

УДК 691.392

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.239854

Розробка методу оцінювання стану об'єкту в інтелектуальних системах підтримки прийняття рішень

В. М. Безуглий, В. В. Олійник, І. О. Романенко, О. В. Жук, В. В. Кузавков, О. В. Борисов, С. О. Коробченко, Е. С. Остапчук, Т. Ю. Давиденко, А. В. Шишацький

Проведено розробку методу оцінки стану об'єкту в інтелектуальних системах підтримки прийняття рішень (СППР). Сутність методу полягає в забезпеченні високої якості аналізу поточного стану об'єкту, що досліджується. Ключовою відмінністю розробленого методу є використання удосконаленого генетичного алгоритму. Удосконалений генетичний алгоритм використовується на етапі побудови нечіткої когнітивної моделі. Використання удосконаленого генетичного алгоритму дозволяє підвищити оперативність ідентифікації факторів та встановлення зв'язків між ними за рахунок одночасного пошуку рішення декількома особами. Об'єктивний та повний аналіз досягається використанням удосконалених нечітких темпоральних моделей стану об'єкту, врахуванням типу невизначеності та зашумленості вихідних даних. Метод також містить удосконалену процедуру обробки вихідних даних в умовах апріорної невизначеності, удосконалену процедуру навчання штучних нейронних мереж та удосконаленої процедури топологічного аналізу структури нечітких когнітивних моделей. Сутність процедури навчання полягає в тому, що відбувається навчання синаптичних ваг штучної нейронної мережі, типу та параметрів функції належності, а також архітектури окремих елементів і архітектури штучної нейронної мережі в цілому. Використання методу дає можливість досягти підвищення оперативності обробки даних на рівні 11–15 % за рахунок використання додаткових удосконалених процедур. Пропонується використання запропонованого методу в СППР автоматизованих систем управління (артилерійськими підрозділами, геоінформаційних системах спеціального призначення). Також можливо використання в СППР АСУ авіацією та протиповітряної оборони, а також в СППР АСУ логістичного забезпечення Збройних Сил.

Ключові слова: системи підтримки прийняття рішень, штучні нейронні мережі, генетичний алгоритм.

1. Вступ

Системи підтримки прийняття рішень (СППР) активно використовуються в усіх сферах життєдіяльності людей. Особливого поширення вони отримали при обробці великих масивів даних в базах даних, прогнозування розвитку процесів, забезпечення інформаційної та аналітичної підтримки процесу прийняття рішень особами, що приймають рішення.

Оснoву існуючих СППР становлять статистичні і методи штучного інтелекту, які забезпечують збір, обробку, узагальнення інформації про стан об'єктів (процесів), а також прогнозування їх майбутнього стану.

Створення інтелектуальних СППР стало природним продовженням широкого застосування СППР класичного типу. Основною фундаментальною відмінністю інтелектуальних СППР від класичних є наявність зворотного зв'язку та здатність адаптуватися до зміни вхідних процесів [1, 2].

Інтелектуальні СППР знайшли широке використання для вирішення специфічних завдань військового призначення, а саме [3, 4]:

- планування розгортання, експлуатації систем зв'язку та передачі даних;
- автоматизація управління військами та зброєю;
- підготовка особового складу за допомогою тренажерних систем та комплексів (навчання та контроль рівня засвоєння особовим складом знань, навичок та умінь);
- планування бойової підготовки частин (підрозділів) та контроль за якістю засвоєння навчального матеріалу;
- дорозвідки об'єктів противника та вибору способу їх вогневого ураження;
- визначення коефіцієнтів оперативно-тактичної важливості об'єктів противника;
- визначення оптимального складу сил та засобів, необхідних для досягнення мети операції (виконання бойового завдання);
- збір, обробка та узагальнення розвідувальних відомостей про стан об'єктів розвідки та ін.

Умовно структуру інтелектуальних СППР умовно можна розділити на 4 великі шари [5, 6]:

- шар інтерфейсу (інтерактивність та візуалізація);
- шар моделювання (статистичні моделі та машинне навчання; числові моделі; моделі на основі теорії ігор, ймовірно-статистичних методів та ін.);
- шар обробки даних (організація потоку даних, робота з базами даних та експертні оцінки);
- шар збору даних (веб сканування, сенсори та інтерфейс програмування).

Аналіз досвіду створення інтелектуальних СППР показує, що найбільш перспективною для їх побудови є інформаційна технологія, заснована на поєднанні різних підходів [2–8]. Одним з таких підходів є поєднання апарату нейронечітких когнітивних моделей (НЧКМ), штучних нейронних мереж (ШНМ) та генетичних алгоритмів (ГА). Все це дозволяє проводити обробку різнотипних даних, адаптувати свою структуру під тип та кількість вхідних даних тим самим збільшуючи власну продуктивність.

Застосування еволюційного методів порівняно з традиційними підходами дає такі переваги:

- здатність швидкої адаптації до предметної галузі, що практично без будь-яких перетворень дає можливість сформуванню структури НЧКМ та ШНМ, яка відповідає цьому процесу;
- можливість проводити паралельний пошук рішення в декількох напрямках;
- уникнення проблеми попадання в пастку локального оптимуму;

- здатність працювати в умовах апріорної невизначеності, нелінійності, стохастичності та хаотичності, різного роду збурень і завад;
- мають як універсальні апроксимуючі властивості, так і можливості побудови нечіткого висновку.

Еволюційні методи одержали широке поширення для розв'язування різних завдань інтелектуального аналізу даних, планування, контролю, ідентифікації, емуляції, прогнозування, інтелектуального управління та т. ін. на кожному шарі інтелектуальних СППР.

Незважаючи на досить успішне їхнє застосування для розв'язку широкого кола завдань інтелектуального аналізу даних, ці системи мають ряд недоліків, пов'язаних з їхнім використанням.

Серед найбільш істотних недоліків можна виділити такі:

1. Складність вибору архітектури системи. Як правило, модель, заснована на принципах обчислювального інтелекту, має фіксовану архітектуру. У зв'язку із цим, адаптація системи до нових даних, що надходять на обробку, що мають відмінну від попередніх даних природу, може виявитися проблематичним.

2. Навчання в пакетному режимі та навчання протягом декількох епох вимагає значних часових ресурсів. Такі системи не пристосовані для роботи в online режимі з досить високим темпом надходження нових даних на обробку.

3. Проблеми при врахуванні множини показників, що мають складну структуру взаємозв'язків, та що суперечать один одному.

4. Складність врахування опосередкованого впливу взаємозалежних компонентів в умовах невизначеності.

5. Нелінійний характер взаємовпливу об'єктів і процесів, нестохастична невизначеність, нелінійність взаємовпливу, часткової неузгодженості і суттєвою взаємозалежності компонентів.

Отже, поєднання НЧКМ та ГА дозволяє проводити аналіз (оцінку) стану об'єктів аналізу, а ШНМ дозволяють проводити глибоке навчання баз даних.

Постає актуальне наукове завдання розробки методики оцінювання в інтелектуальних системах підтримки прийняття рішень з використанням НЧКМ, ГА та ШНМ.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

В роботі [9] представлено алгоритм когнітивного моделювання. Визначено основні переваги когнітивних інструментів. При побудові експериментальної моделі визначено цільові фактори когнітивної карти, проведено аналіз пов'язаності і вивчений процес поширення збурень на графі. Запропонована модель використовується для оцінки та прогнозування господарської діяльності та визначення очікуваних значень ряду параметрів, які необхідно контролювати для діагностики тенденцій розвитку промислового підприємства. До недоліків зазначеного підходу слід віднести відсутність врахування типу невизначеності про стан об'єкту аналізу.

В роботі [10] розкрито суть когнітивного моделювання та сценарного планування. Запропонована система взаємодоповнюючих принципів побудови і реалізації сценаріїв, виділені різні підходи до побудови сценаріїв, описана про-

цедура моделювання сценаріїв на основі нечітких когнітивних карт. Запропоновано виявляти концепти когнітивної карти на основі аналізу внутрішнього і зовнішнього середовища організації, що дозволить системно поглянути на умови господарювання підприємства, спрогнозувати подальший розвиток та прийняти правильні управлінські рішення. Запропонований авторами підхід не дозволяє врахувати тип невизначеності про стан об'єкту аналізу та не враховує затримку на обробку даних про стан об'єкту.

