

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-363-22>

УДК 004.852

УСАЧОВ ВОЛОДИМИР

Харківський національний університет радіоелектроніки

<https://orcid.org/0009-0001-6264-2039>e-mail: volodymyr.usachov1@nure.ua**СОТНИК ІГОР**

Харківський національний університет радіоелектроніки

<https://orcid.org/0009-0000-5638-6975>e-mail: igor.sotnyk@nure.ua**КОМПЛЕКСНА МЕТОДОЛОГІЯ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОГО ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ІНФОРМАЦІЙНО-ОСВІТНІХ РЕСУРСІВ**

У статті розглядається актуальна науково-практична проблема багатокритеріального оцінювання якості інформаційно-освітніх ресурсів в умовах стрімкої цифровізації освіти та жорстких ресурсних обмежень. Було проаналізовано недоліки існуючих міжнародних стандартів та традиційних метрик, які часто ігнорують специфіку когнітивної діяльності користувачів та економічну складову розробки. Основною метою роботи визначено створення комплексної методології, що забезпечує оптимальний баланс між технічною досконалістю програмного продукту, його дидактичною ефективністю та вартістю реалізації. Для вирішення поставлених завдань запропоновано використання гібридного математичного апарату, який базується на синтезі методу аналізу ієрархій для структурування системи показників та методу аналітичних мереж, що дозволяє враховувати складні нелінійні взаємозв'язки і зворотні впливи між критеріями якості з різних кластерів. Особливу увагу приділено проблемі об'єктивізації експертних оцінок: обґрунтовано доцільність імплементації нечіткої логіки та лінгвістичних змінних для формалізації суб'єктивних суджень методистів і педагогів, що сприяє підвищенню точності результатів кваліметриї. Ключовим елементом запропонованого підходу є інтеграція в модель оцінювання спеціалізованих функцій корисності, зокрема мультиплікативної функції Стоуна та методу зміщеного ідеалу. Це дозволяє реалізувати концепцію вартісно-орієнтованого проектування, автоматично моделюючи жорсткі споживчі та бюджетні обмеження ще на етапі проектування системи. Результати дослідження підтверджують, що розроблений інструментарій дозволяє раціонально розподіляти обмежені ресурси розробника, виявляти та відсіювати функціонально надлишкові компоненти та прогнозувати конкурентоспроможність інформаційно-освітніх ресурсів як при створенні тиражованих продуктів, так і при виконанні індивідуальних замовлень.

Ключові слова: інформаційно-освітні ресурси, багатокритеріальне оцінювання якості, метод аналізу ієрархій, метод аналітичних мереж, нечітка логіка, вартісно-орієнтоване проектування.

USACHOV VOLODYMYR, SOTNYK IHOR

Kharkiv National University of Radio Electronics

COMPREHENSIVE METHODOLOGY FOR MULTICRITERIA QUALITY ASSESSMENT OF INFORMATION-EDUCATIONAL RESOURCES-

The modern stage of digitalization in the educational space is characterized not only by the exponential growth of the software market but also by a fundamental paradigm shift in the creation and consumption of information-educational resources (IER). In an environment of fierce competition and market saturation, product quality transforms from a desirable characteristic into a key factor for survival and commercial success. However, the process of developing and improving IER faces a profound dialectical contradiction: developers must satisfy the constantly growing demands of consumers, who seek to maximize the economic efficiency of the software, while operating under strict constraints of time, financial, and human resources. This necessitates a delicate balance between minimizing development costs and achieving high functional suitability. The study identifies that the complexity of building a universal quality assurance system is exacerbated by the lack of unified mechanisms capable of effectively modeling quality for both mass-market products and individual custom orders. Existing international and national standards, such as ISO 9126, serve as a fundamental classification basis but remain largely framework-oriented. They describe how to define properties like reliability or maintainability but fail to set specific metric systems or normative values for the educational domain, leaving this task to the discretion of users. Furthermore, traditional hierarchical assessment methods often ignore complex non-linear interdependencies and feedback loops between conflicting quality criteria - for instance, when increasing functionality negatively impacts usability - rendering them inadequate for modeling real-world systems. To address these challenges, the paper proposes a comprehensive methodology and mathematical framework for multicriteria quality assessment of IER. The core of the proposed approach is a hybrid model that synthesizes the Analytic Hierarchy Process for structuring the problem with the Analytic Network Process. This combination allows for a systemic view of quality, where metrics do not exist in isolation but interact within a network of causal relationships, enabling the model to account for the mutual influence of criteria from different clusters, such as general quality factors and specialized characteristics. A significant innovation of the study is the integration of Fuzzy Logic into the qualimetric analysis procedures to mitigate the subjectivity inherent in expert evaluations. Recognizing that human thinking operates primarily with qualitative categories, the replacement of rigid numerical scales with fuzzy sets and linguistic variables (e.g., "low complexity," "high efficiency") is advocated. This approach effectively formalizes the vague, intuitive concepts used by methodists and pedagogues, leveling the errors associated with human judgment under uncertainty and aggregating diverse expert opinions into a single integral indicator without losing critical semantic nuances. The methodology is deeply rooted in the concept of Value-Based Software Engineering. To ensure economic rationality, the study introduces specialized utility functions, specifically the multiplicative Stone's function and the specific shifted ideal method. These mathematical tools allow for the formalization of strict consumer and budgetary constraints, automatically filtering out project variants that do not meet critical requirements or exceed cost limits. This mechanism facilitates the identification and elimination of "gold plating" - redundant features that consume significant resources but offer low value to the end-user. Consequently, the approach enables a rational redistribution of the budget towards critical quality components, ensuring the creation of a competitive product at an acceptable price. Finally, the study outlines a strategic vector for future research: the transition from discrete expert surveys to automated systems based on Learning Analytics and Big Data. This evolution aims to verify quality through the deep analysis of real user behavior logs - such as reaction times, error patterns, and navigation paths - transforming quality assurance into a continuous, data-driven cycle of improvement.

