2, x_4\} | y_3) = 0.2 \vee 1 = 1. \end{aligned}$$

Підзадача 2. Здійснити вибір варіанта дій, виходячи із забезпечення заданого рівня сприятливості ситуації.

Для дій z_1, z_2 оцінки сприятливості ситуації не нижче «середня» визначатимуться співвідношеннями відповідно:

$$\begin{aligned} y_2 y_3 \in Y &\Rightarrow \sigma_X(\{x_1, x_3\} | y_2) \vee \sigma_X(\{x_1, x_3\} | y_3) = \\ &= 0.7 \vee 0.3 = 0.7 \end{aligned}$$

та

$$y_2 y_3 \in Y \Rightarrow \sigma_X(\{x_2, x_4\} | y_2) = \sigma_X(\{x_2, x_4\} | y_3) = 1 \vee 1 = 1.$$

Отже, найсприятливішу ситуацію з погляду національних інтересів забезпечуватиме дія держави z_2 .

Розв'язання задач прогнозування

У загальному випадку прогноз – це обґрунтоване судження про можливий стан (стани) об'єкта в майбутньому, а також про шляхи й терміни його досягнення. Оскільки стан об'єкта, як правило, описується оцінками, то в технологічному сенсі сутність задачі прогнозування полягає в одержанні оцінки альтернативи в майбутньому. При цьому головним питанням є питання парадигми, обраної для опису часу. Це питання й сьогодні залишається найсуперечливішим. Але все ж можна виокремити три загальні техніки прогнозування:

- статистичну: вивчення статистичних трендів оцінок у минулому, виявлення їхнього характеру і продовження трендів у майбутньому на підставі припущення про стабільність характерних рис;
- сценарну: вивчення умов існування досліджуваного об'єкта, висунення на цій підставі припущень щодо змін умов у майбутньому та щодо їхніх можливих сполучень (сценаріїв), як правило позитивного, негативного і нейтрального з погляду дослідника;
- подієву: висунення припущень щодо подій, які можуть відбутись у майбутньому (виходячи з логіки розвитку системи, де існує досліджуваний об'єкт), і припущень щодо впливу цих подій.

Статистична техніка передбачає спочатку побудову явного чи неявного полінома на основі статистичних оцінок та його подальше «продовження» в часі на основі екстраполяції. Тут одна з основних можливостей застосування методів штучного інтелекту полягає в представленні змінних і коефіцієнтів поліномів у вигляді нечітких чисел $\bar{N}: \mathbb{R} \rightarrow [0,1]$ (див., наприклад, [34]) та обрахунку полінома за допомогою нечітких арифметичних операцій.

Сценарна техніка передбачає насамперед вибір парадигми для опису умов існування досліджуваного об'єкта і методу генерування сценаріїв. Для опису умов можуть використовуватися ймовірнісні розподіли, нечіткі функції належності або нечіткі міри. Генерування сценаріїв передбачає визначення сполучень значень параметрів згаданих вище умов. Огляд методів генерування сценаріїв для випадку ймовірнісних розподілів наведений у [35]. Наприклад, дослідження [36] описує метод генерації сценаріїв для випадку нечітких функцій належності.

Подієва техніка є ефективною у випадках значної невизначеності, коли аналітичну задачу неможливо розв'язати без участі людини, а також за відсутності або невалідності статистики. Технологічно вона зводиться до розв'язання кількох задач оцінювання відповідно до кількості моментів часу, що обраховуються. При цьому

в кожний момент часу на параметри задачі діє певна множина подій, яка змінює ці параметри і за рахунок цього зсуває узагальнену оцінку, одержуючи таким чином прогноз. Техніка передбачає припущення щодо появи в майбутньому певних подій, результатом чого є «зсув» або значень параметрів альтернатив, або важливості критеріїв. Тут головними питаннями є генерація подій і розрахунок ступеня й напряду сукупного впливу кількох подій на параметри альтернатив або ваги критеріїв. Підходи до розв'язання цих питань наведені в дослідженнях [19] та [37] відповідно.

