

Національний університет «Львівська політехніка»
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

МЕРЕНИЧ ЮЛІАН ЮЛІАНОВИЧ

УДК 004.9:519.8:004.5

ДИСЕРТАЦІЯ
ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ
ПРОЄКТУВАННЯ ТА ДИЗАЙНУ ВЕБДОДАТКІВ

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії в галузі інформаційних технологій зі спеціальності 126 — Інформаційні системи та технології.

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ Ю. Ю. Меренич

Науковий керівник — Піх Ірина Всеволодівна, доктор технічних наук, професор

Львів — 2025

АНОТАЦІЯ

Меренич Ю. Ю. Інформаційна технологія оцінювання якості проєктування та дизайну вебдодатків. — Кваліфікаційна наукова робота на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 126 «Інформаційні системи та технології». — Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, 2025.

У дисертаційній роботі розв’язано важливе науково-прикладне завдання оцінювання прогнозованої якості проєктування та дизайну вебдодатків шляхом розроблення інформаційної технології на основі функціонального та онтологічного моделювання, пріоритизації факторів за методами математичного моделювання ієрархій та ранжування, багатокритеріального аналізу альтернатив і засобів нечіткої логіки.

В процесі виконання дисертаційного дослідження розроблено функціональну модель проєктування та дизайну вебдодатків. Побудовано онтологічну модель якості проєктування та дизайну вебдодатків, що ґрунтується на основних міжнародних стандартах. Сформовано множини факторів впливу на якість проєктування та дизайну вебдодатків. Проведено семантичне моделювання факторів. Побудовано моделі вагомості факторів. Здійснено формування альтернативних варіантів реалізації проєктування та дизайну вебдодатків з врахуванням принципів ергономіки та когнітивних принципів взаємодії, доступності та інклюзивності, формування інформаційної архітектури та візуального дизайну. Для одержання прогнозного показника якості проєктування та дизайну вебдодатків використано методи нечіткої логіки.

У *вступі* дисертаційної роботи розкрито актуальність тематики, визначено її мету та завдання, що випливають із логіки дослідження. Окреслено взаємозв’язок роботи із науковими темами кафедри комп’ютерних технологій у видавничо-поліграфічних процесах Національного університету «Львівська

політехніка». Сформульовано об'єкт і предмет дослідження, подано характеристику використаних методів, зокрема сучасних підходів до багатofакторного моделювання та опрацювання нечітких множин. Висвітлено наукову новизну та прикладну значущість положень, що виносяться на захист. Зазначено особистий внесок здобувача у спільних публікаціях. Перелічено конференції, на яких проводилася апробація отриманих результатів. Наведено кількісні показники публікаційної активності та описано структуру дисертації.

У *першому розділі* здійснено аналіз сучасного стану та перспектив розвитку вебдодатків. Розроблено функціональну модель процесу створення вебдодатків, що забезпечує послідовний опис основних етапів і підвищує ефективність реалізації проєктів. Розроблено контекстну діаграму та діаграми двох рівнів декомпозиції. Для відображення структури розробленої моделі сформовано ієрархічну діаграму виокремлених вузлів. Викладено теоретичні основи онтологічного моделювання та доведено доцільність опису предметної області у вигляді ієрархічної структури понять. Сформовано алгоритм побудови онтології та проведено аналіз стандартів якості вебдодатків. Розроблено онтології формування якості вебдодатків на основі базових стандартів у даній галузі. Представлено фрагменти онтологічних словників та онтологічні граfi класів онтологій якості вебдодатків. Розроблено узагальнену онтологію якості вебдодатків. Удосконалено метод онтологічного аналізу шляхом групування еквівалентних класів із різних стандартів у єдині концепти. Кластеризація, що ґрунтується на семантичній подібності, структурному аналізі та функціональному значенні, забезпечила коректне співставлення понять, усунення дублювань та узгодженість моделі.

Наведено перелік завдань дисертаційного дослідження.

У *другому розділі* сформовано множину факторів проєктування та дизайну вебдодатків на основі експертного оцінювання. Фактори розподілено за інтегральними характеристиками: ергономіка та когнітивні принципи взаємодії, доступність та інклюзивність, інформаційна архітектура та візуальний

дизайн. Виконано формалізоване представлення зв'язків між факторами засобами семантичних мереж. Розроблено семантичні моделі впливу на ергономіку й когнітивні принципи взаємодії, доступність та інклюзивність, а також на інформаційну архітектуру та візуальний дизайн. Для опису впливів і залежностей використано конструкції логіки предикатів. Розроблено моделі вагомості факторів за методом математичного моделювання ієрархій та удосконалено їх за методом ранжування, що дозволило обчислити вагові значення та встановити найбільш значущі фактори для кожної групи. На основі структурного аналізу побудовано узагальнену багаторівневу модель пріоритетного впливу факторів, яка відображає ієрархію основних складових проєктування та дизайну вебдодатків.

Третій розділ присвячено формуванню альтернативних підходів до реалізації проєктування та дизайну вебдодатків. Обґрунтовано необхідність вибору ефективної стратегії, що передбачає побудову множини альтернатив і визначення оптимальної з них. Для цього проведено багатокритеріальну оптимізацію на множині можливих рішень на основі методу лінійного об'єднання з урахуванням факторів ергономіки та когнітивних принципів взаємодії, доступності й інклюзивності, інформаційної архітектури та візуального дизайну. Виконано оцінювання корисності альтернатив, у результаті чого для кожної групи характеристик виокремлено варіанти, що забезпечують найвищі показники ефективності. Визначено оптимальні варіанти реалізації на основі функцій належності, що підтвердило висновки, отримані за методом лінійного об'єднання критеріїв. Обрано оптимальний варіант проєктування та дизайну вебдодатків, у якому провідну роль відіграють фактори ергономіки та когнітивних принципів взаємодії, тоді як доступність, інклюзивність, інформаційна архітектура та візуальний дизайн мають співмірне значення.

У четвертому розділі розглянуто особливості застосування нечіткої логіки для оцінювання якості проєктування та дизайну вебдодатків. Розроблено ієрархічну модель формування якості, яка враховує найпріоритетніші лінг-

вістичні змінні та часткові показники якості. Для термів домінантних змінних сформовано нечіткі множини на основі матриць попарних порівнянь і нормованих функцій належності. Розроблено нечіткі бази та матриці знань, що відображають взаємозв'язки між комбінаціями термів окремих змінних і інтегральним показником якості. Сформульовано нечіткі логічні рівняння як для загального показника якості проєктування та дизайну, так і для часткових характеристик: ергономіки та когнітивної взаємодії, доступності й інклюзивності, інформаційної архітектури та візуального дизайну. Проведено дефазифікацію нечітких множин завдяки підстановці значень у нечіткі логічні рівняння. За принципом центру ваги обчислено прогнозований показник якості проєктування та дизайну вебдодатків при визначених вхідних параметрах.

Розроблено інформаційну технологію оцінювання якості проєктування та дизайну вебдодатків, яку представлено у вигляді структурно-функціональної моделі з шістьма основними етапами: функціональне моделювання процесу створення вебдодатків, онтологічне моделювання якості вебдодатків, розроблення семантичних моделей факторів, розроблення моделей вагомості факторів, вибір оптимального варіанту проєктування та дизайну вебдодатків, визначення прогнозованого показника якості проєктування та дизайну вебдодатків. Компоненту інформаційної технології, що реалізує визначення пріоритетності факторів за методом ранжування, представлено у вигляді програмного продукту.

Висновки відображають логічне узагальнення проведеного дослідження й формулюють його основні наукові та прикладні результати.

Одержано такі нові наукові результати дисертаційної роботи:

вперше

– розроблено узагальнену модель процесу створення вебдодатків, що інтегрує функціональні, онтологічні та факторні складові забезпечення якості та відображає структурно-логічну послідовність етапів проєктування й оцінювання, визначає онтологічні зв'язки між структурними, функціональними та

експлуатаційними характеристиками відповідно до сучасних міжнародних стандартів веброзробки, а також враховує вагомість факторів на основі їх коефіцієнтів, типів залежностей і результатів попарних порівнянь.

– розроблено інформаційну концепцію визначення оптимальних варіантів проєктування та дизайну вебдодатків із використанням методів лінійного об'єднання критеріїв і нечіткого відношення переваги, що дало змогу формалізувати процес прийняття рішень за умов невизначеності, підвищити об'єктивність оцінювання проєктних рішень і забезпечити вибір оптимальної структури вебдодатка відповідно до вимог якості та ергономіки.

– розроблено інформаційну технологію оцінювання якості проєктування та дизайну вебдодатків на основі функціонального та онтологічного моделювання, методів математичного моделювання ієрархій, багатокритеріального аналізу альтернатив і засобів нечіткої логіки, що сприяє оптимізації процесів прийняття проєктних рішень та підвищенню ефективності розроблення вебо-рієнтованих систем;

удосконалено

– метод онтологічного аналізу шляхом групування еквівалентних класів та їх об'єднання в узагальнені концепти на основі семантичної подібності, структурного аналізу та функціонального значення, що забезпечує коректне співставлення понять у процесі побудови онтологічної моделі;

набула подальшого розвитку

– модель формування якості проєктування та дизайну вебдодатків, яка базується на використанні математичного апарату нечіткої логіки, що дало змогу сформулювати інноваційний підхід до прогностичного оцінювання ефективності проєктних рішень та підвищити точність вибору оптимальних варіантів їх реалізації в умовах невизначеності.

Одержані у дисертації результати використано у ТОВ «ЄВРОКОМП'ЮТЕР» (м. Іршава, Іршавський р-н, Закарпатська обл.), ТОВ «ПеттерсонАпс» (м. Львів), навчальному процесі факультету інформаційних технологій Дер-

жавного вищого навчального закладу «Ужгородський національний університет».

Ключові слова: вебдодаток, модель, альтернатива, онтологічний аналіз, фактор, нечітка логіка, лінгвістична змінна, оцінювання якості, інформаційна технологія, складні системи, системний підхід, нормалізація даних, багатокри-теріальна оптимізація, системний аналіз, прийняття рішень.

ANNOTATION

Merenych Y. Y. Information Technology for Evaluating the Quality of Web Application Design and Development. — Qualification scientific work in manuscript form.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 126 “Information Systems and Technologies”. — Lviv Polytechnic National University, Lviv, 2025.

The dissertation solves an important scientific and applied problem of evaluating the predicted quality of web application design and layout by developing an information technology based on functional and ontological modeling, factor prioritization using mathematical hierarchy modeling and ranking methods, multicriteria analysis of alternatives, and fuzzy logic tools.

In the course of the dissertation research, a functional model of web application design and development was developed. An ontological model of design and development quality of web applications, based on international standards, was constructed. Sets of factors influencing the quality of web application design and development were formed. Semantic modeling of factors was carried out. Models of factor weight significance were developed. Alternative variants of web application design and development were generated, taking into account ergonomics and cognitive principles of interaction, accessibility and inclusiveness, information architecture, and visual design. Fuzzy logic methods were applied to obtain a forecast indicator of design and development quality of web applications.

The introduction of the dissertation highlights the relevance of the topic, defines its aim and objectives arising from the logic of the research. The relationship of the work with the scientific topics of the Department of Computer Technologies in Publishing and Printing Processes at Lviv Polytechnic National University is outlined. The object and subject of the research are formulated, and the characteristics of the applied methods are provided, in particular modern approaches to multifactor

modeling and processing of fuzzy sets. The scientific novelty and applied significance of the provisions submitted for defense are presented. The author's personal contribution to joint publications is noted. The conferences where the results were tested are listed. Quantitative indicators of publication activity are provided, and the structure of the dissertation is described.

The first chapter analyzes the current state and prospects of web application development. A functional model of the web application creation process is developed, providing a sequential description of the main stages and improving project implementation efficiency. A context diagram and two-level decomposition diagrams are developed. To reflect the structure of the model, a hierarchical diagram of identified nodes is constructed. The theoretical foundations of ontological modeling are presented, and the feasibility of describing the subject area as a hierarchical structure of concepts is justified. An algorithm for ontology construction is proposed, and an analysis of web application quality standards is conducted. Ontologies for web application quality formation based on core industry standards are developed. Fragments of ontological dictionaries and ontological graphs of web application quality classes are presented. A generalized ontology of web application quality is constructed. The method of ontological analysis was improved through grouping equivalent classes from different standards into unified concepts. Clustering based on semantic similarity, structural analysis, and functional significance ensured correct alignment of concepts, elimination of duplication, and model consistency.

The dissertation tasks are outlined.

In the second chapter, a set of factors of web application design and development was formed on the basis of expert evaluation. The factors were classified into integral characteristics: ergonomics and cognitive interaction principles, accessibility and inclusiveness, information architecture, and visual design. Formalized representation of the interrelations between factors was performed using semantic networks. Semantic models of influence on ergonomics and cognitive principles of interaction, accessibility and inclusiveness, as well as on information architecture and

visual design were developed. Predicate logic constructions were used to describe influences and dependencies. Factor weight models were developed using the method of mathematical hierarchy modeling and further refined using the ranking method, which allowed the calculation of weight values and identification of the most significant factors for each group. Based on structural analysis, a generalized multilevel model of priority factor influence was constructed, reflecting the hierarchy of main components of web application design and development.

The third chapter focuses on forming alternative approaches to web application design and development. The necessity of selecting an effective strategy that involves building a set of alternatives and determining the optimal one is substantiated. Multicriteria optimization over the set of possible solutions was performed using the method of linear combination with consideration of ergonomics and cognitive principles of interaction, accessibility and inclusiveness, information architecture, and visual design. The utility of alternatives was evaluated, resulting in identification of variants with the highest efficiency indicators for each characteristic group. Optimal solutions were determined based on membership functions, confirming the results obtained using the linear combination method. The optimal variant of web application design and development was selected, where ergonomics and cognitive principles of interaction played the leading role, while accessibility, inclusiveness, information architecture, and visual design had comparable importance.

The fourth chapter discusses the application of fuzzy logic in evaluating the quality of web application design and development. A hierarchical model of quality formation was developed, incorporating the most prioritized linguistic variables and partial quality indicators. Fuzzy sets for the terms of dominant variables were constructed based on pairwise comparison matrices and normalized membership functions. Fuzzy knowledge bases and matrices were developed to represent relationships between combinations of variable terms and the integral quality indicator. Fuzzy logical equations were formulated for both the overall quality indicator of design and development and partial characteristics: ergonomics and cognitive

interaction, accessibility and inclusiveness, information architecture, and visual design. Defuzzification of fuzzy sets was carried out through substitution of values into fuzzy logical equations. The forecast quality indicator of web application design and development was calculated using the centroid method for given input parameters.

An information technology for evaluating the quality of web application design and development was developed, presented as a structural-functional model with six main stages: functional modeling of the web application creation process, ontological modeling of web application quality, development of semantic factor models, development of factor weight models, selection of the optimal design and development variant, and determination of the forecast quality indicator. The component of the information technology that implements factor prioritization using the ranking method was implemented as a software product.

The conclusions present a logical synthesis of the research and formulate its main scientific and applied results.

*Obtained the following new scientific results of the dissertation research:
for the first time*

- a generalized model of the web application development process has been developed, which integrates the functional, ontological, and factor components of quality assurance and reflects the structural and logical sequence of design and evaluation stages. The model defines ontological relationships between structural, functional, and operational characteristics in accordance with modern international web development standards, and also takes into account the significance of factors based on their coefficients, types of dependencies, and results of pairwise comparisons;

- an informational concept for determining optimal design and layout options for web applications has been developed using methods of linear combination of criteria and fuzzy preference relations, which made it possible to formalize the decision-making process under uncertainty, increase the objectivity of project solution evaluation, and ensure the selection of the optimal web application structure in accordance with quality and ergonomics requirements;

– an information technology for assessing the quality of web application design and layout has been developed based on functional and ontological modeling, methods of mathematical hierarchy modeling, multicriteria analysis of alternatives, and fuzzy logic tools, which contributes to the optimization of decision-making processes and increases the efficiency of web-oriented systems development;

improved

– the method of ontological analysis by grouping equivalent classes and combining them into generalized concepts based on semantic similarity, structural analysis, and functional significance, which ensures the correct correspondence of concepts in the process of building an ontological model;

further developed

– the model of web application design and layout quality formation, which is based on the use of fuzzy logic mathematical apparatus, allowing to form an innovative approach to predictive evaluation of project solution efficiency and to increase the accuracy of selecting optimal implementation options under uncertainty.

The results of the dissertation were implemented at LLC “Euro-Computer” (Irshava, Zakarpattia region), LLC “PetersonApps” (Lviv), and in the educational process of the Faculty of Information Technology of Uzhhorod National University.

Keywords: web application, model, alternative, ontological analysis, factor, fuzzy logic, linguistic variable, quality assessment, information technology, complex systems, systems approach, data normalization, multi-criteria optimization, systems analysis, decision-making.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових виданнях, що індексуються у наукометричних базах даних Scopus та Web of Science:

1. Kudriashova A., Pikh I., Senkivskyi V., Merenych Y. Evaluation of prototyping methods for interactive virtual systems based on fuzzy preference relation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. № 5 (4 (131)). Pp. 71–81. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.313099> (квартиль Q3 відповідно до класифікації SCImago Journal).

Статті у наукових виданнях, включених до Переліку наукових фахових видань України:

2. Меренич Ю. Ю., Піх І. В., Коцік О. Ю. Якість верстання вебдодатків як критерій задоволення потреб користувачів. *Поліграфія і видавнича справа*. 2024. № 1 (87). С. 19–27. <https://doi.org/10.32403/0554-4866-2024-1-87-19-27> (індексована у наукометричній базі Index Copernicus).

3. Сабат В. І., Дурняк Б. В., Сеньківський Н. Ю., Меренич Ю. Ю. Дослідження політики безпеки системи управління повноваженнями документообігу для виробничих структур *Комп'ютерні технології друкарства*. 2024. № 2 (52). С. 86–96. <https://doi.org/10.32403/2411-9210-2024-2-52-1-86-96> (індексована у наукометричній базі Index Copernicus).

4. Піх І., Меренич Ю. Онтологічне моделювання структури вебдодатку. Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. 2025. № 82 (2). С. 7–12. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2025-82-1>.

5. Pikh I., Merenych Y. Semantic models for web application design. *Computer Systems and Information Technologies*. 2025. № 2. Pp. 20–26. <https://doi.org/10.31891/csit-2025-2-2>.

6. Піх І. В., Меренич Ю. Ю. Використання машинного навчання для кластеризації цільової аудиторії веб-додатків. *Вісник ВПІ*. 2025. № 3 (180). С. 121–

125. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2025-180-3-121-125> (індексована у наукометричній базі *Index Copernicus*).

7. Серкутан Т. В., Лях І. М., Меренич Ю. Ю., Меренич Д. Ю. Аналітичні підходи до прогнозу аудиторії соцмереж із залученням SMM-спеціалістів. *Актуальні проблеми економіки*. 2025. № 8 (290). С. 45–55. <https://doi.org/10.32752/1993-6788-2025-1-290-45-55>.

Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

8. Кляп М. М., Меренич Ю. Ю. Особливості побудови інтерфейсів прикладного програмування для комерційних веб-додатків. *XI Міжнародна наукова Інтернет-конференція «Національна безпека у фокусі викликів глобалізаційних процесів в економіці»* : матеріали конференції (Україна–Словаччина, 7–8 грудня 2021 р.). Київ: НАУ, 2021. С. 15–16.

9. Морохович В. С., Кляп М. П., Меренич Ю. Ю., Болехан І. В. Використання фреймворку Ruby on Rails в управлінських процесах. *XIV Міжнародна наукова Інтернет-конференція «Національна безпека у фокусі викликів глобалізаційних процесів в економіці»* : матеріали конференції (Україна–Хорватія, 10–11 листопада 2022 р.). Київ, 2022. С. 60–62.

10. Піх І. В., Меренич Ю. Ю. Моделі формування якості оцінювання вебрестання та веб-дизайну сайтів. *Науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу, наукових працівників і аспірантів* : тези доповідей (Львів, УАД, 06–10 лютого 2023 р.). Львів, 2023. С. 156.

11. Меренич Ю. Ю., Лутак О. А., Шкирта А. С. Інклюзивність та доступність на етапі створення дизайн-проектів. *X Всеукраїнська науково-практична конференція молодих учених «Інформаційні технології — 2023»* : тези доповідей (Київ, 18 травня 2023 р.). Київ, 2023. С. 63–64.

12. Меренич Ю. Ю., Артюк В. В. Критерії оцінювання якості освітніх веб-сайтів. *V Міжнародна науково-практична конференція студентів,*

магістрантів та аспірантів «Квалілогія книги» : матеріали конференції (Львів, 8 червня 2023 р.). Львів, 2023. С. 20–22.

13. Меренич Ю. Ю., Петрус В. М. Framer Motion: сучасний інструмент для простої та ефективної анімації на веб-сайтах. *XVII Міжнародна наукова Інтернет-конференція «Національна безпека у фокусі викликів глобалізаційних процесів в економіці»* : матеріали конференції (Україна–Туреччина, 14–15 жовтня 2023 р.). Київ, 2023. С. 60–62.

14. Піх І. В., Меренич Ю. Ю. Еволюція та сучасні стандарти в технологіях верстання і дизайну веб-додатків. *Науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу, наукових працівників і аспірантів* : тези доповідей (Львів, УАД, 05–09 лютого 2024 р.). Львів, 2024. С. 181.

15. Ціпіньо А., Меренич Ю. Використання штучного інтелекту в боротьбі з загрозами. *Міжнародна науково-практична конференція «Кібербезпека в транскордонному співробітництві»* : тези доповідей (Берегове, 15–16 жовтня 2024 р.). Берегове, 2024. С. 152–153.

16. Піх І. В., Меренич Ю. Ю. Автоматизація та нові підходи у тестуванні веб-додатків. *XVII Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні технології і автоматизація — 2024»* : матеріали конференції (Одеса, 31 жовтня — 01 листопада 2024 р.). Одеса, 2024. С. 493–495.

17. Заїка В. В., Меренич Ю. Ю. Автоматизація процесів обліку та контролю особистих фінансів: аналіз підходів та оптимізації. *XXII Міжнародна наукова Інтернет-конференція «Національна безпека у фокусі викликів глобалізаційних процесів в економіці»* : матеріали конференції (Україна–Бразилія, 29–30 грудня 2024 р.). Київ, 2024. С. 36–38.

18. Меренич Ю. Ю., Піх І. В. Методика створення адаптивних веб-сайтів як частина управління проєктами. *X Міжнародна науково-технічна конференція «Поліграфічні, мультимедійні та web-технології»* : тези доповідей (Харків, 14–17 травня 2025 р.). Київ, 2025. Т. 1. С. 142–144.

19. Меренич Ю. Ю. Використання метрик юзабіліті для порівняльного аналізу варіантів верстання вебдодатків. *I Всеукраїнська науково-практична конференція «Науковий пошук: сучасні проблеми інформаційних технологій, математики, фізики, астрономії, управління та освіти»* : матеріали конференції (Житомир, 15–16 травня 2025 р.). Житомир, 2025. С. 114–116.

20. Меренич Ю. Ю., Мелеш М. М. Автоматизована генерація клієнтських інтерфейсів як інструмент цифрової стійкості в умовах глобалізаційних викликів. *XXIII Міжнародна наукова Інтернет-конференція «Національна безпека у фокусі викликів глобалізаційних процесів в економіці»* : матеріали конференції (Україна–Словаччина, 17–18 травня 2025 р.). Київ, 2025. С. 85–87.

ЗМІСТ

ВСТУП	19
РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОЦЕСУ СТВОРЕННЯ ВЕБДОДАТКІВ	27
1.1. Стан, проблеми та перспективи розвитку процесу створення вебдодатків.....	27
1.2. Функціональне моделювання процесу створення вебдодатків.....	32
1.3. Онтологічний аналіз стандартів якості вебдодатків.....	40
1.4. Узагальнена онтологія якості вебдодатків	62
1.5. Постановка завдань дослідження	68
Висновки до розділу 1	68
РОЗДІЛ 2. МОДЕЛІ ФАКТОРІВ ВПЛИВУ НА ПРОЄКТУВАННЯ ТА ДИЗАЙН ВЕБДОДАТКІВ.....	70
2.1. Формування множини факторів впливу на проєктування та дизайн вебдодатків.....	70
2.2. Формалізоване представлення зв'язків між факторами засобами семантичних мереж.....	80
2.3. Синтез моделей пріоритетності факторів за методом математичного моделювання ієрархій.....	85
2.4. Моделі факторів якості проєктування та дизайну вебдодатків за методом ранжування	94
Висновки до розділу 2	108
РОЗДІЛ 3. СТРАТЕГІЯ ФОРМУВАННЯ ОПТИМАЛЬНОГО ВАРІАНТУ ПРОЄКТУВАННЯ ТА ДИЗАЙНУ ВЕБДОДАТКІВ.....	110
3.1. Обґрунтування стратегії проєктування та дизайну вебдодатків.....	110
3.2. Багатокритеріальна оптимізація інтегральних характеристик проєктування та дизайну вебдодатків.....	112
3.3. Побудова структури нечітких відношень за факторами інтегральних характеристик проєктування та дизайну вебдодатків.....	128
3.4. Вибір оптимального варіанту проєктування та дизайну вебдодатків	140
Висновки до розділу 3	145

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБЛЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ПРОЄКТУВАННЯ ТА ДИЗАЙНУ ВЕБДОДАТКІВ	147
4.1. Особливості застосування нечіткої логіки при оцінюванні якості проєктування та дизайну вебдодатків.....	147
4.2. Модель формування якості проєктування та дизайну вебдодатків	150
4.3. Функції належності лінгвістичних змінних	154
4.4. Визначення прогнозованого показника якості проєктування та дизайну вебдодатків.....	169
4.5. Етапи інформаційної технології оцінювання якості проєктування та дизайну вебдодатків.....	179
4.6. Реалізація компоненти інформаційної технології у вигляді програмного продукту	184
Висновки до розділу 4	189
ВИСНОВКИ.....	191
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	194
ДОДАТКИ.....	213
Додаток А — Список публікацій здобувача та відомості про апробацію результатів дисертації.....	214
Додаток Б — Код програми для визначення пріоритетності факторів за методом ранжування.....	218
Додаток В — Акти впровадження результатів дисертаційної роботи.....	219

ВСТУП

Актуальність теми. Вебдодатки слугують універсальним інструментарієм взаємодії між користувачами та інформаційними системами, забезпечуючи швидкий доступ до даних, сервісів і послуг у будь-який час та з будь-якого пристрою. Різностороннім вебзастосункам належить чільне місце у житті сучасної людини. Актуальність теми дослідження обумовлена стрімким розвитком цифрових технологій, зростанням ролі вебдодатків у різних сферах суспільної діяльності та підвищенням вимог користувачів до функціональності, ергономічності та доступності. Зазначене формує потребу у створенні науково обґрунтованої інформаційної технології, здатної забезпечити прогнозне оцінювання якості проєктування та дизайну вебдодатків з урахуванням багатокритеріального впливу.

Проблематика оцінювання якості вебдодатків стала об'єктом значної кількості досліджень, що реалізуються у межах міждисциплінарного підходу із поєднанням результатів програмної інженерії, когнітивних наук, ергономіки, теорії дизайну та інформаційних технологій. Сучасні наукові розвідки охоплюють широкий спектр питань, зокрема дослідження користувацького досвіду та інтерфейсної взаємодії, впровадження принципів доступності та інклюзивності, адаптивного і респонсивного дизайну, персоналізованої візуалізації контенту, а також автоматизації проєктування та оцінювання якості ІТ-проєктів. Вагомий внесок у розвиток зазначених напрямів зробили зарубіжні дослідники, серед яких Bastardo [44], A. Massaro [57], A. Giannakouloupoulos [65], K. Kabassi [132], Y. Li [140], R. I. Nuñez [141], A. Muhammad [143] та ін.

Суттєвий вклад у розвиток зазначеної проблематики серед українських дослідників належить І. Ляху [47], Т. Говорущенко [77], О. Тимченку [103], А. Кудряшовій [108], М. Коробчинському [114], І. Піх [121], В. Сеньківському [136], Б. Дурняку [139], Р. Ткачуку [153] та ін.

Подальший розвиток наукових досліджень у цій сфері в дисертаційній роботі пов'язаний із впровадженням перспективного підходу, що базується на застосуванні багатокритеріального аналізу, теорії моделювання та апарату нечіткої логіки для визначення прогнозованого рівня якості проєктування та дизайну вебдодатків на основі факторів ергономіки та когнітивних принципів взаємодії, доступності й інклюзивності, інформаційної архітектури та візуального дизайну.

Отже, прогностичне оцінювання якості проєктування та дизайну вебдодатків на основі розробленої відповідної інформаційної технології, що полягає у використанні функціонального моделювання, онтологічного аналізу, семантичного моделювання, системного аналізу, багатфакторного аналізу та нечіткої логіки є актуальним науково-прикладним завданням.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота відповідає Закону України «Про Національну програму інформатизації» (№ 2807-ІХ від 01.12.2022) і пов'язана з науковими та прикладними дослідженнями кафедри комп'ютерних технологій у видавничо-поліграфічних процесах Інституту поліграфії та медійних технологій Національного університету «Львівська політехніка», спрямованими на розроблення та вдосконалення інформаційних технологій оцінювання якості інформаційних систем.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційного дослідження є оцінювання прогнозованої якості проєктування та дизайну вебдодатків шляхом розроблення інформаційної технології на основі функціонального та онтологічного моделювання, пріоритизації факторів за методами математичного моделювання ієрархій та ранжування, багатокритеріального аналізу альтернатив і засобів нечіткої логіки.

Для досягнення мети потрібно розв'язати такі основні завдання:

- побудувати функціональну модель процесу створення вебдодатків, що ґрунтується на формалізованому описі ключових етапів життєвого циклу та онтологію якості вебдодатків із врахуванням структурних, функціональних та

експлуатаційних характеристик відповідно до сучасних міжнародних стандартів у галузі веброзробки;

- на основі експертного оцінювання сформуванати множину ключових факторів проєктування та дизайну вебдодатків та розробити моделі вагомості факторів, враховуючи вагові значення факторів, типи залежностей та попарні порівняння;

- визначити багатофакторні оцінки корисності та значення функцій належності для встановлення оптимальних варіантів проєктування та дизайну вебдодатків за методами лінійного об'єднання критеріїв і нечіткого відношення переваги;

- розробити ієрархічну модель формування якості проєктування та дизайну вебдодатків і нечіткі логічні рівняння для визначення прогнозованого показника якості проєктування та дизайну вебдодатків із застосуванням методів та засобів нечіткої логіки;

- розробити інформаційну технологію оцінювання якості проєктування та дизайну вебдодатків, одну з компонент якої реалізувати у вигляді програмного продукту.

Об'єкт дослідження — процеси формування та оцінювання якості проєктування та дизайну вебдодатків.

Предмет дослідження — фактори, моделі, методи та засоби оцінювання якості проєктування та дизайну вебдодатків.

Методи досліджень. У дисертаційній роботі застосовано комплексну методологію, яка поєднує системний, онтологічний, семантичний, оптимізаційний та прикладний підходи. Для опису процесу створення вебдодатків було використано засоби функціонального моделювання, що забезпечили формалізацію ключових етапів життєвого циклу розробки. На основі положень онтологічного аналізу сформовано багаторівневу систему понять, що інтегрує вимоги сучасних міжнародних стандартів до якості вебдодатків. Для представлення взаємозв'язків між факторами, що впливають на якість проєктування та

дизайну вебдодатків, застосовано семантичні мережі та елементи логіки предикатів, які дозволили формалізувати залежності між характеристиками ергономіки та когнітивної взаємодії, доступності та інклюзивності, інформаційної архітектури та візуального дизайну. Моделі вагомості факторів побудовано за допомогою методу математичного моделювання ієрархій та уточнено методом ранжування, що дало змогу визначити пріоритети впливу окремих факторів у багатфакторній структурі. Завдання вибору оптимальної стратегії реалізації вебдизайну вирішувалося методами багатокритеріальної оптимізації на основі лінійного об'єднання критеріїв та дослідження нечітких переваг, що забезпечило оцінювання множини альтернатив і вибір найбільш ефективного варіанту з урахуванням комплексних вимог. У процесі визначення прогнозного показника якості використано апарат нечіткої логіки, який дав змогу сформувати функції належності для лінгвістичних змінних, побудувати нечіткі бази знань та логічні рівняння, а також виконати дефазифікацію отриманих результатів. Практична реалізація результатів дослідження здійснена за допомогою сучасних програмно-інженерних засобів, що дозволило створити прикладний модуль інформаційної технології, спрямований на визначення пріоритетності факторів за методом ранжування.

Наукова новизна одержаних результатів. Провівши теоретичні та експериментальні дослідження отримано такі нові результати:

вперше

– розроблено узагальнену модель процесу створення вебдодатків, що інтегрує функціональні, онтологічні та факторні складові забезпечення якості та відображає структурно-логічну послідовність етапів проєктування й оцінювання, визначає онтологічні зв'язки між структурними, функціональними та експлуатаційними характеристиками відповідно до сучасних міжнародних стандартів веброзробки, а також враховує вагомість факторів на основі їх коефіцієнтів, типів залежностей і результатів попарних порівнянь.

– розроблено інформаційну концепцію визначення оптимальних варіантів проєктування та дизайну вебдодатків із використанням методів лінійного об’єднання критеріїв і нечіткого відношення переваги, що дало змогу формалізувати процес прийняття рішень за умов невизначеності, підвищити об’єктивність оцінювання проєктних рішень і забезпечити вибір оптимальної структури вебдодатка відповідно до вимог якості та ергономіки.

– розроблено інформаційну технологію оцінювання якості проєктування та дизайну вебдодатків на основі функціонального та онтологічного моделювання, методів математичного моделювання ієрархій, багатокритеріального аналізу альтернатив і засобів нечіткої логіки, що сприяє оптимізації процесів прийняття проєктних рішень та підвищенню ефективності розроблення веборієнтованих систем;

удосконалено

– метод онтологічного аналізу шляхом групування еквівалентних класів та їх об’єднання в узагальнені концепти на основі семантичної подібності, структурного аналізу та функціонального значення, що забезпечує коректне співставлення понять у процесі побудови онтологічної моделі;

набула подальшого розвитку

– модель формування якості проєктування та дизайну вебдодатків, яка базується на використанні математичного апарату нечіткої логіки, що дало змогу сформулювати інноваційний підхід до прогностичного оцінювання ефективності проєктних рішень та підвищити точність вибору оптимальних варіантів їх реалізації в умовах невизначеності.

Практичне значення одержаних результатів. У дисертації розроблено нову інформаційну технологію оцінювання якості проєктування та дизайну вебдодатків, спрямовану на визначення інтегрального показника якості на основі аналізу факторів, різних за суттю та характером представлення. Це дозволило здійснювати оцінювання прогнозованої якості за вхідними параметрами. При цьому, важливими з практичної точки зору є такі результати:

- описано основні етапи процесу створення вебдодатків та вимоги до їх якості і побудовано функціональну та онтологічну моделі;

- визначено пріоритетність факторів проєктування та дизайну вебдодатків і розроблено моделі, що демонструють ієрархію їхнього впливу на показники якості, забезпечуючи обґрунтований вибір оптимальних рішень у процесі вебдизайну;

- запропоновано оптимальні варіанти реалізації проєктування та дизайну вебдодатків згідно багатфакторного об'єднання критеріїв та нечіткого відношення переваги;

- розроблено ієрархічну модель формування показника якості проєктування та дизайну вебдодатків і нечіткі логічні рівняння для його прогнозування;

- розроблено структурно-функціональну модель інформаційної технології оцінювання якості вебдодатків та програмний продукт для визначення пріоритетності факторів за методом ранжування.

Результати дисертаційної роботи апробовано та використано у ТОВ «СВРОКОМП'ЮТЕР» (м. Іршава, Іршавський р-н, Закарпатська обл.), ТОВ «ПеттерсонАпс» (м. Львів), навчальному процесі факультету інформаційних технологій Державного вищого навчального закладу «Ужгородський національний університет» при викладанні навчальних дисциплін у межах лекційних, практичних та лабораторних занять, зокрема у курсах «Комп'ютерна графіка», «Прикладна інформатика», «Проєктування та дизайн цифрових продуктів», «Вебтехнології та вебдизайн», «Основи веброзробки», «Комп'ютерна графіка та візуалізація даних» та «Розробка інтернет-клієнт серверних систем».

Особистий внесок здобувача. Усі результати, представлені в дисертації, автор отримав самостійно. Перелік публікацій, що відображають основні положення роботи, наведено у списку використаних джерел [1, 9, 21, 25, 29, 32, 33, 52, 56, 61, 62, 66, 69, 78, 86, 100–102, 127, 142]. У спільних роботах автору належать такі здобутки: аналіз тенденцій та інновацій у дизайні

вебдодатків [1]; розроблення та опис моделі адаптивного вебдизайну [9]; прогнозування динаміки розвитку соціальних медіа [21]; аналіз цільової аудиторії вебдодатків методами машинного навчання [25]; виокремлення основних принципів побудови інтерфейсів, що дозволяють вебдодаткам взаємодіяти між собою [29]; аналіз засобів облікову аналітичних даних в комерційних вебзастосунках [32]; порівняння технологій, що використовуються у вебдодатках для автоматизації управління фінансами [33]; означення принципів покращення якості інтерфейсів завдяки інструментам автоматизованої генерації [52]; розроблення структурно-функціональної моделі інформаційної технології захисту доступу до автоматизованих інформаційних систем [61]; аналіз сучасного інструментарію для створення анімації на вебсайтах [62]; порівняння методів автоматизованого тестування вебдодатків [66]; формування системи класів та екземплярів онтологічної моделі структури вебдодатку [69]; методи використання штучного інтелекту для протидії загрозам [78]; виокремлення основних принципів покращення вебдизайну щодо доступності та інклюзивності [86]; розроблення та формалізований опис семантичних моделей факторів якості вебдодатків [100]; формування критеріїв якості вебдодатків [101]; формування множини факторів якості освітніх вебдодатків [102]; визначення оптимального варіанту прототипування інтерактивних систем за нечіткими відношеннями переваги [127]; розроблення моделі формування якості вебдизайну [142].

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на XI, XIV, XVII, XXII та XXIII Міжнародних наукових Інтернет-конференціях «Національна безпека у фокусі викликів глобалізаційних процесів в економіці» (Україна–Словаччина, 2021 р.; Україна–Хорватія, 2022 р.; Україна–Туреччина, 2023 р.; Україна–Бразилія, 2024 р.; Україна–Словаччина, 2025 р.); звітних науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу, наукових працівників і аспірантів Української академії друкарства (2023 р., 2024 р.); X Всеукраїнській науково-

практичній конференції молодих учених «Інформаційні технології — 2023» (2023 р.); V Міжнародній науково-практичній конференції студентів, магістрантів та аспірантів «Квалілогія книги» (2023 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Кібербезпека в транскордонному співробітництві» (2024 р.); XVII Міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційні технології і автоматизація — 2024» (2024 р.); X Міжнародній науково-технічній конференції «Поліграфічні, мультимедійні та web-технології» (2025 р.); I Всеукраїнській науково-практичній конференції «Науковий пошук: сучасні проблеми інформаційних технологій, математики, фізики, астрономії, управління та освіти» (2025 р.).

Публікації. За темою роботи опубліковано 20 наукових праць, а саме: 1 стаття у виданні, що індексується у наукометричних базах даних Scopus та Web of Science і належить до квартилю Q3 відповідно до класифікації SCImago Journal; 6 статей у фахових наукових виданнях України, 3 з яких проіндексовані у наукометричній базі Index Copernicus; 13 публікацій у збірниках всеукраїнських та міжнародних конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота містить анотацію, вступ, чотири розділи, висновки, список використаних джерел із 158 найменувань, три додатки. Загальний обсяг роботи становить 221 сторінок. Обсяг основного тексту — 193 сторінок. Дисертація містить 40 рисунків та 53 таблиці.

РОЗДІЛ 1

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА

ПРОЦЕСУ СТВОРЕННЯ ВЕБДОДАТКІВ

1.1. Стан, проблеми та перспективи розвитку процесу створення вебдодатків

Ключовими критеріями успіху будь-якого вебдодатку є інноваційний підхід, здатність залучати інвестиції, гнучкість у прийнятті рішень, ефективне управління командою та чітка стратегія виходу на ринок [1]. Згідно з [2] в мережі «Інтернет» налічується близько 1,1 мільярда вебсайтів, однак обслуговуються та регулярно оновлюються лише 17 %. Це обумовлено постійно зростаючою зацікавленістю з огляду на роль вебресурсів у загальному прогресі. Проте, через високу конкуренцію та швидкі зміни в технологічному середовищі, значна частина проєктів не досягає успіху на ранніх етапах розвитку [1, 3, 4].

Попри існуючі виклики, вебдодатки стали фундаментальним інструментом у багатьох сферах людської діяльності, зокрема в освіті, наукових дослідженнях, медицині, соціальній комунікації, електронній комерції, банківському секторі, індустрії розваг та медіа.

Стрімкий розвиток технологій, конкуренція та постійно зростаючі запити сприяють розвитку та цифровізації освітнього процесу [5]. Дедалі більшої популярності набувають навчальні вебдодатки — комплексні інформаційні продукти, які інтегрують текстовий, графічний, аудіо- та відеоконтент у єдину структуру, забезпечуючи інтерактивність і багатоканальність передачі інформації. У цьому контексті вебсайти можна розглядати як інноваційну форму традиційних друкованих носіїв, адаптовану до сучасних технологій і потреб цифрового суспільства [6, 7]. Це сприяє доступності навчальних платформ та розробці навчальних програм.

Особливістю вебдодатків є здатність адаптовувати контент до індивідуальних потреб користувачів завдяки інтерактивним інструментам, доступності на різних платформах та можливості постійного оновлення інформації [8, 9]. При цьому, ключову роль у взаємодії з користувачами відіграє якість дизайну навчальних сайтів [10–12]. Відсутність теоретично обґрунтованої методики оцінювання якості проєктування та дизайну навчальних вебресурсів ускладнює аналітичні дослідження, спрямовані на визначення впливу мультимедіа на якість навчання та легкість засвоювання матеріалу [13].

Ще одним з напрямів застосування вебресурсів в освіті є представлення навчальних закладів. Значна частина установ має свої вебсайти. Однак, існують неабиякі статистичні відмінності у структурі та змісті вебресурсів, що репрезентують різні заклади освіти. До основних недоліків належить неефективна навігаційна система, неповний або нерелевантний контент, нерегулярні оновлення, порожні меню та підменю, відсутність узгодженого брендингу, орфографічні й граматичні помилки, а також публікація матеріалів, не орієнтованих на цільову аудиторію [14]. Тож ключові проблеми безпосередньо пов'язані з проєктуванням та дизайном вебдодатків.

Вебсайти стали невід'ємним інструментом для поширення наукових знань. Зростаючі вимоги щодо оприлюднення результатів досліджень і необхідність обґрунтовувати фінансування науки та інновацій сприяють розвитку різноманітних цифрових практик. Академічні і науково-дослідні вебресурси відіграють ключову роль у поширенні знань, співпраці між науковцями та залученні громадськості, що свідчить про трансформацію наукової комунікації.

Вебсайти наукових проєктів є не лише інформаційними майданчиками, а й засобами формування наукової аргументації та популяризації цінностей сучасної науки. Водночас аналіз контенту вебресурсів свідчить лише про часткову адаптацію до цифрового середовища та обмежене використання його технічних можливостей [15].

Для медичної спільноти важливим є доступ до великої кількості технічних, наукових і біомедичних ресурсів, що знаходяться в інтернеті. Більшість медичних установ публікують загальнодоступну інформацію, а деякі великі організації мають розгалужені бази даних і сервіси, які використовуються медичними дослідниками, лікарями та викладачами. Окрім того, медичні організації та медичні видання активно просувають свої послуги за допомогою веб-додатків [16].

З розвитком технологій Web 3.0 зростає кількість вебсайтів, що надають онлайн-послуги у сфері охорони здоров'я, що сприяє зниженню навантаження на медичні ресурси. Медичні послуги в онлайн-форматі забезпечують такі переваги, як цілодобова доступність, усунення географічних обмежень, зниження фінансових витрат і прискорене отримання медичної допомоги. Проте для повноцінної реалізації потенціалу цієї технології необхідним є формування довіри користувачів до медичних онлайн-сервісів [17]. Більшої популярності набули вебсайти з рейтингами лікарів. Вони відіграють важливу роль у наданні інформації, яка допомагає пацієнтам визначитися з відповідним лікарем [18].

Вебсайти є одним з ключових інструментів сучасної соціальної комунікації. Термін «соціальні медіа» вперше застосований у 1994 році в токійському онлайн-медіасередовищі Matisse [19]. На початку комерційного розвитку інтернету створено перші платформи, які з часом значно розширилися як за кількістю, так і за активністю користувачів. До соціальних медіа належать блоги, мікроблоги, соціальні мережі, форуми, сервіси для обміну фото- та відеоконтентом [20, 21]. Попри те, що сприяння комунікації не є первинною метою деяких платформ, спільною характеристикою є можливість взаємодії між користувачами. Дослідження показують, що сприйняття такого спілкування часто не відрізняється від традиційних соціальних контактів. Люди відчують підтримку та належність до спільноти, що робить ці платформи важливими для формування та зміцнення соціальних зв'язків [21].

Значний вплив спостерігається в міжособистісних стосунках, включаючи сімейні та романтичні зв'язки. В умовах глобалізації та міграції вебресурси стали важливим інструментом підтримки контактів між родичами. Віртуальне спілкування сприяє збереженню емоційної близькості, компенсуючи фізичну дистанцію. Для осіб, які мають труднощі в традиційній взаємодії, соціальні медіа полегшують ініціювання нових контактів [21–23].

Розвиток соціальних медіа вплинув на маркетингові стратегії компаній. Це змінило взаємодію між брендами та споживачами, надавши останнім активнішу роль [21, 24, 25]. Однак дослідження показують, що очікування споживачів можуть відрізнятися від маркетингових стратегій компаній. Клієнти прагнуть швидкої та доступної комунікації, тоді як компанії зосереджуються на контролі інформаційних потоків [21, 25, 26]. Ще одним важливим аспектом є роль соціальних медіа у сфері працевлаштування. Платформи, такі як LinkedIn, стали основним інструментом рекрутингу для роботодавців, дозволяючи залучати як активних, так і пасивних кандидатів [21, 27].

Електронна комерція знижує витрати на започаткування бізнесу, полегшує вихід компаній на ринок та підвищує конкуренцію. Основою електронної комерції є присутність компаній в інтернеті. Впровадження вебдодатків свідчить про інноваційну поведінку підприємств, що впливає на ефективність та ринкові позиції. Аналіз економічних наслідків цифровізації дає змогу оцінити вплив технологій на економіку [28]. Тривалість перегляду інформації про продукт та час, витрачений на адміністративні завдання, істотно впливають на наміри споживачів щодо придбання того чи іншого товару. Це свідчить про необхідність зрівноваженого підходу до подання стислої, однак змістовної інформації та інтеграції передових інформаційних технологій для забезпечення ефективної взаємодії користувачів із вебсайтами електронної комерції [25, 29–33].

Згідно з [34, 35] елементи вебсайту, візуальна привабливість, доступність та простота використання впливають на споживчі характеристики: нормативну оцінку, швидке задоволення та імпульсивність. Інші дослідження

[36–38] також підтверджують позитивний вплив якості вебсайтів на поведінку покупців. Наприклад, у [36] зазначено, що корисність, простота та інтерактивність контенту сприяють імпульсивним покупкам. Отже, добре спроектований вебсайт підвищує ймовірність спонтанних придбань. У [37] вказано, що для зміцнення взаємодії з клієнтами інтернет-маркетологи повинні покращувати якість вебресурсів. У [38] також підтверджено, що добре розроблені елементи вебдодатків мають значний вплив на онлайн-продажі.

Як зазначалося вище, вебсайти також набули значного поширення у банківській сфері, зокрема для надання послуг онлайн-банкінгу. Онлайн-банкінг є інноваційною практикою для банків та фінансових установ, яка забезпечує доступ до таких послуг, як перевірка залишків на рахунках, переказ коштів, оплата рахунків, покупка товарів і послуг без використання готівки, а також надсилання чеків [39, 40]. Таким чином, онлайн-банкінг суттєво змінює сферу фінансових послуг, стимулюючи інновації, сприяючи зростанню та підвищенню конкурентоспроможності на внутрішньому та зовнішньому ринках [39, 41].

Індустрія розваг включає кіно, театр, телебачення, радіо, музику, танці, образотворче мистецтво, літературу та ігри. Незважаючи на різні класифікації [42], спільною метою є розважання аудиторії та отримання прибутку. Деякі з цих сегментів передбачають організацію живих заходів (наприклад, театри, музеї), інші — продаж електронних форм (наприклад, електронні медіа та ігри), а деякі можуть бути доступні в обох форматах. Завдяки швидкому розвитку інтернет-технологій, розваги стали новою динамічною сферою цифрової індустрії [43]. Звісно, у цьому контексті важко переоцінити роль вебресурсів.

Відповідно до [44] досвід користувача охоплює індивідуальні характеристики та контекст взаємодії з цифровим продуктом чи послугою. Його ключовою складовою є зручність використання, що визначається здатністю системи забезпечити досягнення користувачем поставленої мети у визначених умовах. Сукупність цих властивостей становить фундаментальні параметри людиноорієнтованих технологічних систем.

З огляду на описані твердження можна зробити висновок про важливість використання вебдодатків у різних галузях суспільного життя. Варто зазначити, що первинний вплив на сприйняття інформації та залученість користувачів здійснює якість проектування та дизайну. Зокрема, ергономічність інтерфейсу, інтуїтивна навігація та адаптивність вебдодатків до різних пристроїв сприяють підвищенню ефективності їх використання [9]. Оптимізація продуктивності та безпеки забезпечує стабільність і захист персональних даних користувачів.

1.2. Функціональне моделювання процесу створення вебдодатків

Функціональне моделювання процесу створення вебдодатків сприяє успішному виконанню проєктів завдяки послідовному та теоретично виваженому опису основних етапів. Для цього доцільно використовувати спеціалізовані програмно-технологічні засоби на основі CASE-технологій (Computer-Aided Software Engineering), що дозволяють розробляти та аналізувати моделі. Переважна більшість CASE-засобів використовує специфікації у вигляді діаграм та текстових описів для відображення досліджуваного процесу. Однією з фундаментальних методологій є SADT (Structured Analysis and Design Technique). Вона забезпечує структуроване представлення інформаційних потоків, взаємодію між елементами системи та визначає механізми управління [45, 46].

Методологія IDEF0 (Integration Definition for Function Modeling), створена на основі SADT, використовується для формального опису функціональної структури системи. Для цього будуються діаграми, що відображають вхідні та вихідні дані, механізми управління та ресурси, які необхідні при виконанні функцій. Використання IDEF0 дозволяє створювати детальні моделі процесів, аналізувати ефективність та забезпечувати узгодженість між усіма етапами. Іншими словами, методи функціонального моделювання полягають у розділенні складних систем на простіші компоненти, тобто у декомпозиції

функціональних блоків, та у ієрархічній організації цих компонентів [45]. Візуальне представлення інформації сприяє прийняттю виважених управлінських рішень та спрощує підготовку необхідної проєктної документації [47]. Побудова IDEF0-моделі процесу створення вебдодатків стане ґрунтовною базою для вирішення конкретних прикладних завдань щодо проєктування інформаційних систем визначеної тематики [45].

Основними компонентами IDEF0-моделі є діаграми, які містять необхідну кількість функціональних блоків. Вхідна інформація зображується стрілками, що входять у лівий бік блоків, а вихідна, тобто результуюча — у правий. Керівна інформація позначається зверху, а механізми, що здійснюють операції — знизу. Важливою особливістю є поступова деталізація в процесі створення нових діаграм. При цьому, найвищим рівнем декомпозиції є контекстна діаграма (рис. 1.1), що містить основну функцію [45, 48].



Рис. 1.1. Контекстна діаграма моделі створення вебдодатку

Розглянемо детальніше компоненти розробленої контекстної діаграми. Вхідними даними є потреби замовника, користувацькі запити та початкові ідеї. Під потребами замовника слід розуміти сукупність міркувань та стратегічних цілей, що визначають необхідність розроблення вебдодатку. Протягом усього

життєвого циклу вони слугують критерієм оцінки якості та відповідності бізнес-очікуванням, формуючи стратегічний напрямок розробки. Однак, враховуючи лише потреби та бажання замовника, можна одержати продукт, що не користуватиметься попитом серед цільової аудиторії. Тому необхідно аналізувати та враховувати користувацькі потреби. Звичайно, детальні розвідки щодо цільової аудиторії доцільно здійснювати в процесі UX-досліджень, однак вже на початковому етапі варто розуміти для кого створюється той чи інший веб-додаток та які ключові запити він покриватиме. Безперечно, основою будь-якої розробки є ідея, що згодом набуває деталізації або ж видозмінюється з огляду на обставини, виявлені під час дослідження [49, 50].

Процес створення вебдодатку регламентується формалізованими вимогами, стандартами, правилами та технічними обмеженнями. Формалізовані вимоги можуть бути зафіксовані в технічному завданні, специфікаціях програмного забезпечення, нормативній документації. Вони є основою для узгодженого процесу розробки, мінімізації ризиків та ефективної взаємодії між усіма зацікавленими сторонами. Стандарти регламентують процеси створення, тестування, розгортання та підтримки програмного забезпечення. До технічних обмежень можуть належати вимоги щодо сумісності з апаратним забезпеченням, пропускну здатність мережевої інфраструктури, доступні обчислювальні потужності тощо [1, 51].

Стрілки, що входять у нижню частину діаграми відображають залучення відповідних фахівців, використання необхідних засобів розробки та інших ресурсів [48]. Слід зазначити, що створення вебдодатків є комплексним процесом, що вимагає участі спеціалістів з різних сфер. Дизайнери визначають логіку взаємодії, навігацію та здійснюють візуальне оформлення інтерфейсу. Їхня робота спрямована на створення інтуїтивно зрозумілої структури вебдодатку та забезпечення доступності для користувачів. На основі прототипів розробники здійснюють технічну реалізацію: написання програмного коду, впровадження алгоритмів опрацювання даних, інтеграцію зовнішніх сервісів та

налаштування серверної інфраструктури [50, 52]. Діяльність тестувальників спрямована на мінімізацію ризиків у роботі вебдодатку та підвищення надійності. Вони виявляють помилки, оцінюють продуктивність, перевіряють сумісність з різними пристроями та системами [53]. У ролі інших зацікавлених осіб можуть бути бізнес-аналітики, менеджери, маркетологи та ін. [49]. До засобів розробки належать інструменти та технології, що використовуються в процесі створення вебдодатку: середовища розробки, програмні фреймворки, системи керування версіями, засоби тестування та ін. Технічні ресурси — це сервери, бази даних, хмарні сервіси, засоби моніторингу та управління продуктивністю тощо [54].

Кожна наступна діаграма деталізує батьківську. Отже, під декомпозицією варто розуміти процес побудови діаграм, що уточнюють конкретний функціональний блок та взаємозв'язки, відображені дугами типу «вхід», «вихід», «контроль», «механізми». Зважаючи на особливості ефективного сприйняття інформації, рекомендовано аби кількість функціональних блоків кожної діаграми була в межах від трьох до шести [45].

На рис. 1.2 зображена декомпозиція контекстної діаграми IDEF0-моделі створення вебдодатку.

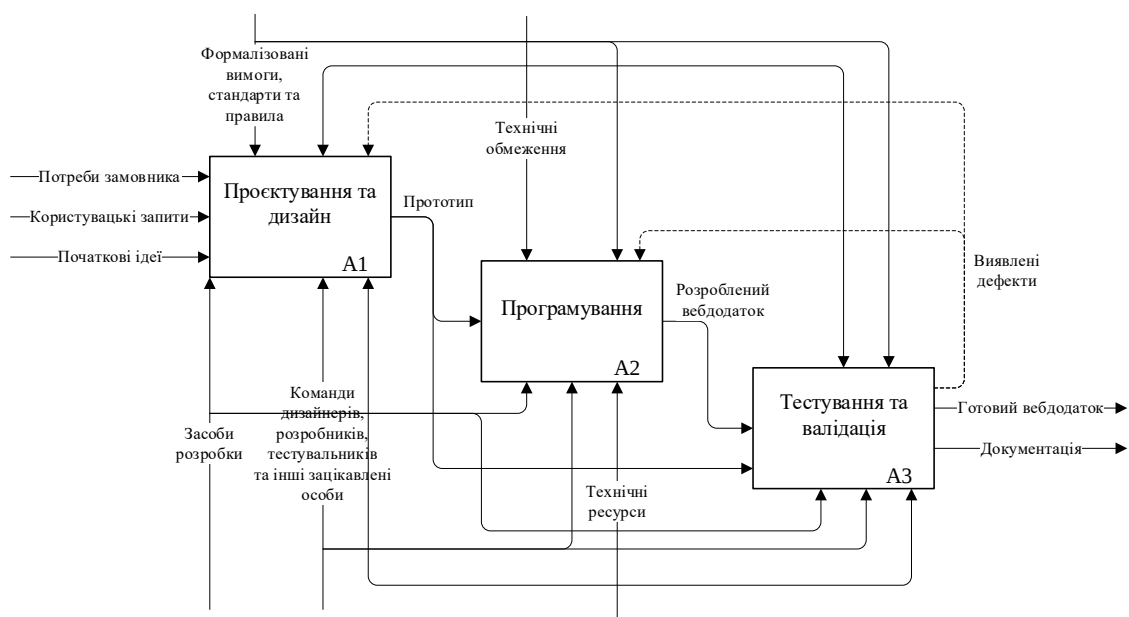


Рис. 1.2. Декомпозиція контекстної діаграми

Створена діаграма складається з трьох основних функціональних блоків, що формують логічну послідовність розроблення вебдодатку: A1 — проєктування та дизайн, A2 — програмування, A3 — тестування та валідація.

Початковим етапом є проєктування та дизайн (рис. 1.3). Проводиться аналіз схожих рішень та дослідження цільової аудиторії. Формується необхідна UX-документація: персони, карти історій, карти емпатії тощо. Здійснюється вибір архітектурних рішень та розроблення функціональної структури. Створюються прототипи необхідного рівня деталізації та візуальний дизайн. При цьому можуть використовуватися автоматизовані засоби створення інтерфесів [21, 50, 52, 55, 56]. Зокрема, у [57] пропонується розділення вмісту у макеті на вебсторінки на основі методології одночасного використання алгоритмів користувацького досвіду (UX), штучної нейронної мережі та довгої короткострокової пам'яті (LSTM).