В роботі [11] проведений аналіз основних підходів до когнітивного моделювання. Когнітивний аналіз і дозволяє: дослідити проблеми з нечіткими чинниками і взаємозв'язками; враховувати зміни зовнішнього середовища та використовувати об'єктивно сформовані тенденції розвитку ситуації в своїх інтересах. Зазначено що необхідно розробці системи критеріїв для можливості формалізації і автоматизації прийняття рішень в проблемних областях. Також зазначено, що необхідно враховувати об'єктивність інформації, яка обробляється.

В роботі [12] представлено метод аналізу великих масивів даних. Зазначений метод орієнтований на пошук скритої інформації в великих масивах даних. Метод включає операції генерування аналітичних базових ліній, зменшення змінних, виявлення розріджених ознак та наведення правил. До недоліків зазначеного методу належить неможливість врахування різних стратегій оцінювання рішень.

В роботі [13] наведений механізм трансформації інформаційних моделей об'єктів будівництва до їх еквівалентних структурних моделей. Цей механізм призначений для автоматизації необхідних операцій з перетворення, модифікації та доповнення під час такого обміну інформацією. До недоліків зазначеного підходу слід віднести неможливість оцінити адекватність та достовірність процесу трансформації інформації.

В роботі [14] проведено розробку аналітичної web-платформи для дослідження географічного та часового розподілу інцидентів. Web-платформу, містить декілька інформаційних панелей зі статистично значущими результатами за територіями. Web-платформа включає певні зовнішні джерела даних щодо соціальних та економічних питань, які дозволяють вивчити взаємозв'язок між цими чинниками та розподілом інцидентів у різних географічних рівнях. До недоліків зазначеної аналітичної платформи належить неможливість оцінити адекватність та достовірність процесу трансформації інформації, а також висока обчислювальна складність.

В роботі [15] проведено розробку методу нечіткого ієрархічного оцінювання якості обслуговування бібліотек. Зазначений метод дозволяє провести оцінювання якості бібліотек за множиною вхідних параметрів. До недоліків зазначеного методу слід віднести неможливість оцінити адекватність та достовірність оцінки.

В роботі [16] проведено аналіз 30 алгоритмів обробки великих масивів даних. Показано їх переваги та недоліки. Встановлено, що аналіз великих масивів даних повинен проводитися пошарово, відбуватися в режимі реального часу та мати можливість до самонавчання. До недоліків зазначених методів слід віднести їх велику обчислювальну складність та неможливість провести перевірку адекватності отриманих оцінок.

В роботі [17] представлено підхід з оцінки вхідних даних для систем підтримки та прийняття рішень. Сутність запропонованого підходу полягає в класифікації базового набору вхідних даних, їх аналізу, після чого на підставі аналізу відбувається навчання системи. Недоліками зазначеного підходу є поступове накопичення похибки оцінювання та навчання в зв'язку з відсутністю можливості оцінки адекватності прийнятих рішень.

В роботі [18] представлено підхід щодо обробки даних з різних джерел інформації. Зазначений підхід дозволяє проводити обробку даних з різних джерел. До недоліків зазначеного підходу слід віднести низьку точність отриманої оцінки та неможливість здійснити перевірку достовірності отриманої оцінки.

В роботі [19] проведений порівняльний аналіз існуючих технологій підтримки прийняття рішень, а саме: метод аналізу ієрархій, нейронні мережі, теорія нечітких множин, генетичні алгоритми і нейро-нечітке моделювання. Вказані переваги і недоліки даних підходів. Визначено сфери їх застосування. Показано, що метод аналізу ієрархій добре працює за умови повної початкової інформації, але в силу необхідності порівняння експертами альтернатив і вибору критеріїв оцінки має високу частку суб'єктивізму. Для задач прогнозування в умовах ризику і невизначеності обґрунтованим є використання теорії нечітких множин і нейронних мереж.

В роботі [20] розроблено метод структурно-цільового аналізу розвитку слабоструктурованих систем. Запропонований підхід до дослідження конфліктних ситуацій, що викликані протиріччями в інтересах суб'єктів, які впливають на розвиток досліджуваної системи і методи вирішення слабоструктурованих проблем на підставі формування сценаріїв розвитку ситуації. При цьому проблема визначається як невідповідність існуючого стану системи необхідному, яке задано суб'єктом управління. Разом з тим, до недоліків запропонованого методу слід віднести проблему локального оптимуму та неможливість проведення паралельного пошуку.

В роботі [21] представлено когнітивний підхід до імітаційного моделювання складних систем. Показано переваги зазначеного підходу, який дозволяє описати ієрархічні складі системи. До недоліків запропонованого підходу слід віднести односпрямованість пошуку рішень.

Проведення аналізу праць [9–21] показало, що відомі такі підходи, засновані на використанні загальнонаукових методів: системний, порівняльний, структурно-функціональний аналіз, метод експертних оцінок, методологія сценарного аналізу соціально-економічних систем та теоретико-інформаційного підходу. Спільними обмеженнями існуючих методів багатокритеріального нечіткого оцінювання альтернатив є:

- складність формування багаторівневої структури оцінювання;
- відсутність врахування сумісності нерівномірно значних показників;
- відсутність можливості спільного виконання прямої і зворотної задач оцінювання за підтримки вибору найкращих рішень;
- неможливість одночасного пошуку рішення в різних напрямках;
- попадання в проблему локального оптимуму;

– неврахування типу невизначеності початкових даних про стан об'єкту та зашумленості даних.

З цією метою пропонується провести розробку методу оцінювання в інтелектуальних системах підтримки прийняття рішень на основі НЧКМ, ШНМ та ГА.

3. Мета і завдання дослідження

Метою дослідження є розробка методу оцінювання стану об'єкту в інтелектуальних системах підтримки прийняття рішень, який б дозволив проводити аналіз стану об'єктів.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- сформулювати математичний опис процесу оцінювання в інтелектуальних системах підтримки прийняття рішень;
- визначити алгоритм реалізації методу;
- навести приклад застосування запропонованого методу при аналізі оперативної обстановки угруповання військ (сил).

4. Матеріали та методи досліджень

Об'єктом дослідження є об'єкти моніторингу військового призначення. В ролі об'єктів можуть виступати пункти управління різних ланок управління, що містять сукупність різноманітних засобів управління та передачі даних, засобів висвітлення повітряної обстановки, засобів розвідки та інш. Основною гіпотезою дослідження є визначення належності об'єкту моніторингу (визначення його походження та кількісно-якісного складу). В якості об'єктів моніторингу будуть розглядатися пункти управління окремих бригад, оперативно-тактичних угруповань військ, оперативних угруповань військ (сил).

В ході проведеного дослідження використовувалися загальні положення теорії штучного інтелекту – для вирішення задачі аналізу стану об'єктів в інтелектуальних системах підтримки прийняття рішень. Тобто теорія штучного інтелекту є основою зазначеного дослідження.

Для вирішення задач опису стану подальшого стану динамічних об'єктів використовувалися нечіткі когнітивні моделі. Зазначене дозволяє описати зміну складних багаторівневих об'єктів у часі. Для підвищення оперативності побудови нечіткої когнітивної моделі використовується удосконалений генетичний алгоритм. В зазначеному дослідженні також використаний розроблений в попередніх роботах метод навчання штучних нейронних мереж, який дозволяє проводити глибоке навчання штучних нейронних мереж. Сутність глибокого навчання полягає в навчанні архітектури, виду та параметрів функції належності. Моделювання проводилося з використанням програмного забезпечення MathCad 2014 (США) та ПЕОМ Intel Core i3 (США).

