



**Математичне моделювання,
обчислювальні методи, оптимальне
керування та дискретні структури**

Прийнято 19.06.2025. Прорецензовано 24.06.2025. Опубліковано 27.06.2025.

УДК 93518.1+620.1339:519.8

DOI: 10.31471/1993-9981-2025-1(54)-132-155

**КОМПЛЕКСНА МЕТОДИКА АНАЛІЗУ ТА РОЗВ'ЯЗАННЯ
НЕСТРУКТУРОВАНИХ БАГАТООБ'ЄКТНИХ ПРОБЛЕМ:
ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ТА ПРАКТИЧНА АПРОБАЦІЯ**

Леонтьєва В. В.*

Кандидат фізико-математичних наук, доцент
Запорізький національний університет
69600, вул. Університетська 66, м. Запоріжжя, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-9863-9712>
e-mail: vleonteva@np.znu.edu.ua

Кондратьєва Н. О.

Кандидат фізико-математичних наук, доцент
Запорізький національний університет
69600, вул. Університетська 66, м. Запоріжжя, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-6994-2536>
e-mail: nkondr@np.znu.edu.ua

Анотація. Об'єктом дослідження виступають неструктуровані якісно визначені багатооб'єктні проблеми аналізу, математичного моделювання та прийняття рішень. Метою роботи є розробка та обґрунтування комплексної методики аналізу та розв'язання неструктурованих якісно визначених багатооб'єктних проблем, що забезпечує можливість проведення ефективного аналізу та прийняття рішень в умовах високого рівня невизначеності, характерного для складних систем різної фізичної природи. Виконано розробку комплексної методики аналізу та розв'язання неструктурованих багатооб'єктних проблем, яка інтегрує системний аналіз та експертні методи, забезпечуючи ефективне перетворення якісних суджень у кількісні оцінки з урахуванням нерівномірної компетентності експертів за окремими критеріями, мінімізуючи при цьому вплив суб'єктивних факторів та забезпечуючи об'єктивну оцінку складності досліджуваної проблемної ситуації, що дозволяє вийти на якісно новий рівень точності та надійності при розв'язанні задач, здійснювати адекватне планування ресурсів та прогнозувати потенційні методологічні ризики ще на початковому етапі дослідження. Ключовими особливостями методики є: диференційоване зважування компетентності експертів, введення об'єктивної метрики складності проблеми (індекс складності), побудова математичної моделі інтегральної оцінки якості та ітеративний характер з можливістю адаптації. Методика складається з п'яти основних етапів: ідентифікація та структурування проблеми, збір експертних знань та оцінка компетентності, перетворення даних та побудова моделей, аналіз моделей і

Запропоноване посилання: Леонтьєва, В. В., & Кондратьєва, Н. О. (2025). Комплексна методика аналізу та розв'язання неструктурованих багатооб'єктних проблем: теоретичні засади та практична апробація. *Методи та прилади контролю якості*, 1(54), 132-155. doi: 10.31471/1993-9981-2025-1(54)-132-155

* Відповідальний автор



Copyright © The Author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

виведення рішення, валідація та інтерпретація результатів. Практична апробація методики здійснена на прикладі оцінки якості керамічного підшипника для високошвидкісного шпинделя прецизійного верстату. Результати дослідження демонструють ефективність методики для розв'язання технічних проблем у машинобудуванні, оцінювання інноваційних матеріалів та технологій, оптимізації виробничих процесів та управління ризиками складних інженерних систем.

Ключові слова: неструктурована проблема, багатооб'єктна проблема, експертні методи, системний аналіз, прийняття рішень, компетентність, індекс складності, інтегральна оцінка.

Вступ

Сучасний науково-технічний прогрес та зростаюча складність технічних систем призводять до виникнення якісно нових викликів у процесах аналізу, математичного моделювання та прийняття рішень. Дедалі частіше фахівці стикаються з так званими неструктурованими проблемами, де системні взаємозв'язки є невідомими або нечітко визначеними, а значна частина інформації має якісний, суб'єктивний або неповний характер [1]. Окреслені проблеми є ще й багатооб'єктними, оскільки вимагають одночасного розгляду та оптимізації великої кількості об'єктів, критеріїв оцінювання або цілей, що ускладнює пошук єдиного «найкращого» рішення [2-4]. У таких умовах традиційні кількісні методи аналізу, математичного моделювання та прийняття рішень виявляються недостатніми та часто неефективними через нестачу чітко визначених параметрів й об'єктивних вимірювань, неможливість адекватного врахування якісних аспектів та суб'єктивних експертних суджень, відсутність універсальних та надійних підходів до аналізу та розв'язання зазначених неструктурованих багатооб'єктних проблем, які вимагають ефективного перетворення якісних суджень у кількісні оцінки, мінімізуючи при цьому вплив суб'єктивних факторів та забезпечуючи об'єктивну оцінку складності. В такій постановці актуальність розвинення математичного інструментарію, спроможного до подолання окреслених складнощів, розробка та застосування ефективних методик для розв'язання зазначених неструктурованих проблем, зумовлені потребою прийняття обґрунтованих рішень в умовах невизначеності та обмеженості об'єктивних даних, стає на визначальне місце в сучасних наукових дослідженнях.

Розв'язання таких проблем є особливо важливим для інженерного проектування, діагностики складних механічних систем, оцінки якості інноваційних матеріалів та технологій, де домінуючими є якісні характеристики, що важко піддаються формалізації, а управлінські рішення безпосередньо впливають на ефективність виробничих процесів, якість продукції та конкурентоспроможність компаній. Актуальність розробки та застосування ефективних методик до розв'язання подібних технічних проблем зумовлена ще й зростанням складності технічних систем, збільшенням кількості альтернатив та критеріїв оцінювання, а також необхідністю забезпечення об'єктивності та надійності експертних висновків. З огляду на це розробка та обґрунтування універсальних та комплексних методик до аналізу та розв'язання неструктурованих багатооб'єктних проблем, що має значний потенціал для застосування у технічних галузях, має визначальне значення.

Мета роботи – розробка та обґрунтування комплексної методики аналізу та розв'язання неструктурованих якісно визначених багатооб'єктних проблем, що забезпечує можливість проведення ефективного аналізу та прийняття рішень в умовах високого рівня невизначеності, характерної для складних систем різної фізичної природи.

Аналіз закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій

Проблема аналізу та розв'язання неструктурованих багатооб'єктних задач із якісно визначеними характеристиками є предметом активного наукового дослідження протягом останніх десятиліть. Традиційні методи багатокритеріального аналізу рішень зосереджуються переважно

на кількісних показниках та структурованих проблемах [1, 5, 6], проте їх застосування до неструктурованих задач із переважанням якісної інформації залишається обмеженим. Багатокритеріальний аналіз рішень є підрозділом дослідження операцій, що явно оцінює множинні конфліктуючі критерії в прийнятті рішень, однак його ефективність знижується при роботі з якісними даними експертного походження.

Значний внесок у розвиток методології обробки якісної інформації зробили дослідження в галузі нечіткої логіки та експертних систем. Нечітка логіка широко визнана як інструмент з можливістю обчислення за допомогою слів для моделювання якісних процесів людського мислення при аналізі складних систем і рішень. Роботи [7, 8] заклали теоретичні основи для формалізації лінгвістичних змінних та нечітких множин, що дозволило перетворювати якісні експертні судження у кількісні оцінки. Подальші дослідження розвинули методи агрегації нечіткої інформації та операції над лінгвістичними змінними [9, 10]. Окремий напрямок досліджень присвячено розробці експертних систем для оцінювання якісних характеристик. Експертні системи оцінювання продуктивності на основі моделей нечіткої логіки використовують лінгвістичні мітки та регульовані числові значення для представлення неоднозначних концепцій, таких як неточність та суб'єктивність. В роботах [11, 12] запропоновано різні підходи до побудови систем нечіткого висновку, що знайшли широке застосування в технічних галузях.

У контексті багатооб'єктних проблем важливого значення набувають дослідження з теорії прийняття рішень за умов невизначеності. Роботи [13, 14] сформували концептуальні засади для аналізу множини ефективних рішень у багатокритеріальних задачах. Сучасні підходи запропонували різні стратегії для роботи з невизначеністю та конфліктуючими цілями в багатооб'єктних задачах [15-17]. Вітчизняні дослідження у

цій галузі представлені роботами з багатокритеріального аналізу складних систем [18-20], з нечітких технологій ідентифікації, прийняття рішень на основі нечітких моделей [21]. Водночас в роботах [22, 23] розроблено методи структуризації експертної інформації для технічних застосувань. Проте більшість цих підходів зосереджені на окремих аспектах проблеми і не забезпечують комплексного інструментарію для аналізу неструктурованих багатооб'єктних проблем. Закордонні дослідження останніх десятиліть демонструють зростаючий інтерес до гібридних підходів, що поєднують різні методології. Нечітка логіка є технікою з наближеним міркуванням, яка імітує процес прийняття рішень людиною та використовує лінгвістичні терміни для розробки причинно-наслідкових зв'язків між вхідними та вихідними змінними. Роботи [24, 25] розвивають інтегровані методи для обробки змішаної кількісно-якісної інформації в складних технічних системах.

Попри значні досягнення в окремих напрямках, аналіз літератури виявляє суттєві прогалини у розробці комплексних методологій для неструктурованих багатооб'єктних проблем. Існуючі підходи часто обмежуються або суто теоретичними розробками без практичної апробації, або вузькоспеціалізованими застосуваннями для конкретних галузей. Крім того, недостатньо розробленими залишаються питання валідації та верифікації результатів експертного оцінювання якісних характеристик в умовах високої невизначеності.

Таким чином, актуальність розробки комплексної методики аналізу та розв'язання неструктурованих якісно визначених багатооб'єктних проблем зумовлена необхідністю подолання існуючих теоретичних та практичних обмежень, забезпечення систематичного підходу до обробки експертної інформації та створення надійного інструментарію для прийняття обґрунтованих рішень в умовах невизначеності.

Комплексна методика аналізу та розв'язання неструктурованих багатооб'єктних проблем

За результатами проведеного аналізу основних властивостей та особливостей неструктурованих проблем, методологічних аспектів їх аналізу та розв'язання в роботі розроблена комплексна методика аналізу та розв'язання неструктурованих якісно визначених багатооб'єктних проблем, здатна ефективно перетворювати якісні судження у кількісні оцінки, враховувати нерівномірну компетентність експертів та об'єктивно оцінювати складність проблеми, що є критично важливим для прийняття обґрунтованих та надійних рішень у складних системах довільної фізичної природи.

Обґрунтування та особливості комплексної методики

Розроблена методика являє собою послідовний алгоритм дослідження та розв'язання неструктурованих якісно визначених багатооб'єктних проблем, що базується на інтеграції системного аналізу та експертних методів, характеризується використанням підходів до зважування компетентності експертів за кожною властивістю об'єкта, включенням об'єктивної метрики кількісної оцінки складності проблеми, побудовою математичної моделі (або її фрагментів) інтегральної оцінки якості досліджуваних рішень / об'єктів, а також використанням комплексу статистичних показників, здатних оцінювати отримувані результати протягом здійснюваного дослідження для надання рекомендацій до вдосконалення цього процесу.