Розв'язання задач чисельних розрахунків

Чисельні розрахунки зустрічаються майже в усіх прикладних задачах, пов'язаних з тактичними, оперативними, логістичними тощо розрахунками. Загальної концептуальної схеми розв'язання цієї задачі не існує, оскільки в кожному конкретному випадку вона визначається логікою розрахунків. По суті, це послідовність арифметичних операцій.

На практиці всі такі операції пов'язані із числовою невизначеністю. Наприклад, ми не можемо точно знати кількість особового складу штурмових підрозділів противника або кількість його танків, бронемашин тощо. Під час планування розподілу та підвезення боєприпасів їхня точна кількість у підрозділах невідома, оскільки тривають бойові дії та відбуваються постійні витрати мінливої інтенсивності. Відомі задачі, де подібна невизначеність описується за допомогою ймовірності. Але ж, як було показано вище, ймовірнісні методи є адитивними. Вони мають негативну властивість компенсації одних значень іншими, а також вимагають незалежності величин, які взаємодіють в арифметичних операціях, що не завжди можливо забезпечити.

Виходом може бути використання нечітких чисел, точніше, нечітких числових множин, які були запропоновані Л. Заде [38]. У загальному випадку нечітким числом A називається нечітка множина з носієм, визначеним на множині дійсних чисел:

$$A = \{(x, y) \in \mathbb{R} \times [0, 1] : y = \mu_A(x)\},$$

де $\mu_A(x)$ – функція належності A . Будь-яка операція $\otimes$ із чотирьох арифметичних операцій між нечіткими числами A та B визначається відповідно до принципу розширення Заде:

$$\mu_C(z) = \sup_{z=x \otimes y} \min \{\mu_A(x), \mu_B(y)\}, x, y, z \in \mathbb{R},$$

де $\mu_C(z)$ – функція належності результуючого числа $C = A \otimes B$.

Але відчутними проблемами цього класичного підходу є складність забезпечення відповідності властивостей нечітких операцій властивостям операцій традиційної арифметики, а також ефект «розповзання носія» в результаті виконання послідовності розрахунків, унаслідок чого невизначеність розв'язку необмежено зростає.

Для розв'язання першої проблеми були запропоновані кілька модифікацій класичних нечітких чисел, наприклад нечіткі числа Атанасова [39]. Для розв'язання другої проблеми авторами був запропонований алгоритм [40], заснований на пошуку нечіткого числа з максимальною ентропією. Цей алгоритм автори реалізували як надбудову для Microsoft Excel, яку можна безкоштовно скачати за посиланням:

<https://www.dropbox.com/s/2qre4sfuo3jawie/Fuzzy%20for%20Excel%2064bit.zip?dl=0>

Висновок

На жаль, обмеження обсягу статті не дають змоги викласти всі нюанси використання сучасних методів штучного інтелекту для розв'язання наукових задач у сфері оборони. Але автори мають надію, що викладені матеріали будуть достатніми, щоб хоча б у першому наближенні продемонструвати можливості цих методів, їхню простоту й ті втрати, які ми робимо, приділяючи їм недостатньо уваги.