5. Результати дослідження з розробки методу оцінки

5.1. Математичний опис процесу оцінювання в інтелектуальних системах підтримки прийняття рішень

Математичний опис процесу оцінювання стану об'єктів для динамічної системи можна представити у вигляді:

$$\begin{aligned}
& \forall t \in \{1, \dots, T, \dots\} S_t = \\
& = \left\{ \begin{array}{l} s_1^{(t)} F_1 \left(\left(\begin{array}{l} \Phi_{1,1} \left(s_1^{(t-1)}, \dots, s_1^{(t-L_1^1)} \right), \\ \Phi_{1,N} \left(s_N^{(t-1)}, \dots, s_N^{(t-L_1^N)} \right) \end{array} \right) \times \iota_1 \right) \times \chi_1, \\ \\ s_2^{(t)} F_2 \left(\left(\begin{array}{l} \Phi_{2,1} \left(s_1^{(t-1)}, \dots, s_1^{(t-L_2^1)} \right), \\ \Phi_{2,N} \left(s_N^{(t-1)}, \dots, s_N^{(t-L_2^N)} \right) \end{array} \right) \times \iota_2 \right) \times \chi_2, \\ \\ \dots \\ s_N^{(t)} F_N \left(\left(\begin{array}{l} \Phi_{N,1} \left(s_1^{(t-1)}, \dots, s_1^{(t-L_N^1)} \right), \\ \Phi_{N,N} \left(s_N^{(t-1)}, \dots, s_N^{(t-L_N^N)} \right) \end{array} \right) \times \iota_N \right) \times \chi_N, \end{array} \right. \quad (1)
\end{aligned}$$

де S – багатовимірний часовий ряд; $S_t = (s_1^{(t)}, s_2^{(t)}, \dots, s_N^{(t)})$ – часовий зріз стану об'єкту аналізу представлений у вигляді багатовимірного часового ряду на t -й момент часу; $s_j^{(t)}$ – значення j -го компонента багатовимірного часового ряду на t -й момент часу; L_j^i – максимальне значення часової затримки i -го компоненту відносно j -го; Φ_{ij} – оператор для врахування взаємовпливу між i -м та j -м компонентом багатовимірного часового ряду; F_i – перетворення для отримання $s^{(t)}$, $i=1, \dots, N$; N – число компонентів багатовимірного часового ряду; ι – оператор для врахування ступеню інформованості про стан об'єкту; χ – оператор для врахування ступеню зашумленості даних про стан об'єкту.

З виразу (2) можна зробити висновок, що вираз дозволяє описати процеси в об'єкті аналізу з урахуванням запізнень у часі. Затримки необхідні на збір, обробку та узагальнення інформації, враховує ступеню інформованості про стан об'єкту та зашумленості даних.

5. 2. Алгоритм реалізації методу оцінювання в інтелектуальних системах підтримки прийняття рішень

Метод оцінки в інтелектуальних системах підтримки прийняття рішень складається з наступної послідовності дій (рис. 1). Хотілося б звернути увагу на те, що основні процедури запропонованого методу детально описані в роботі [22]. Проте, ключовою відмінністю зазначеного методу від відомих є те, що на етапі 3 зазначеного методу використовується удосконалений авторами генетичний алгоритм, основні етапи реалізації якого наведені на рис. 2. Використання зазначеного генетичного алгоритму дозволяє проводити багато направлений пошук декількома особами при побудові нечіткої когнітивної моделі.

1. Введення вихідних даних (дія 1 на рис. 1). На даному етапі вводяться вихідні дані що наявні про об'єкт, що підлягає аналізу.

2. Оброблення вихідних даних з урахуванням невизначеності (дія 2 на рис. 1).

На даному етапі за відбувається врахування типу невизначеності про стан об'єкту аналізу та проводиться ініціалізація базової моделі стану об'єкту [23].

3. Задання значень факторів та зв'язків між ними (дія 3 на рис. 1).

На даному етапі за допомогою удосконаленого генетичного алгоритму відбувається паралельний пошук рішення одночасно декількома особинами популяції для встановлення факторів та зв'язків між ними.

Ідея оцінювання з використанням генетичного алгоритму, полягає в аналізі можливих альтернатив оцінки стану об'єкту аналізу [9]. Оцінка кожної k -ї альтернативи стану об'єкту аналізу здійснюється на основі знайденої очікуваної альтернативи $s(x^{(k)})$, $k = 1, \dots, m$, та формування інтервальної багатокритеріальної оцінки $P(x^{(k)})$. Наведемо допущення:

- по-перше, розроблено та аналізується чотири альтернативи стану об'єкту аналізу $(x^{(1)}, x^{(2)}, x^{(3)}, x^{(4)})$;

- по-друге, розглянуто чотири часткових критерію стану об'єкту аналізу, які можуть бути представлені в вигляді нечітких трапецієподібних чисел, причому їх межі можуть перетинатися. При необхідності збільшення числа можливих градацій стану об'єкту можливо використовувати нечіткі багатограноподібні числа, які представлені в [22, 23];

- по-третє, частковий критерій стану позначений через $s(x^{(k)})$, $s(x^{(k)}) = (s_1^{(k)}, s_2^{(k)}, s_3^{(k)}, s_4^{(k)})$ ($s_1^{(k)}$, $s_4^{(k)}$ – песимістична і оптимістична оцінки стану об'єкту; $[s_2^{(k)}, s_3^{(k)}]$ – інтервал очікуваного стану об'єкту аналізу).

Є обмежена множина альтернатив стану об'єкту аналізу $X = \{x^{(1)}, x^{(2)}, \dots, x^{(m)}\}$, де кожна альтернатива оцінюється кортежем з n ненормованих інтервальних часткових критеріїв $C = \langle c_j(x^{(k)}) \rangle$, $j = \overline{1, n}$. Ставиться завдання знаходження вектору очікуваного стану об'єкту аналізу для кожної k -ї альтернативи стану об'єкту аналізу:

$$s(x^{(k)}) = (s_1^{(k)}, s_2^{(k)}, s_3^{(k)}, s_4^{(k)}), k = \overline{1, m};$$

стосовно оцінки узагальненої корисності, що характеризує реалізація кожної k -ї альтернативи стану об'єкту аналізу:

$$P(x^k) = \sum_{j=1}^n w_j^{\text{норм}} p_j^{\text{норм}}(x^{(k)}), k = \overline{1, m}, j = \overline{1, n}, \quad (2)$$

з можливістю подальшого вибору прийнятної альтернативи, $w_j^{\text{норм}}$ – нормований інтервальний коефіцієнт відносної важливості j -го часткового критерію альтернатив $x^{(k)} \in X$, $p_j^{\text{норм}}(x^{(k)})$ – нормовані інтервальні часткові критерії альтернатив $x^{(k)} \in X$ ($0 < p_j^{\text{норм}}(x^{(k)}) < 1$).