Інтеграція системного аналізу в розробленій методиці проявляється, насамперед, у її структуруючій та концептуальній основі. Так, системний аналіз забезпечує комплексне бачення проблеми: методика починається з глибокого розуміння проблемної ситуації, її контекстуального аналізу та декомпозиції на функціональні елементи та підпроблеми, що дозволяє ідентифікувати всі значущі аспекти, навіть якщо вони є якісно визначеними або «невідомими», що є ключовим принципом

системного аналізу. Крім того, в методиці забезпечено формалізацію та структурування проблеми: системний аналіз надає інструменти для перетворення якісних та нечітких понять у структуровану систему критеріїв та об'єктів, придатну для подальшого кількісного аналізу, що включає створення вимірювальних шкал та інтеграцію різних точок зору (наприклад, конструктора, технолога, оператора) для отримання комплексної оцінки. При цьому потрібно зауважити, що, хоча методика не будує складні системні моделі взаємозв'язків у традиційному сенсі, вона використовує принципи системного мислення для ідентифікації ключових факторів, що впливають на проблему, та їх взаємного впливу через експертні судження, що, по суті, є визначальним при встановленні взаємозв'язків при формалізації проблемної ситуації та є основою для успішної реалізації всього дослідження.

До ключових особливостей та переваг пропонованої в роботі методики можна віднести такі:

- перетворення якісних суджень у кількісні оцінки: неструктуровані проблеми часто містять якісні та нечіткі поняття, які неможливо виміряти традиційними засобами. Пропонована методика забезпечує систематичний підхід до «квантизації» таких якісних даних, перетворюючи їх на кількісно виміряні та придатні для математичної обробки, що дозволяє приймати об'єктивні рішення там, де є доступними суб'єктивні експертні судження;

- поетапний механізм оцінки та зважування компетентності експертів: компетентність експерта може бути нерівномірною щодо різних характеристик досліджуваного об'єкта. Методика враховує цей аспект, здійснюючи поетапний механізм зважування експертних оцінок на основі оцінок та зважувань компетентності експертів за кожним критерієм, що значно підвищує вірогідність отриманих результатів, мінімізуючи вплив менш обґрунтованих думок та упереджень;

- включення об'єктивної метрики кількісної оцінки складності проблеми

(визначення індексу складності): запропонований в роботі індекс складності проблеми вводить об'єктивну метрику для кількісної оцінки складності дослідження, що забезпечує якісно новий рівень точності та надійності при розв'язанні неструктурованих багатооб'єктних проблем та дозволяє здійснювати адекватне планування ресурсів (кількості експертів, тривалості дослідження) та прогнозувати потенційні методологічні ризики ще на початковому етапі. Це є особливо цінним для практичного застосування методики, оскільки дозволяє керівникам проєктів обґрунтовано планувати бюджет, терміни та склад команди дослідників;

– побудова математичної моделі інтегральної оцінки якості: методика передбачає побудову математичної моделі інтегральної оцінки якості досліджуваних об'єктів/рішень, яка агрегує всі зважені та нормалізовані експертні судження в єдиний кількісний показник, що дозволяє безпосередньо порівнювати та ранжувати об'єкти, надаючи чітку основу для прийняття подальших рішень;

– ітеративний характер та адаптивність: методика є ітеративною, що дозволяє повертатися до попередніх етапів для уточнення даних або переформулювання моделі у разі виявлення розбіжностей, недостатньої точності або появи нової інформації, що забезпечує гнучкість та можливість постійного вдосконалення процесу дослідження.

Етапи реалізації методики

Методика складається з п'яти основних етапів, кожен з яких має чітко визначені цілі та завдання:

Етап I: *Ідентифікація та структурування неструктурованої проблеми*. На даному етапі здійснюється формулювання та глибоке розуміння проблемної ситуації, її декомпозиція та формалізація в термінах якісних характеристик.

Даний етап включає:

а) формулювання проблемної ситуації у її початковій формі (наприклад, для механічних систем це може бути спостереження несподіваних збоїв або погіршення продуктивності без певних

причин), її контекстуальний аналіз (для розуміння ширшої системи, в якій існує проблема, включаючи її цілі, середовище та ресурси, для визначення законів, закономірностей та обмежень функціонування);

б) попереднє залучення зацікавлених сторін (ідентифікація провідних фахівців та осіб, які приймають рішення (ОПР), що володіють знаннями про проблему);

в) визначення мети дослідження та об'єкта аналізу (формулюється, що саме потрібно оцінити / вирішити, і який об'єкт (система, пристрій, процес) розглядається. Наприклад, оцінка інтегральної якості нового керамічного підшипника);

г) початкове структурування проблеми (проблемної ситуації) із застосуванням принципів та методів системного аналізу для декомпозиції проблеми на потенційні функціональні елементи або підпроблеми, навіть якщо вони якісно визначені, для ідентифікації аспектів, які є «невідомими» або «важко вимірюваними»;

д) виділення ключових якісних характеристик (критеріїв, властивостей, факторів) об'єкта з метою встановлення повного переліку якісних показників, що впливають на оцінку/рішення (при цьому застосовуються методи мозкового штурму, глибинного інтерв'ювання, фокальних об'єктів і т.п. з обмеженою групою провідних фахівців для генерації широкого спектра ідей, для деталізації та уточнення, якщо потрібні специфічні знання), наприклад, це можуть бути: плавність обертання, віброакустичні характеристики, стійкість до перегріву, легкість монтажу/демонтажу;

е) формування початкового переліку потенційних рішень або об'єктів для порівняння (наприклад, прототипів);

ж) формалізація проблемної ситуації в термінах якісних характеристик (перетворення якісно та нечітко визначених, суб'єктивних аспектів проблеми в структуровану систему критеріїв C_i ($i = \overline{1, n}$), придатну для аналізу та прийняття рішень), яка включає:

– структурування якісних та нечітких понять (наприклад, замість розмитих формулювань типу «підшипник працює

добре» або «є проблеми з якістю», виділяються конкретні аспекти: «плавність ходу» → критерій C_1 «плавність обертання», «шум при роботі» → частина критерію C_2 «віброакустичні характеристики»);

– аналіз суттєвості та впливовості потенційних рішень або об'єктів для порівняння на досягнення поставленої мети, відбір найсуттєвіших рішень / об'єктів P_p ($p = \overline{1, s}$);

– переведення суб'єктивного досвіду в порівняльний формат (коли досвід експертів, наприклад, «відчуваю, що цей підшипник є кращим») перетворюється на систематичне порівняння за визначеними критеріями C_i ($i = \overline{1, n}$);

– створення вимірювальних шкал (систем порівняння), наприклад, для проведення ранжування обирається шкала від 1 до 5 або від 1 до 100, що дозволяє кількісно обробляти якісні судження;

– врахування контексту застосування, коли критерії формуються з урахуванням специфіки використання (наприклад, прецизійні верстати, високі швидкості, змінні навантаження);

– інтеграцію різних думок – об'єднання думок різних експертів (наприклад, конструктора, технолога, експлуатаційника) для отримання комплексної оцінки;

– визначення індексу складності проблеми (IC) – комплексного показника, що дозволяє об'єктивно оцінити ресурсомісткість та методологічні вимоги до проведення дослідження ще на початковому етапі та надає можливість ОПР планувати адекватні ресурси, визначати оптимальну кількість експертів та передбачати потенційні труднощі. Обчислення первісного значення даного показника проводиться за співвідношенням

$$IC_0 = n \times s \times D_{\text{exp}},$$

де n – кількість відібраних критеріїв C_i ($i = \overline{1, n}$); s – кількість досліджуваних об'єктів/рішень P_p ($p = \overline{1, s}$); D_{exp} – очікуваний розкид експертних суджень, який попередньо оцінюється керівником дослідження (або провідним експертом) на основі аналізу характеру проблеми в

межах від 0,2 (для добре структурованих аспектів) до 0,8 (для високосуб'єктивних) наступним чином:

■ $0,2 \leq D_{\text{exp}} < 0,4$: для проблем з переважно об'єктивними, технічними критеріями (наприклад, фізичні властивості матеріалів, технічні характеристики обладнання);

■ $0,4 \leq D_{\text{exp}} < 0,6$: для проблем зі змішаними об'єктивно-суб'єктивними критеріями (наприклад, оцінка якості продукції, що включає як технічні, так і естетичні аспекти);

■ $0,6 \leq D_{\text{exp}} < 0,8$: для проблем з переважно суб'єктивними критеріями (наприклад, оцінка дизайну, ергономічності, соціальної прийнятності).

За величиною визначеного, таким чином, індексу IC_0 здійснюється інтерпретація рівнів складності досліджуваної проблеми:

■ при $IC_0 < 50$: низька складність – для експертизи достатньо 3-4 експерти, доцільним є проведення дослідження протягом 2-3 тижнів, ризики розбіжностей є мінімальними;

■ при $50 \leq IC_0 < 150$: середня складність – для експертизи рекомендується 5-10 експертів, тривалість дослідження – 4-6 тижнів, необхідними є додаткові заходи забезпечення узгодженості;

■ при $IC_0 \geq 150$: висока складність – для експертизи потрібно 11-15 експертів, тривалість дослідження 6-8 тижнів, обов'язковими є додаткові раунди експертизи, високими є ризики неузгодженості;

к) визначення критеріїв успішності здійснюваного дослідження (кількісних або якісних показників, які дозволяють оцінити, наскільки дослідження досягло поставленої мети та наскільки його результати є перевіреними та корисними).

В якості таких критеріїв можуть виступати [19, 27]:

– критерії репрезентативності вибірки експертів, наприклад, мінімальний розмір вибірки експертів (m_{min}), коефіцієнти експертної компетентності, несуперечності;

– критерії узгодженості експертних суджень, наприклад, коефіцієнт конкордації (W) для оцінювання узгодженості суджень експертів, коефіцієнт кореляції Спірмена (ρ) для попарного порівняння ранжувань, коефіцієнт кореляції Кендалла (τ), інформаційної міри ($E_{\alpha,\beta}$) збігу суджень експертів Устюжанінова, дисперсії (σ_i^2) оцінок, наданих за кожним i -м критерієм, для оцінювання розкиду суджень експертів, загальної дисперсії оцінок та загальної дисперсії наданих рангів для оцінювання узагальненої характеристики узгодженості суджень експертів за всіма критеріями;

– статистичні критерії значущості, наприклад, критерій χ^2 Пірсона для перевірки істотності (значущості) коефіцієнта конкордації;

– критерії стабільності результатів, наприклад, коефіцієнти варіації (V_i) оцінок, наданих i -му критерію, індекси чутливості (до зміни складу експертної групи, зміни оцінки певного експерта для деякого критерію, зміна ваги критерію в інтегральній оцінці та т.п.);

– критерії успішності, наприклад, коефіцієнт детермінації (R^2) для оцінки пояснювальної здатності моделі (наскільки добре модель пояснює варіації в індивідуальних експертних оцінках або наскільки точно відображає реальні властивості об'єктів), багатокритеріальні оцінки якості дослідження, критерії ефективності дослідження.

Примітка: Даний етап є початковим і обов'язковим для будь-якої неструктурованої проблеми. Якщо проблема виявляється добре структурованою або слабкоструктурованою з достатньою кількістю кількісних даних, можна перейти до традиційних методів математичного моделювання. В іншому випадку, перехід до Етапу II є обов'язковим.

