УДК 629.76/.78 https://doi.org/10.15407/itm2022.04.051

А. П. АЛПАТОВ, В. Т. МАРЧЕНКО, Н. П. САЗІНА

КІЛЬКІСНА ОЦІНКА РІВНЯ РИЗИКУ ЗБІЛЬШЕННЯ ВИТРАТ НА РОЗРОБКУ ЗРАЗКІВ КОСМІЧНОЇ ТЕХНІКИ

Інститут технічної механіки
Національної академії наук України і Державного космічного агентства України,
вул. Лешко-Попеля, 15, 49005, Дніпро, Україна; e-mail: sazinana@ukr.net

Мета роботи – розробка методичного підходу до кількісної оцінки рівня ризику збільшення витрат на розробку зразків космічної техніки.

Розглянуто технологію та математичні моделі для кількісної оцінки рівня ризику збільшення витрат на виконання дослідно-конструкторської роботи (ДКР) зі створення нових зразків космічної техніки. Основною причиною, що обумовлює ризик збільшення витрат на ДКР, є неповнота та неточність даних, які використовуються в процесі розрахунку очікуваних витрат. В якості міри ризику прийнята ймовірність того, що можливі витрати на реалізацію науково-технічного проєкту не перевищать критичної (для інвестора) величини.

Технологія оцінки рівня ризику побудована на методі статистичних випробовувань Монте-Карло, який закладений в імітаційну модель. В основі методу Монте-Карло лежить аналітико-ймовірнісна модель (детермінована математична модель та ймовірнісна модель даних з відомими законами (функціями) розподілу).

Унікальність, новизна та технічна складність зразків космічної техніки унеможливлюють побудову необхідної аналітико-ймовірнісної моделі. В статі описана математична модель, яка еквівалентна аналітико-ймовірнісній.

В статті приведено обґрунтування правомірності гомоморфного відображення можливісного простору випадкових величин на ймовірнісний простір, тобто запропонована модель в цьому випадку еквівалентна аналітико-ймовірнісній моделі.

Ключовою компонентою імітаційної моделі є математична модель вартості створення зразка космічної техніки. В основу вартісної моделі закладено метод покомпонентної аналогії відносно простих складових частин зразка космічної техніки, використання руху (знизу–вверх) по гілках зваженого орієнтованого деревовидного графа, який є моделлю технічної структури зразка космічної техніки, та методи нечіткої математики.

Запропонований методичний підхід може бути використаний при побудові імітаційної моделі для кількісної оцінки рівня ризику щодо зменшення величини корисного ефекту від експлуатації створюваного зразка, для цього потрібно лише замінити математичну модель вартості ДКР на математичну модель формування корисного ефекту.

Ключові слова: *аналітико-ймовірнісна модель, зразок космічної техніки, інвестиційний проєкт, метод статистичних випробовувань Монте-Карло, невизначеність даних, рівень ризику, функція розподілу ймовірностей, функція розподілу можливостей.*

The goal of this work is to develop a methodological approach to quantitative estimation of the risk of an increase in the cost of space hardware prototyping.

The paper considers a technology and mathematical models for quantitative estimation of the risk of an increase in the cost of a developmental work on space hardware prototyping. The main cause of the risk of development cost increase is that data used in expected cost estimation are incomplete and inaccurate. The risk level is estimated as the probability of the possible cost of an R&D project exceeding a critical (for the investor) value.

The risk estimation technology is constructed on the basis of the Monte Carlo method embedded in a simulation model. The Monte Carlo method is based on an analytico-probabilistic model (a deterministic mathematical model and a probabilistic model with known distribution functions (laws)).

The uniqueness, novelty, and technical complexity of space hardware prototypes do not allow one to construct any analytico-probabilistic model. This paper presents a mathematical model equivalent to an analytico-probabilistic one.

The paper substantiates the appropriateness of a homomorphic mapping of a possibilistic space of random variables into a probabilistic space; i.e. in this case the proposed model is equivalent to an analytico-probabilistic one.

The key component of the simulation model is the mathematical model of the development cost of a space hardware prototype. The cost model is based on a component-by-component analogy for relatively simple components of the space hardware prototype, moving (upward) along the weighted oriented tree graph that models the engineering structure of the space hardware prototype, and fuzzy methods.

The proposed methodological approach may be used in the construction of a simulation model for quantitative estimation vc of the risk of a decrease in the efficiency of use of the prototype under development. To do this, it will be sufficient to replace the mathematical model of development cost with a mathematical model of expected efficiency.

Keywords: *analytico-probabilistic model, space hardware prototype, investment project, Monte Carlo method, data uncertainty, risk level, probability distribution function, possibility distribution function.*

Прийняття рішення щодо включення до складу державної цільової програми складного науково-технічного (а значить високовартісного) проєкту базується на двох інтегральних показниках [1], [2]:

– економічна доцільність (величина очікуваного чистого дисконтованого доходу та очікуваний термін окупності) – для проєктів цивільного призначення або техніко-економічна доцільність (величина очікуваного коефіцієнта вигоди-затрат (відношення корисного ефекту до витрат) та очікувана технічна ефективність створюваного зразка нової техніки) – для проєктів військового та подвійного призначення;

– очікуваний рівень гарантії успішної технічної реалізації проєкту для заданих технічних (для проєктів цивільного призначення) або тактико-технічних (для проєктів військового та подвійного призначення) характеристик та обмеженнях на часовий ресурс. Рівень гарантії успішної технічної реалізації проєкту залежить перш за все від таких факторів, як стан наявних виробничої та експериментальної баз, гарантійного доступу до високотехнологічних комплектуючих виробів та конструкторських матеріалів, наявності відповідних фахівців необхідної кваліфікації.

Оцінка очікуваного рівня гарантії успішної реалізації проєкту є достатньо складною задачею, але в той же час набагато простішою, ніж задача коректної (якісної) оцінки значень очікуваних техніко-економічних показників (вартість (Vt), корисний ефект (KE), технічна ефективність (k_{TE})).

Складність задачі забезпечення коректного розрахунку техніко-економічних показників Vt, KE та k_{TE} визначається перш за все тим, що при розрахунках цих показників використовуються початкові дані (ретроспективні та прогнозні) з високим рівнем невизначеності (об’єктивний фактор) та використанням занадто спрощених методик розрахунків (суб’єктивний фактор).

