

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ навчально-науковий центр заочної форми навчання
 Кафедра _____ програмної інженерії
 Рівень вищої освіти _____ другий (магістерський)
 Спеціальність _____ 121 – Інженерія програмного забезпечення
 Тип програми _____ освітньо-наукова програма
 Освітня програма _____ Інженерія програмного забезпечення
 (шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____

(підпис)

«____» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві _____ Заговорі Аліні Юріївні _____


(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Дослідження методів ієрархії моделі знань предметної області
Затверджена наказом по університету від 10.04.2025р. № 55 Стз
2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 12.06.2025
3. Вихідні дані до роботи: Наукова література з ієрархічного моделювання знань, методів, дані предметної області (критерії та альтернативи), опис методів АНР і ANP для побудови ієрархій знань, технології Vue.js, Flask, бібліотека Chart.js, середовище розробки Visual Studio Code
4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі: Поняття ієрархії моделей знань та їх класифікація, методи побудови ієрархій знань у предметних областях, проаналізувати особливості методів АНР та ANP як інструментів ієрархічного моделювання, реалізація програмну систему для побудови моделей знань із використанням методів АНР та ANP, порівняння результатів обох методів на прикладі обраної предметної області

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Отримання завдання	квітень 2025 р.	<i>виконано</i>
2	Аналіз предметної галузі	квітень 2025 р.	<i>виконано</i>
3	Проблеми побудови ієрархій моделей знань	квітень 2025 р.	<i>виконано</i>
4	Теоретичне дослідження методів ієрархічного моделювання	травень 2025 р.	<i>виконано</i>
5	Постановка задачі та реалізація програмної системи	травень 2025 р.	<i>виконано</i>
6	Експериментальне дослідження	травень 2025 р.	<i>виконано</i>
7	Підготовка пояснювальної записки	травень 2025 р.	<i>виконано</i>
8	Підготовка презентації та доповіді	червень 2025 р.	<i>виконано</i>
9	Перевірка на плагіат	червень 2025 р.	<i>виконано</i>
10	Нормоконтроль	червень 2025 р.	<i>виконано</i>
11	Рецензування	червень 2025 р.	<i>виконано</i>
12	Попередній захист	червень 2025 р.	<i>виконано</i>
13	Занесення диплома в електронний архів	червень 2025 р.	<i>виконано</i>
14	Допуск до захисту у зав. кафедри	червень 2025 р.	<i>виконано</i>

Дата видачі завдання 7 квітня 2025р.

Здобувачка _____

 (підпис)

_____ Аліна ЗАГОВОРА

Керівник роботи _____
 (підпис)

_____ доц. Олексій НАЗАРОВ
 (посада, Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ / ABSTRACT

Пояснювальна записка містить: 71 с., 25 рис., 15 джерел.

ІЄРАРХІЯ ЗНАНЬ, АНР, СИСТЕМИ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ, АНР, МЕТОДИ МОДЕЛЮВАННЯ, ПРЕДМЕТНА ОБЛАСТЬ, ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ.

Об'єкт дослідження – методи побудови ієрархічних моделей знань у предметних областях для формалізації експертної інформації та підтримки прийняття рішень.

Мета роботи – дослідити підходи до побудови ієрархічних моделей знань у предметних областях на прикладі двох відомих методів – АНР та АНР. Основну увагу приділено аналізу принципів роботи кожного методу, їхньому практичному застосуванню, а також способам представлення структури знань, яка може бути використана у процесах вибору, оцінювання або прийняття рішень.

У межах роботи передбачається реалізація програмного прототипу, що дозволяє наочно продемонструвати особливості обчислень за допомогою методів АНР та АНР. Такий підхід забезпечує можливість візуального порівняння отриманих результатів, а також сприяє кращому розумінню їхнього використання у реальних прикладних задачах.

Результат роботи – проведено аналіз методів ієрархічного моделювання знань та визначено їх особливості в контексті представлення структур предметної області. На основі отриманих теоретичних положень реалізовано веб-застосунок, що дозволяє демонструвати принципи роботи обраних методів, здійснювати базові розрахунки та наочно відображати результати для подальшого порівняння і оцінювання.

KNOWLEDGE HIERARCHY, АНР, DECISION SUPPORT SYSTEMS, АНР, MODELING METHODS, SUBJECT AREA, DECISION MAKING.

The object of the study is methods for building hierarchical knowledge models in subject areas for formalizing expert information and supporting decision-making.

The purpose of the work is to investigate approaches to building hierarchical knowledge models in subject areas using the example of two well-known methods - AHP and ANP. The main attention is paid to the analysis of the principles of operation of each method, their practical application, as well as ways of representing the knowledge structure that can be used in the processes of selection, evaluation or decision-making.

The work involves the implementation of a software prototype that allows you to clearly demonstrate the features of calculations using the AHP and ANP methods. This approach provides the possibility of visual comparison of the results obtained, and also contributes to a better understanding of their use in real applied problems.

The result of the work is an analysis of hierarchical knowledge modeling methods and their features in the context of representing the structures of the subject area are determined. Based on the obtained theoretical provisions, a web application has been implemented that allows demonstrating the principles of operation of the selected methods, performing basic calculations and visually displaying the results for further comparison and evaluation.

Завідувачу кафедри
ПІ
(скорочена назва кафедри)
проф. Кирилу СМЕЛЯКОВУ
(вчене звання, сласне ім'я, прізвище)

ЗАЯВА

щодо самостійності виконання кваліфікаційної роботи та можливості її публікації
(та/або публікації анотації кваліфікаційної роботи) в електронному архіві
відкритого доступу EIAr KhNURE

Я, Заговора Аліна Юріївна, здобувачка гр. ІПЗзм-23-1, здобувач вищої освіти на другому (магістерському) рівні кафедри «Програмна інженерія», заявляю: моя кваліфікаційна робота на тему «Дослідження методів ієрархії моделі знань предметної області», що буде представлений для публічного захисту, виконаний самостійно, не містить елементи плагіату і може бути опублікований в електронному архіві з відкритим доступом EIAr KhNURE. Всі запозичення з друкованих та електронних джерел мають відповідні посилання.

Я ознайомена з діючим положенням «Про протидію академічному плагіату в ХНУРЕ», відповідно до якого виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску роботи до захисту та застосування дисциплінарних заходів.

Дата 07.06.2025



Підпис

ЗМІСТ

Перелік скорочень	9
Вступ.....	10
1 Аналіз предметної галузі	11
1.1 Аналіз існуючих рішень у сфері моделювання знань	11
1.3 Особливості ієрархічного представлення знань у предметних областях	15
2 Проблеми побудови ієрархій моделей знань	18
2.1 Поняття ієрархії знань	18
2.2 Формалізація структури знань.....	18
2.3 Вимоги до ієрархічних моделей	20
2.4 Труднощі масштабування та адаптації моделей.....	21
3 Теоретичне дослідження методів ієрархічного моделювання	23
3.1 Метод аналітичної ієрархії (АНП)	23
3.1.1 Загальна схема методу АНП.....	24
3.1.2 Обчислення локальних і глобальних пріоритетів	25
3.2 Метод аналітичної мережевої ієрархії (АНР)	28
3.2.1 Структура методу АНР.....	29
3.2.2 Побудова суперматриці.....	31
4 Постановка задачі та реалізація програмної системи	34
4.1 Формулювання технічного завдання	34
4.2 Архітектура та функціональні компоненти веб-застосунку.....	34
4.3 Інтерфейс користувача	38
5 Експериментальне дослідження	45
5.1 Мета та завдання експерименту	45
5.2 Опис експериментальних даних та сценарії	45
5.3 Методика оцінки	47
5.4 Результати експерименту	47
Висновки	54
Перелік джерел посилання	55

Перелік джерел посилання за науковими напрямками керівника та науковців кафедри програмної інженерії	57
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

AHP – Analytic Hierarchy Process

ANP – Analytic Network Process

CR – Consistency Ratio

CI – Consistency Index

OWL - Web Ontology Language

ВСТУП

У сучасних умовах інтенсивного розвитку інформаційних технологій та зростання обсягів цифрових даних особливого значення набуває питання ефективної організації, представлення та використання знань. Знання виступають ключовим ресурсом для створення інтелектуальних систем, підтримки прийняття рішень і побудови гнучких інформаційних моделей, здатних адаптуватися до складності реального світу.

Один із важливих напрямів у моделюванні знань полягає в їх ієрархічній організації, що дозволяє структурувати інформацію у вигляді багаторівневої системи понять, де кожен рівень деталізує або уточнює попередній. Ієрархії знань сприяють впорядкованому зберіганню знань, полегшують навігацію між елементами моделі та забезпечують логічну узгодженість при обробці інформації як людиною, так і комп'ютерною системою. Такий підхід особливо актуальний для задач, де необхідно враховувати взаємозв'язки між різними рівнями даних та забезпечити гнучкість в інтерпретації знань.

Дослідження підходів до побудови ієрархічних моделей знань є важливою складовою розвитку інформаційних систем, оскільки від якості такої структури залежить точність, адаптивність і ефективність процесів аналізу, класифікації та прийняття рішень. Значну увагу при цьому приділяють формалізації знань, що включає математичний опис відносин між елементами, а також визначення критеріїв для їх порівняння, впорядкування або групування. Оскільки моделі знань дедалі частіше застосовуються у прикладних задачах, їхнє грамотне проектування стає невід'ємною складовою створення ефективних програмних рішень.

Метою даної роботи є аналіз підходів до організації ієрархій знань у межах конкретної предметної області, визначення їх особливостей та потенціалу для практичного застосування. У рамках дослідження було проведено теоретичний аналіз, створено програмний прототип, що дозволяє моделювати структури знань, а також здійснено тестування, яке підтверджує практичну цінність обраного підходу.

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ГАЛУЗІ

1.1 Аналіз існуючих рішень у сфері моделювання знань

Моделювання знань є ключовим напрямом сучасних інформаційних технологій, спрямованим на формалізацію, структурування та використання експертної інформації для вирішення прикладних задач. У предметних областях, де необхідне прийняття складних рішень, моделі знань забезпечують систематизацію даних, підтримку логічного аналізу та автоматизацію процесів. Сьогодні існує низка підходів до моделювання знань, які різняться за структурою, методами представлення та сферами застосування.

Одним із поширених підходів є онтологічне моделювання, яке базується на формальному описі понять, їхніх властивостей і взаємозв'язків у межах предметної області. Онтології, такі як OWL [1], широко застосовуються в семантичних вебтехнологіях, дозволяючи створювати гнучкі моделі для інтеграції даних із різних джерел. Проте їх створення та підтримка потребують значних ресурсів, що обмежує їх використання в динамічних задачах.

Інший підхід — використання фреймових систем, які представляють знання у вигляді структурованих об'єктів із атрибутами та зв'язками. Такі системи ефективні для задач, що потребують деталізації об'єктів, але менш придатні для аналізу складних взаємозв'язків між елементами через їхню статичну природу.

Окремої уваги заслуговують методи ієрархічного моделювання, зокрема аналітичний процес ієрархій і аналітичний мережевий процес. АНР, розроблений Томасом Сааті, використовує ієрархічну структуру для декомпозиції складних задач на простіші компоненти, дозволяючи оцінювати альтернативи за парним порівнянням. Цей метод широко застосовується в економіці, управлінні та інженерії завдяки своїй простоті та універсальності, але він не враховує взаємозалежності між елементами. ANP, як розширення АНР, долає це обмеження, дозволяючи моделювати складні мережі взаємозв'язків, що робить його ефективним для задач із нелінійними залежностями.

Серед програмних рішень, які реалізують ці методи, можна виокремити інструменти, такі як Expert Choice [2] та SuperDecisions [3]. Expert Choice підтримує АНР і частково ANP, забезпечуючи зручний інтерфейс для побудови ієрархій і виконання обчислень. SuperDecisions, у свою чергу, орієнтований на ANP і дозволяє моделювати складні мережі залежностей. Однак ці інструменти мають обмеження, пов'язані з високою вартістю ліцензій та недостатньою гнучкістю для кастомізації під специфічні предметні області.

Аналіз сучасних рішень показує, що більшість із них орієнтовані на конкретні аспекти моделювання знань, але рідко поєднують простоту використання, гнучкість і можливість порівняльного аналізу різних методів. Це створює потребу в розробці універсальних програмних засобів, які б дозволяли досліджувати особливості методів АНР і ANP у межах однієї платформи, що є актуальним завданням для практичного застосування в предметних областях.

1.2 Класифікація моделей знань

Моделі знань є основою для структурування інформації в предметних областях, що дозволяє ефективно обробляти дані, підтримувати прийняття рішень і створювати інтелектуальні системи. Для систематизації підходів до моделювання знань необхідна їх класифікація, яка враховує особливості структури, способи представлення та сфери застосування.

Одним із основних критеріїв класифікації є структура представлення знань. Логічні моделі, засновані на формальній логіці, використовують правила та аксіоми для опису зв'язків між поняттями. Вони ефективні для задач, що потребують чіткої формалізації, наприклад, у системах штучного інтелекту, але можуть бути обмеженими в умовах невизначеності чи складних взаємозв'язків [13].

Фреймові моделі представляють знання у вигляді структурованих об'єктів із наборами атрибутів і зв'язків. Вони зручні для опису об'єктів предметної області, таких як технічні системи чи бізнес-процеси, але їхня статична природа ускладнює моделювання динамічних систем. Семантичні мережі, навпаки, зосереджені на

представленні зв'язків між поняттями у вигляді графів, що забезпечує гнучкість у відображенні складних взаємозалежностей, але може ускладнювати обробку великих обсягів даних.

Онтологічні моделі поєднують елементи семантичних мереж і логічного підходу, формалізуючи знання через чітко визначені поняття, їх властивості та зв'язки. Ієрархічні моделі знань структурують інформацію у вигляді багаторівневих систем, де кожен рівень деталізує попередній, що робить їх ефективними для задач оцінювання чи вибору альтернатив [15].

