

Пащенко Тетяна Павлівна (кандидат технічних наук, доцент)

Чернега Володимир Миколайович (кандидат технічних наук, доцент)

Хорошилова Світлана Йосипівна

Національний університет оборони України, Київ, Україна

МЕТОДИКА ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ЩОДО ВИБОРУ НАПРЯМУ РОЗМІНУВАННЯ НА ОСНОВІ МЕТОДА АНАЛІЗУ ІЄРАРХІЙ

Унаслідок збройної агресії російської федерації проти України майже третина загальної площі України є потенційно небезпечними територіями через забруднення вибухонебезпечними предметами. Водночас, таке бачення не є остаточним, оскільки тривають активні бойові дії. Зазначене призвело до низки проблем. Зокрема, одна з наймасштабніших і довготривалих проблем – очищення території, де велися бойові дії, від вибухонебезпечних предметів. Суперечливість вимог, неоднозначність ситуації, порівнювання та оцінювання варіантів дій за численними критеріями, помилки у виборі пріоритетів й індивідуальні переваги посадових осіб, які приймають рішення, ускладнюють процес ухвалення обґрунтованих рішень, зокрема, для вибору найефективнішого методу проведення робіт із розмінування території, забрудненої вибухонебезпечними предметами. Метод аналізу ієрархій є одним із найбільш ефективних методів багатокритеріального аналізу, що дає змогу структурувати складні проблеми та приймати обґрунтовані рішення. Враховуючи означене, метою статті є розроблення методики прийняття рішення щодо вибору напрямку розмінування на основі методу аналізу ієрархії для обрання найкращого метода(ів) проведення робіт з очищення забрудненої території вибухонебезпечними предметами. У межах дослідження, на прикладі задачі вибору варіанта напрямку розмінування, проаналізовано основні етапи реалізації запропонованої методики, включно із формулюванням ієрархії проблеми, визначенням критеріїв, відповідних підкритеріїв та альтернатив (варіантів дій), оцінюванням важливості критеріїв (підкритеріїв) за допомогою методу парних порівнянь, а також – обчисленням пріоритетів альтернативних рішень. У результаті дослідження встановлено, що методика прийняття рішень на основі методу аналізу ієрархії підвищує обґрунтованість управлінських рішень у протимінній діяльності, забезпечує збалансований підхід до оцінки альтернатив та сприяє більш ефективному використанню наявних ресурсів. Методика дає змогу враховувати кількісні та якісні аспекти прийняття рішень, що є особливо важливим у контексті ускладнених та небезпечних умов, пов'язаних із розмінуванням. Запропоновану методика прийняття рішення на основі методу аналізу ієрархії щодо вибору найкращого напрямку проведення робіт з розмінування пропонується застосовувати в органах військового управління під час планування заходів гуманітарного розмінування, що сприятиме підвищенню безпеки, зменшенню ризиків та оптимізації використання ресурсів щодо очищення територій, забруднених вибухонебезпечними предметами.

Ключові слова: вибухонебезпечні предмети, гуманітарне розмінування, метод аналізу ієрархій, багатокритеріальна задача вибору, експерт, модель, альтернативи, критерії, прийняття рішення.

Вступ

Постановка проблеми. Сьогодні, внаслідок збройної агресії російської федерації (далі – рф) проти України, яка розпочалася з 2014 року, а з 24 лютого 2022 року переросла до повномасштабного вторгнення, Україна набула статусу однієї з найзабрудненіших вибухонебезпечними предметами країн світу. Згідно із законодавством України, вибухонебезпечними предметами називають будь-які боєприпаси, що містять вибухові речовини, матеріали ядерного ділення або ядерного синтезу, а також біологічні та хімічні речовини [1]. Станом на квітень 2024 року, за даними Державної служби з надзвичайних

ситуацій України (далі – ДСНС України) майже третина загальної площі України, є забрудненими територіями. Водночас такий висновок не є остаточним, оскільки тривають активні бойові дії [2–4]. Зазначене негативно впливає, як на безпеку та життєдіяльність цивільного населення, так і на повноцінне відновлення і розвиток громад на забруднених територіях, соціально-економічний розвиток регіонів й держави в цілому, що призвело до низки проблем. Одна з найбільш масштабних і довготривалих проблем – очищення територій, на яких велися бойові дії від вибухонебезпечних предметів.

Згідно Закону України «Про протимінну діяльність в Україні» гуманітарне розмінування

являє собою комплекс заходів, що проводяться операторами протимінної діяльності з метою ліквідації небезпек, пов'язаних із вибухонебезпечними предметами, включно із нетехнічним і технічним обстеженням територій, складенням карт, виявленню, знешкодженню та (або) знищенню вибухонебезпечних предметів, маркуванню, підготовкою документації після розмінування, наданням громадам інформації щодо протимінної діяльності та передачею очищеної території [1]. Для виконання заходів гуманітарного розмінування на звільнених територіях підрозділами ДСНС України, що безпосередньо виконують розмінування, можуть використовуватися різні напрями проведення робіт з очищення, а саме: розмінування вручну, використання детекторів металу, тренуваних собак або шурів, дронів, роботів, спеціалізованих машин розмінування та їх комбінування [5; 6]. Вибір напрямку розмінування залежить від типу та масштабу забруднення, територіально-географічної обстановки, доступних ресурсів і технологій тощо.

Під час розгляду планування завдань із гуманітарного розмінування перед особою, яка приймає рішення (далі – ОПР) виникає безліч проблемних ситуацій, що потребують вибору найоптимальнішого рішення. Змістовність і якість рішень, що приймаються визначаються сукупністю переваг, притаманних кожній ОПР. Під час вибору альтернативи доводиться враховувати вхідну інформацію, значну кількість суперечливих вимог, порівнювати та оцінювати варіанти дій за багатьма критеріями. Зокрема, суперечливість вимог, неоднозначність ситуацій, помилки у виборі пріоритетів сильно ускладнюють прийняття рішення щодо вибору найкращого напрямку проведення робіт із розмінування конкретної ділянки території. Саме тому виникає актуальне наукове завдання стосовно розроблення методики прийняття рішень на основі багатокритеріальних методів для вибору найкращого варіанта дій.

