

УДК 004.8, 354

DOI: <https://doi.org/10.33099/2304-2745/2023-2-78/56-67>

Свешніков С. В., кандидат технічних наук, старший науковий співробітник (0000-0001-8924-4535)  
Бочарніков В. П., доктор технічних наук, професор (0000-0003-4398-5551)  
Мазуренко І. М., доктор філософії (0000-0003-2233-7563)  
Ковальчук П. А. (0000-0002-9434-444X)

Центр воєнно-стратегічних досліджень Національного університету оборони України, Київ

## Оцінка ефективності та ризиків виконання оборонних проєктів на основі нечітко-інтегрального числення

**Резюме.** У статті запропоновано кількісні показники ефективності та ризиків виконання оборонних проєктів, а також алгоритми їх розрахунку на основі поєднання методів сітьового планування та нечітко-інтегрального числення. Це має забезпечити вимірність оборонних проєктів.

**Ключові слова:** оборонне планування; оборонний проєкт; ефективність; ризик; сітьове планування; нечітко-інтегральне числення.

**Постановка проблеми.** Російсько-українська війна наочно показала актуальність розвитку Збройних Сил (ЗС) України на основі оборонного планування, яке має забезпечити якісну підготовку ЗС України до оборони України і сприяти їх ефективному застосуванню у подальшому. У кризових фінансово-економічних умовах держава переходить до вирішення завдань оборонного планування на основі проєктного менеджменту, який забезпечує орієнтацію заходів оборонної політики на кінцевий, функціонально завершений результат і, завдяки цьому, сприяє більш ефективному використанню державних коштів. Відповідно до наказу Міністерства оборони України “Про організацію виконання окремих заходів оборонної реформи на середньострокову перспективу” [1], реалізація оборонної реформи має здійснюватися у формі проєктів. Такими проєктами можуть бути “Огляд спроможностей сил оборони” (який розпочато у 2022 році), або Матриця спроможностей сил оборони, яка визначена Стратегічним оборонним бюлетенем України (затверджено Указом Президента України від 17 вересня 2021 року № 473/2021), або майже будь-яке завдання, яке визначено цим бюлетенем.

Життєвий цикл проєкту складається з проєктування, виконання і оцінювання результату.

Зі свого боку, головним завданням проєктного менеджменту є забезпечення вимірності [2] на всьому життєвому циклі проєкту, який складається з етапів планування і виконання плану, під час яких планується і створюється результат. Без цього неможливо говорити ані про кінцеву ефективність

виконання проєкту, ані про можливість контролю процесу його виконання.

На сьогодні найбільш поширеним залишається опис проєкту засобами теорії сітьового планування [3], відповідно до якої проєкт представляється у вигляді сукупності окремих робіт. Кожна робота потребує певного часу для виконання і взаємопов’язана з іншими роботами за послідовністю, яка визначається логікою утворення часткових елементів загального результату і логікою витрачання ресурсів. Нині відомо кілька способів формального опису проєкту, наприклад, діаграми Ганта [4], дводольні орієнтовані граfi [5] та інші. Головною науковою задачею в рамках теорії сітьового планування є розрахунок загальної тривалості проєкту та резервів часу окремих робіт. Час виконання проєкту розглядається одним з головних підсумовуючих показників.

Залежно від особливостей проєкту, окремі роботи можуть додатково навантажуватись іншими величинами. Тоді розподіл у часі їх суми по роботах або значення іншої функції (що є композицією цих величин, не обов’язково адитивною) може розглядатись як відповідний показник ефективності виконання проєкту. Наприклад, якщо роботи навантажити певними ресурсами і визначити швидкість їх витрачання в ході роботи, можна розглядати графік потрібного забезпечення ресурсами та його характеристики. Інший приклад: навантаження окремих робіт обсягом створюваного результату дає змогу розглянути графік утворення результату проєкту. Варіюючи часом початку робіт (у межах припустимих обмежень), можна

сформулювати оптимізаційну задачу, наприклад, забезпечення рівномірності ресурсних витрат. Подібні задачі є дуже важливими для ефективного проектного менеджменту.

На практиці будь-який проєкт пов'язаний з великою долею невизначеності, оскільки етап планування проєкту стосується процесів, виконання яких відбуватиметься у майбутньому, де важко передбачити та врахувати усі можливі фактори, що можуть призвести до відхилень від планів та норм. Невизначеність умов виконання проєкту впливає на його результат і природним чином викликає ризики, оцінювання яких є одним з найважливіших завдань проектного менеджменту. Такій підхід повністю узгоджується з міжнародним визначенням [6] ризиків в теорії ризик-менеджменту, де ризик розглядається як прояв невизначеності. Зауважимо, що невизначеність породжує не лише ризик втрат, а й можливість придбання певного ефекту у разі позитивного збігу обставин.

Крім того, додаткова невизначеність породжується на етапі виконання проєкту через неадитивні залежності обсягу створюваного результату від часткових результатів, створюваних в рамках окремих робіт. Показник обсягу створюваного результату є невід'ємним елементом системи вимірності оборонних проєктів. У цьому показнику має бути врахована синергія поєднання часткових елементів в загальному результаті і застосування тут адитивних методів неминуче викликатиме систематичну похибку.

Отже, у проектному менеджменті, який здійснюється в умовах невизначеності, існує проблема формування та вимірювання показників, які мають забезпечити вимірність оборонних проєктів на етапах і планування, і виконання. Вони мають враховувати невизначеність кількісної та якісної природи. Кількісні показники можуть бути розраховані за допомогою визначення параметрів робіт на впорядкованих (як правило, числових) множинах і використання арифметичних операцій з нечіткими операндами. Розрахунок якісних показників має здійснюватись іншими методами, орієнтованими на обробку невпорядкованих множин. В обох випадках невизначеність має бути гармонізована з ризиками. Крім того, в проектному менеджменті вагомим є задача управління портфелем проєктів.

Як бачимо, повне розкриття проблеми в рамках однієї статті потребує значного обсягу. Тому далі розгляд результатів дослідження здійснюється лише стосовно кількісних показників. Розгляд проблеми в інших контекстах буде здійснено в інших публікаціях.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Однією з базових у сфері сітьового планування та управління проєктами є робота [7], яка внесла свою вагому частку у формування загального тренду і принципів у вирішенні задач проектного менеджменту.

Однією зі сфер, де методи сітьового планування знайшли широке застосування, є сфера енергетики. Зокрема, в роботі [8] надано огляд моделювання невизначеності в переломленні до предметної області планування роботи розподільчих сіток в енергетиці. Робота [9] пропонує сукупність оптимальних сітьових рішень для забезпечення потреб в електроенергії споживачів, розподілених по географічному району. Критерій оптимальності враховує вимогу використання існуючих розподільчих сіток. Робота [10] пропонує гібридний алгоритм для мінімізації функції вартості капітальних вкладень в енергетичні сітки.