Keywords: information-educational resources, multicriteria quality assessment, Analytic Hierarchy Process, Analytic Network Process, Fuzzy Logic, Value-Based Software Engineering.

Стаття надійшла до редакції / Received 15.01.2026

Прийнята до друку / Accepted 11.02.2026

Опубліковано / Published 26.03.2026

This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Усачов Володимир, Сотник Ігор

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Сучасний етап цифровізації освітнього простору характеризується не лише експоненціальним зростанням ринку програмних засобів, але й кардинальною зміною парадигми їх створення та споживання, де центральне місце займають інформаційно-освітні ресурси (далі - ІОР). В умовах жорсткої конкуренції та насиченості ринку різноманітними пропозиціями, якість продукту трансформується з бажаної характеристики у ключовий фактор виживання та успіху, що актуалізує складну науково-практичну проблему її об'єктивної, кількісної оцінки. Процес розробки та вдосконалення ІОР стикається з фундаментальним діалектичним протиріччям: з одного боку, розробники повинні задовольнити постійно зростаючі вимоги споживачів, які прагнуть максимізувати відношення можливої економічної ефективності програмного засобу до його вартості, а з іншого - діяти в умовах суворих обмежень ресурсів (часових, фінансових, людських). Це вимагає від виробників пошуку тонкого балансу між мінімізацією витрат на розробку та досягненням таких значень конструктивних характеристик якості, які б забезпечували функціональну придатність продукту на високому рівні протягом усього життєвого циклу.

Складність побудови універсальної системи забезпечення якості ІОР обумовлена існуванням принципових відмінностей у методологічних підходах до розробки програмних продуктів. У випадку створення тиражованих продуктів, що не є індивідуальними замовленнями, оцінювання базується на циклічному аналізі ринкових пропозицій, де ключову роль відіграють методи бенчмаркінгу або розгортання функції якості, які використовуються для встановлення діапазонів метрик на основі вподобань масового споживача. Натомість, для індивідуальних проектів, орієнтованих на конкретного замовника, вектор формування вимог зміщується на аналіз специфічних обмежень конкретного замовника та попереднього досвіду розробника, де цільові значення показників визначаються не ринковими середніми, а жорсткими умовами технічного завдання. Відсутність єдиних, формалізованих механізмів, які б дозволяли однаково ефективно моделювати та оцінювати якість у обох зазначених сценаріях, стає критичним фактором, що суттєво знижує ефективність управління проектами. В умовах, коли наявні стандарти не задають конкретних значень метрик, а ресурси розробки (час, бюджет) є вичерпними, виникає гостра проблема пріоритетизації вимог. Без застосування адаптивного математичного інструментарію розробники не здатні об'єктивно ранжувати характеристики якості за ступенем їх впливу на кінцеву цінність продукту. Це призводить до прийняття інтуїтивних, економічно необґрунтованих рішень та нерационального розпорощення обмежених ресурсів: значні зусилля можуть витрачатися на вдосконалення другорядних параметрів, що не додають системі реальної корисності, тоді як критичні для функціональної придатності аспекти залишаються недооціненими, що у підсумку провокує зростання собівартості та зниження конкурентоспроможності ІОР.

Ситуація ускладнюється тим, що існуючі міжнародні та національні стандарти, такі як ISO 9126, хоча і є фундаментальною базою для класифікації характеристик програмного забезпечення, носять переважно рамковий характер. Вони описують способи визначення властивостей ПЗ (надійність, зручність супроводу тощо), проте не задають конкретних систем показників (метрик) та їх нормативних значень для специфічних предметних областей, зокрема для освітніх ресурсів, залишаючи це завдання на розсуд користувачів та експертів. Така невизначеність неминує призводить до проблеми суб'єктивності оцінювання та вимагає проведення складних процедур ранжування метрик відповідно до ступеня їх впливу на інтегральний показник якості з урахуванням думок різноманітних груп споживачів. Більше того, традиційні ієрархічні методи оцінки часто ігнорують складні нелінійні взаємозалежності та зворотні зв'язки між різними критеріями якості (наприклад, коли покращення функціональності негативно впливає на зручність використання), що робить їх недостатньо адекватними для моделювання реальних систем.

Вищевказане свідчить про те, що дана проблема має важливе наукове та практичне значення, оскільки потребує розробки комплексних математичних моделей оцінювання, які б виходили за межі спрощених адитивних схем. Необхідним є застосування удосконаленого математичного апарату, що поєднає метод аналізу ієрархій для структурування проблеми з методом аналітичних мереж для врахування взаємного впливу критеріїв із різних кластерів (наприклад, загальних факторів якості та спеціалізованих характеристик). Вирішення цих завдань дозволить створити надійний інструментарій для раціонального розподілу ресурсів, побудови складних функцій корисності, що враховують жорсткі споживчі обмеження, та, зрештою, забезпечить підвищення конкурентоспроможності інформаційно-освітніх ресурсів шляхом гарантування їх високої якості ще на етапі проектування.