Для багатокритеріального прийняття рішень використовуються методи експертного оцінювання, зокрема, метод аналізу ієрархій (далі – МАІ), розроблений американським математиком і теоретиком прийняття рішень Томасом Л. Сааті [7; 8]. МАІ – математичний інструмент, орієнтований на системний підхід щодо вирішення складних проблем, пов'язаних із задачею прийняття рішення. Метод допомагає ОПР, обрати таке рішення, що найкраще відповідає цілям та його розумінню проблеми. МАІ дає змогу користувачу включати в модель ієрархії всі основні деталі по проблемі, що розглядається, і, водночас, використовувати для аналізу проблеми досить простий математичний апарат та проводити аналіз з урахуванням складних, різноманітних структурних і функціональних зв'язків моделі. Метод аналізу ієрархій є ефективнішим за інші методи прийняття

рішень, оскільки дає змогу групі різних за своїм профілем фахівців (наприклад, експерти, інженери-консультанти з питань очищення території від вибухонебезпечних предметів тощо) взаємодіяти з певної проблеми, модифікувати свої погляди, інтегрувати окремі судження стосовно поданих альтернатив і, в кінцевому підсумку, досягти найбільш ефективного рішення (найкращого) завдяки визначенню числових пріоритетів для кожної з альтернатив.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Томас Л. Сааті є відомим і найвпливовішим ученим у галузі МАІ, оскільки саме він заклав основи методу та активно просував його у науковому та прикладному середовищі. Багато наукових статей, книг та інших матеріалів присвячено методології, застосуванню та вдосконаленню МАІ. Відомі дослідники, окрім Сааті, які зробили внесок у розвиток і вдосконалення методу – Луїс Г. Варгас, Ернест Форман тощо. Були проведені численні дослідження щодо застосування МАІ для прийняття управлінських рішень у різних галузях, таких як економіка, бізнес, управління проектами, медицина, прогнозування, планування, освіта тощо. Зокрема, у своїх публікаціях дослідженню застосування МАІ надавали увагу М. Г. Бадюл, В. А. Крамаренко [9] – у будівництві; Х. Б. Кульчицька, Л. С. Предко [10] – у поліграфії; О. В. Трунова [11] – у виборі інвестиційного проекту в промисловості, М. Т. Фісун, І. О. Кандиба, Г. В. Горбань, М. В. Фаленкова [12] – у виборі засобів розробки синтаксичних аналізаторів у процесі створення мов програмування (DSL). Питаннями теоретичних аспектів прийняття рішень в органах військового управління займалися В. І. Ткаченко, Є. Б. Смірнов [13], А. І. Сбітнев [14] та інші вітчизняні фахівці.

Питання щодо ефективності виконання заходів протимінної діяльності під час розмінування досліджували М. М. Підгородецький, М. В. Комісаров [15], О. Й. Мацько, В. В. Коваль [16] та інші. Питання щодо оцінювання рівня мінної небезпеки в районах забруднених вибухонебезпечними предметами досліджували В. І. Коцюруба, І. В. Черних [17] та інші.

Отже, проведений аналіз публікацій свідчить про наявність досліджень теоретичного обґрунтування та практичного застосування багатокритеріальних методів прийняття рішень під час вибору найкращого варіанта дій. Проте публікації, які б розглядали підходи до застосування, зокрема МАІ, для прийняття рішень у контексті гуманітарного розмінування, наразі відсутні.

Метою статті є розроблення методики прийняття рішення щодо вибору напрямку розмінування на основі методу аналізу ієрархій для обрання найкращого методу(ів) проведення робіт з очищення забрудненої території вибухонебезпечними предметами.

Виклад основного матеріалу дослідження

Прийняття рішення – означає деякий вибір із безлічі альтернатив, який максимально буде сприяти досягненню поставленої мети завдання. Вибір засновано на порівнянні та оцінюванні варіантів дій. Зокрема, перед виконанням робіт з очищення конкретної ділянки території проводиться аналіз, де попередньо вибирають оптимальний варіант дій з альтернативних. Це дає змогу з'ясувати, які методи проведення робіт з розмінування потрібно залишити для подальшого детального розгляду, і навести переконливі причини відхилення інших методів. Переважно такі завдання є багатокритеріальними та можуть містити чинники різної розмірності, а саме: вартість, часові межі, географія території, ресурси, ризики та безпека тощо. Тому будь-який вибір з урахуванням різних критеріїв оцінювання завжди пов'язаний з певними труднощами для особи, яка приймає рішення. Для розв'язання таких задач недостатньо практичного досвіду та інтуїції ОПР, тому для отримання оптимальних рішень потрібно застосовувати методи прийняття рішень, орієнтовані на визначенні найкращих варіантів дій з безлічі альтернатив.

Постановка задачі вибору варіанта дій на основі МАІ є наближеною до задач прийняття рішення, що виникають у реальних ситуаціях. Припустимо, що A_1, A_2, \dots, A_n – множина альтернатив; K_1, K_2, \dots, K_m – критерії, за якими оцінюється кожна з альтернатив. Потрібно зробити найкращий вибір серед альтернатив.

Отже, математичні основи МАІ, зокрема, використання власного вектора матриці попарних порівнянь як вектора пріоритетів, дають змогу застосовувати цей метод для вирішення складних завдань з вибору найкращої альтернативи. З метою вирішення наведених вище проблемних питань авторами запропоновано методика прийняття рішень на основі МАІ для вибору найкращого напрямку проведення робіт з розмінування забрудненої території вибухонебезпечними предметами, що містить шість кроків.

1. *Окреслюється проблема і визначається мета дослідження.*

2. *Декомпозиція подання задачі вибору в формі ієрархічної структури, що відображає проблему.* Кожен елемент ієрархії має наводити різні фактори, які потрібно взяти до уваги під час вибору альтернативи. Такі фактори можуть бути різного характеру, наприклад кількісні та якісні характеристики, експертні оцінки тощо. Пропонується розглядати домінуючу ієрархію, що будується з вершини (мета – перший рівень ієрархії) через проміжні рівні (критерії – кількісна або якісна характеристика, що є істотною для судження про об'єкт дослідження) до найнижчого рівня ієрархії, який є переліком альтернатив (варіанти дій). Ієрархія вважається повною, якщо кожен елемент заданого рівня пов'язаний з усіма елементами наступного рівня.