Робота [11] зосереджена на спробі кількісного виразу якісних показників ризиків невизначеної природи під час побудови міських електромереж. Також питанням оцінювання ризиків проєктів присвячена робота [12].

Робота [13] розглядає частковий випадок сітьового планування, коли структура графу, який описує виконання проєкту, невизначена повністю, тобто час окремих робіт визначено лише зі впевненістю або ймовірністю.

У роботі [14] автори роблять спробу використання нечітких множин і нечіткої арифметики в методах сітьового планування, зокрема PERT (Project Evaluation and Review Technique) та CPM (Critical Path Method). Автори використовують неінтерактивне віднімання для розрахунку показників робіт: найбільш раннього часу початку, найбільш пізній припустимий час завершення і час простою, а також критичний шлях для різного рівня впевненості.

Зауважимо, що однією з головних проблем нечіткої арифметики є проблема [15] забезпечення еквівалентності зі стандартною арифметикою. Це так звана проблема "нечіткого нуля і нечіткої одиниці". Різні методи намагаються забезпечити цю

еквівалентність різними шляхами. Наприклад, орієнтовані нечіткі числа забезпечують дотримання аксіоматики стандартних арифметичних операцій, проте для завдання таких чисел необхідна додаткова експертна інформація [16]. Одночасно з цим зберігаються інші проблеми нечіткої арифметики, зокрема проблема збереження форми функції належності при множенні нечітких операндів [17]. У разі використання трикутних функцій належності з'являється проблема втрати інформації [18]. Проте найбільш важливою і важкою проблемою [19, 20] нечіткої арифметики є різке збільшення носія результуючого нечіткого числа у випадку багатократних операцій. Ця проблема призводить до вибухового зростання невизначеності і результату, який неможливо раціонально інтерпретувати для прийняття рішення.

Аналіз відомих підходів свідчить, що розвиток проектного менеджменту в умовах невизначеності кількісних величин сьогодні рухається шляхом механістичного застосування відомих методів опису і обробки нечітких даних до предметної області управління проектами. Чіткі дані замінюються нечіткими, звичайна арифметика замінюється нечіткою, але якісно нові підходи, які дозволили б комплексно розглянути проблеми проектного менеджменту в умовах невизначеності в сучасній літературі відсутні або розвинуті слабо. Зокрема, не розкриті питання оцінювання якості. Слабо розкриті питання оцінювання ризиків.

Отже **мета статті** полягає у визначенні складу кількісних показників і ризиків оборонних проектів, алгоритмів розрахунку цих показників з урахуванням невизначеності процесу виконання робіт проекту. Вирішення цієї задачі має забезпечити вимірність процесу виконання оборонних проектів під час їх планування та виконання.

**Виклад основного матеріалу.**  
Методичний підхід до визначення показників проектів. Відповідно до Методичних рекомендацій з управління проектами в Міністерстві оборони України [21], під час виконання оборонних проектів мають враховуватись:

- час виконання проекту у цілому;
- час завершення проекту і час початку окремих робіт;
- ресурси, які витрачаються в процесі виконання робіт, зокрема людські та грошові;
- якість виконання окремих робіт і результату проекту у цілому;

- ризики виконання проекту;
- контрольні точки проекту, де має контролюватись якість виконання створеної частини результату проекту.

Усі ці величини і категорії можуть бути поєднані на основі наступної логічної моделі. Крім того, ця модель доповнює склад показників.

Проект представляється як сукупність окремих робіт, в яких створюється частка результату проекту. Роботи залежать одна від одної за логікою створення результату проекту або вивільнення ресурсів, потрібних для її виконання (якщо один і той же ресурс може бути задіяним для різних робіт, наприклад, команда аналітиків). Тобто робота не може розпочатись, якщо не завершено усі попередні роботи. Кожна робота має певний час виконання та, не обов'язково, може мати резерв часу для початку виконання. Змінюючи початок виконання роботи в межах резерву, можна обирати більш кращі (за певним критерієм) умови для забезпечення виконання роботи.

У процесі виконання роботи поступово витрачаються певні ресурси і також поступово створюється результат роботи. Ресурси мають подаватись до місця виконання або перед початком роботи, або в процесі роботи. У будь-якому випадку подача ресурсів має здійснюватись не пізніше моменту їх витрачання. Будь-якому результату притаманна якість, яка за міжнародними стандартами [22] визначається як сукупність властивостей продукції або послуги, які надають їм спроможність задовольнити потреби споживача або замовника. У результаті виконання певних робіт поступово створюються системно значимі елементи (частки) результату проекту. Моменти закінчення цих робіт розглядаються як контрольні точки проекту, у яких має оцінюватись обсяг і якість часткових результатів. У загальному випадку моменти закінчення кожної роботи можуть розглядатись як контрольні точки.

Залежність загального результату проекту від його створюваних елементів не є адитивною функцією, оскільки застосування середньозваженої суми розраховуватиме середній відсоток створення часток результату, але не обсяг власне результату. Як приклад, розглянемо процес створення споживчого результату будівництва будинку. У процесі будівництва результат виникає не поступово, а внаслідок стрибка, який з'являється після облаштування фундаменту,

будівництва стін, даху, встановлення вікон і підключення комунікацій. Після виконання всіх цих процедур за рахунок їх синергії виникає споживчий результат – в будинку можна жити, навіть без внутрішнього ремонту. Більш того, приміщення будинку можна продавати. Подібне створення результату притаманне складним системам з синергетичними ефектами.

Таким чином, для забезпечення вимірності проекту мають бути розглянуті такі показники, розділені на дві групи:

*часові і ресурсні показники:*

загальний час виконання проекту, який визначається часовими показниками виконання окремих робіт;

обсяги ресурсів, потрібних для виконання проекту, які визначаються обсягами ресурсів для виконання окремих робіт та графіками їх витрачання в рамках цих робіт;

*показники створюваного результату:*

обсяг створюваного результату проекту як функція від обсягу часткових результатів, досягнутих в контрольних точках проекту;

якість створюваного результату проекту як функція від якості часткових результатів, досягнутих в контрольних точках проекту.

Показники розділено на дві групи, оскільки вони використовуються по-різному. Часові та ресурсні показники проекту визначаються і розраховуються на етапі планування проекту. На етапі виконання проекту вони виступають цілями, які необхідно досягнути, а також обмежень, яких потрібно дотриматись. Показники створюваного результату розраховуються на

етапі виконання проекту. Для їх розрахунку використовуються поточні оцінки обсягу та якості часткових результатів в контрольних точках проекту, а також залежність загального результату проекту від його окремих елементів, яка визначається на етапі планування проекту.