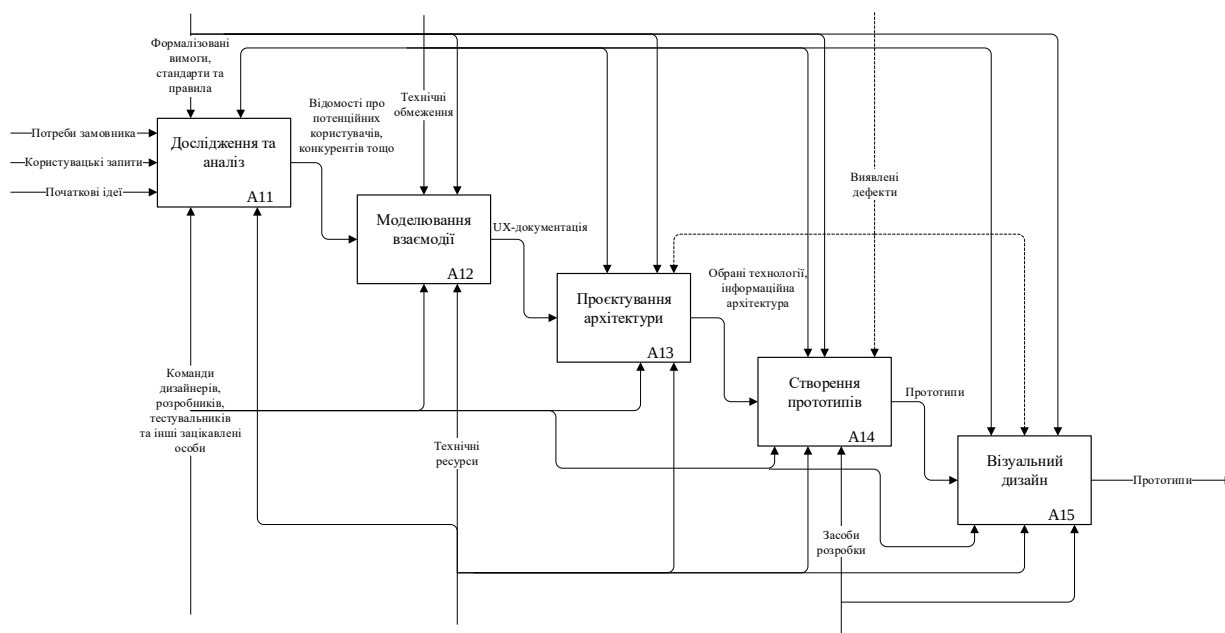


Рис. 1.3. Діаграма декомпозиції блоку «Проектування та дизайн»

Наступним етапом є програмування (рис. 1.4). Налаштування середовища розробки створює необхідні передумови для подальшої роботи. Здійснюється вибір та, за потреби, встановлення програмних інструментів. Також

The diagram illustrates the software development process with four main stages:

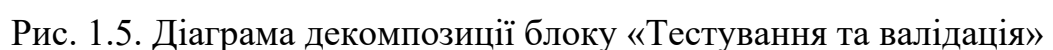
- А21: Налаштування середовища розробки (Development Environment Setup)**
 - Inputs: Формалізовані вимоги, стандарти та правила (Formalized requirements, standards, and rules); Прототипи (Prototypes); Команди дизайнерів, розробників, тестувальників та інші зацікавлені особи (Designer, developer, tester, and other stakeholder commands).
 - Output: Середовище розробки, бібліотеки тощо (Development environment, libraries, etc.) to А22.
- А22: Розробка клієнтської частини (Client Part Development)**
 - Inputs: Технічні обмеження (Technical constraints); Середовище розробки, бібліотеки тощо (Development environment, libraries, etc.) from А21.
 - Output: Запити до сервера (Server requests) to А23.
- А23: Розробка серверної частини (Server Part Development)**
 - Inputs: Технічні обмеження (Technical constraints); Запити до сервера (Server requests) from А22.
 - Output: Результати запитів (Query results) to А24.
- А24: Інтеграція та управління базами даних (Integration and Database Management)**
 - Inputs: Результати запитів (Query results) from А23; Технічні ресурси (Technical resources); Засоби розробки (Development tools).
 - Output: Розроблений вєбдодаток (Developed web application).

Feedback loops and additional inputs include:

- Виявлені дефекти (Detected defects) from А23 and А24 back to А21 and А22.
- Результати запитів (Query results) from А23 back to А21 and А22.
- Запити до бази даних (Database requests) from А23 to А24.
- Технічні обмеження (Technical constraints) from the top back to А21 and А22.

Метою тестування програмних продуктів є виявлення помилок та порівняння вимог із реальною поведінкою системи (рис. 1.5). Первинною є підготовка тестового середовища, що особливо важливо при автоматизованому тестуванні. До тестової документації, залежно від складності проєкту, може

Слід звернути увагу на роз'яснення термінів «розроблений вебдодаток» та «готовий вебдодаток». У даній роботі розробленим вважатимемо той, що пройшов етапи проектування, дизайну та програмування, однак ще не був протестованим. Готовий вебдодаток успішно пройшов тестування, виявлені недоліки виправлені, що дозволяє здійснити його подальший випуск.



Очевидно, що процес декомпозиції не може бути безкінечним та повинен припинитися у певний момент. Тобто, моделі повинні мати заданий ступінь точності. Тому декомпозиція завершується коли модель є достатньо деталізованою аби давати відповіді на необхідні питання і мета моделі вважається досягнутою. Коректність та достовірність розробленої моделі доцільно перевіряти за допомогою ітеративного рецензування. Суть цього методу полягає у спільній роботі автора чи колективу авторів моделі та експертів предметної області. Зауваження, надані експертами, опрацьовуються та, за необхідності, вносяться зміни у модель [45].

Для відображення структури розробленої IDEF0-моделі створення веб-додатку сформовано ієрархічну діаграму вузлів (рис. 1.6) [46, 48].



Рис. 1.6. Дерево вузлів функціональної моделі створення веб-додатку

Розроблена IDEF0-модель слугує не лише засобом документування процесу створення веб-додатку, але й інструментом для його аналізу, оптимізації та стандартизації. Вона покращує комунікацію між учасниками розробки та дозволяє мінімізувати ризики невідповідності вимогам завдяки чіткому визначенню етапів роботи, вхідних та вихідних даних. Таким чином, створення IDEF0-моделі дозволяє забезпечити структурований, прогнозований та

керований процес розроблення вебдодатків. Перспективним напрямом практичного використання є адаптація моделі під конкретні проекти.

1.3. Онтологічний аналіз стандартів якості вебдодатків

Розроблення вебдодатків є складним багатоопераційним процесом, що регламентується стандартами, настановами та іншими нормативно-правовими документами. Зрозуміло, що кінцевою метою є одержання якісного продукту, однак існує чимало вимог до якості, а саме поняття якості не є однозначним. Згідно з [67] під терміном «якість» варто розуміти не лише відповідність очікуваним функціям та властивостям, а й значущість та корисність для користувача. У [68] зазначається, що якість характеризується здатністю відповідати визначеним і прогнозованим вимогам. Варто зазначити, що існує чимало вимог до створення вебдодатків — факторів, що впливають на якість. Тому для дослідження факторів впливу на якість проектування та дизайну вебдодатків доцільно здійснити формалізований опис знань за допомогою онтологічних моделей.

Комп'ютерна онтологія — опис предметної області за допомогою ієрархічної структури понять у вигляді скінченної множини. Фундаментальними принципами розроблення онтології є зрозумілість, обґрунтованість, розширюваність, мінімальний рівень кодування, мінімальна онтологічна залученість [69, 70]. Зважаючи на сказане, сформулюємо твердження, що відображають вимоги до розроблення онтологічних моделей:

Твердження 1. Онтологія повинна забезпечувати адекватне та точне відображення реальної дійсності, базуючись на формально визначених поняттях і термінах, семантична інтерпретація яких є однозначною та загальноприйнятною.

Твердження 2. Позначення понять в онтології повинне відповідати семіотичним стандартам і бути формалізованим на основі узгоджених визначень, зафіксованих у наукових джерелах, таких як глосарії та словники.

Твердження 3. Структура онтології повинна бути несуперечливою, розробленою з використанням аксіоматичних основ і формальних правил для забезпечення консистентності тверджень та їх взаємозв'язків.

Твердження 4. Онтологію потрібно розробляти враховуючи принцип розширюваності, що передбачає можливість динамічного доповнення новими поняттями та твердженнями без втрати цілісності й узгодженості.

Твердження 5. Формалізована модель онтології не повинна залежати від конкретних форматів подання, програмних середовищ чи технологій.

Твердження 6. Побудова онтології має ґрунтуватися на мінімальних онтологічних припущеннях, уникаючи зайвої деталізації й обмежуючись лише тими концепціями, які є критично необхідними для виконання поставлених завдань.

Твердження 7. Усі визначення в онтології повинні піддаватися формальній перевірці для забезпечення достовірності та обґрунтованості моделі.

Твердження 8. Онтологія повинна підтримувати інтеграцію з іншими формалізованими системами знань через стандартизовані протоколи сумісності для забезпечення ефективної взаємодії.

Твердження 9. Онтологічна модель повинна бути орієнтована на універсальність та багаторазове використання [70].

Онтологічне представлення забезпечує структурований опис предметної області за допомогою концептів, їх властивостей та відношень. Таким чином, основними компонентами онтології є класи, екземпляри, властивості-відношення, властивості-дані.

Класи — це фундаментальні елементи онтології, що представляють множини загальних об'єктів чи категорій, об'єднаних на основі спільних характеристик. Вони різняться за рівнем важливості. Кожен клас може мати належні

йому підкласти чи бути підкласом класу вищого порядку, формуючи ієрархію — таксономію класів. Таким чином, верхні рівні ієрархії відповідають узагальненим поняттям, а нижні — специфічним, більш деталізованим. Класи найвищого рівня часто називають суперкласами. Як правило, таксономія представлена у вигляді деревовидної структури, вузли якої відповідають суперкласам або підкласам, а зв'язки вказують на наявність дочірньо-батьківських відношень в ієрархії. Ще одними елементами вказаної ієрархії можуть бути екземпляри (індивіди). Це об'єкти чи сутності в межах заданої предметної області, що знаходяться на нижньому рівні онтологічної ієрархії. Фактично, класи є більш абстрактними поняттями, тоді як екземпляри — конкретними. При цьому, кожен екземпляр належить до одного чи кількох визначених класів, успадковуючи властивості та зв'язки. З практичної точки зору, екземпляри відіграють ключову роль, адже дозволяють моделювати реальні сутності та їх взаємодії [69–71].

Характеристики об'єктів онтології описуються за допомогою властивостей, які поділяються на два види: властивості-відношення та властивості-дані. Властивості-відношення визначають зв'язки між екземплярами, створюючи складні структурні моделі знань. Розрізняють прямі та обернені відношення. Властивості-відношення можуть обмежуватися точно вказаною кількістю зв'язків, бути симетричними (якщо екземпляр X має відношення до екземпляру Y , то екземпляр Y має таке ж відношення до екземпляру X) чи асиметричними (якщо екземпляр X має відношення до екземпляру Y , то екземпляр Y не може мати відношення до екземпляру X), транзитивними (якщо екземпляр X має відношення до екземпляру Y , а екземпляр Y має відношення до екземпляру Z , тоді екземпляр X також має відношення до екземпляру Z). Властивості-дані містять характеристики екземплярів — значення з літеральних типів даних (текст, цілі числа, дробові числа, логічні значення, дата і час). При цьому, значення можуть мати певні обмеження, такі як мінімальне чи максимальне число, діапазон чисел, кількість символів та ін. [71].

Онтології можуть містити додаткові елементи, що розширюють їх функціональні можливості. Найчастіше використовуються анотації, аксіоми та онтологічні словники. Анотації слугують засобом створення метаданих, що забезпечує контекстуальне пояснення елементів онтології (концептів, відношень, аксіом). Вони надають детальний опис сутностей, доповнюючи їх формальну інтерпретацію. Завдяки анотаціям користувачі отримують доступ до інформації про терміни, їхні джерела та потенційні зв'язки з іншими онтологічними моделями. Аксіоми визначають правила та обмеження, встановлюючи умови для взаємодії між елементами онтології. Наприклад, визначення обов'язкових властивостей класів, забезпечення унікальності ідентифікаторів екземплярів, встановлення обмежень тощо [70]. Аксіоми поділяються на кілька видів, залежно від об'єктів опису: аксіоми класів, аксіоми властивостей-відношень, аксіоми властивостей-даних, аксіоми екземплярів, аксіоми анотацій [71]. Онтологічні словники — це формалізовані набори термінів онтології та їх визначень. Головна функція полягає у стандартизації термінології, що є критично важливим для забезпечення сумісності між різними системами. Словники створюються на основі строгих правил формалізації, що виключає неоднозначність інтерпретацій і логічну суперечливість термінів. Вони також відіграють важливу роль у підтримці єдності семантичного простору, сприяючи ефективній інтеграції даних навіть у великих, розподілених інформаційних системах [71, 72].

Такий підхід сприяє семантичній інтероперабельності, уможливлює інтеграцію даних та співставлення знань у гетерогенних середовищах, компоненти яких відрізняються за структурою, функціями, форматами даних тощо.

Залежно від рівня складності поставленої задачі, використовуються різні моделі онтологій [70, 73], що здатні забезпечити формалізацію знань, логічне виведення і повторне застосування. Модель, обрана для аналізу якості веб-додатків, має вид:

$$O = \langle G, P, H, T \rangle, \quad (1.1)$$

де G — множина концептів онтології, P — множина відношень між концептами, H — множина характеристик та властивостей елементів онтології, T — множина типів даних [73].

При цьому множина концептів онтології є наступною:

$$G = G_{cl} \cup G_{ind}, \quad (1.2)$$

де G_{cl} — множина класів онтології, G_{ind} — множина екземплярів онтології.

Множина відношень між концептами:

$$P = P_{ier_cl} \cup \{P_o\} \cup \{P_d\}, \quad (1.3)$$

де P_{ier_cl} — відношення між класами та їх властивостями, $\{P_o\}$ — множина об'єктних властивостей, що описують відношення між екземплярами, $\{P_d\}$ — множина властивостей-даних, що описують відношення між екземплярами та їх значеннями [73].

Наведена модель є оптимальною для управління розподіленими знаннями та відповідає принципам проєктування онтологій у сучасних онтологічних редакторах [71].

Відповідно до рис. 1.7 на початковому етапі розроблення онтології здійснюється дослідження та систематизація знань щодо оцінювання якості веб-додатків. На основі отриманих даних формуються базові поняття та концепції онтології. Також окреслюється перелік проблем, які можуть бути вирішені за допомогою онтологічного підходу. Наступний етап полягає у формулюванні основних функцій та задач онтології для розроблення правил і обмежень проєктування. Наприклад, вимог до ієрархічної структури чи зв'язків між елементами. При цьому, впровадження чітких правил та обмежень забезпечує узгодженість, однозначність та функціональність онтологічної моделі. Для ефективної реалізації проєкту важливим є вибір інформаційної системи графічного представлення онтологічних моделей. Визначальним при виборі системи є наявність вбудованих алгоритмів перевірки консистентності та сумісності з сучасними стандартами, такими як OWL (Web Ontology Language) і RDF

(Resource Description Framework). У даному дослідженні створення, редагування, візуалізація та верифікація онтологічних моделей здійснені за допомогою Protégé — безкоштовної платформи з відкритим кодом, розробленої командою зі Стенфордського університету [70, 71, 75].

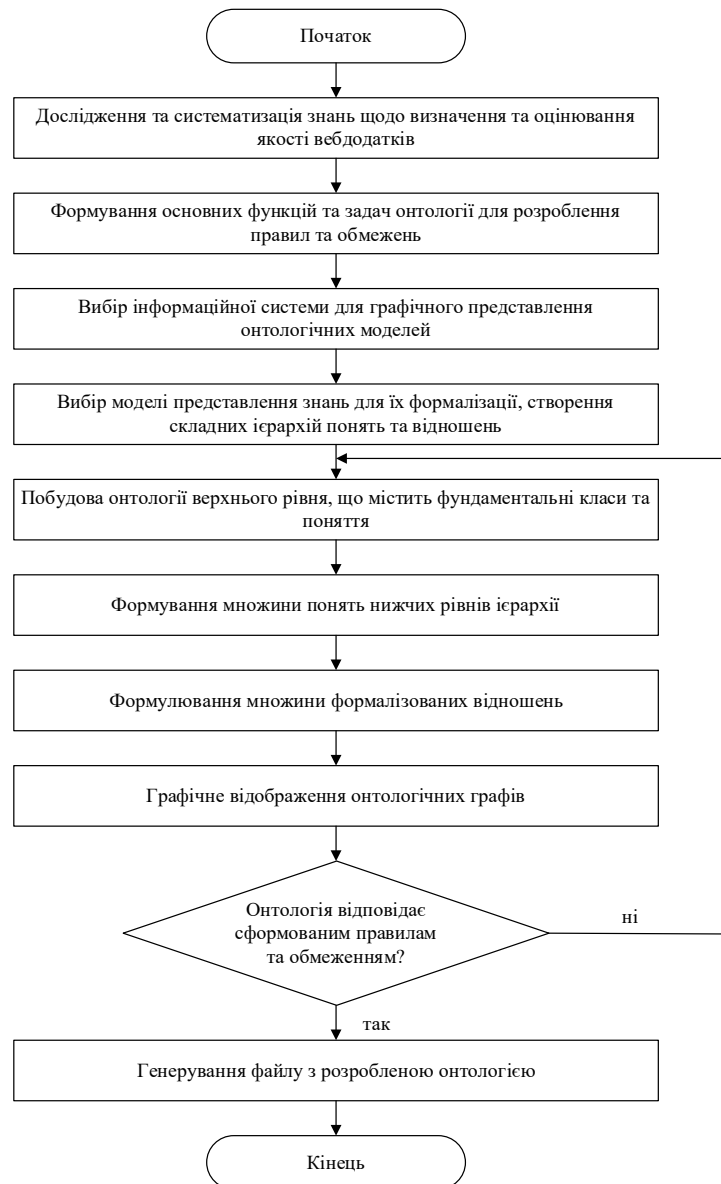


Рис. 1.7. Блок-схема алгоритму розроблення онтології

Вибір оптимальної моделі (стандарту) представлення знань сприяє підвищенню точності аналізу та уможливлює інтеграцію онтології в інші інформаційні системи. Основою для подальшого моделювання є онтологія

верхнього рівня — класи що відображають загальні концепції предметної області та забезпечують логічну цілісність моделі. Від правильності виконання цього етапу залежить організованість та масштабованість моделі. Далі здійснюється формування множини понять нижчих рівнів ієрархії та множини відношень, тобто деталізація онтології. Поняття організовують в ієрархічному вигляді, відображаючи підпорядкованість та зв'язки. Також формалізують ієрархічні (наприклад, «є підтипом»), асоціативні («взаємодіє з», «використовує») чи причинно-наслідкові («призводить до») відношення між елементами моделі. Формалізований опис дозволяє ефективно використовувати створену онтологію для вирішення практичних завдань, таких як аналіз знань, автоматизація процесів чи підтримка прийняття рішень [70, 75].

Графічне відображення онтологічних графів значно полегшує сприйняття складних онтологічних моделей. Візуалізація дозволяє швидко ідентифікувати ключові елементи, зв'язки та потенційні конфлікти онтології. Перевірка онтології на відповідність сформованим правилам та обмеженням підвищує точність онтологічного аналізу. Здійснюється верифікація онтології з метою виявлення помилок та суперечностей. Оцінюється її консистентність та повнота. У разі виявлення недоліків онтологію корегують задля забезпечення надійності та коректності моделі. Завершальним етапом є генерування файлу з розробленою онтологією, готового до використання у прикладних задачах чи інтеграції у програмні системи [70, 75].

Розробимо онтології формування якості вебдодатків за основоположними стандартами у даній галузі. Базовим стандартом є ISO/IEC 25010:2023, який описує модель якості, спрямовану на систематизацію підходів до оцінювання програмних застосунків на основі характеристик та підхарактеристик. Кожна характеристика визначає певний аспект поведінки або властивостей продукту. При цьому виокремлено дев'ять основних характеристик: функціональна придатність, сумісність, продуктивність, надійність, можливість взаємодії, здатність до супроводження, захищеність, гнучкість, безпека [76, 77].

Функціональна придатність характеризує здатність забезпечувати відповідність функцій визначеним вимогам і завданням користувачів. Підхарактеристиками функціональної придатності є функціональна доцільність (узгодженість функцій із вимогами), функціональна коректність (здатність функцій забезпечити очікувані результати) та функціональна повнота (наявність усіх необхідних функцій) [76].

Сумісність означає можливість правильної інтеграції та обміну даними. Основними підхарактеристиками є співіснування, що визначає коректність функціонування з іншими системами, та функціональна сумісність, що забезпечує здатність до обміну даними. Постійна еволюція вебзастосунків та значна фрагментація пристроїв ускладнюють виявлення та виправлення проблем сумісності [76].

Продуктивність відображає здатність системи оптимально використовувати ресурси за визначених умов та у встановлених часових межах. Відповідно, до продуктивності належать: часові характеристики, використання ресурсів, потенційні можливості [76].

Надійність передбачає готовність, безвідмовність, відмовостійкість та відновлюваність. Дослідники надійності систем часто припускають ідеальне налагодження, за якого помилки усуваються одразу після виявлення. Однак, у реальності виправлення одних помилок може спричиняти появу нових, а налагоджувальні команди не завжди здатні повністю їх усунути [76].

У моделі якості продукту можливість взаємодії разом із відповідними підхарактеристиками охоплює сукупність правил, що забезпечують ефективну роботу користувачів або операторів із системою для реалізації визначених завдань у множині контекстів експлуатації [76].

Здатність до супроводження доцільно описувати як можливість ефективної та результативної модифікації системи уповноваженими особами під час обслуговування. До підхарактеристик належать: аналізованість, модифікованість, модульність, тестованість та здатність до повторного використання [76].

Захищеність, у контексті стандарту, описується як здатність програмного продукту захищати інформацію та дані, забезпечуючи доступ лише уповноваженим особам або системам відповідно до рівня авторизації, а також протидіяти атакам з боку злоумисників. Сюди належать конфіденційність, цілісність, непідроблюваність, відслідковуваність, автентичність та стійкість [76, 78].

Гнучкість — це здатність адаптовуватися до змін у вимогах, умовах використання або системному середовищі, враховуючи встановлюваність, адаптивність, взаємозамінюваність, масштабованість [9, 76].

Безпека — здатність продукту уникати недопустимих ситуацій. При цьому основними характеристиками є попередження про небезпеку, ідентифікація ризику, операційні обмеження, безпечне відновлення, безпечна інтеграція [76, 78].

Враховуючи представлені теоретичні положення, сформовано термінологічний словник онтології, фрагмент якого представлено у табл. 1.1.

Таблиця 1.1

Фрагмент термінологічного словника онтології
якості вебдодатків згідно з ISO/IEC 25010:2023 [76]

Клас	Підклас	Опис	Властивості відношення	Властивості дані	Тип даних
1	2	3	4	5	6
Функціональна придатність	Функціональна доцільність	Відповідність функціональності вебдодатку специфічним завданням користувача	Виконує, підтримує, забезпечує	Відсоток виконаних задач	Float
	Функціональна коректність	Відповідність результатів роботи вебдодатку заданим вимогам чи стандартам	Перевіряє, відображає	Кількість знайдених помилок	Integer
	Функціональна повнота	Ступінь реалізації необхідних функцій	Підтримує, реалізує	Число реалізованих функцій	Integer

Продовження табл. 1.1

1	2	3	4	5	6
Продуктивність	Використання ресурсів	Ефективність використання апаратного та програмного забезпечення	Використовує, оптимізує	Використання CPU	Float
	Потенційні можливості	Здатність вебдодатку підтримувати зростання навантаження	Масштабує, розширює	Максимальна кількість одночасних користувачів	Integer
	Часові характеристики	Час, необхідний для виконання дій або відповідей на запити користувача в умовах визначеного навантаження	Відповідає, обробляє	Середній час відповіді	Float
Сумісність	Співіснування	Здатність вебдодатку ефективно функціонувати в загальному середовищі з іншими незалежними системами, не створюючи конфліктів	Інтегрує, забезпечує	Чи виникають конфлікти	Boolean
	Функціональна сумісність	Рівень інтеграції з іншими програмними компонентами	Використовує, адаптує	Підтримка форматів даних	String
Надійність	Безвідмовність	Стійкість до відмов у визначених умовах експлуатації протягом заданого періоду	Забезпечує, підтримує	Середній час до відмови	Float
	Відмовостійкість	Здатність вебдодатку продовжувати функціонування при виникненні відмов окремих компонентів або несправностей	Обробляє помилки, ізолює несправності, забезпечує безперервну роботу	Кількість оброблених відмов, частка функціональності, що залишається доступною під час збою	Integer, Float
	Відновлюваність	Здатність відновлювати функції після відмов у визначений час та без значних втрат	Відновлює, мінімізує наслідки	Час повного відновлення	Float
	Готовність	Здатність вебдодатку бути доступним для використання у визначений час	Забезпечує доступність, підтримує працездатність	Відсоток часу, коли система доступна	Float

Онтологія формування якості вебдодатків на основі стандарту ISO/IEC 25010:2023 представлена на рис. 1.8.

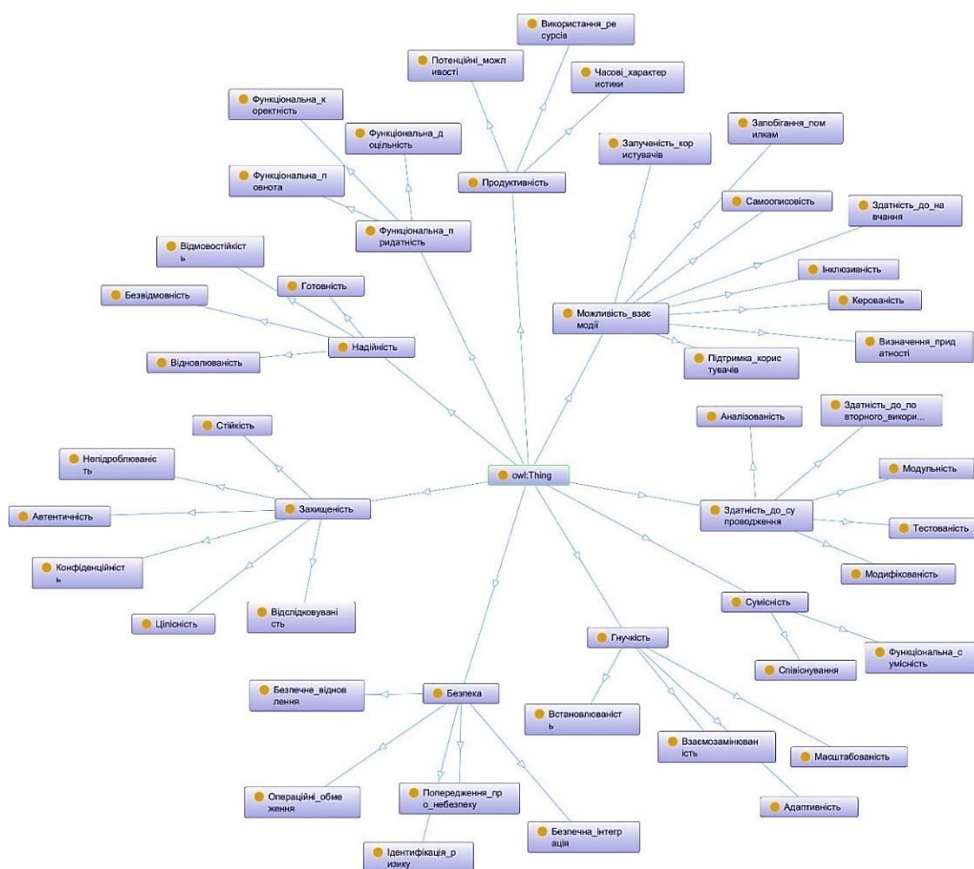


Рис. 1.8. Онтологічний граф класів

Ще одним стандартом, яким варто послуговуватися при проєктуванні та дизайні вебдодатків є ISO 9241-110:2020 [79]. Документ охоплює парадигми ергономіки взаємодії між людиною та застосунком і слугує для оцінювання якості інтерактивних систем.

Принципи взаємодії є фундаментальним елементом при проєктуванні та дизайні вебдодатків, оскільки вони визначають ефективність комунікації між користувачем і інформаційною системою. Оптимальність та функціональність інтерфейсу безпосередньо впливає на загальну ефективність використання вебдодатку. Згідно теорії людино-комп'ютерної взаємодії, одним із основних завдань є створення таких умов, за яких користувач може легко, швидко та з

мінімальними зусиллями виконувати необхідні операції. При цьому, основною метою є зменшення когнітивного навантаження на користувача завдяки інтуїтивно зрозумілому дизайну, який дозволяє орієнтуватися в інтерфейсі без додаткових інструкцій або тривалого навчання. Згідно з теорією сприйняття, впорядкованість та логічна структура елементів інтерфейсу дозволяють ефективно взаємодіяти з системою, що знижує кількість помилок і підвищує продуктивність. Крім того, ефективність взаємодії здійснює неопосередкований вплив на задоволеність користувачів, що є надзвичайно важливим з огляду на конкурентоспроможність вебдодатку [52, 77, 79, 80].

Відповідно, стандарт [79] визначає сім основних принципів, які орієнтовані на забезпечення зручності використання, адаптованості до потреб користувачів та мінімізації помилок у процесі взаємодії. До цих принципів належать: відповідність завданням, самоописовість, відповідність очікуванням, здатність до навчання, керованість, стійкість до помилок, залученість користувачів.

Відповідність завданням полягає в адаптованості системи до виконання задач користувача. До основних підкатегорій належать: підтримка ефективності, мінімізація зайвих дій, оптимізація робочих процесів. Підтримки ефективності полягає у можливості досягнення користувацьких цілей з мінімальними зусиллями. Мінімізація надлишкових дій — усунення непотрібних або дублюючих операцій. Оптимізація робочих процесів — узгодженість функцій системи з завданнями користувача [79, 81].

Самоописовість вказує на зрозумілість системи користувачами без додаткових пояснень. Сюди варто віднести інформативність, прозорість та інтуїтивність. Інформативність передбачає надання чітких підказок щодо доступних функцій та їх використання. Прозорість забезпечує інформування про поточний стан системи та наслідки виконуваних дій. Інтуїтивність гарантує, що елементи інтерфейсу легко сприйматимуться без спеціальної підготовки [9, 79, 81, 82].

Система повинна відповідати знанням, навичкам та досвіду користувачів. Врахування досвіду полягає у адаптації системи до рівня компетенції користувачів. Стандартизація — використання загальноприйнятих шаблонів і метафор. Передбачуваність — узгодженість поведінки вебдодатку з очікуваннями [79, 83].

Здатність до навчання полягає у простоті навігації (можливість легко освоювати базові функції), послідовності дій (однорідність виконання операцій) і підтримці навчання (поступове освоєння складніших функцій) [79].

Користувачі повинні контролювати темп і послідовність виконання операцій. При цьому, контроль дій гарантує можливість впливу на хід взаємодії. Можливість скасування та повторення дозволяє виправляти помилки або повертатися до попередніх дій. Гнучкість надає змогу налаштовувати систему відповідно до індивідуальних потреб [79, 80].

Стійкість до помилок акцентує увагу на запобіганні помилкам, тобто на проактивному усуненні потенційних проблем. Механізми виправлення повинні надавати можливість швидко та ефективно усувати допущені помилки, а інформація про помилки бути чіткою та орієнтованою на допомогу користувачу [79–81].

Залученість користувача спрямована на забезпечення позитивного досвіду взаємодії з системою. Мотивація підвищує рівень задоволеності від використання продукту. Персоналізація дає змогу налаштовувати інтерфейс відповідно до індивідуальних уподобань, а естетичний та зручний дизайн робить взаємодію приємною та продуктивною [79].

Кожен принцип і його підкатегорії формують чітку структуру, яка визначає яким чином вебдодаток повинен забезпечувати високу якість взаємодії та відповідний рівень задоволеності користувачів. Більшість категорій стандарту ISO 9241-110:2020 відповідають підкатегоріям можливості взаємодії згідно ISO/IEC 25010:2023, деталізуючи їх. Зокрема: самоописовість, здатність до навчання, керованість, стійкість до помилок, залученість користувачів [76, 79].

Для формалізованого представлення множини знань сформовано термінологічний словник (табл. 1.2) та розроблено онтологію якості вебдодатків згідно з ISO 9241-110:2020 (рис. 1.9).

Таблиця 1.2

Фрагмент термінологічного словника онтології
якості вебдодатків згідно з ISO 9241-110:2020 [79]

Клас	Підклас	Опис	Властивості відношення	Властивості дані	Тип даних
1	2	3	4	5	6
Відповідність завданням	Мінімізація зайвих дій	Зменшення кількості непотрібних дій для досягнення мети	Мінімізує, скорочує	Кількість кроків, час виконання задачі	Integer
	Підтримка ефективності	Забезпечення продуктивного виконання завдань без зменшення результативності	Забезпечує, підтримує	Рівень виконання завдань	Float
	Оптимізація робочих процесів	Ефективне функціонування системи завдяки підвищенню продуктивності, зменшенню витрат ресурсів та скороченню часу, необхідного на виконання процесів.	Оптимізує, підвищує	Середній час виконання завдання	Float
Самоописовість	Інтуїтивність	Здатність інтерфейсу забезпечувати зрозумілість та передбачуваність функціоналу без додаткових пояснень	Забезпечує, спрощує	Рівень інтуїтивності	Integer
	Прозорість	Підтримка відображення стану системи, включно з наслідками користувацьких дій, що забезпечує інформованість	Відображає, пояснює	Рівень прозорості	Integer
	Інформативність	Доступність і зрозумілість інформації, необхідної для виконання конкретних завдань	Підтримує, надає	Обсяг наданої інформації	String
Відповідність очікуванням	Передбачуваність	Узгодженість функціональності додатку з очікуваннями користувачів, враховуючи звичні моделі поведінки	Відповідає, забезпечує	Ступінь відповідності	Integer

1	2	3	4	5	6
	Стандартизація	Реалізація прийнятих стандартів, що сприяє легкості використання системи	Реалізує, стандартизує	Відповідність стандартам	String
	Врахування досвіду	Забезпечення адаптації вебдодатку до потреб користувачів з різним рівнем досвіду та знань	Враховує, адаптує	Рівень задоволеності	Integer
Здатність до навчання	Проста навігація	Легкість доступу до необхідних функцій чи інформації та зменшення когнітивного навантаження на користувача	Забезпечує, спрощує	Кількість кроків для одержання результату	Integer
	Послідовність дій	Логічність та узгодженість етапів взаємодії з вебдодатком для зменшення імовірності виникнення помилок	Підтримує, узгоджує	Оцінка послідовності	Integer
	Підтримка навчання	Наявність засобів та функціоналу для швидкого освоєння системи користувачами	Реалізує, допомагає	Час на адаптацію	Float

Таким чином, розроблена онтологія містить сім класів першого рівня та двадцять один клас другого рівня, що достатньо для представлення суті стандарту з ISO 9241-110:2020.

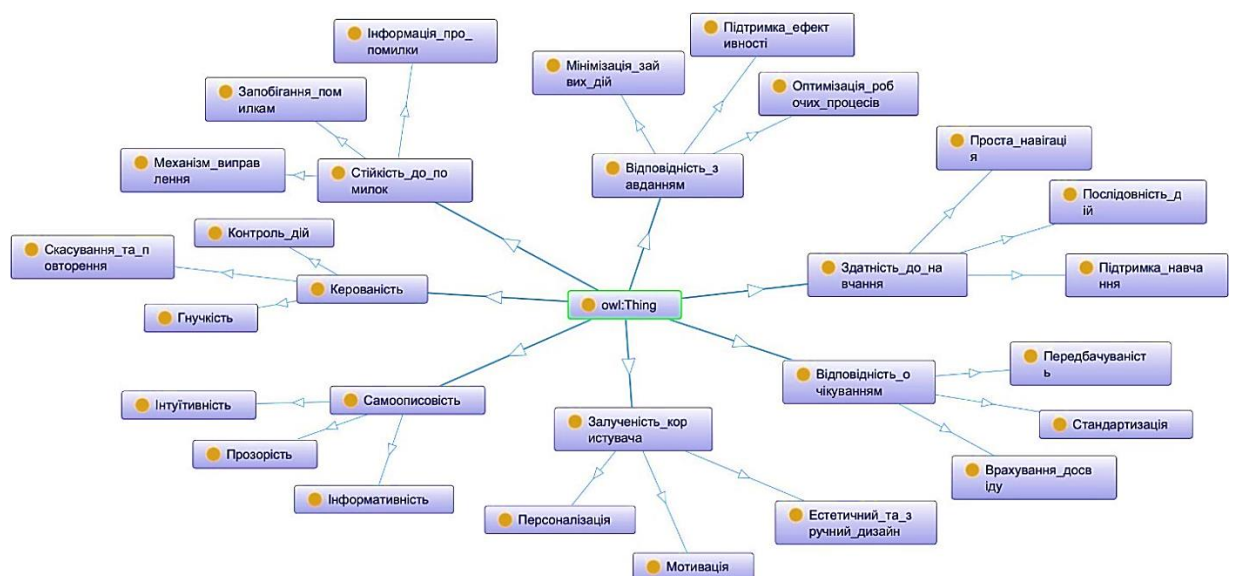


Рис. 1.9. Онтологічний граф класів онтології якості вебдодатків згідно з ISO 9241-110:2020

ISO/IEC 40500:2012 [84], також відомий як Web Content Accessibility Guidelines (WCAG) [85], є міжнародним стандартом, що означає вимоги до доступності вебконтенту. Дотримання вимог даного стандарту є критично важливим для розробників та дизайнерів вебдодатків. Насамперед, це сприяє соціалізації інклюзії, дозволяючи людям із порушеннями зору, слуху, моторики чи когнітивними труднощами отримувати доступ до інформації та сервісів у цифровому середовищі. Стандарт також здійснює значний вплив на відповідність законодавчим нормам. У багатьох країнах положення WCAG були інтегровані в нормативно-правову базу, яка регулює доступність вебресурсів, зокрема у державному секторі. Невиконання цих вимог може призвести до юридичних наслідків або втрати довіри серед користувачів.

Крім забезпечення доступності, стандарт сприяє покращенню користувацького досвіду. Зручність у навігації, адаптивність до різних пристроїв та передбачуваність інтерфейсу покращують взаємодію для усіх користувачів. Використання принципів гнучкого дизайну забезпечує сумісність із допоміжними технологіями, такими як програми для читання екрана або голосові асистенти. Відповідно, цільова аудиторія збільшується [9, 25, 85, 86].

Відповідно до вимог стандарту, якість вебдодатків оцінюється за чотирма ключовими факторами: доступність для сприйняття, керованість, зрозумілість та надійність [84, 84].

Перший фактор вказує на те, що вся інформація та компоненти інтерфейсу повинні бути представлені у зрозумілих і доступних користувачу формах. Це реалізується завдяки текстовим описам нетекстових елементів (зображення, аудіо чи відео), що дозволяє передати інформацію користувачам із вадами зору за допомогою допоміжних технологій. Контент мусить бути доступним незалежно від технологічних засобів, наприклад, шляхом масштабування тексту чи зміни орієнтації екрана. Покращення сприйняття контенту користувачами із порушеннями зору також можливе завдяки достатній різниці між кольорами тексту та фону [85–87].

Керованість визначає вимоги до взаємодії з елементами інтерфейсу. Можливість виконання усіх функцій за допомогою клавіатури (тобто без використання миші) є критично важливою для користувачів із моторними обмеженнями. Також користувачам слід надавати змогу реагувати на динамічні елементи або виконувати дії без лімітів у часі. Уникнення епілептичних тригерів вимагає мінімізації або усунення контенту зі швидкими спалахами чи яскравими кольорними змінами. Навігація повинна бути спрощеною, із забезпеченням чіткої структури задля зручного орієнтування на вебсторінці [84–86].

Зрозумілість забезпечує інтуїтивність та логічність взаємодії з вебдодатком. Контент повинен бути написаний чітко й просто, з можливістю пояснення складної інформації за допомогою додаткових засобів. Користувачі повинні розуміти послідовність дій та очікуваний результат взаємодії з інтерфейсами. Допомога у заповненні форм полягає у наявності інструкцій або підказок для забезпечення коректності введення даних [85, 86, 88].

Надійність — довготривала функціональність вебдодатка та сумісність з різними технологіями. Тобто вебдодаток повинен залишатися функціональним на багатьох пристроях, браузерях та операційних системах. Вебконтент повинен бути адаптованим до допоміжних програм та пристроїв, наприклад програм для читання екрана [85, 86, 78].

Термінологічний словник онтології якості вебдодатків згідно з ISO/IEC 40500:2012 представлений у табличному вигляді (табл. 1.3). Він містить п'ять стовпців, що описують предметну область. Наведено чотири класи розробленої онтології та відповідну кількість підкласів кожного класу. Здійснено теоретичний опис кожного підкласу, що полегшує сприйняття онтологічної моделі. Визначено властивості відношення та властивості дані. Тип даних String призначений для зберігання текстових значень, що не підлягають арифметичним операціям. Float слугує для подання дійсних чисел з плаваючою комою. Integer визначає ціле число без десяткової частини. Boolean виражає бінарне значення логічної істинності [71].

Таблиця 1.3

Термінологічний словник онтології
якості вебдодатків згідно з ISO/IEC 40500:2012 [84, 85]

Клас	Підклас	Опис	Властивості відношення	Властивості дані	Тип даних
1	2	3	4	5	6
Доступність для сприйняття	Текстові альтернативи	Надання текстового еквівалента для немовного контенту	Надає, пояснює	Тип контенту, текстовий опис	String
	Адаптивність	Представлення контенту у форматах, що дозволяють різні способи доступу без втрати інформації	Адаптує, підтримує	Відсоток адаптованого контенту	Float
	Відчутна контрастність	Достатній контраст між текстом і фоном для полегшення читання	Підвищує, регулює	Рівень контрасту	Float
Керованість	Доступність через клавіатуру	Забезпечення доступу до всіх функцій без використання миші	Забезпечує, активує	Відсоток функцій, доступних через клавіатуру	Float
	Достатній час для взаємодії	Надання користувачам достатнього часу для виконання дій	Надає, підтримує	Час до закінчення сесії	Integer
	Уникнення епілептичних тригерів	Уникнення використання контенту, що може спричинити судом чи інші реакції	Запобігає, обмежує	Кількість миготливих елементів	Integer
	Навігація	Забезпечення зрозумілої структури навігації та доступу до інформації	Забезпечує, спрощує	Кількість кроків для одержання результату	Integer
Зрозумілість	Зрозуміла мова	Використання чіткої та простої мови для представлення інформації	Пояснює, спрощує	Кількість складних термінів	Integer
	Передбачуваність	Забезпечення передбачуваної поведінки елементів інтерфейсу	Забезпечує, спрощує	Рівень інтуїтивності	Integer
	Допомога у заповненні форм	Надавання підказок і автоматичного виправлення під час заповнення форм	Допомагає, виправляє	Час виправлення помилок	Float

Продовження табл. 1.3

1	2	3	4	5	6
Надій- ність	Сумісність	Забезпечення відповідності сучасним і майбутнім технологіям	Інтегрує, забезпечує, використовує, адаптує	Чи виникають конфлікти, підтримка форматів даних	Boolean, String
	Підтримка допоміжних технологій	Можливість роботи з екранними читачами та іншими засобами доступності	Підтримує, забезпечує	Відсоток доступності функцій через допоміжні технології	Float

Розроблена онтологія подана у вигляді онтологічного графу, що містить класи першого та другого рівнів (рис. 1.10).

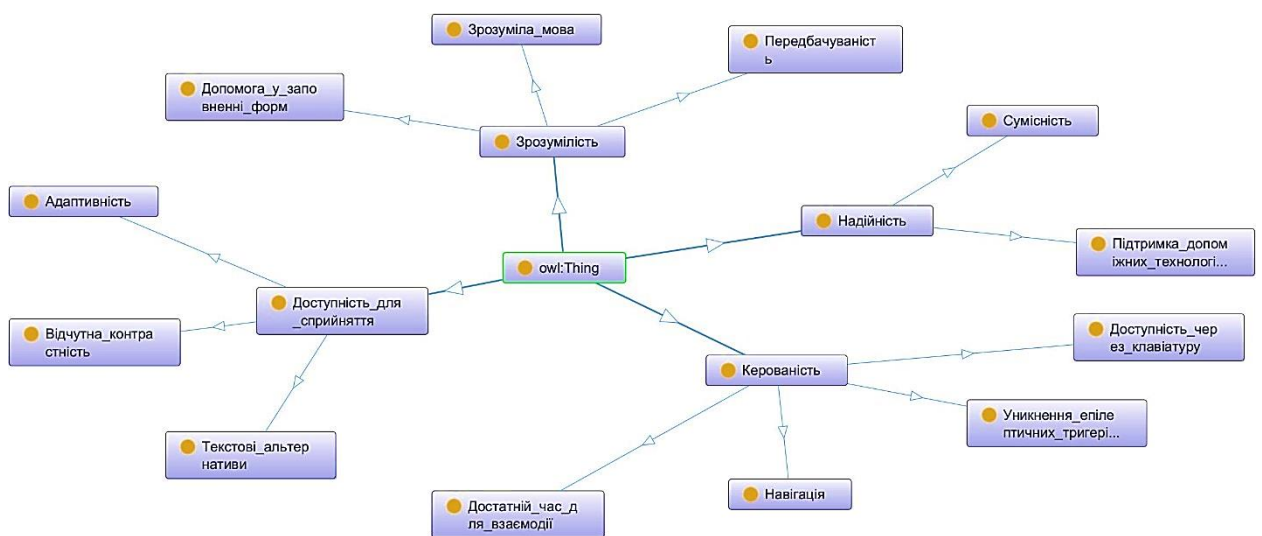


Рис. 1.10. Онтологічний граф класів

онтології якості вебдодатків згідно з ISO/IEC 40500:2012

Міжнародний стандарт ISO/IEC 29138-1:2018 описує ключові потреби користувачів щодо доступності інтерфейсів. Наведено основні категорії потреб: потреба у сприйнятті інформації, у введенні інформації, у розумінні інформації та управлінні, у керуванні середовищем, у безпеці та конфіденційності [89].

Потреби у сприйнятті інформації визначають здатність користувачів отримувати контент незалежно від сенсорних можливостей. Для забезпечення якісного доступу до вебдодатків інформацію потрібно адаптовувати для користувачів із проблемами з зором, слухом або когнітивними порушеннями. Критично важливим є надання альтернативних форматів контенту: текстових описів для немовного контенту, субтитрів для відео, озвучування текстової інформації. Необхідним є також контроль над швидкістю і способом подання інформації, що дозволяє користувачам коригувати відображення контенту відповідно до своїх потреб [89, 90].

Вебінтерфейс повинен підтримувати альтернативні методи введення, зокрема можливість навігації за допомогою клавіатури, сенсорних пристроїв, голосового управління та інших допоміжних технологій. Актуальною для користувачів із порушеннями моторики є можливість налаштування параметрів чутливості та точності пристроїв введення. Крім того, інтерфейс має забезпечувати можливість скасування або повторення дій, що дозволяє виправляти помилки або повторювати введення інформації [89].

Слід використовувати просту та зрозумілу мову, уникати складних технічних термінів чи неоднозначних формулювань. Передбачуваність поведінки інтерфейсу забезпечує логічність та узгодженість виконання дій. Необхідно надавати чіткі інструкції та підказки задля ефективного використання вебресурсів незалежно від рівня технічної підготовки користувачів [89].

Користувачам варто надавати можливість змінювати колірну схему, параметри шрифту та інші налаштування представлення інформації. Вони також повинні мати змогу контролювати рівень звукових та візуальних сповіщень, щоб уникнути перевантаження непотрібною інформацією. Особливо важливим є усунення елементів, що можуть викликати дискомфорт або когнітивне перевантаження, наприклад, занадто швидкі зміни контенту, мерехтливі об'єкти чи нав'язлива реклама [52, 89, 91].

Для підвищення довіри користувачів до системи доцільно впроваджувати механізми безпечного збереження та передачі конфіденційної інформації. Надання користувачам можливості безпечного завершення сеансу допомагає уникнути несанкціонованого доступу до даних. Додатково, система повинна запобігати несанкціонованому використанню особистої інформації шляхом автентифікації, контролю доступу та шифрування даних [78, 89].

У таблиці 1.4 наведено фрагмент термінологічного словника, що описує класи онтології.

Таблиця 1.4

Фрагмент термінологічного словника онтології
якості вебдодатків згідно з ISO/IEC 29138-1:2018 [89]

Клас	Підклас	Опис	Властивості відношення	Властивості дані	Тип даних
1	2	3	4	5	6
Сприйняття інформації	Сенсорні канали (зір, слух, дотик)	Використання різних сенсорних каналів для сприйняття інформації	Впливає, забезпечує	Тип каналу	String
	Альтернативні формати	Надання інформації у різних форматах для зручності користувачів	Підтримує, трансформує	Кількість форматів	Integer
	Швидкість подання інформації	Регулювання швидкості відображення контенту для покращення сприйняття	Контролює, регулює	Час відображення	Float
	Обсяг подання інформації	Оптимізація кількості інформації, що подається одночасно	Обмежує, адаптує	Обсяг даних	Integer
Розуміння інформації та управління	Проста та зрозуміла мова	Використання чіткої, простої лексики та граматики	Спрощує, пояснює	Рівень складності	Integer
	Передбачуваність поведінки інтерфейсу	Узгодженість функціональності додатку з очікуваннями користувачів, враховуючи звичні моделі поведінки	Відповідає, забезпечує	Ступінь відповідності	Integer
	Інструкції та допомога	Надавання підказок і автоматичного виправлення	Допомагає, виправляє	Час виправлення помилок	Float

Продовження табл. 1.4

1	2	3	4	5	6
Керування середовищем	Зовнішній вигляд інтерфейсу (колір, шрифт, розмір)	Використання естетично приємного та функціонально відповідного оформлення	Формує, регулює	Контрастність, розмір шрифту	String
	Звукові сповіщення	Використання звукових сигналів для інформування користувачів	Сповіщає, сигналізує	Рівень гучності	Float
	Візуальні сповіщення	Надання користувачам повідомлень за допомогою графічних елементів	Попереджає, відображає	Час відображення	Float
	Уникнення дискомфортних елементів	Уникнення використання контенту, що може спричинити небажані реакції	Запобігає, обмежує	Кількість миготливих елементів	Integer

Враховуючи дані, наведені у термінологічному словнику, онтологічний граф класів представлено на рис. 1.11.

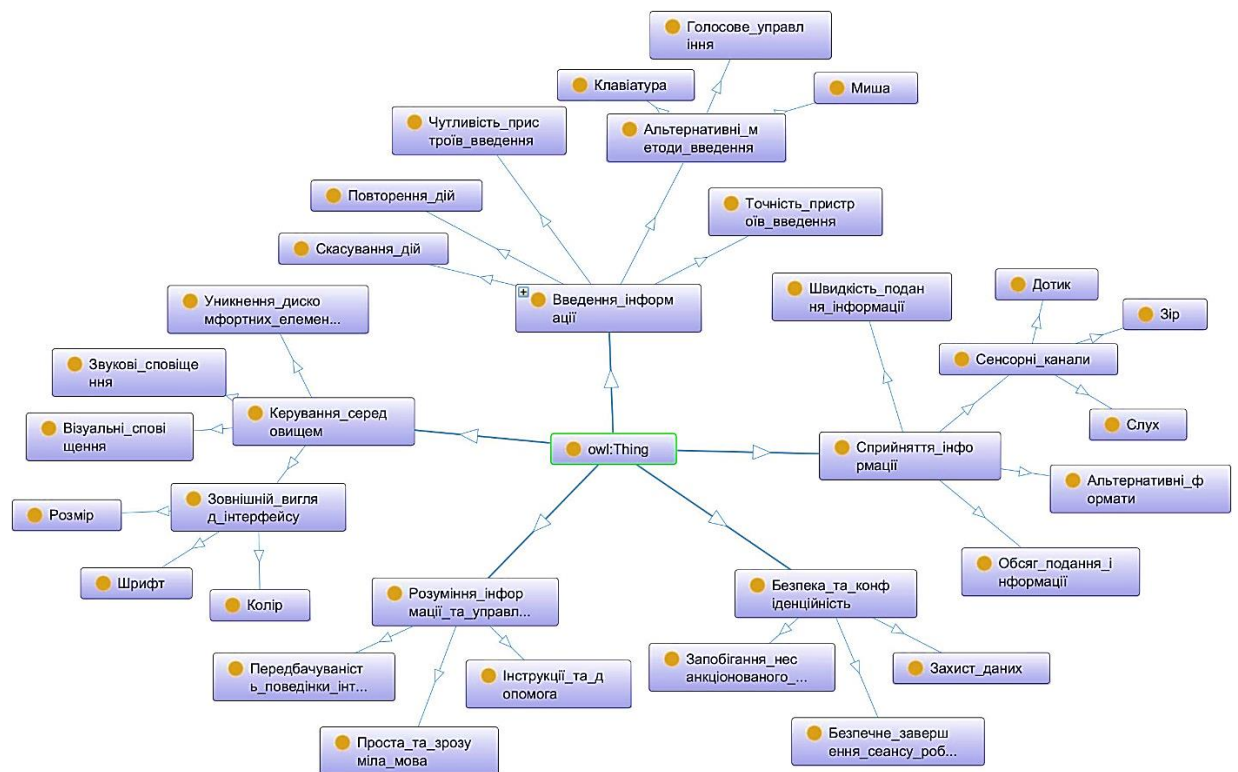


Рис. 1.11. Онтологічний граф класів

онтології якості вебдодатків згідно з ISO/IEC 29138-1:2018

Таким чином, таксономія термінів онтології якості вебдодатків згідно з ISO/IEC 29138-1:2018 містить три рівні. До першого рівня належить п'ять класів, до другого — дев'ятнадцять, до третього — дев'ять.

Слід зазначити, що онтології якості вебдодатків, розроблені на основі проаналізованих міжнародних стандартів, містять деякі однакові чи схожі за смисловим навантаженням класи.

1.4. Узагальнена онтологія якості вебдодатків

Зважаючи на подібність деяких класів розроблених онтологій, доцільно побудувати узагальнену онтологію якості вебдодатків, що дозволить провести оптимізацію кількості класів та встановити узагальнені зв'язки. Для цього використано метод кластеризації [92, 93]. Кластеризація класів є важливим процесом в онтологічному моделюванні, базах знань і машинному навчанні. Вона дозволяє об'єднувати схожі об'єкти в єдині узагальнені класи, зменшуючи надмірність і покращуючи узгодженість моделі. Основна мета кластеризації — виявити структуру у вихідних даних, мінімізувати дублювання та забезпечити ефективну організацію знань. Розглянемо кластеризацію класів на прикладі двох довільних онтологій. Нехай буде множиною, що містить клас A , тобто $A \in G_{cl_1}$, тоді справедливим буде вираз $G_{cl_1} = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$, де n — кількість класів у множині G_{cl_1} . Аналогічно G_{cl_2} буде множиною, що містить клас C , $C \in G_{cl_2}$: $G_{cl_2} = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$.

Вважатимемо, що якщо існують такі класи $A \in G_{cl_1}$ та $C \in G_{cl_2}$, для яких дійсним є вираз $A = C$, то вони є еквівалентними. Визначено функцію кластеризації f , яка об'єднує такі еквівалентні класи у єдиний узагальнений клас:

$$E = f(A, C), \quad (1.4)$$

де f — функція, що виконує операцію кластеризації, E — узагальнений клас, що формується після об'єднання.

Тоді узагальнену множину класів позначено як G_{cl_merged} , тобто $E \in G_{cl_merged} : G_{cl_merged} = \{E_1, E_2, \dots, E_n\}$, де кожен елемент E_i є результатом кластеризації класів A_i та C_j , якщо їх можна вважати тотожними.

Фактично, щоб отримати множину узагальнених класів G_{cl_merged} , застосовано відношення еквівалентності:

$$A \sim C \leftrightarrow A = C. \quad (1.5)$$

Тоді множина узагальнених класів є фактор-множиною, де всі еквівалентні елементи об'єднані в один клас:

$$G_{cl_merged} = G_{cl_1} \cup G_{cl_2}. \quad (1.6)$$

Якщо класи A та/або C мають відповідні підмножини класів $Sub(A)$ і $Sub(C)$, тоді клас E у множині G_{cl_merged} також їх успадкує:

$$Sub(E) = Sub(A) \cup Sub(C). \quad (1.7)$$

Якщо існують батьківські класи (вищі рівні ієрархії) для класів A та/або C , тобто $Sup(A)$ і $Sup(C)$, тоді множина батьківських класів узагальненого класу E формується як об'єднання множин батьківських класів вихідних класів A та/або C :

$$Sup(E) = Sup(A) \cup Sup(C). \quad (1.8)$$

З огляду на сказане, сформовано основні етапи кластеризації:

1. Визначення еквівалентності класів на основі семантичної подібності, структурного аналізу та функціонального значення.
2. Об'єднання еквівалентних класів у єдиний узагальнений клас із збереженням усіх відповідних атрибутів.
3. Успадкування підкласів, що належали вихідним класам, для забезпечення повної деталізації структури онтології.
4. Збереження ієрархічних зв'язків, тобто узагальнений клас також успадковує всі батьківські класи, до яких належали вихідні концепти.

5. Формування узагальненої множини класів шляхом застосування відношення еквівалентності, що дозволяє мінімізувати надмірність і забезпечити узгодженість моделі [70, 92, 93].

За аналогічним принципом проводиться об'єднання класів з кожною наступною онтологією для утворення узагальненої онтології якості вебдодатків:

$$G_{cl_merged} = G_{cl_ISO25010} \cup G_{cl_ISO9241} \cup G_{cl_ISO40500} \cup G_{cl_ISO29138}. \quad (1.9)$$

Приклад формування класу «керованість» узагальненої онтології представлено у таблиці 1.5.

Таблиця 1.5

Приклад оптимізації класів розроблених онтологій

Множини класів онтології	Фрагменти онтологічних моделей (клас «Керованість»)
$G_{cl_ISO25010}$	
$G_{cl_ISO9241}$	
$G_{cl_ISO40500}$	
$G_{cl_ISO29138}$	
G_{cl_merged}	

Відповідно, справедливим також є запис щодо екземплярів онтології:

$$G_{ind_merged} = G_{ind_ISO25010} \cup G_{ind_ISO9241} \cup G_{ind_ISO40500} \cup G_{ind_ISO29138}. \quad (1.10)$$

Та узагальнений запис щодо концептів онтології відповідно до (1.2):

$$G_{merged} = G_{cl_merged} \cup G_{ind_merged}. \quad (1.11)$$

Тоді, згідно з (1.1) маємо:

$$O_{merged} = \langle G_{merged}, P_{merged}, H_{merged}, T_{merged} \rangle. \quad (1.12)$$

Враховуючи наведені твердження, розроблено узагальнену онтологія якості вебдодатків (рис. 1.12).