Етап II: *Збір експертних знань та оцінка компетентності експертів.* На даному етапі здійснюється кількісна оцінка якісних характеристик та зважування експертних суджень.

Даний етап включає:

а) формування експертної групи (відбираються фахівці, що мають глибокі знання у предметній області; кількість експертів має бути достатньою для репрезентативності – зазвичай 5-15 осіб) та визначення репрезентативності вибірки експертів за відібраними на Етапі I критеріями репрезентативності;

б) оцінка компетентності експертів за кожним критерієм. Для кожного експерта E_j ($j = \overline{1, m}$) та кожного критерію C_i ($i = \overline{1, n}$) визначається коефіцієнт компетентності K_{ji} .

Це може бути зроблено кількома способами:

– самооцінюванням (кожен експерт E_j ($j = \overline{1, m}$) оцінює свою компетентність за кожним критерієм C_i ($i = \overline{1, n}$) за певною бальною шкалою (наприклад, від 0 до 1, де 0 – повна некомпетентність, 1 – найвища компетентність, в такому випадку $K_{ji} \in [0, 1]$) та/або використовуючи підходи, за якими, наприклад, коефіцієнти компетентності визначаються у вигляді

$$K_k^{ji} = \frac{K_3^{ji} + K_a^{ji}}{2} \text{ з урахуванням коефіцієнта}$$

K_3^{ji} ступеня ознайомленості експерта з проблемою та коефіцієнту K_a^{ji} аргументованості його думок, у вигляді

$$K_k^{ji} = \frac{K_{3n}^{ji} + K_D^{ji} + K_{Int}^{ji}}{3} \text{ з урахуванням}$$

коефіцієнтів K_{3n}^{ji} рівня його знань, K_D^{ji} рівня досвіду та K_{Int}^{ji} рівня інтуїції, за допомогою коефіцієнта несуперечливості експерта [26], за яким чим більшою є частина суперечливих тверджень, тим менш компетентним він вважається, також можна обчислити за апостеріорними даними (за результатами оцінки об'єктів за ступенем погодженості їхніх оцінок із груповою оцінкою об'єктів) [19], за іншими підходами, сформульованими, наприклад, у роботах [2, 16, 17, 25-27];

– перехресним оцінюванням (інші експерти групи оцінюють компетентність експерта E_j ($j = \overline{1, m}$) за кожним критерієм C_i ($i = \overline{1, n}$) з метою отримання більш об'єктивної оцінки, крім того, для агрегації можна використовувати середнє значення);

– за використанням об'єктивних показників – формальних критеріїв (наприклад, кількістю років досвіду в обраній сфері, кількістю публікацій за темою критерію, наявності наукових ступенів, участі у профільних проєктах), кожному з яких присвоюється певні вагові коефіцієнти, за якими надалі розраховується коефіцієнт компетентності для кожного експерту E_j ($j = \overline{1, m}$) за кожним із критеріїв C_i ($i = \overline{1, n}$);

– проведенням коротких тестувань на знання специфічних аспектів, пов'язаних з кожним критерієм;

в) збір експертних оцінок S_{ji} ($j = \overline{1, m}$, $i = \overline{1, n}$) за критеріями. Експерти оцінюють важливість (вагу) досліджуваних критеріїв C_i ($i = \overline{1, n}$) або їх вплив на загальну якість досліджуваних рішень / об'єктів. Для цього зазвичай застосовуються методи ранжування або шкалювання (наприклад, метод простого ранжування, бальних оцінок, безпосереднього ранжування, парних порівнянь, сум рангів тощо), кожний з яких обирається залежно від поставленої задачі, кількості досліджуваних критеріїв C_i ($i = \overline{1, n}$), кількості досліджуваних рішень / об'єктів P_p ($p = \overline{1, s}$), кількості залучених до експертизи експертів E_j ($j = \overline{1, m}$). Всі отримані від експертів оцінки S_{ji} ($j = \overline{1, m}$, $i = \overline{1, n}$) подаються у вигляді узагальнених таблиць, стовпці яких відповідають експертам E_j ($j = \overline{1, m}$), а рядки – критеріям C_i ($i = \overline{1, n}$);

г) збір експертних оцінок O_{pji} ($p = \overline{1, s}$, $j = \overline{1, m}$, $i = \overline{1, n}$) рішення / об'єкта P_p ($p = \overline{1, s}$), отримана від експерта E_j ($j = \overline{1, m}$) за критерієм C_i ($i = \overline{1, n}$). Всі отримані від

експертів оцінки O_{pji} ($p = \overline{1, s}$, $j = \overline{1, m}$, $i = \overline{1, n}$) подаються у вигляді таблиць за кожним з досліджуваних рішень/об'єктів P_p ($p = \overline{1, s}$), стовпці яких відповідають експертам E_j ($j = \overline{1, m}$), а рядки – критеріям C_i ($i = \overline{1, n}$).

Примітка: Ефективність отримання даних на цьому етапі покращується, коли експерти керуються структурованим розумінням проблеми, отриманим за допомогою системного аналізу. І навпаки, системна структура може бути уточнена якісними даними, отриманими від експертів. Цей етап є не просто збором даних, а певною взаємодією, де структура проблеми (з системного аналізу) керує експертним опитуванням, а експертні відповіді, своєю чергою, уточнюють та збагачують цю структуру. Це ітеративне уточнення є вирішальним для перетворення нечіткого якісного розуміння у більш конкретне, хоча й все ще якісне, визначення проблеми. Перехід до етапу III є обов'язковим для подальшої формалізації.

Етап III: *Перетворення даних та побудова моделей.* На цьому етапі здійснюється перетворення зібраних якісних даних у кількісну форму з урахуванням визначених оцінок компетентності та формулювання початкових математичних моделей або їх фрагментів.

Даний етап включає:

а) обчислення зважених експертних оцінок критеріїв. Для кожного експерта E_j ($j = \overline{1, m}$) та його оцінки S_{ji} ($j = \overline{1, m}$, $i = \overline{1, n}$) критерію C_i ($i = \overline{1, n}$), а також його компетентності K_{ji} ($j = \overline{1, m}$, $i = \overline{1, n}$) за цим критерієм, розраховується зважена оцінка S'_{ji} у вигляді $S'_{ji} = S_{ji} \times K_{ji}$ ($j = \overline{1, m}$, $i = \overline{1, n}$), що забезпечує, що оцінки, отримані від більш компетентних експертів, матимуть більший вплив на кінцевий результат. Застосування цього співвідношення дозволяє масштабувати кожне судження експерта відповідно до його обізнаності у конкретній галузі. Наприклад, якщо

експерт надає високу оцінку критерію, але має низький коефіцієнт компетентності за цим критерієм, його зважена оцінка буде меншою, ніж у висококомпетентного експерта, який надав, можливо, трохи нижчу початкову оцінку. Такий підхід значно підвищує надійність та об'єктивність агрегованих результатів, мінімізуючи вплив менш обґрунтованих думок та перетворюючи суб'єктивні якісні судження на більш надійні кількісні дані;

б) агрегування зважених оцінок. Для кожного критерію C_i ($i = \overline{1, n}$) розраховується усереднена зважена оцінка $\bar{S}_i$ ($i = \overline{1, n}$), яка забезпечує, що усереднення відбуватиметься не за кількістю експертів, а за сумарною компетентністю експертів для даного критерію:

$$\bar{S}_i = \frac{\sum_{j=1}^m S'_{ji}}{\sum_{j=1}^m K_{ji}}, \quad i = \overline{1, n};$$

в) аналіз достовірності отриманих від експертів оцінок (ранжувань) S_{ji} ($j = \overline{1, m}$, $i = \overline{1, n}$) по критеріях C_i ($i = \overline{1, n}$) за відібраними на етапі I критеріями узгодженості та розкиду суджень експертів, статистичними критеріями значущості, коефіцієнтами варіації й ін. Якщо буде встановлена низька узгодженість / високий рівень розкиду думок експертів / статистична незначущість критеріїв / низькі значення коефіцієнтів варіації, то відповідно робиться висновок про низький ступінь довіри ОПР до отримуваних від експертів оцінок та відбувається повернення до попередніх етапів I-II та здійснюється уточнення методики, включаючи визначення проблеми, уточнення критеріїв, переоцінку компетентності експертів, додаткове опитування та отримання експертних даних;

г) уточнення індексу складності – проводиться за співвідношенням

$$IC_{fact} = n \times s \times D_{fact},$$

$$\text{де } D_{fact} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_i}{\bar{S}_i^0} - \text{фактичний розкид}$$

експертних суджень; σ_i – стандартне відхилення оцінок за критерієм C_i ($i = \overline{1, n}$):

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^m (S_{ji} - \bar{S}_i^0)^2} \quad (i = \overline{1, n}); \quad \bar{S}_i^0 - \text{середня}$$

оцінка критерію C_i ($i = \overline{1, n}$) (без урахування зважування): $\bar{S}_i^0 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^m S_{ji}$ ($i = \overline{1, n}$);

д) нормалізація ваг критеріїв. Отримані усереднені зважені оцінки $\bar{S}_i$ ($i = \overline{1, n}$) нормуються, щоб їхня сума дорівнювала одиниці, формуючи вектори ваг W_i ($i = \overline{1, n}$), кожний з яких виступає відносною вагою відповідного критерію C_i ($i = \overline{1, n}$):

$$W_i = \frac{\bar{S}_i}{\sum_{i=1}^n \bar{S}_i}, \quad i = \overline{1, n}.$$

Такі ваги є прямим вхідним параметром для моделі інтегральної оцінки, гарантуючи, що критерії зважуються відповідно до їхньої значущості, визначеної компетентними експертами;

е) побудова математичної моделі інтегральної (комплексної) оцінки. Для кожного досліджуваного рішення / об'єкту P_p ($p = \overline{1, s}$) його інтегральна якість Q_p ($p = \overline{1, s}$) розраховується як сума добутків зважених середньої оцінки рішення / об'єкту за кожним критерієм на відповідну вагу критерію C_i ($i = \overline{1, n}$):

$$Q_p = \sum_{i=1}^n (\bar{O}_{pi} \times W_i), \quad p = \overline{1, s},$$

де $\bar{O}_{pi}$ – зважена середня експертна оцінка рішення / об'єкта P_p ($p = \overline{1, s}$) за критерієм C_i ($i = \overline{1, n}$) (отримана з використанням зважування на компетентність K_{ji} ($j = \overline{1, m}$, $i = \overline{1, n}$) експертів аналогічно обчисленню усереднених зважених оцінок $\bar{S}_i$ ($i = \overline{1, n}$), здійснених на Етапі III, а)-б), але тепер для оцінки рішення / об'єкту P_p ($p = \overline{1, s}$) за критерієм, а не ваги критерію):

$$\overline{O}_{pi} = \frac{\sum_{j=1}^m (O_{pji} \times K_{ji})}{\sum_{j=1}^m K_{ji}}, \quad p = \overline{1, s}, \quad i = \overline{1, n};$$

де O_{pji} ($p = \overline{1, s}, j = \overline{1, m}, i = \overline{1, n}$) – експертна оцінка рішення / об'єкту P_p ($p = \overline{1, s}$), отримана від експерта E_j ($j = \overline{1, m}$) за критерієм C_i ($i = \overline{1, n}$).