Перелік літератури

1. Технологія аналізу воєнно-політичної обстановки / В. П. Бочарніков, С. В. Свешніков, Р. І. Тимошенко, В. І. Павленко. – К. : НУОУ ім. Івана Черняхівського, 2019. – 384 с.
2. Російсько-українська війна: особливості реалізації загроз державному суверенітету України та перспективи виходу з війни [Електронний ресурс] / М. М. Шевченко, О. С. Зозуля, Г. С. Храпач, А. В. Лепіхов // Збірник наукових праць ЦВСД НУОУ ім. І. Черняхівського. – 2022. – № 2 (75). – С. 6–15. – Режим доступу : <https://doi.org/10.33099/2304-2745/2022-2-75/6-15>.
3. Іващенко А. М. Прогнозування розвитку конфліктів гібридного типу на основі Big Data [Електронний ресурс] / А. М. Іващенко // Збірник наукових праць ЦВСД НУОУ ім. І. Черняхівського. – 2021. – № 3 (73). – С. 42–47. – Режим доступу : <https://doi.org/10.33099/2304-2745/2021-3-73/42-47>.
4. Вітер Д. В. Застосування сил спеціальних операцій у багатосферних операціях [Електронний ресурс] / Д. В. Вітер // Збірник наукових праць ЦВСД НУОУ ім. І. Черняхівського. – 2022. – № 3 (76). – С. 6–12. – Режим доступу : <https://doi.org/10.33099/2304-2745/2022-3-76/6-12>.
5. Searle T. Outside the Box: A New General Theory of Special Operations : JSOU Report 17-4 / T. Searle ; Joint Special Operations University. – MacDill Air Force Base : JSOU Press, 2017. – XII, 66 p.
6. Іващенко А. М. Концепція багатодомених операцій та її застосування силами оборони [Електронний ресурс] / А. М. Іващенко, В. В. Гордійчук, Н. М. Андріянова // Збірник наукових праць ЦВСД НУОУ ім. І. Черняхівського. – 2022. – № 3 (76). – С. 62–67. – Режим доступу : <https://doi.org/10.33099/2304-2745/2022-3-76/62-67>.
7. Момот Д. С. Рекомендації щодо визначення кількості та складу мобільних протидиверсійних резервів під час оперативного розгортання військ оперативного командування в інтересах оборонної операції об'єднаних сил [Електронний ресурс] / Д. С. Момот // Збірник наукових праць ЦВСД НУОУ ім. І. Черняхівського. – 2022. – № 3 (76). – С. 86–91. – Режим доступу : <https://doi.org/10.33099/2304-2745/2022-3-76/86-91>.