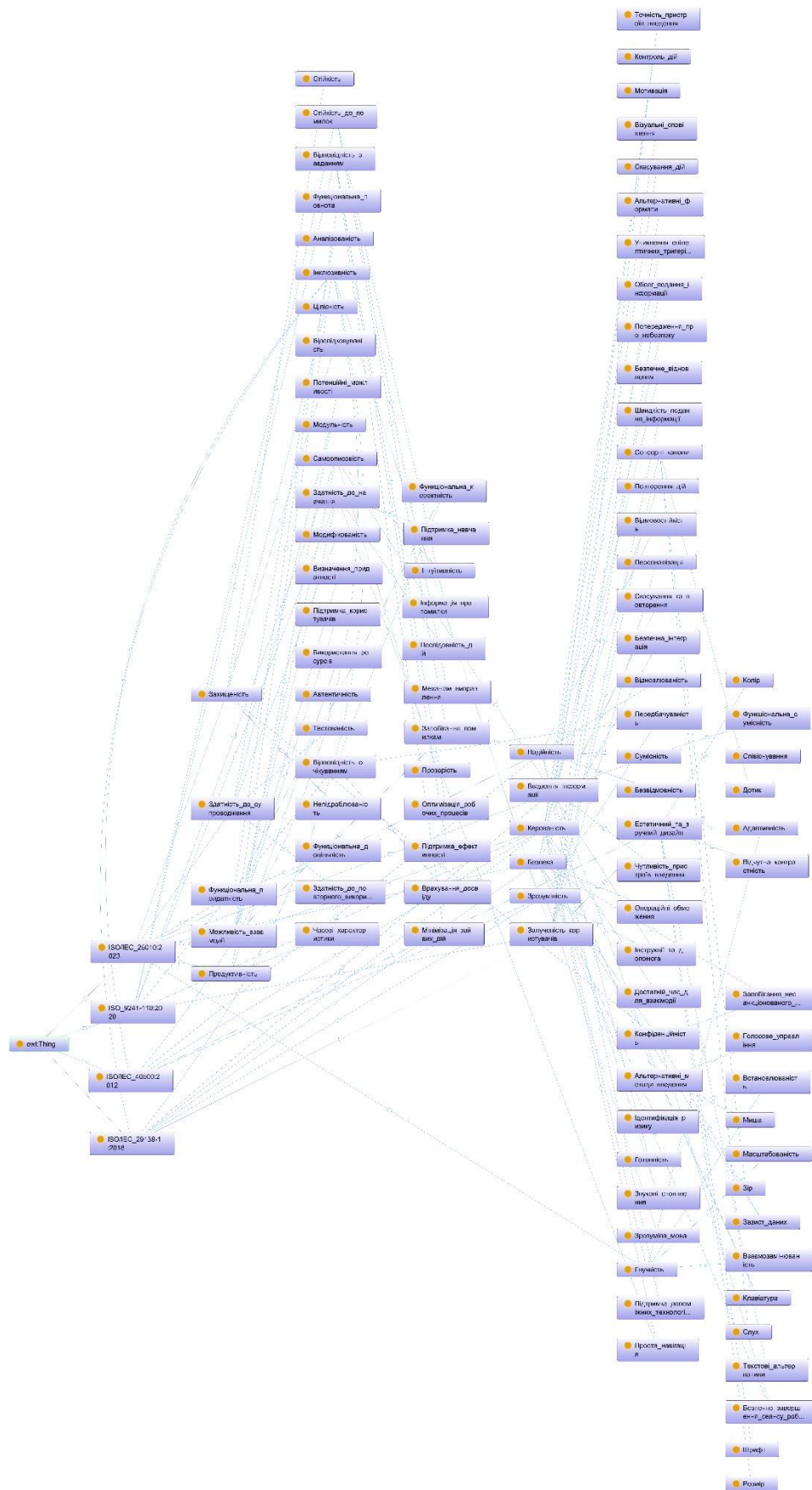


Рис. 1.12. Узагальнений онтологічний граф класів
онтології якості вебдодатків

Для підрахунку кількості унікальних класів узагальноної онтології створено таблицю з переліком класів кожного рівня (табл. 1.6). Слід зазначити, що в даному дослідженні унікальним вважається клас, що не повторюється на попередніх рівнях, адже один і той самий клас може бути одночасно підкласом кількох різних рівнів з огляду на належність до кількох різних домінуючих класів.

Таблиця 1.6

Кількісний аналіз класів розроблених онтологій

Множини класів онтології	Класи онтології					
	I рівень	II рівень	III рівень	IV рівень	V рівень	Всього
$G_{cl_ISO25010}$	9	40	0	0	0	49
$G_{cl_ISO9241}$	7	21	0	0	0	28
$G_{cl_ISO40500}$	4	12	0	0	0	16
$G_{cl_ISO29138}$	5	19	9	0	0	33
G_{cl_merged}	4	17	68	14	2	105

Для обчислення кількості унікальних класів на кожному рівні використано мову програмування Python та бібліотеку для роботи з таблицями та опрацювання даних у форматі DataFrame — Pandas. Використано множину (set()) для збереження унікальних значень. Для кожного рівня відфільтровано вже враховані класи (щоб не рахувати повторно). Підраховано розмір множини, що залишилася після віднімання раніше врахованих класів. Таким чином вдалося виявити, що оптимізовано 21 клас (різниця між кількістю унікальних класів узагальноної онтології та сумою класів чотирьох окремих розроблених онтологій). Фрагмент коду для визначення кількості унікальних класів узагальноної онтології:

```

seen_classes = set()
unique_counts = []
for col in df_cleaned.columns:
    unique_classes = set(df_cleaned[col].dropna()) - seen_classes
    unique_counts.append(len(unique_classes))
    seen_classes.update(unique_classes)
unique_counts

```

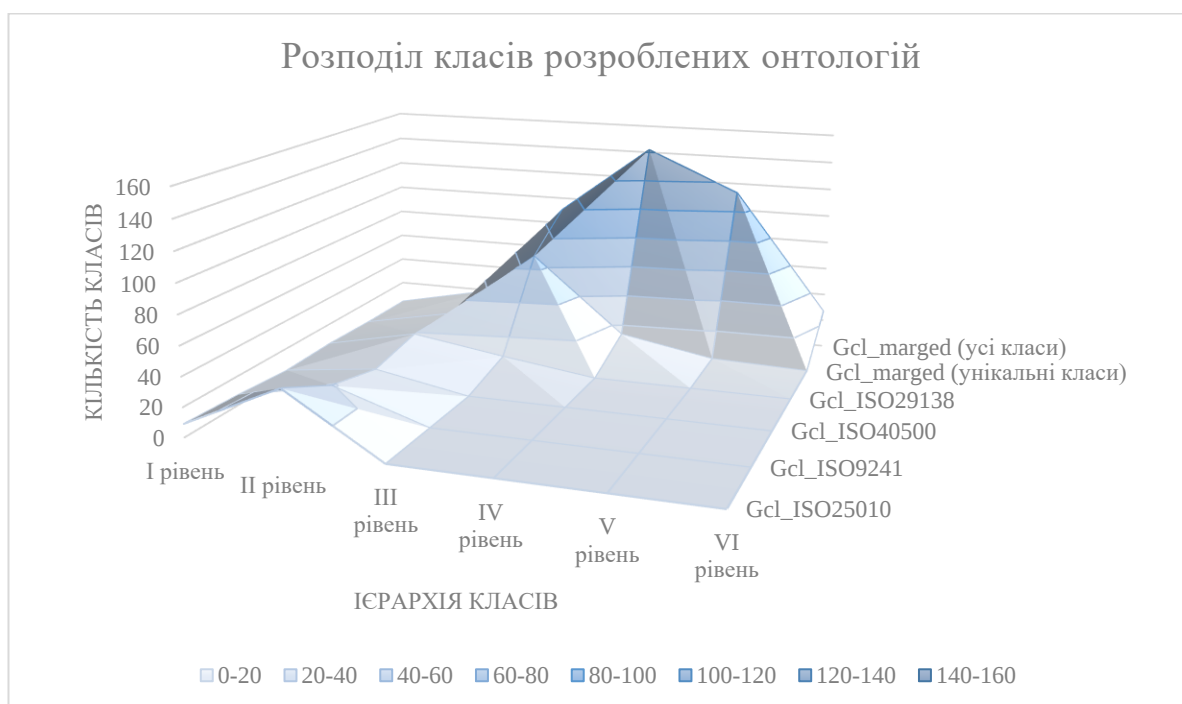


Рис. 1.13. Порівняння кількості класів онтологій

Наведена візуалізація (рис. 1.13) чітко ілюструє високий рівень пов'язаності класів в узагальненій онтології, що свідчить про взаємозалежність та взаємодоповнюваність проаналізованих стандартів. Порівняно з табл. 1.6, рис 1.13 ілюструє також усі класи узагальненої онтології. З огляду на особливості розробленої онтології введено шостий рівень ієрархії, який містить 27 класів.

1.5. Постановка завдань дослідження

Для розроблення інформаційної технології оцінювання якості проєктування та дизайну вебдодатків потрібно розв'язати такі основні завдання:

- побудувати функціональну модель процесу створення вебдодатків, що ґрунтується на формалізованому описі ключових етапів життєвого циклу та онтологію якості вебдодатків із врахуванням структурних, функціональних та експлуатаційних характеристик відповідно до сучасних міжнародних стандартів у галузі веброзробки;

- на основі експертного оцінювання сформувати множину ключових факторів проєктування та дизайну вебдодатків та розробити моделі вагомості факторів, враховуючи вагові значення факторів, типи залежностей та попарні порівняння;

- визначити багатофакторні оцінки корисності та значення функцій належності для встановлення оптимальних варіантів проєктування та дизайну вебдодатків за методами лінійного об'єднання критеріїв і нечіткого відношення переваги;

- розробити ієрархічну модель формування якості проєктування та дизайну вебдодатків і нечіткі логічні рівняння для визначення прогнозованого показника якості проєктування та дизайну вебдодатків із застосуванням методів та засобів нечіткої логіки;

- розробити інформаційну технологію оцінювання якості проєктування та дизайну вебдодатків, одну з компонент якої реалізувати у вигляді програмного продукту.

Висновки до розділу 1

1. Здійснено аналіз сучасного стану та перспектив розвитку вебдодатків, як фундаментального інструменту у багатьох сферах людської діяльності, зокрема в освіті, наукових дослідженнях, медицині, соціальній комунікації,

електронній комерції, банківському секторі, індустрії розваг та медіа. Вказано на необхідність теоретично обґрунтованої методики оцінювання якості проєктування та дизайну вебдодатків.

2. Розроблено функціональну модель процесу створення вебдодатків, що сприяє успішному виконанню проєктів завдяки послідовному та теоретично виваженому опису основних етапів. Розроблено контекстну діаграму та діаграми двох рівнів декомпозиції. Для відображення структури розробленої IDEF0-моделі сформовано ієрархічну діаграму виокремлених вузлів.

3. Наведено теоретичні основи онтологічного моделювання. Обґрунтовано необхідність опису предметної області за допомогою ієрархічної структури понять у вигляді скінченної множини. Сформовано блок-схему алгоритму розроблення онтології. Проведено онтологічний аналіз стандартів якості вебдодатків. Розроблено онтології формування якості вебдодатків на основі базових стандартів у даній галузі. Представлено фрагменти онтологічних словників та онтологічні графи класів онтологій якості вебдодатків.

5. Розроблено узагальнену онтологію якості вебдодатків. Удосконалено метод онтологічного аналізу шляхом групування еквівалентних класів з різних стандартів якості та їх об'єднання в узагальнені концепти. Процес кластеризації включає визначення еквівалентності класів на основі семантичної подібності, структурного аналізу та функціонального значення, що забезпечує коректне співставлення понять. Формування узагальненої множини класів дозволило мінімізувати надмірність, усунути дублювання та забезпечити узгодженість онтологічної моделі.

6. Наведено перелік завдань дисертаційного дослідження, вирішення яких уможливить розроблення інформаційної технології оцінювання якості проєктування та дизайну вебдодатків.

РОЗДІЛ 2

МОДЕЛІ ФАКТОРІВ ВПЛИВУ НА ПРОЄКТУВАННЯ ТА ДИЗАЙН ВЕБДОДАТКІВ

2.1. Формування множини факторів впливу на проєктування та дизайн вебдодатків

Для подальшого дослідження доцільно виокремити найвагоміші критерії, що впливають на проєктування та дизайн вебдодатків. Для цього використано метод експертного оцінювання [94, 95]. На основі узагальненої онтології якості вебдодатків (рис. 1.12) сформовано узагальнену множину факторів $G = \{G_1, G_2, \dots, G_n\}$. Метою експертного оцінювання є виокремлення множини факторів впливу на проєктування та дизайн із запропонованої множини факторів якості вебдодатків. Основою застосування методу є компетентність залучених фахівців, професійний досвід та здатність до обґрунтованого аналізу проблеми. Методологія експертних оцінок охоплює як організаційні аспекти залучення фахівців, так і формальні підходи до аналізу отриманих даних [96].

Метод експертного оцінювання складається з трьох основних етапів (рис. 2.1). Перший етап полягає у логічно-інтуїтивному аналізі досліджуваної проблеми. Його ефективність залежить від професійної компетентності експертів, рівня обізнаності та навичок аргументованого мислення. Другий етап — формування оцінок, які можуть мати як кількісний, так і якісний характер, залежно від специфіки проблеми. На завершальному етапі здійснюється опрацювання отриманих оцінок із застосуванням методів математичної статистики або логічного аналізу, що сприяє підвищенню об'єктивності та точності узагальнених результатів [94–96].

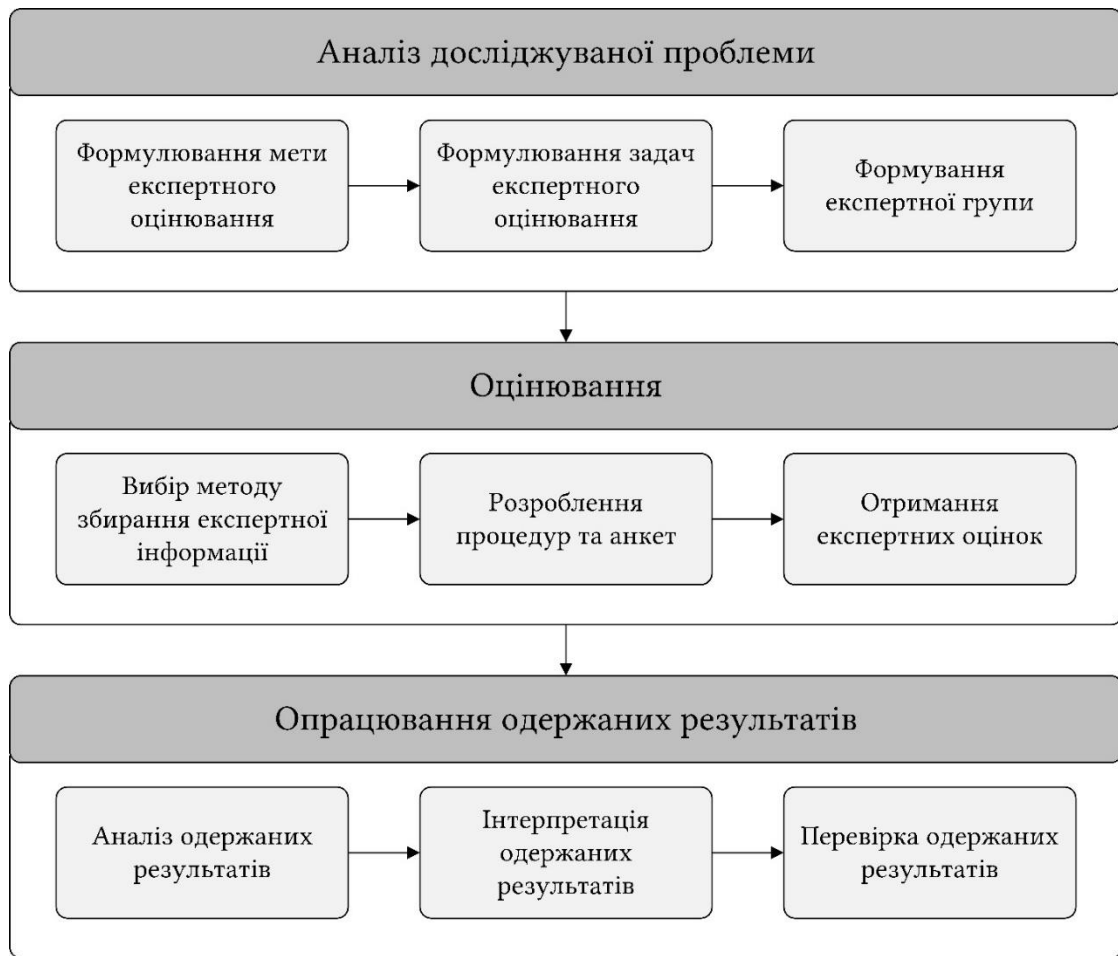


Рис. 2.1. Етапи експертного оцінювання

Одним з найпоширеніших методів експертного оцінювання є метод шкальних оцінок [94, 97, 98]. Кількісне оцінювання відносної значущості факторів здійснюється шляхом присвоєння числових значень у межах фіксованої шкали, як правило 100-бальної. Використання 100-бальної системи полягає у присвоєнні кожному фактору певної оцінки у проміжку від 0 до 100. При цьому 0 відповідає відсутності впливу, а 100 вказує на максимальний рівень значущості. У разі еквівалентної важливості декількох факторів допускається однакове оцінювання [98].

Для систематизованого представлення бальних оцінок експертів формується таблиця (табл. 2.1), яка містить кількість експертів, кількість факторів що оцінюються та бали X_{ij} , що виставив кожен експерт для кожного фактора.

Таблиця 2.1

Матриця оцінювання вагомості факторів

Фак- тори	Експерти						
	1	2	3	...	j	...	m
G_1	X_{11}	X_{12}	X_{13}	...	X_{1j}	...	X_{1m}
G_2	X_{21}	X_{22}	X_{23}	...	X_{2j}	...	X_{2m}
G_3	X_{31}	X_{32}	X_{33}	...	X_{3j}	...	X_{3m}
...	...	...	...	...	...	...	...
i	X_{i1}	X_{i2}	X_{i3}	...	X_{ij}	...	X_{im}
...	...	...	...	...	...	...	...
G_n	X_{n1}	X_{n2}	X_{n3}	...	X_{nj}	...	X_{nm}

Сума оцінок кожного фактора визначається за формулою [94]:

$$S_i = \sum_{j=1}^m X_{ij}, \quad (2.1)$$

де X_{ij} — оцінка i -го фактора, надана j -им експертом, m — загальна кількість експертів.

Середня арифметична оцінка кожного фактора є такою: $\overline{X}_i = S_i/m$.

При залученні значної кількості експертів до процесу експертного оцінювання неминуче виникають відмінності у експертних висновках. Ключовим є ступінь цих розбіжностей, оскільки саме він визначає рівень узгодженості отриманих результатів. Надійність колективного оцінювання досягається лише за умови високого рівня узгодженості експертних суджень [96].

Для оцінювання ступеня варіабельності та взаємної відповідності експертних висновків використовуються кількісні показники, що характеризують статистичний розкид значень: варіаційних розмах L , середнє квадратичне відхилення G та коефіцієнт варіації V . Застосування таких параметрів дозволяє об'єктивно оцінити рівень узгодженості групової експертизи та визначити її достовірність. Висока конкордація оцінок свідчить про стабільність експертного висновку, тоді як значні відхилення можуть сигналізувати про необхідність

уточнення факторів оцінювання або залучення додаткових фахівців для підвищення точності аналізу [94, 99].

Варіаційних розмах L обчислюється як різниця між максимальною та мінімальною оцінкою фактора [94, 99]:

$$L = X_{\max} - X_{\min}, \quad (2.2)$$

де $X_{\max}$ — максимальна оцінка фактору, $X_{\min}$ — мінімальна оцінка фактору.

Середнє квадратичне відхилення K одержуємо з виразу [94, 99]:

$$K = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m (X_{ij} - \bar{X})^2}{m-1}}, \quad (2.3)$$

Коефіцієнт варіації V визначаємо таким чином [94]:

$$V = \frac{K}{\bar{X}} \cdot 100\%. \quad (2.4)$$

Для подальшого опрацювання отриманих даних застосовується метод середніх арифметичних рангів, що забезпечує впорядкування факторів за рівнем впливу. Бальні оцінки трансформуються у рангові показники згідно з порядковим принципом: фактор із найвищою значущістю отримує мінімальний порядковий номер, а фактор із найменшим впливом — максимальний. Якщо кільком факторам належать однакові бальні оцінки, присвоюється стандартизований ранг, що ґрунтується на усередненому значенні порядкових номерів відповідних елементів. Це забезпечує підвищення об'єктивності та коректність подальшого аналітичного опрацювання [94, 95].

Матрицю оцінювання факторів за бальною шкалою доцільно перетворити у матрицю рангів факторів (табл. 2.2), тобто оцінка X_{ij} перетворюється на певний ранг R_{ij} . Стандартизовані ранги визначаються шляхом ділення суми рівнів пріоритетності, отриманих факторами внаслідок бального оцінювання, на кількість факторів з однаковими оцінками [94, 99, 100]:

$$R_{ij} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n}, \quad (2.5)$$

де n — кількість факторів з однаковими оцінками, P_i — рівень пріоритетності i -го фактора у впорядкованому списку, $i = \overline{1, n}$.

Таблиця 2.2

Матриця рангів факторів [100]

Фактори	Експерти						
	1	2	3	...	j	...	m
G_1	R_{11}	R_{12}	R_{13}	...	R_{1j}	...	R_{1m}
G_2	R_{21}	R_{22}	R_{23}	...	R_{2j}	...	R_{2m}
G_3	R_{31}	R_{32}	R_{33}	...	R_{3j}	...	R_{3m}
...	...	...	...	...	...	...	...
i	R_{i1}	R_{i2}	R_{i3}	...	R_{ij}	...	R_{im}
...	...	...	...	...	...	...	...
G_n	R_{n1}	R_{n2}	R_{n3}	...	R_{nj}	...	R_{nm}

Сума рангів кожного фактора визначається аналогічно, як і сума оцінок. Адаптуючи вираз (2.2) отримуємо [100]:

$$F_i = \sum_{j=1}^m R_{ij}. \quad (2.6)$$

Зрозуміло, що чим нижчим є значення F_i , тим вищою є вагомість аналізованого фактора. Тоді середній ранг кожного фактора має вид: $\overline{R}_i = F_i/m$. За значеннями середніх рангів будується ранжований ряд та формується множина факторів проєктування та дизайну вебдодатків [94, 95, 100].

У разі залучення більш ніж двох експертів, для оцінки узгодженості висновків застосовується коефіцієнт координації Кендалла H . Цей статистичний показник дозволяє визначити рівень відповідності індивідуальних суджень між експертами у межах ранжованих рядів. Використання даного коефіцієнта сприяє виявленню рівня консенсусу між оцінками та дозволяє мінімізувати суб'єктивні відхилення [99, 100].

$$H = \frac{12 \cdot U}{m^2(n^3 - n)}, \quad (2.8)$$

де U — сума квадратів відхилення, m — загальна кількість експертів, n — кількість факторів, що порівнюється.

$$U = \sum_{i=1}^n (F_i - \bar{F})^2, \quad (2.9)$$

де $\bar{F}$ — середнє значення суми рангів усіх факторів [100].

Коефіцієнт координації H набуває значень у межах $[0;1]$. Максимальне значення ($H = 1$) вказує на повну відповідність рангів, присвоєних об'єктам усіма експертами. Зменшення значення свідчить про зниження рівня узгодженості експертних оцінок. Наближення H до нуля відображає відсутність систематичної узгодженості між ними [99, 100].

Кількість експертів для експертного оцінювання залежить від складності проблеми, рівня кваліфікації експертів, необхідної надійності оцінки та допустимого рівня розбіжностей між експертами. Рекомендовану кількість експертів можна визначити за формулою:

$$N = 0,5 \cdot \left(\frac{3}{b} + 5 \right) \quad (2.10)$$

де b — допустима похибка результатів експертизи, $0 < b < 1$ [98, 100].

Якщо прийняти довірчу ймовірність на рівні 0,8, тоді гранична похибка оцінювання не перевищуватиме 0,2. Внаслідок обчислення за формулою (2.10) одержано що мінімально допустиму кількість експертів у групі для забезпечення необхідної точності висновків становить 10 осіб. Якщо рівень узгодженості буде низький, то кількість експертів потрібно збільшити [98, 100].

За результатами експертного оцінювання множина факторів впливу на якість проектування та дизайну вебдодатків містить фактори з суттєво вищими балами. Фактори із значно нижчими оцінками відкидаємо. Для прикладу, продемонстровано результати експертного оцінювання для п'яти факторів з найвищими балами (табл. 2.3) [100].

Таблиця 2.3

Фрагмент матриці оцінювання вагомості факторів [100]

Фактори	Експерти										Сума оцінок, S_i	Середня оцінка, $\bar{X}_i$	Варіаційний розмах, L	Середнє квадратичне відхилення, K	Коефіцієнт варіації, V
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10					
G_1	80	70	80	100	90	100	100	100	80	70	870	87	30	12,52	14,39%
G_2	80	80	70	90	80	90	100	90	90	70	840	84	30	9,66	11,50%
G_3	70	80	70	80	100	90	90	90	70	80	820	82	30	10,33	12,60%
G_4	90	70	60	80	70	80	80	80	70	60	740	74	30	9,66	13,06%
G_5	80	70	60	70	60	60	80	80	60	60	680	68	20	9,19	13,51%

На основі виразів (2.2)–(2.4) одержано міри розкидів L , K , V за кожним фактором. Як бачимо з таблиці 1, міри розкидів є незначними, що свідчить про невисоку розбіжність експертних оцінок та належний рівень узгодженості [100].

За формулою (2.5) визначено ранги факторів та занесено у табл. 2.4.

Таблиця 2.4

Фрагмент матриці рангів факторів

Фактори	Експерти										Сума рангів F_i	Середній ранг $\bar{R}_i$	Відхилення від середньої суми $\Delta = (F_i - \bar{F})$	Квадрат відхилення $\Delta^2 = (F_i - \bar{F})^2$
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10				
G_1	4,0	6,0	3,0	1,0	2,0	1,0	1,5	1,0	3,0	4,5	27	2,7	-11,2	125,44
G_2	4,0	3,5	4,5	2,0	3,0	2,5	1,5	2,5	2,0	4,5	30	3	-8,2	67,24
G_3	6,0	3,5	4,5	3,5	1,0	2,5	3,0	2,5	4,5	3,0	34	3,4	-4,2	17,64
G_4	2,0	6,0	6,5	3,5	4,0	4,0	4,5	4,5	4,5	6,5	46	4,6	7,8	60,84
G_5	4,0	6,0	6,5	5,0	5,0	6,0	4,5	4,5	6,0	6,5	54	5,4	15,8	249,64

Відхилення від середньої суми визначається як різниця суми рангів за певним фактором F_i та середньої суми рангів усіх факторів $\bar{F}$. У даному випадку $\bar{F} = 38,2$. Квадрат відхилення дорівнює квадрату різниці суми рангів конкретного фактора та середньої суми рангів усіх факторів. При цьому загальна сума квадратів відхилення щодо аналізованих факторів становить $U = 520,8$. Підставивши дані, одержані у табл. 2.5 у формуле (2.8) обчислено коефіцієнт Кендалла: $H = \frac{12 \times 520,8}{10^2 \times (5^3 - 5)} = 0,521$. Одержаний коефіцієнт конкордації Кендалла свідчить, що рівень узгодженості експертних суджень вище середнього, тобто експертне оцінювання можна вважати узгодженим [99].

Для подальшого дослідження виокремлені експертами класи онтології (фактори), що впливають на проєктування та дизайн вебдодатків, проаналізовано та розділено за трьома основними категоріями. Враховано етапи даного процесу, наведені на рис. 1.6 (дослідження та аналіз, моделювання взаємодії, проєктування архітектури, створення прототипів, візуальний дизайн). Таким чином, категорії факторів є наступними: E – ергономіка та когнітивні принципи взаємодії, D – доступність та інклюзивність, I – інформаційна архітектура та візуальний дизайн. Узагальнено схожі за функціональним призначенням фактори. Також переглянуто та уточнено назви факторів для кращого розуміння експертами та іншими зацікавленими особами.

Одержано множину факторів проєктування та дизайну вебдодатків:

$$G = \{E; D; I\}, \quad (2.11)$$

з такими субпідрядними множинами: $E = \{E_1, E_2, E_3, E_4, E_5, E_6\}$ — множина факторів ергономіки та когнітивних принципів взаємодії, $D = \{D_1, D_2, D_3, D_4, D_5\}$ — множина факторів доступності та інклюзивності, $I = \{I_1, I_2, I_3, I_4, I_5\}$ — множина факторів якості інформаційної архітектури та візуального дизайну [86, 100–102].

Розподіл факторів впливу на проектування та дизайн вебдодатків за трьома основними категоріями представлений на рис. 2.2 [100–102].

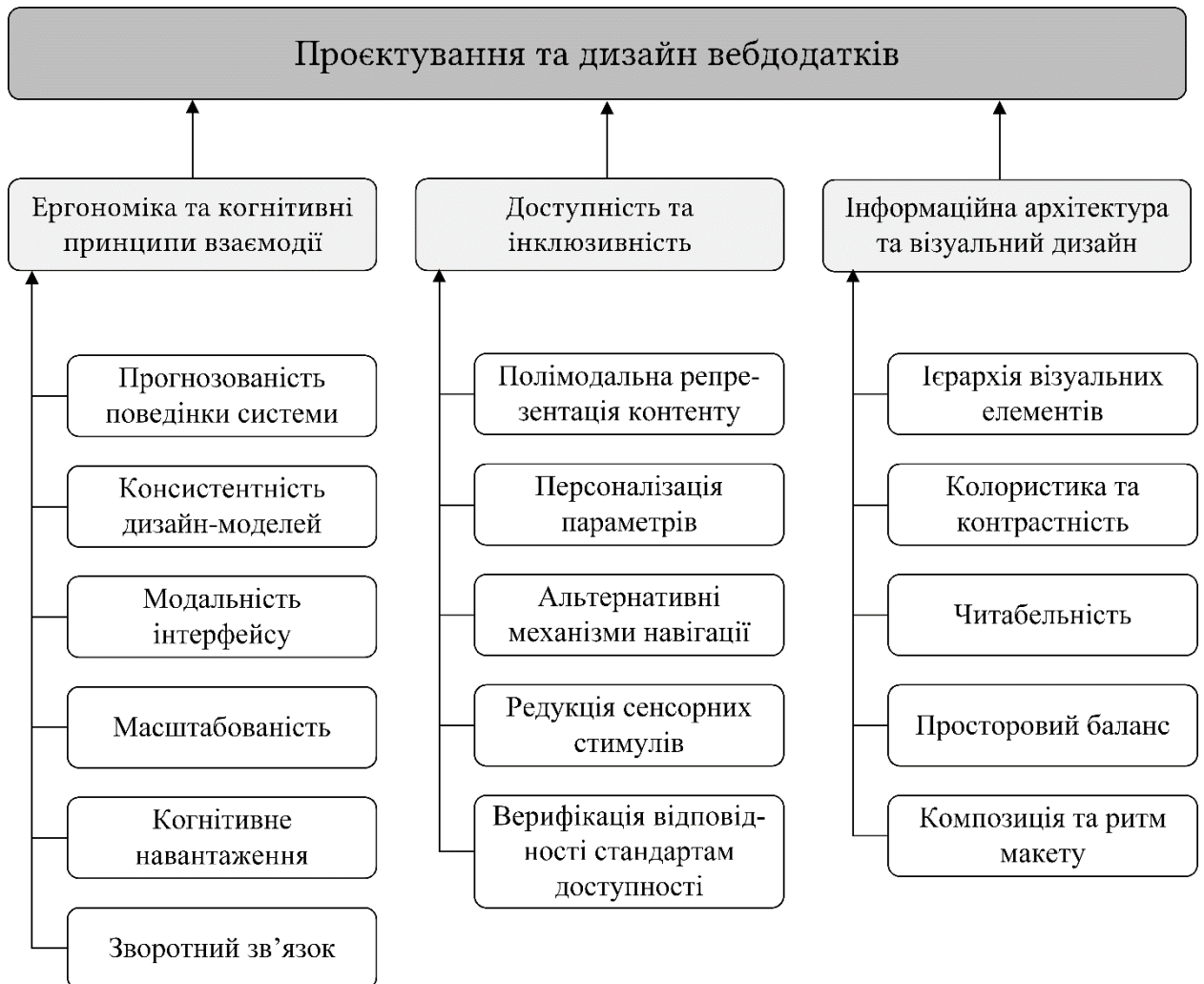


Рис. 2.2. Фактори проектування та дизайну вебдодатків

Внаслідок описаних дій, множина факторів впливу на ергономіку та когнітивні принципи взаємодії з інтерфейсами має вид: $E = \{E_1, E_2, E_3, E_4, E_5, E_6\}$. Ці фактори визначають зручність, передбачуваність та ефективність взаємодії користувача з інтерфейсами:

– прогнозованість поведінки системи (E_1) — відповідність реакцій інтерфейсу очікуванням користувача;

- консистентність дизайн-моделей (E_2) — єдність стилістичних та функціональних рішень у всіх елементах системи;
- модальність інтерфейсу (E_3) — контрольоване використання модальних вікон, діалогів та переходів між станами системи;
- масштабованість (E_4) — гнучкість дизайну для ефективної адаптації до змін контенту та функціональності;
- когнітивне навантаження (E_5) — рівень зусиль, необхідних для розуміння та використання інтерфейсу;
- зворотний зв'язок (E_6) — інформування користувача про результати його дій за допомогою візуальних, звукових та тактильних сигналів [100–102].

До множини факторів впливу на доступність та інклюзивність $D = \{D_1, D_2, D_3, D_4, D_5\}$ входять фактори, що забезпечують адаптацію інтерфейсу для користувачів із різними можливостями та потребами:

- полімодальна репрезентація контенту (D_1) — дублювання інформації у різних сенсорних форматах (текст, звук, тактильний зворотний зв'язок тощо);
- персоналізація параметрів (D_2) — можливість налаштування кольорів, розміру шрифту, швидкості анімацій тощо;
- альтернативні механізми навігації (D_3) — підтримка управління через клавіатуру, голосові команди, екранні зчитувачі;
- редукція сенсорних стимулів (D_4) — мінімізація миготіння, різких анімацій та аудіоефектів, що можуть викликати дискомфорт;
- верифікація відповідності стандартам доступності (D_5) — відповідність WCAG, ISO/IEC 29138-1:2018 та ін. [62, 86, 100, 102].

Опишемо також множину факторів впливу на інформаційну архітектуру та організацію контенту $I = \{I_1, I_2, I_3, I_4, I_5\}$, де:

- ієрархія візуальних елементів (I_1) — логічна організація компонентів інтерфейсу відповідно до їхньої значущості;
- колористика та контрастність (I_2) — відповідність колірної палітри принципам сприйняття та стандартам доступності;
- читабельність (I_3) — вибір шрифтів, міжрядкового інтервалу, довжини рядка для оптимальної читабельності;
- просторовий баланс (I_4) — використання білого простору для гармонійного розподілу контенту та зменшення когнітивного навантаження;
- композиція та ритм макету (I_5) — застосування сіток, модульних систем та пропорційних співвідношень для структурованого дизайну [100–103].

Ці фактори визначають структурування контенту, візуальний баланс та організацію елементів інтерфейсу.

2.2. Формалізоване представлення зв'язків між факторами засобами семантичних мереж

Для означення зв'язків між факторами проєктування та дизайну вебдодатків використано теорію семантичних мереж. Семантичні мережі є однією з найпоширеніших форм представлення знань у сфері штучного інтелекту та опрацювання природної мови, що базується на концептуалізації предметної області через вузли (поняття) та дуги (відношення між ними). Уперше ідея семантичних мереж запропонована як метод моделювання асоціативної пам'яті людини. У сучасному вигляді семантичні мережі значно модифіковані та вдосконалені і відіграють ключову роль у системах підтримки прийняття рішень [100, 103–105].

Основне призначення семантичної мережі полягає в репрезентації об'єктів реального світу у вигляді графа, де кожен вузол відповідає поняттю, а ребра між вузлами — семантичним зв'язкам із визначеними семантичними навантаженнями [100, 104].

Відповідно до виразу (2.11) вузли семантичної мережі (рис. 2.3) є факторами $E = \{E_1, E_2, \dots, E_6\}$, що з'єднані дугами, формуючи пари (E_i, E_j) з певним зв'язком $(i, j = 1 \div 6; i \neq j)$ [100].

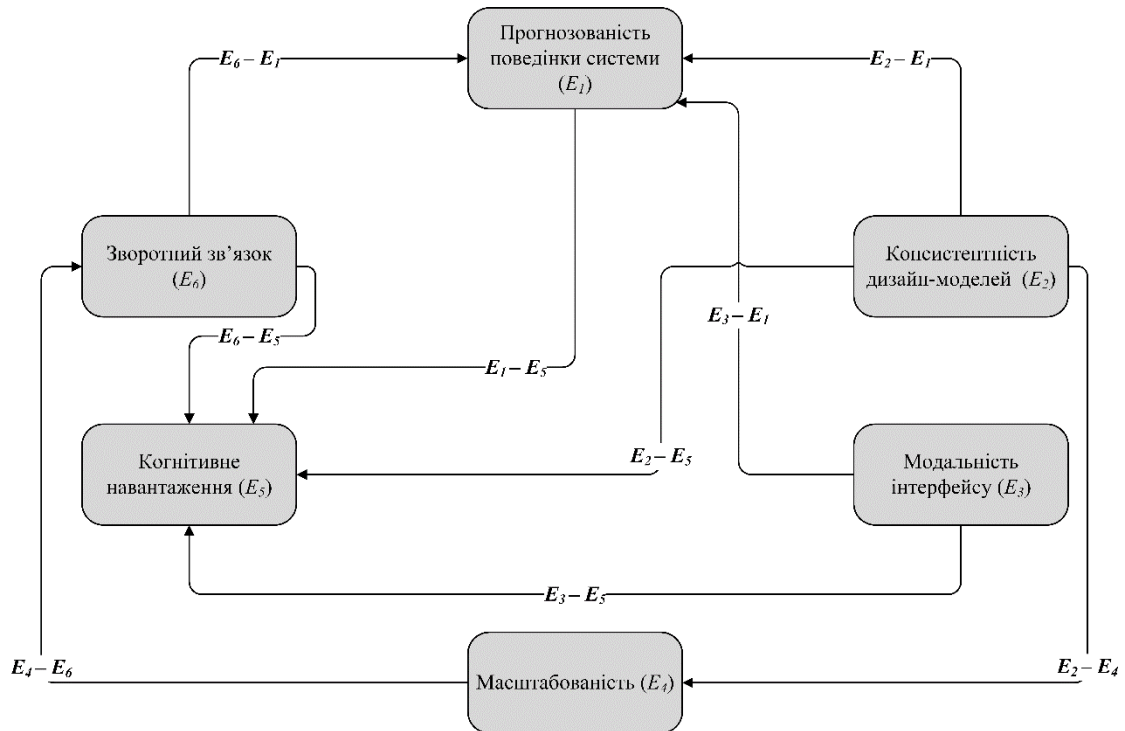


Рис. 2.3. Семантична модель зв'язків між факторами впливу на ергономіку та когнітивні принципи взаємодії з інтерфейсами вебдодатків

Представимо лінгвістичну суть зв'язків: $E_1 - E_5$ — оптимізує, $E_2 - E_1$ — визначає, $E_2 - E_4$ — впливає, $E_2 - E_5$ — оптимізує, $E_3 - E_1$ — модифікує, $E_3 - E_5$ — впливає, $E_4 - E_6$ — модифікує, $E_6 - E_1$ — оптимізує, $E_6 - E_5$ — оптимізує [100].

Опис семантичних мереж доцільно здійснити засобами логіки предикатів. Такий підхід дає змогу точно описувати відношення між поняттями, що формують структуру знань. Основою цього опису є використання логічних конструкцій, зокрема кванторів загальності $\forall$ та існування $\exists$, логічного «і» $\wedge$ та «якщо» $\leftarrow$. Кожен елемент семантичної мережі поданий у вигляді терма, який інтерпретується як фактор предметної області. Взаємозв'язки між цими термами задаються через предикати — логічні функції, які приймають один

або кілька термів як аргументи. Це уможливорює опис як простих, так і складних відношень між поняттями в межах однієї формальної системи [100, 104, 106].

Опис семантичної моделі, зображеної на рис. 2.3 має вид:

$(\forall E_i) [\exists (E_1, \text{прогнозованість поведінки системи}) \leftarrow \text{оптимізує } (E_1, E_5) \wedge \text{визначається } (E_1, E_2) \wedge \text{модифікується } (E_1, E_3) \wedge \text{оптимізується } (E_1, E_6)]; (\forall E_i) [\exists (E_2, \text{консистентність дизайн-моделей}) \leftarrow \text{визначає } (E_2, E_1) \wedge \text{впливає } (E_2, E_4) \wedge \text{оптимізує } (E_2, E_5)]; (\forall E_i) [\exists (E_3, \text{модальність інтерфейсу}) \leftarrow \text{модифікує } (E_3, E_1) \wedge \text{впливає } (E_3, E_5)]; (\forall E_i) [\exists (E_4, \text{масштабованість}) \leftarrow \text{модифікує } (E_4, E_6) \wedge \text{залежить від } (E_4, E_2)]; (\forall E_i) [\exists (E_5, \text{когнітивне навантаження}) \leftarrow \text{оптимізується } (E_5, E_1) \wedge \text{оптимізується } (E_5, E_2) \wedge \text{залежить від } (E_5, E_3) \wedge \text{оптимізується } (E_5, E_6)]; (\forall E_i) [\exists (E_6, \text{зворотний зв'язок}) \leftarrow \text{оптимізує } (E_6, E_1) \wedge \text{оптимізує } (E_6, E_5) \wedge \text{модифікується } (E_6, E_4)] [100].$

Наступною є семантична модель зв'язків між факторами впливу на доступність та інклюзивність вебдодатків (рис. 2.4), факторами якої є $D = \{D_1, D_2, \dots, D_5\}$ зі зв'язками (D_i, D_j) при $(i, j = 1 \div 5; i \neq j)$ [100].

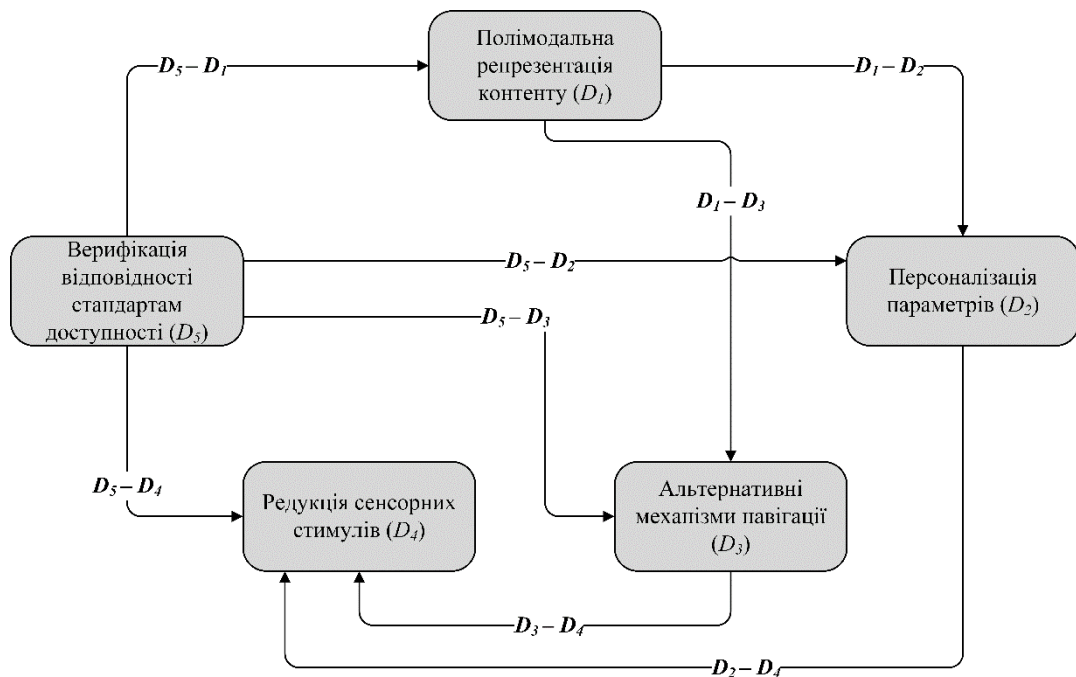


Рис. 2.4. Семантична модель зв'язків між факторами впливу на доступність та інклюзивність вебдодатків

Лінгвістична суть зв'язків є наступною: $D_1 - D_2$ — визначає, $D_1 - D_3$ — ініціює, $D_2 - D_4$ — оптимізує, $D_3 - D_4$ — підтримує, $D_5 - D_1$ — ініціює, $D_5 - D_2$ — визначає, $D_5 - D_3$ — ініціює, $D_5 - D_4$ — оптимізує [100].

Використовуючи елементи логіки предикатів, маємо таке формалізоване представлення зв'язків між факторами впливу на доступність та інклюзивність вебдодатків [100, 104, 105]:

$(\forall D_i) [\exists (D_1, \text{полімодальна репрезентація контенту}) \leftarrow \text{визначає } (D_1, D_2) \wedge \text{ініціює } (D_1, D_3) \wedge \text{ініціюється } (D_1, D_5)]; (\forall D_i) [\exists (D_2, \text{персоналізація параметрів}) \leftarrow \text{оптимізує } (D_2, D_4) \wedge \text{визначається } (D_2, D_1) \wedge \text{визначається } (D_2, D_5)]; (\forall D_i) [\exists (D_3, \text{альтернативні механізми навігації}) \leftarrow \text{підтримує } (D_3, D_4) \wedge \text{ініціюється } (D_3, D_1) \wedge \text{ініціюється } (D_3, D_5)]; (\forall D_i) [\exists (D_4, \text{редукція сенсорних стимулів}) \leftarrow \text{оптимізується } (D_4, D_2) \wedge \text{підтримується } (D_4, D_3) \wedge \text{оптимізується } (D_4, D_5)]; (\forall D_i) [\exists (D_5, \text{верифікація відповідності стандартам доступності}) \leftarrow \text{ініціює } (D_5, D_1) \wedge \text{визначає } (D_5, D_2) \wedge \text{ініціює } (D_5, D_3) \wedge \text{оптимізує } (D_5, D_4)]$ [100].

Семантична мережа з факторами $I = \{I_1, I_2, \dots, I_5\}$ та парами зв'язків (I_i, I_j) при $(i, j = 1 \div 5; i \neq j)$ представлена на рис. 2.5 [100].

Відповідно до рис. 2.5 опишемо суть зв'язків між факторами: $I_1 - I_3$ — визначає, $I_1 - I_4$ — підтримує, $I_2 - I_1$ — ініціює, $I_2 - I_3$ — визначає, $I_4 - I_3$ — оптимізує, $I_5 - I_1$ — ініціює, $I_5 - I_2$ — визначає, $I_5 - I_3$ — оптимізує, $I_5 - I_4$ — визначає [100].

Наведений опис обґрунтовано тим, що ієрархічна організація візуальних елементів визначає рівень читабельності та сприяє досягненню просторової збалансованості. Колористичні характеристики здатні змінювати ієрархію візуальних компонентів. Контраст впливає на ступінь сприйняття текстової та графічної інформації. Просторовий баланс знижує когнітивне навантаження, оптимізуючи візуальне сприйняття. Композиційна побудова ініціює форму-

вання ієрархічної структури об'єктів. Ритмічні та композиційні параметри визначають закономірності розташування колірних акцентів. Композиційно узгоджений макет забезпечує підвищену зручність читання, а просторовий баланс є похідною від композиційної організації елементів.

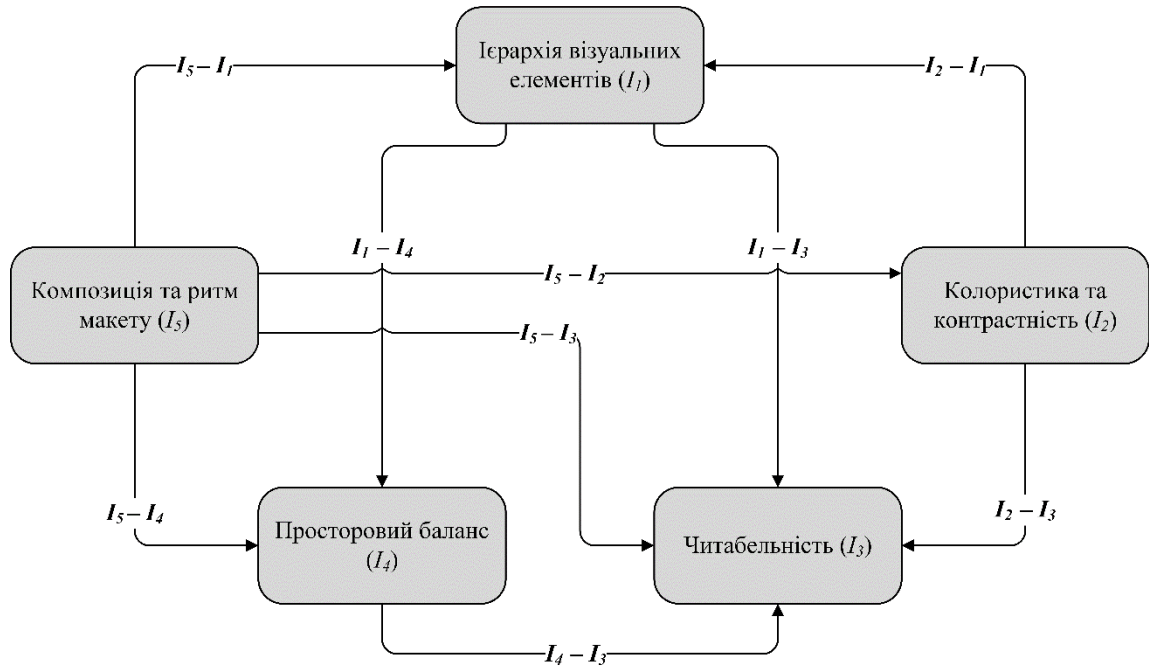


Рис. 2.5. Семантична модель зв'язків між факторами впливу на інформаційну архітектуру та візуальний дизайн вебдодатків

Тоді опис зв'язків між факторами має вид:

$(\forall I_i) [\exists (I_1, \text{ієрархія візуальних елементів}) \leftarrow \text{визначає } (I_1, I_3) \wedge \text{підтримує } (I_1, I_4) \wedge \text{ініціюється } (I_1, I_2) \wedge \text{ініціюється } (I_1, I_5)]; (\forall I_i) [\exists (I_2, \text{колористика та контрастність}) \leftarrow \text{ініціює } (I_2, I_1) \wedge \text{визначається } (I_2, I_3) \wedge \text{визначається } (I_2, I_5)]; (\forall I_i) [\exists (I_3, \text{читабельність}) \leftarrow \text{визначається } (I_3, I_1) \wedge \text{визначається } (I_3, I_2) \wedge \text{оптимізується } (I_3, I_4) \wedge \text{оптимізується } (I_3, I_5)]; (\forall I_i) [\exists (I_4, \text{просторовий баланс}) \leftarrow \text{оптимізує } (I_4, I_3) \wedge \text{підтримується } (I_4, I_1) \wedge \text{визначається } (I_4, I_5)]; (\forall I_i) [\exists (I_5, \text{композиція та ритм макету}) \leftarrow \text{ініціює } (I_5, I_1) \wedge \text{визначає } (I_5, I_2) \wedge \text{оптимізує } (I_5, I_3) \wedge \text{визначає } (I_5, I_4)] [100].$

2.3. Синтез моделей пріоритетності факторів за методом математичного моделювання ієрархій

Для встановлення ієрархії факторів за ступенем важливості використано метод математичного моделювання ієрархій. Першим етапом є побудова бінарної матриці досяжності, яка відображає логічну структуру взаємозв'язків між елементами множини. Таку матрицю можна розглядати як абстрактну модель логіки впливів факторів у межах семантичної мережі. Вона подається у вигляді таблиці, елементи якої визначаються за правилом [104, 105, 107, 108]:

$$X_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{якщо з вершини } i \text{ можна потрапити у вершину } j; \\ 0 & \text{в іншому випадку.} \end{cases} \quad (2.12)$$

Зрозуміло, що по діагоналі матриці будуть одиниці.

Вершини X_j ($j = 1, 2, \dots, n$) вважаються досяжними для вершин X_i ($i = 1, 2, \dots, n$), якщо існує хоча б одна послідовність переходів, що веде від X_i до X_j . Такий шлях є причинно-наслідковим. Отримані зв'язки формалізують на рівні логічного аналізу, що дозволяє виявити приховану структуру підпорядкованостей. Формується логічна база для обґрунтування висновків щодо пріоритетності факторів. Якщо вершина X_j логічно впливає з вершини X_i , її можна вважати підпорядкованою. У результаті для кожного елемента системи будується множина підпорядкованих і залежних елементів. Це дозволяє кількісно оцінити рівень впливу через перетин відповідних множин [104, 108, 109]:

$$L(X_i) = T(X_i) \cap K(X_i), \quad (2.13)$$

де $T(X_i)$ — множина тих вершин, які не є досяжними з x_i , а $K(X_i)$ — множина вершин, до яких існує шлях від X_i . Таким чином, $L(X_i)$ виражає ступінь автономності даного елемента в межах множини X , що дозволяє формалізувати поняття пріоритетності на основі логіки впорядкованості.

На підставі отриманого значення будується оцінка впливовості кожного фактора. Також повинне забезпечуватися таке співвідношення [105, 107, 109]:

$$K(X_i) = L(X_i). \quad (2.14)$$

На основі матриці досяжності та виразів (2.13) та (2.14) розробляються ітераційні таблиці, кожна з яких складається з чотирьох стовпців. У першому стовпці зазначається порядковий номер фактора досліджуваного процесу. Другий стовпець таблиці формується на основі множини $T(X_i)$, яка містить індекси вершин, до яких існує досяжність із вершини X_i . Він відповідає значенням рядків матриці. Третій стовпець $K(X_i)$ відображає множину вершин, які здійснюють прямий вплив на вершину X_i — значення у стовпцях матриці. Залежність, подана у виразі (2.14), інтерпретується як умова балансу: вона виконується тоді, коли множини значень у другому та третьому стовпцях збігаються. Саме цей збіг і фіксує рівень факторів у структурі, що візуалізується у вигляді графічної моделі [104, 105, 108, 109].

Проведено математичне моделювання ієрархій для факторів впливу на ергономіку та когнітивні принципи взаємодії з інтерфейсами вебдодатків. Побудовано матрицю досяжності (табл. 2.5) на основі семантичної мережі (рис. 2.3).

Таблиця 2.5

Матриця досяжності факторів впливу
на ергономіку та когнітивні принципи взаємодії з інтерфейсами

	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6
E_1	1	0	0	0	1	0
E_2	1	1	0	1	1	0
E_3	1	0	1	0	1	0
E_4	0	0	0	1	0	1
E_5	0	0	0	0	1	0
E_6	1	0	0	0	1	1

Відповідно до наведених правил та тверджень сформовано першу ітераційну таблицю (табл. 2.6) для визначення домінантності факторів [104, 109].

Таблиця 2.6

Визначення першого рівня вагомості факторів

i	$T(E_i)$	$K(E_i)$	$T(E_i) \cap K(E_i)$
1	1, 5	1, 2, 3, 6	1
2	1, 2, 4, 5	2	2
3	1, 3, 5	3	3
4	4, 6	2, 4	4
5	5	1, 2, 3, 5, 6	5
6	1, 5, 6	4, 6	6

Внаслідок аналізу даних, представлених у таблиці 2.6, бачимо наявність збігу у третьому та четвертому стовпцях для факторів E_2 та E_3 . Відповідно до співвідношення (2.14) та принципів, покладених в основу обраної методики ієрархічного моделювання, зазначені фактори є найбільш значущими щодо впливу на ергономіку та когнітивні принципи взаємодії з інтерфейсами [109].

Далі здійснюється виключення рядків з факторами із встановленою пріоритетністю [104, 107, 109]. Разом з цим, у другому та третьому стовпцях видаляються всі елементи з номерами 2 та 3. Така модифікація структури таблиці забезпечує підґрунтя для реалізації наступного ітераційного кроку (табл. 2.7) [109].

Таблиця 2.7

Визначення другого рівня вагомості факторів

i	$T(E_i)$	$K(E_i)$	$T(E_i) \cap K(E_i)$
1	1, 5	1, 6	1
4	4, 6	4	4
5	5	1, 5, 6	5
6	1, 5, 6	4, 6	6

У таблиці 2.7 ідентифіковано фактор, що формує другий рівень ієрархії — E_4 , який відповідає масштабованості вебдодатків. Аналогічно до попередньої ітерації, з таблиці вилучається рядок, що відповідає цьому номеру, а також усі згадки про ці значення в другому та третьому стовпцях. У результаті формується наступна таблиця (табл. 2.8) [109].

Таблиця 2.8

Визначення третього рівня вагомості факторів

i	$T(E_i)$	$K(E_i)$	$T(E_i) \cap K(E_i)$
1	1, 5	1, 6	1
5	5	1, 5, 6	5
6	1, 5, 6	6	6

Третім за пріоритетністю є фактор E_6 (зворотній зв'язок). Ітерація продовжується та формується таблиця 2.9.

Таблиця 2.9

Визначення четвертого та п'ятого рівнів вагомості факторів

i	$T(E_i)$	$K(E_i)$	$T(E_i) \cap K(E_i)$
1	1, 5	1	1
5	5	1, 5	5

Четвертий рівень належить фактору E_1 (прогнозованість поведінки системи), а п'ятий — фактору E_5 (когнітивне навантаження).

На основі даних, одержаних за методом математичного моделювання ієрархій [104, 105, 107], розроблено модель вагомості факторів (рис. 2.6).



Рис. 2.6. Модель вагомості факторів

ергономіки та когнітивних принципів взаємодії
на основі математичного моделювання ієрархій

Аналогічно, досліджено пріоритетність факторів доступності та інклюзивності вебдодатків на основі семантичної мережі [104, 109], представленої на рис. 2.4. Подано матрицю досяжності за допомогою таблиці 2.10.

Таблиця 2.10

Матриця досяжності факторів впливу на доступність та інклюзивність

	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5
D_1	1	1	1	0	0
D_2	0	1	0	1	0
D_3	0	0	1	1	0
D_4	0	0	0	1	0
D_5	1	1	1	1	1

Дані для визначення першого рівня пріоритетності наведені у таблиці 2.11.

Таблиця 2.11

Визначення першого рівня вагомості факторів

i	$T(D_i)$	$K(D_i)$	$T(D_i) \cap K(D_i)$
1	1, 2, 3	1, 5	1
2	2, 4	1, 2, 5	2
3	3, 4	1, 3, 5	3
4	4	2, 3, 4, 5	4
5	1, 2, 3, 4, 5	5	5

Згідно з таблицею 2.11 дані у третьому та четвертому стовпцях збігаються для фактора D_5 (верифікація відповідності стандартам доступності), отже він є найвагомішим серед факторів досліджуваної множини, що є логічним з технологічної точки зору. Ітерація продовжується (табл. 2.12), виключаючи інформацію про даний фактор.