*Методичний підхід до представлення оборонних проєктів.* Методичною основою для розрахунку перелічених показників служить представлення будь-якого проекту у вигляді дводольного орієнтованого графу (рис. 1) з однією початковою і однією кінцевою вершинами, що описують початок і кінець проекту відповідно:  $G = (V, E)$ , де  $V = \{v_i, i = \overline{1, I}\}$  – множина вершин графу,  $I$  – кількість вершин,  $E = \{e_n(\overrightarrow{v_i, v_j}); i, j = \overline{1, I}; i \neq j; n = \overline{1, N}\}$  – множина впорядкованих пар вершин (дуг),  $N$  – кількість дуг. Стрілка позначає перехід від  $v_i$  до  $v_j$ . Вершини графу також називають подіями. Початкова  $v_1$  і кінцева  $v_I$  вершини (відповідно, початок і закінчення проекту) можуть бути фіктивними, тобто граф може бути побудовано за допомогою дуг, які не навантажені будь-якими величинами, у тому числі, часом. Перехід між будь-якими вершинами  $v_n$  та  $v_m$  може бути описано як шлях  $(\overrightarrow{v_n, \dots, v_m})$ , у який будь-яка вершина може входити лише один раз (умова ациклічності). У цьому сенсі найкоротшим шляхом є дуга, а власне граф може бути представлений множиною шляхів  $G = \{(\overrightarrow{v_1, \dots, v_I})_k, k = \overline{1, K}\}$ , де  $K$  – кількість шляхів. У загальному випадку різні шляхи можуть перетинатись  $(\overrightarrow{v_1, \dots, v_I})_k \cap (\overrightarrow{v_1, \dots, v_I})_l \neq \emptyset, k \neq l$ .

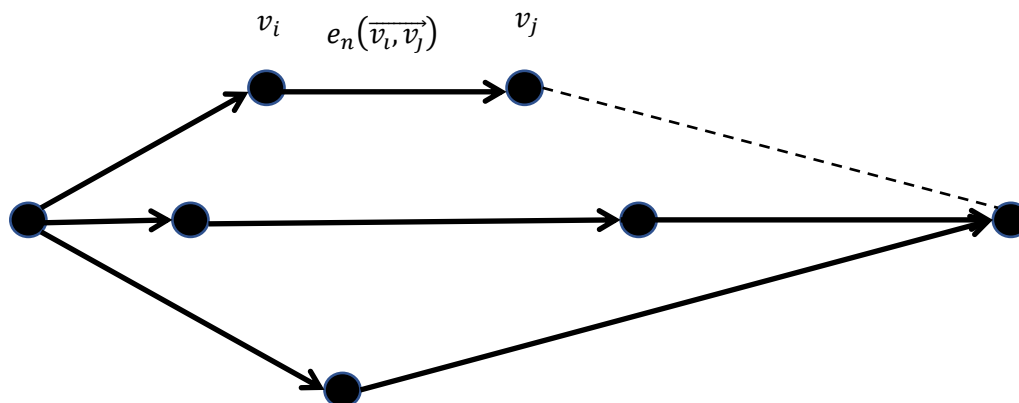


Рис. 1. Приклад дводольного орієнтованого графу

*Методичний підхід до врахування невизначеності та оцінки ризиків.* Зауважимо, що виходячи з фізичного смислу показників проєктів, ризики розглядаються виключно до часових та ресурсних показників. Ці

показники мають кількісну природу. Відповідно до принципу розширення Заде [24], для врахування впливу невизначеності зовнішніх умов на показники робіт проекту можна використовувати нечіткі числа замість

чітких та нечітку арифметику як аналог стандартної арифметики. Тоді стандартні величини, наприклад, час  $t$ , припустимо описати аналогічними за смислом нечіткими величинами:  $\tilde{t}$ .

Оскільки ризики прямо пов'язані з невизначеністю, а невизначеність показників проекту описано нечіткими числами, то буде природним описати ризики проекту характеристиками цих чисел. За смислом ризики проекту мають відображати можливість і розмір відхилення реальних значень часових та ресурсних показників від планових (цільових) значень внаслідок дії зовнішніх умов, які будуть реалізовані під час виконання проекту. Але показників ризиків може бути більше.

Наприклад, розглядаємо відхилення часу виконання проекту від найбільш очікуваного. Чим більше можливі відхилення у бік збільшення часу, тим більше ризик. Навпаки, чим більші можливі відхилення у бік зменшення часу, тим більше стійкість проекту до можливих несприятливих обставин.

Такий підхід дає змогу гармонізувати розрахунок показників ефективності і оцінювання ризиків. Підхід не потребує розроблення спеціальних алгоритмів для визначення ризиків. Ризики імплементовані в невизначеності значень показників і трансформуються під час їх розрахунків.

Як було показано в огляді літератури, існує багато варіантів опису числової невизначеності. Кожен варіант має свої індивідуальні особливості та недоліки. Але загальною вимогою до нечітких чисел є

$$\tilde{R} = \left\{ (x_i, \mu(x_i)), i = \overline{1, n}, x_{i+1} - x_i = \frac{d-a}{n-1}, x_0 = a, x_n = d \right\},$$

де  $n$  – номер дискети (дискретного сегмента),  $d, a$  – нижня та верхня границя носія нечіткого числа.

На сьогодні відомо багато характеристик нечітких чисел, вибір яких залежить від потреб конкретного прикладного дослідження. Достатньо повний огляд цих характеристик надано в роботі [26]. На рис. 2 проілюстровано найбільш розповсюджені характеристики, які використовуються для оцінювання ризиків.

1. Мінімум на  $\alpha$ -рівні – дискрета носія нечіткого числа, зліва від якої усі значення функції належності дискет є меншими:

$$x^{\alpha \min} = \min \{ x_i | \mu(x_i) \geq \alpha \in [0, 1], x_i \in R \}.$$

2. Максимум на  $\alpha$ -рівні – дискрета носія нечіткого числа, справа від якої усі значення функції належності дискет є меншими:

точний опис невизначеності нечіткої величини, а методів реалізації арифметичних операцій – коректність композиції невизначеності операндів. З огляду на цю вимогу, пропонується використовувати дискретизовані (по носію) нечіткі числа з довільною формою функції належності та алгоритм нечіткої арифметики, заснований на принципі максимуму ентропії. Як показано у спеціальному дослідженні [25], ці методи є найбільш підходящими для вирішення прикладних завдань.

Розглянемо представлення дискретизованих нормальних (одно модальних) нечітких чисел довільної форми та їх характеристики, які є важливими для оцінювання ризиків. Будемо називати нечітким числом  $\tilde{R}$  нечітку множину з носієм, визначеним на множині дійсних чисел:

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

$$\mu_{\tilde{R}}(x) = \begin{cases} f_{\tilde{R}}(x) & \text{якщо } x \in [a, b], \\ 1 & \text{якщо } x \in [b, c], \\ g_{\tilde{R}}(x) & \text{якщо } x \in (c, d] \\ 0 & \text{у протилежному випадку,} \end{cases}$$

де  $\mu_{\tilde{R}}(x)$  – функція належності,  $a, b, c, d \in \mathbb{R}, a \leq b \leq c \leq d$ ,  $f_{\tilde{R}}(\cdot)$  – зростаюча справа безперервна функція і  $g_{\tilde{R}}(\cdot)$  зростаюча зліва безперервна функція.