Примітка: перетворення якісно виражених даних у кількісні показники не є довільним; воно часто ґрунтується на квазі-аксіоматичній основі, яка накладає структуру «раціональності» або «узгодженості» на суб'єктивні судження. Ця математична основа забезпечує строгість, необхідну для перетворення якісно виражених експертних думок у форму, придатну для математичного моделювання, навіть для неструктурованих проблем. Перехід до Етапу IV є обов'язковим для подальшого аналізу.

Етап IV: *Аналіз моделі, виведення рішення.* На цьому етапі здійснюється аналіз сформульованих математичних моделей або їх фрагментів, отриманих на попередньому Етапі III, виведення остаточного рішення із наданням початкової якісної інтерпретації отриманих кількісних результатів.

Даний етап включає:

а) аналіз моделей або їх фрагментів – використання аналітичних або чисельних методів для вивчення поведінки та властивостей математичних моделей або їх фрагментів за відібраними на Етапі I критеріями стабільності результатів, інтегральними критеріями успішності, критеріями ефективності дослідження. Це включає:

– аналіз чутливості для розуміння впливу невизначених параметрів, коли досліджується, як зміна складу експертної групи, окремих оцінок (ваг) критеріїв або оцінок досліджуваних рішень / об'єктів впливає на кінцеву інтегральну оцінку. Це дозволяє виявити найбільш впливові критерії;

– аналіз успішності та ефективності дослідження;

– аналіз адекватності індексу складності проблеми – здійснюється на основі порівняння індексів складності IC_{fact} з IC_0 та дозволяє оцінити якість початкового планування дослідження й точність початкових припущень, а також внести корекції у методологію для подібних проблем у майбутньому. Для аналізу адекватності проводиться обчислення величини відхилення

$$\Delta = \frac{|IC_{fact} - IC_0|}{IC_0} \times 100\%$$

між індексами та надається інтерпретація отримуваним результатам:

■ при $\Delta < 20\%$ отримується точний прогноз складності, що означає, що початкове планування було адекватним;

■ при $20\% \leq \Delta < 40\%$ спостерігається помірне відхилення початкової оцінки складності проблеми;

■ при $\Delta \geq 40\%$ – значне відхилення, початкова оцінка складності проблеми була неточною, що може вплинути на адекватність використаної методології;

■ при $\Delta > 40\%$, $IC_{fact} \gg IC_0$ – заниження початкової складності проблеми при формалізації проблемної ситуації;

■ при $\Delta > 40\%$, $IC_{fact} \ll IC_0$ – завищення початкової складності;

б) виведення рішення з отриманої моделі, які можуть бути оптимальними значеннями, прогнозами або класифікаціями;

в) якісна інтерпретація кількісних результатів – перетворення числових результатів назад у значущі якісні дані для ОПР з відзначенням, що модель є наближенням до реальності.

Примітка: даний етап є критичним для перетворення математичних результатів у практичні висновки. Якщо результати аналізу моделі або отримувані рішення не відповідають експертним очікуванням, необхідним стає зворотний перехід до попередніх Етапів I-III для уточнення даних або моделі. Перехід до Етапу V є обов'язковим для валідації.

Етап V: *Валідація, інтерпретація та уточнення*. На цьому етапі здійснюється перевірка адекватності моделі, визначення ступеня довіри ОПР до результатів, інтерпретація результатів у контексті початкової проблеми та уточнення методології або моделі за потреби.

Даний етап включає:

а) валідацію моделей – оцінку адекватності моделей шляхом порівняння отриманих результатів (інтегральних оцінок) з реальними спостереженнями, результатами випробувань або додатковими якісними судженнями експертів (наприклад, для механічних систем це може включати порівняння прогнозованої продуктивності зі спостережуваною поведінкою або визначеними експертами порогами якості). Додатково для цього може бути використано метод Дельфі для перевірки консенсусу щодо результатів;

б) повторну перевірку узгодженості експертних суджень, особливо якщо з'являється нова інформація або отримувані результати за моделями суперечать початковим очікуванням;

в) формування рекомендацій щодо планування подібних досліджень у майбутньому та оцінки адекватності використаних ресурсів – проводиться на основі результатів перевірки адекватності індексу складності проблеми, отриманих на Етапі IV, а):

– при $20\% \leq \Delta < 40\%$ доцільними є корекції у плануванні майбутніх досліджень;

– при $\Delta \geq 40\%$ – необхідним є переосмислення підходу до проблеми: при зниженні початкової складності проблеми ($\Delta \geq 40\%$, $IC_0 \ll IC_{fact}$) потрібно здійснити деталізацію критеріїв, які виявилися більш складними, залучити додаткових експертів, збільшити кількості раундів експертизи й час дослідження, переглянути методи агрегації оцінок; при завищенні складності ($\Delta \geq 40\%$, $IC_0 \gg IC_{fact}$) – доцільно здійснити перегляд критеріїв з метою виявлення надлишкових або дублювальних, провести об'єднання

схожих критеріїв, спростити систему оцінювання, скоротити ресурси або перенаправити їх на поглиблений аналіз;

г) інтерпретацію результатів та підтримку прийняття рішень: здійснюється перетворення складних математичних результатів у дієві рекомендації для ОПР, яка приймає остаточне рішення за отриманою експертною інформацією за дослідженням;

д) ітеративне уточнення: на основі результатів валідації моделі та нових даних, у разі виявлення розбіжностей або недостатньої точності, відбувається повернення до попередніх етапів та здійснюється уточнення методики, включаючи визначення проблеми, уточнення критеріїв, переоцінку компетентності експертів, розширення експертної групи залученням більш спеціалізованих фахівців, надання експертам додаткової інформації про об'єкти дослідження, деталізацію критеріїв оцінки, проведення додаткового раунду експертизи (додаткового опитування) з поглибленим обговоренням та отриманням експертних даних, їх математичну обробку або формулювання моделі. Цей ітеративний процес є вирішальним для підвищення точності та адекватності моделі.

Примітка: даний етап є завершальним у поточному циклі, але може ініціювати новий цикл дослідження, якщо модель виявляється неадекватною, неточною або якщо з'являються нові аспекти проблеми. Якщо модель валідована та результати інтерпретовані та прийнятні, можна переходити до впровадження рішень.

Обговорення застосування методики до розв'язання практичних задач

Розроблена комплексна методика являє собою інструмент для формулювання, аналізу та розв'язання неструктурованих якісно виражених багатоб'єктних проблем, що виникають у системах довільної фізичної природи. Її гнучкість та адаптивність дозволяють застосовувати її в широкому спектрі галузей, де традиційні кількісні підходи є

недостатніми. Зокрема, у технічних та механічних галузях методика може бути надзвичайно корисною для розв'язання наступних проблем:

- з оцінювання нових матеріалів та технологій: при розробці інноваційних матеріалів (наприклад, композитів, наноматеріалів) або впровадженні нових виробничих технологій (наприклад, адитивних технологій), їх повна характеристика часто вимагає оцінювання якісних показників, наприклад, таких як «технологічність», «ремонтпридатність», «естетичний вигляд», «зручність у використанні», які важко формалізувати. Пропонована в роботі методика дозволяє інтегрувати експертні судження інженерів, технологів та користувачів для отримання комплексної оцінки;

- з оптимізації складних виробничих процесів: у виробничих системах, особливо на великих підприємствах, можуть виникати проблеми, пов'язані з «вузькими місцями», «неефективністю робочих інструкцій», «складністю переналагодження обладнання» і т. ін., які часто мають якісний характер та вимагають експертного оцінювання. Пропонована методика дозволяє ідентифікувати та кількісно оцінити зазначені аспекти, що, за своєю сутністю, сприяє прийняттю обґрунтованих управлінських рішень для підвищення ефективності виробництва;

- з проєктування та оцінювання ергономічних систем: при розробці інтерфейсів «людина-машина», робочих місць або споживчих товарів, ключовими є ергономічні та суб'єктивні критерії, наприклад, такі як «зручність», «інтуїтивність», «комфорт», «безпека». Пропонована методика дозволяє систематизувати та кількісно оцінити окреслені аспекти на основі суджень користувачів та фахівців з ергономіки;

- з керування ризиками та надійністю складних інженерних систем: оцінювання ризиків у таких системах, як атомні електростанції, авіаційні комплекси або критична інфраструктура, часто вимагає експертних суджень щодо ймовірності

рідкісних подій або наслідків непередбачених відмов. Розроблена методика може бути використана для структурованого збору та агрегування такого значення експертних оцінок, підвищуючи надійність аналізу ризиків;

- з вибору обладнання та постачальників: при виборі складного обладнання або стратегічних постачальників, окрім ціни та технічних характеристик, важливими є й якісні критерії, наприклад, такі як «репутація постачальника», «якість сервісного обслуговування», «гнучкість у співпраці», «інноваційний потенціал». Пропонована в роботі методика також дозволяє інтегрувати визначені аспекти у процес прийняття рішень.

Загалом, застосування розробленої методики у технічних, механічних та інших сферах дозволяє перетворити неструктуровані проблеми на більш керовані та аналізовані, надаючи особам, що приймають рішення, об'єктивну та обґрунтовану інформацію. Це сприяє підвищенню ефективності керування, оптимізації ресурсів та зниженню ризиків у складних інженерних та виробничих середовищах.

Апробація методики: обчислювальний експеримент з оцінки якості керамічного підшипника

Для ілюстрації практичної застосовності та ефективності розробленої комплексної методики проведено обчислювальний експеримент з оцінки інтегральної якості керамічного підшипника для високошвидкісного шпинделя прецизійного верстата.

У рамках експерименту в якості вихідної розглядалась проблема в наступному формулюванні: інженерна компанія розробила новий тип керамічного підшипника для високошвидкісних шпинделів прецизійних верстатів, зіткнувшись із проблемою оцінки його реальної якості в умовах експлуатації, що включає критично важливі якісні показники (плавність ходу, рівень шуму при роботі, стійкість до перегріву та

сприйняття оператором вібрації), які важко формалізувати. Підшипник має покращені характеристики, але його довговічність та надійність в умовах реальної експлуатації (змінні навантаження, температурні коливання, вібрації) важко оцінити лише за допомогою стандартних кількісних тестів.

Наведена проблема є типовою неструктурованою через якісний характер більшості критеріїв оцінки, які відіграють ключову роль, а традиційні кількісні тести є недостатніми. Це означає, що основний виклик полягає не у відсутності даних, а у їхньому типі – суб'єктивних, якісних судженнях, які важко перевести у вимірювані показники. Саме тому була обрана пропонована в роботі методика, спеціально розроблена для перетворення таких якісних суджень у кількісні оцінки. Пройдемо основні етапи методики та висвітлимо отримані результати з експерименту.

На початковому етапі дослідження:

- сформульовано проблемну ситуацію: новий керамічний підшипник, хоч теоретично покращені характеристики, має невизначену реальну якість в експлуатаційних умовах через складність оцінки якісних показників.