Таблиця 2.12

Визначення другого рівня вагомості факторів

i	$T(D_i)$	$K(D_i)$	$T(D_i) \cap K(D_i)$
1	1, 2, 3	1	1
2	2, 4	1, 2	2
3	3, 4	1, 3	3
4	4	2, 3, 4	4

На другому місці знаходиться фактор D_1 , тобто полімодальна репрезентація контенту, яка дозволяє адаптувати подання інформації до різних сенсорних можливостей користувачів. Використання множинних каналів сприйняття (зорового, слухового, текстового або тактильного) дає змогу мінімізувати бар'єри для осіб з функціональними обмеженнями. Наступний крок представлений у табл. 2.13.

Таблиця 2.13

Визначення третього та четвертого рівнів вагомості факторів

i	$T(D_i)$	$K(D_i)$	$T(D_i) \cap K(D_i)$
2	2, 4	2	2
3	3, 4	3	3
4	4	2, 3, 4	4

На третьому рівні з однаковим пріоритетом знаходяться два фактори — D_2 (персоналізація параметрів) та (альтернативні механізми навігації). Включивши загадані фактори, очевидно, що четвертий рівень належить D_4 (редукція сенсорних стимулів). Фактор D_4 посів останній рівень пріоритетності внаслідок мінімальної ступені зв'язності з іншими елементами семантичної мережі. З практичної точки зору редукція сенсорних стимулів впливає здебільшого на декоративні й когнітивні аспекти сприйняття видання, тоді як більш високі рівні ієрархії мають суттєвіший причинно-наслідковий ефект.

Розроблена модель вагомості факторів представлена на рис. 2.7.

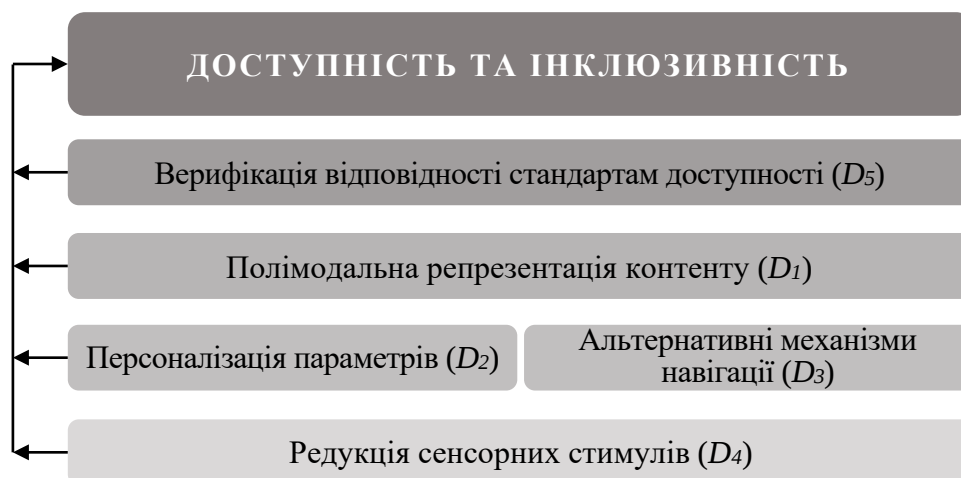


Рис. 2.7. Модель вагомості факторів
доступності та інклюзивності вебдодатків
на основі математичного моделювання ієрархій

Таблиця 2.14

Матриця досяжності факторів впливу
на інформаційну архітектуру та візуальний дизайн

	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5
I_1	1	0	1	1	0
I_2	1	1	1	0	0
I_3	0	0	1	0	0
I_4	0	0	1	1	0
I_5	1	1	1	1	1

Для визначення вагомості факторів впливу на інформаційну архітектуру та візуальний дизайн записано дані з рядків матриці у другий стовпець ітераційної таблиці (табл. 2.15), а дані з стовпців матриці — у третій стовпець [104, 107, 109].

Таблиця 2.15

Визначення першого рівня вагомості факторів

i	$T(I_i)$	$K(I_i)$	$T(I_i) \cap K(I_i)$
1	1, 3, 4	1, 2, 5	1
2	1, 2, 3	2, 5	2
3	3	1, 2, 3, 4, 5	3
4	3, 4	1, 4, 5	4
5	1, 2, 3, 4, 5	5	5

Визначено, що домінантним фактором є I_5 , тобто композиція та ритм макету. Композиція визначає розподіл візуальних елементів і встановлює принципи групування, контрасту та вирівнювання, що прямо впливає на сприйняття структури інформації та її логічної організації. Ритмічні повтори та варіювання форм, відстаней і пропорцій створюють упорядковані патерни, які зменшують когнітивне навантаження та полегшують навігацію, оскільки мозок автоматично розпізнає впізнавані візуальні шаблони. Взаємодія композиції з ритмом забезпечує основу дизайну. Саме завдяки цим двом факторам досягається оптимальний баланс між функціональністю, читабельністю та емоційним відгуком, що робить їх ключовими в процесі проектування будь-якого макету.

Наступний етап визначення пріоритетності факторів представлено у таблиці 2.16.

Таблиця 2.16

Визначення другого рівня вагомості факторів

i	$T(I_i)$	$K(I_i)$	$T(I_i) \cap K(I_i)$
1	1, 3, 4	1, 2	1
2	1, 2, 3	2	2
3	3	1, 2, 3, 4	3
4	3, 4	1, 4	4

Другий за вагомістю впливу на інформаційну архітектуру та дизайн вебдодатків є фактор I_2 (колористика та контрастність). Високий пріоритет обумовлений тим, що правильне сполучення тональних співвідношень забезпечує виразне розмежування інформаційних модулів, що прискорює їхню ідентифікацію та обробку. Ітерація продовжується для визначення вагомості інших факторів (табл. 2.17).

Таблиця 2.17

Визначення третього рівня вагомості факторів

i	$T(I_i)$	$K(I_i)$	$T(I_i) \cap K(I_i)$
1	1, 3, 4	1	1
3	3	1, 3, 4	3
4	3, 4	1, 4	4

На третьому рівні знаходиться фактор I_1 (ієрархія візуальних елементів). Наступна ітерація наведена у табл. 2.18.

Таблиця 2.18

Визначення четвертого та п'ятого рівнів вагомості факторів

i	$T(I_i)$	$K(I_i)$	$T(I_i) \cap K(I_i)$
3	3	3, 4	3
4	3, 4	4	4

Згідно з табл. 2.18 на четверте місце належить фактору I_4 (просторовий баланс), а п'яте — I_3 (читабельність). Читабельність посідає нижчий щабель ієрархії саме тому, що виникає як наслідок вже сформованої інформаційної архітектури та візуальної структури вебдодатків. Лише після того, як основні блоки розміщено, кольорові акценти розставлено, а візуальні зв'язки між компонентами налагоджено, виникає необхідність оптимізувати шрифти та відступи для покращення читабельності.

Візуалізацію рівнів пріоритетності факторів інформаційної архітектури та візуального дизайну представлено на рис. 2.8.

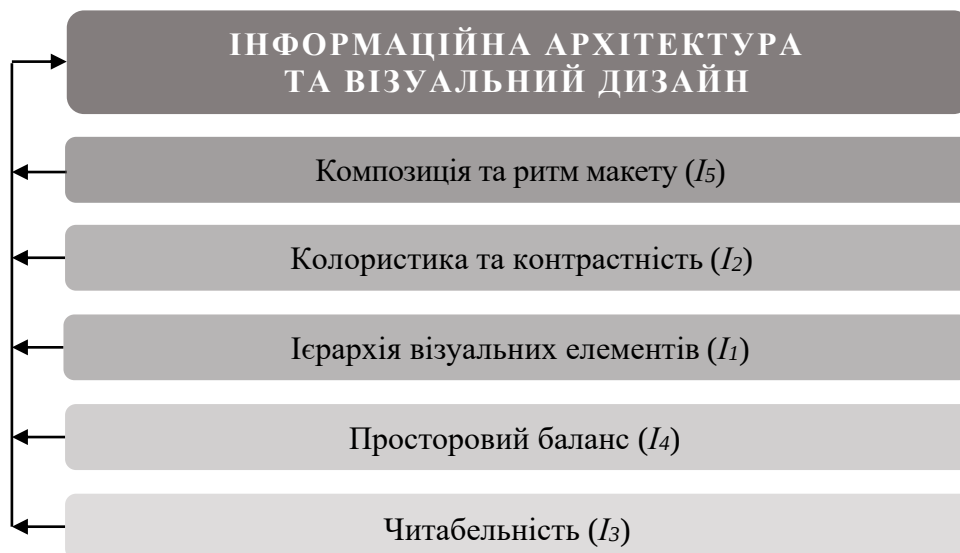


Рис. 2.8. Модель вагомості факторів доступності

та інклюзивності вебдодатків на основі математичного моделювання ієрархій

Таким чином, розроблені моделі факторів проєктування та дизайну вебдодатків відображають вагомість впливу факторів на виокремлені складові [109]. Однак, для деяких факторів одержана однакова пріоритетність, що потребує уточнення.

2.4. Моделі факторів якості проєктування та дизайну вебдодатків за методом ранжування

Метод ранжування факторів дозволяє здійснити впорядкування факторів на основі їх значень у структурі причинно-наслідкових зв'язків. Методологічною основою є побудова ієрархічних моделей, які репрезентують взаємозалежності між множинами факторів, що впливають на досліджуваний процес. Це дозволяє визначити ваги зв'язків та уточнити чи підтвердити результати, одержані за допомогою методу математичного моделювання ієрархій [110–112].

Зв'язки між елементами класифікуються на впливи та залежності, які, у свою чергу, можуть мати як прямий, так і опосередкований характер. Диференціація типів зв'язків дозволяє точніше описати специфіку взаємодії факторів та уникнути редукціоністських припущень про лінійність або незалежність компонентів

моделі [104, 110]. Така класифікація є основою при побудові деревовидної структури, що імітує реальні умови проектування та дизайну вебдодатків, зокрема щодо формування якості кінцевої продукції.

Якість проектування та дизайну вебдодатків, як зазначалося у попередніх розділах, містить значну кількість факторів $G = \{g_1, g_2, \dots, g_n\}$ та формується на основі трьох складових $G = \{E; D; I\}$. Фактори конкретної складової умовно позначено як $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ [100]. Під якісним результатом розуміємо функцію, яка формалізує сукупний внесок множини впливаючих факторів у покращення якості досліджуваного процесу. Нехай цей результат позначено як $F(x_m)$, де m відповідає конкретному процесу. Тоді справедливим є вираз, що відображає функцію якості цієї складової [112]:

$$F(x_m) = \bigcup_{j=1}^n \omega(x_{jm}), \quad (m = 1, 2, 3), \quad (2.12)$$

де: $F(x_m)$ — інтегральна функція якості технологічного процесу з індексом m ; $\omega(x_{jm})$ — коефіцієнт, що характеризує додаткову якість, яку забезпечує фактор j у межах процесу m ; n — загальна кількість факторів, що є релевантними до даного процесу.

Таким чином, твердження щодо існування множини факторів, що впливають на якість технологічного процесу можна представити у формалізованому вигляді [104, 112]:

$$(\exists g)(\forall x)C(x_m); \quad g \in G; \quad x \in X. \quad (2.13)$$

У межах багатфакторного аналізу технологічного процесу визначення ступеня важливості кожного з факторів здійснюється через його ранг, який формально відповідає значенню вагового коефіцієнта. Ранг виконує роль числового маркера, що дозволяє впорядкувати множину факторів за рівнем впливу на цільову функцію [110, 111].

Нехай задано множину вагових коефіцієнтів $W = \{w_{1_m}, w_{2_m}, \dots, w_{n_m}\}$ за умови $G(w) = \max\{w_{1_m}, w_{2_m}, \dots, w_{n_m}\}$, тоді [104, 105]:

$$(\exists g)(\forall w)G(w); g \in G; w \in W. \quad (2.14)$$

Слід зазначити, що існує щонайменше один фактор, що домінує за значенням ваги. Фактор із максимальною вагою розглядається як пріоритетний та має вирішальний вплив. Абсолютна еквівалентність факторів є малоюмовірною, оскільки кожен з них характеризується індивідуальною інтенсивністю впливу, що зумовлена структурною роллю та взаємодією з іншими факторами [110].

Побудова графових моделей ґрунтується на наявності причинно-наслідкових або функціональних зв'язків між факторами досліджуваного процесу. Виявлення таких зв'язків на початковому етапі здійснюється з використанням експертного оцінювання, яке дає змогу сформувати первинну графову структуру, що відображає ієрархію впливу окремих факторів. Визначення початкових рангів відбувається шляхом фіксації переважаючих зв'язків між вузлами графа, що репрезентують відповідні фактори. У такий спосіб утворюється багаторівнева модель, в межах якої встановлюються пріоритети на основі інтенсивності домінування одного фактора над іншим [104, 105].

Якщо виконується умова $B(w) = w_j > w_{j+1}$ для $(j = 1, 2, \dots, n-1)$, тоді можна сформувати такий запис [104, 112]:

$$(\forall w)B(w); w \in W. \quad (2.15)$$

З огляду на сказане, для формування моделі пріоритетного впливу факторів на якість технологічного процесу доцільно застосовувати методологію структурного аналізу із використанням графових представлень. Такий підхід вимагає попередньої ідентифікації множини релевантних факторів і визначення характеру взаємозв'язків між ними. Первинна інформаційна структуру створюється на основі експертного оцінювання, де зв'язки між елементами системи репрезентують ієрархічну організацію впливів [105, 105].

Кількісне ранжування впливів потребує введення формальних параметрів, зокрема вагових коефіцієнтів, які відображають значущість того чи іншого типу зв'язку. Для формалізації прямого та опосередкованого впливу між факторами впроваджується система індексації, що дозволяє класифікувати залежності за порядком. Вважатимемо, що h_{ij} — число зв'язків i -го виду для j -го фактора при $j = 1, \dots, n$, тоді w_i буде ваговим значенням зв'язку i -го виду. Тобто кожному типу взаємодії відповідає певний індекс: для прямих впливів $i = 1$, для непрямих впливів $i = 2$, для прямих залежностей $i = 3$, для непрямих залежностей $i = 4$. Порядок залежності корелює з віддаленістю впливу у графовій структурі: перший порядок означає безпосередній вплив, другий — через проміжний фактор. Це відповідає логіці системного аналізу, де сила взаємодії знижується з віддаленням по графу [104, 105, 112].

Логічно припустити, що для впливів вагові значення будуть додатними, а для усіх залежностей від'ємними. При цьому, опосередковані зв'язки мають меншу вагу ніж прямі. Тоді справедливим буде запис: $w_1 > 0$, $w_2 = w_1 / 2$, $w_3 < 0$, $w_4 = w_3 / 2$. Використовуватимемо такі вагові коефіцієнти: $w_1 = 10$, $w_2 = 5$, $w_3 = -10$, $w_4 = -5$ [104, 105]. Ранги факторів X_{ij} розраховується як зважена сума всіх типів впливів, нормалізована за відповідними коефіцієнтами [104, 112]:

$$X_{ij} = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^n h_{ij} w_i, \quad (2.16)$$

де n — порядковий номер фактора.

Зважаючи на те, що $w_3 < 0$ і $w_4 < 0$ одержано $R_{3j} < 0$ і $R_{4j} < 0$.

Щоб здійснити коректну побудову моделі на основі вагових характеристик, необхідно нормалізувати відповідні значення до уніфікованої координатної системи. Це забезпечує усунення зсувів, викликаних нерівномірністю впливів різних типів зв'язків. У межах графічної інтерпретації це відповідає процедурі вертикального зсуву гістограми, що відображає сукупність взаємодій. Зсув реалізується введенням компенсаційної складової, яка враховує

граничні значення матриць прямих та зворотних впливів. Розрахунок здійснюється за співвідношенням [104, 105, 112]:

$$\Delta_j = \max|X_{3j}| + \max|X_{4j}|, (j = 1, 2, \dots, n). \quad (2.17)$$

Подальші обчислення здійснюються за допомогою агрегованого показника, який поєднує коефіцієнти впливу, вагові значення і відповідні поправки [105, 112]:

$$X_{Fj} = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^n (h_{ij} w_i + \Delta_j). \quad (2.18)$$

Формула (2.18) забезпечує узагальнення кількісних параметрів і створює аналітичну основу для уточнення моделі пріоритетності факторів [105].

Сформовано ієрархічні моделі прямих та непрямих впливів факторів [104, 105] ергономіки та когнітивних принципів взаємодії вебдодатків (рис. 2.9).

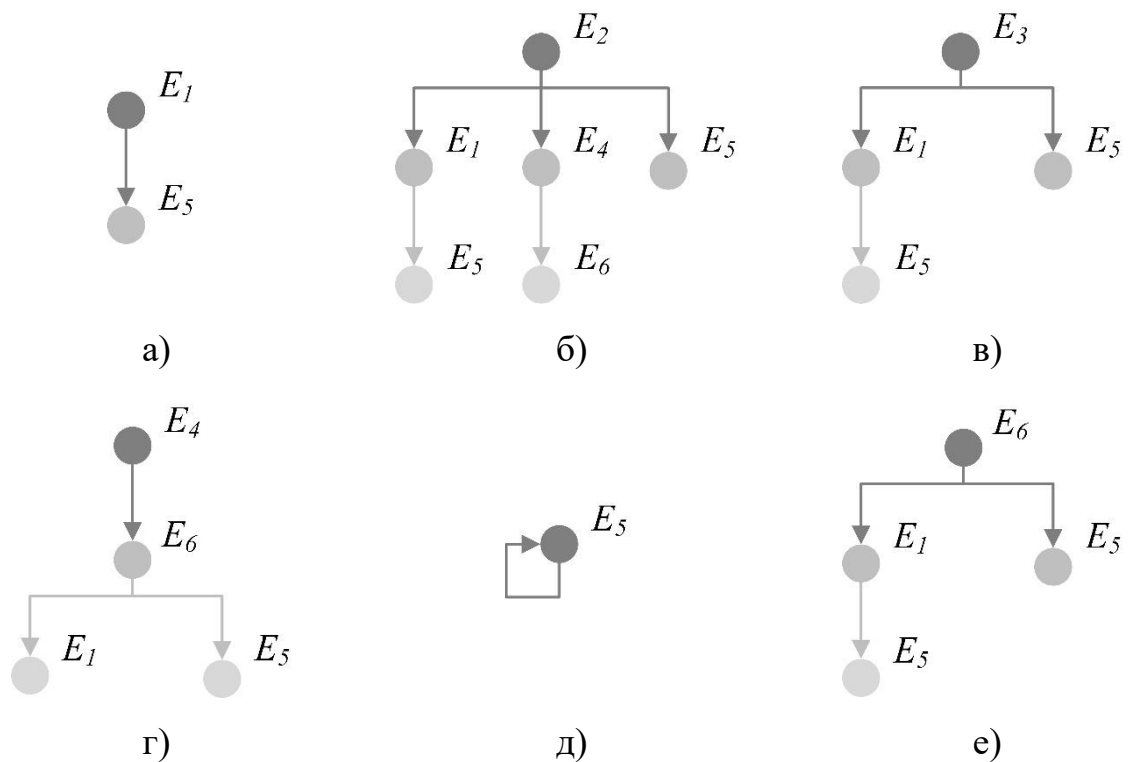


Рис. 2.9. Ієрархічні моделі впливів факторів ергономіки та когнітивних принципів взаємодії:

- а) — прогнозованість поведінки системи; б) — консистентність дизайн-моделей; в) — модальність інтерфейсу; г) — масштабованість; д) — когнітивне навантаження; е) — зворотний зв'язок

Аналогічно представлено моделі залежностей [104, 105] між факторами (рис. 2.10).

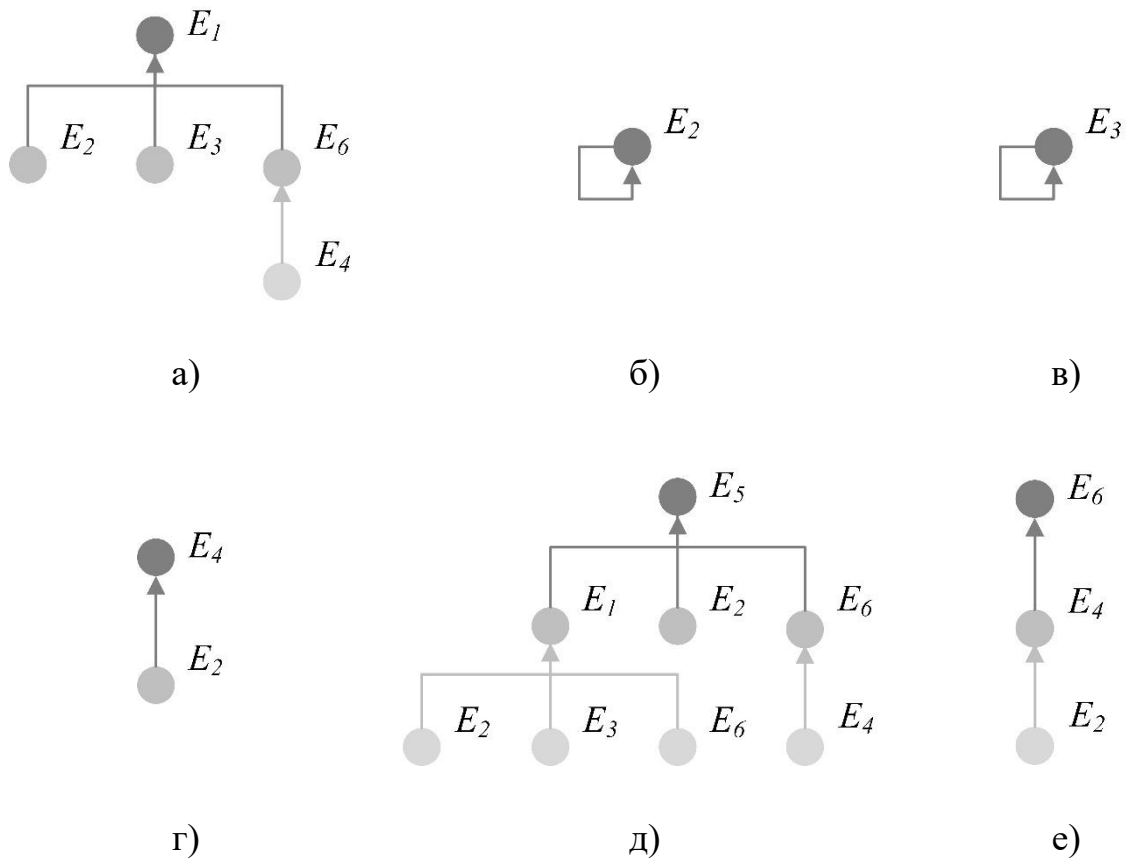


Рис. 2.10. Ієрархічні моделі залежностей факторів ергономіки та когнітивних принципів взаємодії:

а) —прогнозованість поведінки системи; б) — консистентність дизайн-моделей; в) — модальність інтерфейсу; г) — масштабованість; д) — когнітивне навантаження; е) — зворотний зв'язок

Отримані результати щодо рангів та пріоритетів факторів ергономіки та когнітивних принципів взаємодії представлено в табличному вигляді (табл. 2.5.)

Таблиця 2.5

Ранги факторів ергономіки та когнітивних принципів взаємодії

j	h_{1j}	h_{2j}	h_{3j}	h_{4j}	E_{1j}	E_{2j}	E_{3j}	E_{4j}	E_{Fj}	Ранг фактора	Рівень пріоритетності
1	1	1	3	1	10	5	-30	-5	30	2	4
2	3	2	0	0	30	10	0	0	90	5	1
3	2	1	0	0	20	5	0	0	75	4	2
4	1	2	1	0	10	10	-10	0	60	3	3
5	0	0	3	4	0	0	-30	-20	0	1	5
6	2	1	1	1	20	5	-10	-5	60	3	3

Враховуючи дані, наведені у табл. 2.5, уточнено модель вагомості факторів ергономіки та когнітивних принципів взаємодії вебдодатків (рис. 2.11). Внаслідок ранжування визначено ваги факторів аналізованої множини та деталізовано пріоритетність факторів E_2 (консистентність дизайн-моделей) та E_3 (модальність інтерфейсу), які мали однакову вагу у моделі наведених на рис. 2.6.



Рис. 2.11. Модель вагомості факторів ергономіки та когнітивних принципів взаємодії вебдодатків

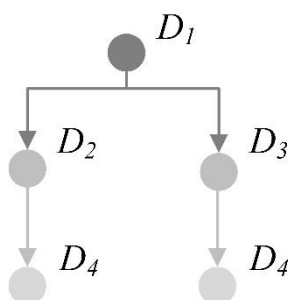
Однак, внаслідок ранжування одержана однакова вагомість для факторів E_4 (масштабованість) та E_6 (зворотний зв'язок). Тому, щодо цих факторів доцільно взяти до уваги результати математичного моделювання ієрархій, де

вони мали різний пріоритет. На основі моделі вагомості факторів (рис. 2.6), одержаної за методом моделювання ієрархій, та моделі вагомості факторів (рис. 2.11), одержаної за методом ранжування, сформовано уточнену модель вагомості факторів (рис. 2.12). Зважаючи на сказане та для зручності інтерпретації результатів, збільшено вагу фактора E_4 (масштабованість) на 5 у. о.

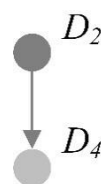


Рис. 2.12. Уточнена модель вагомості факторів ергономіки та когнітивних принципів взаємодії вебдодатків

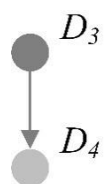
Розроблено ієрархічні моделі прямих (рис. 2.13) та зворотних впливів (рис. 2.14) [104, 105] щодо факторів доступності та інклюзивності вебдодатків.



а)



б)



в)

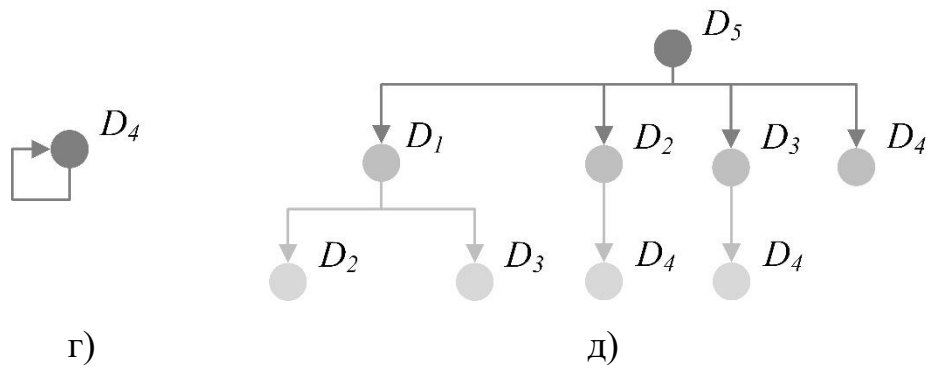


Рис. 2.13. Ієрархічні моделі впливів факторів
доступності та інклюзивності вебдодатків:

- а) — полімодальна репрезентація контенту; б) — персоналізація параметрів;
в) — альтернативні механізми навігації; г) — редукція сенсорних стимулів;
д) — верифікація відповідності стандартам доступності

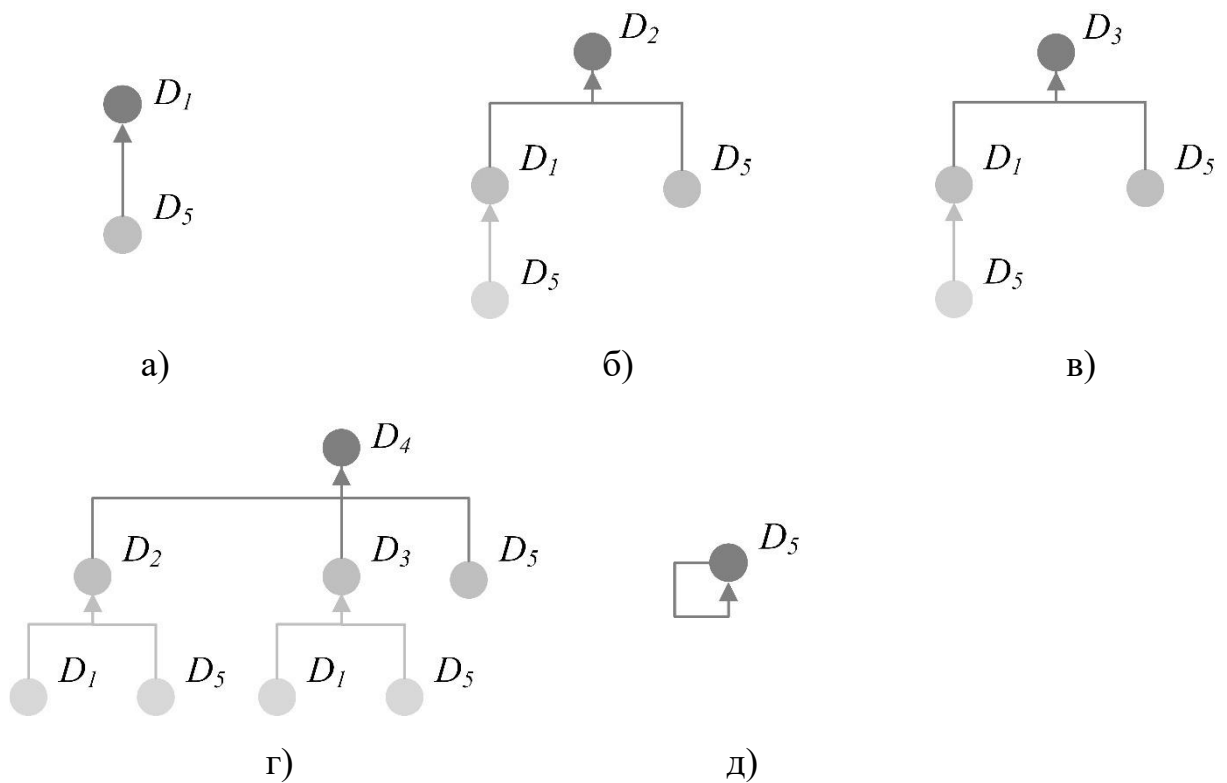


Рис. 2.14. Ієрархічні моделі залежностей факторів
доступності та інклюзивності вебдодатків:

- а) — полімодальна репрезентація контенту; б) — персоналізація параметрів;
в) — альтернативні механізми навігації; г) — редукція сенсорних стимулів;
д) — верифікація відповідності стандартам доступності

Результати обчислень щодо факторів доступності та інклюзивності веб-додатків, ранги факторів та рівні пріоритетності представлені у таблиці 2.6.

Таблиця 2.6

Ранги факторів доступності та інклюзивності вебдодатків

j	h_{1j}	h_{2j}	h_{3j}	h_{4j}	D_{1j}	D_{2j}	D_{3j}	D_{4j}	D_{Fj}	Ранг фактора	Рівень пріоритетності
1	2	2	1	0	20	10	-10	0	70	3	2
2	1	0	2	1	10	0	-20	-5	35	2	3
3	1	0	2	1	10	0	-20	-5	35	2	3
4	0	0	3	4	0	0	-30	-20	0	1	4
5	4	4	0	0	40	20	0	0	110	4	1

Значення рангів факторів підтвердили пріоритети одержані шляхом моделювання ієрархій. При цьому, визначено такі ваги: D_1 (полімодальна репрезентація контенту) — 70 у. о., D_2 (персоналізація параметрів) — 35 у. о., D_3 (альтернативні механізми навігації) — 35 у. о., D_4 (редукція сенсорних стимулів) — 0 у. о., D_5 (верифікація відповідності стандартам доступності) — 110 у. о. Модель, що відображає ваги факторів, наведена на рис. 2.15.



Рис. 2.15. Модель вагомості факторів доступності та інклюзивності вебдодатків

Ієрархічні моделі факторів впливу на інформаційну архітектуру та візуальний дизайн вебдодатків представлені на рис. 2.16.

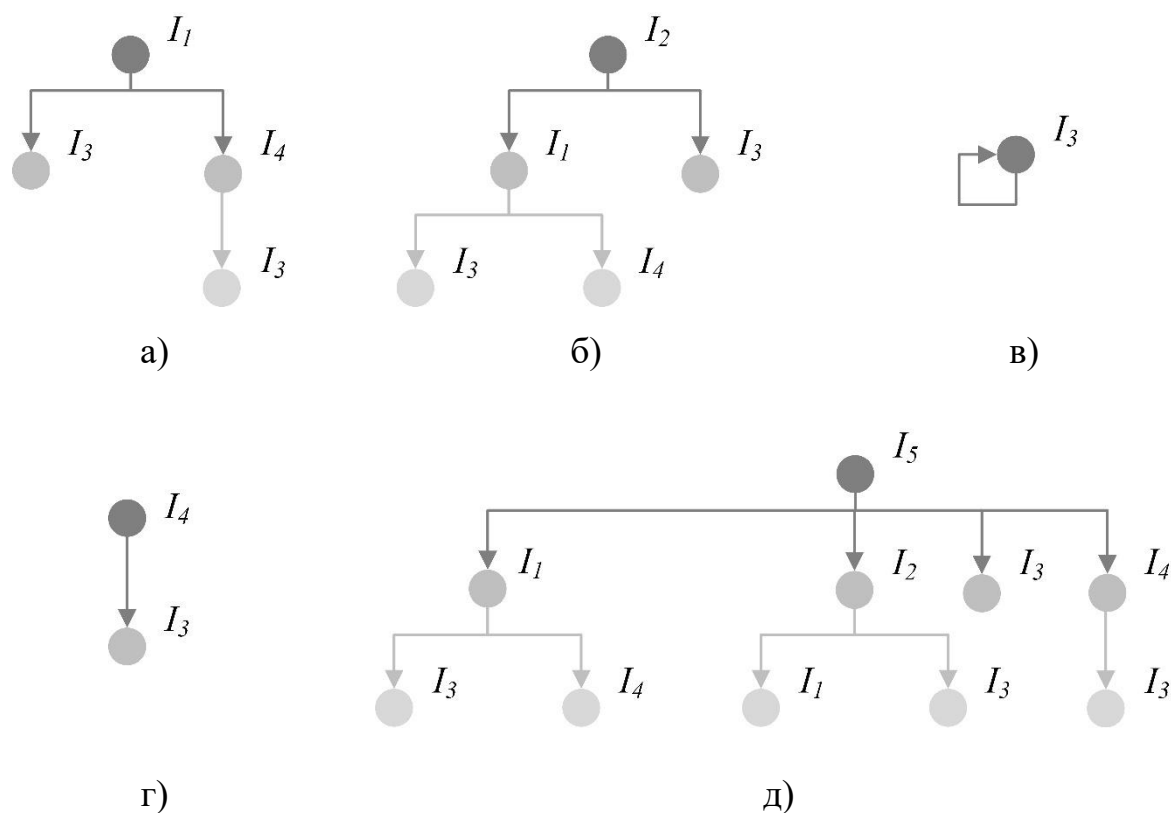
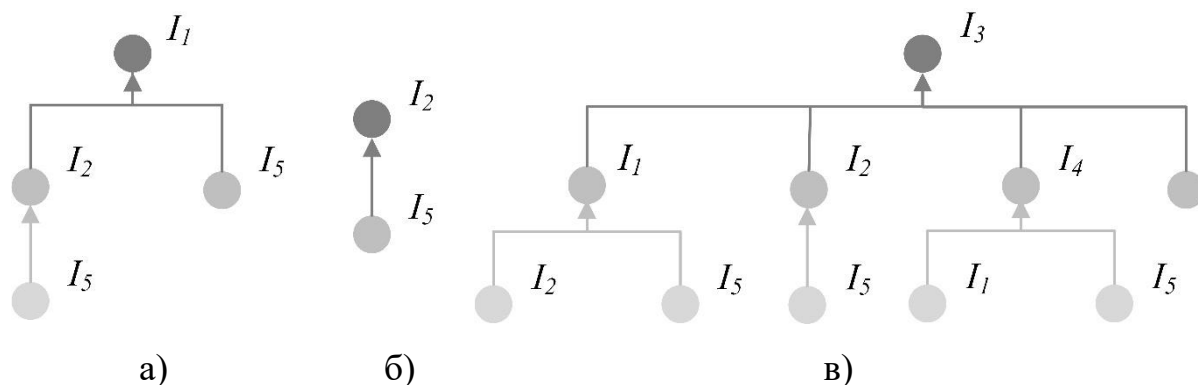


Рис. 2.16. Ієрархічні моделі впливів факторів інформаційної архітектури та візуального дизайну:

а) — ієрархія візуальних елементів; б) — колористика та контрастність; в) — читабельність; г) — просторовий баланс; д) — композиція та ритм макету

На рис. 2.17 представлено залежності між факторами інформаційної архітектури та візуального дизайну вебдодатків.





інформаційної архітектури та візуального дизайну:

Результати обрахунків наведено у таблиці 2.7.

Таблиця 2.7

Ранги факторів інформаційної архітектури та візуального дизайну

j	h_{1j}	h_{2j}	h_{3j}	h_{4j}	I_{1j}	I_{2j}	I_{3j}	I_{4j}	I_{Fj}	Ранг фактора	Рівень пріоритетності
1	2	1	2	1	20	5	-20	-5	65	3	3
2	2	2	1	0	20	10	-10	0	85	4	2
3	0	0	4	5	0	0	-40	-25	0	1	5
4	1	0	2	2	10	0	-20	-10	45	2	4
5	4	5	0	0	40	25	0	0	130	5	1

На рис. 2.18 відображено фактори з такими вагами: I_1 (ієрархія візуальних елементів) — 65 у. о., I_2 (колористика та контрастність) — 85 у. о., I_3 (читабельність) — 0 у. о., I_4 (просторовий баланс) — 45 у. о., I_5 (композиція та ритм макету) — 130 у. о.

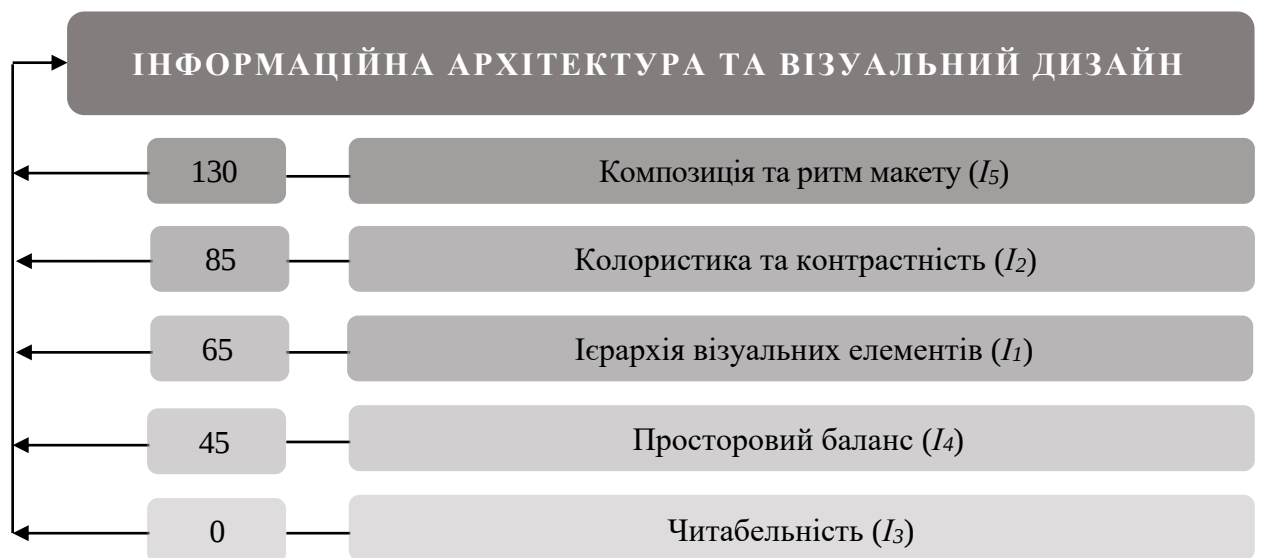


Рис. 2.18. Модель вагомості факторів
інформаційної архітектури та візуального дизайну

Наведемо узагальнену модель вагомості факторів проєктування та дизайну вебдодатків (рис. 2.19).

Отже, основним фактором впливу на ергономіку та когнітивні принципи взаємодії з інтерфейсами визначено консистентність дизайн-моделей, який отримав найвище вагове значення (90 у. о.). Цей фактор забезпечує сталість у поведінці елементів інтерфейсу, що знижує кількість помилок та пришвидшує навчання користувачів. Модальність інтерфейсу дозволяє адаптувати середовище взаємодії до контексту задачі, зменшуючи інформаційне перевантаження, та займає другу позицію за пріоритетом. Масштабованість і зворотний зв'язок оцінено майже однаково, оскільки вони рівноцінно важливі для підтримки динаміки користувацьких сценаріїв. Прогнозованість поведінки системи має нижчий пріоритет, адже її відсутність частково компенсується іншими принципами, зокрема консистентністю. Найнижчий пріоритет належить фактору когнітивне навантаження. Однак, оцінка 0 у. о., не означає що його вплив на досліджуваний процес є відсутнім, а вказує на найменшу вагу серед інших аналізованих факторів.

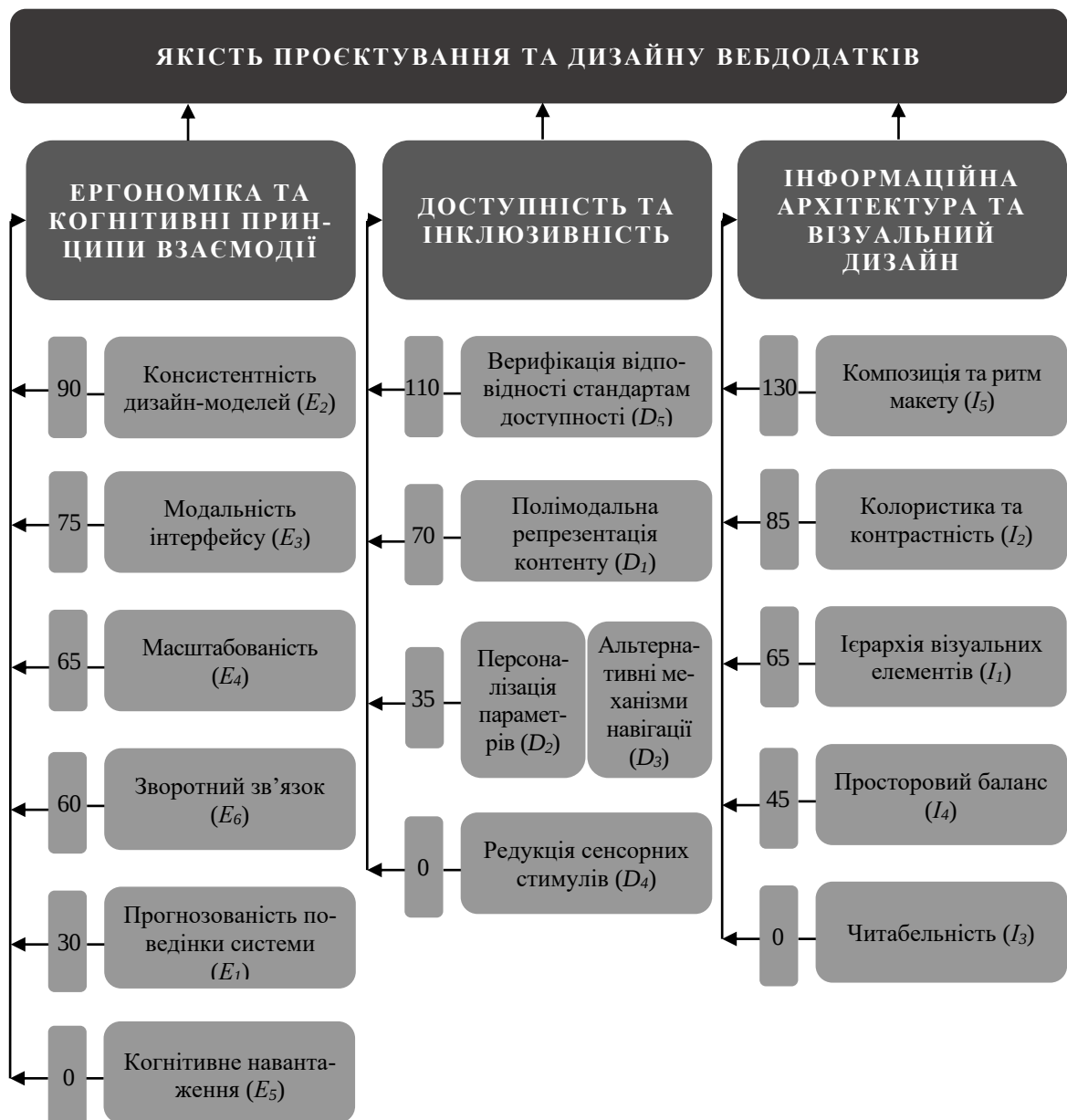


Рис. 2.19. Модель вагомості факторів проєктування та дизайну вебдодатків

Другий блок моделі, що візуалізує фактори впливу на доступність та інклюзивність, складається з чотирьох рівнів. При цьому найдомінантнішим є фактор верифікація відповідності стандартам доступності. Такий результат є логічним з технологічної точки зору, адже даний фактор забезпечує базову сумісність інтерфейсів із нормативними вимогами та гарантує правову відповідність. Полімодальна репрезентація контенту забезпечує доступ до інформації через кілька сенсорних каналів, що підвищує універсальність сприйняття.

Фактори персоналізації параметрів і альтернативні механізми навігації мають середній пріоритет — по 35 у. о. Редукція сенсорних стимулів отримала найменшу вагу у даній моделі, адже цей фактор має вузько спеціалізоване застосування і менш суттєвий вплив на загальний рівень доступності порівняно з базовими факторами технічної сумісності та багатоканального подання інформації.

Найпріоритетнішим фактором, що впливає на якість інформаційної архітектури та візуального дизайну є композиція та ритм макету. Саме цей фактор визначає загальну впорядкованість і цілісність візуального середовища, забезпечує логіку перегляду, мінімізує візуальний шум, підвищуючи ефективність сприйняття контенту. Фактор колористика та контрастність займає другу позицію з показником 85 у. о., оскільки безпосередньо впливає на зорову доступність елементів. Найменш домінантним є фактор читабельність, адже значно залежить від інших факторів.

Висновки до розділу 2

1. Одержано множину факторів проєктування та дизайну вебдодатків на основі експертного оцінювання. Здійснено розподіл факторів за такими інтегральними характеристиками, як ергономіка та когнітивні принципи взаємодії, доступність та інклюзивність, інформаційна архітектура та візуальний дизайн.

2. Виконано формалізоване представлення зв'язків між факторами засобами семантичних мереж. Розроблено семантичну модель факторів впливу на ергономіку та когнітивні принципи взаємодії з інтерфейсами, семантичну модель факторів впливу на доступність та інклюзивність вебдодатків, семантичну модель факторів інформаційної архітектури та візуального дизайну. Для опису впливів і залежностей використано конструкції логіки предикатів.

3. Розроблено моделі вагомості факторів ергономіки та когнітивних принципів взаємодії з інтерфейсами вебдодатків, інклюзивності та доступ-

ності, інформаційної архітектури та візуального дизайну за методом математичного моделювання ієрархій. Для цього побудовано матриці попарних порівнянь та здійснено ітерації для визначення пріоритетів. Удосконалено моделі вагомості факторів інтегральних характеристик за методом ранжування. Побудовано ієрархічні моделі зв'язків, обчислено ранги факторів та визначено їх вагові значення. Визначено, що найвагомішим фактором, що впливає на ергономіку та когнітивні принципи взаємодії з інтерфейсами є E_2 (консистентність дизай-моделей), вага якого 90 у. о. Домінантний вплив на доступність та інклюзивність здійснює фактор D_5 (верифікація відповідності стандартам доступності) — 110 у. о. Фактор I_5 (композиція та ритм макету) є найпріоритетнішим щодо розроблення інформаційної архітектури та візуального дизайну. Його вагове значення становить 130 у. о.

4. На основі структурного аналізу побудовано узагальнену багаторівневу модель пріоритетного впливу факторів, яка відображає ієрархію основних складових проектування та дизайну вебдодатків. Ця модель є універсальною базою для гнучкого налаштування дизайнерських процесів відповідно до специфіки прикладної області, типу системи чи цільової аудиторії.

РОЗДІЛ 3

СТРАТЕГІЯ ФОРМУВАННЯ ОПТИМАЛЬНОГО ВАРІАНТУ ПРОЄКТУВАННЯ ТА ДИЗАЙНУ ВЕБДОДАТКІВ

3.1. Обґрунтування стратегії проєктування та дизайну вебдодатків

Формування ефективної стратегії проєктування та дизайну вебдодатків потребує класифікації проблемних ситуацій враховуючи рівень визначеності їхньої структури. При цьому, проблеми управління веброзробленням можуть мати різний ступінь формалізованості, що обумовлює вибір інструментарію для аналізу та розв'язання. З огляду на особливості стратегічного планування структурно-організаційних процесів, пов'язаних з проєктуванням та дизайном вебдодатків, слід відзначити домінування характеристик, властивих погано структурованим проблемам. При цьому, значна частина параметрів має нечіткий або частково визначений опис, а численні якісні залежності залишаються нерозкритими [113].

Найбільш релевантним підходом до формування стратегічного рішення є використання системного аналізу, що дозволяє досліджувати проблему як цілісну систему з множиною взаємопов'язаних факторів [113, 114]. Розробка можливих сценаріїв проєктування та дизайну вебдодатків відбувається через побудову множини альтернатив, кожна з яких репрезентує варіант досягнення запланованого результату в межах заданих ресурсних та технологічних обмежень. Зазначена множина слугує основою для проведення процедур вибору, орієнтованих на пошук оптимального рішення з урахуванням наперед визначених факторів доцільності, ефективності та технологічної придатності [104, 113].

У процесі вибору оптимальної альтернативи необхідно враховувати неадитивність та взаємозалежність компонент — фундаментальну особливість складних систем. Будь-яка спроба формалізації вибору потребує використання

як аналітичних, так і синтетичних підходів. Аналітичне мислення забезпечує поділ системного об'єкта на складові та дозволяє виявити структурні зв'язки між окремими елементами. Зокрема, така методика застосовувалася при виокремленні інтегральних компонент проектування та дизайну вебдодатків і побудові семантичних мереж факторів впливу на ергономіку та когнітивні принципи взаємодії, доступність та інклюзивність, інформаційну архітектуру та візуальний дизайн. Однак сам по собі цей підхід обмежується локальними властивостями компонент і, відповідно, не забезпечує цілісного розуміння функціонування системи [115, 116].

Синтез, у свою чергу, забезпечує реконструкцію досліджуваного явища через агрегування компонент у єдину структуру. У випадку вибору між альтернативами, що характеризуються складною множиною критеріїв та взаємопов'язаних факторів, системне мислення дозволяє сформуванню узагальнену модель оцінювання, в якій поєднуються як локальні характеристики, так і глобальна цільова орієнтація. З огляду на сказане, доцільним є визначення оптимальних варіантів як інтегральних характеристик (ергономіка та когнітивні принципи взаємодії, доступність та інклюзивність, інформаційна архітектура та візуальний дизайн), так і проектування та дизайну вебдодатків в цілому [116].

Формування адекватної моделі прийняття рішень ускладнюється неможливістю ігнорування слабо визначених або контекстно залежних взаємодій між складовими процесу. Такі взаємодії часто не підлягають суворій причинно-наслідковій інтерпретації, що робить недостатнім використання виключно лінійної логіки. Важливим є залучення концептуальних засобів, що дозволяють описувати взаємозв'язки на основі нечіткого відношення переваг [47, 114, 115].

Застосування методів багатфакторного аналізу дозволяє формалізувати процес пріоритизації факторів, що впливають на кожен з варіантів проектування та дизайну [46, 104, 105]. Процедура скорочення множини характерис-

тик здійснюється шляхом відкидання малозначущих параметрів згідно з принципом Парето. Принципу Парето є одним з ефективних інструментів зменшення складності моделі прийняття рішень на основі багатьох факторів. У будь-якій складній системі лише обмежена кількість факторів відіграє домінуючу роль при формуванні загального результату. При цьому, переважна більшість змінних має мінімальний вплив на досягнення цільових параметрів. Така закономірність дозволяє ідентифікувати ключові фактори, які визначають ефективність проєктування та дизайну вебдодатків, та зосередити аналітичні й розрахункові ресурси саме на них. Ці фактори становлять основу Парето-ефективної множини, яка використовується як робоча множина при здійсненні лінійного об'єднання критеріїв або при застосуванні методів нечіткого домінування. Фактично принцип Парето виконує функцію селекційного фільтра, який забезпечує збереження релевантної інформації, необхідної для формування обґрунтованого управлінського рішення [117, 118].

Остаточна процедура вибору оптимального варіанту проєктування та дизайну вебдодатків ґрунтується на застосуванні методів зведення багатфакторної моделі до єдиного критерію. Це відбувається завдяки лінійному згортанню показників та використанні нечітких моделей переваг, які дозволяють врахувати суб'єктивне оцінювання в умовах невизначеності. Запропонований підхід забезпечує формалізовану основу для прийняття стратегічного рішення щодо проєктування та дизайну вебдодатків [104].

3.2. Багатокритеріальна оптимізація інтегральних характеристик проєктування та дизайну вебдодатків

Багатофакторна оптимізація на множині можливих рішень M є процесом пошуку елемента що забезпечує максимізацію функцій мети, яку можна подати у такій формі: $f(x) = (f_1(x), \dots, f_n(x))$. Метою багатокритеріальної оптимізації є визначення максимальних значень кожної часткової функцій мети:

$f_i(x) \rightarrow \max_{x \in D}$, $i = 1, n$. Тобто необхідно знайти оптимальну альтернативу за всіма заданими факторами. Вирішення багатокритеріальної задачі потребує застосування спеціальних методів, оскільки фактори можуть бути суперечливими, і покращення одного з них може призводити до погіршення іншого [46, 104, 119, 120].

Один із найбільш ефективних є метод лінійного об'єднання критеріїв [43, 104, 121]:

$$F(w, x) = \sum_{i=1}^n w_i f_i(x) \rightarrow \max_{x \in D}; \quad w \in W, \quad (3.1)$$

де W — допустима множина вагових коефіцієнтів.

$$W = \left\{ w = (w_1, \dots, w_n)^T; \quad w_i > 0; \quad \sum_{i=1}^n w_i = 1 \right\}. \quad (3.2)$$

Формула (3.1) дозволяє трансформувати багатокритеріальну задачу в однокритеріальну. Вагові коефіцієнти w_i відображають відносну значущість кожного окремого фактору у загальному процесі прийняття рішень. Нормування ваг забезпечує рівність одиниці сукупного впливу усіх факторів. Тобто відбувається зведення складної багатокритеріальної задачі до узагальненої функції корисності [43, 120, 121]:

$$Q(a_i) = \sum_{i=1}^n w_i q_i(y_i), \quad (3.3)$$

де $Q(a_i)$ — функція корисності кожного можливого альтернативного варіанту; w_i — ваговий коефіцієнт, що відображає значущість i -го фактору, $0 < w_i < 1$, $\sum_{i=1}^n w_i = 1$; $q_i(y_i)$ — функція корисності за кожним фактором; y_i — результат оцінювання альтернативи за заданим фактором.

Отже, вираз (3.3) дає змогу розрахувати узагальнену числову характеристику кожної альтернативи, враховуючи вагомість окремих факторів у структурі рішення [104, 105].

Багатокритеріальна оптимізація, що базується на методі лінійного об'єднання, виконується поетапно. Перший етап — виокремлення множини Парето, яка містить усі найдомінантніші фактори. Створення множини Парето відбувається на основі коефіцієнтів, які визначають пріоритетність кожного фактора. Другий етап — проектування альтернативних варіантів. У дослідженні для кожної інтегральної характеристики проектування та дизайну вебдодатків аналізується по три альтернативи. Для кожної альтернативи експерти визначають значення факторів у відсотковому вираженні. Важливо, щоб сума ваг кожного фактора серед усіх альтернатив дорівнювала 100%. Це забезпечує математичну збалансованість. На третьому етапі формується матриця порівнянь факторів із застосуванням шкали Сааті. Вона дозволяє визначити відносну важливість факторів. Далі для кожного фактора будуються матриці попарних порівнянь запроєктованих альтернатив. Обчислюється корисність цих альтернатив щодо компонентів множини Парето. На завершальному етапі визначаються узагальнені оцінки корисності альтернатив [43, 104, 119, 121, 123].

Нижче наведено детальну методологію реалізації означених етапів лінійної згортки факторів.

З загальної множини факторів $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ обираються ті, що мають найвищу вагу та формується множина Парето-оптимальних факторів $X_p = \{X_1, X_2, \dots, X_m\}$, де $m < n$. Кількість факторів у Парето-оптимальній множині не є строго обмеженою, а визначається на основі суттєвої переваги вагових значень [121, 124, 125].

Кількість можливих альтернатив обумовлена особливостями реалізації досліджуваних процесів. Оптимальним з огляду на особливості проектування та дизайну вебдодатків є виокремлення трьох варіантів: альтернатива a_1 , альтернатива a_2 та альтернатива a_3 . При цьому можливі різні комбінації вагомості факторів щодо кожної альтернативи. Для зручності подальшого аналізу, можливі комбінації систематизовані у таблиці 3.1 [104].

Таблиця 3.1

Можливі варіанти відсоткового вираження впливу факторів

Варіант	y_1	y_2	y_3	Варіант	y_1	y_2	y_3
1	10%	10%	80%	18	40%	10%	50%
2	10%	20%	70%	19	40%	20%	40%
3	10%	30%	60%	20	40%	30%	30%
4	10%	40%	50%	21	40%	40%	20%
5	10%	50%	40%	22	40%	50%	10%
6	10%	60%	30%	23	50%	10%	40%
7	10%	70%	20%	24	50%	20%	30%
8	10%	80%	10%	25	50%	30%	20%
9	20%	10%	70%	26	50%	40%	10%
10	20%	20%	60%	27	60%	10%	30%
11	20%	30%	50%	28	60%	20%	20%
12	20%	40%	40%	29	60%	30%	10%
13	20%	50%	30%	30	70%	10%	20%
14	20%	60%	20%	31	70%	20%	10%
15	20%	70%	10%	32	80%	10%	10%
16	30%	10%	60%	33	30%	60%	10%
17	30%	20%	50%	34	30%	50%	20%

Процес прийняття рішень з приводу обрання оптимального варіанту серед кількох альтернативних потребує формалізації на основі кількісних показників важливості релевантних факторів. Щоб забезпечити коректність такого аналізу, доцільно представити значення впливу факторів на розглянуті альтернативи у вигляді узагальненої таблиці (табл. 3.2). Також зазначаються ваги факторів, одержані за методом ранжування [105, 121].

Таблиця 3.2

Розподіл впливу факторів на можливі альтернативи

Парето-оптимальна множина факторів	Вагові значення факторів	Частки впливу факторів в альтернативах		
		a_1	a_2	a_3
фактор X_1	w_1	y_{11}	y_{12}	y_{13}
фактор X_2	w_2	y_{21}	y_{22}	y_{23}
...	...	...	...	...
фактор X_m	w_m	y_{m1}	y_{m2}	y_{m3}

У новій сформованій сукупності початкові ваги факторів потребують коригування, адже первинний розподіл враховував ширший контекст. Після виключення менш впливових факторів значущість інших може змінитися. Щоб уточнити актуальні вагові коефіцієнти будується матриця попарних порівнянь.