Для представлення у комп'ютері нечіткого числа довільної форми використовується дискретизація по осі абсцис, на якій задано носій нечіткого числа. У цьому випадку, нечітке число представляється множиною пар:

$$x^{\alpha \max} = \max \{ x_i | \mu(x_i) \geq \alpha \in [0, 1], x_i \in R \}.$$

3. Найбільш очікуване значення нечіткого числа – дискрета носія нечіткого числа, яка має найбільше значення функції належності:

$$x^{MEV} = \left\{ x_i | \mu(x_i) = \max_{j=\overline{1, n}} \mu(x_j), x_i \in R \right\}.$$

4. Центр тяжіння нечіткого числа – дискрета носія нечіткого числа, справа і зліва від якої площі фігур є рівними:

$$x^{CG} = \sum_{i=1}^{j-1} |x_i - x_{i+1}| \cdot \mu(x_i), j = \overline{1, n}, x^{CG} \in R.$$

5. Ризик-функція нечіткого числа:

$$\rho(x_k) = \min_{x_i \geq x_k} \mu(x_i) - \max_{x_i \leq x_k} \mu(x_i), i, k = \overline{1, n}.$$

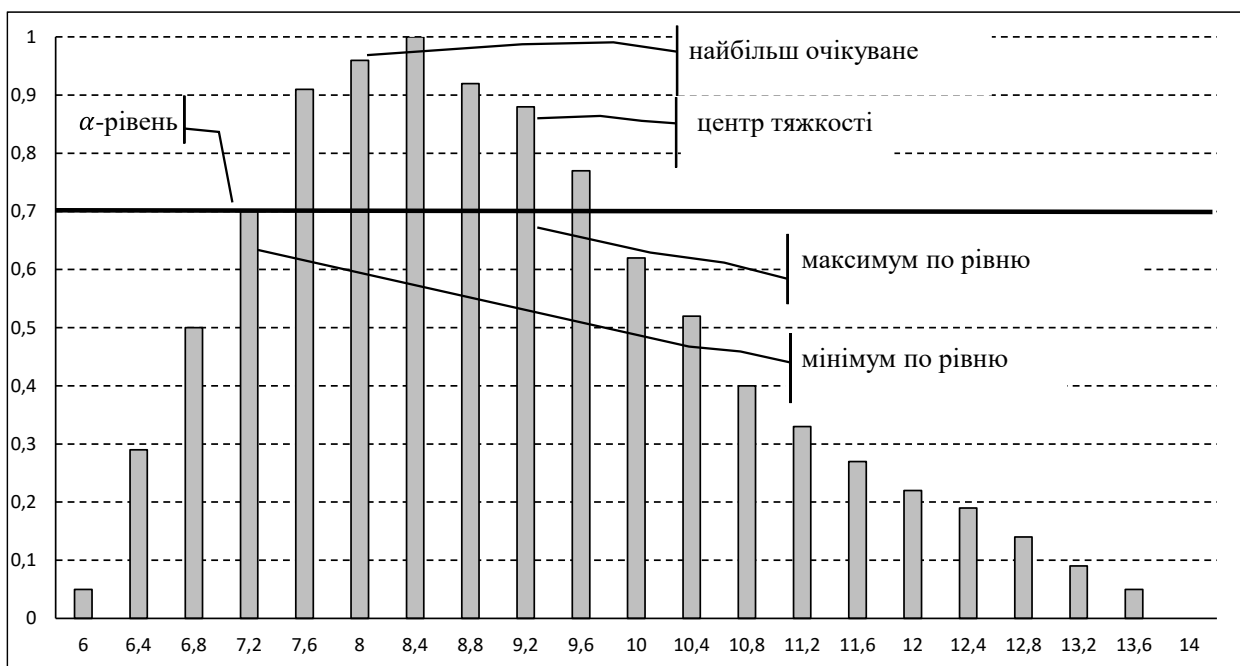


Рис. 2. Характеристики нечітких чисел, які використовуються для оцінювання ризиків

Ризик-функція нечіткого числа  $\tilde{R}$  описує можливість того, що реальне значення числової величини виявиться більше значення, яке описує нечітке число  $\tilde{R}$ . На рис. 3 наведено ризик-функцію нечіткого числа, яке представлено на рис. 2.