- проведено контекстуальний аналіз проблеми: проблема функціонування підшипників розглядається в контексті високоточного машинобудування, де навіть мінімальні відхилення у роботі можуть суттєво вплинути на якість обробки деталей; система працює в умовах змінних навантажень, коливань температури (від 20 до 80°C) та вібрацій, додатковим обмеженням є високі вимоги до точності та швидкості обертання (до 40000 об/хв), а також відсутність можливості проведення тривалих натурних випробувань;

- визначено мету дослідження: здійснити комплексну оцінку інтегральної якості нового керамічного підшипника у порівнянні з наявними прототипами, щоб обґрунтувати рішення щодо його впровадження у виробництво;

- обрано об'єкти аналізу: для порівняння було обрано три прототипи

підшипників: P_1 – новий керамічний підшипник, P_2 – стандартний сталевий підшипник, P_3 – гібридний керамічно-металевий підшипник (сталеві кільця + керамічні кульки);

- здійснено початкове структурування проблеми: проблема докомпозована на наступні функціональні елементи: механічні характеристики роботи; акустичні властивості; теплові характеристики; ергономічні аспекти; технологічні особливості.

- визначено ключові критерії (якісні характеристики): для всебічної оцінки підшипників шляхом мозкового штурму з провідними фахівцями було виділено шість ключових якісних характеристик (критеріїв), що впливають на оцінку якості підшипника, а також є важливими для їх успішної реалізації та функціонування: C_1 – плавність обертання (відсутність заїдань, рівномірність руху); C_2 – вібро-акустичні характеристики (рівень шуму та вібрацій); C_3 – стійкість до перегріву (здатність зберігати характеристики при підвищених температурах); C_4 – відчуття люфту (наявність небажаних зазорів та нестабільностей); C_5 – легкість монтажу / демонтажу (простота встановлення та обслуговування); C_6 – сприйняття оператором комфорту роботи (суб'єктивна оцінка зручності експлуатації);

- сформовано перелік потенційних рішень: P_1 – прототип 1 (новий керамічний підшипник), P_2 – прототип 2 (стандартний сталевий підшипник), P_3 – прототип 3 (гібридний підшипник);

- формалізовано проблемну ситуацію: структуровано систему критеріїв C_i ($i = \overline{1,6}$) для аналізу рішень P_p ($p = \overline{1,2,3}$); для універсальної оцінки всіх якісних характеристик були визначені методи та розроблені шкали вимірювання оцінок: компетентності експертів оцінюються за шкалою від 0 до 1 балу (самооцінка), оцінки критеріїв та оцінки прототипів – за шкалою від 0 до 100 балів (методом бальної оцінки).

– визначено індекс складності проблеми: проведено обчислення початкового індексу складності у вигляді $IC_0 = n \times s \times D_{\text{exp}}$ з наступними параметрами: $n = 6$ (кількість критеріїв), $s = 3$ (кількість об'єктів/рішень), $D_{\text{exp}} = 0,5$ (очікуваний розкид для змішаних об'єктивно-суб'єктивних критеріїв). За обчисленнями $IC_0 = 9 < 50$, що відповідає низькій складності проблеми з мінімальними ризиками розбіжностей і рекомендованим залученням 3-4 експертів;

– обрано критерії успішності дослідження та визначено припустимі їх порогові значення: мінімальний розмір вибірки експертів ($m_{\min} = 5$); мінімальний коефіцієнт компетентності ($K_{\min} = 0,6$); коефіцієнт конкордації Кендалла ($W \geq 0,7 \pm 0,05$); критерій χ^2 Пірсона; коефіцієнт детермінації ($R^2 \geq 0,75$); коефіцієнти варіації оцінок ($v_i \leq 20\%$); індекси чутливості до змін ($< 15\%$).

Отже, пройдено Етап I, за яким проблема проаналізована та формалізована, визначено 6 критеріїв оцінювання, 3 прототипи для порівняння, основні критерії успішності. Проблема є неструктурованою через якісний характер більшості критеріїв, тому переходимо до Етапу II, на якому, в першу чергу, для проведення дослідження була сформована експертна група з п'яти фахівців, що забезпечило об'єктивність та репрезентативність для даного типу проблем. До складу групи увійшли фахівці, які володіють високою кваліфікацією, глибокими знаннями та досвідом у даній предметній області: E_1 – конструктор шпинделів (15 років досвіду), E_2 – технолог виробництва підшипників (12 років досвіду), E_3 – оператор прецизійних верстатів (10 років досвіду), E_4 – інженер з контролю якості (8 років досвіду) та E_5 – спеціаліст з матеріалознавства (18 років досвіду). Кількість експертів ($m = 5$ осіб) відповідає рекомендаціям методики щодо мінімального розміру вибірки експертів та проблем низької складності, що були

визначені на Етапі I. Кожен з експертів оцінив свою компетентність за кожним критерієм шляхом самооцінювання за шкалою від 0 до 1, де 0 – повна некомпетентність, 1 – найвища компетентність. Остаточні оцінки K_{ji} ($j = \overline{1, m}, i = \overline{1, n}$) компетентності експертів представлені в табл. 1.

Таблиця 1 – Матриця компетентності експертів K_{ji} ($j = \overline{1, m}, i = \overline{1, n}$)

Експерт Критерій	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5
C_1	0,9	0,8	0,95	0,7	0,6
C_2	0,85	0,7	0,9	0,8	0,75
C_3	0,7	0,85	0,6	0,9	0,95
C_4	0,95	0,75	0,85	0,8	0,65
C_5	0,8	0,9	0,75	0,85	0,7
C_6	0,75	0,6	0,95	0,7	0,65

Таблиця 1 є критично важливою, оскільки кількісно відображає розподіл знань та досвіду експертів за різними аспектами проблеми. Так, за даними табл. 1 аналіз компетентностей експертів показує, що E_1 найбільш компетентний у механічних аспектах (C_1, C_4), E_2 спеціалізується на технологічних процесах та особливо компетентний у питаннях монтажу та перегріву (C_3, C_5), E_3 має найвищі компетентності в оцінюванні плавності роботи, віброакустиці та ергономіці (C_1, C_2, C_6), E_4 має збалансовану компетентність, E_5 є експертом з матеріалознавства, найкращим у теплових питаннях (C_3). Методика враховує, що компетентність експерта може бути нерівномірною щодо різних характеристик об'єкта дослідження. Це дозволяє у подальших розрахунках надати більшої ваги оцінкам тих експертів, які є найбільш обізнаними у конкретній сфері, що значно підвищує достовірність отриманих результатів.

Надалі проведено збір початкових експертних оцінок S_{ji} , $j = \overline{1, m}$, $i = \overline{1, n}$ важливості критеріїв (табл. 2): експерти

оцінили важливість кожного критерію за шкалою від 0 до 100 балів. Ці суб'єктивні судження, виражені у кількісній формі, є основою для подальшого зважування та агрегування.

Таблиця 2 – Експертні оцінки важливості критеріїв S_{ji} ($j = \overline{1, m}$, $i = \overline{1, n}$)

Експерт \ Критерій	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5
C_1	95	90	98	92	85
C_2	88	82	90	85	80
C_3	85	95	75	90	98
C_4	92	88	85	87	82
C_5	70	85	65	78	72
C_6	75	68	88	72	70

Експерти також надали оцінки (O_{pji} , $p = \overline{1, s}$, $j = \overline{1, m}$, $i = \overline{1, n}$) для кожного з трьох прототипів (P_1 , P_2 , P_3) за всіма шістьма критеріями C_i ($i = \overline{1, n}$) (табл. 3), використовуючи ту ж шкалу від 0 до 100 балів. Ці дані відображають сприйняття експертами продуктивності кожного підшипника за окремими якісними характеристиками.

Таким чином, пройдено Етап II: зібрано експертні дані від 5 експертів щодо компетентності, важливості критеріїв та оцінок прототипів, виявлено спеціалізацію експертів за різними критеріями, що підтверджує необхідність зваженого підходу до агрегації їх думок, а, отже й перехід до Етапу III, присвяченому перетворенню отриманих від експертів даних та побудові моделей.

Таблиця 3 – Початкові експертні оцінки O_{pji} ($p = \overline{1, s}$, $j = \overline{1, m}$, $i = \overline{1, n}$) прототипів P_p ($p = \overline{1, s}$)

Прототип \ Критерій	P_1					P_2					P_3				
	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5
C_1	92	88	95	90	85	78	80	75	82	79	78	80	75	82	79
C_2	85	82	88	87	83	72	70	68	75	73	72	70	68	75	73
C_3	95	98	90	92	96	65	70	62	68	72	65	70	62	68	72
C_4	88	85	90	89	86	80	82	78	85	81	80	82	78	85	81
C_5	78	82	75	80	79	85	90	82	88	86	85	90	82	88	86
C_6	82	78	87	81	80	75	72	78	76	74	75	72	78	76	74

На даному етапі:

– проведено обчислення зважених експертних оцінок (S'_{ji} , $j = \overline{1, m}$, $i = \overline{1, n}$) для кожного критерію C_i ($i = \overline{1, n}$). Цей крок є фундаментальним, оскільки безпосередньо реалізує один з ключових принципів методики: врахування нерівномірної компетентності експертів. Методика чітко зазначає, що компетентність фахівця може відрізнятися щодо різних характеристик об'єкта дослідження;

– здійснено агрегування зважених оцінок критеріїв для отримання усередненої зваженої оцінки для кожного критерію ($\bar{S}_i$, $i = \overline{1, n}$), які представляють консолідовану важливість кожного критерію, вже скориговану з урахуванням компетентності експертів. Це забезпечує надійну основу для подальшої нормалізації ваг критеріїв, оскільки відображає колективне, зважене судження найбільш обізнаних фахівців;

– проведено аналіз достовірності експертних оцінок, за яким отримано кілька ключових висновків: отримане значення $W = 0,6434 < 0,7 \pm 0,05$ вказує на помірну узгодженість експертів (по шкалі Марголіна: $W \in (0,5; 0,7]$) та на високу (по шкалі Харрінгтона: $W \in (0,64; 0,8]$), при цьому не відповідає прийнятому на Етапі I порогу прийнятності ($W \geq 0,7 \pm 0,05$). Такий рівень узгодженості свідчить, що, хоча експерти не досягли ідеального консенсусу у ранжуванні критеріїв, їх судження не є випадковими. Це є очікуваним для проблем зі змішаними об'єктивно-суб'єктивними критеріями, де повна згода може

бути важкодосяжною. Близькість значення W до прийнятного порогу дозволяє продовжити аналіз, але вимагає уважного ставлення до отриманих результатів. Це підкреслює гнучкість методики, яка дозволяє працювати з певним рівнем невизначеності, одночасно надаючи інструменти для її кількісної оцінки. Тест на статистичну значущість за критерієм χ^2 Пірсона (16,0850) підтвердив, що судження експертів є статистично значущими та узгодженими. Додатково, низькі показники коефіцієнтів варіації для всіх критеріїв (усі $V_i < 10\%$) свідчать про дуже високу узгодженість думок експертів щодо величини важливості кожного критерію. Це означає, що незначні розбіжності у майбутньому загальному ранжуванні не впливатимуть на основний консенсус щодо важливості окремих критеріїв чи ефективності прототипів, що посилить довіру до отримуваних інтегральних оцінок якості;

– здійснено уточнення індексу складності проблеми та визначено відхилення між його початковим та фактичним значенням (табл. 4).