У матриці (табл. 3.3) представлені числові співвідношення, що показують наскільки один фактор є більш або менш значущим порівняно з іншим. Головна діагональ матриці завжди заповнюється одиницями, оскільки кожен фактор порівнюється сам із собою. Якщо елементи, що знаходяться над головною діагоналлю, відображають міру переваги фактора X_i над фактором X_j , тоді елементи, розташовані під головною діагоналлю, є оберненими величинами. Наприклад, порівняння вагових коефіцієнтів w_1/w_2 показує у скільки разів фактор X_1 важливіший за фактор X_2 . Тобто, якщо над діагоналлю записано w_1/w_2 , то під діагоналлю обов'язково буде значення w_2/w_1 . Це забезпечує узгодженість матриці [104, 105, 119, 123].

Таблиця 3.3

Порівняння факторів Парето-оптимальної множини

Фактори	X_1	X_2	...	X_m
X_1	1	w_1/w_2	...	w_1/w_m
X_2	w_2/w_1	1	...	w_2/w_m
...	...	...	...	...
X_m	w_m/w_1	w_m/w_2	...	1

Подальше опрацювання матриці полягає у обчисленні нормованого власного вектора, компоненти якого є оновленими ваговими коефіцієнти факторів [124, 126].

Спочатку визначається головний власний вектор матриці на основі середнього геометричного значення елементів у межах кожного рядка. Нехай розроблена матриця позначена A , тоді кожен її елемент позначається як a_{ij} , де

i — номер рядка матриці, j — номер стовпця матриці. Тоді вираз для обчислення компонент головного вектора має вид [104, 121, 126]:

$$X_i = \sqrt[m]{a_{i1} \cdot a_{i2} \cdot a_{ij} \cdot a_{im}} \quad i = \overline{1, m}, \quad (3.4)$$

де m — порядковий номер останнього фактора у Парето-оптимальній множині.

Процес нормалізації відносно одиниці реалізується за такою формулою [104, 126]:

$$X_{i_norm} = \frac{\sqrt[m]{a_{i1} \cdot a_{i2} \cdot a_{ij} \cdot a_{im}}}{\sum_{i=1}^m \sqrt[m]{a_{i1} \cdot a_{i2} \cdot a_{ij} \cdot a_{im}}} \quad i = \overline{1, m} \quad (3.5)$$

Також обчислюються додаткові показники узгодження: $X_{i_norm_1}$ (розраховується шляхом множення матриці на X_{i_norm}) та $X_{i_norm_2}$ ($X_{i_norm_1}$ ділиться на X_{i_norm}). Для контролю точності отриманих результатів використовується аналіз узгодженості. Важливим індикатором є максимальне власне значення матриці $\lambda_{\max}$. Воно розраховується як середнє арифметичне елементів $X_{i_norm_2}$. Для кількісної інтерпретації відхилення від повної узгодженості вводиться індекс NQ , що визначається таким чином: $NQ = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$. Для порівняння з випадковими матрицями аналогічного порядку вводиться відношення узгодженості XQ , $XQ = NQ / XI$. XI — це еталонне значення випадкового індексу, яке емпірично визначене на основі великої кількості генерацій випадкових матриць для кожного порядку. Можливими є такі значення XI : 0,58 для матриць третього порядку; 0,90 — четвертого порядку; 1,12 — п'ятого; 1,24 — шостого; 1,32 — сьомого та ін. [104, 105].

Критерієм прийнятності результатів попарного порівняння вважається виконання умови $XQ \leq 0,1$ та нерівності $NQ < 0,1 \times XI$. Тоді забезпечується допустимий рівень довіри до сформованого вектора пріоритетів. Інакше потрібно переглянути оцінки експертів або скоригувати модельну структуру [43].

Для одержання значень корисності альтернатив за кожним окремим фактором будується матриця попарного порівняння (табл. 3.4). Вона надає кількісне відображення відносних переваг альтернатив стосовно обраного фактора. Кількість матриць відповідає кількості факторів у Парето-оптимальній множині [119, 121, 123, 126].

Таблиця 3.4

Порівняння часток впливу фактора X_i в альтернативах

X_i	a_1	a_2	a_3
a_1	1	y_{i1}/y_{i2}	y_{i1}/y_{i3}
a_2	y_{i2}/y_{i1}	1	y_{i2}/y_{i3}
a_3	y_{i3}/y_{i1}	y_{i3}/y_{i2}	1

Елементи цієї матриці відображають результати попарного порівняння альтернатив з точки зору важливості аналізованого фактора у кожній альтернативі. Застосування методів власних векторів дозволяє визначити нормалізовані вагові коефіцієнти альтернатив щодо обраного фактора. У результаті обчислень одержано кількісні оцінки корисності альтернатив q_{i1} , q_{i2} , q_{i3} [126].

Узагальнені оцінки корисності для кожного із трьох варіантів розраховуються за допомогою таких математичних виразів [43, 104, 105, 121]:

$$\begin{aligned}
 Q(a_1) &= w_1 \cdot q_{11} + w_2 \cdot q_{21} + w_i \cdot q_{i1} + w_m \cdot q_{m1}; \\
 Q(a_2) &= w_1 \cdot q_{12} + w_2 \cdot q_{22} + w_i \cdot q_{i2} + w_m \cdot q_{m2}; \\
 Q(a_3) &= w_1 \cdot q_{13} + w_2 \cdot q_{23} + w_i \cdot q_{i3} + w_m \cdot q_{m3}.
 \end{aligned}
 \tag{3.6}$$

Відповідно до основних положень багатокритеріальної оптимізації, критерієм вибору слугує максимізація оцінки корисності: $\max Q_i$ ($i = 1, 2, 3$). Вибір альтернативи, оцінка якої досягає найбільшого значення, дозволяє забезпечити оптимальність прийнятого рішення з урахуванням багатьох факторів, що одночасно впливають на результат [121].

Запропонований алгоритм може бути адаптований для програмної реалізації, що уможлиблює створення інтелектуальних систем управління технологічними процесами, зокрема щодо проектування та дизайну вебдодатків.

Проаналізовано фактори ергономіки та когнітивних принципів взаємодії за розглянутою методикою. На основі діаграми (рис. 3.1), що відображає ваги факторів ергономіки та когнітивних принципів взаємодії, одержані в розділі 2, сформовано множину Парето-оптимальних факторів $E_P = \{E_2, E_3, E_4, E_6\}$, де вагове значення E_2 становить 90 у. о., E_3 — 75 у. о., E_4 — 65 у. о., E_6 — 60 у. о. Інші фактори мають нижчі показники, тож, згідно з принципом Парето, відкидаються [124, 125].

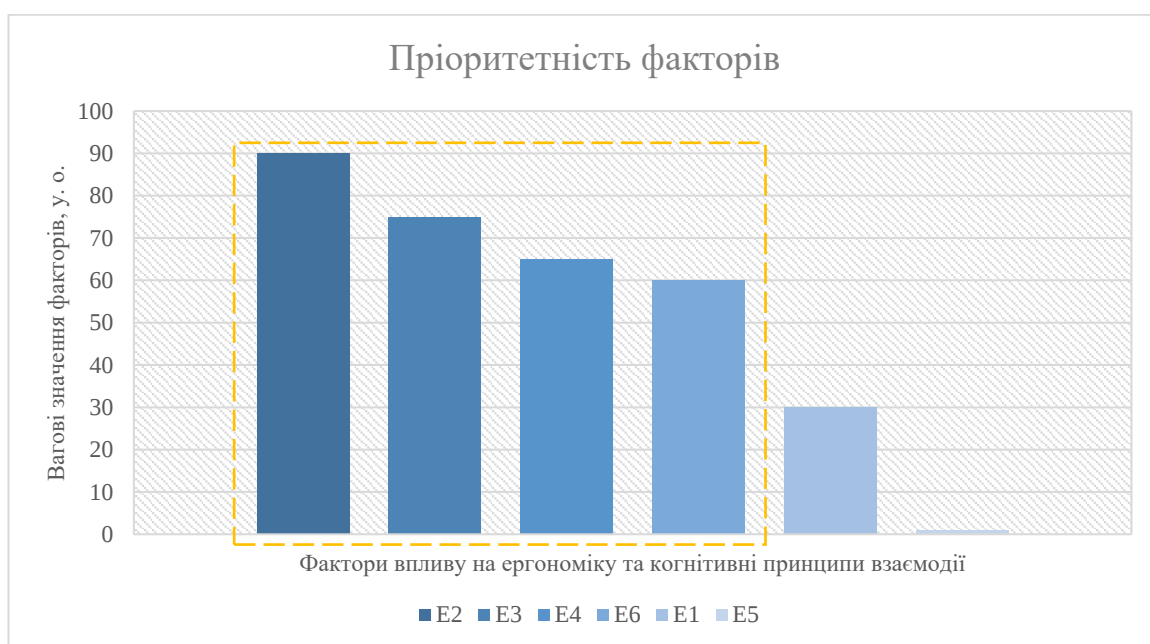


Рис. 3.1. Візуалізація вагових значень факторів ергономіки та когнітивних принципів взаємодії

Визначено три найбільш імовірні альтернативи формування ергономіки та когнітивних принципів взаємодії з інтерфейсами вебдодатків (табл. 3.5). Наведено частки впливу факторів в межах кожної альтернативи [104, 105].

Таблиця 3.5

Альтернативи формування ергономіки та когнітивних принципів взаємодії
з інтерфейсами вебдодатків

Фактори ергономіки та когнітивних принципів взаємодії	Вагові значення факторів	Оцінювання альтернатив		
		a_1	a_2	a_3
Консистентність дизайн-моделей (E_2)	90	40	40	20
Модальність інтерфейсу (E_3)	75	30	30	40
Масштабованість (E_4)	65	20	30	50
Зворотний зв'язок (E_6)	60	30	60	10

Здійснено порівняння факторів для визначення вагових значень в межах Парето-оптимальної множини (табл. 3.6) [119].

Таблиця 3.6

Порівняння Парето-оптимальних факторів

	E_2	E_3	E_4	E_6
E_2	1	3	5	6
E_3	1/3	1	3	4
E_4	1/5	1/3	1	2
E_6	1/6	1/4	1/2	1

Внаслідок обчислень отримано компоненти нормалізованого вектора матриці $E_{norm} = (0,56; 0,26; 0,11; 0,07)$ з критеріями нормалізації $\lambda_{max} = 4,079$, $NQ = 0,026$, $EQ = 0,029$, що знаходяться в межах норми. Отже вагові значення є наступними [124–126]:

$$w_1 = 0,56; w_2 = 0,26; w_3 = 0,11; w_4 = 0,07.$$

Для порівняння альтернатив розроблено матриці за кожним фактором Парето-оптимальної множини. Ці матриці представлені у табличному вигляді (табл. 3.7) [104, 105, 119, 123].

Таблиця 3.7

Порівняння альтернатив щодо факторів

Фактори	a_i/a_j	a_1	a_2	a_3
Консистентність дизайн-моделей (E_2)	a_1	1	1	3
	a_2	1	1	3
	a_3	1/3	1/3	1
Модальність інтерфейсу (E_3)	a_1	1	1	1/2
	a_2	1	1	1/2
	a_3	2	2	1
Масштабованість (E_4)	a_1	1	1/2	1/4
	a_2	2	1	1/3
	a_3	4	3	1
Зворотний зв'язок (E_6)	a_1	1	1/4	3
	a_2	4	1	6
	a_3	1/3	1/6	1

У результаті опрацювання матриць визначені критерії узгодженості та оцінки корисності альтернатив за кожним фактором (табл. 3.8). Слід зазначити, що усі критерії нормалізації знаходяться в допустимих межах, тобто задача не потребує додаткового експертного уточнення [43, 104, 105].

Таблиця 3.8

Результати опрацювання матриць попарних порівнянь

Фактори	Критерії нормалізації			Корисність альтернатив		
	Максимальне власне значення вектора $\lambda_{\max}$	Індекс уз- годженості NQ	Відношення узгодженості EQ	q_{i1}	q_{i2}	q_{i3}
E_2	3	0	0	0,428	0,428	0,142
E_3	3	0	0	0,25	0,25	0,5
E_4	3,018	0,009	0,016	0,136	0,238	0,625
E_6	3,054	0,027	0,046	0,217	0,69	0,091

На основі (3.6) сформовано вираз для обчислення багатofакторних оцінок корисності альтернатив формування ергономіки та когнітивних принципів взаємодії з інтерфейсами [43, 104, 105]:

$$\begin{aligned} Q(a_1) &= w_1 \cdot q_{11} + w_2 \cdot q_{21} + w_3 \cdot q_{31} + w_4 \cdot q_{41}; \\ Q(a_2) &= w_1 \cdot q_{12} + w_2 \cdot q_{22} + w_3 \cdot q_{32} + w_4 \cdot q_{42}; \\ Q(a_3) &= w_1 \cdot q_{13} + w_2 \cdot q_{23} + w_3 \cdot q_{33} + w_4 \cdot q_{43}. \end{aligned} \quad (3.7)$$

Підставивши відповідні значення у вираз (3.7) одержано: $Q(a_1) = 0,335$; $Q(a_2) = 0,379$; $Q(a_3) = 0,285$. Отже найбільш оптимальним варіантом є другий, в якому найбільшу роль відіграє зворотний зв'язок з користувачами.

Аналогічно розглянуто варіанти формування доступності та інклюзивності. На рис. 3.2 представлено візуалізацію вагових значень факторів для формування Парето-оптимальної множини аналізованої інтегральної характеристики проектування та дизайну вебдодатків [124, 125].

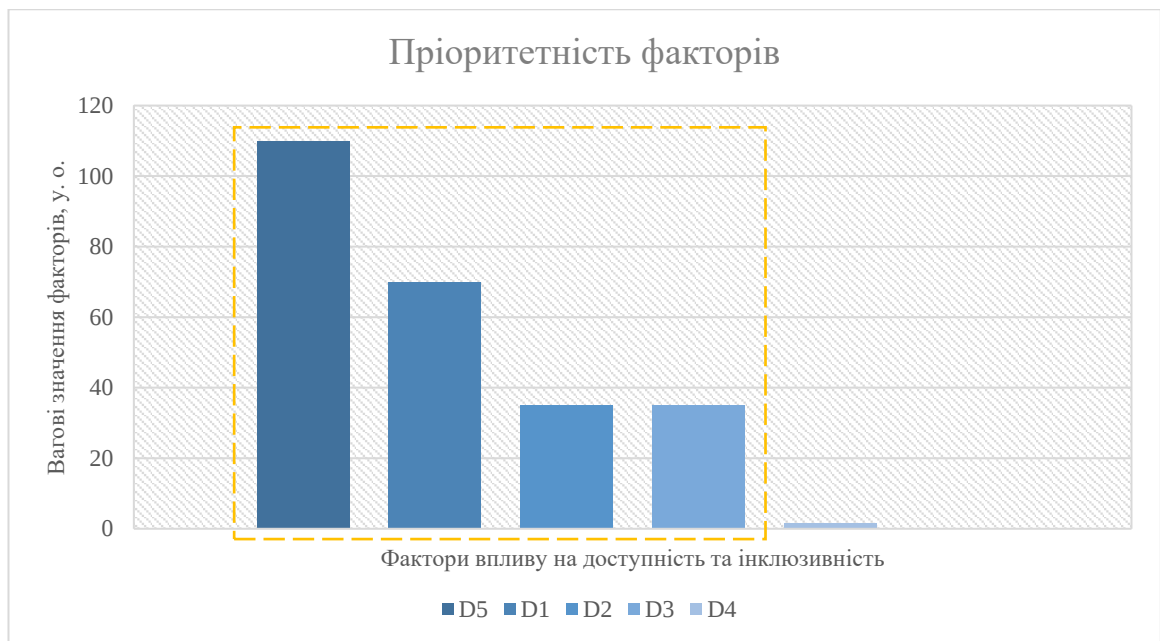


Рис. 3.2. Візуалізація вагових значень факторів доступності та інклюзивності

Згідно з рис. 3.2 одержано таку множину Парето-оптимальних, тобто найбільш вагомих факторів щодо доступності та інклюзивності інтерфейсів вебдодатків: $D_p = \{D_5, D_1, D_2, D_3\}$ [124, 125].

Здійснено проєктування та оцінювання найімовірніших альтернативних варіантів (табл. 3.9) [104, 105].

Таблиця 3.9

Альтернативи формування доступності та інклюзивності вебдодатків

Фактори доступності та інклюзивності	Вагові значення факторів	Оцінювання альтернатив		
		a_1	a_2	a_3
Верифікація відповідності стандартам доступності (D_5)	110	40	30	30
Полімодальна репрезентація контенту (D_1)	70	50	30	20
Персоналізація параметрів (D_2)	35	40	20	40
Альтернативні механізми навігації (D_3)	35	30	40	30

Враховуючи первинні ваги факторів, одержані внаслідок застосування методу ранжування, та можливі оцінки згідно з шкалою Сааті розроблено матрицю попарних порівнянь факторів (табл. 3.10) [119, 124–126].

Таблиця 3.10

Порівняння Парето-оптимальних факторів доступності та інклюзивності

	D_5	D_1	D_2	D_3
D_5	1	4	8	8
D_1	1/4	1	6	6
D_2	1/8	1/6	1	2
D_3	1/8	1/6	1/2	1

У результаті опрацювання матриці отримано компоненти нормалізованого вектора $D_{norm} = (0,62; 0,27; 0,07; 0,05)$ з критеріями нормалізації, що зна-

ходяться в допустимих межах: $\lambda_{\max} = 4,215$, $NQ = 0,072$, $DQ = 0,079$. Вагові значення факторів Парето-оптимальної множини [124–126]:

$$w_1 = 0,62; w_2 = 0,27; w_3 = 0,07; w_4 = 0,05.$$

Матриці для порівняння альтернатив формування доступності та інклюзивності вебдодатків за факторами Парето-оптимальної множини представлені у табл. 3.11 [104, 105, 119, 123].

Таблиця 3.11

Порівняння альтернатив щодо факторів доступності та інклюзивності

Фактори	a_i/a_j	a_1	a_2	a_3
Верифікація відповідності стандартам доступності (D_5)	a_1	1	2	2
	a_2	1/2	1	1
	a_3	1/2	1	1
Полімодальна репрезентація контенту (D_1)	a_1	1	3	4
	a_2	1/3	1	2
	a_3	1/4	1/2	1
Персоналізація параметрів (D_2)	a_1	1	3	1
	a_2	1/3	1	1/3
	a_3	1	3	1
Альтернативні механізми навігації (D_3)	a_1	1	1/2	1
	a_2	2	1	2
	a_3	1	1/2	1

За кожною матрицею обчислено часткові корисності запроєктованих варіантів формування доступності та інклюзивності вебдодатків. Для фактору D_5 (верифікація відповідності стандартам доступності) оцінки корисності мають такі позначення: q_{11} — оцінка за першою альтернативою, q_{12} — оцінка за альтернативою a_2 , q_{13} — оцінка за альтернативою a_3 . Відповідно, для фактору D_1 (полімодальна репрезентація контенту) маємо такі позначення: q_{21} , q_{22} , q_{23} . Для фактора D_2 (персоналізація параметрів): q_{31} , q_{32} , q_{33} . Для фактора D_3 (альтернативні механізми навігації): q_{41} , q_{42} , q_{43} . Одержані результати відображені у табл. 3.12 [43, 104, 105].

Таблиця 3.12

Результати опрацювання матриць попарних порівнянь

Фактори	Критерії нормалізації			Корисність альтернатив		
	Максимальне власне значення вектора $\lambda_{\max}$	Індекс узгодженості NQ	Відношення узгодженості DQ	q_{i1}	q_{i2}	q_{i3}
D_5	3	0	0	0,5	0,25	0,25
D_1	3,018	0,009	0,016	0,625	0,238	0,136
D_2	3	0	0	0,428	0,142	0,428
D_3	3	0	0	0,25	0,5	0,25

Зважаючи на те, що кількість факторів у Парето-оптимальній множині доступності та інклюзивності вебдодатків становить чотири ($i = 1, \dots, 4$), а кількість альтернатив — три ($j = 1, 2, 3$), вираз (3.7) залишається справедливим і для цього випадку. Підставивши значення, отримано оцінки корисності аналізованих альтернатив формування доступності та інклюзивності вебдодатків: $Q(a_1) = 0,521$; $Q(a_2) = 0,254$; $Q(a_3) = 0,234$. Бачимо, що перша альтернатива має значну перевагу порівняно з іншими запроєктованими двома варіантами, отже вона є оптимальною. При цьому, найбільше значення має фактор D_1 (полімодальна репрезентація контенту), що дозволяє користувачам обирати альтернативні можливості представлення даних.

Дану методику застосовано для оцінювання імовірних варіантів розроблення інформаційної архітектури та візуального дизайну вебдодатків. Для зручності побудовано діаграму що ілюструє ваги факторів досліджуваного процесу (рис. 3.3).

Відповідно, Парето-оптимальна множина факторів впливу на якість розроблення інформаційної архітектури та візуального дизайну має вид: $I_P = \{I_5, I_2, I_1, I_4\}$. Фактор I_3 (читабельність) не увійшов у вказану множину у зв'язку з низьким ваговим коефіцієнтом [124, 125].

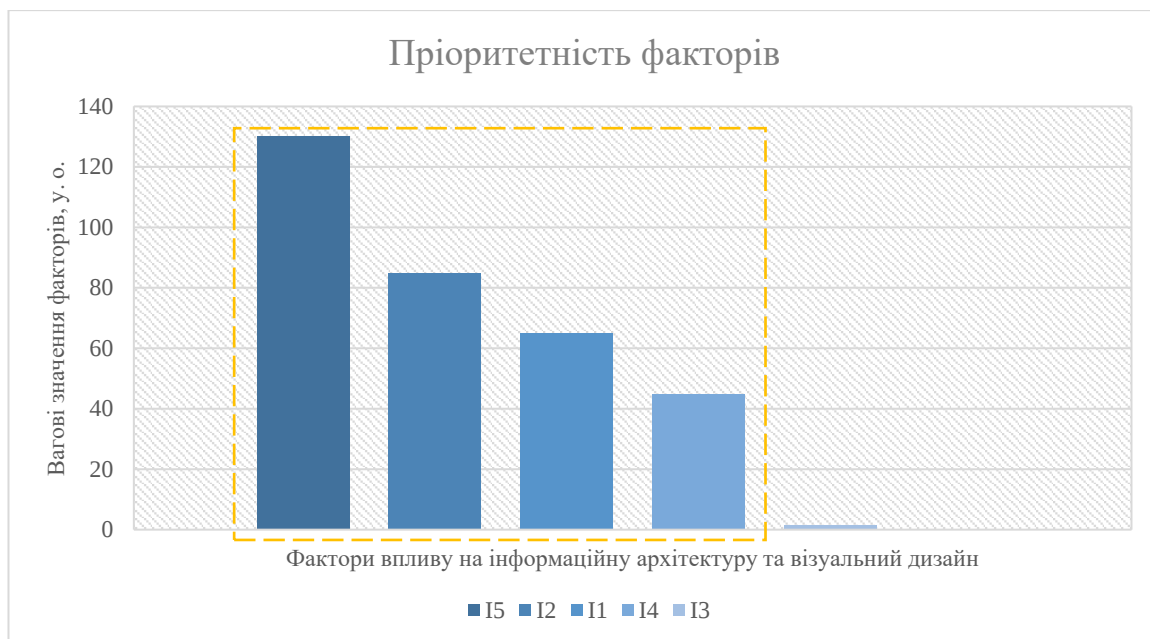


Рис. 3.3. Візуалізація вагових значень факторів інформаційної архітектури та візуального дизайну

Фактори множини Парето, їх вагові значення та найімовірніші варіанти альтернатив продемонстровані у табл. 3.13 [104, 105].

Таблиця 3.13

Альтернативи розроблення інформаційної архітектури та візуального дизайну

Фактори доступності та інклюзивності	Вагові значення факторів	Оцінювання альтернатив		
		a_1	a_2	a_3
Композиція та ритм макету (I_5)	130	40	30	30
Колористика та контрастність (I_2)	85	30	60	30
Ієрархія візуальних елементів (I_1)	65	40	40	20
Просторовий баланс (I_4)	45	30	50	20

Враховуючи первинні ваги факторів, одержані внаслідок застосування методу ранжування, та можливі оцінки згідно з шкалою Сааті розроблено матрицю попарних порівнянь факторів (табл. 3.14) [119].

Таблиця 3.14

Порівняння Парето-оптимальних факторів
інформаційної архітектури та візуального дизайну

	I_5	I_2	I_1	I_4
I_5	1	4	6	8
I_2	1/4	1	3	5
I_1	1/6	1/3	1	3
I_4	1/8	1/5	1/3	1

Ваги факторів інформаційної архітектури та візуального дизайну [105]:

$$w_1 = 0,61; w_2 = 0,23; w_3 = 0,11; w_4 = 0,05.$$

Критерії нормалізації [104, 105]:

$$\lambda_{\max} = 4,147, NQ = 0,049, IQ = 0,054.$$

Матриці для порівняння варіантів розроблення інформаційної архітектури та візуального дизайну за факторами Парето-оптимальної множини представлені у табл. 3.15 [104, 105, 119, 123].

Таблиця 3.15

Порівняння альтернатив щодо факторів
інформаційної архітектури та візуального дизайну

Фактори	a_i/a_j	a_1	a_2	a_3
Композиція та ритм макету (I_5)	a_1	1	2	2
	a_2	1/2	1	1
	a_3	1/2	1	1
Колористика та контрастність (I_2)	a_1	1	1/4	1
	a_2	4	1	4
	a_3	1	1/4	1
Ієрархія візуальних елементів (I_1)	a_1	1	1	3
	a_2	1	1	3
	a_3	1/3	1/3	1
Просторовий баланс (I_4)	a_1	1	1/3	2
	a_2	3	1	4
	a_3	1/2	1/4	1

Результати порівняння альтернатив за факторами інформаційної архітектури та візуального дизайну відображені у табл. 3.16 [43, 104, 105].

Таблиця 3.16

Результати опрацювання матриць попарних порівнянь

Фактори	Критерії нормалізації			Корисність альтернатив		
	Максимальне власне значення вектора $\lambda_{\max}$	Індекс узгодженості NQ	Відношення узгодженості IQ	q_{i1}	q_{i2}	q_{i3}
I_5	3	0	0	0,5	0,25	0,25
I_2	3	0	0	0,166	0,666	0,166
I_1	3	0	0	0,428	0,428	0,142
I_4	3,018	0,009	0,016	0,238	0,625	0,136

Підставивши дані у вираз (3.7) одержано такі оцінки корисності: $Q(a_1) = 0,402$; $Q(a_2) = 0,384$; $Q(a_3) = 0,213$. Відповідно до одержаних результатів оптимальним є варіант a_1 , а визначальними в однаковій мірі є фактори I_5 (композиція та ритм макету) та I_1 (ієрархія візуальних елементів).

3.3. Побудова структури нечітких відношень за факторами інтегральних характеристик проектування та дизайну вебдодатків

Аналіз, що ґрунтується на нечіткому відношенні переваги дозволяє відобразити відношення між елементами множини альтернатив. Такі альтернативи зазвичай характеризуються нечіткими або частково відомими властивостями. Уніфікованість бази для порівняння елементів забезпечується ступенем домінування однієї альтернативи над іншою у вигляді функції належності на інтервалі $[0;1]$. Варто зазначити, що до уваги доцільно приймати лише Парето-оптимальні фактори, як і при лінійній згортці факторів [122, 124].

Припустимо, що розглядається пара альтернатив (a_i, a_j) множини A , для яких необхідно визначити характер переваги. Відношення нестрогої переваги F може відображати такі ситуації: одна альтернатива не поступається іншій чи значно переважає іншу, тобто $a_i \geq a_j$, $(a_i, a_j) \in F$ або $a_j \geq a_i$, $(a_j, a_i) \in F$; аналізовані альтернативи не піддаються однозначному порівнянню $(a_i, a_j) \notin F$, $(a_j, a_i) \notin F$ [104, 127].

Якщо оцінювання здійснюється на основі функцій корисності f_j , де j — фактор за яким оцінюють, тоді перевага може бути виражена через числові значення цих функцій. Корисність кожної альтернативи $a \in A$ за фактором j визначається величиною $f_j(a)$. Отже, альтернатива a_i оцінюється вище ніж альтернативу a_j якщо $f_j(a_i) > f_j(a_j)$. Наведені міркування описано відношенням переваги F_j [127, 128]:

$$F_j = \{(a_i, a_j): f_j(a_i) \geq f_j(a_j), a_i, a_j \in A\} \quad (3.8)$$

Пошук Парето-оптимального варіанту $a_o \in A$ здійснюється за максимальним значенням оцінок усіх факторів [127, 128]:

$$f_j(a_o) \geq f_j(a_j), \forall j = 1, m; \forall a_j \in A \quad (3.9)$$

Для об'єднання всіх факторів, що визначають множину Парето, доцільно скористатися методом перетину множин. Зазначений метод забезпечує врахування всіх значущих характеристик об'єкта дослідження. Множину альтернатив, що задовольняють вимоги окремих факторів позначено як P_1 . Вона формується у результаті послідовного перетину множин переваги F_j :

$P_1 = \bigcap_{j=1}^m F_j$. Тобто, P_1 містить лише прийнятні за усіма факторами альтернативи [43, 104, 105, 127].

Для нечіткого порівняння введено функцію належності $\mu_j(a_i, a_j)$ [127]:

$$\mu_j(a_i, a_j) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } f_j(a_i) \geq f_j(a_j), \text{ тобто } (a_i, a_j) \in F_j \\ 0, & \text{якщо } (a_i, a_j) \notin F_j \end{cases} \quad (3.10)$$

Якщо існує перевага a_i над a_j , тобто $f_j(a_i) \geq f_j(a_j)$, функція належності приймає значення одиниці. Якщо ж таке співвідношення не виконується, функція набуває значення нуля [43, 104, 127].

Ступінь належності пари альтернативи до множини P_1 обмежується найменшим ступенем переваги серед усіх розглянутих факторів [127–129]:

$$\mu_{P_1}(a_i, a_j) = \min \{ \mu_1(a_i, a_j), \mu_2(a_i, a_j), \dots, \mu_n(a_i, a_j) \} \quad (3.11)$$

Тобто для остаточної оцінки відносної переваги між двома альтернативами визначальним є фактор з найменш вираженою перевагою. Такий підхід узгоджується з принципами теорії нечітких множин [129].

Агрегація також може здійснюватися з врахуванням вагових коефіцієнтів факторів w_i та функцій корисності [43, 104, 127]:

$$R(a) = \min_j w_j f_j(a) \quad (3.12)$$

Застосування вагових коефіцієнтів дозволяє вивести ще одну форму об'єднання відношень — P_2 . У цьому випадку оцінка альтернативи визначається як зважена сума функцій корисності [43, 127, 128]:

$$P_2 = \sum_{j=1}^m w_j f_j(a), \text{ де } \sum_{j=1}^m w_j = 1, w_j \geq 0 \quad (3.13)$$

Нормування вагових коефіцієнтів гарантує збереження співмірності результатів і дозволяє проводити коректне порівняння альтернатив [129].

Відповідно, функція належності для відношення P_2 має вид [127]:

$$\mu_{P_2}(a_i, a_j) = \sum_{j=1}^m w_j \mu_j(a_i, a_j) \quad (3.14)$$

На основі викладених теоретичних положень проведено нечітке порівняння альтернатив щодо процесу формування ергономіки та когнітивних принципів взаємодії з інтерфейсами вебдодатків. Нехай виокремлено три

альтернативи a_1, a_2, a_3 , що належать множині A , тобто $A = \{a_1, a_2, a_3\}$. Нечіткими відношеннями за якими здійснюється порівняння є фактори Парето-оптимальної множини: F_1 — консистентність дизайн-моделей; F_2 — модальність інтерфейсу; F_3 — масштабованість; F_4 — зворотний зв'язок. Кожному виокремленому відношенню належать відповідні ваги w_j і функції належності $\mu_j(a_i, a_j)$. Враховуючи наявні вхідні дані, необхідно визначити агреговане відношення P_1 . Щоб встановити, які з альтернатив не є домінованими, формується функція належності такого виду [127]:

$$\mu_{P_1}^{nd}(a) = 1 - \sup_{a \in A} \left\{ \sum_{j=1}^4 \mu_{P_1}(a_j, a_i) - \mu_{P_1}(a_i, a_j) \right\} \quad (3.15)$$

Оператор супремуму визначає максимальне значення переваги інших альтернатив над аналізованою. Чим меншим буде це максимальне значення, тим сильніші позиції займає альтернатива серед решти [129].

Функція належності для об'єднання P_2 розраховується через вагову суму всіх часткових функцій належності [127, 128]:

$$\mu_{P_2}(a_i, a_j) = \sum_{j=1}^4 w_j \mu_j(a_i, a_j), \quad \sum_{j=1}^4 w_j = 1, \quad w_j \geq 0 \quad (3.16)$$

Функція належності для множини не домінованих альтернатив P_2^{nd} щодо згортки P_2 має вид [43, 104, 105, 127]:

$$\mu_{P_2}^{nd}(a) = 1 - \sup_{a \in A} \left\{ \sum_{j=1}^4 \mu_{P_2}(a_j, a_i) - \mu_{P_2}(a_i, a_j) \right\} \quad (3.17)$$

Для визначення спільної множини альтернатив здійснено перетин множин не домінованих рішень P_1^{nd} та P_2^{nd} [43, 104, 105, 127]:

$$P_{nd} = P_1^{nd} \cap P_2^{nd} \quad (3.18)$$

Тобто, до спільної множини потрапляють лише ті альтернативи, які не домінуються в обох вихідних множинах одночасно. Функція належності об'єднаної множини описується таким чином [127–129]:

$$\mu_{\text{нo}}(a) = \min\{\mu_{P_1}^{\text{нo}}(a), \mu_{P_2}^{\text{нo}}(a)\} \quad (3.19)$$

Ступінь належності елемента a до спільної множини визначається як мінімальне значення між його ступенями належності в кожній із вихідних множин. При виборі остаточного рішення пріоритет надається альтернативі з найвищим ступенем невідомості [43, 104, 105, 127].

Здійснено порівняння варіантів процесу формування ергономіки та когнітивних принципів взаємодії з інтерфейсами вебдодатків за Парето-оптимальним факторами — відношеннями переваги: F_1 (консистентність дизайн-моделей) — $a_1 = a_2, a_2 > a_3$; F_2 (модальність інтерфейсу) — $a_1 = a_2, a_2 < a_3$; F_3 (масштабованість) — $a_1 < a_2, a_2 < a_3$; F_4 (зворотний зв'язок) — $a_1 < a_2, a_1 > a_3$. При цьому, вагові значення є такими: $w_1 = 0,56$; $w_2 = 0,26$; $w_3 = 0,11$; $w_4 = 0,07$.

Згідно з (3.10) одержано матриці відношення [43, 104, 105, 127] F_1, F_2, F_3, F_4 (табл. 3.17).

Таблиця 3.17

Матриці відношення

$\mu_{F_j}(a_i, a_j)$	a_i/a_j	a_1	a_2	a_3
$\mu_{F_1}(a_i, a_j)$	a_1	1	1	1
	a_2	1	1	1
	a_3	0	0	1
$\mu_{F_2}(a_i, a_j)$	a_1	1	1	0
	a_2	1	1	0
	a_3	1	1	1
$\mu_{F_3}(a_i, a_j)$	a_1	1	0	0
	a_2	1	1	0
	a_3	1	1	1
$\mu_{F_4}(a_i, a_j)$	a_1	1	0	1
	a_2	1	1	1
	a_3	0	0	1

Об'єднання відношень $P_1 = F_1 \cap F_2 \cap F_3 \cap F_4$ подано у табл. 3.18. Якщо хоча б для одного відношення a_i/a_j у табл. 3.17 вказана відсутність переваги, тобто 0, то і для об'єднання a_i/a_j у відповідній клітинці вказано 0 [127].

Таблиця 3.18

Об'єднання відношень

	a_i/a_j	a_1	a_2	a_3
$\mu_{P_1}(a_i, a_j)$	a_1	1	0	0
	a_2	1	1	0
	a_3	0	0	1

Формально підмножину недовідомих альтернатив відносно відношення P_1 можна описати за допомогою функції належності до цієї множини. Значення функції $\mu_{P_1}^{nd}(a)$ для альтернативи a обчислюється за наступним виразом [43, 104, 105, 127]:

$$\mu_{P_1}^{nd}(a) = 1 - \sup_{a \in A} \{ \mu_{P_1}(a_j, a_i) - \mu_{P_1}(a_i, a_j) \} \quad (3.20)$$

При підстановці значень у формулу (3.20), одержано такі вирази:

$$\mu_{P_1}^{nd}(a_1) = 1 - \sup_{a \in A} \{ 1 - 0; 0 - 0 \} = 0;$$

$$\mu_{P_1}^{nd}(a_2) = 1 - \sup_{a \in A} \{ 0 - 1; 0 - 0 \} = 1;$$

$$\mu_{P_1}^{nd}(a_3) = 1 - \sup_{a \in A} \{ 0 - 0; 0 - 0 \} = 1.$$

$$\mu_{P_1}^{nd}(a) = [0; 1; 1]$$

Згідно з виразом (3.13), побудова згортки нечіткого відношення P_2 , $j=1,4$ виконується таким чином [43, 104, 105, 127]:

$$P_2 = \sum_{j=1}^4 w_j f_j(a) \quad (3.21)$$

Для переходу від скалярної оцінки до парного порівняння альтернатив вводиться функція належності [43, 104, 105, 127]:

$$\mu_{P_2}(a_i, a_j) = \sum_{k=1}^4 w_k \mu_{F_k}(a_i, a_j) \quad (3.22)$$

Визначено елементи матриці об'єднання P_2 за кожною альтернативою [127]:

$$\mu_{P_2}(a_1, a_2) = w_1 \mu_{F_1}(a_1, a_2) + w_2 \mu_{F_2}(a_1, a_2) + w_3 \mu_{F_3}(a_1, a_2) + w_4 \mu_{F_4}(a_1, a_2);$$

$$\mu_{P_2}(a_1, a_3) = w_1 \mu_{F_1}(a_1, a_3) + w_2 \mu_{F_2}(a_1, a_3) + w_3 \mu_{F_3}(a_1, a_3) + w_4 \mu_{F_4}(a_1, a_3);$$

$$\mu_{P_2}(a_2, a_1) = w_1 \mu_{F_1}(a_2, a_1) + w_2 \mu_{F_2}(a_2, a_1) + w_3 \mu_{F_3}(a_2, a_1) + w_4 \mu_{F_4}(a_2, a_1);$$

$$\mu_{P_2}(a_2, a_3) = w_1 \mu_{F_1}(a_2, a_3) + w_2 \mu_{F_2}(a_2, a_3) + w_3 \mu_{F_3}(a_2, a_3) + w_4 \mu_{F_4}(a_2, a_3);$$

$$\mu_{P_2}(a_3, a_1) = w_1 \mu_{F_1}(a_3, a_1) + w_2 \mu_{F_2}(a_3, a_1) + w_3 \mu_{F_3}(a_3, a_1) + w_4 \mu_{F_4}(a_3, a_1);$$

$$\mu_{P_2}(a_3, a_2) = w_1 \mu_{F_1}(a_3, a_2) + w_2 \mu_{F_2}(a_3, a_2) + w_3 \mu_{F_3}(a_3, a_2) + w_4 \mu_{F_4}(a_3, a_2).$$

За даними таблиці 3.17 одержано:

$$\mu_{P_2}(a_1, a_2) = 0,56 \cdot 1 + 0,26 \cdot 1 + 0,11 \cdot 0 + 0,07 \cdot 0 = 0,82;$$

$$\mu_{P_2}(a_1, a_3) = 0,56 \cdot 1 + 0,26 \cdot 0 + 0,11 \cdot 0 + 0,07 \cdot 1 = 0,63;$$

$$\mu_{P_2}(a_2, a_1) = 0,56 \cdot 1 + 0,26 \cdot 1 + 0,11 \cdot 1 + 0,07 \cdot 1 = 1;$$

$$\mu_{P_2}(a_2, a_3) = 0,56 \cdot 1 + 0,26 \cdot 0 + 0,11 \cdot 0 + 0,07 \cdot 1 = 0,63;$$

$$\mu_{P_2}(a_3, a_1) = 0,56 \cdot 0 + 0,26 \cdot 1 + 0,11 \cdot 1 + 0,07 \cdot 0 = 0,37;$$

$$\mu_{P_2}(a_3, a_2) = 0,56 \cdot 0 + 0,26 \cdot 1 + 0,11 \cdot 1 + 0,07 \cdot 0 = 0,37.$$

Представлено значення функцій належності агрегованого відношення переваги у табличному вигляді (табл. 3.19).

Таблиця 3.19

Значення функцій належності

$\mu_{P_2}(a_i, a_j)$	a_i/a_j	a_1	a_2	a_3
	a_1	1	0,82	0,63
	a_2	1	1	0,63
	a_3	0,37	0,37	1

Згідно з виразом (3.17) сформовано множини невідомінованих альтернатив щодо P_2 [127]:

$$\begin{aligned}\mu_{P_2}^{n\partial}(a_1) &= 1 - \sup\{(\mu_{P_2}(a_2, a_1) - \mu_{P_2}(a_1, a_2)); (\mu_{P_2}(a_3, a_1) - \mu_{P_2}(a_1, a_3))\}; \\ \mu_{P_2}^{n\partial}(a_2) &= 1 - \sup\{(\mu_{P_2}(a_1, a_2) - \mu_{P_2}(a_2, a_1)); (\mu_{P_2}(a_3, a_2) - \mu_{P_2}(a_2, a_3))\}; \\ \mu_{P_2}^{n\partial}(a_3) &= 1 - \sup\{(\mu_{P_2}(a_1, a_3) - \mu_{P_2}(a_3, a_1)); (\mu_{P_2}(a_2, a_3) - \mu_{P_2}(a_3, a_2))\}.\end{aligned}$$

Згідно значень функцій належності з табл. 3.19 отримано:

$$\begin{aligned}\mu_{P_2}^{n\partial}(a_1) &= 1 - \sup\{(1 - 0,82); (0,37 - 0,63)\} = 0,82; \\ \mu_{P_2}^{n\partial}(a_2) &= 1 - \sup\{(0,82 - 1); (0,37 - 0,63)\} = 1; \\ \mu_{P_2}^{n\partial}(a_3) &= 1 - \sup\{(0,63 - 0,37); (0,63 - 0,37)\} = 0,74.\end{aligned}$$

Функція належності нечіткого відношення переваги має вид:

$$\mu_{P_2}^{n\partial}(a) = [0,82; 1; 0,74].$$

Перетин невідомінованих множин $P_{n\partial} = P_1^{n\partial} \cap P_2^{n\partial}$ обчислюється так [43, 104, 105, 127]:

$$\mu_P^{n\partial}(a) = \min\{\mu_{P_1}^{n\partial}(a_i), \mu_{P_2}^{n\partial}(a_i)\}, \quad i = 1, 3. \quad (3.23)$$

Тоді результуюча функція є наступною: $\mu_P^{n\partial}(a) = [0; 1; 0,74]$.

Проведений аналіз показав, що найвище значення функції належності $\mu_P^{n\partial}(a_i)$ спостерігається для альтернативи a_2 . Це дозволяє зробити висновок, що a_2 є найкращим серед усіх розглянутих варіантів і може вважатися оптимальним рішенням у задачі формування ергономіки та когнітивних принципів взаємодії з інтерфейсами вебдодатків. Отже, надійність та достовірність результатів підтверджена.

Аналогічно визначено оптимальний варіант формування доступності та інклюзивності вебдодатків. Перш за все сформовано нечітке відношення переваги щодо найпріоритетніших факторів: F_1 (верифікація відповідності стандартам доступності) — $a_1 > a_2, a_2 = a_3$; F_2 (полімодальна репрезентація контенту) — $a_1 > a_2, a_2 > a_3$; F_3 (персоналізація параметрів) — $a_1 > a_2, a_1 = a_3$; F_4 (альтернативні механізми навігації) — $a_1 < a_2, a_1 = a_3$. Вагові значення

одержані шляхом попарних порівнянь Парето-оптимальних факторів доступності та інклюзивності: $w_1 = 0,62$; $w_2 = 0,27$; $w_3 = 0,07$; $w_4 = 0,05$.

Матриці відношення F_1, F_2, F_3, F_4 [43, 104, 105, 127] представлені у таблиці 3.20.

Таблиця 3.20

Матриці відношення

$\mu_{F_j}(a_i, a_j)$	a_i/a_j	a_1	a_2	a_3
$\mu_{F_1}(a_i, a_j)$	a_1	1	1	1
	a_2	0	1	1
	a_3	0	1	1
$\mu_{F_2}(a_i, a_j)$	a_1	1	1	1
	a_2	0	1	1
	a_3	0	0	1
$\mu_{F_3}(a_i, a_j)$	a_1	1	1	1
	a_2	0	1	0
	a_3	1	1	1
$\mu_{F_4}(a_i, a_j)$	a_1	1	0	1
	a_2	1	1	1
	a_3	1	0	1

Об'єднання відношень P_1 [43, 104, 105, 127] наведено у табл. 3.21.

Таблиця 3.21

Об'єднання відношень

$\mu_{P_1}(a_i, a_j)$	a_i/a_j	a_1	a_2	a_3
	a_1	1	0	1
	a_2	0	1	0
	a_3	0	0	1

При підстановці значень у вираз (3.20), одержано такі вирази [127]:

$$\mu_{P_1}^{n\partial}(a_1) = 1 - \sup_{a \in A} \{0 - 0; 0 - 1\} = 1;$$

$$\mu_{P_1}^{n\partial}(a_2) = 1 - \sup_{a \in A} \{0 - 0; 0 - 0\} = 1;$$

$$\mu_{P_1}^{n\partial}(a_3) = 1 - \sup_{a \in A} \{1 - 0; 0 - 0\} = 0.$$

$$\mu_{P_1}^{n\partial}(a) = [1; 1; 0]$$

Згідно виразу (3.22) та даних таблиці 3.20 елементи матриці об'єднання P_2 за кожною альтернативою формування доступності та інклюзивності веб-додатків є такими:

$$\mu_{P_2}(a_1, a_2) = 0,62 \cdot 1 + 0,27 \cdot 1 + 0,07 \cdot 1 + 0,05 \cdot 0 = 0,96;$$

$$\mu_{P_2}(a_1, a_3) = 0,62 \cdot 1 + 0,27 \cdot 1 + 0,07 \cdot 1 + 0,05 \cdot 1 = 1;$$

$$\mu_{P_2}(a_2, a_1) = 0,62 \cdot 0 + 0,27 \cdot 0 + 0,07 \cdot 0 + 0,05 \cdot 1 = 0,05;$$

$$\mu_{P_2}(a_2, a_3) = 0,62 \cdot 1 + 0,27 \cdot 1 + 0,07 \cdot 0 + 0,05 \cdot 1 = 0,94;$$

$$\mu_{P_2}(a_3, a_1) = 0,62 \cdot 0 + 0,27 \cdot 0 + 0,07 \cdot 1 + 0,05 \cdot 1 = 0,12;$$

$$\mu_{P_2}(a_3, a_2) = 0,62 \cdot 1 + 0,27 \cdot 0 + 0,07 \cdot 1 + 0,05 \cdot 0 = 0,69.$$

Значення функцій належності щодо об'єднання P_2 (табл. 3.22):

Таблиця 3.22

Значення функцій належності

$\mu_{P_2}(a_i, a_j)$	a_i/a_j	a_1	a_2	a_3
	a_1	1	0,96	1
	a_2	0,05	1	0,94
	a_3	0,12	0,69	1

На основі значень функцій належності з табл. 3.19 отримано множини недомінованих альтернатив:

$$\mu_{P_2}^{n\partial}(a_1) = 1 - \sup \{(0,05 - 0,96); (0,12 - 1)\} = 1;$$

$$\mu_{P_2}^{n\partial}(a_2) = 1 - \sup \{(0,96 - 0,05); (0,69 - 0,94)\} = 0,09;$$

$$\mu_{P_2}^{n\partial}(a_3) = 1 - \sup \{(1 - 0,12); (0,94 - 0,69)\} = 0,12.$$

Одержана функція належності нечіткого відношення переваги має вид:
 $\mu_{P_2}^{n\partial}(a_i) = [1; 0,09; 0,12]$. У результаті перетину недовінованих множин
 $P_{n\partial} = P_1^{n\partial} \cap P_2^{n\partial}$ обчислено функцію: $\mu_P^{n\partial}(a) = [1; 0,09; 0]$. Оптимальним є варі-
 ант a_1 , значення оцінки корисності якого є найвищим. Отже, результати бага-
 тофакторної оптимізації підтверджено.

Наступним досліджуваним процесом є розроблення інформаційної архі-
 тектури та візуального дизайну з ваговими значеннями факторів $w_1 = 0,61$;
 $w_2 = 0,23$; $w_3 = 0,11$; $w_4 = 0,05$ та такими нечіткими відношеннями: F_1 (компо-
 зиція та ритм макету) — $a_1 > a_2$, $a_2 = a_3$; F_2 (колористика та контрастність) —
 $a_1 < a_2$, $a_1 = a_3$; F_3 (ієрархія візуальних елементів) — $a_1 = a_2$, $a_1 > a_3$; F_4 (прос-
 торовий баланс) — $a_1 < a_2$, $a_1 > a_3$.

Матриці відношення F_1 , F_2 , F_3 , F_4 [43, 104, 105, 127] представлені у таб-
 лиці 3.23.

Таблиця 3.23

Матриці відношення

$\mu_{F_j}(a_i, a_j)$	a_i/a_j	a_1	a_2	a_3
$\mu_{F_1}(a_i, a_j)$	a_1	1	1	1
	a_2	0	1	1
	a_3	0	1	1
$\mu_{F_2}(a_i, a_j)$	a_1	1	0	1
	a_2	1	1	1
	a_3	1	0	1
$\mu_{F_3}(a_i, a_j)$	a_1	1	1	1
	a_2	1	1	1
	a_3	0	0	1
$\mu_{F_4}(a_i, a_j)$	a_1	1	0	1
	a_2	1	1	1
	a_3	0	0	1

Об'єднання відношень P_1 (табл. 3.24) [43, 104, 105, 127]:

Таблиця 3.24

Об'єднання відношень

$\mu_{P_1}(a_i, a_j)$	a_i/a_j	a_1	a_2	a_3
	a_1	1	0	1
	a_2	0	1	1
	a_3	0	0	1

При підстановці значень у вираз (3.20) [127], одержано:

$$\mu_{P_1}^{no}(a_1) = 1 - \sup_{a \in A} \{0 - 0; 0 - 1\} = 1;$$

$$\mu_{P_1}^{no}(a_2) = 1 - \sup_{a \in A} \{0 - 0; 0 - 1\} = 1;$$

$$\mu_{P_1}^{no}(a_3) = 1 - \sup_{a \in A} \{1 - 0; 1 - 0\} = 0.$$

$$\mu_{P_1}^{no}(a) = [1; 1; 0]$$

Визначено елементи матриці щодо об'єднання P_2 , підставивши значення з таблиці 3.23 у формулу (3.22):

$$\mu_{P_2}(a_1, a_2) = 0,61 \cdot 1 + 0,23 \cdot 0 + 0,11 \cdot 1 + 0,05 \cdot 0 = 0,72;$$

$$\mu_{P_2}(a_1, a_3) = 0,61 \cdot 1 + 0,23 \cdot 1 + 0,11 \cdot 1 + 0,05 \cdot 1 = 1;$$

$$\mu_{P_2}(a_2, a_1) = 0,61 \cdot 0 + 0,23 \cdot 1 + 0,11 \cdot 1 + 0,05 \cdot 1 = 0,39;$$

$$\mu_{P_2}(a_2, a_3) = 0,61 \cdot 1 + 0,23 \cdot 1 + 0,11 \cdot 1 + 0,05 \cdot 1 = 1;$$

$$\mu_{P_2}(a_3, a_1) = 0,61 \cdot 0 + 0,23 \cdot 1 + 0,11 \cdot 0 + 0,05 \cdot 0 = 0,23;$$

$$\mu_{P_2}(a_3, a_2) = 0,61 \cdot 1 + 0,23 \cdot 0 + 0,11 \cdot 0 + 0,05 \cdot 0 = 0,61.$$

Значення функцій належності щодо об'єднання P_2 (табл. 3.25):

Таблиця 3.25

Значення функцій належності

$\mu_{P_2}(a_i, a_j)$	a_i/a_j	a_1	a_2	a_3
	a_1	1	0,72	1
	a_2	0,39	1	1
	a_3	0,23	0,61	1

Відповідні множини недовідомих альтернатив мають вид:

$$\mu_{P_2}^{nd}(a_1) = 1 - \sup\{(0,39 - 0,72); (0,23 - 1)\} = 1;$$

$$\mu_{P_2}^{nd}(a_2) = 1 - \sup\{(0,72 - 0,39); (0,61 - 1)\} = 0,67;$$

$$\mu_{P_2}^{nd}(a_3) = 1 - \sup\{(1 - 0,23); (1 - 0,61)\} = 0,23.$$

$\mu_{P_2}^{nd}(a) = [1; 0,67; 0]$ — результуюча функція належності нечіткого відношення переваги, максимальне значення якої вказує на оптимальний варіант розроблення інформаційної архітектури та візуального дизайну вебдодатків. Відповідно, найкращою альтернативою є a_1 , що підтверджено методом лінійного об'єднання критеріїв.

3.4. Вибір оптимального варіанту проєктування та дизайну вебдодатків

Здійснення вибору оптимального варіанту проєктування та дизайну вебдодатків за методом лінійного об'єднання критеріїв ґрунтується на порівнянні альтернатив за трьома основними факторами [43, 104, 105]. Нехай множина факторів проєктування та дизайну вебдодатків матиме вид: $X = \{X_1, X_2, X_3\}$, де X_1 — ергономіка та когнітивні принципи взаємодії, X_2 — доступність та інклюзивність, X_3 — інформаційна архітектура та візуальний дизайн. Тоді сформована таблиця альтернатив має вид (табл. 3.26):

Таблиця 3.26

Альтернативи проєктування та дизайну вебдодатків

Фактори проєктування та дизайну вебдодатків	Оцінювання альтернатив		
	a_1	a_2	a_3
Ергономіка та когнітивні принципи взаємодії (X_1)	30	40	30
Доступність та інклюзивність (X_2)	20	30	50
Інформаційна архітектура та візуальний дизайн (X_3)	50	30	20

Ергономіка і когнітивні принципи взаємодії здійснюють вирішальний вплив на ефективність використання вебдодатків, формуючи основу користувачького досвіду. Доступність та інклюзивність є важливими для забезпечення універсального доступу, однак менш пріоритетними ніж перший фактор. Інформаційна архітектура та візуальний дизайн має дещо менший вплив, порівняно з іншими факторами. Цей фактор сприяє цілісності взаємодії. Порівняння факторів [119] представлене у таблиці 3.27.

Таблиця 3.27

Порівняння факторів проєктування та дизайну вебдодатків

	X_1	X_2	X_3
X_1	1	3	5
X_2	1/3	1	3
X_3	1/5	1/3	1

Визначивши нормалізований вектор [124–126], одержано вагові значення факторів проєктування та дизайну вебдодатків: $w_1 = 0,64$; $w_2 = 0,26$; $w_3 = 0,1$.

Критерії нормалізації знаходяться в межах норми $\lambda_{\max} = 3,039$, $NQ = 0,193$, $XQ = 0,033$. На наступному етапі дослідження сформовано матриці, в яких попарно порівнюються варіанти проєктування та дизайну вебдодатків (табл. 3.28) [43, 104, 105].

Таблиця 3.28

Порівняння варіантів проєктування та дизайну вебдодатків

Фактори	a_i/a_j	a_1	a_2	a_3
Ергономіка та когнітивні принципи взаємодії (X_1)	a_1	1	1/2	1
	a_2	2	1	2
	a_3	1	1/2	1
Доступність та інклюзивність (X_2)	a_1	1	1/2	1/4
	a_2	2	1	1/3
	a_3	4	3	1
Інформаційна архітектура та візуальний дизайн (X_3)	a_1	1	3	4
	a_2	1/3	1	2
	a_3	1/4	1/2	1

Результати опрацювання матриць попарних порівнянь альтернативних варіантів та відповідні критерії, що визначають узгодженість результатів [127, 128], представлені у таблиці 3.29.

Таблиця 3.29

Результати опрацювання матриць попарних порівнянь

Фактори	Критерії нормалізації			Корисність альтернатив		
	Максимальне власне значення вектора $\lambda_{\max}$	Індекс узгодженості NQ	Відношення узгодженості XQ	q_{i1}	q_{i2}	q_{i3}
X_1	3	0	0	0,25	0,5	0,25
X_2	3,018	0,009	0,016	0,136	0,238	0,625
X_3	3,018	0,009	0,016	0,625	0,238	0,136

Згідно з (3.6) сформовано вирази для визначення багатокритеріальних оцінок корисності трьох варіантів проектування та дизайну вебдодатків [43, 104, 105]:

$$\begin{aligned}
 Q(a_1) &= w_1 \cdot q_{11} + w_2 \cdot q_{21} + w_3 \cdot q_{31}; \\
 Q(a_2) &= w_1 \cdot q_{12} + w_2 \cdot q_{22} + w_3 \cdot q_{32}; \\
 Q(a_3) &= w_1 \cdot q_{13} + w_2 \cdot q_{23} + w_3 \cdot q_{33}.
 \end{aligned}
 \tag{3.24}$$

На основі даних табл. 3.29 та виразів (3.24) одержано:

$$\begin{aligned}
 Q(a_1) &= 0,64 \cdot 0,25 + 0,26 \cdot 0,5 + 0,1 \cdot 0,25 = 0,258; \\
 Q(a_2) &= 0,64 \cdot 0,136 + 0,26 \cdot 0,238 + 0,1 \cdot 0,625 = 0,406; \\
 Q(a_3) &= 0,64 \cdot 0,625 + 0,26 \cdot 0,238 + 0,1 \cdot 0,136.
 \end{aligned}$$

Найвище значення оцінки корисності належить другій альтернативі, отже це найкращий варіант реалізації процесу проектування та дизайну вебдодатків.