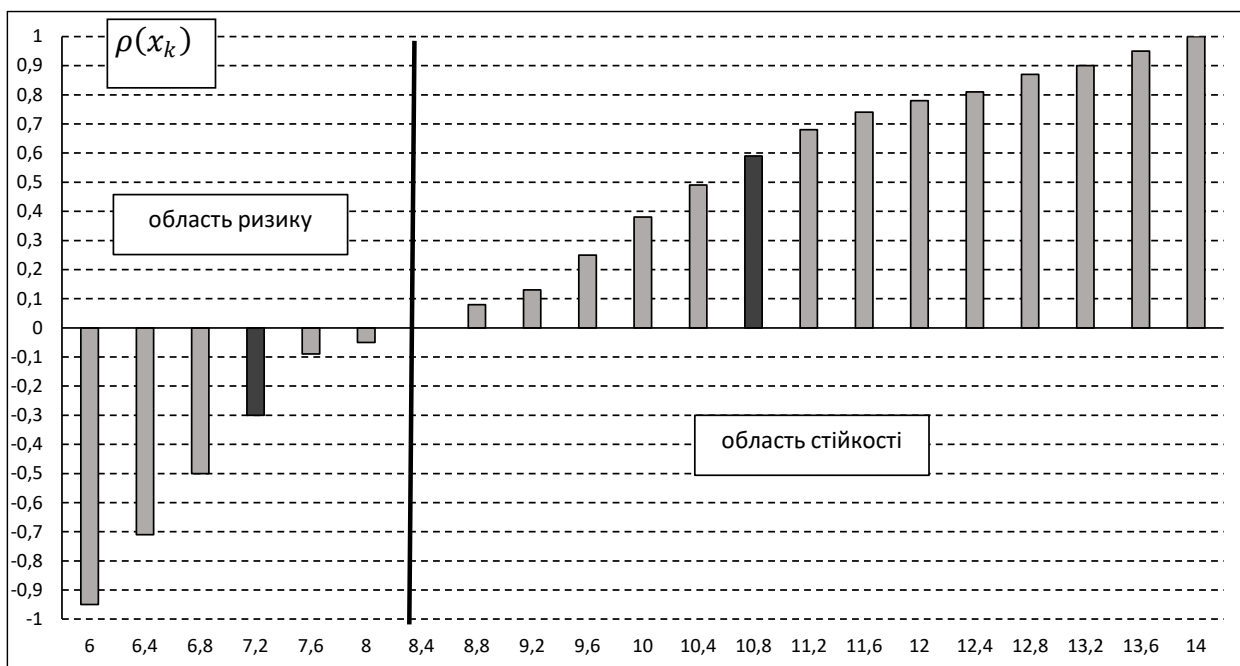


Рис. 3. Ризик-функція нечіткого числа, яке представлено на рис. 2

На рис. 3 показано дві області: область ризику і область акт-ризик (область стійкості). Щоб зрозуміти смисл цих областей, розглянемо приклад використання ризик-функції у практиці. На рис. 3 затемнене дві дискрети нечіткого числа, яке описує витрати певного ресурсу: ( $x_k = 7.2$ ;  $\mu(x_k) = -0.3$ ) і ( $x_i = 10.8$ ;  $\mu(x_i) = 0.6$ ). Припустимо, що є зацікавленість у зменшенні витрат. Тоді

перша дискрета означає таке. Якщо під час прийняття рішення орієнтуватись на витрати  $x_i = 7.2$ , то ризик прийняття невірної рішення буде дорівнювати  $\mu(x_k) = -0.3$ . Друга дискрета означає, що якщо орієнтуватись на витрати  $x_k = 10.8$  (тобто передбачимо більше ресурсів, ніж найбільш очікуване значення), то ризик невірної рішення буде відсутній, а можливість

правильного рішення дорівнюватиме  $\mu(x_k) = 0.6$ .

Тобто ризик-функція описує дві онтологічні характеристики кількісного ризику: розмір можливих втрат і події настання в термінах можливості. Використання ризик-функції забезпечує менеджерів додатковими даними для прийняття рішень.

Ця нова характеристика запропонована вперше, оскільки під час оцінювання кількісних ризиків різних проєктів автори зіштовхнулись з такою суперечністю.

З погляду онтології ризиків, розглянуті вище характеристики нечітких чисел  $x^{amin}$ ,  $x^{amax}$ ,  $x^{MEV}$  та  $x^{CG}$  описують розмір очікуваних втрат, оскільки завдані на множині носія нечіткого числа. Але розмір втрат не є повною характеристикою ризику. Хоча ці характеристики можна ототожнити з ризиками, все ж ризик вимагає додаткового опису в термінах настання втрат, іншими словами, в термінах відношення до дійсності або модальності. Наприклад, в поточних умовах замовник проєкту може втратити \$1.5 млн через зростання цін на ресурси. Це розмір можливих втрат. Але залишається питання, наскільки ця оцінка може бути реалізована на практиці? Отже, оскільки йдеться про оцінку втрат в майбутньому, оцінка ризику має включати не лише розмір втрат, але й оцінку настання цієї події.

Зі свого боку, тут виникають три додаткових питання. По-перше, питання про модальність як відношення до дійсності. По-друге, питання про опис апетиту до ризику. І по-третє, питання про придбання як про категорію, зворотну до категорії ризику.

*Питання про модальність як відношення до дійсності.* Оскільки будь-яке нечітке число представлено як нормальна функція належності, задана на дискретизованій множини дійсних чисел, то таке нечітке число є нечіткою мірою можливості. Ризик-функція нечіткого числа повністю відповідає цьому твердженню, оскільки розраховується як можливість. Таким чином, запропонована ризик-функція може бути використана для опису не лише розміру очікуваних втрат, але й можливості настання цих втрат.

*Питання про опис апетиту до ризику.* Описом апетиту до ризику може служити  $\alpha$ -рівень, від якого залежать часткові критерії ризику, зокрема  $x^{amin}$  та  $x^{amax}$ . Чим нижче  $\alpha$ -рівень, тим більше елементів  $x_i$  попаде в

діапазон  $(x^{amax} - x^{amin})$  та, відповідно, тим більше факторів ризику буде враховано в результаті.

*Питання про втрати та придбання.* Виходячи з міжнародного визначення ризику, фактори невизначеності можливо ототожнити з факторами ризику. В області визначення нечіткого числа завжди існує найбільш очікуване значення, яке ділить число на дві частини. Якщо це число описує показник проєкту, який бажано збільшити, то є справедливими такі міркування. Числа, котрі менше найбільш очікуваного значення (розташовані зліва на шкалі дійсних чисел) є результатом дії факторів ризику, оскільки вони вказують на можливе зниження показника. Числа, котрі більше найбільш очікуваного значення (розташовані справа на шкалі дійсних чисел) є результатом дії факторів анти-ризиків, оскільки вони вказують на можливе збільшення показника. Таким чином, область визначення нечіткого числа можна розділити на дві області: область ризику і область анти-ризиків (область стійкості). Якщо нечітке число описує показник, який бажано зменшити, то області ризику і стійкості змінюються місцями. Отже, запропонована ризик-функція нечіткого числа може використовуватись для опису не лише ризику втрат, але й можливості придбання.

*Алгоритм розрахунку часових показників.* Алгоритм базується на відомих алгоритмах сітьового планування [27], але розрахунки здійснюються з нечіткими числами. У сітьовому плануванні кожна дуга графу  $G$  навантажена часом виконання. Як головні показники використовуються:

- загальний час виконання проєкту  $\zeta^{critical}(G)$ ;
- ранній строк початку роботи  $\zeta^{early}(\overline{v_i, v_{i+1}})$ ;
- пізній строк закінчення роботи  $\zeta^{late}(\overline{v_i, v_{i+1}})$ ;
- резерви часу роботи  $\tilde{t}_\Delta(\overline{v_i, v_{i+1}})$ .

Ці показники розраховуються за допомогою алгоритму, де операції порівняння здійснюються за центром тяжіння нечітких чисел.

Крок 1. Розрахунок ранніх строків початку робіт  $\zeta^{early}(\overline{v_i, v_{i+1}})$ .

Розрахунок здійснюється послідовно, починаючи з робіт, яким не передують жодна робота, і закінчується, коли розраховані ранні строки початку усіх робіт. Для робіт, які виходять з початкової вершини орієнтованого графу проєкту, ранній строк початку

встановлюється рівним нулю:  
 $\tilde{t}^{early}(\overrightarrow{v_l, v_{l+1}}) = 0$ .

Для усіх інших робіт ранній строк початку розраховується як максимальна тривалість шляху серед усіх шляхів, які виходять з початкової вершини до цієї роботи:

$$\tilde{t}^{early}(\overrightarrow{v_l, v_{l+1}}) = \max_{k=1, K} \tilde{t}(\overrightarrow{v_1, \dots, v_l})_k.$$

**Крок 2.** Розрахунок загального часу виконання проєкту.

Загальний час виконання проєкту розраховується як максимальна тривалість шляху серед усіх шляхів, які виходять з початкової до кінцевої вершини:

$$\tilde{t}^{critical}(G) = \max_{k=1, K} \tilde{t}(\overrightarrow{v_1, \dots, v_l})_k.$$

Цей шлях є критичним шляхом проєкту.