Аналіз досліджень

Проблема комплексної оцінки якості програмних засобів та ІОР є предметом численних наукових досліджень, які фокусуються на пошуку ефективних методологій вимірювання як технічних, так і споживчих характеристик продукту. Сучасна еволюція методологій кваліметрії програмного забезпечення освітнього призначення демонструє глибоку трансформацію підходів: від статичного технічного нормування до динамічного аналізу впливу ІТ-продуктів на ефективність когнітивної діяльності здобувачів освіти. У роботі [1] дослідники слушно наголошують, що традиційні інженерні метрики, такі як швидкодія, відмовостійкість, переносимість чи захищеність коду, є безумовно необхідною, проте абсолютно недостатньою умовою якості для специфічних освітніх систем, оскільки вони не враховують психофізіологічні особливості сприйняття інформації. Розвиваючи цю думку, автори вводять та обґрунтовують поняття «педагогічного юзабіліті»,

акцентуючи увагу на тому, що інтерфейс інформаційно-освітнього ресурсу повинен оцінюватися не лише з точки зору класичної ергономіки («наскільки зручно та швидко користувач може натиснути кнопку»), а й з позиції когнітивної психології та дидактики («чи сприяє архітектура цього інтерфейсу запам'ятовуванню, концентрації уваги та зниженню когнітивного навантаження»). Такий підхід, на думку авторів, вимагає радикального перегляду існуючих моделей якості та інтеграції в інженерні специфікації специфічних критеріїв, таких як інтерактивність, адаптивність подачі матеріалу, якість зворотного зв'язку, а також дидактична доцільність візуалізації, які раніше здебільшого ігнорувалися в технічних стандартах серії ISO.

Значний інтерес у науковій спільноті викликає проблема об'єктивізації суб'єктивних вражень методистів, педагогів та контент-мейкерів, які виступають ключовими експертами при оцінюванні якості ІОР. Оскільки людське мислення оперує переважно якісними категоріями, використання жорстких числових шкал часто створює психологічний бар'єр та змушує експертів штучно деталізувати свої судження, обираючи між близькими значеннями, що не мають чіткої семантичної різниці. Для вирішення цієї проблеми у дослідженні [2] пропонується та математично обґрунтовується імплементація апарату нечіткої логіки у процедури кваліметричного аналізу. Автори доводять доцільність переходу від дискретних чисел до використання нечітких множин та лінгвістичних змінних, що дозволяє створити гнучке середовище оцінювання. Такий підхід дає змогу математично коректно формалізувати розмиті, інтуїтивні поняття експертів, нівелювати похибки, властиві людському мисленню в умовах невизначеності, та агрегувати різномірні думки в єдиний інтегральний показник без втрати важливих нюансів експертних знань.

Втім, вирішення проблеми точності експертних оцінок є лише частиною завдання, адже не менш критичним обмеженням класичних підходів є ігнорування реальної архітектури зв'язків між показниками. Тому подальший розвиток методології оцінювання якості неминуче пов'язаний з відходом від спрощених ієрархічних структур, які постулюють незалежність критеріїв, до більш складних мережових моделей. У сучасних дослідженнях [3] ця тенденція реалізується через розробку гібридних методів прийняття рішень, що поєднують гнучкість нечіткої логіки з системністю аналітичних інструментів, таких як Fuzzy ANP та DEMATEL. Автори аргументовано доводять, що метрики якості ІОР не існують в ізоляції, а перебувають у складних причинно-наслідкових зв'язках (наприклад, надмірна функціональна насиченість може негативно впливати на швидкість або юзабіліті). Застосування методу DEMATEL дозволяє візуалізувати ці приховані впливи та побудувати карту взаємозалежностей, забезпечуючи системне бачення якості, де враховуються не лише статичні ваги атрибутів, а й динаміка їхнього взаємного впливу.

Разом з тим, зростання технологічної складності систем неминуче актуалізує питання раціональності витрат, адже в умовах хронічного дефіциту ресурсів та обмеженого фінансування освітньої галузі критично важливим аспектом стає економічна ефективність розробки. Ця проблема розглядається в рамках сучасної концепції вартісно-орієнтованого проектування. У дослідженні [4] автори аргументовано стверджують, що метою проектування ІОР має бути не досягнення абстрактного технологічного ідеалу, а оптимізація співвідношення «педагогічна цінність / вартість розробки». Використання методів функціонально-вартісного аналізу та пріоритетизації вимог дозволяє виявити та відсіяти надлишкові функції, які вимагають значних витрат часу та фінансів, але мають низький вплив на кінцевий результат. Такий прагматичний підхід дозволяє перерозподілити бюджет на користь критично важливих компонентів якості, забезпечуючи створення конкурентоспроможного продукту за прийнятною ціною.

Завершальним інноваційним трендом, широко висвітленим у новітній літературі, є використання інструментів інтелектуального аналізу даних та Big Data для об'єктивної верифікації якості освітніх ресурсів. У роботі [5] розглядається можливість часткової заміни або суттєвого доповнення традиційних експертних опитувань та анкетувань автоматизованим аналізом логів активності користувачів. Дослідники переконливо доводять, що глибинний аналіз реальної поведінки студентів у системі (включаючи такі параметри, як час реакції на завдання, патерни помилок, теплові карти кліків, шляхи навігації та точки виходу з системи) дозволяє отримати найбільш об'єктивні, вільні від соціальних упереджень дані про якість контенту та юзабіліті платформи. Цей підхід дозволяє виявляти приховані проблеми в дизайні курсів, методичні помилки та технічні бар'єри, які можуть залишитися непоміченими під час лабораторних експертних перевірок, трансформуючи процес забезпечення якості в безперервний цикл вдосконалення на основі даних.