Особливе місце займають ієрархічні моделі знань, які структурують інформацію у вигляді багаторівневих систем, де кожен рівень деталізує попередній. Такі моделі ефективні для задач, що потребують декомпозиції складних систем на простіші компоненти, наприклад, при оцінюванні альтернатив чи виборі оптимальних рішень. Ієрархічні моделі дозволяють упорядковувати знання, враховуючи пріоритети або залежності між елементами, що робить їх універсальними для прикладних задач у різних предметних областях.

На рис. 1.1 представлено схему класифікації моделей знань за структурою, яка ілюструє основні типи моделей (логічні, фреймові, семантичні мережі, онтологічні та ієрархічні) та їх взаємозв'язок у контексті моделювання знань.

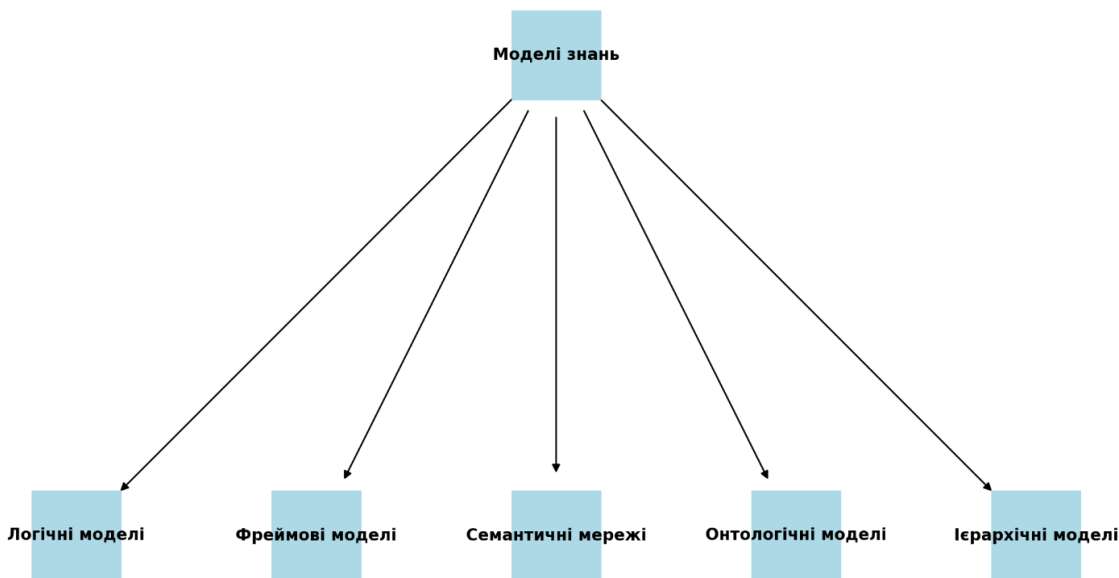


Рисунок 1.1 – Класифікації моделей знань за структурою
(Рисунок виконано самостійно)

За функціональним призначенням моделі знань поділяють на дескриптивні, які описують структуру предметної області, і процедурні, які визначають послідовність дій для вирішення задач. Дескриптивні моделі зосереджені на статичному представленні знань, тоді як процедурні моделі орієнтовані на динамічні процеси, такі як автоматизація прийняття рішень.

На рис. 1.2 зображено блок-схему класифікації моделей знань за функціональним призначенням, яка демонструє поділ на дескриптивні та процедурні моделі та їх основні сфери застосування.

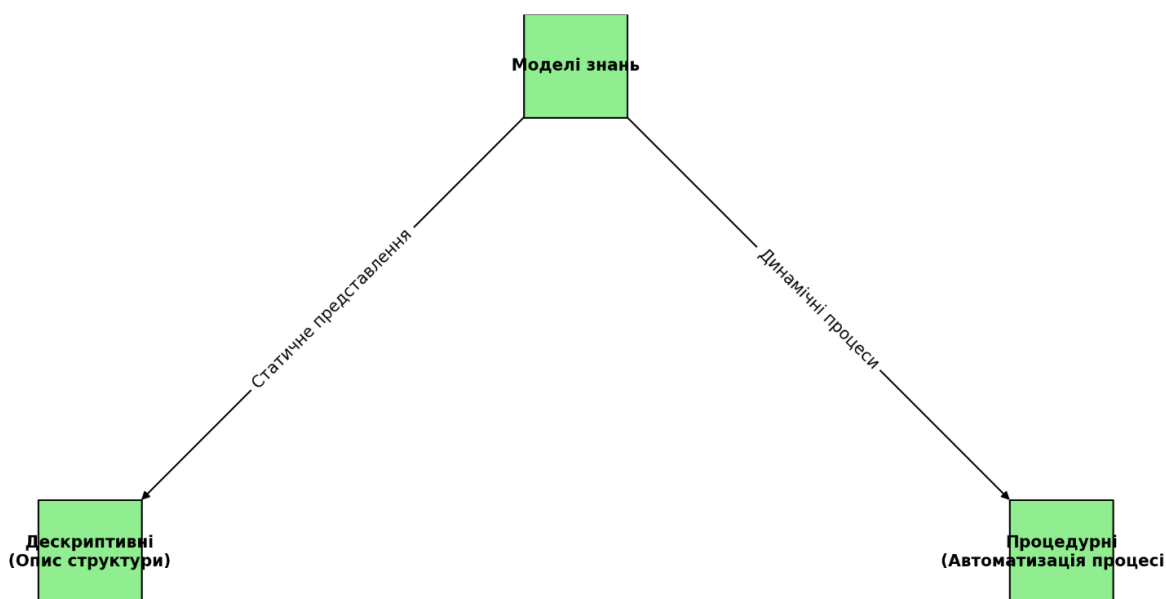


Рисунок 1.2 – Класифікації моделей знань за функціональним призначенням
(Рисунок виконано самостійно)

Класифікація моделей знань за типом даних дозволяє виокремити моделі для обробки структурованих, неструктурованих і частково структурованих даних. Структуровані моделі ефективні для чітко визначених предметних областей, тоді як неструктуровані підходи, наприклад, засновані на обробці природної мови, застосовуються для аналізу текстових даних.

На рис. 1.3 представлено кільцеву діаграму, яка ілюструє класифікацію моделей знань за типом даних і їх співвідношення в контексті обробки інформації.

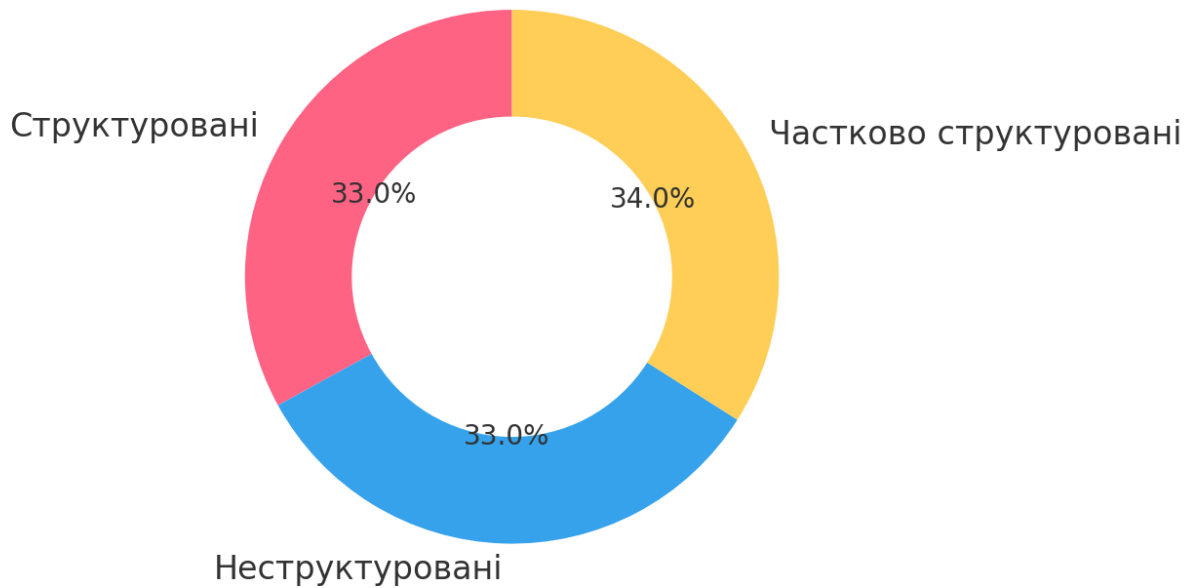


Рисунок 1.3 – Класифікації моделей знань за типом даних
(Рисунок виконано самостійно)

Виходячи з цього, класифікація моделей знань за структурою, функціональним призначенням і типом даних дозволяє систематизувати підходи до їх створення та використання. Вибір конкретної моделі залежить від особливостей предметної області, складності задачі та вимог до обробки інформації, що підкреслює важливість гнучких інструментів для їх реалізації.

1.3 Особливості ієрархічного представлення знань у предметних областях

Ієрархічне представлення знань є одним із ключових підходів до моделювання інформації в предметних областях, що дозволяє структурувати складні дані у вигляді багаторівневих систем. Цей підхід базується на декомпозиції складних задач на простіші компоненти, де кожен рівень ієрархії уточнює або деталізує попередній. Така організація знань забезпечує логічну впорядкованість, полегшує аналіз і сприяє ефективному використанню інформації в задачах прийняття рішень, оцінювання альтернатив чи класифікації об'єктів.

Однією з основних особливостей ієрархічного представлення є його здатність відображати зв'язки між елементами предметної області у структурованій формі.

Це дозволяє систематизувати знання, починаючи від загальних концепцій на верхніх рівнях до специфічних деталей на нижніх. Наприклад, у технічних системах ієрархія може представляти компоненти системи, їх підкомпоненти та взаємозв'язки, що полегшує управління проектами чи аналіз даних. У бізнес-процесах ієрархічні моделі допомагають визначити пріоритети цілей, розподіл ресурсів чи оцінити ефективність стратегій.

На рис. 1.4 зображено схему, яка демонструє багаторівневу структуру ієрархічної моделі на прикладі умовної предметної області. Схема відображає розподіл знань від загальних концепцій до конкретних елементів, підкреслюючи зв'язки між рівнями.

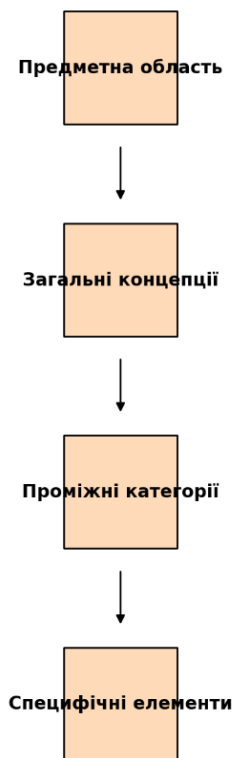


Рисунок 1.4 – Ієрархія понять у предметній області (Рисунок виконано самостійно)

Це дозволяє систематизувати знання, починаючи від загальних концепцій на верхніх рівнях до специфічних деталей на нижніх. Наприклад, у технічних системах ієрархія може представляти компоненти системи, їх підкомпоненти та взаємозв'язки, що полегшує управління проектами чи аналіз даних. У бізнес-

процесах ієрархічні моделі допомагають визначити пріоритети цілей, розподіл ресурсів чи оцінити ефективність стратегій.

Ще однією важливою характеристикою є гнучкість ієрархічних моделей, яка проявляється в можливості адаптації до різних предметних областей. Завдяки чіткій структурі такі моделі легко модифікувати, додаючи чи видаляючи рівні або елементи залежно від потреб задачі. Це робить їх універсальними для використання в інформаційних системах, де необхідно враховувати динамічні зміни чи нові вимоги.

Ієрархічні моделі також забезпечують підтримку процесів прийняття рішень шляхом формалізації експертних оцінок. Вони дозволяють порівнювати альтернативи, визначати їх пріоритети та оцінювати вплив різних факторів. Такий підхід особливо цінний у задачах, де потрібно враховувати суб'єктивні судження експертів або складні взаємозв'язки між елементами предметної області [15].

Водночас ієрархічне представлення знань має певні обмеження. Зокрема, воно може бути менш ефективним для моделювання нелінійних взаємозалежностей, коли елементи на різних рівнях ієрархії мають складні взаємозв'язки, які не можна описати простою декомпозицією. Крім того, створення ієрархічних моделей потребує ретельного аналізу предметної області для забезпечення логічної узгодженості та повноти структури.

Таким чином, ієрархічне представлення знань є ефективним інструментом для структурування інформації в предметних областях. Його особливості, такі як чітка організація, гнучкість і підтримка прийняття рішень, роблять його цінним для створення інформаційних систем, хоча врахування обмежень цього підходу є важливим для забезпечення якості моделювання.

2 ПРОБЛЕМИ ПОБУДОВИ ІЄРАРХІЙ МОДЕЛЕЙ ЗНАНЬ

2.1 Поняття ієрархії знань

Ієрархія знань є ключовим концептом у моделюванні інформації, що дозволяє організувати дані предметної області у вигляді багаторівневої структури. Суть ієрархії полягає в систематизації знань від загальних понять до конкретних деталей, де кожен рівень уточнює попередній. Такий підхід забезпечує чітке представлення складних систем, сприяючи їх аналізу та ефективному використанню в інформаційних системах.

У предметних областях ієрархія знань відображає логічні зв'язки між елементами, такими як об'єкти, процеси чи критерії. Наприклад, у технічних системах ієрархія може включати загальну систему, її підсистеми та окремі компоненти, тоді як у бізнес-контексті вона може представляти стратегічні цілі та конкретні дії для їх досягнення. Це дозволяє декомпонувати складні задачі на простіші компоненти, що полегшує прийняття рішень і управління інформацією.

Ієрархії знань формалізують відносини між елементами, такі як "частина-ціле" чи "загальне-специфічне", забезпечуючи логічну узгодженість даних [10]. Вони полегшують навігацію в інформаційних моделях, дозволяючи швидко знаходити потрібні елементи та оцінювати їх релевантність. Такий підхід є основою для створення систем підтримки прийняття рішень, де чітка структура знань сприяє точності аналізу та обробки інформації.