На практиці розрахунки очікуваних показників Vt, KE та k_{TE} вважаються коректними, якщо фактична вартість дослідно-конструкторської роботи (ДКР) $Vt_{ф}$ не перевищує 15 % величини очікуваної вартості Vt_{o}, а технічна ефективність практично не знижується [3].

Проте не поодинокі випадки, коли показники Vt та KE погіршуються на (100 – 200) % [2]. Тому в процесі проведення техніко-економічного обґрунтування науково-технічного проєкту необхідно поряд з розрахунком очікуваних (номінальних) показників проводити оцінку ризику їх погіршення. В теорії прийняття рішень за величину ризику прийнято вважати величину небажаного відхилення фактичного результату від очікуваного. Для показника вартість ДКР величина ризику визначається як $Vt_{ф} - Vt_{o}$. Слід зазначити, що величина ризику не є детермінованою величиною.

Метою даної статті є викладення розробленого авторами методичного підходу до вирішення задачі коректного оцінювання ризику збільшення витрат на створення нових зразків космічної техніки.

Розробка методичного підходу до вирішення задачі коректного оцінювання ризику зменшення корисного ефекту від використання нових зразків космічної техніки є предметом іншої статті.

1. Вербальна постановка задачі.

Задано:

– функціональне призначення зразка космічної техніки (КТ);
– технічна структура зразка у формі схеми поділу зразка на складові частини у відповідності до вимог стандартів й ЕСКД до рівня найпростіших виробів, для яких оформляється формуляр або паспорт;
– тактико-технічні характеристики (основні) кожного виробу, що включений до схеми поділу;
– техніко-економічні показники виробів-аналогів для кожного зразка схеми поділу;
– склад робіт (основних) для кожного зразка та визначеного складу етапів ДКР.

Загальноприйнята дефініція терміну "рівень ризику" на сьогодні в науковій літературі, і тим більш у нормативних документах, відсутня [4]. Тому при вирішенні поставленої задачі доцільно використовувати визначення терміну, що приведене в [1].

У відповідності з [1] рівень ризику R_p приймає форму кортежу, що має наступний вигляд:

$$R_p = \left\langle Vt_o, \Delta Vt_к, P_p \right\rangle, \ \Delta Vt_к = Vt_к - Vt_o, \ P_p = P\ ((Vt_ф - Vt_o) > \Delta Vt_к),$$

де $\Delta Vt_к$ – допустиме критичне відхилення можливих фактичних витрат від планового значення Vt_o; P_p – ймовірність того, що фактичне значення $Vt_ф$ перевищить критичне значення фактичної вартості $Vt_к = Vt_o + \Delta Vt_к$. За ймовірність в даному випадку приймається міра можливості.

Необхідно визначити:

– метод кількісної оцінки рівня ризику;
– технологію розрахунку рівня ризику з використанням комп'ютерної техніки;
– математичні моделі для кожного компонента технології в формі, зручній для програмування на комп'ютері.

2. Вибір методу кількісної оцінки рівня ризику.

Станом на сьогодні в теорії прийняття рішень використовуються наступні методи [5]:

– статистичний (ймовірнісний). Розрахунки по цьому методу здійснюються відповідно до принципів теорії ймовірностей. Імовірність виникнення втрат визначається на основі статистичних даних попереднього періоду із встановленням області (зони) ризиків, достатності інвестицій, коефіцієнта ризиків (відношення очікуваного прибутку до обсягу всіх інвестицій у проєкт);

– метод експертних оцінок. Метод застосовується у разі відсутності чи недостатнього обсягу вихідної інформації та полягає у залученні експертів для оцінки ризиків. Відібрана група експертів оцінює проєкт та його окремі процеси за рівнем ризиків;

– метод аналізу чутливості проєкту. Цей метод дозволяє оцінити, як змінюються результуючі показники реалізації проєкту за різних значень заданих змінних, необхідних для розрахунку;

– аналіз сценаріїв розвитку проєкту. Метод передбачає розробку кількох варіантів (сценаріїв) розвитку проєкту та їхню порівняльну оцінку. Розраховуються песимістичний варіант (сценарій) можливої зміни змінних, оптимістичний та найімовірніший варіант;

– ігрове моделювання. Метод ігрового моделювання застосовується у разі, якщо існує безліч варіантів сценаріїв розвитку, але їх ймовірності не можуть бути достовірно оцінені;

– метод побудови дерева рішень проєкту. В основу цього покладено покрокове розгалуження процесу реалізації проєкту з оцінкою ризиків, витрат, збитків та вигод;

– імітаційні методи. Ці методи базуються на методі Монте-Карло та покроковому знаходженні значення результуючого показника за рахунок проведення багаторазових випробувань з формальною моделлю. В основі імітаційного методу лежить аналітико-ймовірнісна модель. Одним із серйозних недоліків методу імітаційного моделювання є суттєві витрати на розрахунки, пов'язані з великим обсягом вихідної інформації. Крім того, практичне використання такого методу потребує значних трудових витрат на розробку програмного забезпечення та формування бази даних;

– методи нечітко-множинного аналізу в оцінці ризиків. У цих методах замість розподілу ймовірності застосовується розподіл можливості, що описується функцією належності нечіткого числа. Їх використання передбачає формалізацію вихідних параметрів та цільових показників ефективності проєкту (в основному чистий приведений (дисконтований) дохід – NPV [Net Present Value]) у вигляді вектора інтервальних значень (нечіткого інтервалу). Як окремий випадок до нечітко-множинних методів відносять інтервальний метод. Даний метод відповідає ситуаціям, коли досить точно відомі лише межі значень аналізованого параметра, в межах яких він може змінюватися, але при цьому відсутня будь-яка кількісна або якісна інформація про можливості або ймовірності реалізації різних значень всередині заданого інтервалу.

Майже всі з перерахованих методів, окрім методу чутливості та нечіткомножинного, потребують наявності ймовірнісних оцінок (статистичних чи суб'єктивних) початкових даних. З точки зору коректності визначення рівня ризику найбільш ефективним безумовно є метод імітаційного моделювання.

Можливості методу чутливості дуже обмежені в порівнянні з імітаційними методами, хоча на відміну від інших методів для цих методів наявні математичні моделі.

Жоден з перерахованих вище методів, окрім метода імітаційного моделювання, не задовольняє вимогам постановки задачі, але застосування методу імітаційного моделювання не забезпечене необхідними початковими даними: ймовірностями розподілу вхідних даних.