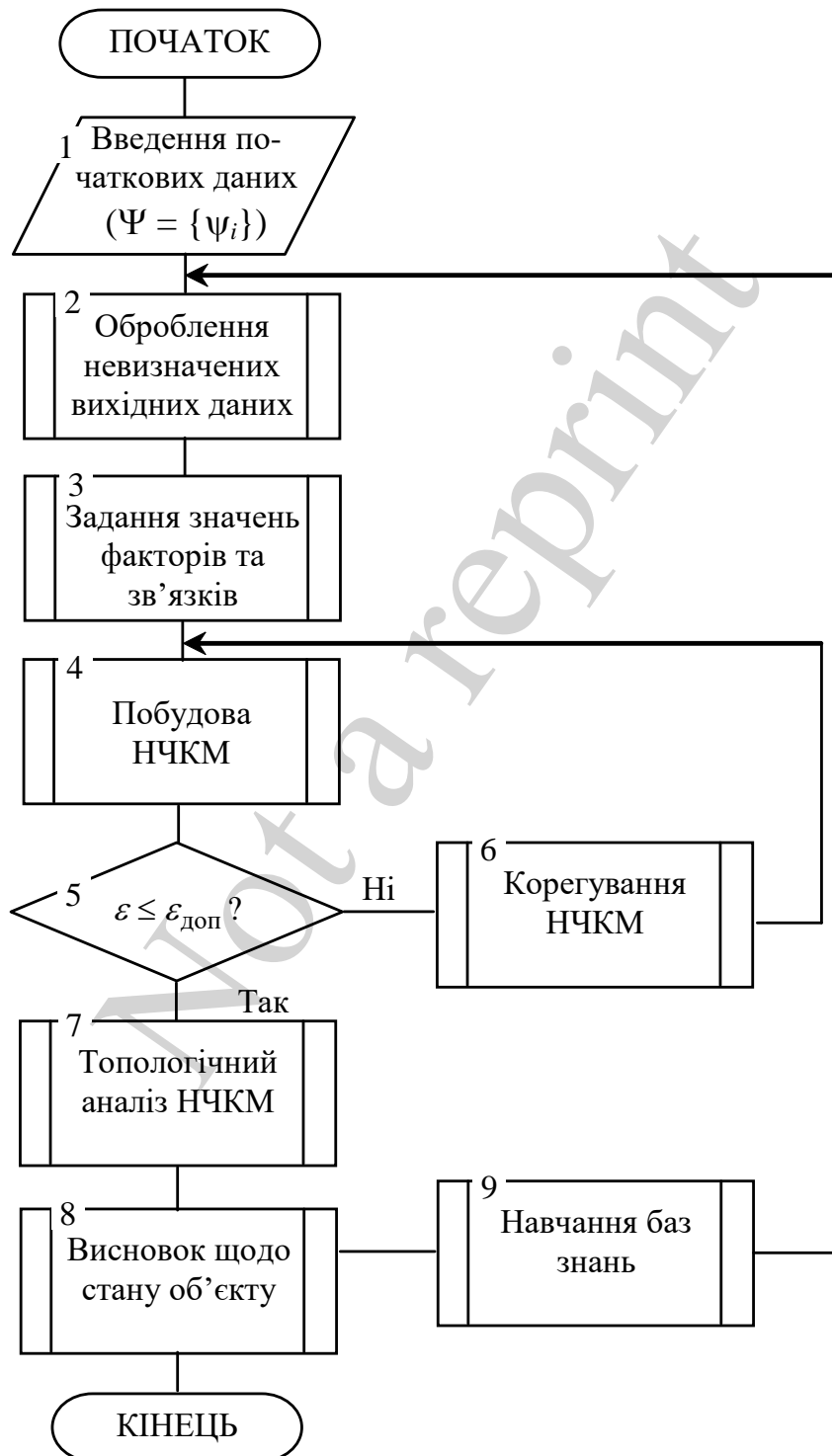


Рис. 1. Алгоритм реалізації методу аналізу стану об'єкту

Таким чином, завдання оцінювання реалізованості альтернатив стану об'єкту аналізу описується такою цільовою функцією:

$$P(x^{(k)}) = \sum_{j=1}^n w_j^{\text{норм}} p_j^{\text{норм}}(x^{(k)}) \rightarrow \max, x^{(k)} \in X \quad (3)$$

та обмеженнями

$$w_j^{\text{норм}} = [\alpha_{j1}, \alpha_{j2}, \alpha_{j3}, \alpha_{j4}], \quad (4)$$

$$s_{\min} \leq s(x^{(k)}) \leq s_{\max}, \quad (5)$$

де $\sum_{j=1}^n \alpha_{j1} < 1$, $\sum_{j=1}^n \alpha_{j4} > 1$; s_1 та s_2 – значення мінімальної і максимальної альтернатив. Вирішення завдання має комбінаторний характер і може бути сформульоване як пошук найкращого рішення. Для знаходження очікуваної альтернативи $s(x^{(k)})$ пропонується генетичний алгоритм, що складається з таких кроків (рис. 2).

Дія 3. 1. Введення початкових даних: $s(x^{(k)})$ – ненормовані інтервальні часткові критерії альтернатив; s_{\min} та s_{\max} – значення мінімальної і максимальної альтернатив; kol – кількість ітерацій; d – позиція кроссинговера; q – позиція мутації; w_j – інтервальний коефіцієнт відносної важливості j -го часткового критерія альтернатив, а також визначення початкового розміру популяції $P=2p$.

Дія 3. 2. Визначення необхідних умов оптимізації: цільова функція (3) і обмеження (4), (5).

Дія 3. 3. Формування початкової популяції – особин-батьків (чотири варіанти векторів стану об'єкту аналізу для кожної k -ї альтернативи стану об'єкту) з використанням генератора випадкових чисел:

$$s_1^P(x^{(1)}) = (s_1^{P(1)}, s_2^{P(1)}, s_3^{P(1)}, s_4^{P(1)}),$$

$$s_2^P(x^{(2)}) = (s_1^{P(2)}, s_2^{P(2)}, s_3^{P(2)}, s_4^{P(2)}),$$

$$s_3^P(x^{(3)}) = (s_1^{P(3)}, s_2^{P(3)}, s_3^{P(3)}, s_4^{P(3)}),$$

$$s_4^P(x^{(4)}) = (s_1^{P(4)}, s_2^{P(4)}, s_3^{P(4)}, s_4^{P(4)}).$$

Формування початкової популяції, в якій хромосоми закодовані в вигляді 8-ми розрядних наборів значень. Даний вид хромосом дозволяє залишати гени розташованими послідовно після застосування оператора мутації. Збереження

безперервного розташування генів дає можливість генетичному оператору схрещування копіювати в дочірню хромосому безперервні ділянки оперативної пам'яті батьківських хромосом, що дозволяє прискорити схрещування [10].

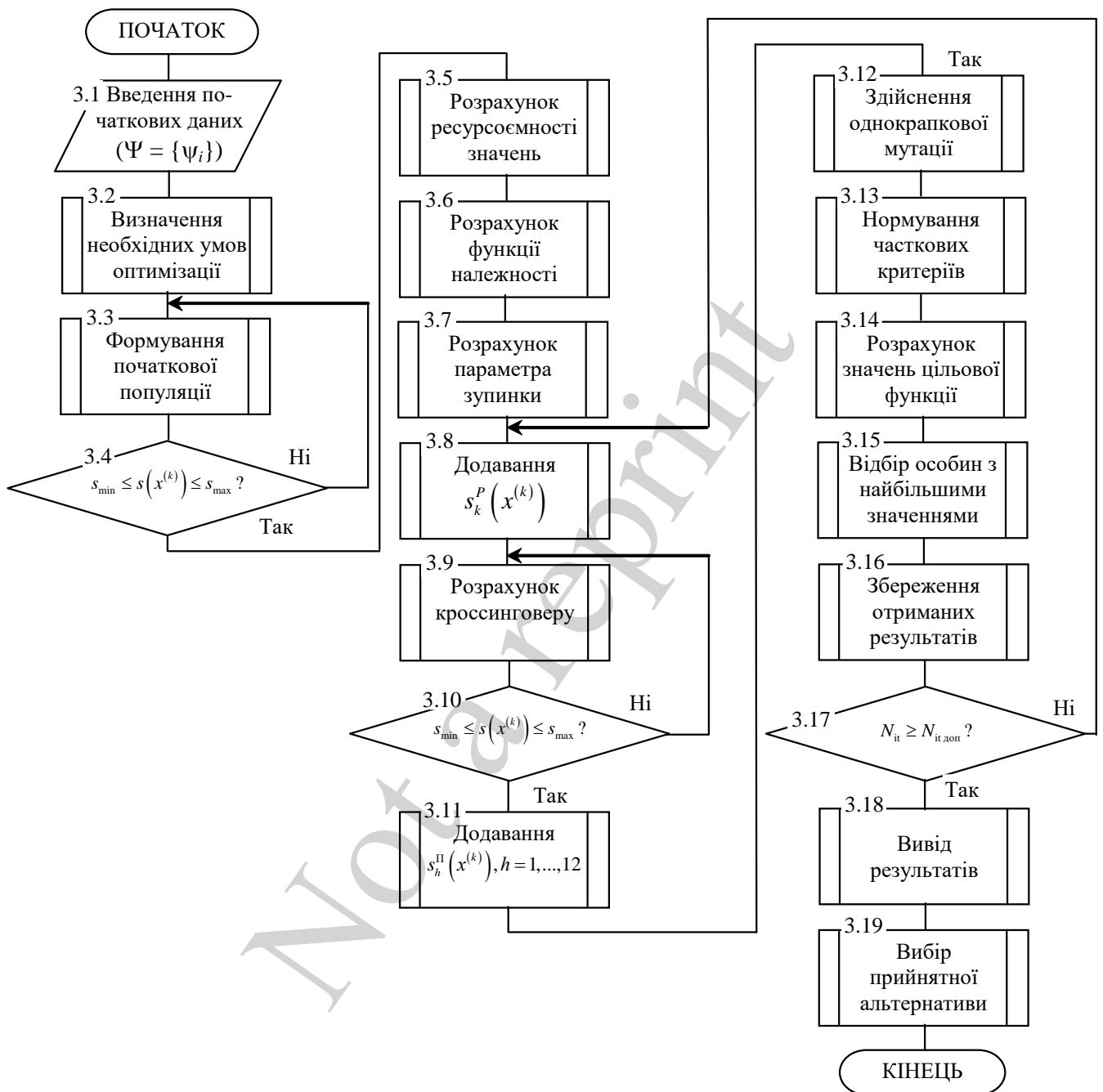


Рис. 2. Послідовність виконання удосконаленого генетичного алгоритму

Дія 3. 4. Перевірка виконання умови. Якщо умова (5) для особин-батьків дотримується, то перехід до дії 8; якщо умова (5) не дотримується, то перехід до дії 3.