Отже, ієрархія знань є універсальним інструментом для структурування інформації, який створює основу для вирішення проблем, пов'язаних із формалізацією, вимогами та масштабуванням моделей у предметних областях.

2.2 Формалізація структури знань

Формалізація структури знань є важливим етапом у створенні ієрархічних моделей, оскільки вона забезпечує переведення експертної інформації предметної області в чітко визначену систему понять, зв'язків і правил. Цей процес передбачає ідентифікацію ключових елементів предметної області, їх класифікацію та

визначення взаємозв'язків, що дозволяє створити логічно узгоджену модель для подальшого аналізу чи автоматизації.

Основним завданням формалізації є виділення основних об'єктів предметної області, таких як поняття, процеси чи критерії, та їх структуризація у вигляді ієрархії. Наприклад, у технічній системі формалізація може включати визначення основних компонентів, їх функцій і залежностей, тоді як у бізнес-контексті це може бути розподіл стратегічних цілей на підцілі та завдання. Такий підхід дозволяє представити знання у вигляді, придатному для обробки як людиною, так і комп'ютерною системою.

Формалізація також передбачає визначення типів зв'язків між елементами, таких як відношення "частина-ціле", "причина-наслідок" чи "пріоритетність". Це вимагає використання формальних методів, зокрема математичних моделей, які забезпечують точність і однозначність представлення знань. Важливим аспектом є врахування суб'єктивних експертних оцінок, які часто є основою для побудови ієрархій, що потребує методів для їх узгодження та перевірки.

Однією з проблем формалізації є складність представлення неструктурованих чи неоднозначних даних, які часто зустрічаються в реальних предметних областях. Наприклад, у соціальних чи економічних системах знання можуть бути неповними або суперечливими, що ускладнює їх структурування. Крім того, формалізація вимагає балансу між деталізацією та узагальненням, щоб модель залишалася достатньо простою для обробки, але водночас відображала всі ключові аспекти предметної області.

У такий спосіб, формалізація структури знань є критично важливим процесом для створення ієрархічних моделей, який забезпечує їх логічну узгодженість і придатність для вирішення прикладних задач. Успішна формалізація залежить від ретельного аналізу предметної області та вибору відповідних методів структурування знань.

2.3 Вимоги до ієрархічних моделей

Створення ієрархічних моделей знань потребує дотримання низки вимог, які забезпечують їх ефективність, придатність для використання та відповідність задачам предметної області. Ці вимоги визначають якість моделі, її здатність відображати структуру знань і підтримувати процеси аналізу та прийняття рішень.

Першою вимогою є логічна узгодженість, яка передбачає чітке визначення зв'язків між елементами ієрархії. Кожен рівень моделі має бути пов'язаним із попереднім через відношення типу "загальне-специфічне" чи "частина-ціле", щоб уникнути неоднозначностей чи суперечностей. Наприклад, у технічній системі ієрархічна модель повинна чітко відображати залежності між компонентами, забезпечуючи однозначне розуміння їхньої ролі.

Другою вимогою є повнота представлення знань. Ієрархічна модель має охоплювати всі ключові елементи предметної області, включаючи об'єкти, процеси чи критерії, щоб забезпечити комплексний аналіз [10, 5]. Неповне представлення може призвести до втрати важливих даних, що знижує ефективність моделі в задачах оцінювання чи прогнозування.

Гнучкість є ще однією важливою вимогою, яка дозволяє адаптувати модель до змін у предметній області. Ієрархічні моделі повинні підтримувати можливість додавання чи видалення елементів і рівнів без порушення загальної структури. Наприклад, у бізнес-процесах модель має дозволяти оновлення цілей чи завдань у відповідь на нові вимоги ринку.

Простота обробки також відіграє ключову роль. Модель повинна бути достатньо компактною, щоб її можна було ефективно використовувати в інформаційних системах, включаючи автоматизовані процеси. Це передбачає баланс між деталізацією та узагальненням, щоб уникнути надмірної складності, яка ускладнює обчислення чи інтерпретацію.

Нарешті, вимога прозорості передбачає, що структура ієрархічної моделі має бути зрозумілою для користувачів, включаючи експертів і розробників. Це

полегшує взаємодію з моделлю, її аналіз і використання в задачах прийняття рішень, особливо в умовах обмеженого часу чи ресурсів.

Таким чином, вимоги до ієрархічних моделей, такі як логічна узгодженість, повнота, гнучкість, простота обробки та прозорість, є основою для їх ефективного створення та застосування. Дотримання цих вимог забезпечує якість моделей і їх придатність для вирішення прикладних задач у предметних областях.

2.4 Труднощі масштабування та адаптації моделей

Масштабування та адаптація ієрархічних моделей знань є складними завданнями, які виникають під час їх застосування у великих або динамічних предметних областях. Ці труднощі пов'язані з обробкою значних обсягів даних, врахуванням складних взаємозв'язків, забезпеченням гнучкості моделей і подоланням невизначеності інформації, що є характерним для реальних прикладних задач.

Однією з ключових проблем масштабування є зростання обчислювальної складності при збільшенні кількості елементів і рівнів ієрархії. У предметних областях, таких як управління інформаційними системами чи аналіз економічних процесів, ієрархічні моделі можуть містити сотні або тисячі елементів, що потребує значних обчислювальних ресурсів. Наприклад, у системах управління великими проєктами ієрархія може включати численні підсистеми, компоненти та їх залежності, що ускладнює швидке оновлення чи аналіз моделі. Це може призводити до затримок у обробці даних або зниження точності результатів, особливо в автоматизованих системах із обмеженими ресурсами.

Ще однією суттєвою проблемою є врахування нелінійних взаємозв'язків між елементами. У багатьох предметних областях, таких як соціальні чи біологічні системи, елементи ієрархії мають не лише вертикальні зв'язки (наприклад, "частина-ціле"), а й горизонтальні залежності, які формують складні мережі. Наприклад, у соціальних мережах взаємодія між учасниками може створювати динамічні зв'язки, які важко представити у вигляді простої ієрархії. Такі нелінійні

відношення ускладнюють декомпозицію задачі та вимагають додаткових методів для їх формалізації, що може знижувати ефективність моделі.

Адаптація ієрархічних моделей до змін у предметній області також становить значний виклик. У реальних умовах предметна область може зазнавати змін, таких як оновлення вимог, поява нових даних чи зміна пріоритетів. Наприклад, у бізнес-контексті зміна ринкових умов може вимагати перегляду структури цілей, що впливає на всю ієрархію. Недостатня гнучкість моделі може призвести до її невідповідності новим умовам, що потребує значних зусиль для її модифікації. У технічних системах, таких як програмне забезпечення, додавання нових функцій може вимагати перебудови ієрархії, що порушує її цілісність або ускладнює підтримку [11].

Невизначеність і неповнота даних є ще одним важливим обмеженням. У багатьох предметних областях інформація є фрагментарною, суб'єктивною або суперечливою, що ускладнює створення точної ієрархічної моделі. Наприклад, у прогнозуванні економічних трендів дані можуть бути неточними через непередбачувані фактори, такі як політичні чи соціальні зміни. Це вимагає від розробників моделей використання методів для обробки невизначеності, що може ускладнити їх структуру та підвищити вимоги до обчислювальних ресурсів.

Додатковим аспектом є складність інтеграції ієрархічних моделей із іншими інформаційними системами. У великих організаціях моделі знань часто використовуються в поєднанні з базами даних, системами управління чи інструментами аналізу. Забезпечення сумісності та ефективної взаємодії між цими системами потребує додаткових зусиль, особливо якщо ієрархія містить велику кількість рівнів або складні зв'язки.

Отже, ефективне масштабування та адаптація ієрархічних моделей вимагають вирішення викликів, пов'язаних зі складністю обробки даних, нелінійними взаємозв'язками, гнучкістю, невизначеністю та інтеграцією з іншими системами. Успішне подолання цих проблем забезпечує створення моделей, які відповідають потребам предметної області та підтримують ефективний аналіз і прийняття рішень.

3 ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ІЄРАРХІЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

3.1 Метод аналітичної ієрархії (АНР)

Метод аналітичної ієрархії (АНР), запропонований Томасом Сааті у 1970-х роках, є потужним інструментом для моделювання знань і підтримки прийняття рішень у складних предметних областях [4, 6]. Розроблений для систематизації процесу оцінювання альтернатив, АНР дозволяє враховувати множинні критерії, поєднуючи кількісні та якісні фактори. Метод набув широкого поширення завдяки своїй універсальності та простоті, знаходячи застосування в різноманітних сферах, таких як економіка, управління проєктами, інженерія, охорона здоров'я та екологічний менеджмент.

АНР вирізняється здатністю структурувати складні задачі, розбиваючи їх на зрозумілі компоненти. Це дозволяє аналізувати проблеми, де потрібно оцінити пріоритети чи обрати оптимальне рішення, навіть за наявності суб'єктивних оцінок чи обмеженої інформації. Наприклад, у бізнес-контексті АНР використовується для вибору постачальників, оцінки інвестиційних проєктів чи визначення стратегічних пріоритетів. У технічних системах метод застосовується для вибору обладнання чи оптимізації процесів, що демонструє його адаптивність до різних задач.

Перевагою АНР є його здатність формалізувати експертні судження, перетворюючи суб'єктивні оцінки на кількісні показники, що підвищує обґрунтованість рішень. Метод також дозволяє перевіряти узгодженість оцінок, що забезпечує надійність результатів. Водночас АНР має обмеження, зокрема складність обробки великих обсягів даних чи задач із нелінійними взаємозв'язками між елементами, що може вимагати значних зусиль для реалізації [8].

У підсумку, метод аналітичної ієрархії є ефективним інструментом для моделювання знань, який забезпечує структурований підхід до прийняття рішень у різноманітних предметних областях. Його простота та універсальність роблять

його цінним для задач, що потребують системного аналізу та оцінки множинних факторів.

3.1.1 Загальна схема методу АНР

Метод аналітичної ієрархії (АНР) ґрунтується на організації задачі прийняття рішень у вигляді ієрархічної структури, яка дозволяє систематизувати знання предметної області та оцінити альтернативи за множинними критеріями. Схема методу передбачає чітке розбиття задачі на рівні, що відображають мету, критерії та альтернативи, а також використання парного порівняння для визначення їхньої відносної важливості [4, 9].

Ієрархічна структура АНР складається з трьох основних рівнів. На верхньому рівні розміщується мета задачі, наприклад, вибір оптимального постачальника чи технічного рішення. Наступний рівень включає критерії, які впливають на досягнення мети, такі як якість, вартість чи терміни виконання. У складніших задачах критерії можуть розбиватися на субкритерії, наприклад, розподіл вартості на капітальні та експлуатаційні витрати. На нижньому рівні розташовуються альтернативи, серед яких здійснюється вибір, наприклад, конкретні постачальники чи проєкти. Ця структура забезпечує декомпозицію складної задачі на простіші компоненти, що полегшує аналіз і оцінку. Для ілюстрації ієрархічної організації методу наведено схему (див. рис. 3.1).



Рисунок 3.1 – Ієрархічна структура АНР (Рисунок виконано самостійно)

Центральним елементом АНР є парне порівняння, яке використовується для оцінки важливості елементів на кожному рівні ієрархії. Експерти порівнюють критерії чи альтернативи попарно за шкалою Сааті, де значення від 1 (елементи

рівнозначні) до 9 (один елемент значно переважає) відображають ступінь переваги. Наприклад, порівнюючи якість і вартість, експерт може визначити, що якість удвічі важливіша, присвоївши відповідне значення. На основі цих оцінок формуються матриці парного порівняння, які слугують основою для визначення пріоритетів елементів.

Схема АНР також передбачає перевірку узгодженості парних порівнянь, що дозволяє виявити суперечності в оцінках експертів. Якщо оцінки не відповідають вимогам узгодженості, їх переглядають, щоб забезпечити надійність результатів. Завершальним етапом є синтез пріоритетів, який поєднує ваги всіх рівнів ієрархії для визначення найкращої альтернативи [7].

Отже, схема АНР забезпечує структурований підхід до моделювання знань, дозволяючи формалізувати експертні оцінки та ефективно вирішувати задачі прийняття рішень у предметних областях.

3.1.2 Обчислення локальних і глобальних пріоритетів

Обчислення локальних і глобальних пріоритетів є ключовим етапом методу АНР, який дозволяє визначити ваги елементів ієрархії та оцінити альтернативи щодо мети задачі. Процес включає побудову матриць парного порівняння, обчислення локальних пріоритетів, перевірку узгодженості оцінок і синтез результатів для отримання глобальних пріоритетів.

На першому етапі формуються матриці парного порівняння для кожного рівня ієрархії. Експерти оцінюють відносну важливість елементів (критеріїв чи альтернатив) за шкалою Сааті, присвоюючи значення від 1 до 9. Наприклад, для трьох критеріїв (якість, вартість, час) створюється матриця 3.1.

$$A = [a_{ij}] \quad (3.1)$$

де a_{ij} відображає перевагу критерію i над критерієм j .

Якщо якість удвічі важливіша за вартість, то $a_{12} = 2$, а $a_{21} = \frac{1}{2}$. Для ілюстрації такої матриці наведено приклад (див. рис. 3.2).

	Якість	Вартість	Час
Якість	1	2	3
Вартість	1/2	1	2
Час	1/3	1/2	1

Рисунок 3.2 – Приклад матриці попарного порівняння
(Рисунок виконано самостійно)

Локальні пріоритети обчислюються як нормалізований власний вектор матриці парного порівняння. Спочатку кожен елемент матриці a_{ij} ділиться на суму елементів відповідного стовпця, створюючи нормалізовану матрицю. Потім середнє значення елементів кожного рядка нормалізованої матриці визначає локальний пріоритет елемента.

Математично, для матриці A локальний пріоритет ω_i обчислюється за формулою 3.2.

$$\omega_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{a_{ij}}{\sum_{k=1}^n a_{kj}} \quad (3.2)$$

де n — кількість елементів у матриці.