Мета статті

Метою роботи є розробка комплексної методології та математичного забезпечення для багатокритеріальної оцінки якості ІОР, що дозволяє забезпечити баланс між технічною досконалістю продукту та економічною ефективністю його розробки. В рамках запропонованого підходу процес кваліметрії розглядається як ітераційна процедура прийняття рішень, яка базується на синтезі методів аналізу ієрархій для структурування показників якості та методу аналітичних мереж для врахування їх взаємних впливів. Оцінювання здійснюється шляхом побудови інтегральних моделей, в яких окремі метрики якості (надійність, юзабіліті, функціональність) агрегуються з урахуванням вагових коефіцієнтів, отриманих на основі експертних суджень. Ключовим елементом методики є використання спеціалізованих функцій корисності, що дозволяє формалізувати жорсткі споживчі та бюджетні обмеження, автоматично відсіюючи варіанти, які не відповідають критичним вимогам. Використання такого підходу дає змогу досягти таких цілей: реалізувати механізм раціонального розподілу обмежених ресурсів розробника, фокусуючись на тих характеристиках ІОР, які мають найбільшу цінність для кінцевого споживача; мінімізувати суб'єктивність експертних оцінок за рахунок

перевірки узгодженості суджень, а також забезпечити можливість адаптації метрик якості під специфіку конкретних освітніх завдань (тиражовані продукти або індивідуальні розробки). Зокрема, застосування розробленого інструментарію дозволяє ще на етапі проектування прогнозувати конкурентоспроможність освітнього ресурсу, уникаючи витрат на реалізацію надлишкового функціоналу, та гарантувати відповідність продукту сучасним вимогам ринку.

Виклад основного матеріалу

Метод аналізу ієрархій є замкнутою логічною конструкцією, що забезпечує, за допомогою простих правил, аналіз складних проблем і приводить до найкращої відповіді. Метод дозволяє групі людей взаємодіяти з приводу проблеми, що їх цікавить, модифікувати свої судження і, в результаті, об'єднати групові судження відповідно до основного критерію: при проведенні попарних порівнянь об'єктів по відношенню до деякої характеристики, або характеристик по відношенню до вищої мети, зворотні відносини забезпечують ключ до об'єднання групових суджень раціональним чином [6].

Центральним питанням при побудові ієрархії - наскільки сильно впливають окремі фактори найнижчого рівня ієрархії на вершину (загальну мету). Нерівномірність впливу за всіма факторами призводить до необхідності визначення інтенсивності впливу, або, вагових пріоритетів факторів. Визначення пріоритетів факторів нижчого рівня щодо мети може бути зведено до послідовності завдань визначення пріоритетів для кожного рівня, а кожне таке завдання - до послідовності попарних порівнянь. Порівняння залишаються основними складовими теорії аналізу ієрархій, навіть якщо вихідне завдання ускладнене умовами зворотного зв'язку між різними рівнями або факторами.

Використання ієрархічного підходу в аналізі систем має ряд істотних переваг, головна з яких є універсальність методу, що дозволяє працювати не тільки з незалежними, але і з залежними критеріями. Структурна гнучкість ієрархії дозволяє розглядати систему на будь-якому рівні деталізації завдяки властивостям декомпозиції та агрегування, що дає можливість точно описувати, як зміни пріоритетів на верхніх рівнях впливають на значимість елементів нижніх рівнів. Таке уявлення забезпечує комплексний погляд на об'єкт дослідження: воно надає детальну інформацію про структуру і функції системи на нижніх рівнях, одночасно забезпечуючи розгляд стратегічних факторів і цілей на вищих рівнях. Крім того, важливо відзначити, що природні системи, організовані ієрархічно за допомогою модульної побудови, формуються і функціонують значно ефективніше, ніж системи, зібрані як єдине неструктуроване ціле [7].

Для кожного ІОР будуються ієрархія груп показників якості f_{ij} в рамках фактора F_i . Далі слід задати спосіб визначення ваг і визначити вид функції корисності систем даного призначення для споживача. Обрані показники зазвичай мають різний ступінь важливості для кінцевого користувача, і користувач приймає рішення про перевагу тієї чи іншої системи виходячи з цього. Математична модель такої поведінки називається моделлю споживчих переваг, в якій благами є критерії якості програмного продукту, а переваги споживачів відповідають ваговим коефіцієнтам обраних критеріїв. У даному випадку, споживчий набір, що представляє собою критерії якості системи, буде представляти собою вектор, координати якого дорівнюють абсолютному значенню критеріїв якості.

Для розрахунку вагових коефіцієнтів показників якості проводиться опитування експертів, що працюють з ІОР, з використанням анкет. Опитування, згідно з рекомендаціями методу, проводиться з використанням шкали [0...9], оскільки такий вибір забезпечує прийнятну точність, обґрунтовану фундаментальними принципами людської психології [8]. Якісні відмінності стають значущими на практиці і мають елемент точності саме в тих випадках, коли величина порівнюваних предметів одного порядку або предмети близькі щодо властивості, використаної для порівняння. Здатність людини проводити якісні розмежування ефективно описується п'ятьма визначеннями - рівний, слабкий, сильний, дуже сильний і абсолютний, - а введення компромісних визначень між сусідніми значеннями, коли потрібна велика точність, формує підсумкову шкалу з дев'яти рівнів, узгодженість якої підтверджена практикою. Крім того, даний підхід корелює з практичним методом класифікації стимулів у трихотомію зон: неприйняття, байдужості та прийняття, де для більш тонкої класифікації в кожну з цих зон закладено принцип трихотомії (поділ на низький, помірний і високий ступені), утворюючи в сумі дев'ять відтінків значущих особливостей. Обґрунтованість такого діапазону також підтверджується психологічною межею при одночасному порівнянні, що вказує на те, що якщо взяти ряд окремих предметів, що злегка відрізняються один від одного, то для їх розрізнення знадобиться саме 9 точок [9].