Одержані результати доцільно перевірити за методом на основі нечітких порівнянь альтернатив за факторами [127, 128]: F_1 (ергономіка та когнітивні принципи взаємодії) — $a_1 < a_2, a_1 = a_3$; F_2 (доступність та інклюзивність) —

$a_1 < a_2, a_2 < a_3$; F_3 (інформаційна архітектура та візуальний дизайн) — $a_1 > a_2, a_2 > a_3$. Тоді матриці відношень F_1, F_2, F_3, F_4 мають вид (табл. 3.30):

Таблиця 3.30

Матриці відношення

$\mu_{F_j}(a_i, a_j)$	a_i/a_j	a_1	a_2	a_3
$\mu_{F_1}(a_i, a_j)$	a_1	1	0	1
	a_2	1	1	1
	a_3	1	0	1
$\mu_{F_2}(a_i, a_j)$	a_1	1	0	0
	a_2	1	1	0
	a_3	1	1	1
$\mu_{F_3}(a_i, a_j)$	a_1	1	1	1
	a_2	0	1	1
	a_3	0	0	1

Після об'єднання відношень [43, 104, 105, 128, 129] $P_1 = F_1 \cap F_2 \cap F_3$ одержано (табл. 3.31):

Таблиця 3.31

Об'єднання відношень

$\mu_{P_1}(a_i, a_j)$	a_i/a_j	a_1	a_2	a_3
$\mu_{P_1}(a_i, a_j)$	a_1	1	0	0
	a_2	0	1	0
	a_3	0	0	1

Одержано множину недовідомих альтернатив стосовно об'єднання P_1 на основі (3.20) [43, 104, 105, 127]:

$$\mu_{P_1}^{nd}(a_1) = 1 - \sup_{a \in A} \{0 - 0; 0 - 0\} = 1;$$

$$\mu_{P_1}^{nd}(a_2) = 1 - \sup_{a \in A} \{0 - 0; 0 - 0\} = 1;$$

$$\mu_{P_1}^{nd}(a_3) = 1 - \sup_{a \in A} \{0 - 0; 0 - 0\} = 1;$$

$$\mu_{P_1}^{no}(a) = [1; 1; 1].$$

З огляду на кількість факторів, за якими порівнюються альтернативи, елементи матриці об'єднання P_2 обчислюються та такими виразами [127, 128]:

$$\mu_{P_2}(a_1, a_2) = w_1\mu_{F_1}(a_1, a_2) + w_2\mu_{F_2}(a_1, a_2) + w_3\mu_{F_3}(a_1, a_2);$$

$$\mu_{P_2}(a_1, a_3) = w_1\mu_{F_1}(a_1, a_3) + w_2\mu_{F_2}(a_1, a_3) + w_3\mu_{F_3}(a_1, a_3);$$

$$\mu_{P_2}(a_2, a_1) = w_1\mu_{F_1}(a_2, a_1) + w_2\mu_{F_2}(a_2, a_1) + w_3\mu_{F_3}(a_2, a_1);$$

$$\mu_{P_2}(a_2, a_3) = w_1\mu_{F_1}(a_2, a_3) + w_2\mu_{F_2}(a_2, a_3) + w_3\mu_{F_3}(a_2, a_3);$$

$$\mu_{P_2}(a_3, a_1) = w_1\mu_{F_1}(a_3, a_1) + w_2\mu_{F_2}(a_3, a_1) + w_3\mu_{F_3}(a_3, a_1);$$

$$\mu_{P_2}(a_3, a_2) = w_1\mu_{F_1}(a_3, a_2) + w_2\mu_{F_2}(a_3, a_2) + w_3\mu_{F_3}(a_3, a_2).$$

Підставивши вагові коефіцієнти факторів та значення матриць з таблиці 3.30, одержано:

$$\mu_{P_2}(a_1, a_2) = 0,64 \cdot 0 + 0,26 \cdot 0 + 0,1 \cdot 1 = 0,1;$$

$$\mu_{P_2}(a_1, a_3) = 0,64 \cdot 1 + 0,26 \cdot 0 + 0,1 \cdot 1 = 0,74;$$

$$\mu_{P_2}(a_2, a_1) = 0,64 \cdot 1 + 0,26 \cdot 1 + 0,1 \cdot 0 = 0,9;$$

$$\mu_{P_2}(a_2, a_3) = 0,64 \cdot 1 + 0,26 \cdot 0 + 0,1 \cdot 1 = 0,74;$$

$$\mu_{P_2}(a_3, a_1) = 0,64 \cdot 1 + 0,26 \cdot 1 + 0,1 \cdot 0 = 0,9;$$

$$\mu_{P_2}(a_3, a_2) = 0,64 \cdot 0 + 0,26 \cdot 1 + 0,1 \cdot 0 = 0,26.$$

Значення функцій належності записано у відповідні клітинки матриці (табл. 3.32).

Таблиця 3.32

Значення функцій належності

	a_i/a_j	a_1	a_2	a_3
$\mu_{P_2}(a_i, a_j)$	a_1	1	0,1	0,74
	a_2	0,9	1	0,74
	a_3	0,9	0,26	1

Множини невідомованих альтернатив щодо P_2 :

$$\mu_{P_2}^{n\partial}(a_1) = 1 - \sup\{(0,9 - 0,1); (0,9 - 0,74)\} = 0,2;$$

$$\mu_{P_2}^{n\partial}(a_2) = 1 - \sup\{(0,1 - 0,9); (0,26 - 0,74)\} = 1;$$

$$\mu_{P_2}^{n\partial}(a_3) = 1 - \sup\{(0,74 - 0,9); (0,74 - 0,26)\} = 0,52.$$

Отримана функція належності нечіткого відношення переваги альтернатив проєктування та дизайну вебдодатків: $\mu_{P_2}^{n\partial}(a) = [0,2; 1; 0,52]$. При перетині недомінованих множин $P_{n\partial} = P_1^{n\partial} \cap P_2^{n\partial}$ результуючою буде також ця функція [127]: $\mu_{P_2}^{n\partial}(a) = [0,2; 1; 0,52]$.

Оптимальною є друга альтернатива, в якій визначальну роль відіграє фактор ергономіки та когнітивних принципів взаємодії, а доступність та інклюзивність і інформаційна архітектура та візуальний дизайн мають однакові рівні важливості. Одержані результати підтверджено за методами лінійного об'єднання критеріїв та нечітких переваг.

Висновки до розділу 3

1. Обґрунтовано важливість формування ефективної стратегії проєктування та дизайну вебдодатків, що полягає у виокремленні множини альтернатив та виборі оптимальної з них.

2. Здійснено багатокритеріальну оптимізацію на множині можливих рішень, що базується на методі лінійного об'єднання, щодо факторів впливу на формування ергономіки та когнітивних принципів взаємодії, доступності та інклюзивності, інформаційної архітектури та візуального дизайну. Найвище значення оцінки корисності серед альтернатив формування ергономіки та когнітивних принципів взаємодії з інтерфейсами належить другому запроєктованому варіанту $Q(a_2) = 0,379$, в якому найбільшу роль відіграє фактор E_6 (зворотний зв'язок з користувачами). Для формування доступності та інклюзивності вебдодатків оптимальною є перша альтернатива з оцінкою корисності

$Q(a_1) = 0,521$ та домінуючим фактором D_1 (полімодальна репрезентація контенту). Для розроблення інформаційної архітектури та візуального дизайну найкращим є варіант a_1 з оцінкою $Q(a_1) = 0,402$, а визначальними в однаковій мірі є фактори I_5 (композиція та ритм макету) та I_1 (ієрархія візуальних елементів).

3. Сформовано нечіткі відношення переваги між альтернативами формування ергономіки та когнітивних принципів взаємодії, доступності та інклюзивності, інформаційної архітектури та візуального дизайну. Визначено оптимальні альтернативи реалізації за максимальними значеннями функцій належності $\mu_p^{no}(a_i) = 1$. Для ергономіки та когнітивних принципів взаємодії оптимальною є альтернатива a_2 , для доступності та інклюзивності — a_1 , для інформаційної архітектури та візуального дизайну — a_1 . На основі нечіткого порівняння підтверджено результати, одержані за методом лінійного об'єднання критеріїв.

4. Обрано оптимальний варіант проєктування та дизайну вебдодатків за ключовими факторами. Найкращою є друга альтернатива з оцінкою корисності $Q(a_2) = 0,406$ та значенням функції належності $\mu_p^{no}(a_2) = 1$. Визначальну роль відіграє фактор ергономіки та когнітивних принципів взаємодії, а доступність та інклюзивність і інформаційна архітектура та візуальний дизайн мають однакові рівні важливості.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБЛЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ

ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ПРОЄКТУВАННЯ ТА ДИЗАЙНУ ВЕБДОДАТКІВ

4.1. Особливості застосування нечіткої логіки при оцінюванні якості проєктування та дизайну вебдодатків

Нечітка логіка є напрямом математичного моделювання, який дає змогу працювати з неточними і розмитими даними. Вона використовується для опису ситуацій, де звичайна двійкова логіка не працює. У реальних процесах часто зустрічаються оцінки, що задаються словами. Такі оцінки важко подати у вигляді точних чисел. Нечітка логіка дозволяє перевести їх у математичну форму [130, 131].

Нечітка логіка ґрунтується на концепції нечітких множин. Приналежність елемента до множини описує не жорстка межа, а плавний перехід від належності до неналежності. Такий підхід відображає реальні процеси, де класифікація не є однозначною. Функція належності приймає значення у межах від нуля до одиниці. Нуль означає повну відсутність належності. Одиниця означає повну належність. Проміжні значення описують різні ступені відповідності елемента поняттю. Ця властивість робить нечіткі множини придатними для опису складних технологічних систем, де фактори часто мають якісний характер [130–132].

Фазифікація виконує перетворення чітких значень на нечіткі. Кожне значення вхідної змінної отримує функцію належності. Це дозволяє описати фактори, що не мають точного числового вираження. Прикладом є словесні оцінки «низький рівень», «середній рівень», «високий рівень». Зворотна процедура носить назву дефазифікації. Вона перетворює нечітке представлення на конкретне число. Саме дефазифіковане значення використовують під час прийняття практичних рішень [132–135].

Для визначення прогнозованого показника якості проектування та дизайну вебдодатків введемо універсальну множину S , яка охоплює всі значення у межах досліджуваної області. Нечітка підмножина N визначається через функцію належності $\mu_N(s)$ [130, 136]:

$$N = \{(\mu_N(s), s), s \in S\}, \quad (4.1)$$

Функція $\mu_N(s)$ визначає ступінь належності кожного елемента, при цьому $(0 \leq \mu_N(s) \leq 1)$, $N \in S$. Для дискретної та скінченної шкали запис має вигляд [104, 136, 137]:

$$N = (\mu_N(s_1) / s_1, \mu_N(s_2) / s_2, \dots, \mu_N(s_n) / s_n) = \sum_{i=1}^n \mu_N(s_i) / s_i, \quad (4.2)$$

Символ «/» позначає відповідність елемента значенню функції належності. Це не є дією ділення. Функції належності виконують роль ідентифікаторів у нечіткому форматі [104, 136].

Лінгвістичні змінні задають словами або словосполученнями природної мови. Сукупність таких значень називають терм-множиною. Окремі елементи терм-множини є термами. Кожному терму відповідає функція належності. Вона встановлюється на основі експертних даних чи статистичних спостережень [130, 138].

Реалізація процесу проектування та дизайну вебдодатків описується функцією:

$$\Psi = F(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (4.3)$$

де n — кількість факторів.

Вхідні фактори можуть мати як кількісну, так і якісну природу. Якщо значення подані числами, то для кожної змінної можна задати інтервал її можливих значень. Це дозволяє врахувати граничні умови та реальні існуючі обмеження. Нижня межа позначає мінімально допустиме значення параметра, верхня — максимально допустиме. Така форма запису зручна для подальшого

використання в моделі, оскільки дає чітке визначення області допустимих значень змінної [130, 131].

Відповідно до виразу (4.3) і [130–132, 136] проєктування та дизайн веб-додатків описується множиною вхідних змінних x_i і однією вихідною змінною Ψ . Для кількісних змінних інтервал задання можна записати у вигляді:

$$[\underline{x}_i, \overline{x}_i], i = \overline{1, n}; [\underline{\Psi}, \overline{\Psi}]. \quad (4.4)$$

Якщо вхідні змінні не мають числового значення, то їх описують через множину допустимих якісних оцінок. Важливо, що така форма подання дозволяє об'єднати в одній моделі різні типи даних. Це можуть бути значення термів лінгвістичних змінних або умовні одиниці, які визначаються експертним шляхом. У такому випадку формалізація виглядає так [136]:

$$P = \{p^{(1)}, p^{(2)}, \dots, p^{(j)}\}, \quad (4.5)$$

де $p^{(k)}$, $k = \overline{1, j}$ — сукупність значень, що можуть бути виражені у числовій формі або описані словесно; j — індекс, що вказує на їхню кількість.

Вихідна змінна Ψ також може бути виражена у вигляді множини умовних одиниць. Це особливо зручно, коли результат подається не числом, а набором якісних характеристик, кожна з яких має свій ступінь важливості або належності [131, 136]:

$$\Psi = \{\varphi^{(1)}, \varphi^{(2)}, \dots, \varphi^{(g)}\}. \quad (4.6)$$

Зв'язки між вхідними і вихідними змінними встановлює база знань. Вона містить сукупність правил, що відображають залежності у досліджуваному процесі. Базу знань подають у формі матриці. Матриця пов'язує комбінації вхідних факторів з оцінками вихідної змінної. Формулювання зв'язків відбувається через правила виду «якщо — і — тоді». У подальшому з матриці знань формуються нечіткі логічні рівняння. Вони поєднують функції належності вхідних даних з функціями належності результатів [136, 139].

Можливі результуючі операції для двох функцій належності мають вигляд [136, 140, 141]:

$$\mu_1 \vee \mu_2 = \max(\mu_1, \mu_2) = \begin{cases} \mu_1, & \text{if } \mu_1 \geq \mu_2, \\ \mu_2, & \text{if } \mu_1 < \mu_2. \end{cases} \quad (4.7)$$

$$\mu_1 \wedge \mu_2 = \min(\mu_1, \mu_2) = \begin{cases} \mu_1, & \text{if } \mu_1 \leq \mu_2, \\ \mu_2, & \text{if } \mu_1 > \mu_2, \end{cases} \quad (4.8)$$

Операція максимуму описує об'єднання нечітких множин. Операція мінімуму описує їх перетин. Для більш складних задач можна використовувати інші оператори, які гнучкіше враховують властивості даних [140].

Отже, побудова моделі оцінювання якості проєктування та дизайну вебдодатків починається з визначення термів та універсальної множини. Далі формується ієрархія змінних. Найвищий рівень цієї ієрархії визначає прогнозований показник якості. Для кожної змінної визначається функція належності. Значення цих функцій нормують. Після цього вони зіставляються з квантами універсальної множини. Створюється база знань, яка описує взаємозв'язки у формі умовно-наслідкових правил. На завершальному етапі будуються нечіткі рівняння. Вони дозволяють отримати прогноз у нечіткому вигляді. Потім виконується дефазифікація, яка дає точне числове значення. Це значення можна застосувати для оцінки та управління якістю [130, 141].

4.2. Модель формування якості проєктування та дизайну вебдодатків

Модель якості процесу проєктування та дизайну вебдодатків доцільно розглядати як відображення залежності між множиною факторів та інтегральним прогнозованим показником якості. Кожен фактор є лінгвістичною змінною. Вони демонструють базові особливості формування ергономіки та когнітивних принципів взаємодії, доступності та інклюзивності, інформаційної архітектури та візуального дизайну. Показник якості проєктування та дизайну вебдодатків виражається через сукупність часткових показників, що належать

до окремих лінгвістичних змінних. Кожна змінна має власне функціональне призначення у структурі моделі [136, 142].

Запишемо функціональне представлення процесу проєктування та дизайну вебдодатків у такому вигляді:

$$G = \{E; D; I\}, \quad (4.9)$$

де аргумент E відповідає якості формування ергономіки та когнітивних принципів взаємодії, аргумент D — доступності та інклюзивності, I — якості інформаційної архітектури та візуального дизайну.

При формуванні якості інтегральних показників проєктування та дизайну вебдодатків доцільно враховувати лише Парето-оптимальні фактори згідно аргументації, наведеної у розділі 3, тобто $E_p = \{E_2, E_3, E_4, E_6\}$ [117, 118]. Для зручності присвоїмо лінгвістичним змінним порядкові номери від 1 до 4.

Таким чином, показник якості формування ергономіки та когнітивних принципів взаємодії E описується так:

$$E = F_E(e_1, e_2, e_3, e_4), \quad (4.10)$$

де: e_1 — лінгвістична змінна «консистентність дизайн-моделей», e_2 — «модальність інтерфейсу», e_3 — «масштабованість», e_4 — «зворотний зв'язок».

Якість процесу формування доступності та інклюзивності на основі Парето-оптимальних факторів визначається виразом:

$$D = F_D(d_1, d_2, d_3, d_4), \quad (4.11)$$

де: d_1 — лінгвістична змінна «верифікація відповідності стандартам доступності», d_2 — «полімодальна репрезентація контенту», d_3 — «персоналізація параметрів», d_4 — «альтернативні механізми навігації».

Показник якості інформаційної архітектури та візуального дизайну формується як:

$$I = F_I(i_1, i_2, i_3, i_4), \quad (4.12)$$

де: i_1 — лінгвістична змінна «композиція та ритм макету», i_2 — «колористика та контрастність», i_3 — «ієрархія візуальних елементів», i_4 — «просторовий баланс».

Для подальшого аналізу для кожної лінгвістичної змінної формується універсальну терм-множина значень та набір лінгвістичних термів. Усі змінні подано у таблиці 4.1. Вона містить як кількісні, так і якісні параметри. Кожен з них має чітко окреслений інтервал значень, що забезпечує коректне формування функцій належності [136, 142, 143].

Таблиця 4.1

Опис лінгвістичних змінних

Змінна	Назва змінної	Множина значень P	Терм-множина T
1	2	3	4
e_1	консистентність дизайн-моделей	(1–3) у. о.	хаотична, частково узгоджена, цілісна
e_2	модальність інтерфейсу	(1–5) режимів	одномодальний, багатомодальний, мультимодальний
e_3	масштабованість	(1–3) у. о.	обмежена, помірна, висока
e_4	зворотний зв'язок	(1–3) у. о.	повільний, середній, швидкий
d_1	верифікація відповідності стандартам доступності	(1–3) у. о.	низька, часткова, повна
d_2	полімодальна репрезентація контенту	(1–5) форматів	одноканальна, багатоканальна, мультиканальна
d_3	персоналізація параметрів	(1–3) у. о.	мінімальна, розширена, повна
d_4	альтернативні механізми навігації	(1–3) механізми	обмежена навігація, розширена навігація, повна навігація
i_1	композиція та ритм макету (збалансованість розташування елементів)	(1–3) у. о.	дисгармонійна, помірна, гармонійна

Продовження табл. 4.1

1	2	3	4
i_2	колористика та контрастність	(1–3) у. о.	низькі, середні, високі
i_3	ієрархія візуальних елементів	(1–3) у. о.	нечітка, помірна, чітка
i_4	просторовий баланс	(1–3) у. о.	перевантажений, помірний, збалансований

Діапазон кількості режимів інтерфейсу встановлено від одного до п'яти. Одне значення відповідає найпростішій конфігурації системи з мінімальним набором функцій. Три режими вже дають користувачу доступ до комбінованих способів взаємодії (наприклад, текстовий, аудіорежим та візуальний). П'ять режимів відображають межу, за якою зростання кількості способів взаємодії не призводить до відчутного підвищення ефективності [144–146].

Кількість форматів представлення контенту також прийнято у межах від одного до п'яти. Один формат означає використання єдиного каналу подання інформації (наприклад, лише текст). Три формати (наприклад, текст, фото та відео) створюють мультимедійність, яка є стандартом для сучасних цифрових продуктів. П'ять форматів позначають досягнення максимального рівня різноманітності без перевантаження інтерфейсу [147, 148].

Число альтернативних механізмів навігації подано від одного до п'яти. Одне значення відповідає наявності базового способу переміщення системою. Два механізми створюють можливість вибору залежно від уподобань користувача або ситуації. Три механізми — оптимальна кількість, яка гарантує гнучкість і зручність, але не перевантажує інтерфейс. Більша кількість механізмів рідко використовується у повсякденному застосуванні та ускладнює підтримку системи [149, 150].

Отримані значення використано для побудови моделі формування якості проєктування та дизайну вебдодатків (рис. 4.1).

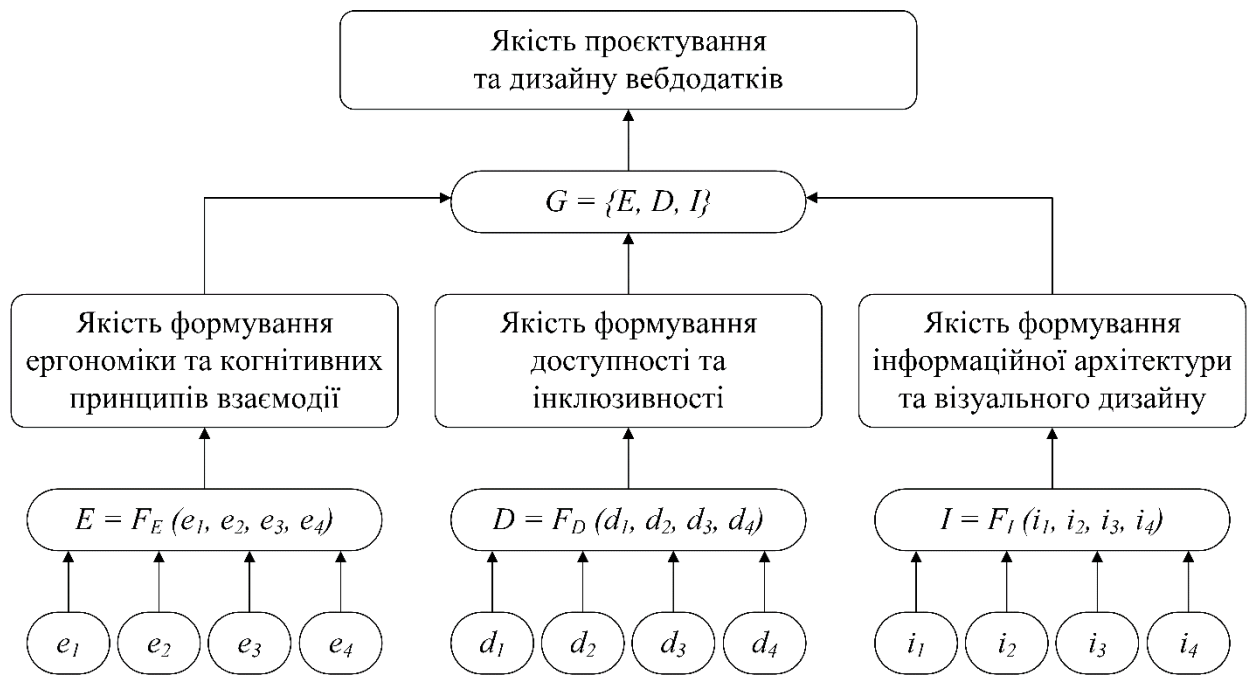


Рис. 4.1. Модель формування якості проєктування та дизайну вебдодатків

Прогнозований показник якості формується поступово. На першому рівні визначаються часткові показники для окремих груп змінних. Далі результати передаються на вищі рівні, де вони інтегруються у загальну оцінку. Це забезпечує більш точне відтворення реальної залежності між параметрами та кінцевим результатом [136].

4.3. Функції належності лінгвістичних змінних

У сучасній теорії нечітких множин лінгвістична змінна розглядається як абстракція, що дозволяє формалізувати виражені природною мовою поняття. Її значення описуються словами або фразами, котрі відображають певні якісні властивості об'єкта чи процесу. Такі змінні успішно застосовуються для моделювання ситуацій, коли традиційні числові параметри не здатні адекватно відобразити реальний стан речей через складність, багатofакторність або невизначеність [132, 140].

Введення функцій належності дозволяє представити суб'єктивні експертні оцінки у вигляді чітко визначених числових залежностей. Тобто кожен описовий терм, який використовується для позначення певної властивості або стану процесу, буде співвіднесений з конкретною математичною функцією, що визначає ступінь належності будь-якого значення змінної до відповідної нечіткої множини [132].

Показник якості виконання процесу доцільно розглядати як окремий лінгвістичний терм Ψ . Для його математичного опису використано універсальну нечітку множину $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$, яка містить систему лінгвістичних змінних $r_\varphi(d_i)$ та відповідні ранги значень у межах інтервалу p_i ($i = 1, \dots, n$). Згідно з підходом, наведеним у [136, 139, 141], формалізований вираз для терму найвищого рівня набуває вигляду:

$$\Psi_F = \left\{ \frac{\mu_\varphi(p_1)}{p_1}, \frac{\mu_\varphi(p_2)}{p_2}, \dots, \frac{\mu_\varphi(p_n)}{p_n} \right\}, \quad (4.13)$$

де $\mu_\varphi(p_i)$ — ступінь з яким елемент $p_i \in P$ відноситься до множини Ψ_F при $\Psi_F \subset P$.

Множина значень $\mu_\varphi(p_i)$ визначається через використання логічних операцій $\wedge$ та $\vee$, що дозволяють описати взаємозв'язки між елементами нечіткої множини і їх взаємний вплив. Це забезпечує перехід від вербального опису ознаки до її математичного представлення у вигляді функції належності [46, 140].

Тоді представлення ступенів належності доцільно записати у такому вигляді [46, 105]:

$$\frac{\mu_1}{r_1} = \frac{\mu_2}{r_2} = \dots = \frac{\mu_n}{r_n}, \quad (4.14)$$

де $\mu_i = \mu_\varphi(p_i)$; $r_i = r_\varphi(p_i)$ для $i = 1, \dots, n$ за умови що $\sum_{i=1}^n \mu_i = 1$.

Для обчислення числових значень функцій належності застосовуємо співвідношення [130, 132]:

$$\left. \begin{aligned} \mu_1 &= \left(1 + \frac{r_2}{r_1} + \frac{r_3}{r_1} + \dots + \frac{r_n}{r_1} \right)^{-1}; \\ \mu_2 &= \left(\frac{r_1}{r_2} + 1 + \frac{r_3}{r_2} + \dots + \frac{r_n}{r_2} \right)^{-1}; \\ \\ \mu_n &= \left(\frac{r_1}{r_n} + \frac{r_2}{r_n} + \frac{r_3}{r_n} + \dots + 1 \right)^{-1}. \end{aligned} \right\} \quad (4.15)$$

Припустимо що діапазон можливих значень кожної лінгвістичної змінної умовно поділено на дві частини. Цього поділу достатньо для введення трьох контрольних точок, які дозволяють здійснити графічну інтерпретацію якісних лінгвістичних термів. Положення точок (p_1, p_2, p_3) визначає умовні межі поділу інтервалу можливих значень змінної на заданій множині. На основі відносних рангів таких термів будується квадратна обернена симетрична матриця $W = w_{ij}$, для якої виконується умова $w_{ij} = r_i / r_j$, якщо $i, j = 1, 2, 3$ [46].

Якщо ранги факторів заздалегідь не визначені, використовується матрицю попарних порівнянь. Її елементи встановлюються за шкалою відносної важливості об'єктів [119]. Для кожного лінгвістичного терму визначається співвідношення його значущості відносно іншого терму. Відповідний елемент матриці розміщують у позиції (i, j) :

$$W = \begin{bmatrix} 1 & \frac{r_2}{r_1} & \frac{r_3}{r_1} \\ \frac{r_1}{r_2} & 1 & \frac{r_3}{r_2} \\ \frac{r_1}{r_3} & \frac{r_2}{r_3} & 1 \end{bmatrix}. \quad (4.16)$$

Беручи до уваги наведені теоретичні передумови, завдання дослідження можна сформулювати у вигляді пошуку максимального значення функції, яка характеризує якість проєктування та дизайну вебдодатків:

$$\left. \begin{aligned} G_F &= F(e_n, d_n, i_n) \rightarrow \max, \quad n = \overline{1, 4}; \\ e_n &> 0, \quad d_n > 0, \quad i_n > 0; \\ \mu_q(p_i) &\rightarrow \max, \quad p_i \in P, \quad G_F \subset P, \quad i = \overline{1, 3}. \end{aligned} \right\} \quad (4.17)$$

При цьому прагнемо досягти максимального значення функції, що вказує на рівень якості проєктування та дизайну вебдодатків [141].

Для синтезу нечітких множин, що відображатимуть терми лінгвістичних змінних проєктування та дизайну вебдодатків, побудовано матриці [141, 143]. Зокрема, для лінгвістичної змінної «консистентність дизайн-моделей» матриця W формується на основі множини значень $P(e_1) = [1, 2, 3]$ у. о. Це дозволяє встановити дискретні рівні зміни вказаної характеристики, які мають однозначний інтерпретаційний зміст при подальшому аналізі. Відповідна термножина значень вказує на ступінь послідовності та узгодженості наявних графічних елементів і стилю на різних сторінках аналізованого вебдодатку та позначається як $T(e_1) = \{\text{хаотична, частково узгоджена, цілісна}\}$. Відповідно, матриці для вказаних термів мають вид:

$$W_{\text{хаотична}}(e_1) = \begin{bmatrix} 1 & 4/9 & 1/9 \\ 9/4 & 1 & 1/4 \\ 9 & 4 & 1 \end{bmatrix} \quad W_{\text{частково узгоджена}}(e_1) = \begin{bmatrix} 1 & 7 & 1 \\ 1/7 & 1 & 1/7 \\ 1 & 7 & 1 \end{bmatrix}$$

$$W_{\text{цілісна}}(e_1) = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 9 \\ 1/3 & 1 & 9/3 \\ 1/9 & 3/9 & 1 \end{bmatrix}$$

Обчислено відповідні значення функцій належності для кожного терма. Розрахунок виконується шляхом знаходження власних векторів матриць і

подальшої нормалізації [46, 104, 105]. Для термів «хаотична», «частково узгоджена» та «цілісна» значення мають вигляд:

$$\mu_{\text{хаотична}}(p_1) = 0,081; \mu_{\text{хаотична}}(p_2) = 0,183; \mu_{\text{хаотична}}(p_3) = 0,734.$$

$$\mu_{\text{частково узгоджена}}(p_1) = 0,466; \mu_{\text{частково узгоджена}}(p_2) = 0,066;$$

$$\mu_{\text{частково узгоджена}}(p_3) = 0,466.$$

$$\mu_{\text{цілісна}}(p_1) = 0,692; \mu_{\text{цілісна}}(p_2) = 0,23; \mu_{\text{цілісна}}(p_3) = 0,076.$$

Далі проводиться нормування значень функцій належності відносно одиниці за допомогою коефіцієнта нормування, який визначається за формулою [136, 141]:

$$k_e = 1/\max \mu_e(p_i), \quad (i=1,2,3), \quad (4.18)$$

де e — терми; p_i — елементи універсальної множини; $\mu_e(p_i)$ — значення функції належності для цих елементів.

Тоді отримані значення функцій належності множаться на коефіцієнт нормування за формулою (4.19), що дозволяє привести максимальне значення функції належності до одиниці для кожного терма [105, 136].

$$\mu_{e_n}(p_i) = k_e \times \mu_e(p_i), \quad (4.19)$$

В результаті, пронормовані значення для термів «хаотична», «частково узгоджена» та «цілісна» змінної «консистентність дизайн-моделей» є такими:

$$\mu_{\text{хаотична}_n}(p_1) = 0,11; \mu_{\text{хаотична}_n}(p_2) = 0,249; \mu_{\text{хаотична}_n}(p_3) = 1.$$

$$\mu_{\text{частково узгоджена}_n}(p_1) = 1; \mu_{\text{частково узгоджена}_n}(p_2) = 0,142; \mu_{\text{частково узгоджена}_n}(p_3) = 1.$$

$$\mu_{\text{цілісна}_n}(p_1) = 1; \mu_{\text{цілісна}_n}(p_2) = 0,332; \mu_{\text{цілісна}_n}(p_3) = 0,11.$$

Терми змінної «консистентність дизайн-моделей» у вигляді нечітких множин виконується з використанням залежності (4.13):

$$\Psi_{\text{хаотична}} = \left\{ \frac{0,11}{1}; \frac{0,249}{2}; \frac{1}{3} \right\} \text{ у. о.}; \quad \Psi_{\text{частково узгоджена}} = \left\{ \frac{1}{1}; \frac{0,142}{2}; \frac{1}{3} \right\} \text{ у. о.};$$

$$\Psi_{\text{цілісна}} = \left\{ \frac{1}{1}; \frac{0,332}{2}; \frac{0,11}{3} \right\} \text{ у. о.}$$

Аналогічні дії проводимо щодо інших лінгвістичних змінних проектування та дизайну вебдодатків, зокрема щодо змінної «модальність інтерфейсу» з множиною значень $P(e_2) = [1, 3, 5]$ режимів. Кількість різних режимів взаємодії (текстовий, аудіо, візуальний, голосовий тощо) описується терм-множиною $T(e_2) = \{\text{одномодальний, багатомодальний, мультимодальний}\}$.

Матриці для вказаних термів мають вид:

$$W_{\text{одномодальний}}(e_2) = \begin{bmatrix} 1 & 3/9 & 1/9 \\ 9/3 & 1 & 1/3 \\ 9 & 3 & 1 \end{bmatrix} \quad W_{\text{багатомодальний}}(e_2) = \begin{bmatrix} 1 & 6 & 1 \\ 1/6 & 1 & 1/6 \\ 1 & 6 & 1 \end{bmatrix}$$

$$W_{\text{мультимодальний}}(e_2) = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 9 \\ 1/3 & 1 & 9/3 \\ 1/9 & 3/9 & 1 \end{bmatrix}$$

Одержані значення функцій належності та їх пронормовані відповідники:

$$\begin{aligned} \mu_{\text{одномодальний}}(p_1) &= 0,076; \mu_{\text{одномодальний}}(p_2) = 0,23; \mu_{\text{одномодальний}}(p_3) = 0,692. \\ \mu_{\text{багатомодальний}}(p_1) &= 0,461; \mu_{\text{багатомодальний}}(p_2) = 0,076; \mu_{\text{багатомодальний}}(p_3) = 0,461. \\ \mu_{\text{мультимодальний}}(p_1) &= 0,692; \mu_{\text{мультимодальний}}(p_2) = 0,23; \mu_{\text{мультимодальний}}(p_3) = 0,076. \\ \mu_{\text{одномодальний}_n}(p_1) &= 0,11; \mu_{\text{одномодальний}_n}(p_2) = 0,332; \mu_{\text{одномодальний}_n}(p_3) = 1. \\ \mu_{\text{багатомодальний}_n}(p_1) &= 1; \mu_{\text{багатомодальний}_n}(p_2) = 0,165; \mu_{\text{багатомодальний}_n}(p_3) = 1. \\ \mu_{\text{мультимодальний}_n}(p_1) &= 1; \mu_{\text{мультимодальний}_n}(p_2) = 0,332; \mu_{\text{мультимодальний}_n}(p_3) = 0,11. \end{aligned}$$

Результуючі нечіткі множини:

$$\Psi_{\text{одномодальний}} = \left\{ \frac{0,11}{1}; \frac{0,332}{3}; \frac{1}{5} \right\} p.; \quad \Psi_{\text{багатомодальний}} = \left\{ \frac{1}{1}; \frac{0,165}{3}; \frac{1}{5} \right\} p.;$$

$$\Psi_{\text{мультимодальний}} = \left\{ \frac{1}{1}; \frac{0,332}{3}; \frac{0,11}{5} \right\} p.$$

Згідно з табл. 4.1 наступною аналізованою змінною є «масштабованість». Універсальна множина значень цієї лінгвістичної змінної $P(e_3) = [1, 2, 3]$ у. о. та терм-множина $T(e_3) = \{\text{обмежена, помірна, висока}\}$, що вказує на здатність зберігати продуктивність при збільшенні навантаження.

Матриці попарних порівнянь для термів «обмежена масштабованість», «помірна масштабованість», «висока масштабованість»:

$$W_{\text{обмежена}}(e_3) = \begin{bmatrix} 1 & 5/9 & 1/9 \\ 9/5 & 1 & 1/5 \\ 9 & 5 & 1 \end{bmatrix} \quad W_{\text{помірна}}(e_3) = \begin{bmatrix} 1 & 7 & 1 \\ 1/7 & 1 & 1/7 \\ 1 & 7 & 1 \end{bmatrix}$$

$$W_{\text{висока}}(e_3) = \begin{bmatrix} 1 & 4 & 9 \\ 1/4 & 1 & 9/4 \\ 1/9 & 4/9 & 1 \end{bmatrix}$$

Значення функцій належності:

$$\mu_{\text{обмежена}}(p_1) = 0,084; \mu_{\text{обмежена}}(p_2) = 0,152; \mu_{\text{обмежена}}(p_3) = 0,762.$$

$$\mu_{\text{помірна}}(p_1) = 0,466; \mu_{\text{помірна}}(p_2) = 0,066; \mu_{\text{помірна}}(p_3) = 0,466.$$

$$\mu_{\text{висока}}(p_1) = 0,734; \mu_{\text{висока}}(p_2) = 0,183; \mu_{\text{висока}}(p_3) = 0,081.$$

Результати нормування:

$$\mu_{\text{обмежена}_n}(p_1) = 0,11; \mu_{\text{обмежена}_n}(p_2) = 0,199; \mu_{\text{обмежена}_n}(p_3) = 1.$$

$$\mu_{\text{помірна}_n}(p_1) = 1; \mu_{\text{помірна}_n}(p_2) = 0,142; \mu_{\text{помірна}_n}(p_3) = 1.$$

$$\mu_{\text{висока}_n}(p_1) = 1; \mu_{\text{висока}_n}(p_2) = 0,249; \mu_{\text{висока}_n}(p_3) = 0,11.$$

Нечіткі множини для термів лінгвістичної змінної «масштабованість»:

$$\Psi_{\text{обмежена}} = \left\{ \frac{0,11}{1}; \frac{0,199}{2}; \frac{1}{3} \right\} \text{ у. о.}; \Psi_{\text{помірна}} = \left\{ \frac{1}{1}; \frac{0,142}{2}; \frac{1}{3} \right\} \text{ у. о.};$$

$$\Psi_{\text{висока}} = \left\{ \frac{1}{1}; \frac{0,249}{2}; \frac{0,11}{3} \right\} \text{ у. о.}$$

Для лінгвістичної змінної «зворотний зв'язок» універсальна множина значень буде $P(e_4)=[1,2,3]$ у. о., а відповідна множина термів змінної $T(e_4)=\{\text{повільний, середній, швидкий}\}$ вказує на швидкість і повноту зворотного зв'язку інтерфейсу (відгуки, підказки, повідомлення).

$$W_{\text{повільний}}(e_4)=\begin{bmatrix} 1 & 6/9 & 1/9 \\ 9/6 & 1 & 1/6 \\ 9 & 6 & 1 \end{bmatrix} \quad W_{\text{середній}}(e_4)=\begin{bmatrix} 1 & 5 & 1 \\ 1/5 & 1 & 1/5 \\ 1 & 5 & 1 \end{bmatrix}$$

$$W_{\text{швидкий}}(e_4)=\begin{bmatrix} 1 & 3 & 9 \\ 1/3 & 1 & 9/3 \\ 1/9 & 3/9 & 1 \end{bmatrix}$$

Значення функцій належності:

$$\mu_{\text{повільний}}(p_1)=0,086; \mu_{\text{повільний}}(p_2)=0,13; \mu_{\text{повільний}}(p_3)=0,782.$$

$$\mu_{\text{середній}}(p_1)=0,454; \mu_{\text{середній}}(p_2)=0,09; \mu_{\text{середній}}(p_3)=0,454.$$

$$\mu_{\text{швидкий}}(p_1)=0,692; \mu_{\text{швидкий}}(p_2)=0,23; \mu_{\text{швидкий}}(p_3)=0,076.$$

Результати нормування:

$$\mu_{\text{повільний}_n}(p_1)=0,11; \mu_{\text{повільний}_n}(p_2)=0,166; \mu_{\text{повільний}_n}(p_3)=1.$$

$$\mu_{\text{середній}_n}(p_1)=1; \mu_{\text{середній}_n}(p_2)=0,198; \mu_{\text{середній}_n}(p_3)=1.$$

$$\mu_{\text{швидкий}_n}(p_1)=1; \mu_{\text{швидкий}_n}(p_2)=0,332; \mu_{\text{швидкий}_n}(p_3)=0,11.$$

Нечіткі множини для термів лінгвістичної змінної «зворотний зв'язок»:

$$\Psi_{\text{повільний}}=\left\{\frac{0,11}{1}; \frac{0,166}{2}; \frac{1}{3}\right\} \text{ у. о.}; \Psi_{\text{середній}}=\left\{\frac{1}{1}; \frac{0,198}{2}; \frac{1}{3}\right\} \text{ у. о.};$$

$$\Psi_{\text{швидкий}}=\left\{\frac{1}{1}; \frac{0,332}{2}; \frac{0,11}{3}\right\} \text{ у. о.}$$

Далі проводимо аналіз лінгвістичної змінної «верифікація відповідності стандартам доступності». Універсальна множина значень представлена в умовних одиницях та відображає три точки поділу множини: $P(d_1)=[1,2,3]$ у. о.

Терм-множина ілюструє рівень відповідності прийнятим стандартам доступності $T(d_1) = \{\text{низька, часкова, повна}\}$.

Враховуючи сказане, матриці попарних порівнянь мають вид:

$$W_{\text{низька}}(d_1) = \begin{bmatrix} 1 & 3/9 & 1/9 \\ 9/3 & 1 & 1/3 \\ 9 & 3 & 1 \end{bmatrix} \quad W_{\text{часткова}}(d_1) = \begin{bmatrix} 1 & 8 & 1 \\ 1/8 & 1 & 1/8 \\ 1 & 8 & 1 \end{bmatrix} \quad W_{\text{повна}}(d_1) = \begin{bmatrix} 1 & 4 & 9 \\ 1/4 & 1 & 9/4 \\ 1/9 & 4/9 & 1 \end{bmatrix}$$

Внаслідок обчислень наведених матриць одержано такі значення функцій належності:

$$\mu_{\text{низька}}(p_1) = 0,076; \mu_{\text{низька}}(p_2) = 0,23; \mu_{\text{низька}}(p_3) = 0,692.$$

$$\mu_{\text{часткова}}(p_1) = 0,47; \mu_{\text{часткова}}(p_2) = 0,058; \mu_{\text{часткова}}(p_3) = 0,47.$$

$$\mu_{\text{повна}}(p_1) = 0,734; \mu_{\text{повна}}(p_2) = 0,183; \mu_{\text{повна}}(p_3) = 0,081.$$

Нормування значень функцій належності відносно одиниці:

$$\mu_{\text{низька}_n}(p_1) = 0,11; \mu_{\text{низька}_n}(p_2) = 0,332; \mu_{\text{низька}_n}(p_3) = 1.$$

$$\mu_{\text{часткова}_n}(p_1) = 1; \mu_{\text{часткова}_n}(p_2) = 0,123; \mu_{\text{часткова}_n}(p_3) = 1.$$

$$\mu_{\text{повна}_n}(p_1) = 1; \mu_{\text{повна}_n}(p_2) = 0,249; \mu_{\text{повна}_n}(p_3) = 0,11.$$

Нечіткі множини аналізованих термів:

$$\Psi_{\text{низька}} = \left\{ \frac{0,11}{1}; \frac{0,332}{2}; \frac{1}{3} \right\} \text{ у. о.}; \quad \Psi_{\text{часткова}} = \left\{ \frac{1}{1}; \frac{0,123}{2}; \frac{1}{3} \right\} \text{ у. о.};$$

$$\Psi_{\text{повна}} = \left\{ \frac{1}{1}; \frac{0,249}{2}; \frac{0,11}{3} \right\} \text{ у. о.}$$

Також сформовано матриці для термів лінгвістичної змінної «полімода-льна репрезентація контенту» при $P(d_2) = [1, 3, 5]$ форматів, що визначає кількість форматів представлення контенту (текст, аудіо, фото, відео, інтерактив) та $T(d_2) = \{\text{одноканальна, багатоканальна, мультиканальна}\}$.

$$W_{\text{одноканальна}}(d_2) = \begin{bmatrix} 1 & 4/9 & 1/9 \\ 9/4 & 1 & 1/4 \\ 9 & 4 & 1 \end{bmatrix} \quad W_{\text{багатоканальна}}(d_2) = \begin{bmatrix} 1 & 7 & 1 \\ 1/7 & 1 & 1/7 \\ 1 & 7 & 1 \end{bmatrix}$$

$$W_{\text{мультимедійна}}(d_2) = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 9 \\ 1/3 & 1 & 9/3 \\ 1/9 & 3/9 & 1 \end{bmatrix}$$

Згідно обчислень матриць та нормування значень одержано:

$$\mu_{\text{одноканальна}}(p_1) = 0,081; \mu_{\text{одноканальна}}(p_2) = 0,183; \mu_{\text{одноканальна}}(p_3) = 0,734.$$

$$\mu_{\text{багатоканальна}}(p_1) = 0,466; \mu_{\text{багатоканальна}}(p_2) = 0,066; \mu_{\text{багатоканальна}}(p_3) = 0,466.$$

$$\mu_{\text{мультимедійна}}(p_1) = 0,692; \mu_{\text{мультимедійна}}(p_2) = 0,23; \mu_{\text{мультимедійна}}(p_3) = 0,076.$$

$$\mu_{\text{одноканальна}_n}(p_1) = 0,11; \mu_{\text{одноканальна}_n}(p_2) = 0,249; \mu_{\text{одноканальна}_n}(p_3) = 1.$$

$$\mu_{\text{багатоканальна}_n}(p_1) = 1; \mu_{\text{багатоканальна}_n}(p_2) = 0,142; \mu_{\text{багатоканальна}_n}(p_3) = 1.$$

$$\mu_{\text{мультимедійна}_n}(p_1) = 1; \mu_{\text{мультимедійна}_n}(p_2) = 0,332; \mu_{\text{мультимедійна}_n}(p_3) = 0,11.$$

Нечіткі множини термів «одноканальна», «багатоканальна», «мультимедійна» мають вид:

$$\Psi_{\text{одноканальна}} = \left\{ \frac{0,11}{1}; \frac{0,249}{3}; \frac{1}{5} \right\} \phi; \quad \Psi_{\text{багатоканальна}} = \left\{ \frac{1}{1}; \frac{0,142}{3}; \frac{1}{5} \right\} \phi;$$

$$\Psi_{\text{мультимедійна}} = \left\{ \frac{1}{1}; \frac{0,332}{3}; \frac{0,11}{5} \right\} \phi.$$

Лінгвістична змінна «персоналізація параметрів» означає можливості персоналізації інтерфейсу для користувача, тобто налаштування вигляду та поведінки вебдодатку. Універсальна множина значень цієї змінної: $P(d_3) = [1, 2, 3]$ у. о. Терм-множина: $T(d_3) = \{\text{мінімальна, розширена, повна}\}.$

Матриці попарних порівнянь:

$$W_{\text{мінімальна}}(d_3) = \begin{bmatrix} 1 & 3/9 & 1/9 \\ 9/3 & 1 & 1/3 \\ 9 & 3 & 1 \end{bmatrix} \quad W_{\text{розширена}}(d_3) = \begin{bmatrix} 1 & 6 & 1 \\ 1/6 & 1 & 1/6 \\ 1 & 6 & 1 \end{bmatrix}$$

$$W_{\text{повна}}(d_3) = \begin{bmatrix} 1 & 4 & 9 \\ 1/4 & 1 & 9/4 \\ 1/9 & 4/9 & 1 \end{bmatrix}$$

Значення функцій належності для термів «мінімальна», «розширена», «повна»:

$$\mu_{\text{мінімальна}}(p_1) = 0,076; \mu_{\text{мінімальна}}(p_2) = 0,23; \mu_{\text{мінімальна}}(p_3) = 0,692.$$

$$\mu_{\text{розширена}}(p_1) = 0,461; \mu_{\text{розширена}}(p_2) = 0,076; \mu_{\text{розширена}}(p_3) = 0,461.$$

$$\mu_{\text{повна}}(p_1) = 0,734; \mu_{\text{повна}}(p_2) = 0,183; \mu_{\text{повна}}(p_3) = 0,081.$$

Результати нормування відносно одиниці:

$$\mu_{\text{мінімальна}_n}(p_1) = 0,11; \mu_{\text{мінімальна}_n}(p_2) = 0,332; \mu_{\text{мінімальна}_n}(p_3) = 1.$$

$$\mu_{\text{розширена}_n}(p_1) = 1; \mu_{\text{розширена}_n}(p_2) = 0,165; \mu_{\text{розширена}_n}(p_3) = 1.$$

$$\mu_{\text{повна}_n}(p_1) = 1; \mu_{\text{повна}_n}(p_2) = 0,249; \mu_{\text{повна}_n}(p_3) = 0,11.$$

Нечіткі множини термів лінгвістичної змінної «персоналізація параметрів»:

$$\Psi_{\text{мінімальна}} = \left\{ \frac{0,11}{1}; \frac{0,332}{2}; \frac{1}{3} \right\} \text{ у. о.}; \quad \Psi_{\text{розширена}} = \left\{ \frac{1}{1}; \frac{0,165}{2}; \frac{1}{3} \right\} \text{ у. о.};$$

$$\Psi_{\text{повна}} = \left\{ \frac{1}{1}; \frac{0,249}{2}; \frac{0,11}{3} \right\} \text{ у. о.}$$

Універсальна множина значень лінгвістичної змінної «альтернативні механізми навігації» (клавіатурні шляхи, голос, карта сайту тощо) має вид:
 $P(d_4) = [1, 2, 3]$ механізми.

Терм-множина: $T(d_4) = \{\text{обмежена, розширена, повна}\}.$

Матриці попарних порівнянь для термів «обмежена навігація», «розширена навігація», «повна навігація»:

$$W_{\text{обмежена навігація}}(d_4) = \begin{bmatrix} 1 & 4/9 & 1/9 \\ 9/4 & 1 & 1/4 \\ 9 & 4 & 1 \end{bmatrix} \quad W_{\text{розширена навігація}}(d_4) = \begin{bmatrix} 1 & 7 & 1 \\ 1/7 & 1 & 1/7 \\ 1 & 7 & 1 \end{bmatrix}$$

$$W_{\text{повна навігація}}(d_4) = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 9 \\ 1/3 & 1 & 9/3 \\ 1/9 & 3/9 & 1 \end{bmatrix}$$

Результати обчислень матриць та нормування:

$$\mu_{\text{обмежена навігація}}(p_1) = 0,081; \mu_{\text{обмежена навігація}}(p_2) = 0,183; \mu_{\text{обмежена навігація}}(p_3) = 0,734.$$

$$\mu_{\text{розширена навігація}}(p_1) = 0,466; \mu_{\text{розширена навігація}}(p_2) = 0,066;$$

$$\mu_{\text{розширена навігація}}(p_3) = 0,466.$$

$$\mu_{\text{повна навігація}}(p_1) = 0,692; \mu_{\text{повна навігація}}(p_2) = 0,23; \mu_{\text{повна навігація}}(p_3) = 0,076.$$

$$\mu_{\text{обмежена навігація}_n}(p_1) = 0,11; \mu_{\text{обмежена навігація}_n}(p_2) = 0,249; \mu_{\text{обмежена навігація}_n}(p_3) = 1.$$

$$\mu_{\text{розширена навігація}_n}(p_1) = 1; \mu_{\text{розширена навігація}_n}(p_2) = 0,142; \mu_{\text{розширена навігація}_n}(p_3) = 1.$$

$$\mu_{\text{повна навігація}_n}(p_1) = 1; \mu_{\text{повна навігація}_n}(p_2) = 0,332; \mu_{\text{повна навігація}_n}(p_3) = 0,11.$$

Відповідно до одержаних пронормованих значень функцій належності термів лінгвістичної змінної «альтернативні механізми навігації» та виразу (4.13) нечіткі множини будуть наступними:

$$\Psi_{\text{обмежена навігація}} = \left\{ \frac{0,11}{1}; \frac{0,249}{2}; \frac{1}{3} \right\} \text{ м.}; \quad \Psi_{\text{розширена навігація}} = \left\{ \frac{1}{1}; \frac{0,142}{2}; \frac{1}{3} \right\} \text{ м.};$$

$$\Psi_{\text{повна навігація}} = \left\{ \frac{1}{1}; \frac{0,332}{2}; \frac{0,11}{3} \right\} \text{ м.}$$

Гармонійність композиції та ритму макету (збалансованість розташування елементів) представлено лінгвістичною змінною «композиція та ритм

макету» з універсальною множиною $P(i_1)=[1,2,3]$ у. о. та терм-множиною:
 $T(i_1)=\{\text{дисгармонійна}, \text{помірна}, \text{гармонійна}\}.$

Матриці для термів «дисгармонійна», «помірна», «гармонійна»:

$$W_{\text{дисгармонійна}}(i_1)=\begin{bmatrix} 1 & 4/9 & 1/9 \\ 9/4 & 1 & 1/4 \\ 9 & 4 & 1 \end{bmatrix} \quad W_{\text{помірна}}(i_1)=\begin{bmatrix} 1 & 8 & 1 \\ 1/8 & 1 & 1/8 \\ 1 & 8 & 1 \end{bmatrix}$$

$$W_{\text{гармонійна}}(i_1)=\begin{bmatrix} 1 & 4 & 9 \\ 1/4 & 1 & 9/4 \\ 1/9 & 4/9 & 1 \end{bmatrix}$$

Згідно з результатами знаходження власних векторів матриць і подальшої нормалізації одержано:

$$\mu_{\text{дисгармонійна}}(p_1)=0,081; \mu_{\text{дисгармонійна}}(p_2)=0,183; \mu_{\text{дисгармонійна}}(p_3)=0,734.$$

$$\mu_{\text{помірна}}(p_1)=0,47; \mu_{\text{помірна}}(p_2)=0,058; \mu_{\text{помірна}}(p_3)=0,47.$$

$$\mu_{\text{гармонійна}}(p_1)=0,734; \mu_{\text{гармонійна}}(p_2)=0,183; \mu_{\text{гармонійна}}(p_3)=0,081.$$

Пронормовані відносно одиниці значення функцій належності термів лінгвістичної змінної «композиція та ритм макету»:

$$\mu_{\text{дисгармонійна}_n}(p_1)=0,11; \mu_{\text{дисгармонійна}_n}(p_2)=0,249; \mu_{\text{дисгармонійна}_n}(p_3)=1.$$

$$\mu_{\text{помірна}_n}(p_1)=1; \mu_{\text{помірна}_n}(p_2)=0,123; \mu_{\text{помірна}_n}(p_3)=1.$$

$$\mu_{\text{гармонійна}_n}(p_1)=1; \mu_{\text{гармонійна}_n}(p_2)=0,249; \mu_{\text{гармонійна}_n}(p_3)=0,11.$$

Отримані нечіткі множини для аналізованих термів:

$$\Psi_{\text{дисгармонійна}}=\left\{\frac{0,11}{1}; \frac{0,249}{2}; \frac{1}{3}\right\} \text{ у. о.}; \Psi_{\text{помірна}}=\left\{\frac{1}{1}; \frac{0,123}{2}; \frac{1}{3}\right\} \text{ у. о.};$$

$$\Psi_{\text{гармонійна}}=\left\{\frac{1}{1}; \frac{0,249}{2}; \frac{0,11}{3}\right\} \text{ у. о.}$$

За аналогічним принципом розроблено матриці попарних порівнянь термів для лінгвістичної змінної «колеристика та контрастність» з множиною значень $P(i_2) = [1, 2, 3]$ у. о. та множиною термів $T(i_2) = \{\text{низькі, середні, високі}\}$.

$$W_{\text{низькі}}(i_2) = \begin{bmatrix} 1 & 5/9 & 1/9 \\ 9/5 & 1 & 1/5 \\ 9 & 5 & 1 \end{bmatrix} \quad W_{\text{середні}}(i_2) = \begin{bmatrix} 1 & 8 & 1 \\ 1/8 & 1 & 1/8 \\ 1 & 8 & 1 \end{bmatrix} \quad W_{\text{високі}}(i_2) = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 9 \\ 1/3 & 1 & 9/3 \\ 1/9 & 3/9 & 1 \end{bmatrix}$$

Результати обчислення матриць:

$$\mu_{\text{низькі}}(p_1) = 0,084; \mu_{\text{низькі}}(p_2) = 0,152; \mu_{\text{низькі}}(p_3) = 0,762.$$

$$\mu_{\text{середні}}(p_1) = 0,47; \mu_{\text{середні}}(p_2) = 0,058; \mu_{\text{середні}}(p_3) = 0,47.$$

$$\mu_{\text{високі}}(p_1) = 0,692; \mu_{\text{високі}}(p_2) = 0,23; \mu_{\text{високі}}(p_3) = 0,076.$$

Значення пронормованих функцій належності:

$$\mu_{\text{низькі}_n}(p_1) = 0,11; \mu_{\text{низькі}_n}(p_2) = 0,199; \mu_{\text{низькі}_n}(p_3) = 1.$$

$$\mu_{\text{середні}_n}(p_1) = 1; \mu_{\text{середні}_n}(p_2) = 0,123; \mu_{\text{середні}_n}(p_3) = 1.$$

$$\mu_{\text{високі}_n}(p_1) = 1; \mu_{\text{високі}_n}(p_2) = 0,332; \mu_{\text{високі}_n}(p_3) = 0,11.$$

Нечіткі множини для термів змінної «колеристика та контрастність»:

$$\Psi_{\text{низькі}} = \left\{ \frac{0,11}{1}; \frac{0,199}{2}; \frac{1}{3} \right\} \text{ у. о.}; \quad \Psi_{\text{середні}} = \left\{ \frac{1}{1}; \frac{0,123}{2}; \frac{1}{3} \right\} \text{ у. о.};$$

$$\Psi_{\text{високі}} = \left\{ \frac{1}{1}; \frac{0,332}{2}; \frac{0,11}{3} \right\} \text{ у. о.}$$

Універсальна множина значень змінної «ієрархія візуальних елементів» $P(i_3) = [1, 2, 3]$ у. о., терм-множина $T(i_3) = \{\text{нечітка, помірна, чітка}\}$. Розроблені матриці попарних порівнянь для термів «нечітка», «помірна», «чітка»:

$$W_{\text{нечітка}}(i_3) = \begin{bmatrix} 1 & 4/9 & 1/9 \\ 9/4 & 1 & 1/4 \\ 9 & 4 & 1 \end{bmatrix} \quad W_{\text{помірна}}(i_3) = \begin{bmatrix} 1 & 7 & 1 \\ 1/7 & 1 & 1/7 \\ 1 & 7 & 1 \end{bmatrix} \quad W_{\text{чітка}}(i_3) = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 9 \\ 1/3 & 1 & 9/3 \\ 1/9 & 3/9 & 1 \end{bmatrix}$$

Обчислення матриць та нормування значень призвело до одержання таких результатів:

$$\mu_{\text{нечітка}}(p_1) = 0,081; \mu_{\text{нечітка}}(p_2) = 0,183; \mu_{\text{нечітка}}(p_3) = 0,734.$$

$$\mu_{\text{помірна}}(p_1) = 0,466; \mu_{\text{помірна}}(p_2) = 0,066; \mu_{\text{помірна}}(p_3) = 0,466.$$

$$\mu_{\text{чітка}}(p_1) = 0,692; \mu_{\text{чітка}}(p_2) = 0,23; \mu_{\text{чітка}}(p_3) = 0,076.$$

$$\mu_{\text{нечітка}_n}(p_1) = 0,11; \mu_{\text{нечітка}_n}(p_2) = 0,249; \mu_{\text{нечітка}_n}(p_3) = 1.$$

$$\mu_{\text{помірна}_n}(p_1) = 1; \mu_{\text{помірна}_n}(p_2) = 0,142; \mu_{\text{помірна}_n}(p_3) = 1.$$

$$\mu_{\text{чітка}_n}(p_1) = 1; \mu_{\text{чітка}_n}(p_2) = 0,332; \mu_{\text{чітка}_n}(p_3) = 0,11.$$

Отже, нечіткі множини мають такий вигляд:

$$\Psi_{\text{нечітка}} = \left\{ \frac{0,11}{1}; \frac{0,249}{2}; \frac{1}{3} \right\} \text{ у. о.}; \Psi_{\text{помірна}} = \left\{ \frac{1}{1}; \frac{0,142}{2}; \frac{1}{3} \right\} \text{ у. о.};$$

$$\Psi_{\text{чітка}} = \left\{ \frac{1}{1}; \frac{0,332}{2}; \frac{0,11}{3} \right\} \text{ у. о.}$$

Змінна «просторовий баланс» означає використання вільного простору та щільність за допомогою множини значень $P(i_4) = [1, 2, 3]$ у. о. та терм-множини $T(i_4) = \{\text{перевантажений, помірний, збалансований}\}$.

