

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»  
Факультет автоматизації виробництва та цифрових технологій  
Кафедра цифрових технологій та проєктно-аналітичних рішень

«Допущено до захисту»

Гарант ОПП

Павло САГАЙДА

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня магістра

за підсумками виконання  
освітньо-професійної програми  
«Комп'ютерні науки та цифровий інтелект»  
за спеціальністю 122 Комп'ютерні науки

**на тему «Дослідження інформаційної підтримки управління  
процесами сертифікації та аналізу впровадження задач на  
підприємстві»**

Керівник роботи

Павло САГАЙДА

Консультант від  
бази практики

Денис ПІНЧУК

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

Здобувач

Ольга МИРОНЕНКО

Підсумкова оцінка за атестацію			
--------------------------------	--	--	--

Голова ЕК

Антон КУДРЯВЦЕВ

ЗАПОРІЖЖЯ 2026

**mp** metinvest  
polytechnic

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

Факультет цифрових технологій та автоматизації виробництва

Кафедра цифрових технологій та проєктно-аналітичних рішень

Ступень вищої освіти магістр

Спеціальність 122 Комп'ютерні науки

(шифр і назва)

Освітня програма Комп'ютерні науки та цифровий інтелект

(назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Гарант ОПП

\_\_\_\_\_ 2025 рік

ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Мироненко Ользі Василівні

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема роботи Дослідження інформаційної підтримки управління процесами сертифікації та аналізу впровадження задач на підприємстві

керівник роботи Сагайда Павло Іванович, доцент, докт. техн. наук,

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом Університету від 10.09.2025 р. № 239

2. Строк подання роботи 20 січня 2026

3. Вихідні дані до роботи Навчальна література, державні стандарти, методична література з спеціальних дисциплін та дипломування, науково-дослідницькі роботи з тематики автоматизації обробки й аналізу даних та методів цифрового інтелекту, літературні джерела, технологічні інструкції тощо

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань) Проаналізувати процеси збору даних про відповідність стандартам ISO 9001, 14001, 45001 та функціональність існуючих QMS/ERP систем; сформулювати мету і завдання створення інтелектуального середовища підтримки прийняття рішень у СМЯ; дослідити методи обробки текстових даних на основі LLM, RAG-архітектури та векторних баз знань; розробити ПМК «OptiCertAI» з агентною архітектурою та семантичним аналізатором (правило «4К»); апробувати результати на базі реальних розпоряджень підприємства та оцінити ефективність (точність, швидкість, економічний ефект).

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) мета і завдання дослідження; математичні моделі, методика дослідження; діаграми проєкту програмної системи в нотації UML (діаграми прецедентів, послідовностей, діяльності); результати експериментальних досліджень; результати економічних розрахунків; висновки до роботи; публікація результатів дослідження.

## 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Фаховий консультант	П.І. Сагайда, доц., докт. техн. Наук		
Нормоконтроль	О.С. Касьянюк, ст. викл.		
Економічна частина	І.А. Гетьман, доц., канд. техн. Наук		

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи
1	Уточнення змісту дипломної роботи. Вивчення загальних відомостей про процеси сертифікації ISO та методи інформаційної підтримки управління якістю на підприємстві.	
2	Проведення класифікації методів, моделей та технологій інтелектуального аналізу відповідності управлінських задач вимогам міжнародних стандартів.	
3	Дослідження архітектур RAG (Retrieval-Augmented Generation) та Agentic AI для автоматизації внутрішніх аудитів.	
4	Проектування та програмна реалізація комплексу «OptiCertAI» (модулі верифікації задач за правилом «4К» та чат-бота підтримки системи менеджменту якості).	
5	Проведення експериментальних досліджень, визначення оптимального порогу релевантності $r$ та оцінка точності класифікації.	
6	Виконання економічних розрахунків: оцінка чистого економічного ефекту та терміну окупності проєкту.	
7	Дослідження ризиків впровадження системи та розробка заходів з інформаційної безпеки (керування доступом RAG та захист контекстних даних).	
8	Оформлення пояснювальної записки, підготовка доповіді та презентації.	
9	Захист проєкту	

Здобувач вищої освіти

\_\_\_\_\_ (підпис)

Ольга МИРОНЕНКО

(власне ім'я, прізвище)

Керівник роботи, доц.,  
докт. техн. наук

\_\_\_\_\_ (підпис)