Опитування користувачів проводиться з наступним формулюванням: «Є дві властивості програмного продукту. Вкажіть, яка з них є більш важливою для Вас при формуванні підсумкової оцінки продукту, позначте відносну важливість в термінах шкали оцінок, зазначених нижче»: 1 - рівна значимість обох критеріїв, 3 - слабка перевага першого критерію над другим, 5 - сильна перевага першого над другим, 7 - значна перевага першого над другим, 9 - абсолютна перевага першого над другим (оцінки 2, 4, 6 і 8 теж використовуються як проміжні, тобто при невпевненості у виборі точного значення).

В результаті опитування заповнюється матриця A , де елемент a_{ij} (A_i важливіший або дорівнює A_j) визначається наступним чином: $a_{ij} = 1$ - властивості рівні за значимістю, $a_{ij} = 3$ - A_i має слабку перевагу над A_j , $a_{ij} = 5$ - A_i має сильну перевагу над A_j , $a_{ij} = 7$ - A_i має значну перевагу над A_j , $a_{ij} = 9$ - A_i має абсолютну перевагу над A_j , $a_{ij} = 2, 4, 6, 8$ - проміжні значення для надання відтінку оцінкам. Якщо навпаки є перевага елемента A_j щодо A_i , то елемент $a_{ij} = 1/a_{ji}$.

Послідовність дій при використанні методу аналізу ієрархій така:

1. Складаються таблиці суджень, в яких опитування користувачів проводиться за описаним вище принципом. У кожній таблиці порівнюються тільки критерії, що входять в один кластер і знаходяться на одному рівні ієрархії.

2. Для кожної таблиці обчислюється вектор пріоритетів одних критеріїв над іншими: підсумувати елементи кожного рядка і нормалізувати діленням кожної суми на суму всіх елементів, сума отриманих результатів буде дорівнювати одиниці.

$$\omega_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} \quad (1)$$

Потім кожен вектор нормується:

$$\omega_i(norm) = \frac{\omega_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i} \quad (2)$$

Знайдений вектор пріоритетів відповідає головному власному вектору (ω_i). Значення $\omega_i(norm)$ для кожного критерію відповідає шуканій ваговій функції $\omega(i, j)$, яка відображає значимість (вагу) критерію у формуванні фактора або критерію більш високого рівня ієрархії.

3. На наступному кроці знаходиться індекс узгодженості для кожної таблиці. Узгодженість думок експертів можна оцінити за величиною коефіцієнта конкордації (далі - КК):

$$W = \frac{12S}{n^2(m^3 - m)}, \quad (3)$$

де S - сума квадратів відхилень всіх оцінок рангів кожного об'єкта експертизи від середнього значення, n - число експертів, m - число об'єктів експертизи.

Коефіцієнт конкордації змінюється в діапазоні $0 < W < 1$, причому 0 - повна неузгодженість, 1 - повна однаковість. При побудові ієрархій значення КК нижче $0,9$ неприпустимо.

4. Якщо КК близький до нуля, то виникає необхідність у перегляді суджень, оскільки причиною неузгодженості найчастіше є неадекватна оцінка експертами реального пріоритету однієї властивості по відношенню до всіх інших.

5. Після виявлення суджень користувача про важливість наявності тих чи інших властивостей і можливого підвищення їх індексу узгодженості, необхідно визначити вид самої функції корисності, яка також враховує споживчі обмеження.

Для визначення споживчих обмежень проводиться опитування за списком всіх критеріїв, що входять до ієрархії. Експертам пропонується визначити нижні межі оцінок якості кожного критерію, при невиконанні яких інформаційно-освітній ресурс не зможе виконувати своє призначення. Оцінку пропонується проводити також в інтервалі від 0 до 9 . Таким же чином оцінюється і сам ІОР.

Для остаточної оцінки ІОР необхідно вибрати і обчислити функцію корисності. Серед найбільш підходящих можна виділити такі функції корисності, як: функція Стоуна (мультиплікативна), модифікована функція Стоуна (адитивна), метод зміщеного ідеалу.

Розглянемо кожен з них:

1. Функція Стоуна являє собою функцію, яка жорстко враховує споживчі обмеження, тобто дана функція приймає нульове значення, якщо хоча б один з показників менше, ніж виставлене експертами споживче обмеження:

$$\begin{cases} F_{IOP} = \prod_{i=1}^n \tilde{X}_i \cdot \omega_i(norm) \\ F_{CO} = \prod_{j=1}^n \tilde{X}_j \cdot \omega_j(norm) \\ \tilde{X}_i = 0, \text{ якщо хоча б один } \tilde{X}_i < \tilde{X}_j \end{cases} \quad (4)$$

де \tilde{X}_i - оцінки ІОР, \tilde{X}_j - споживчі обмеження, $\omega_i(norm)$ - ваги критеріїв (значимість критеріїв), F_{IOP} - функція корисності оцінюваного ІОР, F_{CO} - функція, що визначає споживчі обмеження.