В якості методу кількісної оцінки рівня ризику (в розрізі постановки задачі) приймається метод Монте-Карло з заміною функцій ймовірностей розподілу вхідних даних функціями розподілу можливості. Правомірність такої заміни базується на теоретичних засадах, приведених в [6], [7]. Обґрунтування правомірності та алгоритм побудови функцій розподілу можливості приведено нижче.

Слід зазначити, що в відкритих джерелах інформації дані про практичне застосування та математичні моделі щодо імітаційного методу оцінки ризику не було виявлено, хоча задачі оцінки ризику присвячено значну кількість наукових статей, учбових посібників та монографій.

3. Технологічна схема розрахунку рівня ризику з використанням модифікованого методу Монте-Карло.

Технологія розрахунку рівня ризику являє собою склад та послідовність виконання необхідних операцій по обробці числових даних з метою визначення рівня ризику. Розрахунок рівня ризику приведено в формі послідовності блоків обчислювального процесу з використанням комп'ютерної техніки.

Основними блоками схеми обчислювального процесу є:

1. формування початкових даних;
2. задання N – необхідного числа варіантів комп'ютерного експерименту з визначення можливих значень величини $Vt_Ф$; присвоєння варіанту експерименту початкового значення $n=1$;
3. формування масиву рівномірно розподілених на інтервалі [0,1] випадкових величин у відповідності з міжнародним стандартом ISO 28640:2010 Random variate generation methods (Методи генерації випадкових чисел);
4. обчислення можливих значень випадкових величин для n-го варіанта експерименту з використанням методу Монте-Карло;
5. обчислення можливого значення випадкової величини $Vt_Ф$ для n-го варіанта експерименту, запис результату в базу даних комп'ютерного експерименту;
6. перевірка виконання умови $n=N$. Якщо умова виконується – перейти до операції 7, інакше – присвоїти $n=n+1$ та перейти до операції 4;
7. обробка результатів комп'ютерного експерименту;
8. формування кінцевих результатів комп'ютерного експерименту для змінних кортежу $R_p=\left\langle Vt_o, \Delta Vt_к, P_p \right\rangle$, $\Delta Vt_к = Vt_к - Vt_o$, $P_p = P\ ((Vt_ф - Vt_o) > \Delta Vt_к)$.

4. Склад та короткий опис основних математичних моделей, що використовуються про обчисленні рівня ризику.

4.1. Вартісна математична модель.

Приведена вартісна модель розрахунку вартості ДКР зі створення нових зразків космічної техніки на сьогодні є найбільш досконалою на всьому пострадянському просторі (а, можливо, і в світі) по критерію точність та технологічність в сенсі її реалізації у формі комп'ютерної програми [8].

Вартість ДКР зразка КТ складається з поетапних витрат для виконання робіт зі створення космічного апарата та його складових частин. Для компактного представлення вартісної моделі зразка КТ введемо два допоміжні математичні об'єкти: зважений орієнтований деревовидний граф $Gz(V,D)$, еквівалентний технічній структурі космічного апарата (де V – множина вершин, а D – множина дуг або ребер) та орієнтований деревовидний граф $Ge(E,W)$, еквівалентний структурі етапів та підетапів виконання ДКР (де E – множина вершин, W – множина дуг).

Технічна структура зразка КТ (як вхідні дані) задається у формі схеми поділу. Вершинам графа $Gz(V,D)$, у цьому випадку, будуть відповідати зразки (технічні вироби), з яких складається зразок КТ: системи (та еквівалентні їм вироби), підсистеми (та еквівалентні їм вироби), блоки (вузли), складові частини блоків (підвузли), відповідні їм макети (МА) та наземне допоміжне обладнання (NDO). Так, до складу виробів першого рівня у схемі поділу зразка КТ входять у ранзі систем: цільова апаратура (сканери, радіолокатори, транспондери) та наземне допоміжне обладнання (механічне, електричне, пневматичне).

Кореневій вершині графа $Gz(V,D)$ V_0 ставиться у відповідність зразок КТ (умовне позначення C_0). Вершинам першого (суміжного з кореневою вершиною V_0) ярусу V_i ставляться у відповідність системи (C_i), вершинам другого ярусу V_{ij} – підсистеми (C_{ij}), вершинам третього ярусу V_{ijk} – блоки або вузли (C_{ijk}) і так далі.

Кожна гілка графа $Gz(V,D)$ починається з кореневої вершини V_0 і закінчується вершиною-листком V_l (вершина, з якої не виходять дуги). Вершинам-листкам відповідають вироби, які є покупними або запозиченими, та нові вироби, для яких існує близький вітчизняний аналог.

Аналогічно будується граф $Ge(E,W)$. Кореневій вершині даного графа E_0 відповідає ДКР. Вершинам першого (суміжного з кореневою вершиною E_0) ярусу E_m ставляться у відповідність стадії: ескізне проєктування, технічне проєктування, розробка робочої документації, виготовлення й випробовування дослідних та льотного зразків.

Вершинам другого ярусу E_{mn} ставляться у відповідність етапи: розробка та випуск пояснювальної записки ескізного проєкту, розробка та лабораторні відпрацювання макетів найбільш складних компонентів блоків та вузлів, розробка та випуск пояснювальної записки технічного проєкту, розробка та лабораторні відпрацювання макетів найбільш складних блоків та вузлів, розробка конструкторської документації, розробка експлуатаційної документації, розробка технологічної документації, підготовка та проведення наземного експериментального відпрацювання складових частин та зразка КТ в цілому, виготовлення льотного зразка.

Вершинам третього ярусу E_{mnp} ставляться у відповідність підетапи: виготовлення та проведення випробовувань макетів зразка КТ, виготовлення та проведення автономних випробовувань експериментальних зразків складових частин систем зразка КТ, виготовлення та комплексні випробовування дослідних зразків систем зразка КТ та поставка їх для збирання інженерної моделі та проведення комплексних випробовувань на інженерній моделі зразка КТ, коригування та випуск конструкторської, експлуатаційної та технологічної документації, збирання льотного зразка КТ, заводські приймально-здавальні випробування льотного зразка КТ, підготовка до відправлення на космодром льотного зразка КТ.

Множина вершин $V(C)$ графа $Gi(V,D)$ включає технічні вироби, які виготовляються в процесі ДКР зразка КТ.