3. *Визначення пріоритетів елементів ієрархічної структури.* За допомогою методу парних порівнянь визначаються пріоритети, що відображають відносну важливість або перевагу елементів структури. Для цього будуються матриці парних порівнянь, які містять судження експерта стосовно важливості елементів. Матриці парних порівнянь будуються для всіх елементів рівня, що розташовані вище. Загальний вигляд матриці парних порівнянь наведено у таблиці 1.

Таблиця 1

Матриця парних порівнянь

Елементи, що порівнюються	A_1	A_2	...	A_n
A_1	a_{11}	a_{12}	...	a_{1n}
A_2	a_{21}	a_{22}	...	a_{2n}
...
A_n	a_{n1}	a_{n2}	...	a_{nn}

Для оцінювання елементів (A_i) матриці парних порівнянь використовується шкала відносної важливості (таблиця 2), що надає експерту можливість ставити у відповідність ступеням переваги одного елемента перед іншим – деяке число [7; 8; 18].

Таблиця 2

Шкала відносної важливості (шкала Т. Сааті) [7; 8; 18]

Оцінка відносної важливості	Визначення	Пояснення
1	Однакова важливість	Обидва елементи роблять однаковий вклад
3	Один елемент незначним чином важливіший за інший	Досвід дає змогу поставити один елемент трохи вище за другий
5	Суттєва перевага	Відчутна перевага одного елемента над іншим
7	Значна перевага	Практично значна перевага одного елемента над іншим
9	Абсолютна перевага одного над іншим	Домінування одного елемента над іншим (очевидна перевага)
2, 4, 6, 8	Проміжні оцінки між двома сусідніми судженнями	Застосовуються в компромісному випадку
Зворотні величини чисел, наведених вище	Значення симетричних елементів матриці	Використовується для оцінки не переважаючих елементів

Під час побудови матриць методом парних порівнянь порівнюється відносна важливість лівих елементів матриці з елементами вгорі. Отже, якщо елемент зліва важливіший за елемент вгорі, то в клітинку (i, j) матриці парних порівнянь заносять позитивне ціле число (a_{ij}) в інтервалі від 1 до 9, якщо навпаки – дробове (1/a_{ij}). Відносна важливість будь якого елемента матриці, що порівнюється сам із собою, дорівнює одиниці.

У тих випадках, коли важко розрізнити скільки є проміжних градацій від абсолютної до слабкої переваги або цього не потрібно в конкретній задачі вибору, може використовуватися шкала з меншою кількістю градацій. Гранично шкала вибору градацій має дві оцінки: 1 – елементи рівнозначні; 2 – перевага одного елемента над іншим. За умови залучення для оцінювання пріоритетів елементів ієрархічної структури групи з R експертів числове значення судження визначається як середнє геометричне окремих суджень експертів:

$$a_{ij} = R \sqrt[R]{\prod_{k=1}^R a_{ijk}}$$

де a_{ijk} – оцінка судження k-го експерта.

Призначення експертів проводиться відповідно до їх компетентності у питаннях, що розглядаються, рівня посади, стажу роботи тощо.

4. *Визначення векторів локальних пріоритетів для кожної матриці парних порівнянь та оцінювання узгодженості (однорідності) суджень експертів.* Пріоритети – це числа, що пов'язані з елементами ієрархії структури та відображають відносні переваги (ваги) елементів у кожній групі. Пріоритети безрозмірні величини, які можуть отримувати значення від 0 до 1. Чим більше величина пріоритету, тим більш переважним є відповідний йому елемент. Пріоритет елемента ієрархії мети по визначенню відповідає 1. Сума усіх пріоритетів елементів на одному рівні ієрархії – 1.

Вектор локальних пріоритетів характеризує відносний вплив множини елементів нижчого рівня ієрархії на елемент вищого рівня. Вектор локальних пріоритетів визначається як середнє геометричне рядків матриці попарних порівнянь з

подальшою нормалізацією всіх складових отриманого вектору за виразом:

$$W_i = \frac{\sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}}}{\sum_{i=1}^n \left(\sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}} \right)}, \quad (1)$$

де a_{ij} – i-й елемент j-го стовпця матриці парних порівнянь;

n – кількість елементів, які порівнюються.

Ідеально узгодженої матриці парних порівнянь не існує, тому потрібне оцінювання допустимості похибки. Значення узгодженості оцінок експерта розраховується на основі таких показників:

розмірність матриці парних порівнянь (n);

максимальне власне значення матриці парних порівнянь (λ_{max});

індекс узгодженості (однорідності) матриці парних порівнянь (далі – ІУ);

співвідношення узгодженості матриці парних порівнянь (далі – СУ).

Максимальне власне значення матриці парних порівнянь визначається за виразом:

$$\lambda_{max} = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^n a_{ijk} \times W_i \right). \quad (2)$$

де W_i – локальні пріоритети.

Для оцінювання узгодженості суджень експертів використовується відхилення максимального власного значення матриці парних порівнянь від розмірності матриці. Чим ближче λ_{max} до n, тим узгодженішою є матриця парних порівнянь.

Показник співвідношення узгодженості визначається за виразом:

$$СУ = \frac{ІУ}{СВУ}, \quad (3)$$

де СВУ – середня випадкова узгодженість, значення якої залежно від розміру матриці парних порівнянь вибирається з таблиці 3;

ІУ – індекс узгодженості, що розраховується за виразом:

$$ІУ = \frac{\lambda_{max} - n}{СВУ}. \quad (4)$$

Таблиця 3

Значення показника середньої випадкової узгодженості залежно від розміру матриці [7; 8; 18]

Розмір матриці	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Середня випадкова узгодженість	0	0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Показник співвідношення узгодженості допомагає зрозуміти чи є порушення числової і транзитивної узгодженості. Якщо отримане значення співвідношення узгодженості менше 0,1 (або 10%), то рівень узгодженості суджень експертів вважається допустимим. У зворотному випадку, оцінки суджень експертів під час заповнення матриці парних порівнянь необхідно поліпшити (тобто перевірити судження у ході заповнення матриць парних порівнянь). Якщо ця

міра не дає потрібного результату, то варто почати спробу більш точного структурування задачі (групування аналогічних елементів під більш значущими критеріями – повернення до кроку 2).