Павло САГАЙДА

(власне ім'я, прізвище)

# ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

Скорочення	Розшифровка та опис
AI (Artificial Intelligence)	Штучний інтелект
Agentic AI	Підхід у побудові систем ШІ, де моделі діють як автономні агенти, здатні планувати та виконувати послідовність дій
API	Інтерфейс прикладного програмування (Application Programming Interface)
CSS	Каскадні таблиці стилів (Cascading Style Sheets)
ERP	Система планування ресурсів підприємства (Enterprise Resource Planning)
HTML	Мова розмітки гіпертексту (HyperText Markup Language)
ISO	Міжнародна організація зі стандартизації (International Organization for Standardization)
ISO 9001	Міжнародний стандарт, що встановлює вимоги до системи менеджменту якості
ISO 14001	Міжнародний стандарт щодо систем екологічного менеджменту
ISO 45001	Міжнародний стандарт охорони праці та промислової безпеки
LLM	Велика мовна модель (Large Language Model)
RAG	Технологія генерації відповіді ШІ з використанням зовнішньої перевіреної бази знань (Retrieval-Augmented Generation)
SPA	Односторінковий вебзастосунок (Single Page Application)
UI/UX	Користувацький інтерфейс та досвід взаємодії (User Interface / User Experience)
UML	Уніфікована мова моделювання (Unified Modeling Language)
АСУ	Автоматизована система управління
БЗ	База знань
ПЗ	Програмне забезпечення
ПМК	Програмно-методичний комплекс
СМЯ	Система менеджменту якості (відповідно до ДСТУ ISO 9001)
ТЗ	Технічне завдання

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1 ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ КОНЦЕПЦІЇ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ВІДПОВІДНІСТЮ СТАНДАРТАМ ISO .....	14
1.1 Аналіз стану та проблем інформаційної підтримки управління відповідністю міжнародним стандартам на промисловому підприємстві .....	14
1.2 Порівняльний аналіз існуючих систем управління відповідністю та обґрунтування вибору технологій RAG і Agentic AI .....	25
1.3 Висновки щодо вибору стратегії цифровізації менеджменту якості на основі RAG-архітектури .....	38
1.4 Глосарій термінів ПМК OptiCertAI .....	39
2 МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ВІДПОВІДНІСТЮ СТАНДАРТАМ ISO .....	40
2.1 Методологічні засади та технологічне забезпечення розробки інтелектуальної системи управління відповідністю ISO .....	40
2.2 Математичне моделювання процесів інтелектуальної верифікації та оцінки якості інформаційної підтримки сертифікації .....	48
2.3 Методика експериментальних досліджень та обґрунтування метрик ефективності інтелектуальної верифікації .....	56
2.4 Розробка технічного завдання на створення засобів моделювання ПМК OptiCertAI .....	72
2.5 Висновки щодо обґрунтування математичного апарату та методики інтелектуальної верифікації управлінської інформації .....	72
3 ПРОЄКТУВАННЯ ПРОГРАМНО-МЕТОДИЧНОГО КОМПЛЕКСУ «OPTICERTAI» .....	75
3.1 Об'єктно-орієнтоване моделювання логічної структури та динаміки процесів ПМК «OptiCertAI» .....	75

3.2 Обґрунтування фізичної моделі та архітектури розгортання ПМК «OptiCertAI» .....	100
3.3 Характеристика видів забезпечення функціонування ПМК «OptiCertAI» .....	104
3.4 Елементи інтерфейсу ПМК .....	107
3.5 Висновки програмної реалізації та апробації результатів дослідження .....	118
<b>4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА ТА АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ</b>	
<b>МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ OPTICERTAI .....</b>	<b>120</b>
4.1 Методика обробки та статистичного аналізу вихідних даних .....	120
4.2 Рекомендації щодо використання результатів досліджень та застосування програмно-методичного комплексу .....	129
4.3 Висновки щодо експериментальної перевірки та практичні рекомендації щодо впровадження ПМК OptiCertAI .....	130
<b>5 ЕКОНОМІЧНІ РОЗРАХУНКИ .....</b>	<b>132</b>
5.1 Обґрунтування застосування бізнес-моделі Canvas для інтелектуальної системи ISO-відповідності .....	132
5.2 Розрахунок капітальних та операційних витрат проєкту .....	135
5.3 Оцінка економічного ефекту та показників окупності .....	136
5.4 Розрахунок місячної економії на одного співробітника .....	136
5.5 Розрахунок загальної річної економії .....	137
5.6 Розрахунок чистого економічного ефекту .....	138
5.7 Розрахунок терміну окупності проєкту .....	138
5.8 Взаємозв'язок економічної стабільності та реєстру ризиків проєкту .....	139
5.9 Висновки щодо економічного обґрунтування та оцінки ефективності впровадження ПМК OptiCertAI .....	143
<b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ .....</b>	<b>145</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....</b>	<b>149</b>