**Крок 3.** Розрахунок пізніх строків закінчення робіт  $\tilde{t}^{late}(\overrightarrow{v_l, v_{l+1}})$ .

$$\tilde{t}_\Delta(\overrightarrow{v_l, v_{l+1}}) = \tilde{t}^{late}(\overrightarrow{v_l, v_{l+1}}) - \tilde{t}^{early}(\overrightarrow{v_l, v_{l+1}}).$$

Роботи з резервом часу  $\tilde{t}_\Delta(\overrightarrow{v_l, v_{l+1}}) = 0$  належать критичному шляху проєкту.

Алгоритм розрахунку ресурсних показників. Головним ресурсним показником є обсяг певного ресурсу, який має бути витрачений в кожний момент часу. Цей показник може бути представлений у вигляді дискретизованої функції  $Res^m(p)$ , де  $m$  – індекс ресурсу,  $p = 1, P$  – дискрета часу,  $P$  – максимальний час виконання проєкту. Графік витрачання ресурсу розраховується для кожного ресурсу як сума обсягів витрачання цього ресурсу під час виконання кожної роботи  $(res_n^m)_p$ :

$$Res^m(p) = \sum_{n=1}^N (res_n^m)_p.$$

Загальні обсяги потрібних ресурсів розраховуються як сума  $Res^m(p)$  по усіх часових дискретах:

$$Res_\Sigma^m = \sum_{p=1}^P Res^m(p).$$

На основі цього графіку визначається графік потрібного забезпечення ресурсами проєкту, а також графік фінансування проєкту:

$$Fin(p) = \sum_{m=1}^M Cost^m(p) \cdot Res^m(p),$$

де  $Cost^m(p)$  – вартість  $m$ -го ресурсу;

$M$  – кількість ресурсів.

Вартість ресурсу визначена як показник, що може змінюватись у часі. Це дає змогу

Розрахунок здійснюється послідовно, починаючи з робіт, за якими не слідє жодна робота, і закінчується, коли розраховані пізні строки закінчення усіх робіт.

Для робіт, які закінчуються кінцевою вершиною, пізній строк закінчення встановлюється рівним нулю:  $\tilde{t}^{late}(\overrightarrow{v_l, v_l}) = 0$ .

Для усіх інших робіт пізній строк закінчення розраховується як різниця між загальним часом виконання проєкту і максимальною тривалістю шляху від закінчення цієї роботи до кінцевої вершини:

$$\tilde{t}^{late}(\overrightarrow{v_l, v_{l+1}}) = \max_{k=1, K} \tilde{t}(\overrightarrow{v_l, \dots, v_l})_k.$$

**Крок 4.** Розрахунок резервів часу робіт.

Розрахунок здійснюється для усіх робіт. Резерв часу визначається як різниця між пізнім строком закінчення роботи і раннім часом її початку:

враховувати інфляцію цін у процесі виконання проєкту. Загальний обсяг фінансування проєкту розраховується як сума:

$$Fin_\Sigma = \sum_{p=1}^P Fin(p).$$

Алгоритм розрахунку обсягу створюваного результату проєкту. Як було зазначено, алгоритм використовується на етапі виконання проєкту. Вимірювання обсягу створюваного результату здійснюється в контрольних точках проєкту, де закінчується створення системного значимих часткових результатів. Ідея алгоритму полягає у порівнянні сукупності поточних вимірювань обсягів часткових результатів з неадитивною функцією, яка описує залежність повноти кінцевого результату проєкту від сукупності створених часткових результатів. Ця функція має бути побудована на етапі планування проєкту. Вона має враховувати синергію системи, створюваної в результаті виконання проєкту. Синергія кінцевого результату може бути описана у вигляді додаткового внеску, що виникає за рахунок взаємодії часткових результатів.

Тут ключовим моментом стає універсальна множина – та множина, на базі якої будуються методи обробки даних і вирішення задач. На рис. 4 показано два найбільш поширених типи дискретної універсальної множини, яка описують систему з трьох елементів  $\{x_i, i = 1, 2, 3\}$ .



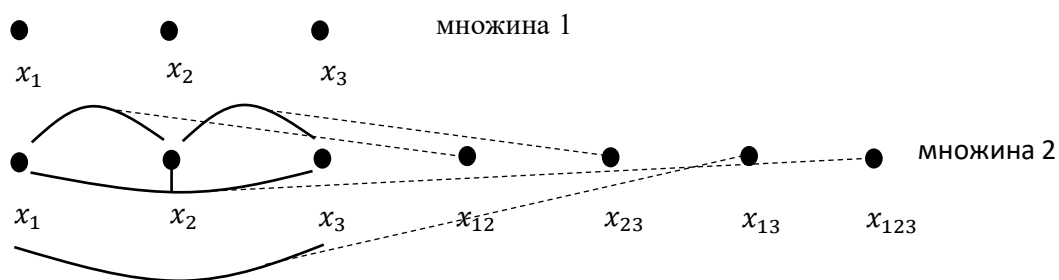


Рис. 4. Два варіанти дискретних універсальних множин

Перша множина складається виключно з цих трьох елементів. Цю множину використовують найбільш розповсюджені методи, такі як метод порівнянь або обробки нечітких множин. Для побудови на цій множині функцій експертним шляхом (що є досить поширеним для оборонних проєктів), експертам задають питання стосовно лише елементів системи. Вплив взаємодій елементів тут не може бути врахований у принципі. Щоб це зробити, потрібно використовувати другу універсальну множину, яка лежить в основі інших методів, зокрема теорії нечітких мір. Під час побудови нечітких мір експертам задаються додаткові питання стосовно підмножин системи, з взаємодій яких формується їх синергія.

Враховуючи це, алгоритм розрахунку обсягу створюваного результату проєкту полягає у визначенні обсягу виконання проєкту залежно від обсягу виконання робіт проєкту в контрольних точках, пов'язаних зі створенням функціонально закінчених частин результату. Позначимо множину контрольних точок як  $V = \{v_j, j = \overline{1, J}\}$ , де  $J$  – кількість контрольних точок. Нехай нечітка міра Сугено  $g_V(\cdot): 2^V \rightarrow [0,1]$  описує залежність обсягу створюваного результату від кількості і складу реалізованих частин проєкту. Замітимо, що  $2^V$  позначає множину усіх підмножин множини  $V$ . Звідси видно, що нечітка міра враховує не лише окремі елементи множини  $V$ , але й усі взаємодії між ними, тобто синергію системи  $V$ . Також нехай функція належності  $\mu(v_i): V \rightarrow [0,1]$  описує реальні обсяги створених частин результату. Тоді нечіткий інтеграл Сугено

$$W = (s) \int_V \mu(v_i) \circ g_V(\cdot)$$

розраховуватиме обсяг реально створюваного результату проєкту, який враховує недоробки частин проєкту та їх вплив на повноту кінцевого результату відповідно до синергії взаємодії частин. Нечітку міру, як й функцію

належності, можна завдати кількома відомими способами [28].