Кроки 3 та 4 методики виконуються для всіх рівнів і груп в ієрархії структури.

5. *Синтез пріоритетів елементів ієрархії.* В результаті процедури синтезу обчислюються пріоритети альтернативних рішень щодо головної мети задачі. Здійснюється ієрархічний синтез для

зважування власних векторів вагами критеріїв і розраховується сума по всіх відповідних зважених компонентах власних векторів рівня ієрархії, який розміщений нижче. Локальні пріоритети збільшуються на пріоритет відповідного критерію на наступному вищому рівні та підсумовуються по кожному елементу відповідно до критеріїв, на які впливає цей елемент. У такий спосіб формується складений або глобальний пріоритет цього елемента, що потім використовується для зважування локальних пріоритетів розташованих рівнем нижче і порівнюваних стосовно нього як до критерію. Процедура продовжується до самого нижнього рівня.

6. *Прийняття рішення.* Здійснюється порівняння результатів оцінювання пріоритетності альтернатив та визначення найкращого варіанта дій з урахуванням встановлених критеріїв та їх ваг.

Отже, математичний апарат методики дає змогу оцінювати пріоритети елементів ієрархічної структури моделі для вибору найкращого варіанта дій з безлічі альтернатив та може стати базовим у процесі створення систем підтримки прийняття рішень, що допомагають зменшити ризики прийняття не обґрунтованих рішень та негативні наслідки від прийняття таких рішень.

Авторами наведено використання методики прийняття рішення на основі МАІ на прикладі задачі вибору найкращого варіанта методу проведення робіт з розмінування забрудненої території вибухонебезпечними предметами, враховуючи різні аспекти, що впливають на безпеку та ефективність очищення.

Постановка задачі вибору. Припустимо є три варіанта напрямів проведення робіт з

розмінування забрудненої ділянки території вибухонебезпечними предметами. Потрібно вибрати найкращий варіант рішення щодо безпечного та ефективного розмінування за критеріями – ефективність і вартість.

Вхідними даними задачі є:

Критерії (Підкритерії). Привабливість кожного метода проведення робіт із розмінування буде оцінюватися відносно двох критеріїв – ефективність, вартість та шести відповідних підкритеріїв – точність і надійність; часові рамки; ефективне використання ресурсів; мінімізація ризиків і небезпек; вартість обладнання та технологій; трудомісткість робіт.

Альтернативи. Припустимо, що альтернативні варіанти методів проведення робіт із розмінування конкретної ділянки забрудненої території для задачі визначені, як «Варіант № 1», «Варіант № 2» і «Варіант № 3».

Побудова ієрархічної моделі задачі вибору та виявлення зв'язків між її складовими допомагає проаналізувати всі аспекти проблеми та глибше вникнути до суті обраної задачі. Слід відмітити, що в методиці прийняття рішення на основі МАІ для вибору найкращого методу проведення робіт з розмінування забрудненої території вибухонебезпечними предметами не існує єдиного підходу до побудови ієрархії проблеми, тому будь-яка ієрархічна модель відображає суб'єктивний погляд на проблему особи, що приймає рішення. На рисунку 1 наведена домінуюча ієрархічна модель прийняття рішення для вибору найкращого методу проведення робіт із розмінування, яка складається з чотирьох рівнів.

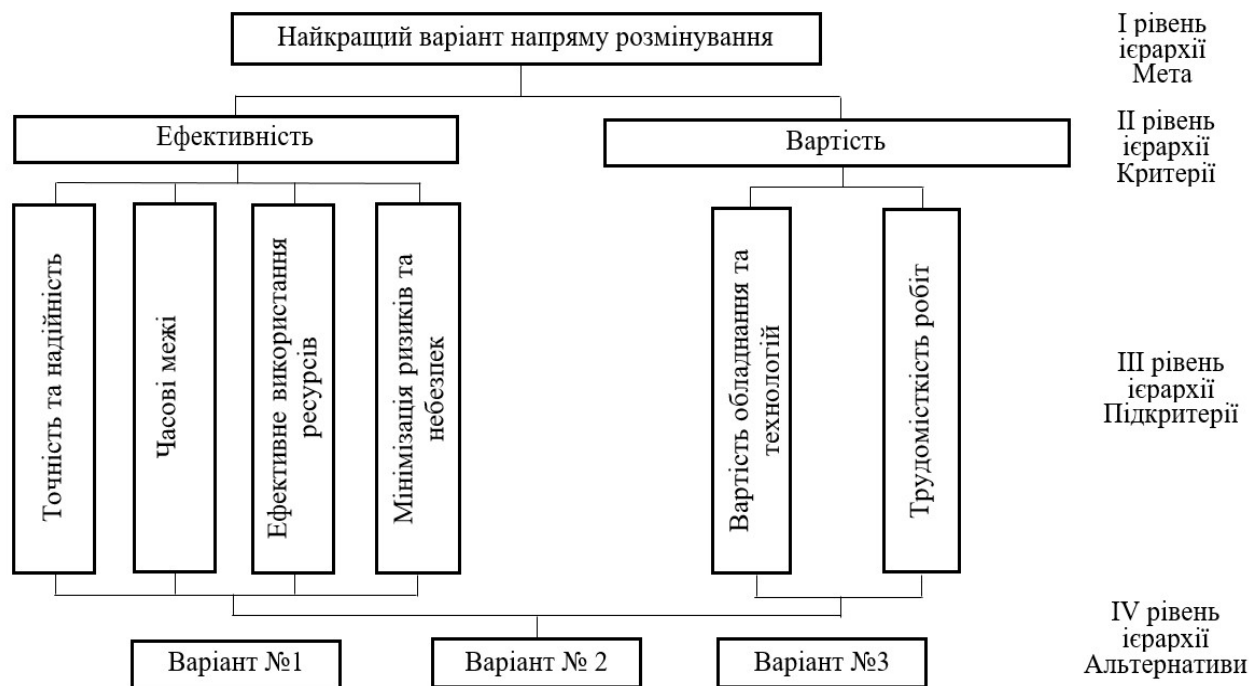


Рисунок 1 – Ієрархічна модель прийняття рішення для вибору найкращого напрямку розмінування

I-й рівень ієрархії. Мета – прийняття компромісного рішення стосовно напряму проведення робіт із розмінування, що найкраще підходить для факторів і типів вибухонебезпечних предметів конкретної ділянки території.