Відповідні матриці мають вид:

$$W_{\text{перевантажений}}(i_4) = \begin{bmatrix} 1 & 4/9 & 1/9 \\ 9/4 & 1 & 1/4 \\ 9 & 4 & 1 \end{bmatrix} \quad W_{\text{помірний}}(i_4) = \begin{bmatrix} 1 & 8 & 1 \\ 1/8 & 1 & 1/8 \\ 1 & 8 & 1 \end{bmatrix}$$

$$W_{\text{збалансований}}(i_4) = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 9 \\ 1/3 & 1 & 9/3 \\ 1/9 & 3/9 & 1 \end{bmatrix}$$

Значення функцій належності:

$$\mu_{\text{перевантажений}}(p_1) = 0,081; \mu_{\text{перевантажений}}(p_2) = 0,183; \mu_{\text{перевантажений}}(p_3) = 0,734.$$

$$\mu_{\text{помірний}}(p_1) = 0,47; \mu_{\text{помірний}}(p_2) = 0,058; \mu_{\text{помірний}}(p_3) = 0,47.$$

$$\mu_{\text{збалансований}}(p_1) = 0,692; \mu_{\text{збалансований}}(p_2) = 0,23; \mu_{\text{збалансований}}(p_3) = 0,076.$$

Результати нормування значень функцій належності для термів «перевантажений», «помірний», «збалансований»:

$$\mu_{\text{перевантажений}_n}(p_1) = 0,11; \mu_{\text{перевантажений}_n}(p_2) = 0,249; \mu_{\text{перевантажений}_n}(p_3) = 1.$$

$$\mu_{\text{помірний}_n}(p_1) = 1; \mu_{\text{помірний}_n}(p_2) = 0,123; \mu_{\text{помірний}_n}(p_3) = 1.$$

$$\mu_{\text{збалансований}_n}(p_1) = 1; \mu_{\text{збалансований}_n}(p_2) = 0,332; \mu_{\text{збалансований}_n}(p_3) = 0,11.$$

Нечіткі множини згідно з (4.13):

$$\Psi_{\text{перевантажений}} = \left\{ \frac{0,11}{1}; \frac{0,249}{2}; \frac{1}{3} \right\} \text{ у. о.}; \Psi_{\text{помірний}} = \left\{ \frac{1}{1}; \frac{0,123}{2}; \frac{1}{3} \right\} \text{ у. о.};$$

$$\Psi_{\text{збалансований}} = \left\{ \frac{1}{1}; \frac{0,332}{2}; \frac{0,11}{3} \right\} \text{ у. о.}$$

Отримані результати побудови матриць попарних порівнянь та подальшого визначення функцій належності дають можливість формалізувати якісні ознаки через кількісні параметри. Побудовані нечіткі множини відображають реальний вплив кожного терма на якість лінгвістичних змінних процесу проєктування та дизайну вебдодатків [130, 131].

4.4. Визначення прогнозованого показника якості проєктування та дизайну вебдодатків

На основі проведеного експертного аналізу визначено вплив факторів на якість проєктування та дизайну вебдодатків. Для цього сформовано базу знань, у якій відображено взаємозв'язки між комбінаціями лінгвістичних термів окремих змінних та інтегрованим показником якості. Це дає змогу відтворити алгоритм досягнення прогнозованого рівня якості за умов конкретного сценарію реалізації досліджуваного процесу [139].

Показнику якості проєктування та дизайну вебдодатків G належать терми «низька», «середня», «висока». Прийняті лінгвістичні терми дають змогу побудувати формальні залежності, що відображають взаємозв'язок між якіс-

ними характеристиками. Для змінних E — «якість формування ергономіки та когнітивних принципів взаємодії», D — «якість формування доступності та інклюзивності», I — «якість інформаційної архітектури та візуального дизайну» застосовано аналогічний принцип трирівневої градації термів [130, 139].

Враховуючи вираз (4.9) та модель формування якості проєктування та дизайну вебдодатків, представлену на рис. 4.1, нечіткі бази знань щодо найвищого рівня якості та часткових показників мають вид:

$$\begin{aligned} &IF\ E = \langle \text{низька, середня, висока} \rangle \\ &AND\ D = \langle \text{низька, середня, висока} \rangle \\ &AND\ I = \langle \text{низька, середня, висока} \rangle, \\ &THEN\ G = \langle \text{низька, середня, висока} \rangle. \end{aligned} \quad (4.20)$$

$$\begin{aligned} &IF\ e_1 = \langle \text{хаотична, частково узгоджена, цілісна} \rangle \\ &AND\ e_2 = \langle \text{одномодальний, багатомодальний, мультимодальний} \rangle \\ &AND\ e_3 = \langle \text{обмежена, помірна, висока} \rangle \\ &AND\ e_4 = \langle \text{повільний, середній, швидкий} \rangle, \\ &THEN\ E = \langle \text{низька, середня, висока} \rangle. \end{aligned} \quad (4.21)$$

$$\begin{aligned} &IF\ d_1 = \langle \text{низька, часткова, повна} \rangle \\ &AND\ d_2 = \langle \text{одноканальна, багатоканальна, мультиканальна} \rangle \\ &AND\ d_3 = \langle \text{мінімальна, розширена, повна} \rangle \\ &AND\ d_4 = \langle \text{обмежена, розширена, повна} \rangle, \\ &THEN\ D = \langle \text{низька, середня, висока} \rangle. \end{aligned} \quad (4.22)$$

$$\begin{aligned} &IF\ i_1 = \langle \text{дисгармонійна, помірна, гармонійна} \rangle \\ &AND\ i_2 = \langle \text{низькі, середні, високі} \rangle \\ &AND\ i_3 = \langle \text{нечітка, помірна, чітка} \rangle \\ &AND\ i_4 = \langle \text{перевантажений, помірний, збалансований} \rangle, \\ &THEN\ I = \langle \text{низька, середня, висока} \rangle. \end{aligned} \quad (4.23)$$

На підставі сформованих умов (4.20)–(4.23) будуються матриці знань, подані у табл. 4.2–4.5, які використовуються у процесі нечіткого логічного висновку для оцінювання якості проєктування та дизайну вебдодатків. Матриці знань є формалізованим представленням сукупності правил, що встановлюють зв'язок між множинами вхідних і вихідних лінгвістичних змінних. Вони відображає структуру експертних знань у вигляді таблиці відповідностей, де кожна комірка фіксує логічну залежність між комбінацією умов і результатом [105, 130, 131, 140].

Таблиця 4.2

Матриця знань щодо якості проєктування та дизайну вебдодатків

Якість формування ергономіки та когнітивних принципів взаємодії E	Якість формування доступності та інклюзивності D	Якість інформаційної архітектури та візуального дизайну I	Якість проєктування та дизайну вебдодатків G
низька	низька	низька	низька
низька	середня	низька	
середня	середня	середня	середня
середня	середня	висока	
висока	висока	середня	висока
висока	висока	висока	

Сформовано матрицю знань [136, 139] на основі встановлених закономірностей взаємодії факторів, що визначають якість формування ергономіки та когнітивних принципів взаємодії (табл. 4.3).

Таблиця 4.3

Матриця знань щодо якості ергономіки та когнітивних принципів взаємодії

Консистентність дизайн-моделей e_1	Модальність інтерфейсу e_2	Масштабованість e_3	Зворотний зв'язок e_4	Якість формування ергономіки та когнітивних принципів взаємодії E
1	2	3	4	5
хаотична	одномодальний	обмежена	повільний	низька
частково узгоджена	одномодальний	обмежена	повільний	

Продовження табл. 4.3

1	2	3	4	5
частково узгоджена	багатомодальний	помірна	середній	середня
частково узгоджена	мультимодальний	помірна	середній	
цілісна	багатомодальний	висока	швидкий	висока
цілісна	мультимодальний	висока	швидкий	

Також у табличному вигляді подано розроблену матрицю знань [136, 139] щодо лінгвістичної змінної D — «якість формування доступності та інклюзивності» та її часткових показників (табл. 4.4).

Таблиця 4.4

Матриця знань щодо якості формування доступності та інклюзивності

Верифікація відповідності стандартам доступності d_1	Полімодальна репрезентація контенту d_2	Персоналізація параметрів d_3	Альтернативні механізми навігації d_4	Якість формування доступності та інклюзивності D
низька	одноканальна	мінімальна	обмежена	низька
низька	одноканальна	розширена	обмежена	
часткова	багатоканальна	розширена	розширена	середня
часткова	мультиканальна	розширена	розширена	
повна	мультиканальна	розширена	повна	висока
повна	мультиканальна	повна	повна	

Побудова наступної матриці знань здійснюється шляхом поєднання найбільш імовірних варіантів значень вхідних змінних та визначення для кожної комбінації відповідного рівня лінгвістичної змінної I (табл. 4.5) [130, 131, 136, 139]. Якість інформаційної архітектури та візуального дизайну формується на основі таких факторів, як композиція та ритм макету, колористика та контрастність, ієрархія візуальних елементів та просторовий дизайн. Кожна змінна характеризується власною множиною термів, які відображають якісні градації її

значення. Наприклад, композиція та ритм макету може бути дисгармонійно, помірно чи гармонійною. Така матриця знань не лише фіксує всі допустимі варіанти взаємодії факторів, а й дає можливість відтворювати закономірності, що виникають у реальних умовах проектування інтерфейсів та візуальних рішень.

Таблиця 4.5

Матриця знань щодо якості інформаційної архітектури
та візуального дизайну

Композиція та ритм макету i_1	Колористика та контраст- ність i_2	Ієрархія ві- зуальних елементів i_3	Просторо- вий баланс i_4	Якість інфор- маційної архітек- тури та візуаль- ного дизайну I
дисгармо- нійна	низькі	нечітка	переванта- жений	низька
дисгармо- нійна	низькі	помірна	переванта- жений	
помірна	середні	помірна	помірний	середня
гармонійна	середні	помірна	помірний	
помірна	високі	чітка	збалансова- ний	висока
гармонійна	високі	чітка	збалансова- ний	

Згідно табл. 4.2 розроблено нечіткі логічні рівняння [105, 151, 152] щодо лінгвістичної змінної G «якість проектування та дизайну вебдодатків» для термів «низька», «середня», «висока»:

$$\begin{aligned}
 \mu_{\text{низька}}(G) &= \mu_{\text{низька}}(E) \wedge \mu_{\text{низька}}(D) \wedge \mu_{\text{низька}}(I) \vee \\
 &\vee \mu_{\text{низька}}(E) \wedge \mu_{\text{середня}}(D) \wedge \mu_{\text{низька}}(I), \\
 \mu_{\text{середня}}(G) &= \mu_{\text{середня}}(E) \wedge \mu_{\text{середня}}(D) \wedge \mu_{\text{середня}}(I) \vee \\
 &\vee \mu_{\text{середня}}(E) \wedge \mu_{\text{середня}}(D) \wedge \mu_{\text{висока}}(I), \\
 \mu_{\text{висока}}(G) &= \mu_{\text{висока}}(E) \wedge \mu_{\text{висока}}(D) \wedge \mu_{\text{середня}}(I) \vee \\
 &\vee \mu_{\text{висока}}(E) \wedge \mu_{\text{висока}}(D) \wedge \mu_{\text{висока}}(I).
 \end{aligned}
 \tag{4.24}$$

На основі матриць знань щодо часткових показників якості проектування та дизайну вебдодатків, представлених у табл. 4.3–4.5, також сформовано нечіткі логічні рівняння [136, 151]:

$$\begin{aligned}
\mu_{\text{низька}}(E) &= \mu_{\text{хаотична}}(e_1) \wedge \mu_{\text{одномодальний}}(e_2) \wedge \mu_{\text{обмежена}}(e_3) \wedge \\
&\wedge \mu_{\text{повільний}}(e_4) \vee \mu_{\text{частково узгоджена}}(e_1) \wedge \mu_{\text{одномодальний}}(e_2) \wedge \\
&\wedge \mu_{\text{обмежена}}(e_3) \wedge \mu_{\text{повільний}}(e_4), \\
\mu_{\text{середня}}(E) &= \mu_{\text{частково узгоджена}}(e_1) \wedge \mu_{\text{багатомодальний}}(e_2) \wedge \mu_{\text{помірна}}(e_3) \wedge \\
&\wedge \mu_{\text{середній}}(e_4) \vee \mu_{\text{частково узгоджена}}(e_1) \wedge \mu_{\text{мультимодальний}}(e_2) \wedge \\
&\wedge \mu_{\text{помірна}}(e_3) \wedge \mu_{\text{середній}}(e_4), \\
\mu_{\text{висока}}(E) &= \mu_{\text{цілісна}}(e_1) \wedge \mu_{\text{багатомодальний}}(e_2) \wedge \mu_{\text{висока}}(e_3) \wedge \\
&\wedge \mu_{\text{швидкий}}(e_4) \vee \mu_{\text{цілісна}}(e_1) \wedge \mu_{\text{мультимодальний}}(e_2) \wedge \\
&\wedge \mu_{\text{висока}}(e_3) \wedge \mu_{\text{швидкий}}(e_4).
\end{aligned} \tag{4.25}$$

$$\begin{aligned}
\mu_{\text{низька}}(D) &= \mu_{\text{низька}}(d_1) \wedge \mu_{\text{одноканальна}}(d_2) \wedge \mu_{\text{мінімальна}}(d_3) \wedge \\
&\wedge \mu_{\text{обмежена}}(d_4) \vee \mu_{\text{низька}}(d_1) \wedge \mu_{\text{одноканальна}}(d_2) \wedge \\
&\wedge \mu_{\text{розширена}}(d_3) \wedge \mu_{\text{обмежена}}(d_4), \\
\mu_{\text{середня}}(D) &= \mu_{\text{часткова}}(d_1) \wedge \mu_{\text{багатоканальна}}(d_2) \wedge \mu_{\text{розширена}}(d_3) \wedge \\
&\wedge \mu_{\text{розширена}}(d_4) \vee \mu_{\text{часткова}}(d_1) \wedge \mu_{\text{мультिकанальна}}(d_2) \wedge \\
&\wedge \mu_{\text{розширена}}(d_3) \wedge \mu_{\text{розширена}}(d_4), \\
\mu_{\text{висока}}(D) &= \mu_{\text{повна}}(d_1) \wedge \mu_{\text{мультिकанальна}}(d_2) \wedge \mu_{\text{розширена}}(d_3) \wedge \\
&\wedge \mu_{\text{повна}}(d_4) \vee \mu_{\text{повна}}(d_1) \wedge \mu_{\text{мультиканальна}}(d_2) \wedge \\
&\wedge \mu_{\text{повна}}(d_3) \wedge \mu_{\text{повна}}(d_4).
\end{aligned} \tag{4.26}$$

$$\begin{aligned}
\mu_{\text{низька}}(I) &= \mu_{\text{дисгармонійна}}(i_1) \wedge \mu_{\text{низькі}}(i_2) \wedge \mu_{\text{нечітка}}(i_3) \wedge \\
&\wedge \mu_{\text{перевантажений}}(i_4) \vee \mu_{\text{дисгармонійна}}(i_1) \wedge \mu_{\text{низькі}}(i_2) \wedge \\
&\wedge \mu_{\text{помірна}}(i_3) \wedge \mu_{\text{перевантажений}}(i_4), \\
\mu_{\text{середня}}(I) &= \mu_{\text{помірна}}(i_1) \wedge \mu_{\text{середні}}(i_2) \wedge \mu_{\text{помірна}}(i_3) \wedge \\
&\wedge \mu_{\text{помірний}}(i_4) \vee \mu_{\text{гармонійна}}(i_1) \wedge \mu_{\text{середні}}(i_2) \wedge \\
&\wedge \mu_{\text{помірна}}(i_3) \wedge \mu_{\text{помірний}}(i_4), \\
\mu_{\text{висока}}(I) &= \mu_{\text{помірна}}(i_1) \wedge \mu_{\text{високі}}(i_2) \wedge \mu_{\text{чітка}}(i_3) \wedge \\
&\wedge \mu_{\text{збалансований}}(i_4) \vee \mu_{\text{гармонійна}}(i_1) \wedge \mu_{\text{високі}}(i_2) \wedge \\
&\wedge \mu_{\text{чітка}}(i_3) \wedge \mu_{\text{збалансований}}(i_4).
\end{aligned} \tag{4.27}$$

Узагальнене подання нечіткої множини лінгвістичної змінної G будуватиметься з урахуванням сукупності нечітких термів, що характеризуються якісними ознаками рівнів «низька», «середня» та «висока». Кожен з цих термів визначається через власну функцію належності, яка відображає ступінь відповідності значень аналізованої змінної певному якісному рівню [46, 104, 136].

$$G(E, D, I) = \left\{ \frac{\mu_{\text{низька}}(G)}{k_1}, \frac{\mu_{\text{середня}}(G)}{k_2}, \frac{\mu_{\text{висока}}(G)}{k_3} \right\}, \quad (4.28)$$

де k_1, k_2, k_3 — позначають значення змінної G , що відносяться до кожного з розглянутих термів.

Після формування загальної нечіткої множини постає задача переходу до кількісних показників, що відображають інтегральну оцінку якості проектування та дизайну вебдодатків. Такий перехід ґрунтується на процедурі дефазифікації. Дефазифікація дозволяє отримати еквівалентне числове представлення на основі нечітких значень. Для цього побудовано таблиці, у яких термножини доповнені значеннями функцій належності у вузлових точках поділу універсальної множини значень P [104, 130, 134–136].

Сформовано таблицю, що містить усі значення функцій належності лінгвістичної змінної E — «якість формування ергономіки та когнітивних принципів взаємодії» (табл. 4.6).

Таблиця 4.6

Значення функцій належності якості формування ергономіки
та когнітивних принципів взаємодії

Лінгвістична змінна	Множина значень	Функція належності	Значення у точках поділу множини		
			$\mu_i(p_1)$	$\mu_i(p_2)$	$\mu_i(p_3)$
1	2	3	4	5	6
Консистентність дизайну-моделей (e_1)	1, 2, 3 у. о.	$\mu_{\text{хаотична}}(p_i)$	0,11	0,249	1
		$\mu_{\text{частково узгоджена}}(p_i)$	1	0,142	1
		$\mu_{\text{цілісна}}(p_i)$	1	0,332	0,11

Продовження табл. 4.6

1	2	3	4	5	6
Модаль-ність інтерфейсу (e_2)	1, 3, 5 режимів	$\mu_{\text{одномодальний}}(p_i)$	0,11	0,332	1
		$\mu_{\text{багатомодальний}}(p_i)$	1	0,165	1
		$\mu_{\text{мультимодальний}}(p_i)$	1	0,332	0,11
Масштабованість (e_3)	1, 2, 3 у. о.	$\mu_{\text{обмежена}}(p_i)$	0,11	0,199	1
		$\mu_{\text{помірна}}(p_i)$	1	0,142	1
		$\mu_{\text{висока}}(p_i)$	1	0,249	0,11
Зворотний зв'язок (e_4)	1, 2, 3 у. о.	$\mu_{\text{повільний}}(p_i)$	0,11	0,166	1
		$\mu_{\text{середній}}(p_i)$	1	0,198	1
		$\mu_{\text{швидкий}}(p_i)$	1	0,332	0,11

Також побудовано таблицю значень функцій належності лінгвістичної змінної D — «якість формування доступності та інклюзивності» (табл. 4.7).

Таблиця 4.7

Значення функцій належності якості формування доступності та інклюзивності

Лінгвістична змінна	Множина значень	Функція належності	Значення у точках поділу множини		
			$\mu_i(p_1)$	$\mu_i(p_2)$	$\mu_i(p_3)$
Верифікація відпов. ст. доступності (d_1)	1, 2, 3 у. о.	$\mu_{\text{низька}}(p_i)$	0,11	0,332	1
		$\mu_{\text{часткова}}(p_i)$	1	0,123	1
		$\mu_{\text{повна}}(p_i)$	1	0,249	0,11
Полімода-льна репрезентація контенту (d_2)	1, 3, 5 форматів	$\mu_{\text{одноканальна}}(p_i)$	0,11	0,249	1
		$\mu_{\text{багатоканальна}}(p_i)$	1	0,142	1
		$\mu_{\text{мультिकанальна}}(p_i)$	1	0,332	0,11
Персоналізація параметрів (d_3)	1, 2, 3 у. о.	$\mu_{\text{мінімальна}}(p_i)$	0,11	0,332	1
		$\mu_{\text{розширена}}(p_i)$	1	0,165	1
		$\mu_{\text{повна}}(p_i)$	1	0,249	0,11
Альтернативні мех. навігації (d_4)	1, 2, 3 механізми	$\mu_{\text{обмежена}}(p_i)$	0,11	0,249	1
		$\mu_{\text{розширена}}(p_i)$	1	0,142	1
		$\mu_{\text{повна}}(p_i)$	1	0,332	0,11

Значення функцій належності щодо змінної I — «якість інформаційної архітектури та візуального дизайну» подано у табл. 4.8.

Таблиця 4.8

Значення функцій належності якості
інформаційної архітектури та візуального дизайну

Лінгвістична змінна	Множина значень	Функція належності	Значення у точках поділу множини		
			$\mu_i(p_1)$	$\mu_i(p_2)$	$\mu_i(p_3)$
Композиція та ритм макету (i_1)	1, 2, 3 у. о.	$\mu_{\text{дисгармонійна}}(p_i)$	0,11	0,249	1
		$\mu_{\text{помірна}}(p_i)$	1	0,123	1
		$\mu_{\text{гармонійна}}(p_i)$	1	0,249	0,11
Колористика та контрастність (i_2)	1, 2, 3 у. о.	$\mu_{\text{низькі}}(p_i)$	0,11	0,199	1
		$\mu_{\text{середні}}(p_i)$	1	0,123	1
		$\mu_{\text{високі}}(p_i)$	1	0,332	0,11
Ієрархія візуальних елементів (i_3)	1, 2, 3 у. о.	$\mu_{\text{нечітка}}(p_i)$	0,11	0,249	1
		$\mu_{\text{помірна}}(p_i)$	1	0,142	1
		$\mu_{\text{чітка}}(p_i)$	1	0,332	0,11
Просторовий баланс (i_4)	1, 2, 3 у. о.	$\mu_{\text{перевантажений}}(p_i)$	0,11	0,249	1
		$\mu_{\text{помірний}}(p_i)$	1	0,123	1
		$\mu_{\text{збалансований}}(p_i)$	1	0,332	0,11

Для проведення дефазифікації [130, 131, 134, 135] у нечіткі логічні рівняння (4.25)–(4.27) підставлено значення з табл. 4.6–4.8. Для проведення експерименту використано середні значення універсальних множин даних.

$$\mu_{\text{низька}}(E) = 0,249 \wedge 0,332 \wedge 0,199 \wedge 0,166 \vee 0,142 \wedge 0,332 \wedge 0,199 \wedge 0,166 = 0,166;$$

$$\mu_{\text{середня}}(E) = 0,142 \wedge 0,165 \wedge 0,142 \wedge 0,198 \vee 0,142 \wedge 0,332 \wedge 0,142 \wedge 0,198 = 0,142;$$

$$\mu_{\text{висока}}(E) = 0,332 \wedge 0,165 \wedge 0,249 \wedge 0,249 \vee 0,332 \wedge 0,332 \wedge 0,249 \wedge 0,249 = 0,249.$$

$$\mu_{\text{низька}}(D) = 0,332 \wedge 0,249 \wedge 0,332 \wedge 0,249 \vee 0,332 \wedge 0,249 \wedge 0,165 \wedge 0,249 = 0,249;$$

$$\mu_{\text{середня}}(D) = 0,123 \wedge 0,142 \wedge 0,165 \wedge 0,142 \vee 0,123 \wedge 0,332 \wedge 0,165 \wedge 0,142 = 0,123;$$

$$\mu_{\text{висока}}(D) = 0,249 \wedge 0,332 \wedge 0,165 \wedge 0,332 \vee 0,249 \wedge 0,332 \wedge 0,249 \wedge 0,332 = 0,249.$$

$$\mu_{\text{низька}}(I) = 0,249 \wedge 0,199 \wedge 0,249 \wedge 0,249 \vee 0,249 \wedge 0,199 \wedge 0,142 \wedge 0,249 = 0,199;$$

$$\mu_{\text{середня}}(I) = 0,123 \wedge 0,123 \wedge 0,142 \wedge 0,123 \vee 0,249 \wedge 0,123 \wedge 0,142 \wedge 0,123 = 0,123;$$

$$\mu_{\text{висока}}(I) = 0,123 \wedge 0,332 \wedge 0,332 \wedge 0,332 \vee 0,249 \wedge 0,332 \wedge 0,332 \wedge 0,332 = 0,249.$$

Одержані результати часткових показників якості проєктування та дизайну вебдодатків підставлено у нечіткі логічні рівняння (4.24) [136, 134, 151]:

$$\mu_{\text{низька}}(G) = 0,166 \wedge 0,249 \wedge 0,199 \vee 0,166 \wedge 0,123 \wedge 0,199 = 0,166;$$

$$\mu_{\text{середня}}(G) = 0,142 \wedge 0,123 \wedge 0,123 \vee 0,142 \wedge 0,123 \wedge 0,249 = 0,123;$$

$$\mu_{\text{висока}}(G) = 0,249 \wedge 0,249 \wedge 0,123 \vee 0,249 \wedge 0,249 \wedge 0,249 = 0,249.$$

Для переходу від якісного опису процесу проєктування та дизайну вебдодатків до кількісного оцінювання використано принцип центра ваги, який забезпечує отримання збалансованого інтегрального значення показника на основі зважування усіх термів нечіткої множини. Аналітичне представлення розрахункової процедури задається таким виразом [104, 105, 136]:

$$G = \frac{\sum_{i=1}^m \left[\underline{G} + (i-1) \frac{\overline{G} - \underline{G}}{m-1} \right] \mu_i(G)}{\sum_{i=1}^m \mu_i(G)}, \quad (4.29)$$

де $\underline{G}$ та $\overline{G}$ — задають нижню та верхню межі діапазону зміни показника якості; m — позначає кількість нечітких термів; $\mu_i(G)$ — значенням функції належності для i -го терма при заданому рівні вхідної змінної.

Слід зазначити, що вагами виступають значення функцій належності, а координати центру маси визначаються дискретизацією відрізка $[\underline{G}, \overline{G}]$ на m рівновіддалених точок [136].

За заданими умовами $m = 3$, що відповідає трьом рівням якісного оцінювання — «низький», «середній» та «високий». Для цих термів значення функцій належності позначаються як $\mu_1(G) = \mu_{\text{низька}}(G)$, $\mu_2(G) = \mu_{\text{середня}}(G)$, $\mu_3(G) = \mu_{\text{висока}}(G)$. Межі зміни змінної G будуть такими: $\underline{G} = 1\%$, $\overline{G} = 100\%$. Вибір саме такого інтервалу зумовлений доцільністю інтерпретувати значення

показника якості у відносних величинах. Процедура дефазифікації передбачає підстановку у формулу (4.29) трьох репрезентативних точок, які відповідають інтервалам 1 %, 50 % та 100 %, для узгодження центру ваги з основними рівнями якості [46]. Отримані значення $\mu_1(G) = 0,166$, $\mu_2(G) = 0,123$, $\mu_3(G) = 0,249$ відображають ступінь належності процесу до кожного з термів при конкретних обраних вхідних параметрах.

$$G_{\text{прогноз.}} = \frac{1 \cdot 0,166 + 50 \cdot 0,123 + 100 \cdot 0,249}{0,166 + 0,123 + 0,249} = 58,022 \, \%.$$

Отримане значення потрібно трактувати як інтегральну характеристику стану досліджуваного процесу, яка враховує всі три рівні якісного оцінювання при обраних вхідних параметрах з урахуванням їх вагомості. При виборі інших параметрів показник буде змінюватися відповідно до аналогічно проведених обчислень [130, 131, 136].

4.5. Етапи інформаційної технології оцінювання якості проєктування та дизайну вебдодатків

Інформаційна технологія — це організована система методів, алгоритмів та засобів, що забезпечує перетворення первинних даних у релевантну інформацію для підтримки процесів прийняття рішень [61, 77, 153]. Розроблена інформаційна технологія оцінювання якості проєктування та дизайну вебдодатків складається з шести основних етапів, кожен з яких містить необхідну кількість проміжних кроків. Нижче наведено детальний теоретичний опис виокремлених етапів.

Етап 1. Функціональне моделювання процесу створення вебдодатків

Початковий етап полягає у системному функціональному моделюванні з метою комплексного відображення логічної структури проєктування та створення вебдодатків. В основі моделювання лежить методологія IDEF0, розроблена на базі підходу SADT, що дозволяє здійснювати структурований аналіз

ієрархії функцій, а також визначати їх взаємозв'язки через формалізовані вхідні та вихідні параметри, керуючі впливи та механізми реалізації. На етапі аналізу сучасного стану галузі визначаються основні тенденції розвитку вебтехнологій, специфіка вимог користувачів, стан нормативно-правової бази, наявні технологічні обмеження та перспективні напрями розвитку. Побудова контекстної діаграми дозволяє сформувати інтегральне уявлення про систему як єдине ціле, відобразити головну функцію та її ключові інформаційні зв'язки. Декомпозиція контекстної діаграми спрямована на деталізацію загальної функції у вигляді підфункцій, що формують логічно впорядковану структуру виконання робіт. Кожен рівень деталізації зберігає зв'язок із вищим рівнем і забезпечує ієрархічну цілісність моделі. Побудова дерева вузлів моделі виконується задля представлення функціональної структури у вигляді системи вузлів, що відповідають окремим підпроцесам, та їх підпорядкованості [45, 46, 48, 153].

Етап 2. Онтологічне моделювання якості вебдодатків

Наступний етап передбачає формалізоване моделювання знань щодо якості вебдодатків на основі онтологічного підходу. Розроблення онтології здійснюється відповідно до міжнародних стандартів, зокрема ISO/IEC 25010:2023, ISO 9241-110:2020 та ISO/IEC 40500:2012, що регламентують вимоги до якості, ергономіки та доступності вебпродуктів. Створення онтології верхнього рівня спрямоване на відображення узагальнених концептів предметної області, які забезпечують семантичну цілісність моделі. Подальша деталізація виконується шляхом формування множини понять нижчих рівнів ієрархії та встановлення між ними відношень різних типів: ієрархічних («є підтипом»), асоціативних («взаємодіє з») та причинно-наслідкових («призводить до»). Формалізація зв'язків супроводжується визначенням характеристик і властивостей кожного елемента моделі, що дозволяє створити основу для подальшого кількісного та якісного аналізу. Для перевірки консистентності моделі здійснюється графічне відображення у вигляді онтологічних графів, що

дозволяє візуально ідентифікувати ключові концепти, їх взаємозв'язки та потенційні суперечності. Результатом етапу є верифікована онтологічна модель, готова до інтеграції у системи підтримки прийняття рішень та інші прикладні інформаційні середовища [69–72, 74, 76, 79, 84, 85, 89, 153].

Етап 3. Розроблення семантичних моделей факторів

На основі побудованої онтології виконується розроблення семантичних моделей факторів, що здійснюють визначальний вплив на якість проєктування та дизайну вебдодатків. Використовуються експертні методи оцінювання, які дозволяють визначити значущість факторів, виявити їх взаємозалежності та ступінь впливу на ключові характеристики продукту. Формується узгоджена множина факторів, що охоплює ергономічні та когнітивні аспекти взаємодії, принципи доступності та інклюзивності, параметри інформаційної архітектури та особливості візуального дизайну. Семантичне моделювання здійснюється із застосуванням логіки предикатів, що забезпечує формальну несуперечливість та можливість автоматизованої обробки знань. У процесі побудови моделі встановлюються семантичні зв'язки між факторами, визначаються залежності прямого та опосередкованого впливу, а також формалізуються логічні правила взаємодії [94–98, 100, 102–104, 153].

Етап 4. Розроблення моделей вагомості факторів

На цьому етапі проводиться математичне моделювання ієрархічної структури факторів для визначення їх відносної значущості. Формуються матриці досяжності та ієрархічні таблиці, які відображають ступінь взаємозв'язків між окремими параметрами. Виконується ранжування факторів за допомогою побудови ієрархічних дерев, що відображають причинно-наслідкові залежності та пріоритети. Розрахунок вагових коефіцієнтів здійснюється з урахуванням як кількісних, так і якісних характеристик. Це дозволяє отримати оцінку впливу кожного фактора на результуючу якість. При цьому будуються як моделі вагомості факторів ергономіки та когнітивних принципів взаємодії, доступності та інклюзивності, інформаційної архітектури та візуального дизайну,

так і узагальнена модель вагомості факторів проєктування та дизайну вебдодатків. Побудовані моделі вагомості стають базою для обґрунтованого вибору оптимальних варіантів реалізації вебдодатків на наступних етапах дослідження [100, 104, 107, 109, 153].

Етап 5. Вибір оптимального варіанту проєктування та дизайну вебдодатків

На цьому етапі застосовуються методи багатокритеріального вибору для визначення оптимального варіанту проєктних рішень. Розрахунок здійснюється на основі методів лінійного об'єднання критеріїв та аналізу відношень переваг. Кожна альтернатива оцінюється за множиною параметрів, які відображають технічні, ергономічні та експлуатаційні параметри. Додатково враховуються експертні оцінки, що дозволяє поєднати формалізовані обчислення з якісними характеристиками, важливими для кінцевих користувачів. Спочатку здійснюється вибір оптимальних варіантів інтегральних характеристик проєктування та дизайну вебдодатків, тобто ергономіки та когнітивних принципів взаємодії, доступності та інклюзивності, інформаційної архітектури та візуального дизайну. Далі відбувається визначення оптимального варіанту проєктування та дизайну вебдодатків за вказаними інтегральними характеристиками. Порівняння результатів за кількома методами забезпечує підвищення надійності прийнятого рішення та зменшення ризику вибору неефективного варіанту [104, 105, 110–112, 153].

Етап 6. Визначення прогнозованого показника якості проєктування та дизайну вебдодатків

Заключний етап полягає у формуванні прогнозованої оцінки якості обраного варіанту реалізації вебдодатку. Для цього розробляється багаторівнева модель на основі апарату нечіткої логіки, що дозволяє врахувати невизначеність та варіативність початкових даних. Формується вихідна база даних, що містить інформацію про лінгвістичні змінні, терм множини та множини допустимих значень. Визначаються функції належності для лінгвістичних змінних,

що описують рівні якості за ключовими параметрами. Формуються бази знань, матриці знань та нечіткі рівняння. Використання нечітких логічних рівнянь дає змогу сформувати комплексну оцінку навіть у випадках, коли вхідні дані є неповними або мають нечіткий характер. Прогнозований показник визначається методом центру ваги, що забезпечує інтегральну оцінку, зведену до єдиного числового результату [130, 131, 135, 136, 153].

На рис. 4.2 подано розроблену структурно-функціональну модель інформаційної технології оцінювання якості проєктування та дизайну вебдодатків.

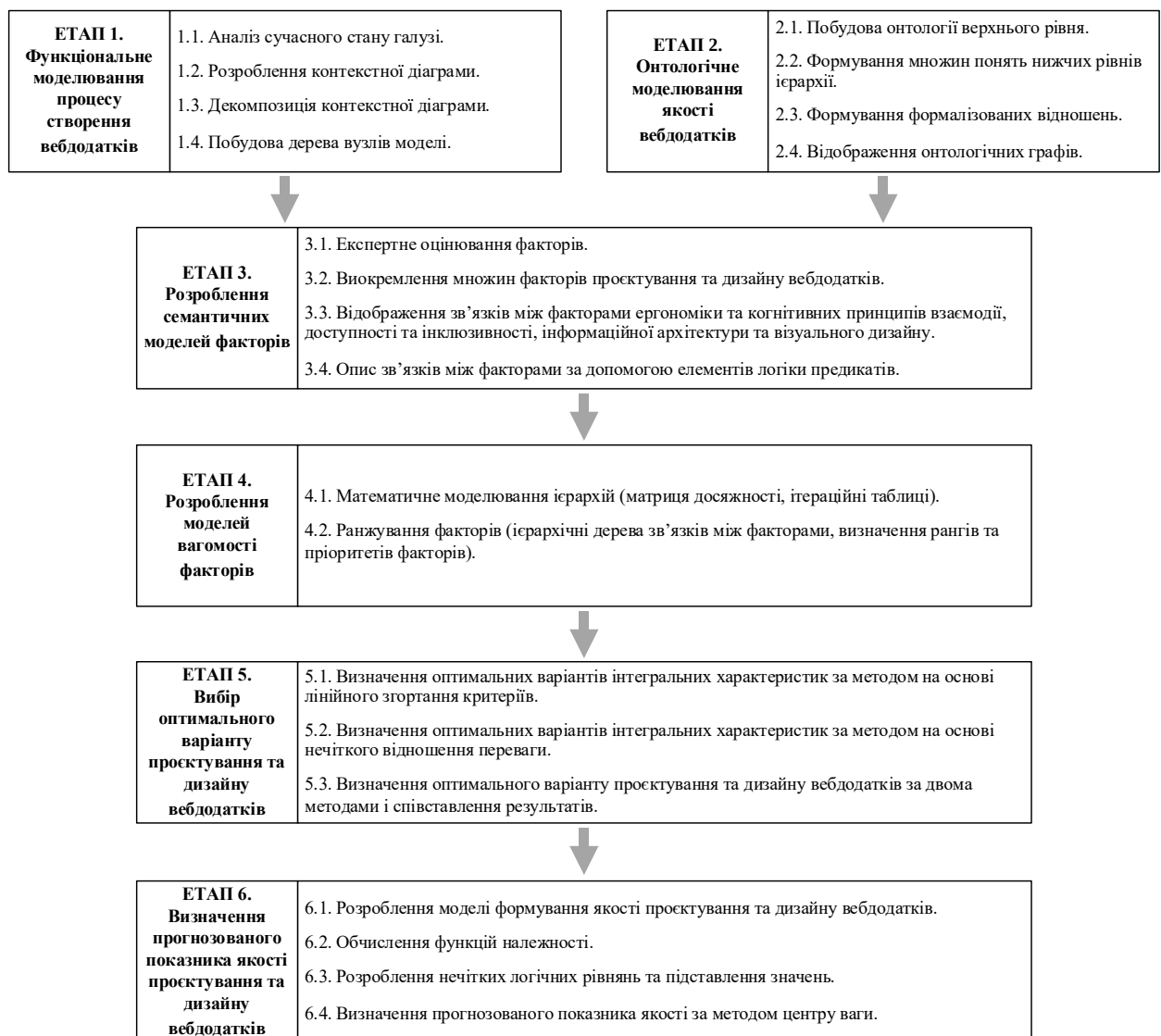


Рис. 4.2. Структурно-функціональна модель інформаційної технології оцінювання якості проєктування та дизайну вебдодатків

Таким чином, розроблена інформаційна технологія має вагоме наукове та практичне значення, оскільки формує цілісний підхід до управління якістю вебдодатків, поєднуючи концептуальне, формалізоване та аналітичне представлення процесів. Її цінність полягає у здатності системно інтегрувати методи структурного аналізу, онтологічного моделювання та багатокритеріального оцінювання в єдиний інструментарій, який забезпечує узгодженість, відтворюваність і обґрунтованість прийнятих рішень.

Актуальність зумовлена зростанням складності вебдодатків, необхідністю врахування значної кількості характеристик та вимогою до забезпечення стабільної якості в умовах динамічного розвитку цифрового середовища. Запропонована інформаційна технологія усуває фрагментарність підходів, властиву традиційним методам розробки, та забезпечує інтеграцію різнорівневих моделей у єдину узгоджену систему.

Важливим є те, що технологія враховує як об'єктивні, так і експертні оцінки. Це дозволяє не лише оцінювати поточний рівень якості, а й прогнозувати її зміни. У результаті досягається підвищення ефективності процесу розробки, скорочення витрат часу та ресурсів, а також зростання конкурентоспроможності кінцевого продукту. Методологічна універсальність технології забезпечує її адаптацію до різних сфер застосування, включно з освітніми, комерційними та інклюзивними вебсервісами.

4.6. Реалізація компоненти інформаційної технології у вигляді програмного продукту

Одним з первинних та ключових етапів інформаційної технології оцінювання якості проєктування та дизайну вебдодатків є визначення пріоритетності факторів. У цьому контексті надійним та теоретично виваженим є метод ранжування [104, 105, 110, 111], детально описаний та реалізований у підрозділі 2.4 розділу 2. Основний алгоритм програми представлено на рис. 4.3.

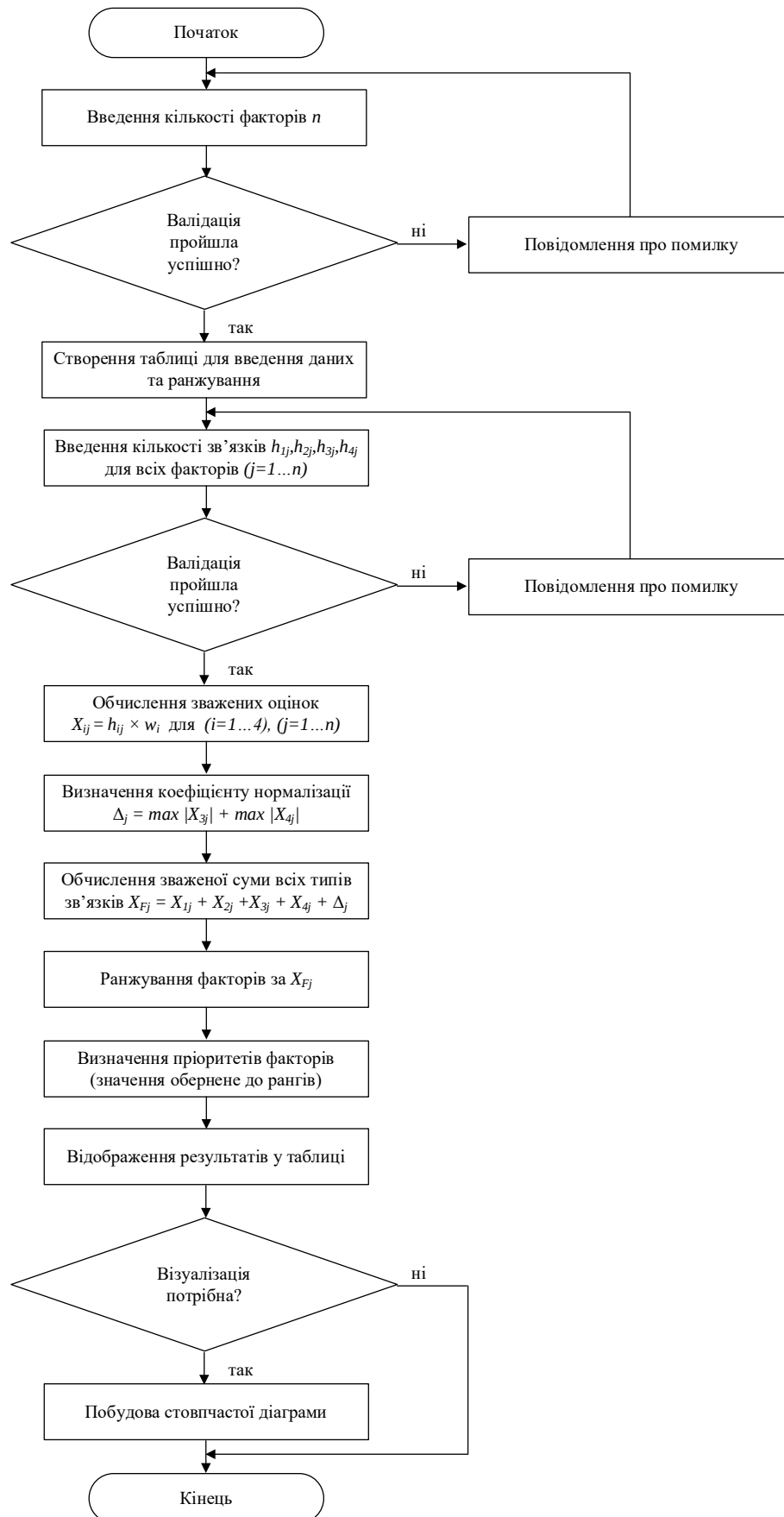


Рис. 4.3. Алгоритм програми

«Визначення пріоритетності факторів за методом ранжування»

Програмний продукт «Визначення пріоритетності факторів за методом ранжування» реалізований з використанням об'єктно-орієнтованої парадигми програмування на мові Python (посилання для ознайомлення з кодом програми вказане у Додатку Б). Він забезпечує повний цикл аналізу від введення первинних даних до візуалізації кінцевих результатів. Програма має чітко структуровану модульну архітектуру. Основний клас реалізує патерн Model-View-Controller, де модель даних подана внутрішніми структурами для зберігання інформації про кількість зв'язків щодо кожного фактора та результатів обчислень. Представлення здійснено за допомогою графічного інтерфейсу користувача на основі бібліотеки Tkinter. Контролер забезпечує координовану взаємодію між компонентами програми [154, 155].

Інтерфейс містить компонент введення параметрів. Здійснюється валідація вхідних даних та попередження про можливі помилки введення. Динамічна таблиця автоматично адаптується до кількості введених факторів. Навігація між полями введення здійснюється за допомогою розширеної системи клавіатурних скорочень. Обчислювальний модуль містить валідатор вхідних даних, який перевіряє коректність введених значень та їх відповідність математичним вимогам алгоритму.

Модуль ранжування та визначення пріоритетності забезпечує сортування факторів за значенням інтегрального показника та присвоєння відповідних рангів і пріоритетів. Модуль візуалізації включає генератор статистичних діаграм з використанням бібліотеки Matplotlib [156, 157]. Система адаптивного масштабування автоматично налаштовує параметри візуалізації залежно від кількості факторів. Здійснюється логарифмічне масштабування ширини діаграми та динамічний розрахунок кута повороту підписів.

Програма сумісна з операційними системами Windows, macOS та Linux. Мінімальні системні вимоги: 512 мегабайт оперативної пам'яті та 50 мегабайт вільного дискового простору. Для оптимальної продуктивності рекомендовано 2 гігабайти оперативної пам'яті [158].

Інтерфейс програми з прикладом визначення пріоритетності факторів ергономіки та когнітивних принципів взаємодії представлений на рис. 4.4.

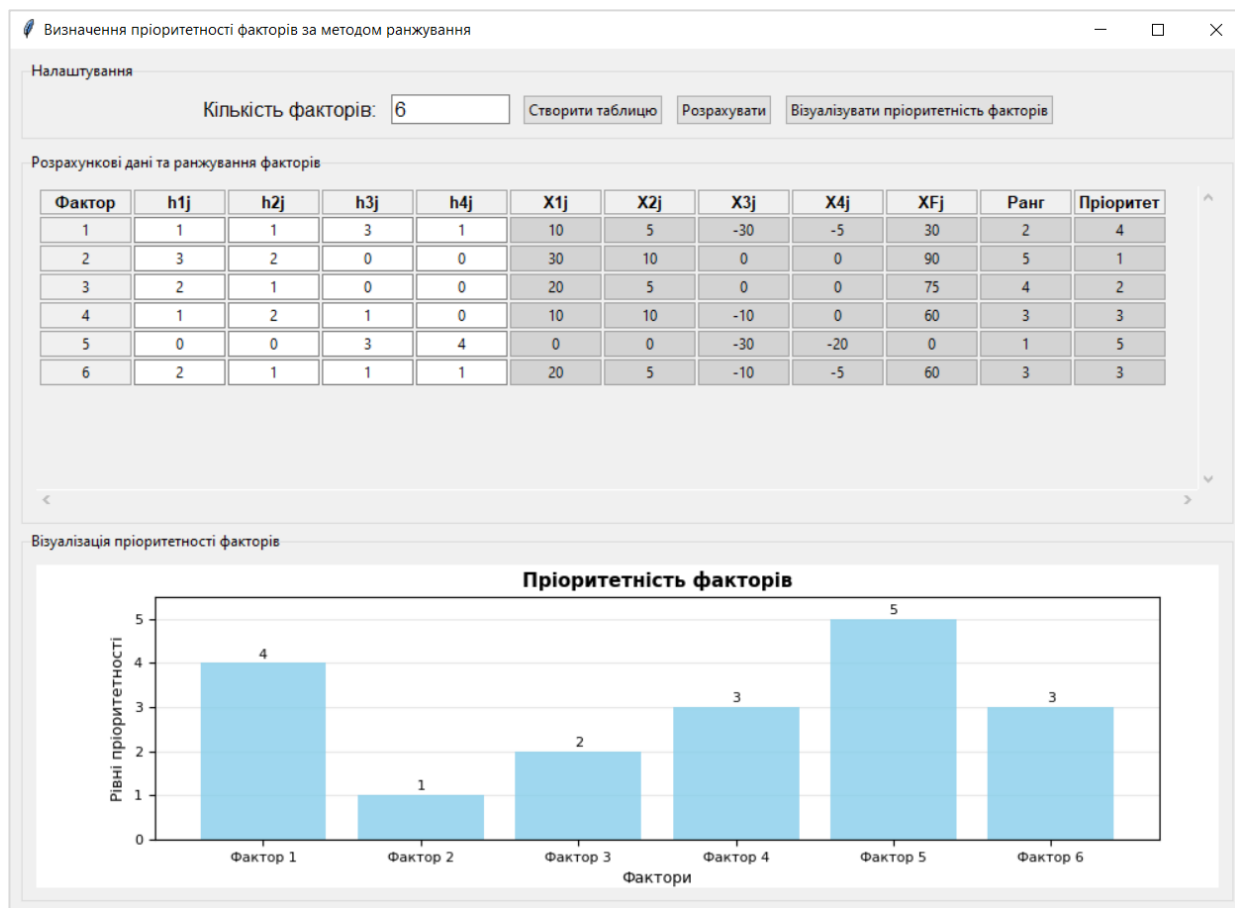


Рис. 4.4. Інтерфейс програми
«Визначення пріоритетності факторів за методом ранжування»

На рис. 4.4 наведено приклад визначення пріоритетності факторів у розробленій програмі. Користувач вводить необхідну кількість факторів та натискає кнопку «Створити таблицю». Якщо дані введено не коректно, з'являється повідомлення про помилку (рис. 4.5). Логічно, що дозволено введення цілого числа, що є більшим нуля.

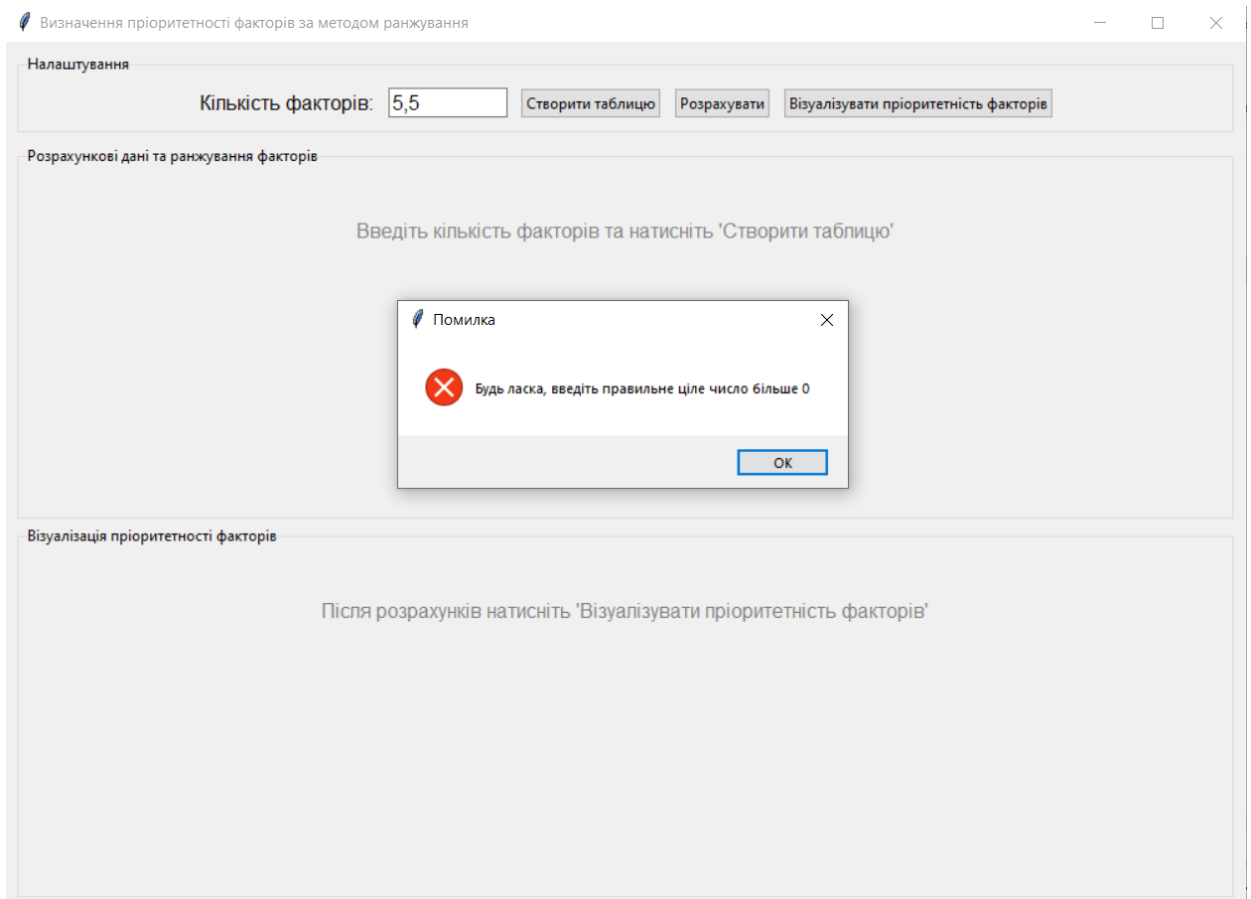


Рис. 4.5. Приклад некоректного введення даних

Якщо дані введено коректно створюється таблиця, яка містить 12 стовпців: фактор (порядковий номер фактора), h_{1j} — кількість прямих впливів щодо аналізованого фактора; h_{2j} — кількість впливів 2-го порядку (непрямих); h_{3j} — кількість прямих залежностей; h_{4j} — кількість залежностей 2-го порядку; X_{1j} обчислюється згідно з виразом (2.16), тобто $X_{1j} = h_{1j} w_1$; X_{2j} обчислюється як $X_{2j} = h_{2j} w_2$; X_{3j} обчислюється як $X_{3j} = h_{3j} w_3$; X_{4j} обчислюється як $X_{4j} = h_{4j} w_4$; X_{Fj} характеризує загальну оцінку фактора з урахуванням всіх категорій зв'язків та коригувального механізму, обчислюється за формулою (2.18); ранг фактора відображає його порядковий номер у загальному рейтингу, де ранг 1 відповідає найнижчій пріоритетності; пріоритет фактора є оберненим значенням до рангу та вказує на важливість фактора. Дані щодо

кількості зв'язків користувач вводить у стовпці h_{1j} , h_{2j} , h_{3j} , h_{4j} та натискає кнопку «Розрахувати». На наступному етапі користувач може натиснути кнопку «Візуалізувати пріоритетність факторів» для відображення стовпчастої діаграми. При цьому по осі абсцис представлено порядкові номери факторів, а по осі ординат — рівні пріоритетності [46, 104, 105, 110–112].

Розроблений програмний продукт може бути застосований у прийнятті рішень в умовах невизначеності та неповної інформації, зокрема щодо проєктування та дизайну вебдодатків.

Висновки до розділу 4

1. Означено особливості застосування нечіткої логіки при оцінюванні якості проєктування та дизайну вебдодатків. Розроблено ієрархічну модель формування якості проєктування та дизайну вебдодатків, яка враховує найпріоритетніші лінгвістичні змінні та часткові показники якості.

2. Сформовано нечіткі множини для усіх термів домінантних лінгвістичних змінних проєктування та дизайну вебдодатків на основі матриць попарних порівнянь та нормованих відносно одиниці значень функцій належності.

3. Розроблено нечіткі бази та матриці знань, у яких відображено взаємозв'язки між комбінаціями лінгвістичних термів окремих змінних та інтегрованим показником якості проєктування та дизайну вебдодатків. Побудовано нечіткі логічні рівняння для термів лінгвістичної змінної G «якість проєктування та дизайну вебдодатків» та для часових показників якості E «якість формування ергономіки та когнітивних принципів взаємодії», D «якість формування доступності та інклюзивності», I «якість інформаційної архітектури та візуального дизайну».

4. Проведено дефазифікацію нечітких множин завдяки підстановці значень у нечіткі логічні рівняння. За принципом центру ваги здійснено обчислення прогнозованого показника якості проєктування та дизайну вебдодатків при обраних вхідних параметрах, що становить $G_{\text{прогноз.}} = 58,022 \%$.

5. Розроблено інформаційну технологію оцінювання якості проєктування та дизайну вебдодатків. Розроблену інформаційну технологію представлено у вигляді структурно-функціональної моделі, що містить шість основних етапів: функціональне моделювання процесу створення вебдодатків, онтологічне моделювання якості вебдодатків, розроблення семантичних моделей факторів, розроблення моделей вагомості факторів, вибір оптимального варіанту проєктування та дизайну вебдодатків, визначення прогнозованого показника якості проєктування та дизайну вебдодатків.

6. Компоненту інформаційної технології проєктування та дизайну вебдодатків, спрямовану на визначення пріоритетності факторів за методом ранжування, представлено у вигляді програмного продукту. Програма розроблена з використанням об'єктно-орієнтованої парадигми програмування на мові Python та містить три основні модулі: налаштування, розрахункові дані та ранжування факторів, візуалізація пріоритетності факторів.

ВИСНОВКИ

Згідно з проведеними теоретичними та експериментальними дослідженнями у дисертаційній роботі розв'язано важливе науково-прикладне завдання оцінювання прогнозованої якості проєктування та дизайну вебдодатків шляхом розроблення інформаційної технології на основі функціонального та онтологічного моделювання, пріоритизації факторів за методами математичного моделювання ієрархій та ранжування, багатокритеріального аналізу альтернатив і засобів нечіткої логіки.

При цьому отримано такі нові результати:

1. Здійснено аналіз сучасного стану та перспектив розвитку вебдодатків. Розроблено функціональну модель процесу створення вебдодатків, зокрема контекстну діаграму та діаграми двох рівнів декомпозиції. Для відображення структури розробленої IDEF0-моделі сформовано ієрархічну діаграму виокремлених вузлів. Побудовано блок-схему алгоритму розроблення онтології. Удосконалено метод онтологічного аналізу шляхом групування еквівалентних класів з різних стандартів якості та їх об'єднання в узагальнені концепти. Розроблено онтологічну модель якості вебдодатків.