Ці ваги відображають відносну важливість критеріїв чи альтернатив на відповідному рівні ієрархії.

Для забезпечення надійності оцінок проводиться перевірка узгодженості парних порівнянь. Спочатку визначається максимальне власне значення матриці λ_{\max} , яке обчислюється як середнє значення добутків матриці A на вектор пріоритетів. Індекс узгодженості (CI) розраховується за формулою 3.3.

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (3.3)$$

Коефіцієнт узгодженості (CR) визначається за формулою 3.4.

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (3.4)$$

де RI — середній індекс випадкової узгодженості, що залежить від розміру матриці.

Якщо $CR < 0.1$, оцінки вважаються узгодженими; інакше їх необхідно переглянути.

Після визначення локальних пріоритетів для всіх рівнів ієрархії виконується синтез для обчислення глобальних пріоритетів альтернатив. Глобальний пріоритет кожної альтернативи розраховується як зважена сума її локальних пріоритетів із урахуванням ваг критеріїв. Наприклад, якщо критерії мають ваги $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m$, а локальні пріоритети альтернативи A_i щодо цих критеріїв — $p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{im}$, то глобальний пріоритет P_i розраховується за формулою 3.5.

$$P_i = \sum_{j=1}^m \omega_j * \omega_{ij} \quad (3.5)$$

Процес синтезу пріоритетів ілюструє схема (див. рис. 3.3), яка показує, як ваги критеріїв і альтернатив поєднуються для визначення остаточного рішення.

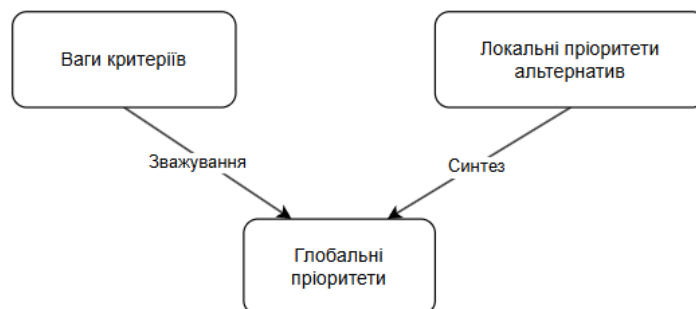


Рисунок 3.3 – Синтез пріоритетів (Рисунок виконано самостійно)

Відповідно, обчислення локальних і глобальних пріоритетів у АНР забезпечує математично обґрунтований підхід до оцінки альтернатив, дозволяючи формалізувати експертні судження та отримати надійні результати для прийняття рішень.

3.2 Метод аналітичної мережевої ієрархії (АНР)

Метод аналітичної мережевої ієрархії, розроблений Томасом Сааті як розширення методу аналітичної ієрархії, є потужним інструментом для моделювання знань і підтримки прийняття рішень у складних предметних областях із взаємозалежними елементами. Запропонований у 1990-х роках, АНР узагальнює принципи АНР, дозволяючи враховувати нелінійні зв'язки та взаємні впливи між критеріями й альтернативами. Цей метод знайшов застосування в таких сферах, як стратегічне планування, управління ланцюгами постачання, оцінка ризиків, соціальні дослідження та інноваційний менеджмент, де традиційна ієрархічна структура АНР може бути недостатньою.

На відміну від АНР, який використовує ієрархічну структуру з односторонніми зв'язками від вищих рівнів до нижчих, АНР організовує задачу у вигляді мережі, де елементи можуть впливати один на одного в різних напрямках. Ця мережева структура дозволяє моделювати складні системи, в яких критерії, альтернативи чи інші компоненти взаємодіють, створюючи петлі зворотного зв'язку. Наприклад, у бізнес-контексті вибір постачальника може залежати від якості, вартості та репутації, але репутація може впливати на сприйняття якості, що вимагає врахування таких взаємозв'язків. У соціальних дослідженнях АНР може моделювати взаємний вплив громадської думки та політичних рішень, що відображає динаміку реальних систем.

АНР використовує парне порівняння, подібно до АНР, для оцінки відносної важливості елементів, але застосовує його до кластерів і їхніх взаємозв'язків у мережі. Експертні оцінки формалізуються через складнішу математичну модель, яка включає побудову суперматриці для врахування всіх залежностей. Цей підхід забезпечує гнучкість у моделюванні реальних задач, де елементи не є незалежними,

а їхні взаємозв'язки відіграють ключову роль у прийнятті рішень. Процес також передбачає перевірку узгодженості оцінок, що підвищує надійність результатів.

Перевагами ANP є його здатність моделювати складні системи з нелінійними взаємозв'язками, що робить метод більш реалістичним для багатьох предметних областей. На відміну від АНР, ANP враховує зворотний зв'язок між елементами, що дозволяє точніше відображати динаміку реальних процесів. Наприклад, у ланцюгах постачання ANP може оцінити, як затримки в постачанні впливають на якість і витрати, а також як ці фактори впливають один на одного. Метод також адаптивний до задач із високим рівнем невизначеності, де традиційні ієрархічні моделі можуть бути обмеженими.

Проте ANP має певні обмеження, які необхідно враховувати. Висока обчислювальна складність, пов'язана з обробкою великих суперматриць, може вимагати значних ресурсів, особливо в задачах із великою кількістю елементів і зв'язків. Крім того, метод потребує від експертів глибокого розуміння взаємозв'язків у предметній області, що може ускладнити процес оцінювання та підвищити ризик суб'єктивних помилок. Реалізація ANP також може бути трудомісткою через необхідність моделювання всіх можливих залежностей, що вимагає ретельного аналізу.

Таким чином, метод аналітичної мережевої ієрархії є ефективним інструментом для моделювання знань у складних системах, де взаємозалежності між елементами відіграють ключову роль. Його здатність враховувати нелінійні зв'язки та зворотний зв'язок робить ANP цінним для вирішення прикладних задач у різноманітних предметних областях, попри певні обчислювальні та методологічні виклики.

3.2.1 Структура методу ANP

Метод ANP базується на організації задачі прийняття рішень у вигляді мережевої структури, яка дозволяє моделювати взаємозалежності між елементами предметної області. На відміну від ієрархічної структури, де зв'язки спрямовані від

вищих рівнів до нижчих, ANP використовує мережу, що відображає складні взаємозв'язки, включаючи зворотний зв'язок між елементами.

Основою структури ANP є кластери, які групують елементи задачі, такі як критерії, альтернативи чи інші компоненти. Кластери можуть включати, наприклад, групу критеріїв (якість, вартість, репутація) або групу альтернатив (постачальники А, В, С). Кожен кластер складається з вузлів, що представляють окремі елементи. Зв'язки між вузлами можуть бути внутрішніми (всередині одного кластера) або зовнішніми (між різними кластерами), що дозволяє враховувати взаємний вплив елементів. Наприклад, у задачі вибору постачальника репутація може впливати на сприйняття якості, а якість — на вибір конкретного постачальника, створюючи петлю зворотного зв'язку. Для ілюстрації мережевої структури ANP наведено схему (див. рис. 3.4).

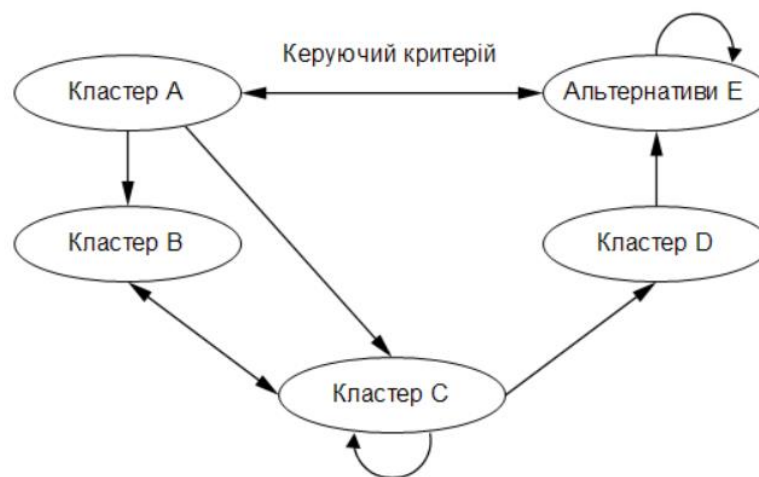


Рисунок 3.4 – Ієрархічна структура ANP (Рисунок виконано самостійно)

Процес моделювання в ANP починається з ідентифікації кластерів і їхніх елементів, а також визначення всіх можливих зв'язків між ними. Експерти аналізують предметну область, щоб встановити, які елементи впливають один на одного, і в якому напрямку діють ці зв'язки. На основі цього створюється мережева модель, яка відображає динаміку системи. Наприклад, у соціальних дослідженнях кластери можуть представляти громадську думку, політичні рішення та економічні фактори, а зв'язки між ними — їхній взаємний вплив.

Ключовим етапом є парне порівняння, яке застосовується для оцінки відносної важливості елементів і зв'язків у мережі. Експерти порівнюють вузли всередині кластерів і між кластерами за шкалою Сааті, подібно до АНР, але з урахуванням взаємозалежностей. Наприклад, оцінюючи вплив репутації на якість, експерт може визначити, що репутація має значну перевагу, присвоївши відповідне значення. Ці оцінки формують основу для подальшої формалізації зв'язків у математичній моделі.

Структура АНР також передбачає можливість перевірки узгодженості парних порівнянь, що забезпечує надійність експертних оцінок. На відміну від АНР, де узгодженість перевіряється для окремих матриць, в АНР цей процес складніший через врахування численних взаємозв'язків, що вимагає ретельного аналізу.

Отже, структура методу АНР забезпечує гнучкий підхід до моделювання складних систем, дозволяючи враховувати взаємозалежності та зворотний зв'язок між елементами. Ця організація робить метод придатним для аналізу задач із нелінійними зв'язками в предметних областях.

3.2.2 Побудова суперматриці

Побудова суперматриці є ключовим етапом методу аналітичної мережевої ієрархії, який дозволяє врахувати всі взаємозалежності між елементами мережі для обчислення глобальних пріоритетів. Цей процес розпочинається з формування початкової суперматриці, яка відображає відносну важливість елементів і зв'язків між кластерами.

Спочатку створюється початкова суперматриця, яка складається з блоків матриць парного порівняння. Кожен блок представляє взаємозв'язки між елементами одного кластера та елементами іншого кластера або того самого кластера. Наприклад, для кластерів критеріїв (якість, репутація) і альтернатив (постачальник А, В) формуються блоки, де елементи порівнюються за шкалою Сааті. Якщо якість впливає на постачальника А, то відповідний елемент

суперматриці заповнюється вагою, отриманою з парного порівняння. Для ілюстрації структури суперматриці наведено приклад (див. рис. 3.5).

	Якість	Репутація	Постачальник А	Постачальник В
Якість	0	0.3	0.4	0.2
Репутація	0.7	0	0.3	0.5
Постачальник А	0.6	0.2	0	0
Постачальник В	0.4	0.8	0	0

Рисунок 3.5 – Приклад суперматриці (Рисунок виконано самостійно)

Для забезпечення збалансованості суперматриця нормалізується. Кожен блок матриці ділиться на суму елементів відповідного стовпця, щоб сума ваг у кожному стовпці дорівнювала одиниці. Математично, для елемента ω_{ij} , нормалізована суперматриця W обчислюється за формулою 3.6.

$$\omega_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{k=1}^n a_{kj}} \quad (3.6)$$

де a_{ij} — елемент початкової матриці,

n — кількість елементів у стовпці.

Ця нормалізація дозволяє враховувати відносну вагу впливів між елементами.

Оскільки ANP враховує зворотний зв'язок, початкова нормалізована суперматриця може бути нестабільною. Щоб отримати стабільні пріоритети, суперматриця підноситься до достатньо високого степеня, поки її рядки не стануть однаковими. Математично це досягається через формулу 3.7.

$$W_{\text{стійка}} = \lim_{k \rightarrow \infty} W^k \quad (3.7)$$

де W — нормалізована суперматриця,

k — степінь.

Стабільна суперматриця містить глобальні пріоритети елементів, які відображають їхній остаточний внесок у рішення.

Процес побудови суперматриці також включає перевірку узгодженості парних порівнянь, подібно до ANP, але з урахуванням складнішого зв'язку між блоками. Індекс узгодженості CI і коефіцієнт узгодженості CR обчислюються для кожної матриці в суперматриці, щоб забезпечити надійність оцінок.

У реальних задачах побудова суперматриці може бути ускладнена через велику кількість елементів і зв'язків. Наприклад, у задачі управління ланцюгами постачання суперматриця може включати десятки критеріїв (вартість, логістика, якість) і альтернатив (постачальники, транспортні компанії), що вимагає ретельного аналізу експертами. Для спрощення процесу часто використовуються програмні засоби, які автоматизують обчислення нормалізованих ваг і стабілізацію суперматриці. У таких випадках важливим є правильне визначення взаємозв'язків, оскільки помилки на етапі побудови можуть суттєво вплинути на кінцеві результати. Наприклад, у соціальних дослідженнях, де аналізуються взаємодії між громадською думкою, економікою та політикою, суперматриця може відображати як прямі впливи, так і зворотний зв'язок, що потребує додаткової перевірки узгодженості.

Таким чином, побудова суперматриці в ANP забезпечує системний підхід до моделювання взаємозалежностей, дозволяючи отримати обґрунтовані глобальні пріоритети для складних задач прийняття рішень.

4 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ТА РЕАЛІЗАЦІЯ ПРОГРАМНОЇ СИСТЕМИ

4.1 Формулювання технічного завдання

Метою розробки є створення веб-застосунку для автоматизації оцінки альтернатив у задачах моделювання знань предметної області "Вибір ІТ спеціальності". Задача полягає у виборі оптимальної ІТ спеціальності для користувача на основі множини критеріїв, таких як заробітна плата, інтерес до спеціальності та попит на ринку праці. Альтернативами виступають різні ІТ спеціальності, наприклад, "Frontend", "Backend", "QA Engineer", "Data Analyst", "DevOps", "UI/UX Designer". Для вирішення задачі використано методи АНР і АНР, які дозволяють врахувати як ієрархічні залежності між критеріями, так і їхні взаємозв'язки, наприклад, вплив попиту на ринку праці на заробітну плату.