Дія 3. 5. Розрахунок ресурсоемності отриманих значень і перевірка умов на неперевикнення $res_{\text{доп}}$ для кожної особини в початковій популяції:

$$res_i = f(U_{eff}), \quad (6)$$

де U_{eff} – ключові показники ефективності.

Дія 3. 6. Розрахунок функції належності рівня досягнення цілі Λ_{ij}^{targ} , що полягає в реалізації ітераційної процедури перерахунку цільових показників на основі розробленої нечіткої когнітивної моделі:

$$\Lambda_{ij}^{targ} = f(U_{eff}), \quad j = \overline{1, k}. \quad (7)$$

Дія 3. 7. Розрахунок параметра зупинки алгоритму на основі мінімального відхилення рівня досягнення цілі щодо необхідного значення:

$$\begin{aligned} \Delta\Lambda_{ij}^{targ} &= \Lambda_{ij}^{targ} - \Lambda_{необ}^{targ}, \\ \Delta\Lambda &= \min_i \min_j \Delta\Lambda_{ij}^{targ}. \end{aligned} \quad (8)$$

Дія 3. 8. Додавання вектору $s_k^P(x^{(k)})$ в популяцію.

Дія 3. 9. Здійснення операції односточкового кросинговеру над отриманими варіантами векторів k -ої альтернативи $s^P(x^{(k)})$ (точка кросинговеру $d < 4$). Вибір особин і формування пар для схрещування відповідно до їх функцією придатності. Запропонована процедура відбору реалізована за допомогою механізму адаптації параметрів алгоритму оптимізації, описаного в роботі [1].

Даний механізм адаптації побудований на основі компромісу між швидкістю збіжності і якістю одержуваного локально-оптимального рішення, його суть зводиться до того, що ймовірність відбору особин гнучко змінюється в залежності від передісторії пошуку [11].

З цією метою використовується нормальний закон розподілу ймовірності відбору. Математичне очікування приймається рівним значенню функції придатності найкращою для даного покоління хромосоми популяції. Якщо в черговому поколінні відбулася зміна найкращою хромосоми, то дисперсія приймає максимальне значення, розширюючи тим самим діапазон пошуку. Якщо ж протягом декількох поколінь виявляється краща хромосома, то дисперсія зменшується, в найпростішому випадку, вона пропорційна числу поколінь:

$$D = D_{max} - \beta \times g, \quad (9)$$

де D_{max} – максимальне значення дисперсії; β – коефіцієнт, що визначає швидкість збіжності алгоритму; g – число "невдалих" поколінь.

Математичне сподівання функції розподілу дорівнює значенню функції F_{max} . Випадкова величина X_i є безперервною, на відміну від дискретних значень

F_k , $k=1,2,\dots,M$ і необхідно вибрати таке значення F_k функції придатності, відстань від якого до F_{\max} була б найближчою до відстані від X_i до F_{\max} :

$$k = \arg \min \| |F_{\max} - X| - |F_{\max} - X| \|. \quad (10)$$

В даному випадку цим значенням буде F_i .

У наступних циклах відбору необхідно враховувати при розгляді значення функції придатності, відповідні особинам, вже відібраним на попередніх циклах. Це забезпечить різноманітність складу популяції.

Описаний механізм формує передумови для елітного відбору, зберігає найкращу зі знайдених хромосом популяції, і використовується в трьох випадках:

- перед етапом кросинговеру для вибору схрещується особин;
- перед етапом мутації для вибору особин, що мутують;
- після застосування всіх операторів ГА для відбору найбільш придатних особин в наступне покоління.

В результаті операції кросинговеру виходить 12 особин-нащадків:

$$s_1^{\Pi}(x^{(1)}) = (s_1^{P(1)}, s_d^{P(1)}, s_{d+1}^{P(2)}, s_4^{P(2)}),$$

$$s_2^{\Pi}(x^{(2)}) = (s_1^{P(2)}, s_d^{P(2)}, s_{d+1}^{P(1)}, s_4^{P(1)}),$$

$$s_3^{\Pi}(x^{(1)}) = (s_1^{P(1)}, s_d^{P(1)}, s_{d+1}^{P(3)}, s_4^{P(3)}),$$

$$s_4^{\Pi}(x^{(3)}) = (s_1^{P(3)}, s_d^{P(3)}, s_{d+1}^{P(1)}, s_4^{P(1)}),$$

$$s_5^{\Pi}(x^{(1)}) = (s_1^{P(1)}, s_d^{P(1)}, s_{d+1}^{P(4)}, s_4^{P(4)}),$$

$$s_6^{\Pi}(x^{(4)}) = (s_1^{P(4)}, s_d^{P(4)}, s_{d+1}^{P(1)}, s_4^{P(1)}),$$

$$s_7^{\Pi}(x^{(2)}) = (s_1^{P(2)}, s_d^{P(2)}, s_{d+1}^{P(3)}, s_4^{P(3)}),$$

$$s_8^{\Pi}(x^{(3)}) = (s_1^{P(3)}, s_d^{P(3)}, s_{d+1}^{P(2)}, s_4^{P(2)}),$$

$$s_9^{\Pi}(x^{(2)}) = (s_1^{P(2)}, s_d^{P(2)}, s_{d+1}^{P(4)}, s_4^{P(4)}),$$

$$s_{10}^{\Pi}(x^{(4)}) = (s_1^{P(4)}, s_d^{P(4)}, s_{d+1}^{P(2)}, s_4^{P(2)}),$$

$$s_{11}^{\Pi}(x^{(3)}) = (s_1^{P(3)}, s_d^{P(3)}, s_{d+1}^{P(4)}, s_4^{P(4)}),$$

$$s_{12}^{\Pi}(x^{(4)}) = (s_1^{P(4)}, s_d^{P(4)}, s_{d+1}^{P(3)}, s_4^{P(3)}). \quad (11)$$

Оператор кросинговеру (кросовера, схрещування) дозволяє на основі схрещування хромосом батьків створювати хромосоми нащадків. Одноточкове схрещування полягає в розрізуванні хромосом батьків в обраній випадковим чином спільної точки розрізу (розриву) і обмін правими частинами («хвостами» хромосом).

Дія 3. 10. Перевірка виконання умови. Якщо умова (5) для отриманих особин-нащадків дотримується, то перехід до дії 11; якщо умова (5) не дотримується, то перехід до дії 9.

Дія 3. 11. Додавання вектору $s_h^{\Pi}(x^{(k)})$, $h=1, \dots, 12$ в популяцію.

Дія 3. 12. Здійснення операції однокрапкової мутації отриманих 12 особин-нащадків (точка мутації $q < 4$). З приходом особи-нащадка шляхом мутації виходить нова особина-нащадок з мutowаними генами $\bar{s}_1^{-M}(x^{(1)}) = (s_1^M, s_q^M, \bar{s}_{q+1}^{-M}, s_4^M)$. Аналогічним чином дана операція проводиться і над іншими особинами-нащадками. Оператор мутації дозволяє випадково вносити зміни в особини, які згодом набувають нових властивостей. Одноточкова мутація полягає у випадковому виборі гена, який обмінюється своїм значенням з рядом розташованим геном.

Дія 3. 13. Здійснення нормування часткових критеріїв $p_j^{\text{норм}}(x^{(k)})$, в тому числі і очікувана вартість альтернатив для кожної k -ї альтернативи оцінювання стану об'єкту по формулі

$$c_j(x^{(k)}) = [c_{j1}(x^{(k)}), c_{j2}(x^{(k)}), c_{j3}(x^{(k)}), c_{j4}(x^{(k)})],$$

$$p_j^{\text{норм}}(x^{(k)}) = \left[\frac{c_{j1}(x^{(k)})}{c_j^{\max}}, \frac{c_{j2}(x^{(k)})}{c_j^{\max}}, \frac{c_{j3}(x^{(k)})}{c_j^{\max}}, \frac{c_{j4}(x^{(k)})}{c_j^{\max}} \right],$$

$$c_j^{\max} = \max_{1 \leq k \leq m} \{c_{j4}^{(k)}\}, \quad (12)$$

де $c_{j1}(x^{(k)})$, $c_{j4}(x^{(k)})$ – песимістична та оптимістична оцінки границь інтервалів, $c_{j2}(x^{(k)})$, $c_{j3}(x^{(k)})$ – інтервал найбільш очікуваних значень. Розрахунок інтервальних коефіцієнтів $w_j^{\text{норм}}$ відносної важливості часткових критеріїв за формулою:

$$w_j^{\text{норм}} = \frac{w_j}{\sum_{j=1}^n w_j}, \quad j = \overline{1, n}, \quad (13)$$

де w_j – інтервальний коефіцієнт відносної важливості j -го частки критерію, який може бути представлений у вигляді інтервалів, нечітких трикутних, трапецієподібних чисел та багатограноподібних чисел.