Кожному елементу декартового добутку множин $V(C) \times E = \{V_m(C), E_k\}$ можна поставити у відповідність уніфікований блок вартісної моделі (рівняння (1) – (10)):

$$Vt_e(C) = \sum_q (VtR_{e,q}(C) + VtM_{e,q}(C) + VtPKV_{e,q}(C)) + \Delta Vt_e(C), \quad q \in Q(C,E), \qquad (1)$$

$$VtR_{e,q}(C) = TR_{e,q}(C) \cdot Q_{BP}(C), \qquad (2)$$

$$TR_{e,q}(C) = TR^a_{e,q}(C) \cdot K_H\left(R_{e,q}(C)\right) \cdot K_{СЛ}\left(R_{e,q}(C)\right) \cdot K^{-1}_{AB}\left(R_{e,q}(C)\right), \qquad (3)$$

$$VtM_{e,q}(C) = \sum_p (K(M_{e,q,p}) \cdot Ц(M_p)), \quad p = \overline{1, P_M}, \qquad (4)$$

$$VtPKV_{e,q}(C) = \sum_n (K(PKV_{e,q,n}) \cdot Ц(PKV_n)), \quad n = \overline{1, N_{PKV}}, \qquad (5)$$

$$\Delta Vt_e(C) = \sum_{n=1}^{\deg(C)-1} (Vt_e(C_d)), \qquad (6)$$

$$K_H(C_H) = f(C_H) = \frac{b^{*2} - a^{*2} + n^{*2} - m^{*2} + b^* \cdot n^* - a^* \cdot m^*}{3(b^* - a^* + n^* - m^*)},$$
$$q = \{a, m, n, b\} \xrightarrow{f} \{a^*, m^*, n^*, b^*\}, \qquad (7)$$
$$q^* = \exp(\alpha(q - C^\alpha_H) \cdot 10^{-2}),$$

$$K_{СЛ}(C) = \varphi(C) = \frac{d^{*2} - c^{*2} + s^{*2} - p^{*2} + d^* \cdot n^* - c^* \cdot p^*}{3(d^* - c^* + s^* - p^*)},$$
$$g = \{c, p, s, d\} \xrightarrow{\varphi} g^* = \{c^*, p^*, s^*, d^*\}, \qquad (8)$$
$$g^* = \left(\frac{1 - K^a_{ТУ}(C\ \ )}{1 - K_{ТУ}(C)}\right)^g.$$

$$Q_{BP}(C) = ZP_{CM}(C) \cdot (1 + \delta_{БЮ} + K_{HP}(C)) \cdot (1 + \delta_{ППР}(C)) \cdot (1 + \delta_{НДС}(C)), \qquad (9)$$

$$K_{AB} = \frac{TR^0_{e,q}}{TR^+_{e,q}}, \qquad (10)$$

де C – узагальнений зразок (виріб), що приймає одне зі значень множини $V(C)$; e – узагальнений етап, що приймає одне зі значень множини E; C_d – виріб, який безпосередньо входить до складу виробу C (вершина в графі $Gz(V,D)$, суміжна з вершиною C, та нижча від неї за рівнем ієрархії); $\deg(C)$ – степінь вершини у графі $Gz(V,D)$, яка відповідає виробу C.

У формулі (6) $\Delta Vt_e(C) = 0$, якщо виріб C є вершиною-листком у графі $Gi(V,D)$, тобто $\deg(C) = 1$.

Для спрощеної моделі вартості коефіцієнти K_H, $K_{СЛ}$ та K_{AB} є чіткими величинами, а для імітаційної моделі ці коефіцієнти є нечіткими величинами і будуть позначатися $\tilde{K}_H$, $\tilde{K}_{СЛ}$ та $\tilde{K}_{AB}$ та обраховуватись за іншими математичними співвідношеннями.

В формулах (1) – (9) використовуються базові змінні величини:

$Vt_e(C)$, $VtR_{e,q}(C)$, $VtM_{e,q}(C)$, $VtPKV_{e,q}(C)$, $TR_{e,q}(C)$, $TR^a_{e,q}(C)$, $Q_{BP}(C)$, $K_H\left(R_{e,q}(C)\right)$, $K_{СЛ}\left(R_{E,q}(C)\right)$, $K_{AB}\left(R_{e,q}(C)\right)$, $K(M_{e,q,p})$, $Ц(M_p)$, $K(PKV_{e,q,n})$, $Ц(PKV_n)$.

Зміст базових змінних економічного типу:

$Vt_e(C)$ – повна вартість з урахуванням матеріалів і покупних комплектуючих виробів (ПКВ) групи (комплексу) взаємозв'язаних робіт $\{R_{e,q}\}$;

$VtR_{e,q}(C)$ – чиста вартість роботи без урахування матеріалів і ПКВ $R_{e,q}$ (q-ї роботи етапу (підетапу) E по виробу C);

$TR_{e,q}(C)$, $TR^a_{e,q}(C)$ – трудомісткість (люд. місяць) роботи $R_{e,q}$ по виробу C, та по виробу-аналогу C відповідно;

$Q_{BP}(C)$ – середньомісячний виробіток на одного працівника на підприємстві-розробнику узагальненого виробу C;

$VtM_{e,q}(C)$ і $VtPKV_{e,q}(C)$ – загальна вартість матеріалів і покупних комплектуючих виробів, необхідних для виконання $R_{e,q}(C)$ відповідно;

$K(M_{e,q,p})$ і $Ц(M_p)$ – кількість матеріалу марки p, необхідного для виконання роботи $R_{e,q}(C)$ і ціна одиниці виміру цього матеріалу відповідно ($p=\overline{1,P_M}$, P_M – число марок матеріалів, необхідних для виконання роботи $R_{E,q}(C)$);

$K(PKV_{e,q,n})$ і $Ц(PKV_n)$ – кількість ПКВ типу n, необхідних для виконання роботи $R_{e,q}(C)$ і ціна одиниці цього ПКВ відповідно ($n=\overline{1,N_{PKV}}$, N_{PKV} – число типів ПКВ, необхідних для виконання роботи $R_{e,q}(C)$).

Фізичний зміст базових змінних технічного типу:

$K_H\left(R_{e,q}(C)\right)$ – коефіцієнт відносної новизни конструкції узагальненого виробу C по відношенню до виробу-аналога з прив'язкою до виду роботи $R_{e,q}(C)$;

$K_{СЛ}\left(R_{e,q}(C)\right)$ – коефіцієнт відносної технічної складності узагальненого виробу по відношенню до виробу-аналога з прив'язкою до виду роботи $R_{e,q}(C)$;

$K_{AB}\left(R_{e,q}(C)\right)$ – коефіцієнт відносного рівня автоматизації роботи $R_{e,q}(C)$ по відношенню до аналогічної роботи ДКР виробу-аналога. Параметр $R_{e,q}(C)$ є нечіткою числовою величиною.