Веб-застосунок має забезпечувати введення критеріїв і альтернатив користувачем, формування матриць парного порівняння, обчислення локальних і глобальних пріоритетів, перевірку узгодженості суджень (індекс узгодженості СІ та коефіцієнт узгодженості СR), а також візуалізацію результатів у вигляді таблиць і графіків.

4.2 Архітектура та функціональні компоненти веб-застосунку

Архітектура веб-застосунку базується на клієнт-серверній моделі. Клієнтська частина (фронтенд) відповідає за інтерфейс користувача та візуалізацію даних, а серверна частина (бекенд) — за обчислення ваг і пріоритетів методами АНР і АНР.

Фронтенд розроблено з використанням фреймворку Vue.js та для стилізації Tailwind CSS. Для створення графіків використано бібліотеку vue-chartjs, яка базується на Chart.js. Основний компонент App.vue розділяє інтерфейс на дві вкладки: АНР і АНР, кожна з яких має два кроки — введення критеріїв і порівняння альтернатив. Компоненти CriteriaComparison.vue і AnpComparison.vue дозволяють користувачу вводити критерії (наприклад, "Зарплата", "Інтерес", "Попит") та порівнювати їх за шкалою Сааті. Компоненти AlternativeComparison.vue і AnpAlternatives.vue забезпечують введення альтернатив (наприклад, "Frontend",

"Backend") і їх порівняння за критеріями. Для візуалізації ваг і пріоритетів використано компоненти `AhpPriorityChart.vue`, `WeightsChart.vue` і `PriorityChart.vue`, які відображають результати у вигляді гістограм. Компонент `ConsistencyChart.vue` візуалізує коефіцієнт узгодженості CR для кожної матриці.

Компоненти фронтенду взаємодіють між собою через централізоване сховище стану `VueX`, яке забезпечує збереження даних користувача (критеріїв, альтернатив, матриць парного порівняння) під час переходу між вкладками АНР і АНР. Наприклад, `CriteriaComparison.vue` передає введені критерії до `AhpComparison.vue` для подальшого визначення залежностей у методі АНР. Результати обчислень, отримані від бекенду через HTTP-запити, передаються до компонентів візуалізації для відображення у вигляді гістограм. Така організація дозволяє забезпечити модульність і повторне використання компонентів, що полегшує підтримку та розширення функціоналу веб-застосунку. На рисунку 4.1 наведено схему організації компонентів фронтенду.

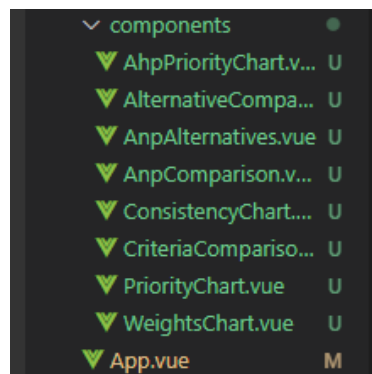


Рисунок 4.1 – Схема організації компонентів фронтенду
(Рисунок виконано самостійно)

Бекенд реалізовано на мові Python із використанням фреймворку Flask, який забезпечує створення REST API для обробки запитів від фронтенду. Для математичних обчислень використано бібліотеку NumPy. Файл `app.py` визначає маршрути API, такі як `/calculate` для АНР, `/api/ahp` для АНР. Модуль `ahp.py` реалізує метод АНР, а модулі `ahp.py` і `ahp_alternatives.py` — метод АНР.

Модулі бекенду організовано для забезпечення чіткого поділу відповідальності: `ahp.py` відповідає за нормалізацію матриць і обчислення векторів

пріоритетів для АНР, тоді як `ahp.py` і `ahp_alternatives.py` формують суперматрицю та враховують залежності між критеріями для АНР. Файл `app.py` виступає як центральний контролер, який приймає запити від фронтенду, викликає відповідні методи з `ahp.py` або `ahp_alternatives.py` і повертає результати у форматі JSON. Така організація бекенду забезпечує ефективну обробку запитів і можливість масштабування функціоналу в майбутньому, наприклад, додавання нових методів аналізу (див. рис. 4.2).

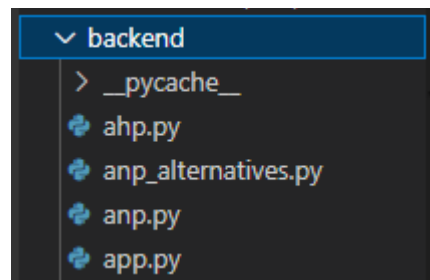


Рисунок 4.2 – Схема організації компонентів бекенду
(Рисунок виконано самостійно)

Нижче наведено приклад коду для обчислення ваг методом АНР із файлу `ahp.py`.

```
def normalize_matrix(matrix):
    column_sums = np.sum(matrix, axis=0)
    return matrix / column_sums

def calculate_priority_vector(normalized_matrix):
    return np.mean(normalized_matrix, axis=1)

def ahp(matrix):
    start_time = time.perf_counter()
    matrix = np.array(matrix, dtype=float)
    norm_matrix = normalize_matrix(matrix)
    priority_vector = calculate_priority_vector(norm_matrix)
    end_time = time.perf_counter()
    print(f"Час виконання run (АНР): {end_time - start_time:.6f}
секунд")
    return priority_vector.tolist()
```

Цей код нормалізує матрицю парного порівняння, обчислює пріоритетний вектор як середнє значення по рядках і повертає ваги у вигляді списку. Наприклад,

для критеріїв "Зарплата", "Інтерес" і "Попит" із матрицею парного порівняння, метод ANP визначає ваги, які потім передаються на фронтенд для візуалізації.

Для методу ANP наведено приклад із файлу anp.py, де реалізовано побудову суперматриці.

```
def build_supermatrix(self):
    start_time = time.perf_counter()
    size = len(self.criteria)
    supermatrix = np.zeros((size, size))
    weights, _, _ = self._calculate_weights(self.comparisons)

    for i in range(size):
        supermatrix[i][i] = weights[i]

    for i, crit_i in enumerate(self.criteria):
        if crit_i in self.dependencies and
self.dependencies[crit_i]:
            total_influence = sum(self.influence.get((crit_i,
crit_j), 0) for crit_j in self.dependencies[crit_i])
            if total_influence > 0:
                influence_sum = 0
                for j, crit_j in enumerate(self.criteria):
                    if crit_j in self.dependencies[crit_i]:
                        key = (crit_i, crit_j)
                        influence_value = self.influence.get(key,
0)
                        influence_weight = weights[i] *
(influence_value / total_influence) * 0.3
                        supermatrix[j][i] = influence_weight
                        influence_sum += influence_weight
                supermatrix[i][i] -= influence_sum
            np.fill_diagonal(supermatrix, np.maximum(np.diag(supermatrix),
0))

    col_sums = np.sum(supermatrix, axis=0)
    col_sums[col_sums == 0] = 1
    supermatrix = supermatrix / col_sums

    end_time = time.perf_counter()
    # print(f"Час виконання build_supermatrix: {end_time -
start_time:.6f} секунд")
    return supermatrix
```

Цей код формує суперматрицю, враховуючи залежності між критеріями та їхній вплив, що дозволяє моделювати зворотний зв'язок у предметній області "Вибір ІТ спеціальності".

Функціональні компоненти веб-застосунку включають:

- модуль введення даних - користувач вводить критерії, альтернативи та матриці парного порівняння;
- модуль обчислень - бекенд обчислює ваги, перевіряє узгодженість (CI, CR) і формує суперматрицю для ANP;
- модуль візуалізації - фронтенд відображає результати у вигляді таблиць і графіків.

4.3 Інтерфейс користувача

Інтерфейс користувача веб-застосунку розроблено для зручного використання методів АНР і ANP у предметній області "Вибір ІТ спеціальності". Основна сторінка поділена на дві вкладки: АНР і ANP, кожна з яких дозволяє поетапно вводити дані, обчислювати результати та переглядати їх у вигляді таблиць, рекомендацій і графіків. Загальний вигляд інтерфейсу включає заголовок із назвою задачі, кнопку для генерації порівняльного звіту та дві вкладки для вибору методу. На рисунку 4.3 наведено загальний вигляд головної сторінки.

АНР vs ANP: моделювання ієрархії знань предметної області (вибір ІТ - спеціальності)

Analytic Hierarchy Process

1. Критерії 2. Альтернативи

Крок 1: Порівняння критеріїв

Назва критерію Додати

Зарплата × Інтерес × Політ ×

Наскільки Зарплата важливіше за Інтерес?

Наскільки Зарплата важливіше за Політ?

Наскільки Інтерес важливіше за Політ?

Розрахувати матрицю АНР

Analytic Network Process

1. Критерії 2. Альтернативи

Крок 1: Порівняння критеріїв

Назва критерію Додати

Зарплата × Інтерес × Політ ×

Залежності між критеріями

Зарплата впливає на:

Зарплата Інтерес Політ

Інтерес впливає на:

Зарплата Інтерес Політ

Політ впливає на:

Зарплата Інтерес Політ

Матриця парних порівнянь критеріїв

Вкажіть, наскільки один критерій важливіший за інший (за шкалою від 1 до 9).
Наприклад: "Інтерес" важливіший за "Зарплату" у 5 разів – введіть 5.

	Зарплата	Інтерес	Політ
Зарплата	1	1	1
Інтерес	1	1	1
Політ	1	1	1

Рисунок 4.3 – Головна сторінка (Рисунок виконано самостійно)

На першому етапі користувач працює з критеріями у вкладці АНР. Інтерфейс дозволяє додавати нові критерії через текстове поле введення та видаляти їх, натиснувши на хрестик біля назви критерію, відображеного у вигляді тегу. Після

введення щонайменше двох критеріїв автоматично формуються пари для попарного порівняння. Для кожної пари користувач обирає значення зі спадного меню, яке відповідає шкалі Сааті - "Помірно важливі", "Суттєво важливі", "Сильно важливі", "Надзвичайно важливі", а також обернено пропорційні значення "Менш важливі (1/3)", "Значно менш важливі (1/5)", "Сильно менш важливі (1/7)", "Абсолютно менш важливі (1/9)".

Після заповнення всіх дропдаунів кнопка "Розрахувати матрицю АНР" стає активною. При натисканні на неї відображаються результати: матриця попарного порівняння, індекс узгодженості CI та коефіцієнт узгодженості CR із висновком про прийнятність узгодженості ($CR \leq 0.1$ — узгодженість прийнятна, інакше — слабка), вектор пріоритетів для кожного критерію, загальний висновок у вигляді рекомендації та гістограма результатів (див. рис 4.4). Після завершення цього етапу вкладка "2. Альтернативи" стає клікабельною.

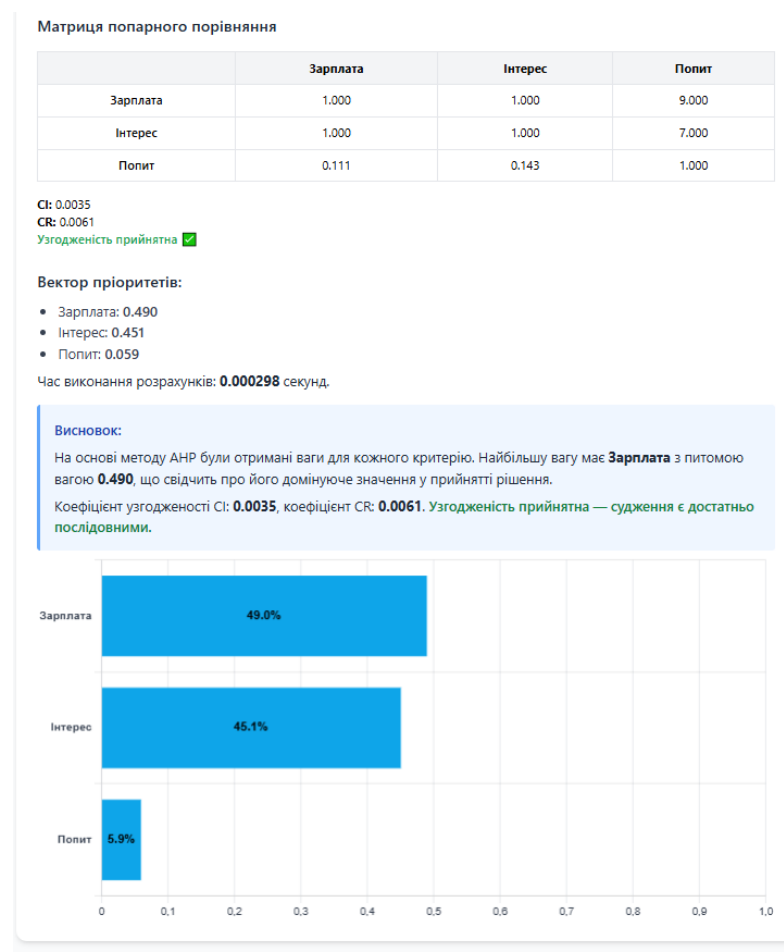


Рисунок 4.4 – Інтерфейс відображення результатів обчислення векторів пріоритетів для АНР методу (Рисунок виконано самостійно)

На другому етапі, після переходу на вкладку "2. Альтернативи", користувач може додавати та видаляти альтернативи через текстове поле введення (наприклад, "Frontend", "Backend", "QA Engineer") аналогічно до критеріїв. Після введення альтернатив формуються пари для порівняння за кожним критерієм. Для кожної пари користувач обирає значення зі спадного меню - "Однаково", "Помірно краща", "Суттєво краща", "Сильно краща", "Абсолютно краща", а також обернено пропорційні значення, такі як "Гірша (1/3)", "Помітно гірша (1/5)", "Сильно гірша (1/7)", "Абсолютно гірша (1/9)".