Дія 3. 14. Розрахунок значень цільової функції (2) для всіх особин популяції, а саме – для всіх варіантів векторів очікуваної стану об'єкту.

Дія 3. 15. Відбір чотирьох особин (чотирьох векторів) з 12 можливих з найбільшими значеннями цільової функції, які будуть батьками для наступної ітерації (покоління), або ж у разі виконання всіх ітерації – результатом обчислень.

Оскільки в запропонованому завданні розглядаються чотири альтернативи оцінки стану об'єкту, то відбирається всього чотири вектора очікуваного стану. Відбір особин виробляється ранговим методом, тобто особини популяції ранжуються за значенням їх функції пристосованості (ранжирування проводиться по зростанню величин). Оскільки оцінки узагальненої корисності $P(x^{(k)})$ представлені в вигляді трапецієподібних нечітких чисел, то для вибору прийнятної альтернативи стану об'єкту застосовується метод Чію-Парку.

Дія 3. 16. Збереження отриманих результатів.

Дія 3. 17. Перевірка виконання умови. Якщо умова виконання $N_{it} \geq N_{it\text{ доп}}$ кількості ітерацій дотримується, то перехід до дії 18; якщо умова не дотримується, то перехід до дії 8.

Дія 3. 18. Вивід результатів (вектори альтернатив $s(x^{(k)})$ і багатокритеріальної оцінки $Sp(P(x^{(k)}))$ для кожної k -ї альтернативи).

Дія 3. 19. Вибір прийнятної альтернативи. Прийнятною альтернативою вважається та, у якій узагальнена корисність є найбільшою.

Кінець алгоритму.

Процедури 4–9 запропонованого методу детально описані в роботі [24].

5. 3. Приклад застосування запропонованого методу при аналізі оперативної обстановки угруповання військ (сил)

Проведено моделювання роботи методу пошуку рішень відповідно до алгоритму на рис. 2 та виразів (1)–(13). Проведено моделювання роботи запропонованого методу оцінювання в програмному середовищі MathCad 14 (США). В якості задачі, що вирішувалася при проведенні моделювання, було оцінювання елементів оперативної обстановки угруповання військ (сил).

Вихідні дані для оцінки стану оперативної обстановки з використанням запропонованого методу:

– кількість джерел інформації, про стан об'єкту моніторингу – 3 (засоби радіомоніторингу, засоби дистанційного зондування землі та безпілотні літальні апарати) Для спрощення моделювання було взято однакову кількість кожного засобу – по 4 засоби;

– кількість інформаційних ознак по яким відбувається визначення стану об'єкту моніторингу – 12. До таких параметрів відносяться: належність, тип організаційно-штатного формування, пріоритетність, мінімальна ширина по фронту, максимальна ширина по фронту. Також враховується кількість особового складу, мінімальна глибина по флангу, максимальна глибина по флангу, зага-

льна чисельність особового складу, кількість зразків ОБТ, кількість типів зразків ОБТ та кількість засобів зв'язку);

– варіанти організаційно-штатних формувань – рота, батальйон, бригада.

Когнітивна карта оперативної обстановки угруповання – це квадратна таблиця (матриця інцидентності). Рядки і стовпці взаємно однозначно відповідають базисним факторам, що описують досліджуваній об'єкт, а число, що стоїть на перетині i -го рядка та j -го стовпчика, описує дію i -го фактору на j -й фактор (табл. 1).

Таблиця 1

Матриця інцидентності когнітивної карти оцінювання обстановки

№	w_1	w_2	w_3	w_4	w_5	w_6	w_7	w_8	w_9	w_{10}	w_{11}	w_{12}
w_1	0	1	1	0	0	0	0	1	0	1	1	0
w_2	0	0	1	0	1	1	1	0	0	1	1	0
w_3	0	1	0	0	1	0	0	-1	0	1	0	-1
w_4	0	0	1	0	0	1	-1	0	0	1	1	0
w_5	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0
w_6	0	1	0	0	-1	0	1	1	-1	1	1	0
w_7	1	-1	1	0	0	-1	0	1	0	1	0	0
w_8	0	-1	1	1	1	-1	0	0	0	0	0	0
w_9	1	0	1	1	-1	1	1	0	0	1	1	0
w_{10}	1	-1	0	1	0	1	0	-1	0	0	0	0
w_{11}	1	1	1	-1	0	1	0	0	0	1	1	1
w_{12}	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0

У табл. 2, 3 представлено порівняльні результати оцінки оперативності навчання штучних нейронних мереж, що еволюціонують.

Таблиця 2

Порівняльні результати оцінки оперативності навчання штучних нейронних мереж, що еволюціонують

Система	Параметри алгоритму	ХВ (Індекс Ксі-Бені)	Час, сек
FCM (Fuzzy C-Means)	–	0.1903	2.69
EFCM	Dthr=0.24	0.1136	0.14
EFCM	Dthr=0.19	0.1548	0.19
Запропонована система (пакетний режим)	delta=0.1	0.0978	0.37
Запропонована система (online режим)	delta=0.1	0.1127	0.25

Перед навчанням ознаки спостережень були нормалізовані на інтервалі [0, 1].

Варто відзначити, що запропонована процедура навчання показала кращий за критерієм РС (partition coefficient, РС – коефіцієнт розбиття) результат в порівнянні з EFCM і кращий за часом роботи результат в порівнянні з FCM. Дослідження показало, що зазначена процедура навчання забезпечує в середньому

на 11–15 % більшу високу оперативність навчання штучних нейронних мереж та не накопичує похибок в ході навчання (табл. 2, 3).

Таблиця 3
Порівняльні результати кластеризації

Система	Параметри алгоритму	XВ (Індекс Ксі-Бені)	Час, сек
FCM (Fuzzy C-Means)	Dthr=0.6	0.2963	0.81
EFCM	Dthr=0.6	0.2330	0.54
Запропонована система (пакетний режим)	delta=0.4	0.2078	0.45
Запропонована система (online режим)	delta=0.4	0.2200	0.30

Зазначені результати видно з результатів в останніх рядках табл. 2, 3, як різниця індексу Ксі-Бені. Разом з тим, як вже було зазначено, в ході роботи відомі методи накопичують помилки, саме тому в запропонованому методі запропоновано використання штучних нейронних мереж, що еволюціонують.

Розглянемо роботу генетичного алгоритму, описаного вище на конкретному прикладі.

Є чотири альтернативи $(x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, x_3^{(k)}, x_4^{(k)})$ стану об'єкту моніторингу, які описуються чотирма частковими критеріями. Критеріями є: c_1 – тривалість операції, діб.; c_2 – кількість особового складу, чол.; c_3 – ймовірність досягнення мети операції, може бути не досягнута повністю або частково; c_4 – вартість проведення операції $s(x_i)=[767,830]$ у. о., ($i=1\dots4$). Необхідно провести оцінку стану об'єкту з наступним вибором його поточного стану.

Розрахункові значення часткових критеріїв стану об'єкту для кожної альтернативи представлено в табл. 4.

Таблиця 4
Розрахункові значення часткових критеріїв стану об'єкту для кожної альтернативи поточного стану

Альтернативи досягнення мети операції	Часткові критерії стану об'єкту		
	c_1	c_2	c_3
$x^{(1)}$	[9,5, 10, 10,7, 11]	[10, 12, 13, 15]	[0,8, 0,82, 0,83, 0,84]
$x^{(2)}$	[8,7, 9, 9,5,10]	[8, 9,10,12]	[0,83, 0,85, 0,86, 0,87]
$x^{(3)}$	[9,2, 9,6, 10, 10,3]	[9,10,11,12]	[0,8, 0,83, 0,84, 0,85]
$x^{(4)}$	[9,5, 9,8, 10,3, 10,7]	[10, 11, 12, 13]	[0,84, 0,86, 0,87, 0,9]

На основі підходів наведених в [2, 4] отримана коефіцієнти відносної важливості часткових критеріїв у вигляді трапецієподібних чисел:

$$w_1 = [3, 3,4, 3,7, 4,3], w_2 = [3,2, 3,65, 3,76, 4,2],$$

$$w_3 = [2,2, 2,6, 2,77, 3,12], \quad w_4 = [2,5, 2,85, 3,3, 3,4],$$

де $w_{4(s)}$ – вагові коефіцієнт відносної важливості критерію вартості проведення операції угрупованням військ (сил).