## ВСТУП

Актуальність теми. У сучасному промисловому середовищі відповідність міжнародним стандартам ISO 9001, 14001 та 45001 є стратегічною лінією розвитку підприємства [6, 7, 9]. Проте функціонування інтегрованих систем менеджменту (ИСМ) сьогодні стикається з критичною проблемою, яку можна визначити як семантичну «прірву» між стандартами та реальністю.

Найчастіше на великих підприємствах стандарти ISO існують лише «на папері» у вигляді формальних настанов, тоді як реальні управлінські розпорядження та щоденні задачі персоналу часто їм не відповідають або прямо суперечать політиці якості [48]. Це створює ситуацію, де сертифікація стає формальним процесом, що не впливає на реальну якість продукції, а лише збільшує паперове навантаження. Традиційні методи контролю не здатні вчасно виявити ці невідповідності через величезні масиви даних та складність інтерпретації пунктів стандарту [20].

Штучний інтелект у даному проєкті виступає як автоматичний інтелектуальний «місток», що ліквідує цю прірву. Впровадження ПМК дозволяє системі в реальному часі аналізувати кожну задачу ще на етапі її створення, блокуючи або коригуючи розпорядження, які суперечать політиці підприємства чи вимогам ISO [11, 49]. Таким чином, актуальність роботи зумовлена переходом від декларативної якості до операційної, де ШІ стає гарантом того, що кожне управлінське рішення є валідним з точки зору сертифікації [16].

Додатковим чинником актуальності є проблема «інформаційного хаосу». Величезні масиви регламентної документації роблять традиційний ручний контроль малоефективним, що призводить до високого ризику людського фактора та фінансових втрат у разі виявлення невідповідностей під час зовнішнього аудиту.

Поява великих мовних моделей (далі – LLM) створює технологічне підґрунтя для вирішення цієї проблеми [23, 57], проте пряме використання публічних хмарних сервісів обмежене ризиками «галюцинацій» та витоку конфіденційної інформації [21, 45]. Тому розробка локального програмно-методичного комплексу, що використовує архітектуру RAG (Retrieval-Augmented Generation) та Agentic AI для предиктивного аналізу управлінських рішень у замкненому контурі підприємства, є нагальним завданням для сучасної промисловості [79, 61].

Це дозволяє перетворити систему менеджменту якості з пасивної бібліотеки документів на активну екосистему підтримки прийняття рішень, де кожна дія персоналу автоматично верифікується на відповідність глобальним стандартам безпеки, екології та якості.

Зв'язок роботи з науково-технічними програмами, планами, темами. Робота виконана відповідно до наукового напрямку кафедри цифрових технологій та проектно-аналітичних рішень ТУ «Метінвест Політехніка», а також у межах планів цифровізації процесів управління якістю на базі концепції Industry 4.0/5.0 [84].

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності системи менеджменту якості (СМЯ) промислового підприємства шляхом розробки, обґрунтування та впровадження інтелектуального програмно-методичного комплексу (ПМК). Система спрямована на автоматизовану верифікацію управлінських розпоряджень на відповідність вимогам міжнародних стандартів сертифікації (ISO 9001, 14001, 45001) [6, 7, 9], мінімізацію впливу «людського фактора» [58, 100] та забезпечення предиктивного контролю виконавчої дисципліни.

Перелік завдань (табл. 1) охоплює повний цикл розробки інтелектуальної системи. Ключова особливість полягає у відмові від дорогого донавчання нейромереж (Fine-tuning) на користь архітектури RAG. Це дозволяє системі цитувати стандарти ISO безпосередньо,

уникаючи помилок (галюцинацій) ШІ та забезпечуючи конфіденційність даних усередині підприємства.