II-й рівень ієрархії. Критерії:

ефективність – визначає, наскільки ефективно кожен варіант рішення розв'язує поставлену задачу вибору;

вартість – визначає, вартість реалізації кожного варіанту рішення.

III-й рівень ієрархії. Підкритерії:

точність і надійність – визначає, наскільки точно та надійно кожен варіант рішення дає змогу виявити та знищити вибухонебезпечні предмети;

часові межі – визначає, наскільки швидко та ефективно кожен варіант рішення дає змогу досягти поставлених цілей розмінування в максимально короткий час;

ефективне використання ресурсів – визначає, наскільки ефективно використовуються різні ресурси, такі як персонал, обладнання, матеріали та фінансові засоби, для реалізації кожного варіанту рішення;

мінімізація ризиків і небезпек – визначає, наскільки кожен варіант рішення дає змогу мінімізувати ризики і небезпеки для персоналу та місцевого населення під час проведення операцій розмінування;

вартість обладнання та технологій – містить витрати на придбання потрібного обладнання для розмінування, такого як детектори мін, ручні та механізовані засоби розмінування, захисне обладнання, вибухові заряди, спеціальне обладнання для виявлення й руйнування мін тощо;

трудомісткість робіт – вартість праці та робочої сили, потрібної для виконання розмінування. Чим більше людей або робочих годин знадобиться для завершення операції, тим вищою є вартість розмінування.

IV-й рівень ієрархії. Альтернативи, серед яких здійснюється вибір – пропозиції напрямів проведення робіт із розмінування, що підходять для факторів і типів вибухонебезпечних предметів й забезпечують досягнення мети за показниками («Варіант № 1», «Варіант № 2», «Варіант № 3»).

Слід зауважити, що наведена модель ієрархії задачі вибору, призначена лише для ілюстрації можливостей запропонованої методики прийняття рішення на основі МАІ і тому є досить, узагальненою. За потреби ієрархічна структура задачі може бути уточнена і деталізована за бажанням ОПР (користувача).

Після побудови ієрархії моделі, для визначення пріоритетів, що відображають відносну важливість або перевагу елементів на кожному рівні ієрархічної моделі будуються матриці парних порівнянь для всіх елементів нижнього рівня, що відносяться до відповідного елемента вищого рівня. Для ієрархічної моделі задачі (рис. 1) будуються дев'ять матриць парних порівнянь, а саме: одна матриця для II-го рівня, дві – для III-го

рівня, шість – для IV-го рівня ієрархії. Матриці заповнюються оцінками попарних порівнянь елементів, симетричних відносно головної діагоналі, що відображають кожне судження експерта (табл. 2). Чим більша величина пріоритету, тим значущішим є відповідний елемент.

У табл. 4 наведено приклад заповнення матриці парних порівнянь, що формується зі значень парних порівнянь критеріїв на II-му рівні ієрархії щодо загальної мети, розташованої на I-му рівні.

Таблиця 4

Матриця парних порівнянь для елементів II рівня ієрархії

Мета задачі вибору	Ефективність	Вартість
Ефективність	1	1
Вартість	1	1

Число 1 у першому рядку і другому стовпчику таблиці означає, що з погляду експерта, критерії «Ефективність» і «Вартість» рівнозначно впливають на досягнення головної мети.

Для матриці парних порівнянь II-го рівня ієрархії, визначаються локальні пріоритети (W_i), за формулою (1). У результаті обчислень локальні пріоритети для критеріїв «Ефективність» і «Вартість», відповідно:

$$W_1 = (1 * 1)^{1/2} / 2 = 0,500;$$

$$W_2 = (1 * 1)^{1/2} / 2 = 0,500.$$

Для перевірки матриці попарних порівнянь на узгодженість (несуперечливість) суджень потрібно розрахувати показники, що відповідають за узгодженість матриці, а саме:

максимальне власне значення матриці (λ_{max});

індекс узгодженості (ІУ);

співвідношення узгодженості (СУ).

За виразом (2) розраховується максимальне власне значення матриці:

$$\lambda_{max} = 2,000$$

Розмір матриці (n) для II-го рівня ієрархії дорівнює 2.

За формулою (4) визначається індекс узгодженості:

$$ІУ = 0 / 1 = 0$$

Для визначення співвідношення узгодженості порівнюється індекс узгодженості зі значенням середньої випадкової узгодженості матриці того ж розміру. Значення СВУ було отримане з таблиці 3. У результаті обчислень за виразом (3) співвідношення узгодженості дорівнює 0. Отримане значення співвідношення узгодженості дає змогу стверджувати про узгодженість (несуперечливість) суджень експертів. Аналогічно визначаються вектори локальних пріоритетів та оцінки узгодженості суджень експертів для матриць парних порівнянь III-го рівня ієрархії. Вага кожної складової визначається на основі оцінок експертів.

Матриці парних порівнянь для III-го рівня ієрархії з отриманими результатами розрахунків локальних пріоритетів подано у таблиці 5.

Матриці парних порівнянь та вектори локальних пріоритетів для елементів III рівня ієрархії

Ефективність	Матриця парних порівнянь				Вектор пріоритетів (W_i)	Вартість	Матриця парних порівнянь		Вектор пріоритетів (W_i)
	Точність та надійність	Часові межі	Ефективне використання ресурсів	Мінімізація ризиків та небезпек			Вартість обладнання та технологій	Трудомісткість робіт	
Точність та надійність	1	1	1	1/3	0,186	Вартість обладнання та технологій	1	1/5	0,167
Часові межі	1	1	1	1	0,245	Трудомісткість робіт	5	1	2,236
Ефективне використання ресурсів	1	1	1	1	0,245	Розмір матриці ($n = 2$)	Власне значення матриці (λ_{max})		2,000
Мінімізація ризиків та небезпек	3	1	1	1	0,323		Індекс узгодженості (IY)		0,000
Розмір матриці ($n = 4$)	Власне значення матриці (λ_{max})				4,158		Співвідношення узгодженості (CY)		0,000(0%)
	Індекс узгодженості (IY)				0,053				
	Співвідношення узгодженості (CY)				0,058 (5,68 %)				

Матриці парних порівнянь для IV-го рівня ієрархії мають розмірність $n = 3$, що збігається з кількістю варіантів рішень, а кількість матриць відповідає кількості підкритеріїв, за яким порівнюються ці варіанти. Величини відносної важливості кожного варіанта рішень відносно

кожного підкритерію визначаються аналогічно як для вищих рівнів ієрархії моделі.