Індекс q, що входить до складу базових змінних, означає порядковий номер роботи, яка виконується в процесі ДКР узагальненого виробу C на узагальненому етапі (підетапі) робіт E, та належить множині $Q(C,e)$, $q \in Q(C,e) = (q_1, q_2, ..., q_{N_c})$.

Опис параметрів $a_к, m_к, n_к, b_к$ та $c,\ p,\ s,\ d$ приведено в п. 4.2.2

У формулі (10) $TR^0_{e,q}$ – трудомісткість виконання роботи $R_{e,q}$ до впровадження засобів автоматизації; $TR^+_{e,q}$ – трудомісткість виконання роботи $R_{e,q}$ після впровадження засобів автоматизації.

4.2. Математична модель для побудови функції розподілу можливих значень випадкових величин.

4.2.1. Обґрунтування правомірності заміни в імітаційній моделі функцій розподілу ймовірностей на функції розподілу можливостей випадкових величин.

В основі імітаційних моделей лежить аналітично-ймовірнісні моделі. Для виконання поставленої задачі потрібно вирішити задачу заміни аналітично-ймовірнісної моделі на еквівалентну аналітично-можливісну. Для цього необхідно обґрунтувати правомірності заміни функції розподілу ймовірностей на функції розподілу можливостей випадкових величин.

Міра можливості (як і ймовірнісна міра) приймає значення на числовому інтервалі [0,1], але не має частотно-статистичних властивостей. Хоча міра можливостей не має подійно-частотної інтерпретації, але дозволяє оцінити реальність появи події, виходячи із наявності обмеженої кількості дослідних фактів, прийнятих гіпотез та логічних міркувань.

Формально міра можливостей P_{os} події A_i може бути записана наступним чином [6]:

$$P_{os}(A_i) := F(\Omega) \to [0{,}1],\ A_i \subset \Omega,\ \Omega = (\bigcup_{i=1} A_i) \cup \varnothing,\ P_{os}(\Omega) = 1,\ P_{os}(\varnothing) = 0,$$

де Ω – множина всіх можливих подій, включаючи порожню множину $\varnothing$; $F(\Omega)$ – відображення елементів множини Ω на замкнутий інтервал $[0{,}1]$.

Кожній події A_i ставиться у відповідність число $0 \le P_{os}(A_i) \le 1$.

Теорія можливостей побудована на наступних основних аксіомах [6]:

1) аксіома монотонності по включенню – якщо подія A призводить до появи події B (тобто $A \subseteq B$), тоді виконується умова:

$$P_{os}(A) < P_{os}(B). \tag{11}$$

Формальне представлення цієї аксіоми в теорії ймовірностей еквівалентне виразу (11);

2) аксіома об'єднання:

$$\forall A \quad i \quad \forall B \subset \Omega \Rightarrow P_{os}(A \bigcup B) \ge \max\{P_{os}(A), P_{os}(B)\}. \tag{12}$$

Формальне представлення цієї аксіоми в теорії ймовірностей не еквівалентне виразу (12) и має наступний вигляд:

$$P_r(A \bigcup B) = P_r(A) + P_r(B) - P_r(AB);$$

3) аксіома перетину:

$$\forall A \;\; i \;\; B \in \Omega \Rightarrow P_{os}(A \cap B) \le \min\{P_{os}(A), P_{os}(B)\}. \qquad (13)$$

Формальне представлення цієї аксіоми в теорії ймовірностей не еквівалентне виразу (13) та має наступний вигляд:

$$P_r(A \cap B) = P_r(A) \cdot P_r(B)\,;$$

4) аксіома позитивності міри:

$$P_{os}(A) \ge 0\,. \qquad (14)$$

Формальне представлення цієї аксіоми в теорії ймовірностей еквівалентне виразу (14);

5) аксіома об'єднання двох протилежних подій A та $\overline{A}$:

$$P_{os}(A \cup \overline{A}) \ge 1\,. \qquad (15)$$

Формальне представлення цієї аксіоми в теорії ймовірностей не еквівалентне виразу (15) та має наступний вигляд:

$$P_r(A \cup \overline{A}) = 1\,.$$

У роботах [6], [7] доведено, що теорія ймовірностей є окремим випадком теорії можливостей. Тоді, використовуючи умови (13) – (15), можна мінімізувати відмінність теорії ймовірностей та теорії можливостей.

З виразу (14) випливає, що нижньою межею величини $P_{os}(A \cup B)$ є величина $\max\{P_{os}(A), P_{os}(B)\}$, а верхньою межею – величина $P_{os}(A) + P_{os}(B)$ при $A \cap B = \varnothing$.

З виразу (15) випливає, що верхньою межею величини $P_{os}(A \cap B)$ служить $\min\{P_{os}(A), P_{os}(B)\}$, а нижньою межею величина $P_{os}(A) \cdot P_{os}(B)$.

Нижня межа виразу (15) $P_{os}(A \cup \overline{A})$ дорівнює 1.

З урахуванням наведених верхніх та нижніх меж вираз (14), (15) можна привести до виду:

$$\begin{gathered} P_{os}(A \cup B) \le P_{os}(A) + P_{os}(B)\,, \\ P_{os}(A \cap B) \ge P_{os}(A) \cdot P_{os}(B)\,, \\ P_{os}(A \cup \overline{A}) = 1\,. \end{gathered} \qquad (16)$$

З рівнянь (13) та (16) випливає, що функція розподілу можливостей може бути досить близькою до функції розподілу ймовірностей, тобто:

$$P_{os}(A) - P_r(A) \approx 0\,. \qquad (17)$$

Умову (17) можна вважати коректною, якщо немає вимоги, щоб значення ймовірності належало до елементарних подій [6].

До наведеного теоретичного обґрунтування слід відзначити, що в імітаційній моделі не використовуються теоретико-множинні операції об'єднання та перетину.

Отже можливісний простір випадкових (нечітких) величин правомірно гомоморфно відобразити на ймовірнісний простір. При відображенні аналітико-ймовірнісна модель буде еквівалентна аналітико-можливісній на полі алгебраїчних операцій. З еквівалентності моделей випливає еквівалентність функції розподілу ймовірностей та функції розподілу можливостей.