2. Модифікована функція Стоуна являє собою функцію, яка більш гнучко враховує споживчі обмеження:

$$\begin{cases} F_{IOP} = \sum_{i=1}^n \tilde{X}_i \cdot \omega_i(norm) \\ F_{CO} = \sum_{j=1}^n \tilde{X}_j \cdot \omega_j(norm) \\ F_{IOP} = 0, \text{ якщо } \forall \tilde{X}_i < \tilde{X}_j \end{cases} \quad (5)$$

де \tilde{X}_i - оцінки ІОР, \tilde{X}_j - споживчі обмеження, $\omega_i(norm)$ - ваги критеріїв (значимість критеріїв), F_{IOP} - функція корисності оцінюваного ІОР, F_{CO} - функція, що визначає споживчі обмеження.

3. Аналіз великої кількості компонок можна проводити на основі методу зміщеного ідеалу. Метод є універсальним, з його допомогою вирішуються різні практичні завдання [10].

Вибираються допустимі рішення O_j - об'єкти багатокритеріальної задачі $O_j(\tilde{X}_1^j, \tilde{X}_2^j, \dots, \tilde{X}_n^j)$ для яких по кожному критерію задовольняється обмеження типу $\tilde{X}_i^j \geq F_i$, де $i = 1, 2, \dots, I$; F_i - гранично допустимі споживчі значення обраних критеріїв якості. За кожним критерієм вибирається максимальне значення серед розглянутих, в результаті чого отримуємо вектор, що позначає шуканий ідеал:

$$I = (I_1^{\max}, I_2^{\max}, \dots, I_i^{\max}, \dots, I_n^{\max}) \quad (6)$$

Для кожного з розглянутих об'єктів за кожним з критеріїв знаходимо відхилення від ідеалу. Ці відхилення і дають адитивну цільову функцію:

$$\begin{cases} F_{IOP}^j = \sum_{i=1}^n |\tilde{X}_i^j - I_i| \omega_i(norm) \\ F_{IOP}^j = 0, \text{ якщо } \forall \tilde{X}_i^j < F_i \end{cases} \quad (7)$$

Після отримання функції корисності для IOP і для бюджетних обмежень, можна зробити висновок про ефективність IOP, щоб IOP вважалось ефективним, необхідно, щоб: $F_{IOP} \geq F_{CO}$.

Метод аналітичних мереж (далі - МАМ) є універсальним інструментом вимірювання залежностей в ієрархії показників. У процесі порівняння елементів ієрархії експерти відповідають на питання, який з двох об'єктів має більший вплив на заданий об'єкт. При порівнянні елементів в методі аналітичних мереж задається інше питання, який з двох об'єктів сильніше впливає на деякий третій об'єкт. Врахування залежностей і зворотних зв'язків між елементами дозволяє більш об'єктивно оцінити розглянуті альтернативи. МАМ вимагає великих витрат для представлення фактів і їх взаємозв'язків, тому він використовується не як основний метод, а як допоміжний - для обліку залежності між об'єктами ієрархії [11].

Суть МАМ полягає у виділенні залежних (схожих) критеріїв, які можуть вплинути на точність кінцевого результату оцінки. Далі виділені критерії порівнюються таким чином, щоб оцінити ступінь їх впливу елементів на третій елемент того ж компонента щодо керуючого критерію. Таким же способом проводяться парні порівняння компонентів мережі за їх взаємним впливом один на одного. В рамках МАМ розглядаються два варіанти - один відповідає впливу елементів компонента тільки на самих себе, а другий - взаємному впливу елементів в одному компоненті.

Оскільки в роботі розглядається залежність критеріїв з різних кластерів факторів - загальних і факторів спеціалізованої якості, то пропонується використовувати МАМ для обліку залежності між об'єктами ієрархії. Для цього слід узагальнити загальні та спеціалізовані фактори в один - якість IOP. Дана модифікація буде компромісним підходом, що дозволяє отримати прийнятний за точністю результат при невеликих витратах часу.

Для отримання необхідного результату слід розрахувати вагу кожного показника в обох ієрархіях (загальних показників якості та показників спеціалізованої якості) окремо:

$$\omega_i(norm) = \frac{\omega_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i} \quad (8)$$

Значення $\omega'_i(norm)$ для кожного показника відповідає шуканій ваговій функції $\omega(i, j)$, яка відображає значимість (вагу) показника у формуванні фактора або критерію більш високого рівня ієрархії.

Далі необхідно об'єднати обидві ієрархії в одну - якість IOP. Після цього розрахунок ваг кожного показника ієрархії проводиться заново:

$$\omega'_i(norm) = \frac{\omega'_i}{\sum_{i=1}^n \omega'_i} \quad (9)$$

Значення $\omega'_i(norm)$ для кожного показника нової ієрархії відповідає шуканій ваговій функції $\omega'(i, j)$, яка відображає значимість (вагу) кожного показника нової об'єднаної ієрархії у формуванні фактора або критерію більш високого рівня.

Значення ваг показників двох різних ієрархій будуть відрізнятися. Для того щоб врахувати цей факт, необхідно порахувати середнє значення ваги кожного показника для отримання найбільш точного значення.

$$\omega''_i = \frac{\omega_i + \omega'_i}{2} \quad (10)$$

Значення ω''_i відповідає шуканій ваговій функції $\omega''(i, j)$, яка відображає значимість (вагу) кожного показника з урахуванням можливих залежностей між показниками якості.