Таблиця 4 – Порівняння початкового та фактичного індексів складності проблеми

Показник	Значення	Інтерпретація
IC_0	9	низька складність (очікувана)
IC_{fact}	1,224	низька складність (фактична)
Δ	86,4 %	значне відхилення

Величина $\Delta = 86,4\%$ вказує на значне відхилення початкової оцінки складності проблеми. Зокрема, $IC_{fact} \ll IC_0$ означає, що початкова складність проблеми була завищена під час її формалізації. Цей результат є критично важливим для розуміння якості початкового планування дослідження. Початкова оцінка $IC_0 = 9$ свідчила про низьку складність, що передбачало потребу в 3-4 експертах та тривалість дослідження 2-3 тижні. Фактичний $IC_{fact} = 1,224$ також відповідає низькій складності, однак, значне

відхилення Δ вказує на те, що початкові припущення щодо розкиду думок експертів були неточними, і проблема виявилася менш складною для експертної оцінки, ніж передбачалося. Це означає, що, можливо, було залучено більше ресурсів, ніж об'єктивно необхідно. Цей значний розрив демонструє цінність методики як інструменту самокорекції та адаптивного планування. Вона надає об'єктивний, заснований на даних зворотний зв'язок щодо початкового розуміння проблеми та розподілу ресурсів. Це дозволяє керівникам проєктів коригувати методологію для подібних проблем у майбутньому, забезпечуючи адекватне планування бюджету, термінів та складу команди дослідників;

– проведено нормалізацію ваг критеріїв: перетворення агрегованих зважених оцінок $\bar{S}_i$ у відносні ваги W_i ($W_i \geq 0$, $\sum W_i = 1$), які відображають пропорційну важливість кожного критерію в загальній оцінці якості (табл. 5).

Таблиця 5 – Нормалізовані ваги (W_i , $i = \overline{1, n}$)

C_i	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
W_i	0,1834	0,1688	0,1778	0,1725	0,1474	0,15

Аналіз отриманих в табл. 5 ваг W_i дозволяє чітко визначити пріоритети серед якісних аспектів, що впливають на якість підшипника. Критерій C_1 (Плавність обертання) має найвищу вагу (0,1834), за ним слідує C_3 (Стійкість до перегріву) з вагою 0,1778 та C_4 (Відчуття люфту) з вагою 0,1725. Натомість C_5 (Легкість монтажу/демонтажу) та C_6 (Сприйняття оператором комфорту роботи) мають найнижчі ваги (0,1474 та 0,1500 відповідно). Це кількісно підтверджує колективне судження експертів про те, що для високоточного машинобудування ключові експлуатаційні характеристики, такі як плавність ходу, термостійкість та відсутність люфту, є більш критичними, ніж аспекти зручності монтажу чи суб'єктивного комфорту оператора. Таке ранжування безпосередньо інформує про

пріоритети у проектуванні, виробництві та контролі якості, вказуючи, куди слід спрямовувати ресурси для досягнення максимальної сприйнятої якості;

– визначено інтегральні оцінки якості (Q_p , $p = \overline{1, s}$), що є результатом моделі, яка надає єдину кількісну міру загальної якості для кожного прототипу (табл. 6). Це дозволяє безпосередньо порівнювати та ранжувати об'єкти.

Таблиця 6 – Інтегральні оцінки (Q_p , $p = \overline{1, s}$) якості та ранжування

Прототип	Інтегральна оцінка якості (Q_p , $p = \overline{1, s}$)	Ранг
P_1	86,71	1
P_2	76,90	3
P_3	82,15	2

Перетворення розрізнених якісних суджень у єдиний, порівняльний показник є кінцевою метою методики для неструктурованих проблем. Початкова проблема полягала в тому, що якісні судження було важко формалізувати. Застосована методика систематично перетворила ці судження на кількісні показники шляхом зважування компетентності експертів та ваг критеріїв. Отримане значення Q_p ($p = \overline{1, s}$) є агрегацією всіх цих складних, зважених вхідних даних в одне дієве число. Це дає змогу приймати об'єктивні рішення там, де раніше були доступні лише суб'єктивні експертні думки, тим самим зменшуючи невизначеність та підвищуючи надійність остаточного вибору.

Таким чином, пройдено Етап III, в результаті якого визначено, що прототип P_1 має найвищу оцінку (86,71), за ним слідує P_3 (82,15), а P_2 отримав найнижчу оцінку (76,90). Найбільший вплив на інтегральну оцінку мають критерії плавності обертання ($W_1 = 0,1834$), стійкості до перегріву ($W_3 = 0,1778$) та відчуття люфту ($W_4 = 0,1725$).

З метою аналізу моделі та виведення за здійсненим дослідженням рішення надалі здійснено перехід до Етапу IV, на якому:

– проведено аналіз чутливості моделі для розуміння впливу невизначених параметрів на кінцеву інтегральну оцінку за двома сценаріями:

■ при збільшенні ваги критерію C_1 (плавність обертання) на 5%: результати аналізу (табл. 7) показали мінімальні зміни в інтегральних оцінках якості прототипів (менше як 0,1% для всіх), при цьому ранжування прототипів залишилося незмінним: $P_1 \succ P_3 \succ P_2$, що свідчить про високу стійкість моделі до помірних коливань у вагах критеріїв та підвищує довіру до отриманих результатів й їх надійності для прийняття рішень.

Таблиця 7 – Результати аналізу чутливості до зміни ваги критерію C_1

Прототип	Початкова Q_p	Нова Q_p ($C_1 + 5\%$)	Зміна Q_p	Відсоткова зміна Q_p
P_1	86,71	86,78	+0,07	+0,08%
P_2	76,90	76,98	+0,08	+0,10%
P_3	82,15	82,18	+0,03	+0,04%

■ при виключенні одного з експертів (а саме E_4): результати аналізу (табл. 8) показали незначні зміни в інтегральних оцінках якості прототипів (менше як 0,4% для всіх), найбільша зміна спостерігалася для прототипу P_3 (-0,39%), тоді як для P_1 та P_2 зміни є ще меншими. При цьому ранжування прототипів залишилося незмінним: $P_1 \succ P_3 \succ P_2$, що підтверджує високу стійкість моделі до змін у складі експертної групи, що свідчить про надійність отриманих результатів та їхню стабільність.

Таблиця 8 – Результати аналізу чутливості до виключення експерту E_4

Прототип	Початкова Q_p	Нова Q_p ($C_1 + 5\%$)	Зміна Q_p	Відсоткова зміна Q_p
P_1	86,71	86,90	+0,19	+0,22%
P_2	76,90	76,92	+0,02	+0,03%
P_3	82,15	81,83	-0,32	-0,39%

– аналіз успішності та ефективності дослідження за коефіцієнтом детермінації R^2 : за результатами дослідження розрахований коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,914$ та значно перевищує встановлений поріг у 0,75, а, отже, підтверджує високу пояснювальну здатність моделі: інтегральна оцінка якості (Q_p) ефективно відображає та пояснює варіації в індивідуальних експертних судженнях щодо якості прототипів, що підвищує довіру до результатів дослідження;

– аналіз адекватності індексу складності проблеми – на основі порівняння індексів складності IC_{fact} з IC_0 (табл. 4) визначено, що початкове значення IC_0 не відповідає дійсності та говорить про неточність початкових припущень ($\Delta \geq 40\%$ та $IC_{fact} \ll IC_0$ вказують на завищення початкової складності проблеми під час її формалізації). Ця розбіжність є не просто помилкою, а цінним уроком, інтегрованим у саму методологію. Методика передбачає розрахунок як початкового (прогнозного), так і фактичного (після збору даних) індексу складності. Велика різниця між ними виявляє значну невідповідність між початковими очікуваннями та реальністю узгодженості експертних суджень. У цьому випадку, менший фактичний розкид думок експертів ($D_{fact} = 0,068$) порівняно з очікуваним ($D_{exp} = 0,5$) призвів до значно нижчого фактичного індексу складності ($IC_{fact} = 1,224$) порівняно з початковим ($IC_0 = 9$). Це означає, що проблема виявилася менш складною для експертної оцінки, ніж передбачалося на етапі планування. Якщо ж припустити, що в експертній групі кількість експертів зменшилась на одного експерта (наприклад, E_4), то в такому випадку ми отримаємо $D_{fact} = 0,0753$, що призведе й до збільшення $IC_{fact} = 1,3561$, а отже, до зменшення відхилення Δ ($\Delta = 84,93\%$), тобто внаслідок змінення експертної групи на одного експерта можна досягти й

зменшення рівня неадекватності визначеного на етапі планування дослідження індексу складності. Також, умова $\Delta \geq 40\%$, $IC_{fact} \ll IC_0$ має прямі наслідки для планування майбутніх проєктів, вказуючи на те, що, можливо, було виділено більше ресурсів (наприклад, залучено більше експертів або тривалість дослідження була довшою), ніж об'єктивно необхідно.

Поряд із аналізом моделі на даному кроці сформульовано остаточне рішення – фінальне ранжування прототипів P_p ($p = \overline{1, s}$) від найвищої до найнижчої якості за інтегральними оцінками якості (Q_p , $p = \overline{1, s}$) (табл. 6): $P_1 \succ P_3 \succ P_2$.

Також для отриманого розв'язку проведена якісна інтерпретація кількісних результатів: отримані кількісні оцінки чітко вказують на те, що новий керамічний підшипник (P_1) є кращим вибором з точки зору комплексної якості, оціненої експертами з урахуванням їх компетентності та важливості критеріїв, його перевага над гібридним (P_3) та стандартним сталевим (P_2) підшипниками є значною, що підтверджує його потенційну придатність для впровадження у виробництво. Крім того, додано детальний аналіз переваг, недоліків та рекомендацій для кожного прототипу:

– прототип P_1 : демонструє найвищі показники за найважливішими критеріями: «плавність обертання» (90,49), «стійкість до перегріву» (93,66) та «віброакустичні характеристики» (85,05), що свідчить про його високу ефективність у критичних експлуатаційних умовах високошвидкісних шпинделів; його висока інтегральна оцінка (86,71) підтверджує його загальну перевагу. Оцінки за критеріями «легкість монтажу/демонтажу» (79,34) та «комфорт роботи» (82,23) є дещо нижчими порівняно з його основними експлуатаційними характеристиками, хоча все ще залишаються на високому рівні, що може вказувати на потенційні, хоч і незначні, виклики під час встановлення або суб'єктивного сприйняття оператором.

Рекомендується до негайного впровадження у виробництво для застосувань, де плавність, термостійкість та низький рівень вібрацій є критично важливими. Для подальшого вдосконалення можна розглянути оптимізацію конструкції для спрощення монтажу та підвищення ергономіки, якщо це не вплине на ключові експлуатаційні показники.