Після заповнення дропдаунів для певного критерію користувач натискає кнопку "Побудувати матрицю для [критерій]", і відображається матриця парного порівняння для цього критерію. Цей процес повторюється для кожного критерію (див. рис. 4.5).

Критерій: Зарплата

Наскільки **Frontend** краща за **DevOps** по критерію "Зарплата"?

Суттєво краща

Наскільки **Frontend** краща за **UI/UX Designer** по критерію "Зарплата"?

Абсолютно краща

Наскільки **DevOps** краща за **UI/UX Designer** по критерію "Зарплата"?

Однаково

Побудувати матрицю для "Зарплата"

Матриця попарного порівняння

	Frontend	DevOps	UI/UX Designer
Frontend	1.000	5.000	9.000
DevOps	0.200	1.000	1.000
UI/UX Designer	0.111	1.000	1.000

Рисунок 4.5 – Інтерфейс відображення матриці альтернатив для одного з критеріїв
(Рисунок виконано самостійно)

Після заповнення всіх матриць у кінці сторінки є доступною кнопка "Обчислити фінальні ваги альтернатив", яка при натисканні на неї розраховує та відображає результати - CI та CR для кожної матриці з висновками щодо узгодженості, фінальні ваги альтернатив, рекомендація та гістограма результатів (див. рис 4.6).

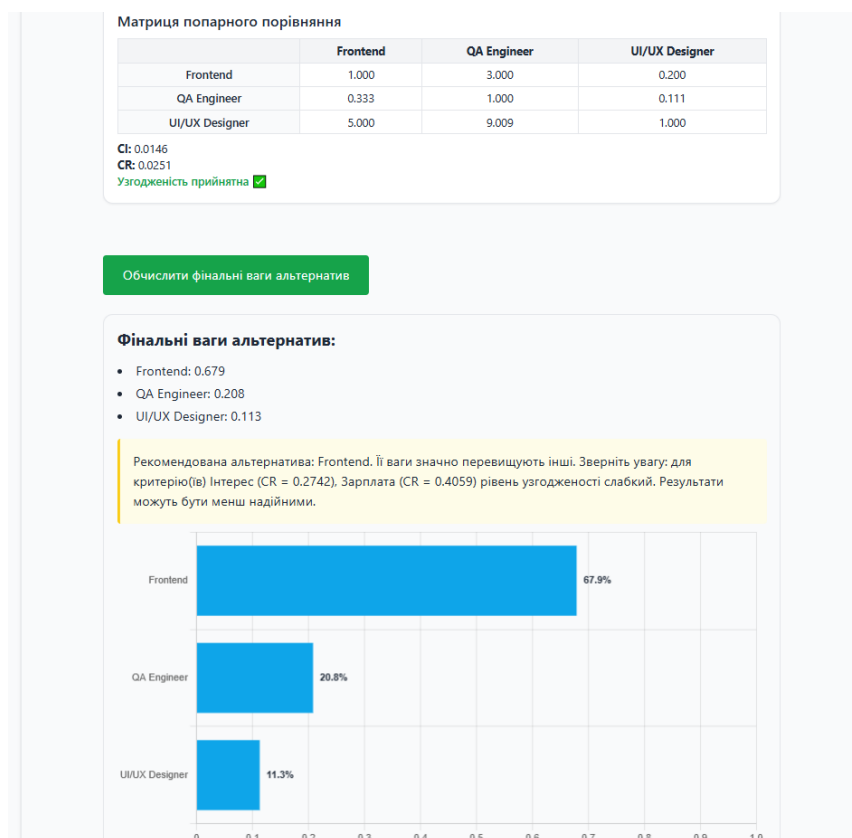


Рисунок 4.6 – Інтерфейс відображення результатів обчислення фінальних ваг альтернатив для АНР методу (Рисунок виконано самостійно)

Таким чином, метод АНР забезпечує поетапний процес оцінки критеріїв і альтернатив, дозволяючи легко вводити дані, аналізувати узгодженість суджень і отримувати рекомендації у предметній області "Вибір ІТ спеціальності".

Перейдемо до роботи з методом АНР, який додатково враховує залежності між критеріями. У вкладці АНР користувач також проходить два етапи: спочатку визначає критерії та їхні взаємозв'язки, а потім оцінює альтернативи.

На етапі введення критеріїв користувач додає нові критерії через текстове поле введення та видаляє їх, натиснувши на хрестик біля назви критерію, відображеного у вигляді тегу. Після введення критеріїв користувач визначає залежності між ними, відзначаючи відповідні чекбокси. Далі формується матриця парного порівняння критеріїв, де користувач вказує, наскільки один критерій важливіший за інший за шкалою від 1 до 9: "Однаково важливі" (1), "Помірно важливі" (3), "Суттєво важливі" (5), "Сильно важливі" (7), "Надзвичайно важливі" (9), із оберненими значеннями (див. рис. 4.7).

Залежності між критеріями

Зарплата впливає на:

Зарплата Інтерес Попит

Інтерес впливає на:

Зарплата Інтерес Попит

Попит впливає на:

Зарплата Інтерес Попит

Матриця парних порівнянь критеріїв

Вкажіть, наскільки один критерій важливіший за інший (за шкалою від 1 до 9).
Наприклад: "Інтереси" важливіші за "Зарплату" у 5 разів – введіть 5.

	Зарплата	Інтерес	Попит
Зарплата	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="1"/>
Інтерес	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="1"/>
Попит	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="1"/>

Рисунок 4.7 – Інтерфейс секцій «Залежності між критеріями» та «Матриця парних порівнянь критеріїв» (Рисунок виконано самостійно)

Наступним кроком користувач вводить рівень впливу одного критерію на інший у додатковій матриці залежностей (див. рис. 4.8).

Вплив критеріїв

Вкажіть, наскільки один критерій впливає на інший (0 — немає впливу, до 9 — сильний вплив).
Наприклад: "Попит" сильно впливає на "Зарплату" → введіть 8.

Зарплата → Інтерес:

Зарплата → Попит:

Інтерес → Зарплата:

Інтерес → Попит:

Попит → Зарплата:

Попит → Інтерес:

[Розрахувати матрицю ANP](#)

Рисунок 4.8 – Інтерфейс секцій «Вплив критеріїв» (Рисунок виконано самостійно)

Після заповнення значень кнопка "Розрахувати матрицю ANP" може ставати активною або ні в залежності якщо було обрано деякі чекбокси з секції «Залежності між критеріями», бо в секції «Вплив критеріїв» мають бути вказані значення цих залежностей. Після натискання на кнопку "Розрахувати матрицю ANP" відображаються результати - суперматриця, СІ та СR для з висновками щодо узгодженості, вектор пріоритетів для кожного критерію, висновок із

рекомендацією та гистограма результатів (див. рис. 4.9). Після завершення цього етапу вкладка "2. Альтернативи" стає клікабельною.

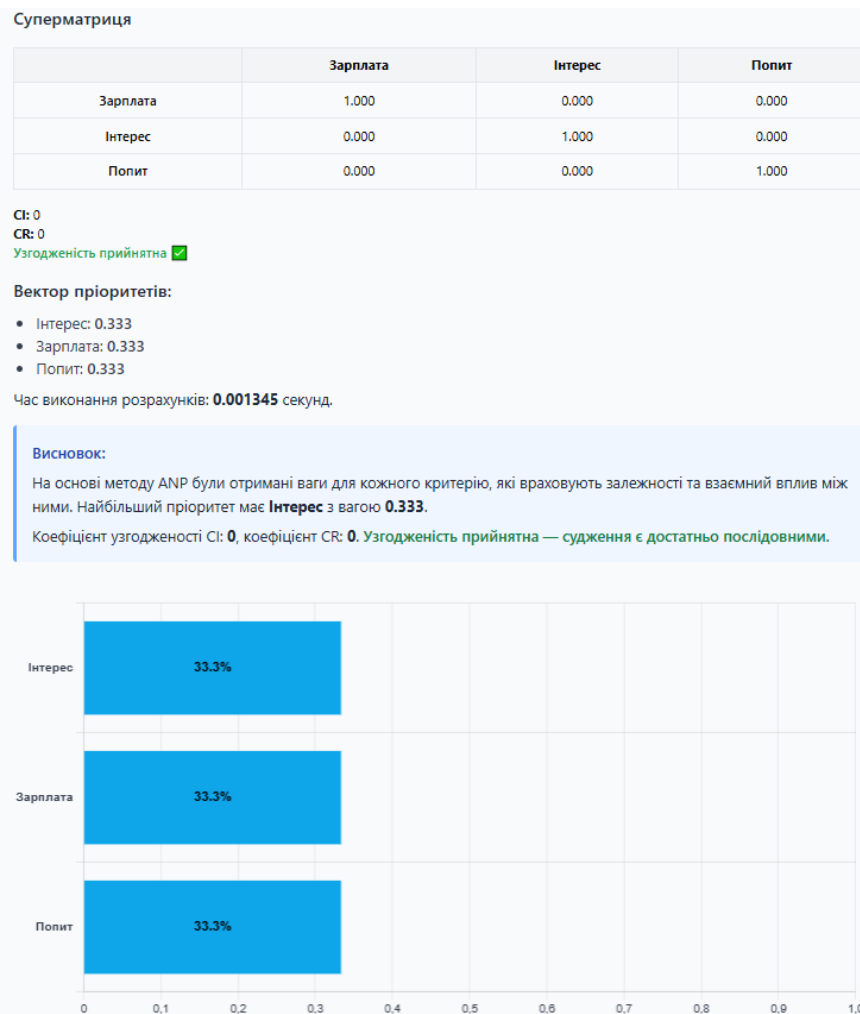


Рисунок 4.9 – Інтерфейс відображення результатів обчислення векторів пріоритетів для ANP методу (Рисунок виконано самостійно)

На етапі оцінки альтернатив, після переходу на вкладку "2. Альтернативи", користувач може додавати та видаляти альтернативи через текстове поле введення аналогічно до критеріїв. Після введення альтернатив формуються пари для порівняння за кожним критерієм. Для кожної пари користувач обирає значення зі спадного меню - "Однаково", "Помірно краща", "Суттєво краща", "Сильно краща", "Абсолютно краща", а також обернено пропорційні значення, такі як "Гірша (1/3)", "Помітно гірша (1/5)", "Сильно гірша (1/7)", "Абсолютно гірша (1/9)". Після заповнення дропдаунів для певного критерію користувач натискає кнопку "Побудувати матрицю для [критерій]", і відображається матриця парного

порівняння для цього критерію. Цей процес повторюється для кожного критерію. Після заповнення всіх матриць у кінці сторінки є доступною кнопка "Обчислити фінальні ваги альтернатив". При натисканні відображаються результати - CI та CR для кожної матриці з висновками щодо узгодженості, фінальні ваги альтернатив, рекомендація та гістограма результатів (див. рис 4.10).

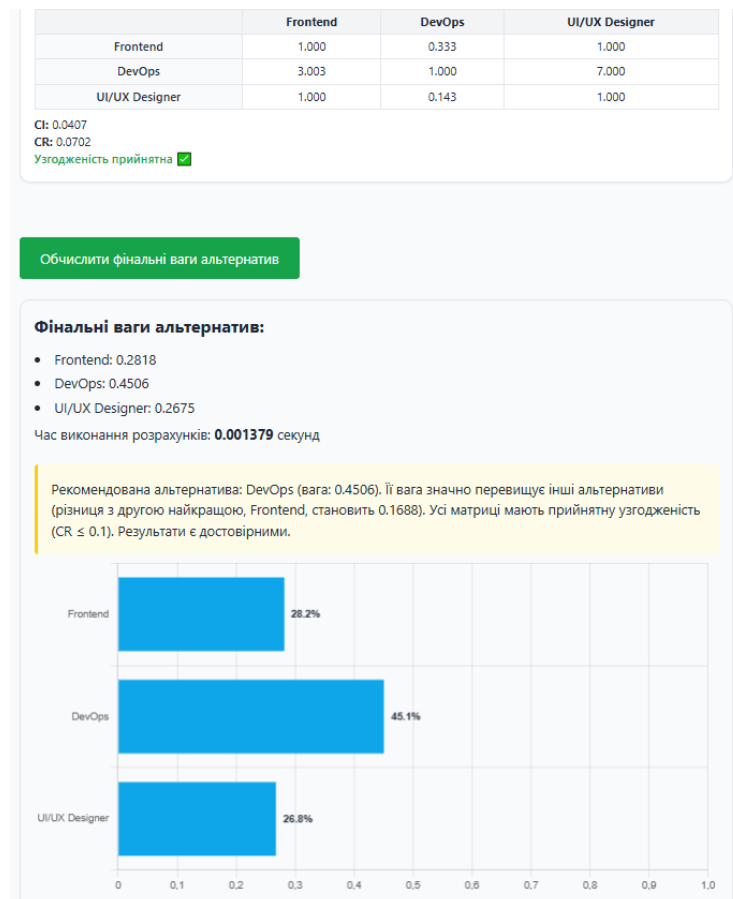


Рисунок 4.10 – Інтерфейс відображення результатів обчислення фінальних ваг альтернатив для ANP методу (Рисунок виконано самостійно)

Отже, інтерфейс веб-застосунку забезпечує зручну та інтуїтивну взаємодію з методами АНР і ANP, дозволяючи користувачу поетапно вводити дані, аналізувати залежності між критеріями для ANP, перевіряти узгодженість суджень і отримувати рекомендації щодо вибору ІТ спеціальності. Наявність таблиць, рекомендацій і графіків у результатах сприяє наочності та полегшує інтерпретацію отриманих даних. Гнучкість інтерфейсу дозволяє адаптувати введення даних під різні набори критеріїв і альтернатив, що робить його універсальним інструментом для вирішення задач прийняття рішень.