Алгоритм розрахунку якості створюваного результату проєкту. Алгоритм базується на міркуваннях, аналогічних тим, що покладені в основу попереднього алгоритму.

Оцінювання якості виконання частин проєкту також здійснюється на етапі виконання проєкту в контрольних точках. Нечітка міра  $g_Q(\cdot)$  описує залежність якості створюваного результату від якості реалізованих частин проєкту. Результати оцінювання якості часткових результатів представляються у вигляді функції належності  $\eta(v_i)$ . Тоді нечіткий інтеграл Сугено

$$Q = (s) \int_V \eta(v_i) \circ g_Q(\cdot)$$

розраховує якість кінцевого результату проєкту залежно від якості його частин з урахуванням синергії їх поєднання.

Зазначимо, що оцінювання якості виконання частин результату проєкту є однією з найважливіших функцій проєктного менеджменту. Головним завданням оцінювання якості є вимірювання ступеня відповідності властивостей частини результату вимогам споживача. Оскільки вимоги споживача, частіше за усе, можуть бути описані якісними категоріями, оцінювання якості і ризиків якості концептуально відрізняється від підходів, застосованих до кількісних величин, і буде здійснено в інших публікаціях.

Основні часові і ресурсні ризики виконання проєктів. Застосовуючи характеристики нечітких чисел (див. рис. 2) до часових і ресурсних показників проєктів, що розраховуються за допомогою викладених алгоритмів, можна визначити основні часові і ресурсні ризики виконання проєктів. Зокрема, використовуються такі характеристики нечітких чисел: песимістична оцінка  $x^{amax}$ , оптимістична оцінка  $x^{amin}$ , найбільш очікувана оцінка  $x^{MEV}$ , рівноважна оцінка

$x^{CG}$ , відносний діапазон можливих змін  $|x^{amax} - x^{amin}|/x^{CG}$ , ризик песимістичної оцінки  $\rho(x^{amax})$ , ризик оптимістичної оцінки  $\rho(x^{amin})$ . Ці характеристики застосовуються до визначених вище часових і ресурсних показників проекту і окремих робіт.

**Напрями подальшого розвитку аналітичної підтримки проектного менеджменту.** На основі сітьової моделі виконання проекту і алгоритмів розрахунку кількісних показників можна побудувати кілька важливих для проектного менеджменту задач. У загальному випадку, залежність певного показника від параметрів робіт проекту може бути описана функціоналом  $Y(p) = F(x_1, \dots, x_l)$ .

Якщо в якості множини визначення функціоналу завдати строки початку робіт  $\tilde{t}^{early}(\vec{v}_l, \vec{v}_{l+1})$ , що мають резерви часу  $\tilde{t}_\Delta(\vec{v}_l, \vec{v}_{l+1}) > 0$ , а в якості значення функціоналу визначити рівномірність фінансування проекту

$\left| \max_{p=1, P} Fin(p) - \min_{p=1, P} Fin(p) \right|$ , то можна сформулювати задачу

пошуку ранніх строків початку робіт, за якими забезпечується рівномірність графіку фінансування проекту. Ця задача є класичною задачею проектного менеджменту. Її рішення дозволяє зменшити навантаження на фінансове забезпечення проекту і уникнути або мінімізувати обсяги зовнішніх дорогих кредитів.

Запропоновані показники дають змогу розширити коло аналітичних задач, які можуть вирішуватись в межах менеджменту оборонних проектів.

Зокрема, якщо ввести функцію зміни вартості ресурсів в часі (фактор інфляції цін), завдати максимально можливий обсяг складів для накопичення ресурсів, вартість зберігання ресурсів на складах і вартість транспортування ресурсів до складів і зі складів до місця виконання проекту, можна сформулювати задачу визначення оптимального графіку закупок ресурсів  $V_{yu}(p)$  за критерієм мінімальної вартості забезпечення проекту ресурсами.

Інша задача. Якщо проект виконується в складних умовах (наприклад, фізичної протидії), стає актуальним питання визначення мінімально припустимих обсягів виконання робіт, за якими виконання проекту ще може вважатись задовільним, тобто коли обсяг створеного результату проекту буде перевищувати завданий поріг. Аналогічна

задача може бути сформульована стосовно якості виконання робіт проекту.

Зауважимо, що можливість вирішення оптимізаційних задач в умовах невизначеності сьогодні є доведеною в ланці робіт, наприклад [28], хоча й потребує додаткового дослідження.

**Висновки.** У статті запропоновано методичний підхід до визначення кількісних показників оборонних проектів, який полягає у поєднанні відомих методів сітьового планування з методами теорії нечітких мір та інтегралів Сугено. Зокрема, запропоновано показники, які розраховуються на етапі планування проектів, і показники, які розраховуються на етапі виконання проектів у контрольних точках проекту. До перших відносяться часові та ресурсні показники, до других – показники обсягу та якості створюваного результату, які враховують синергію поступового поєднання і перетворення окремих частин у загальний результат. Запропоновано підхід до оцінювання ризиків проекту, який полягає у представленні часових і ресурсних показників у вигляді нечітких чисел і використанні їх характеристик як показників ризиків. Запропоновано алгоритми розрахунку показників. Пропоновані у статті рішення дають змогу забезпечити вимірність оборонних проектів, тобто те, що вимагають нормативні документи Міністерства оборони України.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Наказ Міністерства оборони України від 14.08.2020 р. № 283 URL: <http://surl.li/eeizr>.
2. Методичні рекомендації з управління проектами. Міністерство оборони України, 2019, 50 с. URL: [https://www.mil.gov.ua/content/oboron\\_plans/Metod\\_recomendacii\\_z\\_upravlinnia\\_p\\_roektamy.pdf](https://www.mil.gov.ua/content/oboron_plans/Metod_recomendacii_z_upravlinnia_p_roektamy.pdf).
3. Плетнева Л. А. Исследование операций по разделам: “Теория игр и сетевое планирование” : методические указания. Москва : МАДИ, 2013. 48 с. URL: <http://surl.li/eawbg>.
4. Wilson J. M. Gantt charts: A centenary appreciation // European Journal of Operational Research. 2003. Vol. 149, No. 2. С. 430–437. URL: <http://surl.li/eawbo>.
5. Graph theory with applications / J. A. Bondy et al. London : Macmillan, 1976. Т. 290. URL: <http://surl.li/eawbq>.
6. Purdy G. ISO 31000: 2009 – setting a new standard for risk management // Risk Analysis: An International Journal. 2010. Vol. 30, No. 6. P. 881–886. URL: <https://cutt.ly/B1dxjoR>.