8. Хімченко О. С. Формалізація завдання з дезорганізації системи управління військами (силами) противника під час нанесення зустрічного удару ракетними військами [Електронний ресурс] / О. С. Хімченко // Збірник наукових праць ЦВСД НУОУ ім. І. Черняхівського. – 2022. – № 2 (75). – С. 26–32. – Режим доступу : <https://doi.org/10.33099/2304-2745/2022-2-75/26-32>.
9. Слісар П. О. Удосконалена методика визначення ймовірності досягнення потрібного ефекту координації вогневого ураження противника в операції [Електронний ресурс] / П. О. Слісар // Збірник наукових праць ЦВСД НУОУ ім. І. Черняхівського. – 2022. – № 2 (75). – С. 40–46. – Режим доступу : <https://doi.org/10.33099/2304-2745/2022-2-75/40-46>.
10. Кацалан В. О. Методичний підхід до оцінювання рівня інформаційно-психологічного впливу противника в інтересах інформаційної операції Збройних Сил України [Електронний ресурс] / В. О. Кацалан, О. Д. Кирпичников, Р. Д. Саунін // Збірник наукових праць ЦВСД НУОУ ім. І. Черняхівського. – 2022. – № 3 (76). – С. 24–31. – Режим доступу : <https://doi.org/10.33099/2304-2745/2022-3-76/24-31>.
11. Методичний підхід до управління ризиками безпеки інформації як складової забезпечення інформаційної безпеки держави [Електронний ресурс] / П. М. Сніцаренко, Ю. А. Саричев, В. П. Зубков, Ю. А. Піщанський // Збірник наукових праць ЦВСД НУОУ ім. І. Черняхівського. – 2022. – № 2 (75). – С. 47–55. – Режим доступу : <https://doi.org/10.33099/2304-2745/2022-2-75/47-55>.
12. Підходи до оцінювання захищеності інформаційної інфраструктури Міністерства оборони України [Електронний ресурс] / А. А. Рибидайло, В. А. Федорієнко, О. С. Кульчицький, Є. Г. Обозненко // Збірник наукових праць ЦВСД НУОУ ім. І. Черняхівського. – 2022. – № 1 (74). – С. 69–77. – Режим доступу : <https://doi.org/10.33099/2304-2745/2022-1-74/69-77>.
13. Застосування дата-центричного підходу під час побудови інформаційної інфраструктури з використанням хмарних технологій для оборонних потреб [Електронний ресурс] / Ю. А. Кирпичников, В. О. Капілевич, О. В. Андрощук, М. В. Петрушен // Збірник наукових праць ЦВСД НУОУ ім. І. Черняхівського. – 2022. – № 3 (76). – С. 68–75. – Режим доступу : <https://doi.org/10.33099/2304-2745/2022-3-76/68-75>.
14. Аналіз підходів до оцінювання психофізіологічного стану воїнів Сил оборони України за допомогою мініатюрних кардіографічних засобів [Електронний ресурс] / М. М. Бочаров, В. Г. Дикун, І. А. Чайковський та ін. // Збірник наукових праць ЦВСД НУОУ ім. І. Черняхівського. – 2022. – № 3 (76). – С. 76–85. – Режим доступу : <https://doi.org/10.33099/2304-2745/2022-3-76/76-85>.
15. Аналіз стану заходів протидії корупції в Міністерстві оборони України та Збройних Силах України за 2018–2020 роки [Електронний ресурс] / П. В. Жук, В. В. Бевз, С. С. Гайдаров та ін. // Збірник наукових праць ЦВСД НУОУ ім. І. Черняхівського. – 2022. – № 3 (76). – С. 92–100. – Режим доступу : <https://doi.org/10.33099/2304-2745/2022-3-76/92-100>.
16. Загорка О. М. Розвиток зенітних ракетних комплексів і систем для оборони військ та об'єктів від ударів нестратегічних балістичних ракет [Електронний ресурс] / О. М. Загорка, О. В. Дейнега // Збірник наукових праць ЦВСД НУОУ ім. І. Черняхівського. – 2022. – № 2 (75). – С. 16–25. – Режим доступу : <https://doi.org/10.33099/2304-2745/2022-2-75/16-25>.
17. Saaty T. L. Analytical planning: the organization of systems / T. L. Saaty, K. P. Kearns. – Oxford : Pergamon Press, 1985. – VII, 208 p. – (International series in modern applied mathematics and computer science ; vol. 7).
18. Li J. J. An MCDM model based on KL-AHP and TOPSIS and its application to weapon system evaluation [Електронний ресурс] / J. J. Li, L. W. Liu // Proceedings of the 5th International Asia Conference on Industrial Engineering and Management Innovation (IEMI2014). – Режим доступу : https://link.springer.com/chapter/10.2991/978-94-6239-100-0_48.
19. Bocharnikov V. Metric on the space of systems behavior functions represented by fuzzy measures [Електронний ресурс] / V. Bocharnikov, S. Sveshnikov // Yugoslav Journal of Operations Research. – 2023. – OnLine-First Issue. – Режим доступу : <https://doi.org/10.2298/YJOR230315012B>.
20. Gao F. Weapon system operational effectiveness evaluation based on the belief rule-based system with interval data [Електронний ресурс] / F. Gao, A. Zhang, W. Bi // Journal of Intelligent & Fuzzy Systems. – 2020. – Vol. 39, issue 5. – P. 6687–6701. – Режим доступу : <https://doi.org/10.3233/JIFS-190651>.
21. Свешніков С. В. Ентропійний алгоритм нечіткої арифметики / С. В. Свешніков // Наук.-техн. зб. ННДЦ ОТ і ВВ України. – 2002. – Вип. 13. – С. 14–25.
22. Zhang S. T. Evaluation of Capability of Weapon System of Systems Based on Multi-Scenario [Електронний ресурс] / S. T. Zhang, Y. J. Dou, Q. S. Zhao // Advanced Materials Research. – 2014. – Vols. 926–930. – P. 3806–3811. – Режим доступу : <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.926-930.3806>.
23. Measuring national power in the postindustrial age [Електронний ресурс] / A. J. Tellis, J. Bially, C. Layne, M. McPherson. – Santa Monica : RAND, 2000. – XVI, 198 p. – Режим доступу : <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA386226.pdf>.
24. Косецов В. О. Національна безпека України: теорія, реальність, прогноз : монографія / В. О. Косецов ; Центр міжнародної безпеки та стратегічних студій. – К. : Сатсанга, 2000. – 80 с.
25. Deza M. Encyclopedia of distances / M. Deza, E. Deza. – 4th ed. – Berlin : Springer, 2016. – XXII, 756 p.
26. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / А. Н. Аверкин, И. З. Батыршин, А. Ф. Блишун и др. ; под ред. Д. А. Поспелова. – М. : Наука, 1986. – 312 с. – (Проблемы искусственного интеллекта ; т. 8).
27. Estimating the potential willingness of the state to use military force based on the Sugeno fuzzy integral [Електронний ресурс] / S. Sveshnikov, V. Bocharnikov, A. Pavlikovsky, A. Prima // Yugoslav Journal of Operations Research. – 2022. – Vol. 32, No 3. – P. 325–356. – Режим доступу : <http://dx.doi.org/10.2298/YJOR210515002S>.
28. Свешніков С. В. Врахування синергетичних втрат ефективності бойової системи на основі нечіткої міри Сугено / С. В. Свешніков, В. П. Бочарников, О. С. Хімченко // Труды университета. – 2022. – № 2 (171). – С. 35–51.
29. Chiang J. H. Choquet fuzzy integral-based hierarchical networks for decision analysis [Електронний ресурс] / J. H. Chiang // IEEE Transactions on Fuzzy Systems. – 1999. – Vol. 7, issue 1. – P. 63–71. – Режим доступу : <https://doi.org/10.1109/91.746311>.
30. Madhulatha T. S. An overview on clustering methods [Електронний ресурс] / T. S. Madhulatha // IOSR Journal of Engineering. – 2012. – Vol. 2, issue 4. – P. 719–725. – Режим доступу : <https://doi.org/10.9790/3021-0204719725>.