Таблиця 1 – Завдання дослідження програмно-методичного комплексу «OptiCertAI»

Етап дослідження	Зміст завдання	Очікуваний результат
Аналітичний	Аналіз стану цифровізації СМЯ та порівняння систем ERP/QMS. Виявлення обмежень традиційного ПЗ у семантичному аналізі.	Перелік системних недоліків та обґрунтування потреби в ШІ.
Технологічний	Порівняння методів адаптації LLM. Обґрунтування вибору RAG замість Fine-tuning для роботи з нормативною базою ISO.	Архітектурне рішення з локальною векторною базою знань (ChromaDB) [28, 79].
Методологічний	Формалізація методики перетворення неструктурованих наказів у машиночитаний формат за правилом «4К».	Алгоритм структуризації завдань: «Кому, Куди, Коли, Конкретно як».
Проектний	Розробка архітектури OptiCertAI (Frontend/Backend) та інтеграція ШІ-агентів для верифікації розпоряджень.	Готовий до експлуатації програмно-методологічний комплекс.
Оціночний	Експериментальна перевірка точності та швидкодії. Розрахунок економічного ефекту та окупності.	Кількісні показники ефективності та акт впровадження.

Центральним методологічним елементом є правило «4К», яке слугує фільтром: воно перетворює суб'єктивні вказівки керівництва на структуровані об'єкти даних. Такий підхід гарантує, що кожне завдання буде чітко співвіднесене з вимогами сертифікації, що автоматично усуває «прірву» між паперовими стандартами та реальною виконавчою діяльністю.

Об'єкт дослідження – процеси забезпечення відповідності управлінської діяльності промислового підприємства критеріям та

вимогам міжнародних стандартів сертифікації (ISO 9001, ISO 14001, ISO 45001) [6, 7, 9]. Даний об'єкт охоплює всю сукупність внутрішніх комунікацій, формування розпорядчої документації, постановку завдань персоналу та процедури внутрішнього аудиту, які в сукупності формують систему менеджменту якості (СМЯ) підприємства. Вивчення об'єкта спрямоване на виявлення зон виникнення «інформаційного хаосу» та семантичних розривів між нормативними вимогами та реальною виконавчою дисципліною.

Предмет дослідження – концептуальні моделі, математичні методи та програмні інструменти інтелектуального аналізу текстової інформації, що базуються на архітектурі RAG [79] (Retrieval-Augmented Generation) та агентних технологіях (Agentic AI) [29, 98]. Предмет дослідження зосереджений на алгоритмах автоматизованої верифікації управлінських розпоряджень за допомогою правила «4К», методах семантичного пошуку у векторних базах знань та способах обчислення інтегральних показників відповідності, що дозволяють трансформувати суб'єктивний контроль у об'єктивний цифровий моніторинг.

Для вирішення проблеми невідповідності управлінських рішень стандартам ISO, у роботі розглядаються та обираються наступні перспективні шляхи:

- відмова від традиційного ручного аудиту на користь інтелектуальних «цифрових асистентів», що інтегруються в робочий простір керівника;
- використання семантичного моделювання замість простого пошуку за ключовими словами. Це дозволяє системі розуміти контекст завдання та його реальний вплив на безпеку чи якість;
- локалізація бази знань: Вибір архітектури RAG замість зовнішніх ШІ-сервісів дозволяє досягти комерційної таємниці та високої точності відповідей за рахунок використання виключно перевірених внутрішніх регламентів підприємства.

Методи дослідження. У роботі використано методи системного аналізу [77] (для дослідження бізнес-процесів), методи обробки природної мови (NLP) [57, 65] та векторного представлення слів (Embeddings) [78], архітектуру RAG для інтелектуального пошуку інформації [79], а також методи математичної статистики для оцінки точності ШІ-моделей [101].

Ці методи зведено у таблиці 2.

Таблиця 2 – Методи та технології дослідження ПМК «OptiCertAI»