Матриці парних порівнянь для IV-го рівня ієрархії з отриманими результатами розрахунків локальних пріоритетів альтернатив відносно кожного із підкритеріїв наведено в таблиці 6.

Таблиця 6

Матриці парних порівнянь та вектори локальних пріоритетів для елементів IV рівня ієрархії

Точність та надійність	Варіант №1	Варіант №2	Варіант №3	Вектор пріоритетів (W_i)	Часові межі	Варіант №1	Варіант №2	Варіант №3	Вектор пріоритетів (W_i)
	Варіант №1	1	1/3			1/3	0,143	Варіант №1	
Варіант №2	3	1	1	0,429	Варіант №2	3	1	1/2	0,340
Варіант №3	3	1	1	0,429	Варіант №3	3	2	1	0,540
Розмір матриці ($n = 3$)	Власне значення матриці (λ_{max})			3,001	Розмір матриці ($n = 3$)	Власне значення матриці (λ_{max})			3,124
	Індекс узгодженості (IY)			0,001		Індекс узгодженості (IY)			0,062
	Співвідношення узгодженості (CY)			0,001		Співвідношення узгодженості (CY)			0,107
Ефективне використання ресурсів	Варіант №1	Варіант №2	Варіант №3	Вектор пріоритетів (W_i)	Мінімізація ризиків та небезпек	Варіант №1	Варіант №2	Варіант №3	Вектор пріоритетів (W_i)
Варіант №1	1	1/3	1/3			0,143	Варіант №1	1	
Варіант №2	3	1	1	0,429	Варіант №2	2	1	1	0,387
Варіант №3	3	1	1	0,429	Варіант №3	3	1	1	0,443
Розмір матриці ($n = 3$)	Власне значення матриці (λ_{max})			3,001	Розмір матриці ($n = 3$)	Власне значення матриці (λ_{max})			3,018
	Індекс узгодженості (IY)			0,001		Індекс узгодженості (IY)			0,009
	Співвідношення узгодженості (CY)			0,001		Співвідношення узгодженості (CY)			0,016

Вартість обладнання та технологій	Варіант №1	Варіант №2	Варіант №3	Вектор пріоритетів (W _i)	Трудомісткість робіт	Варіант 1	Варіант 2	Варіант 3	Вектор пріоритетів (W _i)
Варіант №1	1	2	2	0,500	Варіант 1	1	1/5	1/5	0,091
Варіант №2	1/2	1	1	0,250	Варіант 2	5	1	1	0,455
Варіант №3	1/2	1	1	0,250	Варіант 3	5	1	1	0,455
Розмір матриці (n = 3)	Власне значення матриці (λ _{max})			3,000	Розмір матриці (n = 3)	Власне значення матриці (λ _{max})			3,001
	Індекс узгодженості (ІУ)			0,000		Індекс узгодженості (ІУ)			0,001
	Співвідношення узгодженості (СУ)			0,000		Співвідношення узгодженості (СУ)			0,001

На кінцевому кроці розв'язання задачі вибору варіанта рішення виконується синтез (лінійна згортка) пріоритетів на ієрархії моделі. Загальна оцінка пріоритетності альтернатив обчислюється шляхом множення векторів пріоритетів нижчого

рівня за кожним підкритерієм на вектор пріоритетів III-го та вектор пріоритетів II-го рівня ієрархії, потім результати складаються уздовж кожного рядка. Отже, вектор глобальних пріоритетів є добутком матриць:

$$\begin{pmatrix} 0,143 & 0,143 & 0,143 & 0,169 & 0,500 & 0,091 \\ 0,429 & 0,340 & 0,429 & 0,387 & 0,250 & 0,455 \\ 0,429 & 0,540 & 0,429 & 0,443 & 0,250 & 0,455 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0,141 \\ 0,064 \\ 0,141 \\ 0,156 \\ 0,334 \\ 0,167 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,258 \\ 0,363 \\ 0,384 \end{pmatrix}.$$

Кращою вважається альтернатива з найбільшим значенням компоненти вектора глобального пріоритету. Отже, на підставі отриманих результатів глобальних пріоритетів здійснюється вибір варіанта рішення, який найкраще відповідає визначеним цілям і критеріям прийняття рішення. У результаті розв'язання задачі отримано найбільше значення компоненти вектора глобальних пріоритетів – 0,384 для «Варіант №3». Цей варіант рішення є найкращим під час вибору напряму проведення робіт з очищення (розмінування) конкретної ділянки забрудненої території вибухонебезпечними предметами, а «Варіант №1» – не рекомендується для використання.

Висновки й перспективи подальших досліджень

Отже, у статті авторським колективом проаналізовано сутність методу аналізу ієрархій, розглянуто особливості його застосування як інструменту прийняття рішення для розв'язування багатокритеріальних задач вибору. Розроблена методика дає змогу визначати критерії для оцінювання кожного варіанта рішення щодо вибору напряму розмінування окремо, розподіляти їх за рівнем ієрархії проблеми з урахуванням їх важливості під час вибору, а також визначати вплив кожного критерію на підсумковий результат.

Узгодження результатів (суджень) експертного оцінювання матриць парних порівнянь у запропонованій методиці проведено за допомогою

показника відношення узгодженості. Для досягнення високої точності результатів, величина співвідношення узгодженості має бути менше 0,1 (або 10%). Якщо співвідношення узгодженості виходить за ці межі, то експертам потрібно додатково досліджувати задачу вибору та перевіряти свої судження під час заповнення матриць парних порівнянь. Це дало змогу виключити помилки в оцінках експертів.