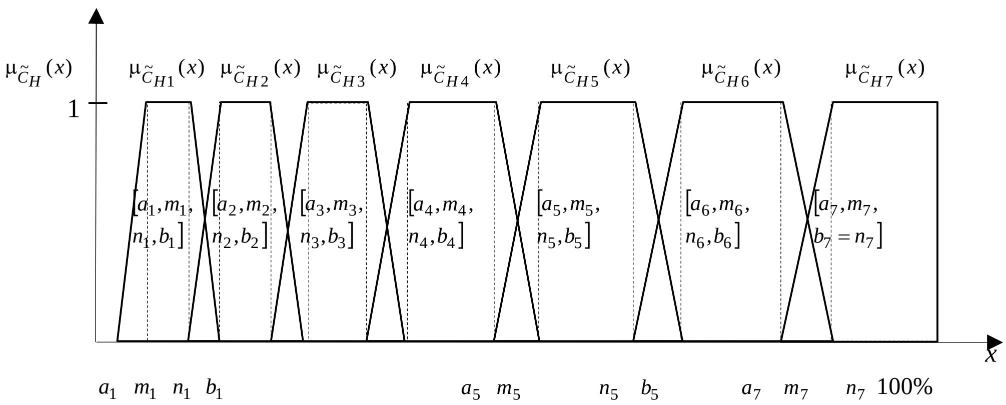
4.2.2. Склад та математичні моделі нечітких даних, що використовуються у вартісній моделі.

До нечітких даних належать нечіткі числові дані та лінгвістичні змінні [9].

Нечіткість початкових даних являється основною причиною того, що фактичні техніко-економічні показники науково-технічних проєктів і, зокрема, вартість проєкту зі створення нових зразків КТ будуть теж невизначеними величинами, які можна інтерпретувати як випадкові величини з невідомими законами розподілу. Побудовану функцію приналежності $\mu_A(x)$ будемо використовувати надалі як якісну міру того, що нечітка числова величина A набуде значення $A = x$ з рівнем можливості $\mu_A(x = A)$.

В приведеній математичній моделі для розрахунків вартості ДКР зразка КТ (вартісна модель) використовується нечітка лінгвістична змінна "степінь новизни конструкції" (C_H), яка складається з семи термів ($C_1 - C_7$). Кожному терму відповідає своя функція належності. Також до складу вартісної моделі може входити від 1000 до 10000 (в залежності від кількості нових виробів в складі зразка КТ згідно зі схемою поділу) нечітких числових величин, якими є коефіцієнти технічної складності конструкції ($K_{СЛ}$) та значна кількість коефіцієнтів рівня автоматизації (K_{AB}) найбільш важливих та складних робіт, що будуть виконуватись в процесі виконання ДКР.

Геометрична форма закладених в математичну модель функцій належності приведена на рис. 1 та рис. 2.



$$\mu_{\tilde{C}_{H0}}(x = 0) = 1;\ \mu_{\tilde{C}_{H0}}(x > 0) = 0$$

Рис. 1 – Графік функції належності лінгвістичної змінної "новизна розробки"

Приведена на рис. 1 функція належності лінгвістичної змінної "новизна розробки" є функцією розподілу можливості, а точніше, впевненості Головного розробника зразка КТ, що нечітко визначена величина "новизна розробки" прийме конкретне значення на нечіткому інтервалі $[a_к, m_к, n_к, b_к]$. Сегмент $(m_к, n_к)$ є інтервалом, в якому найбільш можливе знаходження значення параметра "ступінь новизни розробки", а величини $(m_к - a_к)$ та $(b_к - n_к)$ є оцінкою розмитості меж сегменту $(m_к, n_к)$. Нечіткому інтервалу відповідає трапецієподібна функція належності. Побудова такої функції належності (визначення параметрів $a_к, m_к, n_к, b_к$) є достатньо простою задачею для досвідченого проєктанта (в умовах наявності навіть обмеженого об'єму, але достатньо коректних фактичних даних щодо 2 – 3 аналогічних розробок).

Використання трапецієподібної функції належності, показаної на рис. 1 та рис. 2, значно спрощує побудову математичного виразу функцій належності для нечітких числових величин. Математична форма функцій належності має в цьому випадку такий вигляд:

$$\mu_{\tilde{C}_{Нк}}(x) = [a_к, m_к, n_к, b_к](x) = \begin{cases} 0, & якщо \quad x < a_к \\ \dfrac{x - a_к}{m_к - a_к}, & якщо \quad a_к \le x \le m_к \\ 1, & якщо \quad m_к < x < n_к \\ \dfrac{b_к - x}{b_к - n_к}, & якщо \quad n_к \le x \le b_к \\ 0, & якщо \quad x > b_к \end{cases},$$

$$\tilde{C}_{Нк} \subset X = [0;100], \quad к = \overline{1,7}.$$

З урахуванням практичного досвіду [3] побудована складна, але достатньо адекватна двопараметрична функція:

$$\tilde{K}_H(\tilde{C}_H) = \exp(\alpha \times (\tilde{C}_H - C_H^a)/100), \tag{18}$$

де $\tilde{K}_H$ – нечітке значення величини K_H; α – параметр, який залежить від типу (класу) зразка КТ, визначається з використанням статистичних даних.

В стислій узагальненій формі

$$\tilde{K}_H(\tilde{C}_H) = f(\tilde{C}_H). \tag{19}$$

Принцип узагальнення Заде для нечітких множин дозволяє використання чітких функцій (відображень) f від нечітких змінних [9]. Так як у виразі (18) величина C_H є нечітким числом, то K_H є також нечіткою величиною [9]:

$$f : X \longrightarrow Y; \quad y = f(x); \quad \tilde{C}_H \subset X = [0;100];$$
$$\tilde{K}_H \subseteq Y = [y_{\min}; y_{\max}];$$
$$y_{\min} = f(a_k); \; y_{\max} = f(b_k).$$

У формулі (18) параметр $\alpha > 0$, тому відповідна формулі (19) функція $f(x)$ є безперервною строго зростаючою однозначною функцією на проміжку $[a_к, b_к]$, а значить існує обернена до неї однозначна функція $x = f^{-1}(y)$.