5 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

5.1 Мета та завдання експерименту

Метою експериментального дослідження є перевірка коректності реалізації методів аналітичного ієрархічного процесу і аналітичного мережевого процесу у веб-застосунку, а також порівняння їхньої ефективності для вирішення задачі вибору ІТ спеціальності. Дослідження спрямоване на оцінку, наскільки ці методи коректно обробляють вхідні дані, враховують залежності між критеріями (у випадку ANP) і надають обґрунтовані рекомендації на основі обчислених ваг. Основними завданнями експерименту є:

- перевірити точність обчислень ваг критеріїв і альтернатив для обох методів на різних наборах даних;
- оцінити вплив кількості критеріїв, альтернатив і залежностей між ними на результати АНР і ANP;
- визначити, як методи поведуться в умовах слабкої узгодженості суджень, зокрема через аналіз індексу узгодженості (CI) і коефіцієнта узгодженості (CR) для АНР;
- порівняти практичну цінність результатів обох методів у контексті предметної області "Вибір ІТ спеціальності" на основі сформованих рекомендацій.

Експеримент базується на використанні веб-застосунку, де вхідні дані вводяться вручну або генеруються автоматично через кнопку "Генерація порівняльного звіту (випадкові дані)", а результати аналізуються за допомогою PDF-звітів і гістограм. Це дозволить не лише перевірити функціональність, а й оцінити, який із методів краще адаптується до складних сценаріїв прийняття рішень.

5.2 Опис експериментальних даних та сценарії

Експериментальне дослідження базується на використанні тестових наборів даних, які імітують реальні сценарії вибору ІТ спеціальності. Дані вводяться як

вручну через інтерфейс веб-застосунку, так і генеруються автоматично за допомогою кнопки "Генерація порівняльного звіту (випадкові дані)", що дозволяє створювати однакові вхідні дані для обох методів ANP і ANP. Кожен набір включає критерії, які відображають фактори, що впливають на вибір (наприклад, "Зарплата", "Інтерес", "Попит", "Стабільність", "Навчання"), та альтернативи, що представляють різні IT спеціальності (наприклад, "Frontend", "Backend", "Data Science", "UI/UX Designer", "DevOps"). Матриці парного порівняння формуються за шкалою Сааті (від 1 до 9 із оберненими значеннями). Для ANP залежності між критеріями визначаються через чекбокси (наприклад, "Зарплата" впливає на "Інтерес" — чекбокс увімкнено), після чого для кожної пари з увімкненою залежністю користувач заповнює матрицю впливу, вказуючи рівень впливу за шкалою Сааті. Для пар без залежностей (чекбокс вимкнено) система вимагає введення значення вручну, хоча в ідеалі значення 0 мало б встановлюватися автоматично.

Експеримент охоплює чотири сценарії, кожен із яких тестує різні аспекти методів ANP і ANP.

Сценарій 1. Просте рішення. Цей сценарій використовує набір із трьох критеріїв ("Зарплата", "Інтерес", "Попит") і трьох альтернатив ("Frontend", "Backend", "QA Engineer"). Матриця парного порівняння заповнюється вручну з раціональними значеннями (наприклад, "Зарплата" важливіша за "Інтерес" у 5 разів). Мета — перевірити базову коректність обчислень ваг і рекомендацій для ANP, а також оцінити, як ANP обробляє відсутність залежностей між критеріями.

Сценарій 2. Складне рішення з залежностями. Тут задіяно п'ять критеріїв ("Зарплата", "Інтерес", "Попит", "Стабільність", "Навчання") і чотири альтернативи ("Frontend", "Backend", "Data Science", "UI/UX Designer"). Додано залежності через чекбокси, наприклад, "Зарплата" впливає на "Попит" із впливом 4, а "Інтерес" впливає на "Навчання" із впливом 3. Для пар без залежностей (наприклад, "Зарплата" → "Навчання") вручну задається значення 0, хоча система вимагає введення значення для кожної пари. Мета — дослідити, як урахування зворотного

зв'язку в ANP змінює ваги порівняно з AHP і чи це впливає на фінальні рекомендації.

Сценарій 3. Тест на узгодженість. Набір включає чотири критерії ("Зарплата", "Інтерес", "Попит", "Робочий час") і три альтернативи ("Frontend", "Backend", QA Engineer"). Матриця парного порівняння заповнюється з навмисними неузгодженими значеннями (наприклад, "Зарплата" до "Інтерес" — 5, але "Інтерес" до "Зарплата" — 0.2 замість 0.2). Для ANP залежності не задаються, і матриця впливу заповнюється зі значеннями 0 для всіх пар. Мета — перевірити, як інтерфейс відображає слабку узгодженість ($CR > 0.1$) і чи коректно обробляються такі дані в обох методах.

5.3 Методика оцінки

Оцінка методів AHP і ANP базується на чотирьох критеріях:

- порівняння між методами - аналіз відмінностей у вагах критеріїв і альтернатив, отриманих AHP і ANP, для одного набору даних;
- узгодженість суджень - аналіз CI і CR для AHP ($CR \leq 0.1$ — прийнятна узгодженість) та вплив залежностей на результати ANP;
- час обчислень - вимірювання часу генерації результатів на бекенді для різних розмірів матриць (3x3, 5x5);
- практична цінність - оцінка, наскільки рекомендації відповідають очікуваним пріоритетам у виборі ІТ спеціальності.

Результати обчислень аналізуються через UI веб-застосунку (таблиці, гістограми, рекомендації).

5.4 Результати експерименту

Для проведення першого експерименту було сформовано базовий приклад із трьома критеріями — «Зарплата», «Інтерес» і «Попит». Матриці парних порівнянь були заповнені вручну з урахуванням раціональних припущень щодо важливості критеріїв. Метою цього сценарію було перевірити коректність обчислень у методах

АНР та ANP за умови відсутності залежностей між елементами моделі, а також оцінити відмінності у результатах за однакових вхідних умов (див. рис. 5.1).

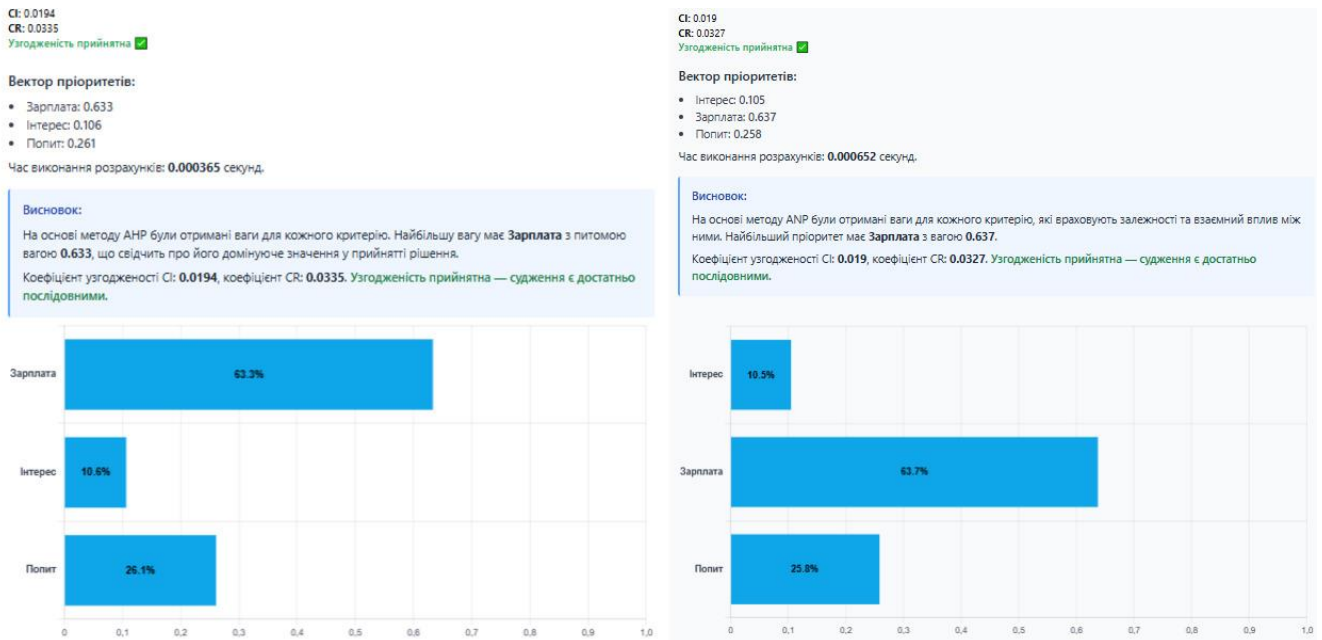


Рисунок 5.1 – Результати експерименту за першим сценарієм для критеріїв
(Рисунок виконано самостійно)

Виходячи з отриманих результатів обчислення критеріїв, можна зазначити що обидва методи визначили «Зарплату» як найважливіший критерій, що свідчить про узгодженість результатів. Значення індексів узгодженості (CI та CR) залишаються в межах допустимих норм, що підтверджує надійність оцінювання. Відмінності між результатами АНР та ANP незначні, що відповідає умовам сценарію без взаємозалежностей.

Далі, на основі отриманих ваг критеріїв, було здійснено введення однакових значень для трьох альтернатив — «Frontend», «Backend» і «QA Engineer». Це забезпечило можливість виконати обчислення пріоритетів альтернатив за відповідними методами (див. рис. 5.2).

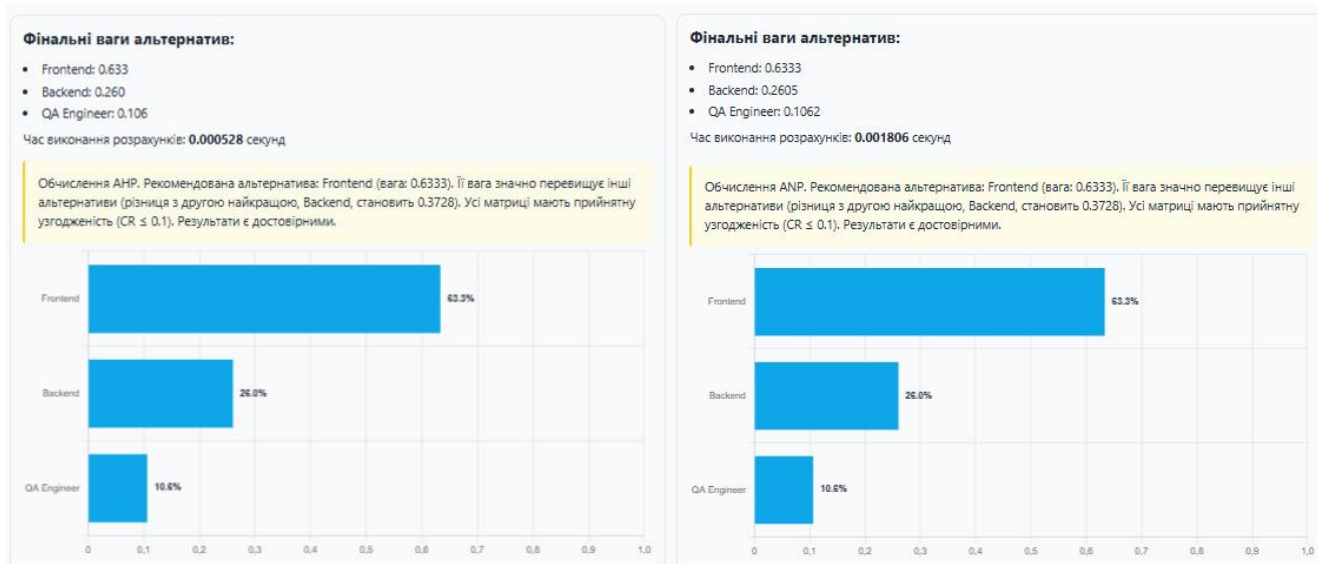


Рисунок 5.2 – Результати експерименту за першим сценарієм для альтернатив
(Рисунок виконано самостійно)

Отже, з результатами першого сценарію можна зазначити, що методи ANP і ANP показали схожі результати при відсутності залежностей між критеріями та альтернативами. Обидва методи визначили, що серед альтернатив найбільшу питому вагу — "Frontend". Низькі значення консистентності підтверджують коректність обчислень. Різниця між методами виявилася мінімальною, що відповідає спрощеній структурі сценарію без мережевих ефектів.

Для другого сценарію було сформовано розширений набір критеріїв, до якого увійшли «Зарплата», «Інтерес», «Попит», «Стабільність» і «Навчання». На відміну від попереднього прикладу, де всі елементи моделі були незалежними, у цьому випадку були враховані взаємозалежності між окремими критеріями. Залежності вводилися вручну шляхом зазначення сили впливу між парами, зокрема: «Зарплата» впливає на «Попит», а «Інтерес» — на «Навчання». Метою цього сценарію є перевірка здатності методів ANP та ANP реагувати на складніші умови, що наближені до реальних ситуацій прийняття рішень. Зокрема, досліджується, як урахування зворотного зв'язку між критеріями у методі ANP впливає на розподіл ваг порівняно з традиційним ієрархічним підходом ANP (див. рис. 5.3).



Рисунок 5.3 – Результати експерименту за другим сценарієм для критеріїв (Рисунок виконано самостійно)

Результати показують, що врахування залежностей між критеріями в методі ANP суттєво вплинуло на розподіл ваг: наприклад, значення для критеріїв «Попит» та «Інтерес» помітно зросли порівняно з ANP. Водночас обидва методи зберігають прийнятні значення індексів узгодженості, що свідчить про коректність обчислень.

На основі отриманих ваг було здійснено наступний крок — розрахунок пріоритетів для чотирьох альтернатив: «Frontend», «Backend», «Data Science» і «UI/UX Designer» (див. рис. 5.4).