Доведено, що використання методики прийняття рішень на основі методу аналізу ієрархій дасть змогу приймати більш обґрунтовані управлінські рішення, зокрема у сфері протиміної діяльності. У контексті гуманітарного розмінування, запропонована методика прийняття рішень на основі методу аналізу ієрархій є універсальною. Вона може бути застосована для оцінювання різних аспектів операцій, а саме:

пріоритетність розмінування різних територій на основі їхнього потенційного ризику та важливості;

оцінювання ефективності різних методів проведення робіт із розмінування та їх вартості;

визначення пріоритетів у використанні ресурсів, таких як роботизовані системи чи спеціалізоване обладнання.

Отже, запропонована методика прийняття рішення на основі методу аналізу ієрархій для вибору найкращого напряму проведення робіт із розмінування забрудненої ділянки території вибухонебезпечними предметами розкриває можливості метода аналізу ієрархій та може бути

реалізована за допомогою будь-якої сучасної мови програмування (наприклад, Python), як програмний продукт підтримки прийняття рішення, який дає змогу особі, яка приймає рішення, визначити найоптимальніший варіант вибору альтернативи та скоротити час на проведення аналізу. Крім цього, наведена методика може бути реалізована, як частина

інформаційної системи та використовуватись у складі модуля прийняття рішень під час планування.

Перспективами подальших досліджень слід вважати впровадження в інформаційні системи підтримки прийняття рішень в органах військового управління.

Список бібліографічних посилань

1. Про протимінну діяльність в Україні: Закон України від 25.04.2019 № 2706-VIII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2642-19#Text/> (дата звернення: 31.05.2024).
 2. Майже половину території України потрібно розмінувати внаслідок війни – ДСНС. 2022. URL: <https://cutt.ly/o9wUsfe>.
 3. Україна – одна з найбільш замінованих країн світу. Що з цим робити? 2022. URL: <https://www.bbc.com/ukrainian/features-61080365> (дата звернення: 31.05.2024).
 4. Скільки території України потребує розмінування. 2022. URL: <http://surl.li/dnrvdq> (дата звернення: 31.05.2024).
 5. Напрямки розмінування які застосовуються в системі ДСНС. 2024. URL: <http://surl.li/sgzmts> (дата звернення: 31.05.2024).
 6. Методики розмінування: різноманітність підходів до мінної загрози. 2023. URL: <http://surl.li/wnlzbt> (дата звернення: 31.05.2024).
 7. Saaty T. L. Multicriteria Decision Making: The Analytical Hierarchy Process. NewYork: McGraw Hill, 1990. 502 p.
 8. Saaty T. L. The Analytic Network Process. RWS Publications. Pittsburgh, 1996. 370 p.
 9. Бадюл М. Г., Крамаренко В. А. Застосування методу аналізу ієрархій у проєктуванні та будівництві. Будівництво, матеріалознавство, машинобудування. 2013. Вип. 70. С. 27–35.
 10. Кульчицька Х. Б., Предко Л. С. Застосування методу аналізу ієрархій при виборі проєкту в поліграфії. Поліграфія і видавнича справа. 2018. № 1. С. 51–60.
 11. Трунова О. В. Застосування методу Сааті при прийнятті управлінських рішень. Вісник Чернігівського національного педагогічного університету. Педагогічні науки. 2013. Вип. 108.1. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VchdpuP_2013_1_108_34 (дата

звернення: 31.05.2024).
 12. Фісун М. Т., Кандиба І. О., Горбань Г. В., Фаленкова М. В. Використання методу аналізу ієрархій для вибору засобів розробки синтаксичних аналізаторів при створенні DSL. Наукові праці ВНТУ. 2021. № 1. URL: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/628/590> (дата звернення: 31.05.2024).
 13. Теорія прийняття рішень органами військового управління: монографія / Ткаченко В. І., Смірнов Є. Б. та ін. Харків : ХУПС, 2008. 545 с.
 14. Сбігнєв А. І. Прийняття рішень в умовах багатокритеріальності. Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. 2008. № 2(2). С. 26–29.
 15. Комісаров М. В., Підгородецький М. М. Методика оцінювання ефективності виконання заходів протимінної діяльності. Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. 2022. № 1(43). С. 13–18. DOI:10.33099/2311-7249/2022-43-1-13-18.
 16. Мацько О.Й., Коваль В. В., Комісаров М. В. До питання визначення внеску факторів в ефективність виконання заходів протимінної діяльності в Україні. Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. 2021. № 3(44). С. 154–158. DOI: 10.30748/nipts.2021.44.18.
 17. Коцюруба В. І., Черних І. В., Малюга В. Г., Місюра О. М. Загальні питання до питання оцінювання рівня мінної небезпеки. Системи озброєння і військова техніка. 2019. № 3(59). С. 93–98. DOI: 10.30748/soivt.2019.59.12.
 18. Сучасні методи підтримки прийняття рішень: навчальний посібник / Микусь С. А., Солонніков В. Г., Крайнов В. О. та ін. Київ : НУОУ, 2020. 312 с.

METHODOLOGY FOR MAKING DECISIONS ON THE CHOICE OF DEMINING DIRECTION BASED ON THE ANALYTIC HIERARCHY PROCESS

Pashchenko Tetiana (Candidate of Technical Sciences, Associate Professor)

Cherneha Volodymyr (Candidate of Technical Sciences, Associate Professor)

Khoroshilova Svitlana

National Defence University of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Formulation of the problem in general As a result of the armed aggression of the russian federation against Ukraine, almost a third of the total area of Ukraine is potentially dangerous due to contamination with explosive devices. At the same time, this assessment is not final, as active hostilities continue. This has led to a number of problems. In particular, one of the largest and most long-term problems is the clearance of the territories where military operations were conducted from explosive objects. The contradictory requirements, ambiguity of situations, comparison and evaluation of action options by many criteria, mistakes in choosing priorities, and preferences inherent in each decision maker complicate the process of making an informed decision, in particular, to choose the best method of conducting work on the demining of contaminated territory with explosive objects. The analytic hierarchy process is one of the most effective methods of multicriteria analysis, which allows structuring complex problems and making informed decisions. Based on this, the purpose of the article is to develop a decision-making methodology for choosing a demining direction based on the hierarchy analysis method to select the best method(s) for conducting work on the clearance of a contaminated area from explosive ordnance.