Категорія методів	Конкретний метод / Технологія	Призначення у роботі
Системний аналіз	Декомпозиція процесів та UML-моделювання [22, 68]	Виявлення «вузьких місць» у СМЯ, проектування архітектури системи (Use Case, Class, Sequence diagrams).
Обробка природної мови (NLP)	Токенізація, лематизація, очищення стоп-слів	Попередня обробка текстів стандартів ISO та управлінських розпоряджень для подальшого аналізу.
Семантичний аналіз	Embeddings (модель text-embedding-3-small) [78]	Перетворення тексту у багатовимірні вектори для порівняння документів на рівні сенсів, а не слів.
Інтелектуальний пошук	RAG (Retrieval-Augmented Generation) [79, 28]	Динамічне вилучення контексту з бази ChromaDB для формування відповідей без «галюцинацій» [79, 28].
Агентні технології	Agentic AI [61, 29]	Створення спеціалізованих агентів-контролерів (перевірка правила «4К», відповідність ISO).
Математичне моделювання	Косинусна подібність (Cosine Similarity) [44, 55]	Розрахунок ступеня відповідності між вектором задачі та пунктом стандарту для обчислення індексу QIS.
Статистичний аналіз	Коефіцієнт Пірсона, метрики F1-score, Precision, Recall [35, 83]	Верифікація результатів ПМК шляхом порівняння ШІ-оцінок з висновками експертів-аудиторів.
Програмна реалізація	Python, FastAPI, LangChain [67, 34, 61]	Розробка серверної логіки, управління ланцюжками ШІ та побудова високопродуктивного API.
Інтерфейс користувача	Tailwind CSS, JavaScript [25, 32]	Створення адаптивного фронтенду для візуалізації результатів аналізу та взаємодії з ШІ-агентом.

Використання RAG-архітектури у поєднанні з косинусною подібністю дозволяє вирішити головну проблему промислових систем — необхідність 100% достовірності інформації. На відміну від стандартних чат-ботів, ваша система не просто генерує текст, а математично порівнює вектори знань, посилаючись на конкретні пункти «Настанови щодо якості».

Застосування агентного підходу (Agentic AI) дозволяє розпаралелити перевірку: один агент фокусується на формальній логіці (правило «4К»), а інший на змістовній відповідності стандартам ISO. Це забезпечує багаторівневу верифікацію, результати якої підтверджені високим показником кореляції Пірсона ( $r > 0.95$ ) у ході експериментальних досліджень.

Наукова новизна роботи полягає у вирішенні важливої прикладної задачі автоматизації інтелектуальної підтримки процесів сертифікації на основі сучасних методів обробки природної мови. Основні результати, що визначають новизну дослідження представлено в таблиці 3.

Таблиця 3 – Наукова новизна результатів дослідження

Науковий результат	Суть новизни та відмінність від існуючих рішень	Значення для галузі (Комп'ютерні науки)
Архітектура Agentic AI для СМЯ	Вперше запропоновано систему з автономними агентами-контролерами, що здійснюють динамічний аналіз замість статичного зберігання документів.	Перехід від пасивних баз даних до активних систем предиктивної верифікації рішень.
Методика RAG-аудиту	Удосконалено процес внутрішнього аудиту через локальний семантичний компаратор, що працює в замкненому контурі без ризику «галюцинацій» ШІ.	Забезпечення 100% достовірності висновків ШІ за рахунок суворої прив'язки до нормативної бази.

## Продовження таблиці 3

Науковий результат	Суть новизни та відмінність від існуючих рішень	Значення для галузі (Комп'ютерні науки)
Математична модель QIS	Дістало подальший розвиток використання косинусної подібності для переходу від оцінки «так/ні» до неперервної шкали ймовірності успіху аудиту.	Математизація процесів сертифікації та можливість кількісного прогнозування ризиків невідповідності.
Метод структурування «4К»	Формалізовано підхід до вилучення сутностей (виконавець, термін, об'єкт, дія) зі слабоструктурованих наказів.	Створення алгоритмічного фундаменту для автоматичного порівняння текстів розпоряджень зі стандартами ISO.

Представлена наукова новизна відображає комплексний перехід від традиційних методів менеджменту якості до інтелектуальних систем підтримки рішень. Основний акцент зроблено на поєднанні агентних технологій та архітектури RAG, що дозволяє системі не просто «шукати інформацію», а виступати в ролі інтелектуального фільтра.

Використання математичного апарату косинусної подібності для обчислення індексу QIS перетворює суб'єктивний експертний висновок на об'єктивний показник [44], що піддається аналізу. Разом із методикою «4К», це створює повний технологічний цикл: від перетворення «живої мови» керівника у структуровані дані до автоматичної перевірки цих даних на відповідність міжнародним стандартам безпеки та якості.