Функція належності нечіткого числа $\tilde{K}_H$ згідно з [9] має наступний вигляд:

$$\mu_{\tilde{K}_H}(y) = \mu_{\tilde{C}_H}(x) = \mu_{\tilde{C}_H}(f^{-1}(y)).$$

Тоді

$$\tilde{K}_H(\tilde{C}_H) = f(\tilde{C}_H) = f(\int_{x \in X} \mu_{\tilde{C}_H}(x)/x) = \int_{y \in Y} \mu_{\tilde{C}_H}(f^{-1}(y))/y).$$

Знак $\int$ означає безперервність функцій належності $\mu_{\tilde{C}_H}(x)$ та $\mu_{\tilde{K}_H}(y)$.

Значення параметра α найбільш зручно визначити із відомого співвідношення трудомісткостей розробки конструкторської документації зразків-аналогів.

По аналогії з [3] коефіцієнт складності $K_{СЛ}$ може бути виражений показовою функцією від ТТХ нового зразка

$$K_{СЛ}(C) = \left(\frac{1 - K_{ТУ}(C^{(a)})}{1 - K_{ТУ}(C)} \right)^{\beta} .$$

При цьому $K_{ТУ}(C) \le 0{,}99$, а $K_{ТУ}(C^{(a)}) \le K_{ТУ}(C)$.

В стислій узагальненій формі

$$K_{СЛ}(C) = \varphi(\beta) , \qquad (20)$$

де $K_{ТУ}(C)$ та $K_{ТУ}(C^{(a)})$ – показники технічного рівня відповідно нового зразка та його аналога.

В формулі (20) показник β є нечітким числом на нечіткому інтервалі $[c, p, s, d]$. Параметри c, p, s, d залежать тільки від типу зразка КТ і визначаються Головним розробником зразка КТ за межами вартісної моделі. Значення параметрів c, p, s, d найбільш зручно визначити з відомого співвідношення трудомісткостей автономних (комплексних) випробовувань зразків-аналогів. Показники $K_{ТУ}(C)$ та $K_{ТУ}(C^{(a)})$ обчислюються за окремою методикою.

Функція належності нечіткого числа $\tilde{\beta}$ має вигляд:

$$\mu_{\tilde{\beta}}(u) = [c, p, s, d](u) = \begin{cases} 0, & якщо \quad u < c \\ \dfrac{u-c}{p-c}, & якщо \quad c \le u \le p \\ 1, & якщо \quad p < u < s \\ \dfrac{d-u}{d-s}, & якщо \quad s \le u \le d \\ 0, & якщо \quad u > d \end{cases}$$

$$\tilde{\beta} \subseteq U = [0; \beta_{\max}], \quad \beta_{\max} < 2 \text{, [3].}$$

Графік функцій належності $\mu_{\tilde{\beta}}(u)$ приведено на рис. 2.

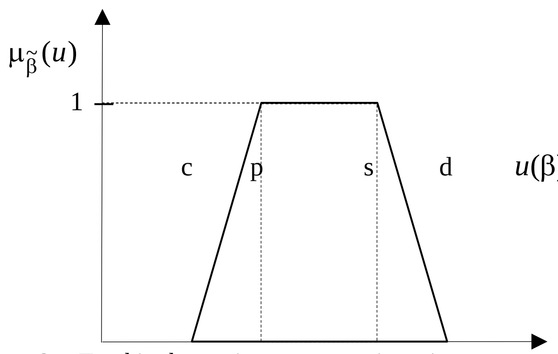


Рис. 2 – Графік функції належності нечіткої величини $\tilde{\beta}$

Функція φ відображає множину U в множину V :

$$\varphi : u \longrightarrow V \ ; \ V = \left[\varphi(c), \varphi(d)\right].$$

Функція належності нечіткого числа $K_{СЛ}$ згідно з [9] має вигляд:

$$\mu_{\tilde{K}_{СЛ}}(v) = \mu_{\tilde{\beta}}(u) = \mu_{\tilde{\beta}}(\varphi^{-1}(v)) \ .$$

Тоді

$$\tilde{K}_{СЛ}(v) = \varphi(\tilde{\beta}) = \int\limits_{v \in V} \mu_{\tilde{\beta}}(\varphi^{-1}(v)) / v \ .$$

4.2.3. Обґрунтування структури та параметрів функції розподілу можливих значень випадкових величин.

Функції розподілу можливих значень випадкових величин будуються на основі функції належності $\mu_{\tilde{A}}(x)$ нечітких числових величин таким чином, щоб відповідні їй випадкові значення можна було генерувати програмним способом на комп'ютері з використанням стандартизованої методики. В свою чергу, функція $\mu_{\tilde{A}}(x)$ будується за даними експертних оцінок нечіткості значень величин, які в принципі піддаються вимірюванню.

В якості відправних положень для визначення структури та параметрів функції розподілу можливих значень випадкових величин прийнято:

– математичне моделювання нечіткості проводиться стосовно техніко-економічних параметрів, які обмежені і знизу, і зверху;

– функція розподілу повинна бути гнучкою, тобто покривати широкий спектр найбільш використовуваних на практиці функцій розподілу випадкових величин;

– процес побудови функції розподілу повинен бути максимально формалізованим і спрощеним та забезпечувати мінімальні затрати зусиль експертів при побудові функції належності.

В найбільшій мірі цим вимогам відповідає стандартна бета-функція $f(x, \alpha, \beta) = \dfrac{(\alpha + \beta + 1)!}{\alpha! \cdot \beta!} x^{\alpha} (1 - x)^{\beta}$, $0 < x < 1$, $\alpha, \beta \geq -1$ та трапецієподібна функція належності.

Варіюванням параметрами α і β можна будувати практично майже всі стохастичні розподіли, які використовуються на практиці [10]. Для побудови бета-функції існує міжнародний стандарт ISO 28640:2010.

Примітка: Від інтервалу $[0,1]$ простим лінійним перетворенням легко перейти до будь-якого інтервалу $[a, b]$.

Використовується трапецієподібна функція належності виду:

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \left[a, m, n, b\right](x) = \begin{cases} 0, & якщо \quad x < a \\ \dfrac{x - a}{m - a}, & якщо \quad a \leq x \leq m \\ 1, & якщо \quad m < x < n \\ \dfrac{b - x}{b - n}, & якщо \quad n \leq x \leq b \\ 0, & якщо \quad x > b \end{cases}.$$

На основі значень параметрів $[a, m, n, b]$, які визначають функцію належності $\mu_{\tilde{A}}(x)$ нечіткої величини, достатньо легко обчислюються параметри бета-функції α і β за наступним правилом:

– нормована функція належності $\mu_{\tilde{A}}(x)$ фактично відображає функцію розподілу можливих значень нечіткої (можливої) величини, але автоматична (комп'ютерна) генерація можливих значень нечіткої величини є дуже складною в реалізації. Тому нормовану функцію належності доцільно замінити на еквівалентну функцію, автоматична генерація даних для якої вже реалізована в формі комп'ютерної програми;

– для нормованої функції $\mu_{\tilde{A}}(x)$ знайти відповідні параметри: математичне очікування, моду, дисперсію;

– за визначеними для нормованої функції належності параметрами знаходяться параметри α і β еквівалентної бета-функції.