Висновки й перспективи подальшого розвитку

У результаті проведеного дослідження було розроблено та теоретично обґрунтовано комплексну методологію багатокритеріального оцінювання якості інформаційно-освітніх ресурсів, яка базується на гібридному поєднанні методу аналізу ієрархій та методу аналітичних мереж, що дозволило вирішити важливу науково-практичну проблему об'єктивізації суб'єктивних експертних суджень в умовах невизначеності та ресурсних обмежень. Ключовою науковою новизною та перевагою запропонованого підходу є відмова від використання спрощених адитивних схем на користь складних мережевих моделей, які здатні адекватно відображати та враховувати нелінійні взаємозв'язки і зворотні впливи між конфліктуючими критеріями якості, що раніше часто ігнорувалися в традиційних системах оцінювання.

Впровадження в процедуру кваліметричного аналізу спеціалізованих функцій корисності, забезпечує можливість формалізації жорстких бюджетних і споживчих обмежень ще на ранніх етапах життєвого циклу проекту, що дозволяє автоматично відсіювати варіанти, які не відповідають критичним вимогам замовника або перевищують допустимі межі витрат. Практична цінність роботи полягає в реалізації принципів вартісно-орієнтованого проектування, що дозволяє створити дієвий механізм раціонального перерозподілу обмежених ресурсів розробника шляхом виявлення функціонально надлишкових компонентів, які не несуть значної педагогічної цінності, тим самим гарантуючи досягнення оптимального балансу між технічною досконалістю програмного продукту та економічною ефективністю його створення.

Першочерговим та найбільш масштабним вектором розвитку наукових розвідок у даній предметній області є стратегічний перехід від епізодичного використання експертних методів оцінювання до системного впровадження автоматизованих комплексів моніторингу, що базуються на новітніх інструментах навчальної аналітики та технологіях обробки великих даних. Такий технологічний зсув дозволить докорінно трансформувати традиційний процес забезпечення якості, перетворивши його на безперервний цикл вдосконалення на основі емпіричних доказів, де валідація проектних рішень здійснюється не через суб'єктивні анкетування фокус-груп, а шляхом глибинного аналізу масивів об'єктивних даних про реальну поведінку користувачів у системі, включаючи такі тонкі параметри, як теплові карти кліків, специфічні патерни помилок, час реакції на когнітивне навантаження та точки критичного виходу з освітнього середовища, що уможливить виявлення прихованих методичних прогалин, недоступних для виявлення під час лабораторних перевірок.

Іншим важливим перспективним напрямком подальшого розвитку теоретичного базису дослідження є поглиблення та ускладнення математичного апарату шляхом більш широкої інтеграції інструментарію нечіткої логіки та гібридних моделей прийняття рішень у структуру запропонованої методології, що дозволить остаточно подолати обмеження, пов'язані з необхідністю дискретизації безперервних експертних суджень у жорстких числових шкалах. Оскільки людське мислення в умовах невизначеності та неповноти інформації оперує переважно якісними категоріями, подальша наукова робота має зосередитися на розробці вдосконалених алгоритмів використання лінгвістичних змінних для опису складних нелінійних взаємозв'язків між критеріями якості, що забезпечить створення більш гнучкого обчислювального середовища, здатного коректно агрегувати різномірні, часто суперечливі думки експертів у єдиний узгоджений результат без втрати важливих семантичних нюансів, мінімізуючи при цьому психологічні бар'єри та когнітивні викривлення, які неминуче виникають при використанні традиційних детермінованих методів ранжування.

Література

1. Moshood, D. T., Rotimi, E. F., & Rotimi, O. B. J. An Integrated Paradigm for Managing Efficient Knowledge Transfer: Towards a More Comprehensive Philosophy of Transferring Knowledge in the Construction Industry. *Construction Economics and Building*, 2022, vol. 22, iss. 3, article no. e8050. DOI: <https://doi.org/10.5130/ajceb.v22i3.8050>.
2. Kamide, N. Sequential Fuzzy Description Logic. Reasoning for Fuzzy Knowledge Bases with Sequential Information. *2020 IEEE 50th International Symposium on Multiple-Valued Logic (ISMVL)*, Miyazaki, Japan, IEEE, 2020 pp. 218–223. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISMVL49045.2020.000-2>
3. Rayala, V. & Kalli, S. R. Big data clustering using Improvised Fuzzy C-Means clustering. *Revue d'Intelligence Artificielle*, 2021, vol. 34, iss. 6, pp. 701-708. DOI: <https://doi.org/10.18280/RIA.340604>
4. Omran, P. G., Wang, K. & Wang, Z. An Embedding-based Approach to Rule Learning in Knowledge Graphs. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 2019, vol. 33, iss. 4, pp. 1348-1359. DOI: <https://doi.org/10.1109/tkde.2019.2941685>
5. Tanon, P. T., Weikum, G. & Suchanek, F. YAGO 4: A Reason-able Knowledge Base. *The Semantic Web (ESWC 2020), Lecture Notes in Computer Science*, Springer, Cham, 2020, vol. 12123, pp. 583-596. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-49461-2_34
6. Svatoš, M., Schockaert, S., Davis, J., & Kuaelka, O. Strike: Rule-driven relational learning using stratified k-entailment. *24th European Conference on Artificial Intelligence, 29 August–8 September 2020, Santiago de Compostela, Spain – Including 10th Conference on Prestigious Applications of Artificial Intelligence (PAIS 2020)*, 2020, vol. 325, pp. 1515–1522. DOI: <https://doi.org/10.3233/FAIA200259>
7. Oparin, G. A., Bogdanova, V. G., & Pashinin, A. A. Classification in Binary Feature Space Using Logical Dynamic Models. *44th International Convention on Information, Communication and Electronic Technology (MIPRO)*, 27 September–1 October 2021, Opatija, Croatia, IEEE, 2021, pp. 1020-1025. DOI: <https://doi.org/10.23919/mipro52101.2021.9596697>
8. Karataiev, O., Shubin, I. (2023), "Formal model of multi-agent architecture of a software system based on knowledge interpretation". *Radioelectronic and Computer Systems*. 2023. No. 4. P. 53–64. DOI: <https://doi.org/10.32620/reks.2023.4.05>
9. He L., P. Jiang, P-SaaS: knowledge service-oriented manufacturing workflow model for knowledge collaboration and reuse. *IEEE 16th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, Hong Kong, China, 2020, P. 570–575. DOI: <https://doi.org/10.1109/CASE48305.2020.9216974>