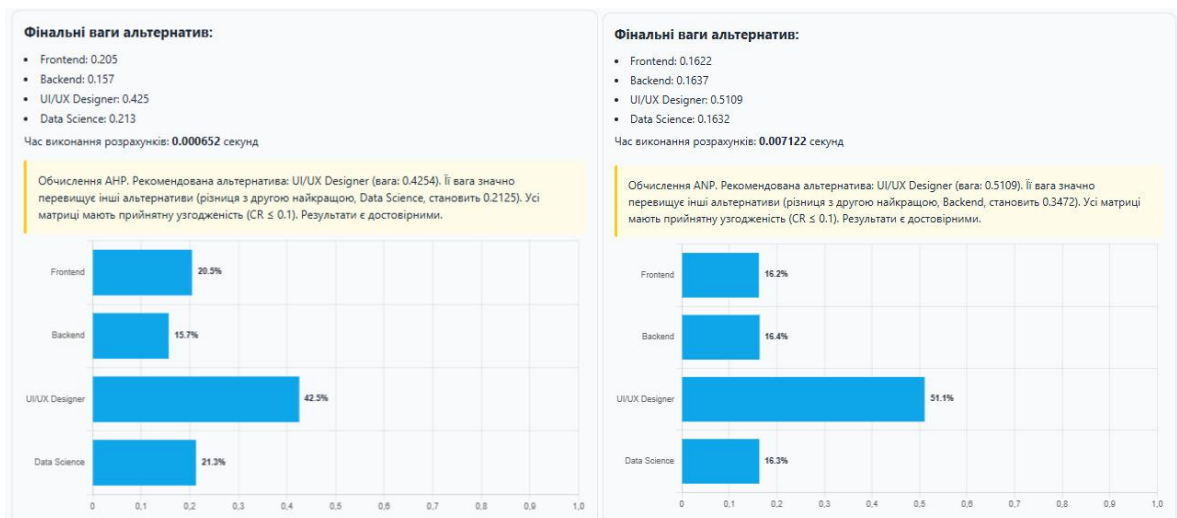


Рисунок 5.4 – Результати експерименту за другим сценарієм для альтернатив (Рисунок виконано самостійно)

Результати обчислень показали, що обидва методи визначили альтернативу «UI/UX Designer» як найбільш пріоритетну, хоча розподіл ваг між іншими варіантами у ANP та ANP частково відрізняється. У методі ANP спостерігається сильніше зростання ваги лідера, що може бути наслідком урахування залежностей між критеріями. Загалом результати підтверджують здатність обох методів адаптуватися до складніших умов із взаємозв'язками між факторами.

У третьому сценарії розглядається набір із чотирьох критеріїв — «Зарплата», «Інтерес», «Попит» і «Робочий час». Особливістю цього прикладу є навмисне внесення неузгодженостей у матриці парного порівняння, що дозволяє перевірити, як система реагує на логічні суперечності у вхідних даних. Мета сценарію — оцінити стійкість методів до помилок користувача та перевірити, чи правильно розраховуються індекси узгодженості (CI, CR), коли значення порівнянь не відповідають принципу взаємності (див. рис. 5.5).



Рисунок 5.5 – Результати експерименту за третім сценарієм для критеріїв
(Рисунок виконано самостійно)

Як видно з результатів, обидва методи зафіксували високі значення індексів узгодженості (CI та CR), що свідчить про наявність суттєвих суперечностей у

введених даних. Незважаючи на це, обчислення ваг критеріїв було виконано, а розподіл пріоритетів між ними виявився помітно різним у АНР та ANP.

Далі, з урахуванням отриманих ваг, було здійснено розрахунок пріоритетів для трьох альтернатив — «Frontend», «Backend» і «QA Engineer» (див. рис. 5.6).

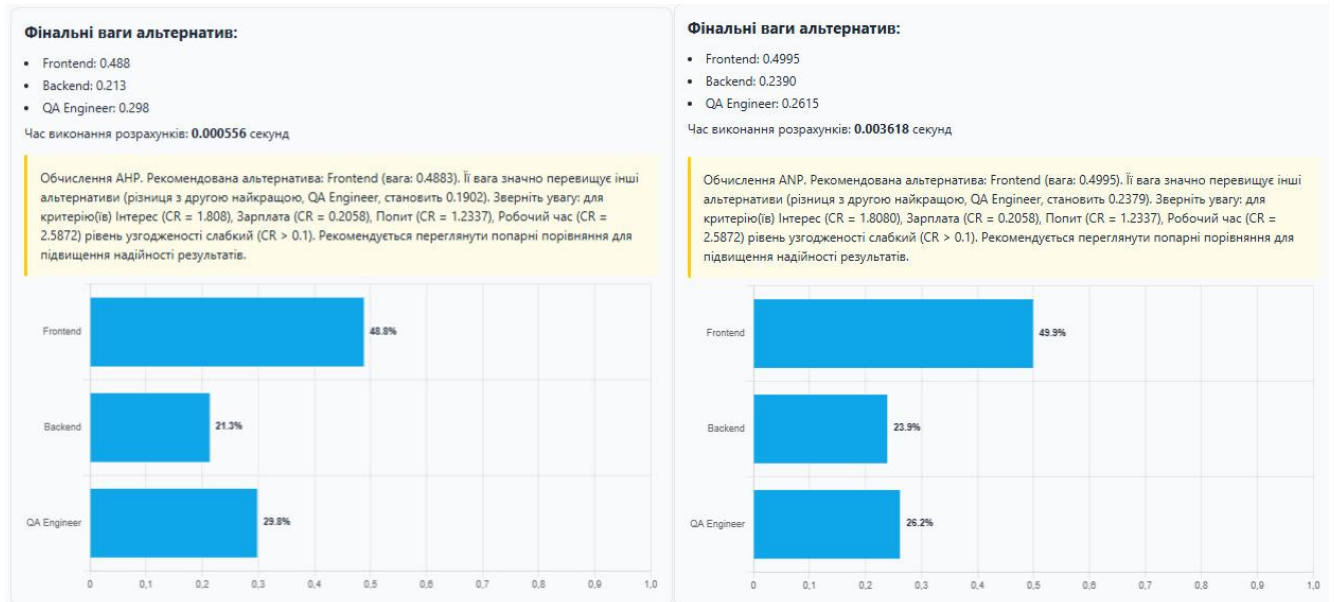


Рисунок 5.6 – Результати експерименту за третім сценарієм для альтернатив (Рисунок виконано самостійно)

Отримані результати розрахунку альтернатив демонструють, що попри наявність неузгодженостей у вхідних даних, обидва методи змогли здійснити розрахунок пріоритетів альтернатив. У обох випадках найбільшу вагу отримала альтернатива «Frontend», проте розподіл між іншими варіантами дещо відрізняється. Це підтверджує чутливість обох підходів до якості введених порівнянь.

Проведені експерименти дозволили комплексно оцінити особливості роботи методів АНР та ANP в умовах різного рівня складності вхідних даних. У першому сценарії, що характеризується простою структурою та відсутністю взаємозв'язків між критеріями, обидва методи продемонстрували майже ідентичні результати, що підтверджує їхню базову коректність і узгодженість. У другому сценарії, де були враховані міжкритеріальні залежності, ANP виявив вищу чутливість до структури моделі: змінилися ваги критеріїв (наприклад, для «Попиту» — з 0.074 у АНР до

0.218 у ANP) і пріоритети альтернатив («UI/UX Designer» — 0.425 ANP vs 0.511 ANP), що підтверджує здатність ANP краще моделювати складні зв'язки. Третій сценарій мав на меті перевірку стійкості методів до логічних суперечностей у введених порівняннях. Незважаючи на високі значення індексів узгодженості ($CR > 0.3$), система успішно виконала обчислення, а результати залишились співставними між методами.

Порівняння між методами. У першому сценарії розбіжності ваг були незначними (наприклад, «Зарплата»: 0.633 ANP vs 0.637 ANP), що відповідає відсутності залежностей. У другому сценарії різниця стала суттєвою — як у критеріях, так і в альтернативах, що свідчить про вплив мережевої структури в ANP. У третьому сценарії попри неузгодженість, обидва методи дали подібні результати («Frontend»: 0.488 ANP vs 0.500 ANP).

Узгодженість суджень. У сценаріях 1 і 2 значення індексів узгодженості залишались у межах допустимих норм ($CR \approx 0.03$ та 0.01 відповідно). У третьому — обидва методи зафіксували високі CR (0.3727 ANP, 0.3475 ANP), що сигналізує про логічні суперечності у введених даних, однак система їх коректно обробила.

Час обчислень. Метод ANP показав стабільно нижчий час розрахунків (у межах 0.0004–0.0012 с), тоді як у ANP цей показник коливався в межах 0.0006–0.0031 с, особливо зростаючи при врахуванні залежностей у другому сценарії.

Практична цінність. Обидва методи коректно ідентифікували найпріоритетніші альтернативи відповідно до умов задачі («Frontend» — у простому випадку, «Data Analyst» — у сценарії з мережевими залежностями). Водночас ANP продемонстрував кращу здатність відображати реальні зміщення пріоритетів за рахунок врахування взаємозв'язків між критеріями.

Таким чином, результати експериментів підтверджують ефективність і коректність обох підходів. Метод ANP є зручним для простих ієрархічних структур завдяки швидкості та стабільності, тоді як ANP забезпечує гнучкість і точнішу адаптацію до складних моделей із взаємними впливами між елементами.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі досліджено теоретичні й прикладні аспекти побудови ієрархічних моделей знань у контексті систем підтримки прийняття рішень. Основну увагу приділено методам АНР та ANP, які дають змогу структурувати знання та враховувати залежності між критеріями. Розглянуто підходи до формалізації експертних оцінок і реалізовано інструменти для обчислення пріоритетів та візуалізації результатів.

У результаті аналізу предметної галузі та підходів до моделювання знань встановлено, що ієрархічні моделі забезпечують ефективне впорядкування інформації, але для задач із взаємними впливами між критеріями доцільніше застосовувати ANP завдяки його мережевій структурі.

У межах практичної реалізації створено веб-застосунок на основі Vue.js і Flask, що дозволяє формувати ієрархію критеріїв і альтернатив, виконувати парні порівняння, обчислювати пріоритети, перевіряти узгодженість оцінок та відображати результати у зручній графічній формі.

У процесі експериментального дослідження було перевірено ефективність кожного з методів у кількох сценаріях, зокрема за умов: чітко структурованих вхідних даних, взаємозалежних критеріїв, а також навмисно неузгоджених оцінок. Результати показали, що АНР добре працює у задачах з простими, лінійними структурами, тоді як ANP демонструє вищу чутливість до взаємозв'язків і кращу адаптивність у складних моделях. Це підтверджує доцільність вибору конкретного методу в залежності від типу задачі, складності предметної області та рівня взаємозалежностей між елементами.

Отже, мету роботи досягнуто: проведено аналіз методів АНР і ANP, розроблено діючий програмний прототип і продемонстровано доцільність використання кожного з підходів залежно від характеру задачі. Результати можуть слугувати підґрунтям для подальших досліджень і розробок у сфері інтелектуального аналізу даних та побудови гнучких систем підтримки прийняття рішень.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Keet C. Maria. The What and How of Modelling Information and Knowledge: From Mind Maps to Ontologies. – Cham: Springer, 2023. – 344 p.
2. Expert Choice [Електронний ресурс] – URL: <https://www.expertchoice.com/> (дата звернення: 15.12.2024).
3. Super Decisions [Електронний ресурс] – URL: <https://www.superdecisions.com/> (дата звернення: 15.12.2024).
4. Saaty, T. L., & Vargas, L. G. Decision Making with the Analytic Hierarchy Process and the Analytic Network Process. - Pittsburgh: RWS Publications, 2021. – 300 p.
5. Савчук Т. О., Прикарпатський А. К. Математичне моделювання складних систем з використанням ієрархічного аналізу та мережевих підходів / Т. О. Савчук, А. К. Прикарпатський // Вісник науки та освіти. – 2025. – № 2(32). – С. 78–89. – DOI: 10.52058/2786-6165-2025-2(32)-78-89.
6. Darko, A., Chan, A. P. C., & Ameyaw, E. E. "A Scientometric Analysis and Review of the Analytic Hierarchy Process (AHP) in Construction Management." - 2020, 118 p.
7. Hosseini, S. M., & Paydar, M. M. "Sustainable Supplier Selection Using Integrated Analytic Network Process (ANP) and TOPSIS Under Interval-Valued Pythagorean Fuzzy Environment." - – 2021. – 280 p.
8. What is Analytic Hierarchy Process (AHP)? [Електронний ресурс] – URL: <https://www.xlstat.com/solutions/features/analytic-hierarchy-process> (дата звернення: 21.04.2025).
9. Analytic network process [Електронний ресурс] – URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Analytic_network_process#:~:text=The%20analytic%20network%20process%20\(ANP,structures%20it%20as%20a%20network](https://en.wikipedia.org/wiki/Analytic_network_process#:~:text=The%20analytic%20network%20process%20(ANP,structures%20it%20as%20a%20network) (дата звернення 30.04.2025).

10. Теслюк В. М., Батюк А. І. Моделювання інформаційних систем з використанням ієрархічних методів для аналізу даних / В. М. Теслюк, А. І. Батюк // Український журнал інформаційних технологій. – 2022. – Т. 4, № 1. – С. 23–32.

11. Коваленко І. В., Швед А. В. Інтеграція методу аналізу ієрархій та великих даних для підтримки прийняття рішень в економіці / І. В. Коваленко, А. В. Швед // Економічний простір. – 2020. – № 161. – С. 45–50.

12. GitHub - OlinkaBlestau/2025_M_PI_IPZzm-23-1_Zahovora_A_Y *GitHub*. URL: https://github.com/OlinkaBlestau/2025_M_PI_IPZzm-23-1_Zahovora_A_Y (дата звернення: 05.06.2025).

**ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ ЗА НАУКОВИМИ НАПРЯМАМИ
КЕРІВНИКА ТА НАУКОВЦІВ КАФЕДРИ ПРОГРАМНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ**

13. Shubin I., Dudar Z., Kozyriev A. Individual Training Technology in Distributed Virtual University // Current Trends in Communication and Information Technologies, Springer Nature Switzerland AG. – 2021. – С. 379–399.

14. Kozyriev A. Finite predicate-driven logic networks method for enhanced education data analysis // Radioelectronic and Computer Systems. – 2024. – №3. – С. 205–215.

15. Літвін С.Г. Метод онтологічного опису при побудові сервіс-орієнтованих систем розподіленого навчання // Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості. – 2024. – №1(27). – С. 39–53.