– прототип P_2 : має найвищу оцінку за критерієм «легкість монтажу/демонтажу» (86,74), що вказує на його простоту у встановленні та обслуговуванні, що є важливим фактором для застосувань, де швидкість заміни та мінімізація часу простою є пріоритетом; значно поступається іншим прототипам за ключовими експлуатаційними характеристиками, такими як «стійкість до перегріву» (68,69), «віброакустичні характеристики» (71,55) та «плавність обертання» (78,86); його інтегральна оцінка (76,90) є найнижчою. Не рекомендується для використання у високошвидкісних шпинделях прецизійних верстатів через низькі показники за критично важливими критеріями та може бути розглянутий для менш вимогливих застосувань, де вартість та легкість обслуговування є пріоритетом, а високі швидкості та точність не є основними вимогами;

– прототип P_3 : займає проміжне положення між P_1 й P_2 за більшістю критеріїв, демонструючи збалансовані характеристики, особливо добре проявляє себе у «плавності обертання» (85,25) та «стійкості до перегріву» (83,79), що робить його кращим за сталевий аналог у цих аспектах; поступається P_1 за більшістю критичних експлуатаційних показників; його інтегральна оцінка (82,15) є другою, але значно нижчою за P_1 . Може бути розглянутий як альтернатива P_1 у випадках, коли повне впровадження керамічного підшипника є економічно невиправданим або існують інші обмеження. Однак, для досягнення максимальної якості та продуктивності у

високошвидкісних шпинделях, P_1 залишається кращим вибором.

Такі дані надали, таким чином, пряму відповідь на основне питання порівняння прототипів, запропонувавши чітку кількісну основу для прийняття рішення.

Надалі здійснено перехід на останній Етап V, на якому:

– на основі аналізу з використанням введеної метрики складності проблеми розроблено рекомендації щодо планування подібних досліджень у майбутньому для підвищення точності та забезпечення адекватності використаних ресурсів: доцільно переглянути критерії з метою виявлення надлишкових або дублювальних, а також розглянути можливість об'єднання схожих критеріїв, що може спростити систему оцінювання; розглянути можливість скорочення кількості залучених експертів або тривалості дослідження, оскільки проблема виявилася менш складною, ніж очікувалося, ресурси можуть бути перенаправлені на поглиблений аналіз інших аспектів або на інші проекти; розглянути можливість спрощення методів збору експертних даних, якщо це не вплине на достовірність результатів;

– на основі інтегральних оцінок якості та проведеного аналізу, інженерній компанії надано чітку, дієву рекомендацію щодо нового керамічного підшипника, виходячи з того, що прототип P_1 продемонстрував найвищу інтегральну якість серед усіх досліджуваних варіантів, що обґрунтувало його впровадження у виробництво;

– надано ітеративне уточнення для підвищення точності й адекватності моделі (стосовно переоцінки критеріїв та компетентності експертів, зміною складу експертної групи залученням більш спеціалізованих фахівців, надання експертам додаткової інформації про об'єкти дослідження, деталізації критеріїв оцінки, проведення додаткового раунду експертизи) та заключні висновки з випискою за основними показниками здійсненого дослідження.

Наостанок зауважимо, що проведений обчислювальний експеримент продемонстрував, як комплексна методика ефективно перетворила якісні експертні судження на кількісні, дієві дані, незважаючи на виявлене початкове завищення складності проблеми. Це забезпечило надійний процес прийняття рішень для інженерної компанії, дозволяючи їй впевнено впроваджувати інноваційні рішення.

Результати та обговорення

Розроблена методика має кілька принципових переваг порівняно з існуючими підходами.

По-перше, диференційоване зважування компетентності експертів дозволяє більш точно агрегувати експертні судження, що особливо важливо при роботі з міждисциплінарними проблемами у високотехнологічних галузях машинобудування. Наприклад, при розробці нових систем автоматизованого керування верстатами необхідно інтегрувати знання експертів з механіки, електроніки, програмування та ергономіки, кожен з яких має різний рівень компетентності у суміжних областях.

По-друге, індекс складності проблеми та введена метрика Δ забезпечують об'єктивну основу для планування ресурсів дослідження. Завдяки їм методика є не одноразовим інструментом, а рамковою основою для ітеративного навчання та вдосконалення. Велике значення Δ трансформується в конкретні рекомендації для коригування методологічного підходу в наступних проектах. Це демонструє здатність методики розвиватися та оптимізувати своє застосування, призводить до більш точних початкових оцінок проблеми та ефективнішого розподілу ресурсів з часом, а також сприяє застосуванню підходу навчання організації до вирішення складних проблем. На практиці це є особливо цінним для промислових підприємств, які мають обмежені ресурси та потребують обґрунтованого планування інноваційних проєктів. Можливість

прогнозувати потребу в експертах, тривалість дослідження та потенційні ризики неузгодженості значно підвищують ефективність управління проєктами.

По-третє, п'ятиетапна структура методики забезпечує системний підхід до розв'язання неструктурованих проблем, гарантуючи, що всі критичні аспекти будуть належним чином враховані. Ітеративний характер методики дозволяє уточнювати результати на основі нової інформації та забезпечує високу адаптивність до специфіки конкретних проблем.

Водночас, методика має певні обмеження. Її ефективність суттєво залежить від якості формування експертної групи та точності оцінки компетентності експертів. Неадекватна оцінка компетентності може призвести до спотворення результатів, особливо при роботі з високо спеціалізованими технічними проблемами. Крім того, методика вимагає значних часових та організаційних ресурсів для її повноцінної реалізації.

Особливої уваги заслуговує питання валідації результатів. У технічних галузях не завжди можливо швидко перевірити адекватність експертних оцінок через експериментальні дані або промислову експлуатацію. Наприклад, оцінка довговічності нових конструкційних матеріалів може потребувати років випробувань. Тому важливим напрямком подальших досліджень є розробка методів непрямой валідації, що базуються на аналізі узгодженості експертних суджень та їх відповідності теоретичним моделям.

Перспективи практичного застосування методики охоплюють широкий спектр технічних проблем: від оцінки інноваційних матеріалів та технологій до планування модернізації виробничих систем. Особливо перспективним є застосування методики у сфері Індустрії 4.0, де необхідно інтегрувати традиційні інженерні знання з новими цифровими технологіями.

Висновки

Основні наукові та практичні результати дослідження полягають у наступному.

1. Досліджено проблему аналізу та розв'язання неструктурованих багато-об'єктних проблем, обґрунтовано актуальність розробки та застосування ефективної комплексної методики для розв'язання зазначених неструктурованих проблем в умовах невизначеності та обмеженості об'єктивних даних.

2. Розроблено та обґрунтовано комплексну п'ятиетапну методику аналізу та розв'язання неструктурованих багато-об'єктних проблем, яка дозволяє систематично перетворювати якісні експертні судження у кількісні оцінки для прийняття обґрунтованих рішень в умовах невизначеності.

3. Визначено та обґрунтовано ключові етапи, методи та підходи, включені в методику, що дозволяють комплексно ефективно працювати з якісними характеристиками, які є домінуючими у таких проблемах.

4. Інтегровано у методику механізм оцінки компетентності експертів за кожною окремою властивістю (критерієм) об'єкта дослідження, що дозволило зважувати судження експертів відповідно до їхньої фактичної компетентності в

конкретній області, підвищуючи достовірність та об'єктивність агрегованих даних.

5. Запропоновано та математично обґрунтовано введення індексу складності проблеми в методику як об'єктивної метрики для оцінки ресурсомісткості дослідження, обґрунтованого планування ресурсів, прогнозування методологічних ризиків та адаптації методики до специфіки конкретної проблеми.

6. Практично підтверджено ефективність методики через обчислювальний експеримент з оцінки якості керамічного підшипника, що продемонстрував успішне перетворення якісних характеристик у надійні кількісні оцінки.

Розроблена методика є потужним інструментом для прийняття обґрунтованих рішень за об'єктами та процесами довільної фізичної природи, в основних характеристиках яких міститься якісна або неповна інформація. Її застосування дозволяє підвищити ефективність проектування, діагностики та управління об'єктами з домінуючими неструктурованими характеристиками.

Подяки

Відсутні.

Конфлікт інтересів

Відсутній.

Список використаних джерел

1. Simon, H.A. The Structure of Ill Structured Problem. *Artificial Intelligence*. 1973. No. 4. P. 181-201. doi: [10.1016/0004-3702\(73\)90011-8](https://doi.org/10.1016/0004-3702(73)90011-8)
2. Архипов, О.Є., Архипова, С.А. Оцінювання якості роботи експертів за даними багатооб'єктної експертизи. *Науково-технічний журнал «Захист інформації»*. 2011. № 4. С. 5-13. doi: [10.18372/2410-7840.13.2049](https://doi.org/10.18372/2410-7840.13.2049)
3. Єманов, В.В., Споришев, К.О., Онопрієнко, О.С. Метод багатофакторного вибору експертів за максимумом коефіцієнта компетентності. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2022. Т. 33 (72). № 5. С. 73-80. doi: [10.32782/2663-5941/2022.5/10](https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.5/10)
4. Ткаченко, В.І., Дробаха, Г.А., Смірнов, Є.Б. Шляхи формалізації процесів багато критеріальної оцінки в системі підтримки прийняття рішень. *Системи озброєння і військова техніка*. 2007. № 2 (10). С. 3-11. URL: http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?I21DBN=LINK&P21DBN=UJRN&Z21ID=&S21REF=10&S21CNR=20&S21STN=1&S21FMT=ASPmeta&C21COM=S&2_S21P03=FILA=&2_S21STR=soivt_2007_2_3
5. Saaty, T.L. Decision making with the Analytic Hierarchy Process. *International Journal of Services Sciences*. 2008. Vol. 1, No. 1. P. 83-98. doi: [10.1504/IJSSCI.2008.017590](https://doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590)
6. Belton, V., Stewart, T.J. Multiple Criteria Decision Analysis: An Integrated Approach. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2002. 372 p.
7. Zadeh, L.A. Fuzzy sets. *Information and Control*. 1965. Vol. 8. No. 3. P. 338-353.