Початкові значення параметрів генетичного алгоритму такі: крапка кроссовера (схрещування) – 1; крапка мутації – 1; кількість ітерацій – 10.

У результаті були отримані наступні рішення, представлені в табл. 5.

Таблиця 5
Результати оптимізації

Альтернативи досягнення мети операції	Вектор вартості проведення операції	Оцінка узагальненої корисності
$x^{(1)}$	[600, 656, 661, 721]	0,94
$x^{(2)}$	[600, 692, 710, 736]	0,72
$x^{(3)}$	[600, 674, 693, 709]	0,55
$x^{(4)}$	[600, 685, 743, 750]	0,69

З табл. 2 видно, що альтернатива x_1 зі значеннями вартості [600, 656, 7661, 721] і відповідної їй узагальненою корисністю $F(x^{(1)})=0,94$ є найкращою альтернативою застосування угруповання. Вектор розподілу [600, 656, 7661, 721] означає, що при зазначеному варіанті застосуванні угруповання військ (сил) реалізація альтернативи $x^{(1)}$ застосування угруповання військ (сил) складе від 656 до 717 млн. умовних одиниць.

6. Обговорення результатів з розробки методу оцінювання

Основними перевагами запропонованого методу оцінки є:

- має гнучку ієрархічну структуру показників, що дозволяє звести завдання багатокритеріального оцінювання альтернатив до одного критерію або використувати для вибору вектор показників – вирази (5)–(13);
- однозначність отриманої оцінки стану об'єкту – вирази (5)–(13);
- широка сфера використання (системи підтримки та прийняття рішень);
- не накопичує похибку навчання (табл. 2, 3);
- можливість адаптації системи показників в ході роботи – вирази (2)–(5);
- навчання не тільки синаптичних ваг штучної нейронної мережі, але й виду та параметрів функції належності (табл. 2, 3);
- навчання архітектури штучних нейронних мереж (табл. 2, 3);
- обчислення даних за одну епоху без необхідності зберігання попередніх обчислень;
- врахування типу невизначеності при побудові нечіткої когнітивної темпоральної моделі (дія 2 на рис. 2 як результат продовження праці [23]);
- можливість синтезу оптимальної структури системи підтримки та прийняття рішення – вирази (2)–(5);
- можливість швидкої побудови нечіткої когнітивної темпоральної моделі за рахунок одночасного пошуку рішення декількома особинами – вирази (5)–(13);

– здатність уникнення проблеми локального екстремуму – вирази (5)–(13).

До недоліків запропонованого методу слід віднести:

– втрата інформативності при оцінюванні стану об'єкту моніторингу за рахунок побудови функції належності. Зазначена втрата інформативності може бути зменшена за рахунок вибору типу функції належності при практичній реалізація запропонованого методу в системах підтримки та прийняття рішень. Вибір типу функції належності залежить від обчислювальних ресурсів конкретного електронно-обчислювального засобу;

– менша точність оцінювання по окремо взятому параметру оцінки стану об'єкту;

– менша точність оцінювання порівняно з іншими методами оцінювання.

Зазначений метод дозволить:

– провести оцінку стану об'єкту;

– визначити ефективні заходи для підвищення ефективності управління;

– підвищити швидкість оцінки стану об'єкту;

– зменшити використання обчислювальних ресурсів систем підтримки та прийняття рішень.

За результатами проведеного аналізу ефективності запропонованого методу видно, що його обчислювальна складність є на 11–15 % меншою у порівнянні з іншими підходами, що використовуються для оцінювання ефективності прийнятих рішень, які представлені в табл. 2.

Пропонується використання запропонованого методу в системах підтримки прийняття рішень автоматизованих систем управління артилерійськими підрозділами, геоінформаційних систем спеціального призначення. Також можливо використання СППР в АСУ авіацією та протиповітряної оборони, а також СППР АСУ логістичного забезпечення Збройних Сил.

Обмеженнями дослідження є необхідність наявності початкової бази даних про стан об'єкту моніторингу, необхідність врахування часу затримки на збір та доведення інформації від джерел розвідувальних відомостей.

Зазначене дослідження є подальшим розвитком досліджень, що спрямовані на розробку методологічних засад підвищення ефективності обробки даних в інформаційних системах спеціального призначення, що опубліковані вже раніше [2, 3–6, 23, 24].

Напрями подальших досліджень слід спрямувати на зменшення обчислювальних витрат при обробці різнотипних даних в інформаційних системах спеціального призначення з використанням методів штучного інтелекту [25–34].

7. Висновки

1. Проведено математичний опис процесу оцінювання в інтелектуальних системах підтримки прийняття рішень. Зазначений математичний опис дозволяє описати процеси, що проходять в інтелектуальних системах підтримки прийняття рішень під час вирішення завдань аналізу стану об'єктів. В якості критерію ефективності зазначеного методу обрано оперативність процесу аналізу стану об'єкту. В зазначеному описі процес аналізу представлено у вигляді багатовимі-

рного часового ряду. Це дозволяє створити ієрархічний опис складного процесу за рівнями узагальнення та провести відповідний аналіз його стану.

2. Визначено алгоритм реалізації методу, що дозволяє:

- провести багатовимірний аналіз стану об'єктів в умовах невизначеності;
- забезпечити оцінку в умовах нестохастичної невизначеності, нелінійності взаємовпливу, часткової неузгодженості і суттєвою взаємозалежності компонентів багатовимірного часового ряду;
- провести топологічний аналіз структури НЧКМ;
- враховувати зашумленість вихідних даних на оперативність обробки даних;
- врахувати час затримки на надходження інформації від пунктів добування на пункти обробки;
- врахувати початковий тип невизначеності вихідних даних при побудові НКМ;
- провести структурно-параметричне навчання штучних нейронних мереж для інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень;
- здійснити швидку побудову нечіткої когнітивної темпоральної моделі за рахунок одночасного пошуку по декільком напрямкам декількома особинами.

3. Проведений приклад використання запропонованої методу на прикладі оцінки стану оперативної обстановки угруповання війсь (сил). Зазначений приклад показав підвищення ефективності оперативності обробки даних на рівні 11–15 % за рахунок використання додаткових удосконалених процедур.

Подяки

Авторський колектив висловлює подяку за надання допомоги в підготовці статті:

- доктору технічних наук, професору Кувшинову Олексію Вікторовичу – заступнику начальника навчально-наукового інституту Національного університету оборони України імені Івана Черняхівського;
- доктору технічних наук, старшому науковому співробітнику Сові Олегу Ярославовичу – начальнику кафедри автоматизованих систем управління Військового інституту телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут;
- доктору технічних наук, старшому науковому співробітнику Журавському Юрію Володимировичу – начальнику кафедри електротехніки та електроніки Житомирського військового інституту ім. С. П. Корольова;
- заслуженому діячу науки і техніки України, доктору технічних наук, професору Слюсарю Вадиму Івановичу – головному науковому співробітнику Центрального науково-дослідного інституту озброєння та військової техніки Збройних Сил України;
- доктору технічних наук, професору Ротштейну Олександрю Петровичу – професору Ієрусалимського політехнічного інституту Махон Лев;
- кандидату технічних наук, доценту Башкирову Олександрю Миколайовичу – провідному науковому співробітнику Центрального науково-дослідного інституту озброєння та військової техніки Збройних Сил України.