2. Одержано множину факторів проєктування та дизайну вебдодатків на основі експертного оцінювання. Здійснено розподіл факторів за такими інтегральними характеристиками, як ергономіка та когнітивні принципи взаємодії, доступність та інклюзивність, інформаційна архітектура та візуальний дизайн. Виконано формалізоване представлення зв'язків між факторами засобами семантичного моделювання та логіки предикатів. Побудовано матриці попарних порівнянь факторів та здійснено ітерації для визначення пріоритетів. Удосконалено моделі вагомості факторів стосовно інтегральних характеристик за методом ранжування. Побудовано ієрархічні моделі зв'язків, обчислено ранги факторів та одержано їх вагові значення. Розроблено моделі вагомості факторів проєктування та дизайну вебдодатків. Визначено, що найвагомішим фактором, що впливає на ергономіку та когнітивні принципи взаємодії з інтер-

фейсами є E_2 (консистентність дизай-моделей), вага якого 90 у. о. Домінантний вплив на доступність та інклюзивність здійснює фактор D_5 (верифікація відповідності стандартам доступності) — 110 у. о. Фактор I_5 (композиція та ритм макету) є найпріоритетнішим щодо розроблення інформаційної архітектури та візуального дизайну. Його вагове значення становить 130 у. о.

3. Здійснено багатокритеріальну оптимізацію на множині можливих рішень, що базується на методі лінійного об'єднання, щодо факторів впливу на якість інтегральних характеристик. Найвище значення оцінки корисності серед альтернатив формування ергономіки та когнітивних принципів взаємодії з інтерфейсами належить другому запроєктованому варіанту $Q(a_2) = 0,379$. Для формування доступності та інклюзивності вебдодатків оптимальною є перша альтернатива з оцінкою корисності $Q(a_1) = 0,521$. Для розроблення інформаційної архітектури та візуального дизайну найкращим є варіант a_1 з оцінкою $Q(a_1) = 0,402$. Сформовано нечіткі відношення переваги між альтернативами. Визначено оптимальні альтернативи реалізації за максимальними значеннями функцій належності $\mu_p^{nd}(a_i) = 1$. На основі нечіткого порівняння підтверджено результати, одержані за методом лінійного об'єднання критеріїв. Обрано оптимальний варіант проектування та дизайну вебдодатків. Найкращою є друга альтернатива з оцінкою корисності $Q(a_2) = 0,406$ та значенням функції належності $\mu_p^{nd}(a_2) = 1$. Визначальну роль відіграє фактор ергономіки та когнітивних принципів взаємодії, а доступність та інклюзивність і інформаційна архітектура та візуальний дизайн мають однакові рівні важливості.

4. Розроблено ієрархічну модель формування якості проектування та дизайну вебдодатків, яка враховує найпріоритетніші лінгвістичні змінні та часткові показники якості. Сформовано нечіткі множини для усіх термів домінантних лінгвістичних змінних проектування та дизайну вебдодатків. Розроблено нечіткі бази та матриці знань, у яких відображено взаємозв'язки між комбі-

націями лінгвістичних термів змінних та показником якості проєктування та дизайну вебдодатків. Побудовано нечіткі логічні рівняння для термів лінгвістичної змінної G «якість проєктування та дизайну вебдодатків» та для часкових показників якості E «якість формування ергономіки та когнітивних принципів взаємодії», D «якість формування доступності та інклюзивності», I «якість інформаційної архітектури та візуального дизайну». Проведено дефазифікацію нечітких множин завдяки підстановці значень у нечіткі логічні рівняння. За принципом центру ваги здійснено обчислення прогнозованого показника якості проєктування та дизайну вебдодатків при обраних вхідних параметрах, що становить $G_{\text{прогноз.}} = 58,022 \%$.

5. Розроблено інформаційну технологію оцінювання якості проєктування та дизайну вебдодатків, що містить такі основні етапи: функціональне моделювання процесу створення вебдодатків, онтологічне моделювання якості вебдодатків, розроблення семантичних моделей факторів, розроблення моделей вагомості факторів, вибір оптимального варіанту проєктування та дизайну вебдодатків, визначення прогнозованого показника якості проєктування та дизайну вебдодатків. Компоненту інформаційної технології, спрямовану на визначення пріоритетності факторів за методом ранжування, представлено у вигляді програмного продукту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Піх І. В., Меренич Ю. Ю. Еволюція та сучасні стандарти в технологіях верстання і дизайну веб-додатків. *Науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу, наукових працівників і аспірантів* : тези доповідей (Львів, УАД, 05–09 лютого 2024 р.). Львів, 2024. С. 181.
2. How Many Websites Are There in the World? *Siteefy*. URL: <https://siteefy.com/how-many-websites-are-there/>.
3. D'Andrea F. A. M. C., Santos D. A. G. D., Costa C. V. P., Zen A. C. Why startups fail in emerging entrepreneurial ecosystems? *REGEPE Entrepreneurship and Small Business Journal*. 2023. № 12 (3): e2055. <https://doi.org/10.14211/-regepe.esbj.e2055>.
4. Cavicchioli M., Kocollari U. Learning from failure: Big data analysis for detecting the patterns of failure in innovative startups. *Big data*. 2021. № 9 (2). Pp. 79–88. <https://doi.org/10.1089/big.2020.0047>.
5. Nagaraj A., Reimers I. Digitization and the demand for physical works: Evidence from the Google Books project. *Available at SSRN*. 2021, 3339524. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3339524>.
6. Onyejelem T. E., Aondover E. M. Digital generative multimedia tool theory (DGMTT): A theoretical postulation. *Journalism*. 2024. № 14 (3). Pp. 189–204. <https://doi.org/10.17265/2160-6579/2024.03.004>.
7. Scott S., Orlikowski W. The digital undertow: How the corollary effects of digital transformation affect industry standards. *Information Systems Research*. 2022. № 33 (1). Pp. 311–336. <https://doi.org/10.1287/isre.2021.1056>.
8. Kumala F. N., Ghufon A., Astuti P. P., Crismonika M., Hudha M. N., Nita C. I. R. MDLC model for developing multimedia e-learning on energy concept for primary school students. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. № 1869 (1), 012068. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1869/1/012068>.
9. Меренич Ю. Ю., Піх І. В. Методика створення адаптивних веб-сайтів як частина управління проєктами. *X Міжнародна науково-технічна конфе-*

ренція «Поліграфічні, мультимедійні та web-технології» : тези доповідей (Харків, 14–17 травня 2025 р.). Київ, 2025. Т. 1. С. 142–144.

10. Kudriashova A., Pikh I., Senkivskyi V., Merenych Y. Evaluation of prototyping methods for interactive virtual systems based on fuzzy preference relation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. № 5 (4 (131)). Pp. 71–81. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.313099>.

11. Zatserkovnyi R., Senkivskyi V., Zatserkovna R., Maik V. Application for determining the usability of adapted textbooks by people with low vision 2023. *IEEE 18th International Conference on Computer Science and Information Technologies (CSIT)*, Lviv, Ukraine. 2023. Pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/CSIT61576.2023.10324055>.

12. Senkivskyi V., Pikh I., Babichev S., Kudriashova A., Senkivska N. Modeling of alternatives and defining the best options for websites design. *2nd International Workshop on Intelligent Information Technologies and Systems of Information Security*. 2021. Pp. 259–270. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-2853/paper24.pdf>.

13. Hasan N., Mishra A., Ray A. K. Fuzzy logic based cross-layer design to improve Quality of Service in Mobile ad-hoc networks for Next-gen Cyber Physical System. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2022. № 35, 101099. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2022.101099>.

14. Birhan A. T. Examining trends and effectiveness of academic institutions' website contents. *KOME*. 2024. № 12 (1). Pp. 19–34. <https://doi.org/10.17646/-KOME.of.8>.

15. Lorés R. Science on the web: The exploration of European research websites of energy-related projects as digital genres for the promotion of values. *Discourse, context & media*. 2020. № 35, 100389. <https://doi.org/10.1016/j.dcm.2020.100389>.

16. Glowinski J. V. Medical resources on the Internet. *Annals of Internal Medicine*. 1995. № 123 (2). Pp. 123–131. <https://doi.org/10.7326/0003-4819-123-2-199507150-00008>.
17. Hong Z., Deng Z., Zhang W. Examining factors affecting patients trust in online healthcare services in China: the moderating role of the purpose of use. *Health Informatics Journal*. 2019. № 25 (4). Pp. 1647–1660. <https://doi.org/10.1177/1460458218796660>.
18. Emmert M., Meier F., Pisch F., Sander U. Physician choice making and characteristics associated with using physician-rating websites: Cross-sectional study. *Journal of Medical Internet Research*. 2013. № 15 (8) : e187. <https://doi.org/10.2196/jmir.2702>.
19. Bercovici J. Who coined social media? Web pioneers compete for credit. *Forbes*. 2010. URL: <http://forbes.com/sites/jeffbercovici/2010/12/09/who-coined-social-media-web-pioneers-compete-for-credit/2/>.
20. Aichner T., Jacob F. Measuring the degree of corporate social media use. *International Journal of Market Research*. 2015. № 57. Pp. 257–276.
21. Серкутан Т. В., Лях І. М., Меренич Ю. Ю., Меренич Д. Ю. Аналітичні підходи до прогнозу аудиторії соцмереж із залученням SMM-спеціалістів. *Актуальні проблеми економіки*. 2025. № 8 (290). С. 45–55. <https://doi.org/10.32752/1993-6788-2025-1-290-45-55>.
22. Kolhar M., Kazi R. N. A., Alameen A. Effect of social media use on learning, social interactions, and sleep duration among university students. *Saudi Journal of Biological Sciences*. 2021. № 28 (4). Pp. 2216–2222. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.01.010>.
23. Khalili B. G., Qargha R., Quraishi T. The influence of social media networks on families dynamics: Opportunities and challenges. *APLIKATIF: Journal of Research Trends in Social Sciences and Humanities*. 2024. № 3 (1). Pp. 1–11. <https://doi.org/10.59110/aplikatif.v3i1.334>.

24. Long L., Wang C., Zhang M. Does social media pressure induce corporate hypocrisy? Evidence of ESG greenwashing from China. *Journal of business ethics*. 2024. № 197 (2). Pp. 311–338. <https://doi.org/10.1007/s10551-024-05747-3>.
25. Піх І. В., Меренич Ю. Ю. Використання машинного навчання для кластеризації цільової аудиторії веб-додатків. *Вісник ВПІ*. 2025. № 3 (180). С. 121–125. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2025-180-3-121-125>.
26. Baird H. C., Parasnis G. From social media to social customer relationship management. *Strategy and Leadership*. 2011. № 39 (5). Pp. 30–37. <https://doi.org/10.1108/108785711111161507>.
27. Healy M., Cochrane S., Grant P., Basson M. LinkedIn as a pedagogical tool for careers and employability learning: A scoping review of the literature. *Education+ Training*. 2023. № 65 (1). Pp. 106–125. <https://doi.org/10.1108/ET-01-2022-0004>.
28. Rizov M., Vecchi M., Domenech J. Going online: Forecasting the impact of websites on productivity and market structure. *Technological Forecasting and Social Change*. 2022. № 184, 121959. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.-121959>.
29. Кляп М. М., Меренич Ю. Ю. Особливості побудови інтерфейсів прикладного програмування для комерційних веб-додатків. *XI Міжнародна наукова Інтернет-конференція «Національна безпека у фокусі викликів глобалізаційних процесів в економіці»* : матеріали конференції (Україна–Словаччина, 7–8 грудня 2021 р.). Київ: НАУ, 2021. С. 15–16.
30. Necula S. C. Exploring the impact of time spent reading product information on e-commerce websites: A machine learning approach to analyze consumer behavior. *Behavioral Sciences*. 2023. № 13 (6), 439. <https://doi.org/10.3390/bs13060439>.
31. Javornik A. Augmented reality: Research agenda for studying the impact of its media characteristics on consumer behaviour. *Journal of Retailing and*

Consumer Services. 2016. № 30. Pp. 252–261. <https://doi.org/10.1016/j.jretconser.2016.02.004>.

32. Морохович В. С., Кляп М. П., Меренич Ю. Ю., Болехан І. В. Використання фреймворку Ruby on Rails в управлінських процесах. *XIV Міжнародна наукова Інтернет-конференція «Національна безпека у фокусі викликів глобалізаційних процесів в економіці»* : матеріали конференції (Україна–Хорватія, 10–11 листопада 2022 р.). Київ, 2022. С. 60–62.

33. Заїка В. В., Меренич Ю. Ю. Автоматизація процесів обліку та контролю особистих фінансів: аналіз підходів та оптимізації. *XXII Міжнародна наукова Інтернет-конференція «Національна безпека у фокусі викликів глобалізаційних процесів в економіці»* : матеріали конференції (Україна–Бразилія, 29–30 грудня 2024 р.). Київ, 2024. С. 36–38.

34. Rahman M. F., Hossain M. S. The impact of website quality on online compulsive buying behavior: Evidence from online shopping organizations. *South Asian Journal of Marketing*. 2023. № 4 (1). Pp. 1–16. <https://doi.org/10.1108/SAJM-03-2021-0038>.

35. Hossain M. S., Zhou X., Rahman M. F. Examining the impact of QR codes on purchase intention and customer satisfaction on the basis of perceived flow. *International Journal of Engineering Business Management*. 2018. № 10. Pp. 1–11. <https://doi.org/10.1177/1847979018812323>.

36. Hossain M. S., Rahman M. F. Website quality, perceived flow, trust, and commitment: Developing a customer relationship management model. *Impact of Globalization and Advanced Technologies on Online Business Models*. 2021. Pp. 202–226. <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-7603-8.ch013>.

37. Ali F. Hotel website quality, perceived flow, customer satisfaction and purchase intention. *Journal of Hospitality and Tourism Technology*. 2016. № 7 (2). Pp. 213–228. <https://doi.org/10.1108/JHTT-02-2016-0010>.

38. Gao W., Li X. Building presence in an online shopping website: The role of website quality. *Behaviour & information technology*. 2019. № 38 (1). Pp. 28–41. <https://doi.org/10.1080/0144929X.2018.1509127>.
39. Gautam D. K., Sah G. K. (2023). Online banking service practices and its impact on e-customer satisfaction and e-customer loyalty in developing country of South Asia-Nepal. *Sage Open*. 2023. № 13 (3), 21582440231185580. <https://doi.org/10.1177/21582440231185580>.
40. Chou D. C., Chou A. Y. A guide to the Internet revolution in banking. *Information Systems Management*. 2000. № 17 (2). Pp. 47–53. <https://doi.org/10.1201/1078/43191.17.2.20000301/31227.6>.
41. Ayinaddis S. G., Taye B. A., Yirsaw B. G. (2023). Examining the effect of electronic banking service quality on customer satisfaction and loyalty: An implication for technological innovation. *Journal of Innovation and Entrepreneurship*. 2023. № 12 (1). Pp. 1–18. <https://doi.org/10.1186/s13731-023-00287-y>.
42. Vogel H. L. Entertainment Industry Economics. Cambridge : Cambridge University Press, 2020. 457 p.
43. Aranyossy M. Technology adoption in the digital entertainment industry during the COVID-19 pandemic: An extended UTAUT2 model for online theater streaming. *Informatics*. 2022. № 9 (3), 71. <https://doi.org/10.3390/informatics-9030071>.
44. Bastardo R., Pavão J., Rocha N. P. Methodological quality of user-centered usability evaluation of digital applications to promote citizens' engagement and participation in public governance: A systematic literature review. *Digital*. 2024. № 4(3). Pp. 740–761. <https://doi.org/10.3390/digital4030038>.
45. Мінухін С. В., Беседовський О. М., Знахур С. В. Методи і моделі проектування на основі сучасних CASE-засобів : навчальний посібник. Харків : ХНЕУ, 2008. 272 с.

46. Сеньківський В. М., Кудряшова А. В., Козак Р. О. Інформаційна технологія формування якості редакційно-видавничого процесу : монографія. Львів : Українська академія друкарства, 2019. 272 с.
47. Malyar N., Polishchuk V., Sharkadi M., Liakh I. Model of start-ups assessment under conditions of information uncertainty. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. № 3 (4 (81)). Pp. 43–49. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.71222>.
48. Шаховська Н. Б., Литвин В. В. Проектування інформаційних систем : навчальний посібник. Львів : «Магнолія-2006», 2011. 380 с.
49. Мартинович Н. О., Горник В. Г., Бойченко Е. Б. Маркетингові дослідження : навчальний посібник. Київ: «Видавництво Людмила», 2021. 323 с.
50. Чемерис Г. Ю. UX/UI дизайн : навчальний посібник. Запоріжжя : ЗНУ, 2021. 290 с.
51. Грицюк Ю. І. Аналіз вимог до програмного забезпечення : навчальний посібник. Львів : Вид-во Львів. політехніки, 2018. 453 с.
52. Меренич Ю. Ю., Мелеш М. М. Автоматизована генерація клієнтських інтерфейсів як інструмент цифрової стійкості в умовах глобалізаційних викликів. *XXIII Міжнародна наукова Інтернет-конференція «Національна безпека у фокусі викликів глобалізаційних процесів в економіці»* : матеріали конференції (Україна–Словаччина, 17–18 травня 2025 р.). Київ, 2025. С. 85–87.
53. Крепич С. Я., Співак І. Я. Якість програмного забезпечення та тестування: базовий курс : навчальний посібник. Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2020. 478 с.
54. Баран С. В. Основи web-програмування : навчальний посібник. Кривий Ріг: Державний університет економіки і технологій, 2023. 316 с.
55. Unger R., Chandler C. A Project Guide to UX Design: For user experience designers in the field or in the making. New Riders, 2023. 400 p.
56. Меренич Ю. Ю. Використання метрик юзабіліті для порівняльного аналізу варіантів верстання вебдодатків. *І Всеукраїнська науково-практична*

конференція «Науковий пошук: сучасні проблеми інформаційних технологій, математики, фізики, астрономії, управління та освіти» : матеріали конференції (Житомир, 15–16 травня 2025 р.). Житомир, 2025. С. 114–116.

57. Massaro A., Giannone D., Birardi V., Galiano A. M. An innovative approach for the evaluation of the web page impact combining user experience and neural network score. *Future Internet*. 2021. № 13 (6), 145. <https://doi.org/10.3390/fi13060145>.

58. Nyabuto M. G. M., Mony V., Mbugua S. Architectural review of client-server models. *International journal of scientific research and engineering trends*. 2024. № 10 (1). Рр. 139–143.

59. Ярцев В. П. Організація баз даних та знань : навчальний посібник. К: ДУТ, 2018. 214 с.

60. Захист інформації в комп'ютерних системах : підручник / В. Д. Козюра та ін. Ніжин : ФОП Лук'яненко В.В., ТПК «Орхідея», 2020. 236 с.

61. Сабат В. І., Дурняк Б. В., Сеньківський Н. Ю., Меренич Ю. Ю. Дослідження політики безпеки системи управління повноваженнями документообігу для виробничих структур *Комп'ютерні технології друкарства*. 2024. № 2 (52). С. 86–96, <https://doi.org/10.32403/2411-9210-2024-2-52-1-86-96>.

62. Меренич Ю. Ю., Петрус В. М. Framer Motion: сучасний інструмент для простої та ефективної анімації на веб-сайтах. *XVII Міжнародна наукова Інтернет-конференція «Національна безпека у фокусі викликів глобалізаційних процесів в економіці»* : матеріали конференції (Україна–Туреччина, 14–15 жовтня 2023 р.). Київ, 2023. С. 60–62.

63. Certified Tester. Foundation Level Syllabus. International Software Testing Qualifications Board. ISTQB, 2023. 78 p.

64. Certified Tester Advanced Level Test Management Syllabus. International Software Testing Qualifications Board. ISTQB, 2024. 87 p.

65. Giannakouloupoulos A., Pergantis M., Lamprogeorgos A. User Experience, functionality and aesthetics evaluation in an academic multi-site web ecosystem. *Future Internet*. 2024. 16(3), 92. <https://doi.org/10.3390/fi16030092>.
66. Піх І. В., Меренич Ю. Ю. Автоматизація та нові підходи у тестуванні веб-додатків. XVII Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні технології і автоматизація — 2024» : матеріали конференції (Одеса, 31 жовтня — 01 листопада 2024 р.). Одеса, 2024. С. 493–495.
67. ДСТУ ISO 9000:2015 Системи управління якістю. Основні положення та словник термінів. Вид. офіц. Київ: УкрНДНЦ, 2016. 45 с.
68. ДСТУ 3993-2000 Товарознавство. Терміни та визначення. Вид. офіц. Київ: УкрНДНЦ, 2000. 24 с.
69. Піх І., Меренич Ю. Онтологічне моделювання структури вебдодатку. Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. 2025. № 82 (2). С. 7–12. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2025-82-1>.
70. Комп'ютерні онтології та їх використання у навчальному процесі. Теорія і практика : монографія / С. О. Довгий та ін. К. : Інститут обдарованої дитини, 2013. 310 с.
71. Ontology Metrics. Protégé 5 Documentation. URL: <http://protegeproject.github.io/protege/views/ontology-metrics/>.
72. Сілагін О. В., Денисюк В. О. Онтологічне моделювання бази знань з організації подорожей. *Український журнал інформаційних технологій*. 2022. Т. 4, № 1. С. 44–52. <https://doi.org/10.23939/ujit2022.01.044>.
73. Гладун А. Я., Рогуніна Ю. В. Семантичні технології: принципи та практики. К. : ТОВ «ВД «АДЕФ-Україна», 2016. 308 с.
74. Рогуніна Ю. В. Використання онтологічних знань інтелектуальними агентами. *Проблеми програмування*, 2017. № 2. С. 82–95.
75. Глазунова Л., Перекрестов І. Формальний опис обліку робочого часу викладача ВНЗ за допомогою онтологічної моделі. *Herald of Khmelnytskyi*

National University. Technical Sciences. 2024. № 343 (6 (1)). С. 73–80.
<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-343-6-10>.

76. ISO/IEC 25010:2023. Systems and software engineering. Software quality requirements and evaluation (SQuaRE). Quality model. International Organization for Standardization, 2023. 22 p.

77. Hovorushchenko T., Voichur Y., Medzaty D. Information technology for prediction of software quality level. *Radioelectronic and Computer Systems*. 2023. № (3). Pp. 238–254.

78. Ціпіньо А., Меренич Ю. Використання штучного інтелекту в боротьбі з загрозами. *Міжнародна науково-практична конференція «Кібербезпека в транскордонному співробітництві» : тези доповідей (Берегове, 15–16 жовтня 2024 р.)*. Берегове, 2024. С. 152–153.

79. ISO 9241-110:2020. Ergonomics of human-system interaction. Part 110: Interaction principles. International Organization for Standardization, 2020. 32 p.

80. Heinold E., Rosen P. H., Wischniewski S. Usability questionnaire for robotic systems based on the ISO 9241-110. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2025. № 10 (3). Pp. 2231–2238. <https://doi.org/10.1109/LRA.2025.3526557>.

81. Heinold E., Rosen P. H., Wischniewski S. Validation of a usability questionnaire for summative evaluation of robotic systems. *31st IEEE International Conference on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN)*. 2022. Pp. 109–114. <https://doi.org/10.1109/RO-MAN53752.2022.9900612>.

82. Brand L., Humm B. G., Krajewski A., Zender A. Towards improved user experience for artificial intelligence systems. *International Conference on Engineering Applications of Neural Networks*. 2023. № 1826. Pp. 33–44. https://doi.org/10.1007/978-3-031-34204-2_4.

83. Vu K. P. L., Proctor R. W., Hung Y. H. Website design and evaluation. *Handbook of human factors and ergonomics*. 2021. Pp. 1016–1036. <https://doi.org/10.1002/9781119636113.ch39>.

84. ISO/IEC 40500:2012. Information technology. W3C Web Content Accessibility Guidelines (WCAG) 2.0. International Organization for Standardization, 2012.

85. Web content accessibility guidelines (WCAG) 2.1. URL: <https://www.w3.org/Translations/WCAG21-ua/>.

86. Меренич Ю. Ю., Лутак О. А., Шкирта А. С. Інклюзивність та доступність на етапі створення дизайн-проектів. *X Всеукраїнська науково-практична конференція молодих учених «Інформаційні технології — 2023»* : тези доповідей (Київ, 18 травня 2023 р.). Київ, 2023. С. 63–64.

87. Campoverde-Molina M., Luján-Mora S. Valverde L. Accessibility of university websites worldwide: A systematic literature review. *Universal Access in the Information Society*. 2023. № 22. Pp. 133–168. <https://doi.org/10.1007/s10209-021-00825-z>.

88. Park K., Jung S. Designing inclusive websites for people with disabilities as part of an event tourism strategic planning process. *Journal of Convention & Event Tourism*. 2022. № 23 (2). Pp. 129–153. <https://doi.org/10.1080/154701-48.2021.1949419>.

89. ISO/IEC 29138-1:2018. Information technology. User interface accessibility. Part 1: User accessibility needs. International Organization for Standardization, 2018. 90 p.

90. Henni S. H., Maurud S., Fuglerud K. S., Moen A. The experiences, needs and barriers of people with impairments related to usability and accessibility of digital health solutions, levels of involvement in the design process and strategies for participatory and universal design: a scoping review. *BMC Public Health*. 2022. № 22 (1), 35. <https://doi.org/10.1186/s12889-021-12393-1>.

91. Alajarmeh N. Evaluating the accessibility of public health websites: an exploratory cross-country study. *Universal access in the information society*. 2022. № 21 (3). Pp. 771–789. <https://doi.org/10.1007/s10209-020-00788-7>.

92. Jain A. K., Murty M. N., Flynn P. J. Data clustering: A review. *ACM computing surveys (CSUR)*. 199. № 31 (3). Pp. 264–323.
93. Gan G., Ma C., Wu J. Data clustering: theory, algorithms, and applications. Society for Industrial and Applied Mathematics, 2020. 406 p.
94. Грабовецкий Б. Є. Основи економічного прогнозування : навчальний посібник. Вінниця : ВФ ТАНГ, 2000. 209 с.
95. Грабовецький Б. Є. Методи експертних оцінок: теорія, методологія, напрямки використання : монографія. Вінниця : ВНТУ, 2010. 171 с.
96. 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.
97. Козенкова В. Д., Козенкова Н. П. Експертні оцінки у прийнятті фінансових рішень. *Економічний вісник*. 2021. № 1. С. 158–169. <https://doi.org/10.33271/ebdut/73.158>.
98. Кудряшова А. В., Сельменський Р. А. Роль онтології в оцінюванні компетентності експертів. Методика опрацювання експертних висновків щодо факторів впливу на якість післядрукарського опрацювання книжкових видань. *Поліграфія і видавнича справа*. 2022. № 2 (84). С. 36–43.
99. Черепанська І. Ю., Кирилович В. А., Сазонов А. Ю., Самотокін Б. Б. Планування, моделювання та верифікація процесів в гнучких виробничих системах. Практикум : навч.-метод. посібн. / за заг. ред. В. А. Кириловича. Житомир : ЖДТУ, 2015. 274 с.
100. Pikh I., Merenych Y. Semantic models for web application design. *Computer Systems and Information Technologies*. 2025. № 2. Pp. 20–26. <https://doi.org/10.31891/csit-2025-2-2>.
101. Меренич Ю. Ю., Піх І. В., Коцік О. Ю. Якість верстання вебдодатків як критерій задоволення потреб користувачів. *Поліграфія і видавнича справа*. 2024. № 1 (87). С. 19–27, <https://doi.org/10.32403/0554-4866-2024-1-87-19-27>.

102. Меренич Ю. Ю., Артюк В. В. Критерії оцінювання якості освітніх веб-сайтів. *V Міжнародна науково-практична конференція студентів, магистрантів та аспірантів «Квалілогія книги»* : матеріали конференції (Львів, 8 червня 2023 р.). Львів, 2023. С. 20–22.

103. Tymchenko O., Khamula O., Havrysh B. Semantic analysis methods usage for the implementation of systems of graphic objects content analysis. *6th International Workshop on Modern Data Science Technologies*. 2024. № 3723. Pp. 396–411. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3723/paper22.pdf>.

104. Дурняк Б. В., Піх І. В., Сеньківський В. М. Теоретичні основи інформаційної концепції формування та оцінювання якості видавничо-поліграфічних процесів : монографія. Львів : Українська академія друкарства, 2022. 356 с.

105. Сеньківський В. М., Кудряшова А. В. Моделі інформаційної технології проектування післядрукарських процесів : монографія. Львів : Українська академія друкарства, 2022. 204 с.

106. Піх І. В., Сеньківський В. М., Голубник Т. С., Литовченко О. В., Сеньківська Н. Є. Моделі факторів формування якості процесу запису видання на носій. *Поліграфія і видавнича справа*. 2019. № 1. С. 86–92.

107. Кудряшова А. В. Модель пріоритетного впливу факторів на якість післядрукарських процесів. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2023. № 1. С. 187–192. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-73-1-25>.

108. Kudriashova A., Pikh I., Senkivsky V., Oliarnyk T., Bilyk O. Designing an intelligent system for digital image classification. *6th International Workshop on Intelligent Information Technologies & Systems of Information Security*. 2025. № 3963. Pp. 208–218.

109. Піх І. В., Сеньківський В. М., Андріїв Р. Р. Оптимізована модель чинників достовірності текстових даних. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2024. Т. 34, № 4. С. 78–85. <https://doi.org/10.36930/40340410>.

110. Mrzygłocka-Chojnacka J., Ryńca R. Using a multi-criteria ranking method to assess factors influencing the implementation of sustainable development at higher educational institutions. *Sustainability*. 2023. № 15 (7), 6256. <https://doi.org/10.3390/su15076256>.
111. Alhijawi B., Fraihat S., Awajan A. Multi-factor ranking method for trading-off accuracy, diversity, novelty, and coverage of recommender systems, *International Journal of Information Technology*. 2023. № 15 (3). Pp. 1427–1433. <https://doi.org/10.1007/s41870-023-01158-1>.
112. Сеньківський В. М., Піх І. В., Мельников О. В. Метод ранжування факторів впливу на якість технологічних процесів. *Поліграфія і видавнича справа*. 2013. № 1–2. С. 33–41.
113. Величко О. М., Гордієнко Т. Б. Основи системного аналізу і прийняття оптимальних рішень : підручник. Херсон : Олді-плюс, 2022. 672 с.
114. Kalinina I., Gozhyj A., Bidyuk P., Gozhyi V., Korobchynskyi M., Nadruga V. A systematic approach to data normalization and standardization in machine learning problems. *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*. Cham: Springer, 2024. № 244. Pp. 206–219. https://doi.org/10.1007/978-3-031-88483-2_11.
115. Нікітіна Л., Яценко І. Моделі та методи прийняття рішень : навчальний посібник. Харків : НТУ «ХПІ», 2023. 179 с.
116. Навчальний посібник з дисципліни «Системний аналіз» для здобувачів спеціальності 122 – Комп’ютерні науки : навчальний посібник / В. М. Тонконогий та ін. Одеса : Нац. ун-т «Одеська політехніка», 2022. 84 с.
117. Rajput S., Sabharwal N., Singh A., Shingan B., Yadav B. P. City gas distribution incident analysis in India using Pareto Principle: A comprehensive analysis. *Journal of Failure Analysis and Prevention*. 2022. № 22 (3). Pp. 899–911. <https://doi.org/10.1007/s11668-022-01422-9>.
118. Van der Aalst W. M. On the Pareto principle in process mining, task mining, and robotic process automation. *DATA*. 2020. Pp. 5–12.

119. Saaty T. L. The modern science of multicriteria decision making and its practical applications: The AHP/ANP approach. *Operations research*. 2013. № 61 (5). Pp. 1101–1118.
120. Serugga J., Kagioglou M., Tzortzopoulos P. A Utilitarian decision-making approach for front end design — a systematic literature review. *Buildings*. 2020. № 10 (2), 34. <https://doi.org/10.3390/buildings10020034>.
121. Pikh I., Senkivskyy V., Sikora L., Lysa N., Kudriashova A. Automated system for evaluating alternatives for developing innovative IT projects. *Applied Sciences*. 2025. № 15(3), 1167. <https://doi.org/10.3390/app15031167>.
122. Yigit F., Basilio M. P., Pereira V. A Hybrid approach for the multi-criteria-based optimization of sequence-dependent setup-based flow shop scheduling. *Mathematics*. 2024. № 12 (13), 2007. <https://doi.org/10.3390/math12132007>.
123. Tokatli A. A multi-criteria framework for the holistic ergonomic design evaluation of VR products. *Frontiers in Virtual Reality*. 2025. № 6, 1549963. <https://doi.org/10.3389/frvir.2025.1549963>.
124. Anysz H., Nicał A., Stević Ž., Grzegorzewski M., Sikora K. Pareto optimal decisions in multi-criteria decision making explained with construction cost cases. *Symmetry*. 2021. № 13 (1), 46. <https://doi.org/10.3390/sym13010046>.
125. Kesireddy A., Medrano F. A. Elite multi-criteria decision making — Pareto front optimization in multi-objective optimization. *Algorithms*. 2024. № 17 (5), 206. <https://doi.org/10.3390/a17050206>.
126. Benmoussa K., Laaziri M., Khouilji S., Kerkeb M. L., El Yamami A. AHP-based approach for evaluating ergonomic criteria. *Procedia Manufacturing*. 2019. № 32. Pp. 856–863. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.294>.
127. Kudriashova A., Pikh I., Senkivskyy V., Merenych Y. Evaluation of pro-totyping methods for interactive virtual systems based on fuzzy preference relation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. № 5 (4 (131)). Pp. 71–81. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.313099>

128. Pikh I., Senkivskyy V., Kudriashova A., Senkivska N. Prognostic Assessment of COVID-19 Vaccination Levels. *Lecture Notes in Data Engineering, Computational Intelligence, and Decision Making. ISDMCI 2022. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*. 2023, № 149. Pp. 246–265. https://doi.org/10.1007/978-3-031-16203-9_15.
129. Muhammad A., Siddique A., Naveed Q. N., Khaliq U., Aseere A. M., Hasan M. A., Qureshi M. R. N., Shahzad B. Evaluating usability of academic websites through a fuzzy analytical hierarchical process. *Sustainability*. 2021. № 13 (4), 2040. <https://doi.org/10.3390/su13042040>.
130. Zadeh L. A., Aliev R. A. Fuzzy logic theory and applications: part I and part II. World Scientific Publishing, 2018. 612 p.
131. Mouzouris G. C., Mendel J. M. Nonsingleton fuzzy logic systems: theory and application. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. 1997. № 5 (1). Pp. 56–71. <https://doi.org/10.1109/91.554447>.
132. Kabassi K., Karydis C., Bottonis A. AHP, Fuzzy SAW, and Fuzzy WPM for the evaluation of cultural websites. *Multimodal Technologies and Interaction*. 2020. № 4 (1), 5. <https://doi.org/10.3390/mti4010005>.
133. Thaker S., Nagori V. Analysis of fuzzification process in fuzzy expert system. *Procedia computer science*. 2018. № 132. Pp. 1308–1316. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.05.047>.
134. Chakraverty S., Sahoo D. M., Mahato N. R. Defuzzification. *Concepts of Soft Computing*. Singapore: Springer Singapore, 2019. Pp. 117–127. https://doi.org/10.1007/978-981-13-7430-2_7.
135. Jain D., Sharma S. K., Dhiman P. Comparative analysis of defuzzification techniques for fuzzy output. *Journal of Algebraic Statistics*. 2022. № 13 (2). Pp. 874–882.
136. Senkivskyy V., Sikora L., Lysa N., Kudriashova A., Pikh I. Fuzzy system for the quality assessment of educational multimedia edition design. *Applied Sciences*. 2025. № 15 (8), 4415. <https://doi.org/10.3390/app15084415>.

137. Deng J., Deng Y. Information volume of fuzzy membership function. *International Journal of Computers Communications & Control*. 2021. № 16 (1). Pp. 1–14. <https://doi.org/10.15837/ijccc.2021.1.4106>.
138. Ali M. A., Mekhilef S., Yusoff N., Abd Razak B. Laser simulator logic: A novel inference system for highly overlapping of linguistic variable in membership functions. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*. 2022. № 34 (10). Pp. 8019–8040. <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2022.07.017>.
139. Durnyak B., Shepita P., Tupychak L., Syvak A., Bohonis O. Fuzzy model of knowledge assessment in inclusive education information systems. *6th International Workshop on Intelligent Information Technologies & Systems of Information Security*. 2025. № 3963. 3p. 28–38. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3963/paper3.pdf>.
140. Li Y., Zhu L. Failure modes analysis related to user experience in interactive system design through a fuzzy failure mode and effect analysis-based hybrid approach. *Applied Sciences*. 2025. № 15(6), 2954. <https://doi.org/10.3390/app15062954>.
141. Nuñez I., Cano E. E., Cruz E., Concepción D., Navarro N., Rovetto C. Improving usability in mobile apps for residential energy management: A hybrid approach using fuzzy logic. *Applied Sciences*. 2024. № 14 (5), 1751. <https://doi.org/10.3390/app14051751>.
142. Піх І. В., Меренич Ю. Ю. Моделі формування якості оцінювання верстання та веб-дизайну сайтів. *Науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу, наукових працівників і аспірантів : тези доповідей (Львів, УАД, 06–10 лютого 2023 р.)*. Львів, 2023. С. 156.
143. Muhammad A., Siddique A., Naveed Q. N., Khaliq U., Aseere A. M., Hasan M. A., Qureshi M. R. N., Shahzad B. Evaluating usability of academic websites through a fuzzy analytical hierarchical process. *Sustainability*. 2021. № 13 (4), 2040. <https://doi.org/10.3390/su13042040>.

144. Chojecki P, Strazdas D, Przewozny D, Gard N, Runde D, Hoerner N, Al-Hamadi A, Eisert P, Bosse S. Assessing the value of multimodal interfaces: A study on human–machine interaction in weld inspection workstations. *Sensors*. 2023. № 23 (11), 5043. <https://doi.org/10.3390/s23115043>.
145. Wei D, Zhang C, Fan M, Ge S, Mi Z. Research on multimodal adaptive in-vehicle interface interaction design strategies for hearing-impaired drivers in fatigue driving scenarios. *Sustainability*. 2024. № 16 (24), 10984. <https://doi.org/10.3390/su162410984>.
146. Dritsas E, Trigka M, Troussas C, Mylonas P. Multimodal interaction, interfaces, and communication: A survey. *Multimodal Technologies and Interaction*. 2025. № 9 (1), 6. <https://doi.org/10.3390/mti9010006>.
147. Ljubojević M, Savić M, Mijić D, Vico G. Improving the efficiency of multimedia learning and the quality of experience by reducing cognitive load. *Applied Sciences*. 2025. № 15 (3), 1054. <https://doi.org/10.3390/app15031054>.
148. Wang L, Che G, Hu J, Chen L. Online review helpfulness and information overload: The roles of text, image, and video elements. *Journal of Theoretical and Applied Electronic Commerce Research*. 2024. № 19 (2). Pp. 1243–1266. <https://doi.org/10.3390/jtaer19020064>.
149. Umar M, Hussain I, Mahmood T, Mirza HT, Faisal CMN. Design strategies to minimize mobile usability issues in navigation design patterns. *Information*. 2024. № 15 (11), 732. <https://doi.org/10.3390/info15110732>.
150. Zhang X, Jin L, Zhao J, Li J, Luh D-B, Xia T. The influences of different sensory modalities and cognitive loads on walking navigation: A preliminary study. *Sustainability*. 2022. № 14 (24), 16727. <https://doi.org/10.3390/su142416727>.
151. Schivo S., Scholma J., van der Vet P. E., Karperien M., Post J. N., van de Pol J., Langerak, R. Modelling with ANIMO: Between fuzzy logic and differential equations. *BMC Systems Biology*. 2016. № 10 (1), 56. <https://doi.org/10.1186/s12918-016-0286-z>.

152. Khazaei, B., Hosseini, S. M. Improving the performance of water balance equation using fuzzy logic approach. *Journal of Hydrology*. 2015. № 524. Pp. 538–548. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.02.047>.
153. Tkachuk R. L., Domorad O. V., Petryk V. A. Information technology for quality evaluation of publishing and printing processes. *Наукові записки [Українська академія друкарства]*. 2025. № 1 (70). С. 116–121. <http://doi.org/10.32403/1998-6912-2025-1-70-116-121>.
154. Lott S. F., Phillips D. Python object-oriented programming: Build robust and maintainable object-oriented Python applications and libraries. Packt Publishing Ltd, 2021. 714 p.
155. Kirsan A. S., Takano K., Mansurina S. Z. EksPy: A new Python framework for developing graphical user interface based PyQt5. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*. 2024. № 14 (1). Pp. 520–531. <http://doi.org/10.11591/ijece.v14i1.pp520-531>.
156. Sial A. H., Rashdi S. Y. S., Khan A. H. Comparative analysis of data visualization libraries Matplotlib and Seaborn in Python. *International Journal*. 2021. № 10(1). Pp. 277–281. <http://doi.org/10.30534/ijatcse/2021/391012021>.
157. Barrett P., Hunter J., Miller J. T., Hsu J. C., Greenfield P. Matplotlib — A portable Python plotting package. *Astronomical Data Analysis Software and Systems XIV*. 2005. № 347. Pp. 91–95.
158. Katsaragakis M., Papadopoulos L., Konijnenburg M., Catthoor F., Soudris D. A memory footprint optimization framework for Python applications targeting edge devices. *Journal of Systems Architecture*. 2023. № 142, 102936. <https://doi.org/10.1016/j.sysarc.2023.102936>.

ДОДАТКИ

Додаток А — Список публікацій здобувача та відомості про
апробацію результатів дисертації

**Статті у наукових виданнях, що індексуються у наукометричних ба-
зах даних Scopus та Web of Science:**

1. Kudriashova A., Pikh I., Senkivskyi V., Merenych Y. Evaluation of proto-
typing methods for interactive virtual systems based on fuzzy preference relation.
Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2024. № 5 (4 (131)). Pp. 71–
81. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.313099> (квартиль Q3 відповідно до
класифікації SCImago Journal).

**Статті у наукових виданнях, включених до Переліку наукових фа-
хових видань України:**

2. Меренич Ю. Ю., Піх І. В., Коцік О. Ю. Якість верстання вебдодатків
як критерій задоволення потреб користувачів. *Поліграфія і видавнича справа*.
2024. № 1 (87). С. 19–27. <https://doi.org/10.32403/0554-4866-2024-1-87-19-27>
(індексована у наукометричній базі Index Copernicus).

3. Сабат В. І., Дурняк Б. В., Сеньківський Н. Ю., Меренич Ю. Ю. Дослі-
дження політики безпеки системи управління повноваженнями документоо-
бігу для виробничих структур *Комп'ютерні технології друкарства*. 2024. № 2
(52). С. 86–96. <https://doi.org/10.32403/2411-9210-2024-2-52-1-86-96> (індексо-
вана у наукометричній базі Index Copernicus).

4. Піх І., Меренич Ю. Онтологічне моделювання структури вебдодатку.
Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. 2025.
№ 82 (2). С. 7–12. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2025-82-1>.

5. Pikh I., Merenych Y. Semantic models for web application
design. *Computer Systems and Information Technologies*. 2025. № 2. Pp. 20–26.
<https://doi.org/10.31891/csit-2025-2-2>.

6. Піх І. В., Меренич Ю. Ю. Використання машинного навчання для кла-
стеризації цільової аудиторії веб-додатків. *Вісник ВПІ*. 2025. № 3 (180). С. 121–

125. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2025-180-3-121-125> (індексована у наукометричній базі *Index Copernicus*).

7. Серкутан Т. В., Лях І. М., Меренич Ю. Ю., Меренич Д. Ю. Аналітичні підходи до прогнозу аудиторії соцмереж із залученням SMM-спеціалістів. *Актуальні проблеми економіки*. 2025. № 8 (290). С. 45–55. <https://doi.org/10.32752/1993-6788-2025-1-290-45-55>.

Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

8. Кляп М. М., Меренич Ю. Ю. Особливості побудови інтерфейсів прикладного програмування для комерційних веб-додатків. *XI Міжнародна наукова Інтернет-конференція «Національна безпека у фокусі викликів глобалізаційних процесів в економіці»* : матеріали конференції (Україна–Словаччина, 7–8 грудня 2021 р.). Київ: НАУ, 2021. С. 15–16.

9. Морохович В. С., Кляп М. П., Меренич Ю. Ю., Болехан І. В. Використання фреймворку Ruby on Rails в управлінських процесах. *XIV Міжнародна наукова Інтернет-конференція «Національна безпека у фокусі викликів глобалізаційних процесів в економіці»* : матеріали конференції (Україна–Хорватія, 10–11 листопада 2022 р.). Київ, 2022. С. 60–62.

10. Піх І. В., Меренич Ю. Ю. Моделі формування якості оцінювання верстання та веб-дизайну сайтів. *Науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу, наукових працівників і аспірантів* : тези доповідей (Львів, УАД, 06–10 лютого 2023 р.). Львів, 2023. С. 156.

11. Меренич Ю. Ю., Лутак О. А., Шкирта А. С. Інклюзивність та доступність на етапі створення дизайн-проектів. *X Всеукраїнська науково-практична конференція молодих учених «Інформаційні технології — 2023»* : тези доповідей (Київ, 18 травня 2023 р.). Київ, 2023. С. 63–64.

12. Меренич Ю. Ю., Артюк В. В. Критерії оцінювання якості освітніх веб-сайтів. *V Міжнародна науково-практична конференція студентів,*

магістрантів та аспірантів *«Квалілогія книги»* : матеріали конференції (Львів, 8 червня 2023 р.). Львів, 2023. С. 20–22.

13. Меренич Ю. Ю., Петрус В. М. Framer Motion: сучасний інструмент для простої та ефективної анімації на веб-сайтах. *XVII Міжнародна наукова Інтернет-конференція «Національна безпека у фокусі викликів глобалізаційних процесів в економіці»* : матеріали конференції (Україна–Туреччина, 14–15 жовтня 2023 р.). Київ, 2023. С. 60–62.

14. Піх І. В., Меренич Ю. Ю. Еволюція та сучасні стандарти в технологіях верстання і дизайну веб-додатків. *Науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу, наукових працівників і аспірантів* : тези доповідей (Львів, УАД, 05–09 лютого 2024 р.). Львів, 2024. С. 181.

15. Ціпіньо А., Меренич Ю. Використання штучного інтелекту в боротьбі з загрозами. *Міжнародна науково-практична конференція «Кібербезпека в транскордонному співробітництві»* : тези доповідей (Берегове, 15–16 жовтня 2024 р.). Берегове, 2024. С. 152–153.

16. Піх І. В., Меренич Ю. Ю. Автоматизація та нові підходи у тестуванні веб-додатків. *XVII Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні технології і автоматизація — 2024»* : матеріали конференції (Одеса, 31 жовтня — 01 листопада 2024 р.). Одеса, 2024. С. 493–495.

17. Заїка В. В., Меренич Ю. Ю. Автоматизація процесів обліку та контролю особистих фінансів: аналіз підходів та оптимізації. *XXII Міжнародна наукова Інтернет-конференція «Національна безпека у фокусі викликів глобалізаційних процесів в економіці»* : матеріали конференції (Україна–Бразилія, 29–30 грудня 2024 р.). Київ, 2024. С. 36–38.

18. Меренич Ю. Ю., Піх І. В. Методика створення адаптивних веб-сайтів як частина управління проєктами. *X Міжнародна науково-технічна конференція «Поліграфічні, мультимедійні та web-технології»* : тези доповідей (Харків, 14–17 травня 2025 р.). Київ, 2025. Т. 1. С. 142–144.

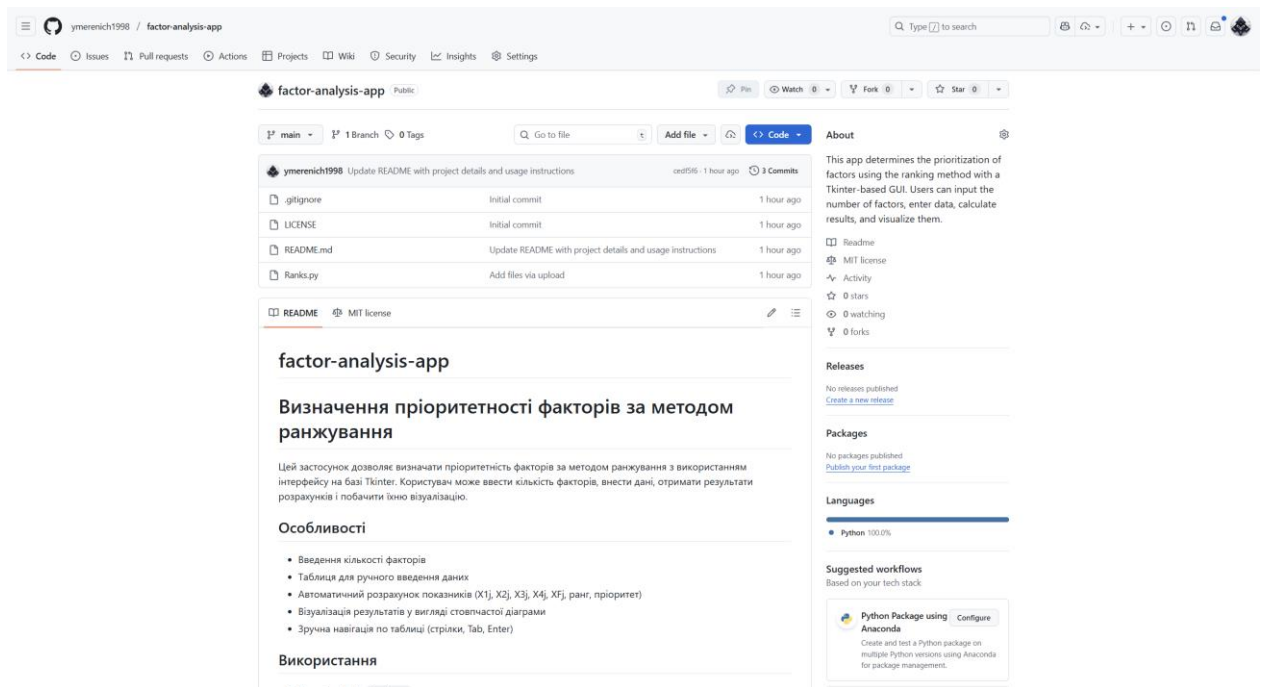
19. Меренич Ю. Ю. Використання метрик юзабіліті для порівняльного аналізу варіантів верстання вебдодатків. *I Всеукраїнська науково-практична конференція «Науковий пошук: сучасні проблеми інформаційних технологій, математики, фізики, астрономії, управління та освіти»* : матеріали конференції (Житомир, 15–16 травня 2025 р.). Житомир, 2025. С. 114–116.

20. Меренич Ю. Ю., Мелеш М. М. Автоматизована генерація клієнтських інтерфейсів як інструмент цифрової стійкості в умовах глобалізаційних викликів. *XXIII Міжнародна наукова Інтернет-конференція «Національна безпека у фокусі викликів глобалізаційних процесів в економіці»* : матеріали конференції (Україна–Словаччина, 17–18 травня 2025 р.). Київ, 2025. С. 85–87.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на XI, XIV, XVII, XXII та XXIII Міжнародних наукових Інтернет-конференціях «Національна безпека у фокусі викликів глобалізаційних процесів в економіці» (Україна–Словаччина, 2021 р.; Україна–Хорватія, 2022 р.; Україна–Туреччина, 2023 р.; Україна–Бразилія, 2024 р.; Україна–Словаччина, 2025 р.); звітних науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу, наукових працівників і аспірантів Української академії друкарства (2023 р., 2024 р.); X Всеукраїнській науково-практичній конференції молодих учених «Інформаційні технології — 2023» (2023 р.); V Міжнародній науково-практичній конференції студентів, магістрантів та аспірантів «Квалілогія книги» (2023 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Кібербезпека в транскордонному співробітництві» (2024 р.); XVII Міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційні технології і автоматизація — 2024» (2024 р.); X Міжнародній науково-технічній конференції «Поліграфічні, мультимедійні та web-технології» (2025 р.); I Всеукраїнській науково-практичній конференції «Науковий пошук: сучасні проблеми інформаційних технологій, математики, фізики, астрономії, управління та освіти» (2025 р.).

Додаток Б — Код програми для визначення пріоритетності факторів за методом ранжування

Вихідний код програмного продукту для визначення пріоритетності факторів за методом ранжування опублікований у публічному репозиторії GitHub: <https://github.com/ymerenich1998/factor-analysis-app/> (дата звернення: 30.09.2025). На рисунку подано скріншот репозиторію.

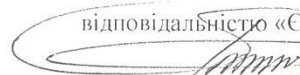


У файлі «Ranks.py» міститься програмний код для запуску графічного інтерфейсу користувача, призначеного для визначення пріоритетності факторів за методом ранжування. Програма дозволяє вказати кількість факторів, ввести оцінки для кожного з них, автоматично сформувати розрахункову таблицю, обчислити підсумкові показники, ранги та пріоритети, а також побудувати стовпчасту діаграму пріоритетності. Реалізовано зручну навігацію з клавіатури (стрілки, Tab, Enter), прокрутку великої таблиці, перевірку коректності введених даних із повідомленнями про помилки та динамічне масштабування діаграми. Інтерфейс створено з використанням бібліотеки Tkinter, для побудови графіків застосовано matplotlib.

Додаток В — Акти впровадження результатів дисертаційної роботи

ЗАТВЕРДЖУЮ

Керівник товариства з обмеженою
відповідальністю «СВРОКОМП'ЮТЕР»

 Іван ПОПОВИЧ
« 25 » червня 2025р.

АКТ

впровадження результатів дисертаційного дослідження

«Інформаційна технологія оцінювання якості проєктування та дизайну вебдодатків»
Меренича Юліана Юліановича у практичну діяльність ТОВ «СВРОКОМП'ЮТЕР»

Даним актом засвідчується, що результати дисертаційного дослідження Меренича Юліана Юліановича «Інформаційна технологія оцінювання якості проєктування та дизайну вебдодатків», виконаного у Національному університеті «Львівська політехніка», були впроваджені у практичну діяльність інтернет-провайдера ТОВ «СВРОКОМП'ЮТЕР».

Впровадження здійснено шляхом використання розробленої методики та програмного продукту для оцінювання якості вебдодатків і цифрових сервісів, що застосовуються у роботі провайдера. Інформаційна технологія включає моделі й алгоритми багатокритеріального аналізу, засоби нечіткої логіки та інструменти прогнозування показників якості, які забезпечують оцінку зручності, надійності та ефективності цифрових рішень.

Практичне застосування результатів у ТОВ «СВРОКОМП'ЮТЕР» дало можливість удосконалити процеси розробки та тестування внутрішніх вебсистем, систем обліку та клієнтських інтерфейсів. Використання програмного продукту, реалізованого на мові Python, дозволяє проводити налаштування параметрів, ранжування факторів і візуалізацію результатів оцінювання, що сприяє підвищенню якості наданих послуг інтернет-зв'язку та оптимізації роботи з абонентами.

Таким чином, результати дисертаційного дослідження інтегровані у виробничу діяльність інтернет-провайдера і сприяють підвищенню ефективності контролю якості цифрових сервісів та забезпеченню надійності комунікаційних послуг.

Відповідальний за впровадження:

Керівник

ТОВ «СВРОКОМП'ЮТЕР»



ТОВ «ПеттерсонАпс»
Адреса: 79032, м. Львів, вул. Шафарика, 4/1
Тел. (096) 466 98 43
E-mail: taras@pettersonapps.com
ЄДРПУ: 40348567
р/р: UA40 305299 00000 26007043605402
Банк: АТ КБ «ПриватБанк»



АКТ

впровадження результатів дисертаційного дослідження

«Інформаційна технологія оцінювання якості проєктування та дизайну вебдодатків»

Меренича Юліана Юліановича у практичну діяльність компанії «PettersonApps»

Даним актом засвідчується, що результати дисертаційного дослідження Меренича Юліана Юліановича «Інформаційна технологія оцінювання якості проєктування та дизайну вебдодатків», виконаного у Національному університеті «Львівська політехніка», упроваджено у практичну діяльність компанії «PettersonApps».

Впровадження здійснено шляхом використання розробленої методики та програмного продукту у процесах розробки й тестування вебдодатків. Інформаційна технологія поєднує функціональні, онтологічні та ієрархічні моделі, методи багатокритеріального аналізу й інструменти нечіткої логіки, що забезпечують об'єктивне оцінювання та прогнозування якості проєктування і дизайну цифрових продуктів.

Практичне застосування результатів у компанії «PettersonApps» дозволило підвищити ефективність оцінки вебдодатків за рахунок визначення пріоритетних факторів якості, побудови ієрархічних моделей із урахуванням ергономіки, когнітивної взаємодії, доступності, інклюзивності та інформаційної архітектури, а також виконання інтегральних розрахунків за допомогою нечітких множин. Розроблений програмний продукт, реалізований мовою Python, забезпечує налаштування параметрів, проведення розрахунків, ранжування факторів і візуалізацію результатів.

Таким чином, результати дисертаційного дослідження успішно інтегровані у виробничі процеси компанії, що сприяє вдосконаленню системи контролю якості, підвищенню надійності вебдодатків та оптимізації процесів їхнього проєктування, розроблення і тестування.

Відповідальний за впровадження:

Директор



Островерх Т.П.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової роботи
ДВНЗ «Ужгородський національний університет»
доктор медичних наук, професор
Іван МИРОНЮК
«15» вересня 2025р.



АКТ

впровадження результатів дисертаційного дослідження
«Інформаційна технологія оцінювання якості проєктування та дизайну вебдодатків»
Меренича Юліана Юліановича в навчальний процес

Цей акт складено про те, що результати дисертаційного дослідження Меренича Юліана Юліановича «Інформаційна технологія оцінювання якості проєктування та дизайну вебдодатків», виконаного у Національному університеті «Львівська політехніка», упроваджено у навчальний процес факультету інформаційних технологій Державного вищого навчального закладу «Ужгородський національний університет».

Впровадження полягає у використанні розробленої інформаційної технології, що включає функціональні, онтологічні та ієрархічні моделі, методи багатокритеріального аналізу та засоби нечіткої логіки для оцінювання прогнозованої якості вебдодатків, а також інших отриманих наукових результатів.

Ці результати застосовуються при викладанні навчальних дисциплін у межах лекційних, практичних та лабораторних занять, зокрема у курсах «Комп'ютерна графіка», «Прикладна інформатика», «Проектування та дизайн цифрових продуктів», «Вебтехнології та вебдизайн», «Основи веброзробки», «Комп'ютерна графіка та візуалізація даних» та «Розробка інтернет-клієнт серверних систем». Впровадження здійснено у підготовці студентів освітнього ступеня «бакалавр» за спеціальностями F2 «Інженерія програмного забезпечення» та F6 «Інформаційні системи та технології».

Крім того, результати дослідження використовуються у наукових проєктах та при виконанні кваліфікаційних робіт, що сприяє формуванню у студентів сучасних компетентностей у сфері веброзробки, дизайну цифрових продуктів та оцінювання їхньої якості.

Декан факультету
інформаційних технологій,
доктор технічних наук, професор


Ігор ПОВХАН