Research methods. For multi-criteria decision-making, expert evaluation methods are used, in particular, the hierarchy analysis method.

Analysis of recent researches and publications. The study analyzes the main stages of implementation of the proposed methodology, including the formulation of the problem hierarchy, identification of criteria, relevant sub-criteria and alternatives (options), assessment of the importance of criteria (sub-criteria) using the method of pairwise comparisons, and calculation of priorities of alternative solutions, using the example of the task of choosing a demining direction.

Presenting the main material. The study found that the decision-making methodology based on the analytic hierarchy process increases the validity of management decisions in mine action, provides a balanced approach to evaluating alternatives and contributes to more efficient use of available resources. The methodology allows taking into account both quantitative and qualitative aspects of decision-making, which is especially important in the context of complex and dangerous conditions related to demining. The proposed decision-making methodology based on the hierarchy analysis method for choosing the best direction for demining is proposed to be used in military authorities when planning humanitarian demining activities, which will help to increase safety, reduce risks and optimize the use of resources for the clearance of contaminated areas with explosive objects.

Elements of scientific novelty. The article analyzes the essence of the hierarchy analysis method, considers the peculiarities of its application as a decision-making tool for solving multi-criteria selection problems.

Theoretical and practical significance of the article. The developed methodology makes it possible to determine the criteria for evaluating each decision option for choosing a demining direction separately, to distribute them according to the level of the problem hierarchy, taking into account their importance during the selection, and to determine the impact of each criterion on the final result. It is proved that the use of the decision-making methodology based on the hierarchy analysis method will allow making more informed management decisions, in particular in the field of mine action.

Conclusion and the perspectives of future researches. The proposed methodology for decision-making based on the hierarchy analysis method for choosing the best direction for carrying out work on demining a contaminated area of the territory with explosive objects reveals the capabilities of the hierarchy analysis method and can be implemented using any modern programming language as a decision support software product that allows the decision maker to determine the best option for choosing an alternative and reduce the time for analysis. In addition, this methodology can be implemented as part of an information system and used as part of a decision-making module during planning. Prospects for further research should be considered the implementation of decision support in information systems in military command and control.

Keywords: explosive ordnance, humanitarian demining, analytic hierarchy process, multicriteria selection problem, expert, model, alternatives, criteria, decision-making.

References

- 1. On Mine Action in Ukraine:** Law of Ukraine of 25 April 2019 № 2706-VIII [online]. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2642-19#Text/> [Accessed: 31 May 2024].
- 2. Almost half of Ukraine's territory needs to be demined as a result of war - SSES – SSES.** 2022 [online]. Available at: <https://cutt.ly/o9wUsfe> [Accessed: 31 May 2024].
- 3. Ukraine is one of the most mined countries in the world. What should be done about it?** (2022) [online]. Available at: <https://www.bbc.com/ukrainian/features-61080365>. [Accessed: 31 May 2024].
- 4. Skilky terytorii Ukrainy potrebuie rozminuvannia,** (2022) [online]. Available at: <http://surl.li/dnrvdq> [Accessed: 31 May 2024].
- 5. Areas of demining used in the system of the SES,** (2024) [online]. Available at: <http://surl.li/sgzmts> [Accessed: 31 May 2024].
- 6. Demining techniques: a variety of approaches to the mine threat,** (2023) [online]. Available at: <http://surl.li/wnlztb> [Accessed: 31 May 2024].
- 7. Saaty, T. L.,** (1990). *Multicriteria Decision Making: The Analytical Hierarchy Process.* New York: McGraw Hill, 502.
- 8. Saaty, T. L.** (1996). *The Analytic Network Process.* RWS Publications. Pittsburgh, 370.
- 9. Badiul, M. H., Kramarenko, V. A.,** (2013). Application of the hierarchy analysis method in design and construction. *Construction, materials science, mechanical engineering*, 70, 27-35.
- 10. Kulchytska, Kh. B., Predko, L. S.,** (2018). Application of the hierarchy analysis method when choosing a project in printing. *Printing and publishing*, 1, 51-60.
- 11. Trunova, O. V.,** (2013). Application of the Saaty method in managerial decision-making. *Bulletin of Chernihiv National Pedagogical University. Pedagogical sciences*, 108.1 [online]. Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VchdpuP_2013_1_108_34 [Accessed: 31 May 2024].
- 12. Fisun, M. T., Kandyba, I. O., Horban, H. V., Falenkova, M. V.,** (2021). The use of hierarchy analysis method for the choice of parsers development tools in DSL creation. *Scientific works of VNTU*, 1. [online]. Available at: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/628/590> [Accessed: 31 May 2024].
- 13. Tkachenko, V. I., Smirnov, Ye. B. ta in.,** (2008). *Decision Making Theory by Military Command and Control Bodies: A Monograph / Za red. Tkachenka V., Smirnova Ye.* Kharkiv : KhUPS, 545.
- 14. Sbitniev, A. I.,** (2008). Decision-making in a multi-criteria environment. *Modern Information Technologies in the Sphere of Security and Defence*, 2(2), 26-29.
- 15. Komisarov, M., Pidhorodetskyi, M.,** (2022). Methods of evaluation of efficiency of implementation of measures of demining activities taking. *Modern Information Technologies in the Sphere of Security and Defence*, 1(43), 13-18. DOI:10.33099/2311-7249/2022-43-1-13-18.
- 16. Matsko, O., Koval, V., Komisarov, M.,** (2021). On the determination of the contribution of factors to efficiency implementation of mine action in Ukraine. *Science and Technology of the Air Force of Ukraine*, 3(44), 154-158. DOI: 10.30748/nitps.2021.44.18.
- 17. Kotsiuruba, V., Chernykh, I., Maliuha, V., Misyura, O.,** (2019). To the issue of mine hazard level assessment. *Systems of Arms and Military Equipment*, 3(59), 93-98. DOI: 10.30748/soivt.2019.59.12.
- 18. Mykus, S., Solonnikov, V., Krainov, V.,** (2020). *Modern methods of decision support: a textbook.* Kyiv : NUOU, 312.