8. Bellman, R.E., Zadeh, L.A. Decision-making in a fuzzy environment. *Management Science*. 1970. Vol. 17. No. 4. P. 141-164.
9. Dubois, D., Prade, H. Fuzzy Sets and Systems: Theory and Applications. New York: Academic Press, 1980. 393 p.
10. Yager, R.R. On ordered weighted averaging aggregation operators in multicriteria decision making. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*. 1988. Vol. 18. No. 1, P. 183-190. doi: [10.1109/21.87068](https://doi.org/10.1109/21.87068)
11. Mamdani, E.H. Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*. 1974. Vol. 121. No. 12. P. 1585-1588. doi: [10.1049/piee.1974.0328](https://doi.org/10.1049/piee.1974.0328)
12. Sugeno, M. Industrial Applications of Fuzzy Control. Amsterdam: North-Holland, 1985. 269 p.
13. Pareto, V. Cours d'économie politique. Lausanne: F. Rouge, 1896. 430 p.
14. Edgeworth, F. Y. Mathematical Psychics: An Essay on the Application of Mathematics to the Moral Sciences. London: C. Kegan Paul & Co., 1881. 150 p.
15. Roy, B. The outranking approach and the foundations of ELECTRE methods. *Theory and Decision*. 1991. Vol. 31. No. 1. P. 49-73. doi: [10.1007/978-3-642-75935-2_8](https://doi.org/10.1007/978-3-642-75935-2_8)
16. Steuer, R.E., Dace, N.A. Multiple criteria decision making combined with finance: A categorized bibliographic study. *European Journal of Operational Research*. 2003. Vol. 150. No. 3. P. 496-515. doi: [10.1016/S0377-2217\(02\)00774-9](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(02)00774-9)
17. Zeleny, M. Multiple Criteria Decision Making. New York: McGraw-Hill, 1982. 563 p.
18. Dennis, A., Wixom, B.H., Roth, R.M. Systems analysis and design. New York : John Wiley & Sons, 2019. 594 p.
19. Pankratova, N., Nedashkovskaya, N. Methods of evaluation and improvement of consistency of expert pairwise comparison judgments. *Information Theories and Applications*. 2015. Vol. 22. No. 3. P. 203-223. URL: <http://www.foibg.com/ijita/vol22/ijita22-03-p01.pdf>
20. Панкратова, Н.Д. Системний аналіз. Теорія та застосування. Київ : Наук. Думка, 2018. 348 с.
21. Rotshtein, A., Rakytyanska, H. Fuzzy Evidence in Identification, Forecasting and Diagnosis. Heidelberg: Springer, 2012. 313 p. doi: [10.1007/978-3-642-25786-5_1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-25786-5_1)
22. Кігель, В.Р. Методи і моделі підтримки прийняття рішень у ринковій економіці. Київ: ЦУЛ, 2003. 202 с.
23. Крючковський, В.В. Структуризація процедур колективного прийняття рішень. *Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія «Технічні науки»*. 2011. № 4 (59). С. 128-134. doi: [10.26642/tn-2011-4\(59\)-128-134](https://doi.org/10.26642/tn-2011-4(59)-128-134)
24. Chen, S.J., Hwang, C.L. Fuzzy Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications. Berlin: Springer-Verlag, 1992. 536 p. doi: [10.1007/978-3-642-46768-4](https://doi.org/10.1007/978-3-642-46768-4)
25. Linkov, I., Mosberg, E. Multi-Criteria Decision Analysis: Environmental Applications and Case Studies. Boca Raton: CRC Press, 2012. 204 p. doi: [10.1201/b11471](https://doi.org/10.1201/b11471)
26. Величко, О.М., Коломієць, Л.В., Гордієнко, Т.Б., Шевцов, А.Г., Карпенко, С.Р., Габер, А.А. Групове експертне оцінювання та компетентність експертів. За загал. ред. д-ра техн. наук Величка О.М. Одеса: ФОП Бондаренко М.О., 2015. 286 с.
27. Гнатієнко, Г.М., Снитюк, В.Є. Експертні технології прийняття рішень : монографія. Київ : ТОВ «Маклаут». 2008. 444 с.

References

1. Simon, H.A. The Structure of Ill Structured Problem. *Artificial Intelligence*. 1973. No. 4. P. 181-201. doi: [10.1016/0004-3702\(73\)90011-8](https://doi.org/10.1016/0004-3702(73)90011-8)
2. Arkhypov, O.E., Arkhipova S.A. Otsiniuvannia yakosti roboty ekspertiv za danymy bahatoobiektnoi ekspertyzy. *Naukovo-tekhnichnyi zhurnal «Zakhyst informatsii»*. 2011. No. 4. P. 5-13. doi: [10.18372/2410-7840.13.2049](https://doi.org/10.18372/2410-7840.13.2049)[in Ukrainian]
3. Yemanov, V.V., Sporyshev, K.O., Onoprienko, O.S. Metod bahatofaktornoho vyboru ekspertiv za maksimumom koefitsiienta kompetentnosti. *Vcheni zapysky TNU imeni V.I. Vernadskoho. Seriya: Tekhnichni nauky*. 2022. T. 33 (72). No. 5. P. 73-80. doi: [10.32782/2663-5941/2022.5/10](https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.5/10) [in Ukrainian]

4. Tkachenko, V.I., Drobakha, H.A., Smirnov, E.B. Shliakhy formalizatsii protsesiv bahatokryterialnoi otsinky v systemi pidtrymky pryiniattia rishen. *Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika*. 2007. No. 2 (10). P. 3-11. URL: http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?I21DBN=LINK&P21DBN=UJRN&Z21ID=&S21REF=10&S21CNR=20&S21STN=1&S21FMT=ASP_meta&C21COM=S&S21P03=FILA=&S21STR=soivt_2007_2_3 [in Ukrainian]
5. Saaty, T.L. Decision making with the Analytic Hierarchy Process. *International Journal of Services Sciences*. 2008. Vol. 1, No. 1. P. 83-98. doi: [10.1504/IJSSCI.2008.017590](https://doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590)
6. Belton, V., Stewart, T.J. Multiple Criteria Decision Analysis: An Integrated Approach. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2002. 372 p.
7. Zadeh, L.A. Fuzzy sets. *Information and Control*. 1965. Vol. 8. No. 3. P. 338-353.
8. Bellman, R.E., Zadeh, L.A. Decision-making in a fuzzy environment. *Management Science*. 1970. Vol. 17. No. 4. P. 141-164.
9. Dubois, D., Prade, H. Fuzzy Sets and Systems: Theory and Applications. New York: Academic Press, 1980. 393 p.
10. Yager, R.R. On ordered weighted averaging aggregation operators in multicriteria decision making. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*. 1988. Vol. 18. No. 1, P. 183-190. doi: [10.1109/21.87068](https://doi.org/10.1109/21.87068)
11. Mamdani, E.H. Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*. 1974. Vol. 121. No. 12. P. 1585-1588. doi: [10.1049/piee.1974.0328](https://doi.org/10.1049/piee.1974.0328)
12. Sugeno, M. Industrial Applications of Fuzzy Control. Amsterdam: North-Holland, 1985. 269 p.
13. Pareto, V. Cours d'économie politique. Lausanne: F. Rouge, 1896. 430 p.
14. Edgeworth, F. Y. Mathematical Psychics: An Essay on the Application of Mathematics to the Moral Sciences. London: C. Kegan Paul & Co., 1881. 150 p.
15. Roy, B. The outranking approach and the foundations of ELECTRE methods. *Theory and Decision*. 1991. Vol. 31. No. 1. P. 49-73. doi: [10.1007/978-3-642-75935-2_8](https://doi.org/10.1007/978-3-642-75935-2_8)
16. Steuer, R.E., Dace, N.A. Multiple criteria decision making combined with finance: A categorized bibliographic study. *European Journal of Operational Research*. 2003. Vol. 150. No. 3. P. 496-515. doi: [10.1016/S0377-2217\(02\)00774-9](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(02)00774-9)
17. Zeleny, M. Multiple Criteria Decision Making. New York: McGraw-Hill, 1982. 563 p.
18. Dennis, A., Wixom, B.H., Roth, R.M. Systems analysis and design. New York : John Wiley & Sons, 2019. 594 p.
19. Pankratova, N., Nedashkovskaya, N. Methods of evaluation and improvement of consistency of expert pairwise comparison judgments. *Information Theories and Applications*. 2015. Vol. 22. No. 3. P. 203-223. URL: <http://www.foibg.com/ijita/vol22/ijita22-03-p01.pdf>
20. Pankratova, N.D. Systemnyi analiz. Teoriia ta zastosuvannia. Kyiv : Nauk. Dumka, 2018. 348 s. [in Ukrainian]
21. Rotshtein, A., Rakytyanska, H. Fuzzy Evidence in Identification, Forecasting and Diagnosis. Heidelberg: Springer, 2012. 313 p. doi: [10.1007/978-3-642-25786-5_1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-25786-5_1)
22. Kihel, V.R. Metody i modeli pidtrymky pryiniattia rishen u rynkovii ekonomitsi. Kyiv: TsUL, 2003. 202 s. [in Ukrainian]
23. Kriuchkovskyi, V.V. Strukturyzatsiia protsedur kolektyvnoho pryiniattia rishen. *Visnyk Zhytomyrskoho derzhavnogo tekhnolohichnoho universytetu. Seriiia «Tekhnichni nauky»*. 2011. № 4 (59). S. 128-134. doi: [10.26642/tn-2011-4\(59\)-128-134](https://doi.org/10.26642/tn-2011-4(59)-128-134) [in Ukrainian]
24. Chen, S.J., Hwang, C.L. Fuzzy Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications. Berlin: Springer-Verlag, 1992. 536 p. doi: [10.1007/978-3-642-46768-4](https://doi.org/10.1007/978-3-642-46768-4)
25. Linkov, I., Mosberg, E. Multi-Criteria Decision Analysis: Environmental Applications and Case Studies. Boca Raton: CRC Press, 2012. 204 p. doi: [10.1201/b11471](https://doi.org/10.1201/b11471)
26. Velychko, O.M., Kolomiiets, L.V., Hordiienko, T.B., Shevtsov, A.H., Karpenko, S.R., Haber, A.A. Hrupove ekspertne otsiniuvannia ta kompetentnist ekspertiv / Za zahal. red. d-ra tekhn. nauk Velychka O.M. Odesa: FOP Bondarenko M.O., 2015. 286 s. [in Ukrainian]
27. Hnatiienko, H.M., Snytiuk, V.E. Ekspertni tekhnolohii pryiniattia rishen : monohrafiia. Kyiv : TOV «Maklout». 2008. 444 s. [in Ukrainian]

COMPLEX METHODOLOGY FOR ANALYZING AND SOLVING UNSTRUCTURED MULTI-OBJECT PROBLEMS: THEORETICAL FOUNDATIONS AND PRACTICAL APPROBATION

Leontieva V. V.

Candidate of sciences in physics and mathematics, Associate Professor
Zaporizhzhia National University
69600, Universytetska St., 66, Zaporizhzhia, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-9863-9712>
e-mail: vleonteva@np.znu.edu.ua

Kondratieva N. O.

Candidate of sciences in physics and mathematics, Associate Professor
Zaporizhzhia National University
69600, Universytetska St., 66, Zaporizhzhia, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-6994-2536>
e-mail: nkondr@np.znu.edu.ua

Abstract. The object of the research is unstructured qualitatively defined multi-objective problems of analysis, mathematical modeling and decision-making. The purpose of the work is to develop and substantiate a complex methodology for analyzing and solving of unstructured qualitatively defined multi-objective problems. This methodology provides the possibility conducting the effective analysis and decision-making under conditions of high level of uncertainty that is typical for complex systems of different physical nature. A complex methodology for analyzing and solving unstructured multi-objective problems has been developed. This methodology integrates system analysis and expert methods, ensuring the effective transformation of qualitative judgments into quantitative evaluations, taking into account the uneven competence of experts according to certain criteria, minimizing the influence of subjective factors and providing an objective evaluation of the complexity of the studied problem situation, that allows to reach a qualitatively new level of accuracy and reliability in problem-solving, adequate resource planning, and the forecasting of potential methodological risks at the initial stages of research. Key features of the methodology include: differentiated weighting of experts' competence, implementation of an objective metric of problem complexity (complexity index), construction of a mathematical model of integral quality evaluation, and an iterative nature with the possibility of adaptation. The methodology consists of five main stages: problem identification and structuring, expert knowledge acquisition and competency evaluation, data transformation and model building, model analysis and solution derivation, validation and interpretation of results. The practical testing of the methodology was carried out on the example of evaluating the quality of a ceramic bearing for a high-speed spindle of a precision machine tool. The research results demonstrate the methodology's effectiveness for solving technical problems in mechanical engineering, evaluating innovative materials and technologies, optimizing production processes, and managing risks in complex engineering systems.

Keywords: unstructured problem, multi-objective problem, expert methods, system analysis, decision-making, competence, complexity index, integral evaluation.