Література

1. Башкиров, О. М., Костина, О. М., Шишацький, А. В. (2015). Развитие интегрированных систем зв'язку та передачі даних для потреб Збройних Озброєння та військова техніка, 1 (5), 35–39.
2. Dudnyk, V., Sinenko, Y., Matsyk, M., Demchenko, Y., Zhyvotovskiy, R., Repilo, I. et. al. (2020). Development of a method for training artificial neural networks for intelligent decision support systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (2 (105)), 37–47. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.203301>
3. Maistrenko, O., Khoma, V., Karavanov, O., Stetsiv, S., Shcherba, A. (2021). Devising a procedure for justifying the choice of reconnaissance-firing systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (3 (109)), 60–71. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.224324>
4. Pievtsov, H., Turinskyi, O., Zhyvotovskiy, R., Soya, O., Zvieriev, O., Lanetskii, B., Shyshatskiy, A. (2020). Development of an advanced method of finding solutions for neuro-fuzzy expert systems of analysis of the radioelectronic situation. *EUREKA: Physics and Engineering*, 4, 78–89. doi: <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2020.001353>
5. Zuiev, P., Zhyvotovskiy, R., Zvieriev, O., Hatsenko, S., Kuprii, V., Nakonechnyi, O. et. al. (2020). Development of complex methodology of processing heterogeneous data in intelligent decision support systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (9 (106)), 14–23. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.208554>
6. Shyshatskiy, A., Zvieriev, O., Salnikova, O., Demchenko, Ye., Trotsko, O., Neroznak, Ye. (2020). Complex Methods of Processing Different Data in Intellectual Systems for Decision Support System. *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*, 9 (4), 5583–5590 doi: <https://doi.org/10.30534/ijatcse/2020/206942020>
7. Yeromina, N., Kurban, V., Mykus, S., Peredrii, O., Voloshchenko, O., Kosenko, V. et. al. (2021). The Creation of the Database for Mobile Robots Navigation under the Conditions of Flexible Change of Flight Assignment. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 11 (05), 37–44. doi: https://doi.org/10.46338/ijetae0521_05
8. Petrosian, R., Chukhov, V., Petrosian, A. (2021). Development of a method for synthesis the FIR filters with a cascade structure based on genetic algorithm. *Technology Audit and Production Reserves*, 4 (2 (60)), 6–11. doi: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.237271>
9. Алпеева, Е. А., Волкова, И. И. (2019). Использование нечетких когнитивных карт при разработке экспериментальной модели автоматизации производственного учета материальных потоков. *Экономика в промышленности*, 12 (1), 97–106. doi: <https://doi.org/10.17073/2072-1633-2019-1-97-106>
10. Заграновская, А. В., Эйснер, Ю. Н. (2017). Моделирование сценариев развития экономической ситуации на основе нечетких когнитивных карт. *Современная экономика: проблемы и решения*, 10 (94), 33–47. doi: <https://doi.org/10.17308/meps.2017.10/1754>

11. Симанков, В. С., Путьято, М. М. (2013). Исследование методов когнитивного анализа. Системный анализ, управление и обработка информации, 13, 31–35.
12. Ko, Y.-C., Fujita, H. (2019). An evidential analytics for buried information in big data samples: Case study of semiconductor manufacturing. *Information Sciences*, 486, 190–203. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ins.2019.01.079>
13. Ramaji, I. J., Memari, A. M. (2018). Interpretation of structural analytical models from the coordination view in building information models. *Automation in Construction*, 90, 117–133. doi: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.02.025>
14. Pérez-González, C. J., Colebrook, M., Roda-García, J. L., Rosa-Remedios, C. B. (2019). Developing a data analytics platform to support decision making in emergency and security management. *Expert Systems with Applications*, 120, 167–184. doi: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.11.023>
15. Chen, H. (2018). Evaluation of Personalized Service Level for Library Information Management Based on Fuzzy Analytic Hierarchy Process. *Procedia Computer Science*, 131, 952–958. doi: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.04.233>
16. Chan, H. K., Sun, X., Chung, S.-H. (2019). When should fuzzy analytic hierarchy process be used instead of analytic hierarchy process? *Decision Support Systems*, 125, 113114. doi: <https://doi.org/10.1016/j.dss.2019.113114>
17. Osman, A. M. S. (2019). A novel big data analytics framework for smart cities. *Future Generation Computer Systems*, 91, 620–633. doi: <https://doi.org/10.1016/j.future.2018.06.046>
18. Gödri, I., Kardos, C., Pfeiffer, A., Váncza, J. (2019). Data analytics-based decision support workflow for high-mix low-volume production systems. *CIRP Annals*, 68 (1), 471–474. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.04.001>
19. Harding, J. L. (2013). Data quality in the integration and analysis of data from multiple sources: some research challenges. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-2/W1, 59–63. doi: <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-xl-2-w1-59-2013>
20. Papa, A., Shemet, Y., Yarovy, A. (2021). Analysis of fuzzy logic methods for forecasting customer churn. *Technology Audit and Production Reserves*, 1 (2 (57)), 12–14. doi: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.225285>
21. Горелова, Г. В. (2013). Когнитивный подход к имитационному моделированию сложных систем. *Известия ЮФУ. Технические науки*, 3, 239–250.
22. Lutsenko, I., Fomovskaya, E., Oksanych, I., Koval, S., Serdiuk, O. (2017). Development of a verification method of estimated indicators for their use as an optimization criterion. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (4 (86)), 17–23. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.95914>
23. Koshlan, A., Salnikova, O., Chekhovska, M., Zhyvotovskiy, R., Prokopenko, Y., Hurskyi, T. et. al. (2019). Development of an algorithm for complex processing of geospatial data in the special-purpose geoinformation system in conditions of diversity and uncertainty of data. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (9 (101)), 35–45. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.180197>

24. Mahdi, Q. A., Shyshatskyi, A., Prokopenko, Y., Ivakhnenko, T., Kupriyenko, D., Golian, V. et. al. (2021). Development of estimation and forecasting method in intelligent decision support systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (9 (111)), 51–62. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.232718>
25. Polozhiuk, K., Yaremenko, V. (2020). Neural networks and Monte-Carlo method usage in multi-agent systems for sudoku problem solving. *Technology Audit and Production Reserves*, 6 (2 (56)), 38–41. doi: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2020.218427>
26. Akanova, A., Kaldarova, M. (2020). Impact of the compilation method on determining the accuracy of the error loss in neural network learning. *Technology Audit and Production Reserves*, 6 (2 (56)), 34–37. doi: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2020.217613>
27. Leoshchenko, S., Oliinyk, A., Subbotin, S., Zaiko, T. (2020). Usage of swarm intelligence strategies during projection of parallel neuroevolution methods for neuromodel synthesis. *Technology Audit and Production Reserves*, 5 (2 (55)), 12–17. doi: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2020.214769>
28. Yaremenko, V., Syrotiuk, O. (2020). Development of a multi-agent system for solving domain dictionary construction problem. *Technology Audit and Production Reserves*, 4 (2 (54)), 27–30. doi: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2020.208400>
29. Lakhno, V., Sagun, A., Khaidurov, V., Panasko, E. (2020). Development of an intelligent subsystem for operating system incidents forecasting. *Technology Audit and Production Reserves*, 2 (2 (52)), 35–39. doi: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2020.202498>
30. Hoseini Alinodehi, S. P., Moshfe, S., Saber Zaeimian, M., Khoei, A., Hadidi, K. (2016). High-Speed General Purpose Genetic Algorithm Processor. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 46 (7), 1551–1565. doi: <https://doi.org/10.1109/tcyb.2015.2451595>
31. Hou, N., He, F., Zhou, Y., Chen, Y., Yan, X. (2018). A Parallel Genetic Algorithm With Dispersion Correction for HW/SW Partitioning on Multi-Core CPU and Many-Core GPU. *IEEE Access*, 6, 883–898. doi: <https://doi.org/10.1109/access.2017.2776295>
32. Nobile, M. S., Cazzaniga, P., Besozzi, D., Colombo, R., Mauri, G., Pasi, G. (2018). Fuzzy Self-Tuning PSO: A settings-free algorithm for global optimization. *Swarm and Evolutionary Computation*, 39, 70–85. doi: <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2017.09.001>
33. Nugroho, E. D., Wibowo, M. E., Pulungan, R. (2017). Parallel implementation of genetic algorithm for searching optimal parameters of artificial neural networks. 2017 3rd International Conference on Science and Technology - Computer (ICST). doi: <https://doi.org/10.1109/icstc.2017.8011867>
34. Bergel, A. (2020). Neuroevolution. *Agile Artificial Intelligence in Pharo*, 283–294. doi: https://doi.org/10.1007/978-1-4842-5384-7_14