7. Кофман А., Дебазей Г. Сетевые методы планирования и их применение. Москва : Прогресс, 1968.
8. Ehsan A., Yang Q. State-of-the-art techniques for modelling of uncertainties in active distribution network planning: A review // *Applied energy*. 2019. Т. 239. С. 1509–1523.
9. You S., Bindner H. W., Hu J., Douglass P. J. An overview of trends in distribution network planning: A movement towards smart planning. IEEE PES T&D Conference and Exposition. 2014. P. 1–5. DOI: 10.1109/TDC.2014.6863446.
10. Sadegheh A. Optimization of network planning by the novel hybrid algorithms of intelligent optimization techniques // *Energy*. 2009. Т. 34, № 10. С. 1539–1551.
11. Risk assessment of urban network planning in china based on the matter-element model and extension analysis / Y. He et al. // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2011. Т. 33, № 3. С. 775–782.
12. Опыт оценки рисков подземного строительства / Л. Л. Кауфман и др. // *Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта*. 2010. № 32. С. 55–60.
13. Gazdik, "Fuzzy-Network Planning – FNET," in *IEEE Transactions on Reliability*. Aug. 1983. Vol. R-32, No. 3. P. 304–313. DOI: 10.1109/TR.1983.5221657.
14. Kanmohammadi S., Rahimi F., Sharifian M. B. B. Analysis of different fuzzy CPM network planning procedures. ICECS : 10th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems, 2003. Vol. 3. P. 1074–1077. DOI: 10.1109/ICECS.2003.1301696.
15. Mares M. Weak arithmetics of fuzzy numbers. *Fuzzy Sets and Systems*. Vol. 91. 1997. P. 143–153. DOI: 10.1016/S0165-0114(97)00136-X.
16. Iwona Pisz, Anna Chwastyk, Iwona Łapuńka. Assessing the profitability of investment projects using ordered fuzzy numbers // *Scientific Journal of Logistics*. Vol 15, No. 3. 2019. P. 377–389. <http://doi.org/10.17270/J.LOG.2019.342>.
17. Barnabás Bede. Product Type Operations between Fuzzy Numbers and their Applications in Geology. *Acta Polytechnica Hungarica*. Vol. 3. No. 1. 2006. P. 123–139.
18. Olga Kosheleva, Sergio D. Cabrera, Glenn A. Gibson, Misha Koshelev. Fast implementations of fuzzy arithmetic operations using fast Fourier transform (FFT). *Fuzzy Sets and Systems*. Vol. 91. Issue 2. 1997. P. 269–277. DOI: 10.1016/S0165-0114(97)00147-4.
19. Stefanini, Luciano & Sorini, Laerte & Professor, Maria. *Fuzzy Numbers and Fuzzy Arithmetic*. 2008. In book: *Handbook of Granular Computing*. P. 249 – 283. DOI: 10.1002/9780470724163.ch12.
20. Haitao Liu and Sizong GUO. Equality and Identity of Fuzzy Numbers and Fuzzy Arithmetic with Equality Constraints. *International Conference on Intelligent Systems and Knowledge Engineering* 2007. P. 334–339. DOI: 10.2991/iske.2007.56.
21. Методичні рекомендації з управління проектами. Міністерство оборони України, 2019, 50 с. URL: [https://www.mil.gov.ua/content/oboron\\_plans/Metod\\_recomendacii\\_z\\_upravlinnia\\_p\\_roektamy.pdf](https://www.mil.gov.ua/content/oboron_plans/Metod_recomendacii_z_upravlinnia_p_roektamy.pdf).
22. Lushi I. et al. A literature review on ISO 9001 standard // *European Journal of Business, Economics and Accountancy*. 2016. Т. 4, № 2. С. 81–85. URL: <http://surl.li/edldp>.
23. Zadeh L A (1975) The Concept of linguistic variable and its applications to approximate reasoning. *Information Sciences*. DOI: [https://doi.org/10.1016/0020-0255\(75\)90046-8](https://doi.org/10.1016/0020-0255(75)90046-8).
24. Sveshnikov S, Bocharnikov V. Computational Algorithm and Tools of Fuzzy Arithmetic Based on the Principle of Maximum Entropy. *Research Article*. URL: [https://assets.researchsquare.com/files/rs-1254409/v1\\_covered.pdf?c=1642605797](https://assets.researchsquare.com/files/rs-1254409/v1_covered.pdf?c=1642605797).
25. Slavka Bodjanova. Median value and median interval of a fuzzy number. *Information Sciences*. Vol. 172. Issue 1. 2005. pp. 73–89. DOI: 10.1016/j.ins.2004.07.018.
26. Коршунов Ю. М. Математические основы кибернетики. 3-е изд., перераб. и доп. Москва : Энергоатомиздат, 1987. 496 с.
27. Бочарніков В. П., Свешніков С. В., Тимошенко Р. І., Павленко В. І. *Технологія аналізу воєнно-політичної обстановки*. Київ : НУОУ імені Івана Черняхівського, 2017. 397 с.
28. Tang J. et al. Understanding of fuzzy optimization: theories and methods // *Journal of Systems Science and Complexity*. 2004. Т. 17, № 1. С. 117–136. URL: <http://surl.li/egoqi/>

Стаття надійшла до редакційної колегії 12.06.2023

### **Assessing the effectiveness and risks of implementing defense projects based on fuzzy integral calculus**

#### **Annotation**

The Russian-Ukrainian war clearly showed the relevance of the development of the Armed Forces of Ukraine based on defense planning, which should ensure high-quality training of the Ukrainian Armed Forces for the defense of Ukraine and contribute to their effective use in the future. In crisis financial and economic conditions, the state is moving towards solving the problems of defense planning on the basis of project management, which ensures the orientation of defense policy towards the final, functionally completed result.

In project management, which is carried out under conditions of uncertainty, there is a problem of forming and measuring indicators that ensure the measurability of defense projects at the stages of both planning and implementation. They must take into account the uncertainty of a quantitative and qualitative nature. In this article, consideration of the results of the study is carried out only in relation to quantitative indicators.

A methodical approach to determining the quantitative indicators of defense projects is proposed, which consists of combining the known methods of network planning with the methods of the theory of fuzzy measures and Sugeno integrals. In particular, indicators calculated at the project planning stage and indicators calculated at the stage of project implementation at project milestones are proposed. The former include time and resource indicators, and the latter - indicators of the volume and quality of the result being created, taking into account the synergy of the gradual combination and transformation of individual parts into a common result. An approach to project risk assessment is proposed, which consists of presenting time and resource indicators in the form of fuzzy numbers and using their characteristics as risk indicators. Algorithms for calculating indicators are proposed.

**Keywords:** defense planning; defense project; efficiency; risk; network planning; fuzzy-integral calculus.