10. Kyrychenko, I., Malikin, D. "Research of Methods for Practical Educational Tasks Generation Based on Various Difficulty Levels" 6th International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems (COLINS-2022), May 12–13, 2022, Gliwice, Poland. CEUR Workshop Proceedings 3171, Volume I: Main, 2022. P. 1030–1042. available at: <https://ceur-ws.org/Vol-3171/paper74.pdf>
11. Dudar Z., Shubin I., Kozyriev A. Individual Training Technology in Distributed Virtual University. Lecture Notes in Networks and Systems. 2021, 212 LNNS, P. 379–399. DOI: http://doi.org/10.1007/978-3-030-76343-5_20

References

1. Moshood, D. T., Rotimi, E. F., & Rotimi, O. B. J. An Integrated Paradigm for Managing Efficient Knowledge Transfer: Towards a More Comprehensive Philosophy of Transferring Knowledge in the Construction Industry. *Construction Economics and Building*, 2022, vol. 22, iss. 3, article no. e8050. DOI: <https://doi.org/10.5130/ajceb.v22i3.8050>.
2. Kamide, N. Sequential Fuzzy Description Logic. Reasoning for Fuzzy Knowledge Bases with Sequential Information. *2020 IEEE 50th International Symposium on Multiple-Valued Logic (ISMVL)*, Miyazaki, Japan, IEEE, 2020 pp. 218–223. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISMVL49045.2020.000-2>
3. Rayala, V. & Kalli, S. R. Big data clustering using Improvised Fuzzy C-Means clustering. *Revue d'Intelligence Artificielle*, 2021, vol. 34, iss. 6, pp. 701-708. DOI: <https://doi.org/10.18280/RIA.340604>
4. Omran, P. G., Wang, K. & Wang, Z. An Embedding-based Approach to Rule Learning in Knowledge Graphs. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 2019, vol. 33, iss. 4, pp. 1348-1359. DOI: <https://doi.org/10.1109/tkde.2019.2941685>
5. Tanon, P. T., Weikum, G. & Suchanek, F. YAGO 4: A Reason-able Knowledge Base. *The Semantic Web (ESWC 2020)*, *Lecture Notes in Computer Science*, Springer, Cham, 2020, vol. 12123, pp. 583-596. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-49461-2_34
6. Svatoš, M., Schockaert, S., Davis, J., & Kuaelka, O. Strike: Rule-driven relational learning using stratified k-entailment. *24th European Conference on Artificial Intelligence, 29 August–8 September 2020, Santiago de Compostela, Spain – Including 10th Conference on Prestigious Applications of Artificial Intelligence (PAIS 2020)*, 2020, vol. 325, pp. 1515–1522. DOI: <https://doi.org/10.3233/FAIA200259>
7. Oparin, G. A., Bogdanova, V. G., & Pashinin, A. A. Classification in Binary Feature Space Using Logical Dynamic Models. *44th International Convention on Information, Communication and Electronic Technology (MIPRO)*, 27 September–1 October 2021, Opatija, Croatia, IEEE, 2021, pp. 1020-1025. DOI: <https://doi.org/10.23919/mipro52101.2021.9596697>
8. Karataiev, O., Shubin, I. (2023). "Formal model of multi-agent architecture of a software system based on knowledge interpretation". *Radioelectronic and Computer Systems*. 2023. No. 4. P. 53–64. DOI: <https://doi.org/10.32620/reks.2023.4.05>
9. He L., P. Jiang, P-SaaS: knowledge service-oriented manufacturing workflow model for knowledge collaboration and reuse. *IEEE 16th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, Hong Kong, China, 2020, P. 570–575. DOI: <https://doi.org/10.1109/CASE48305.2020.9216974>
10. Kyrychenko, I., Malikin, D. "Research of Methods for Practical Educational Tasks Generation Based on Various Difficulty Levels" 6th International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems (COLINS-2022), May 12–13, 2022, Gliwice, Poland. CEUR Workshop Proceedings 3171, Volume I: Main, 2022. P. 1030–1042. available at: <https://ceur-ws.org/Vol-3171/paper74.pdf>
11. Dudar Z., Shubin I., Kozyriev A. Individual Training Technology in Distributed Virtual University. Lecture Notes in Networks and Systems. 2021, 212 LNNS, P. 379–399. DOI: http://doi.org/10.1007/978-3-030-76343-5_20