Математична модель та технологія програмної генерації випадкових величин з використанням комп'ютера приведені в міжнародному стандарті ISO 28640:2010.

5. Метод обчислення рівня ризику можливого збільшення витрат на розробку нового зразка космічної техніки.

За результатами проведення модельних комп'ютерних експериментів з використанням імітаційної моделі буде сформовано масив з N ($N \approx 1000$) випадкових чисел, які відображають можливі витрати на виконання ДКР зі створення нового зразка космічної техніки.

Виходячи з обґрунтування, що функція розподілу можливостей достатньо близька до функції розподілу ймовірнісних величин, масив даних N випадкових чисел можна вважати за статистичну вибірку. Це робить правомірним для їх обробки використання методів математичної статистики, наприклад, методів, приведених в [11].

Для заданих значень очікуваних планових витрат Vt_o на ДКР та допустимої величини можливих критичних витрат $Vt_к$ визначається рівень ризику R_p в формі кортежу:

$$R_p = \langle Vt_o, \Delta Vt_к, P_p \rangle, \quad \Delta Vt_к = Vt_к - Vt_o .$$

Висновки

Імітаційний метод є найбільш точним серед всіх існуючих методів кількісної оцінки ризиків інвестиційних проєктів, але, разом з тим, цей метод є найбільш складним в сенсі розробки для нього математичних моделей та його практичного використання. Це обумовлено тим, що в основі імітаційного методу лежить аналітико–ймовірнісна модель, яка повинна бути перетворена в комп'ютерну програму. Окрім того, цей метод потребує використання значного обсягу статистичних даних з відомими законами (функціями) розподілу.

У відкритих джерелах інформації дані про практичне застосування та математичні моделі щодо імітаційного методу оцінки ризику не було виявлено, хоча задачі оцінки ризику присвячено значну кількість наукових статей, учбових посібників та монографій.

Запропонований авторами методичний підхід по суті є методикою кількісної оцінки ризику збільшення вартості на ДКР зі створення нових зразків космічної техніки з використанням імітаційного моделювання. В статті приведені всі необхідні для цього математичні моделі та описана відповідна технологія обчислювального процесу. Ключовою та найбільш складною компонентною імітаційної моделі є математична модель вартості. Приведена в статті математична модель є достатньо оригінальною в порівнянні з існуючими вартісними моделями. Оригінальність запропонованої вартісної математичної моделі полягає в такому: по-перше – вартість ДКР є сильно нелінійною (використовуються експоненціальні та показникові функції) функцією від значень тактико-технічних характеристик нового зразка космічної техніки, в існуючих моделях вартості використовується тільки лінійна залежність; по-друге – технічна структура зразка моделюється деревовидним орієнтованим та зваженим графом (з векторними показниками ваги дуг графа); по-третє – через відсутність достатнього обсягу достовірних статистичних даних математична модель вартості побудована з використанням нечітких, але цілком можливих даних. Для того щоб забезпечити правомірність використання таких даних в імітаційній моделі з використанням методу Монте-Карло в статті приведено обґрунтування еквівалентності функції розподілу ймовірностей та функції розподілу можливостей, а також приведено ефективний алгоритм побудови функції розподілу можливостей.

Запропонований методичний підхід може бути використаний при побудові імітаційної моделі для кількісної оцінки рівня ризику щодо зменшення величини корисного ефекту від експлуатації створюваного зразка космічної техніки. Для цього потрібно лише замінити математичну модель вартості ДКР на математичну модель формування корисного ефекту.

1. *Алпатов А. П., Марченко В. Т., Хорольський П. П., Сазіна Н. П.* Методологічні аспекти фінансово-економічного обґрунтування проєктів космічної техніки. Космічна наука і технологія. 2014. Т. 20. № 6. С. 49–59. https://doi.org/10.15407/knit2014.06.049
2. *Alpatov A. P., Marchenko V. T., Khorolsikyi P. P., Sazina N. P.* The Status and Directions for Improving the Regulatory and Procedural Framework for the Rocket and Space Technology Development in Ukraine. Sciens end Innovation. 2022. Vol. 18. № 1. P. 76–88.
3. *Малышев Г. В.* Проектирование автоматических космических аппаратов. Вероятностные методы анализа, Москва.: Машиностроение, 1982. С. 28.
4. *Быков А. А., Порфирьев Б. Н.* Об анализе риска, концепциях и классификации рисков. Проблемы анализа рисков. 2006. № 4. С. 319–337.
5. *Привалов Н. Г., Козловский А. Н., Петров В. Н.* Современный инструментарий количественного анализа и оценки рисков инновационных проектов. Записки Горного института. Т.197. Санкт-Петербург. 2012. С. 107–113.
6. *Дюбуа Д., Прад А.* Теория возможностей. Приложения к представлению знаний в информатике: пер. с фр. М.: Радио и связь, 1990. 288 с.
7. *Пытьев Ю. П.* Возможность как альтернатива вероятности. Математические и эмпирические основы, применение. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 464 с.
8. *Марченко В. Т., Петляк О. А., Сазіна Н. П., Хорольський П. П.* Методичний підхід до створення вітчизняної галузевої методики розрахунку вартості дослідно-конструкторських робіт зі створення космічних апаратів. Технічна механіка. 2021. № 3. С. 83–98. https://doi.org/10.15407/itm2021.03.083
9. *Штовба С. Д.* Введение в теорию нечетких множеств и нечеткую логику. URL: http://matlab.exponenta.ru/ fuzzylogic/index.php (дата звернення: 08.01.2022).
10. *Грицюк С. Н., Мирзоева Е. В., Лысенко В. В.* Математические методы и модели в экономике: учебник. Ростов н/Д: Феникс, 2007. 348 с.
11. *Кобзарь А. И.* Прикладная математическая статистика, для инженеров и научных работников. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 816 с.

Отримано 02.11.2022,
в остаточному варіанті 29.11.2022