31. Бочарніков В. П. Алгоритм кластеризації військово-політичних сил в умовах невизначеності / В. П. Бочарніков, С. М. Возняк // Наук-техн. зб. ННДЦ ОТ і ВБ України. – 1999. – Вип. 3. – С. 35–41.
32. Advances in fuzzy clustering and its applications / edited by J. V. de Oliveira, W. Pedrycz. – Chichester : John Wiley & Sons, 2007. – XX, 434 p.
33. Ногин В. Д. Обобщенный принцип Эджворта-Парето в терминах функций выбора / В. Д. Ногин // Труды ИСА РАН. – 2005. – Т. 12. – С. 43–53.
34. Mosleh M. Fuzzy polynomial regression with fuzzy neural networks [Електронний ресурс] / М. Mosleh, М. Otadi, S. Abbasbandy // Applied mathematical modelling. – 2011. – Vol. 35, issue 11. – P. 5400–5412. – Режим доступу : <https://doi.org/10.1016/j.apm.2011.04.039>.
35. Kaut M. Evaluation of scenario-generation methods for stochastic programming [Електронний ресурс] / М. Kaut, W. Stein // Stochastic Programming E-print Series (SPEPS). – Vol. 2003. – Режим доступу : <https://doi.org/10.18452/8296>.
36. A fuzzy inference based scenario building in two-stage optimization framework for sustainable recycling supply chain redesign [Електронний ресурс] / М. Feitó-Cespón, Y. Costa, M. S. Pishvae, R. Cespón-Castro // Expert Systems with Applications. – 2021. – Vol. 165. – Art. 113906. – Режим доступу : <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113906>.
37. Sveshnikov S. Forecasting financial indexes with model of composite events influence / S. Sveshnikov, V. Bocharnikov // Journal of Applied Economic Sciences. – 2009. – Vol. 4, issue 9. – P. 425–440.
38. Zadeh L. A. The Concept of linguistic variable and its application to approximate reasoning [Електронний ресурс] / L. A. Zadeh // Information Sciences. – 1975. – Vol. 8, issue 4. – P. 301–357. – Режим доступу : [https://doi.org/10.1016/0020-0255\(75\)90046-8](https://doi.org/10.1016/0020-0255(75)90046-8).
39. Nehi H. M. Intuitionistic fuzzy numbers and it's applications in fuzzy optimization problem / H. M. Nehi, H. R. Maleki // Proceedings of the 9th WSEAS International Conference on Systems, 11–13 July 2005, Athens, Greece / edited by I. W. Sandberg. – Stevens Point : WSEAS, 2005. – P. 1–5.
40. Sveshnikov S. Computational Algorithm and Tools of Fuzzy Arithmetic Based on the Principle of Maximum Entropy [Електронний ресурс] : preprint / S. Sveshnikov, V. Bocharnikov // Research Square. – Режим доступу : <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1254409/v1>.