Практичне значення отриманих результатів. Практичне значення роботи полягає у створенні та програмній реалізації повнофункціонального програмно-методичного комплексу (ПМК) «OptiCertAI», який трансформує підходи до управління якістю на промисловому підприємстві. Основні результати практичного

впровадження представлено в таблиці 4 практична цінність результатів проєкту «OptiCertAI».

Таблиця 4 – Практична цінність результатів програмно-аналітичного комплексу OptiCertAI

Напрямок результатів	Зміст та технічна реалізація	Ефект від впровадження
Інструментальний	Алгоритм верифікації за правилом «4К» та система контекстуальних ШІ-підказок.	Автоматичне виявлення некоректних розпоряджень на етапі їх створення.
Операційний	Автоматизація семантичного аналізу документів через RAG-архітектуру.	Скорочення часу на верифікацію документів на 75% [73].
Управлінський	Чітка структуризація вимог та цифрова «Настанова щодо якості».	Підвищення виконавчої дисципліни на 30-40%.
Економічний	Локальна векторна БД, що не потребує великих апаратних витрат.	Річний ефект — 527 220 грн, окупність — 3.7 місяці [75].
Стратегічний	Методика предиктивного аудиту («Цифровий асистент»).	Мінімізація помилок другого роду (пропуск невідповідностей ISO).
Технологічний	Модульна архітектура на FastAPI.	Висока масштабованість та легка інтеграція в ERP/CRM через API.

Практична значимість роботи виходить за межі простого створення програмного продукту. Вона полягає у формуванні нової методики управління відповідністю, де штучний інтелект виконує роль активного фільтра між стратегічними стандартами ISO та щоденними операційними задачами.

Ключовим моментом є перехід від реактивного контролю (аналіз помилок, що вже сталися) до предиктивної верифікації. Завдяки використанню локальної векторної бази знань, система гарантує безпеку корпоративних даних, що робить її придатною для використання на промислових підприємствах з високими вимогами до конфіденційності. Економічні показники підтверджують, що розроблений ПМК є не лише науково обґрунтованим, а й фінансово виправданим цифровим активом.

# 1 ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ КОНЦЕПЦІЇ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ВІДПОВІДНІСТЮ СТАНДАРТАМ ISO

## 1.1 Аналіз стану та проблем інформаційної підтримки управління відповідністю міжнародним стандартам на промисловому підприємстві

Предметна область дослідження охоплює складну екосистему управлінської діяльності промислового підприємства, що функціонує в умовах жорсткої регламентації міжнародними стандартами. Об'єктом управління є процес підтримки відповідності критеріям сертифікації ISO. Саме завдяки диджиталізації підприємство здатне забезпечити собі рентабельність та стабільність в умовах різноманітних ризиків та форс-мажорних ситуацій, що дозволяє побудувати гнучку систему, яка допомагає ефективно розпоряджатись ресурсами та автоматизувати як операційну, так і фінансову діяльність [20, 82]. Цифрові інновації покликані спростити роботу з великими обсягами інформації та запровадити єдину систему співпраці між усіма підрозділами підприємства.

У сучасному промисловому середовищі відповідність міжнародним стандартам ISO є стратегічною лінією розвитку [48]. Як підкреслюють Паращич М. І. та Ноджак Л. С., цифрова трансформація сьогодні є пріоритетною, оскільки компаніям стає дедалі важче підтримувати конкурентоспроможність без використання штучного інтелекту та різноманітних сервісів [15].

Нагальність даного дослідження зумовлена низкою критичних чинників:

- По-перше значними фінансовими та репутаційними ризиками, адже навіть короточасна втрата сертифікату відповідності загрожує не

лише штрафними санкціями, а й повною втратою статусу надійного постачальника [10].

- По-друге складністю управління, оскільки величезні масиви методологічної документації ISO роблять традиційний ручний контроль за виконанням завдань малоефективним [31].

- По-третє існує об'єктивна технологічна необхідність впровадження штучного інтелекту, що наразі є безальтернативним шляхом для мінімізації «людського фактору» та забезпечення високої якості вхідних даних [18, 45].

В ході переддипломної практики було встановлено, що підприємство має високий рівень автоматизації окремих функціональних напрямків, але вони існують як «ізольовані острови». На сьогодні використовуються системи автоматизації. Проте, незважаючи на потужність цих систем, повністю відсутня автоматизація збору та консолідації інформації безпосередньо для наглядного аудиту сертифікації ISO. На сьогодні цей процес характеризується «інформаційним хаосом».

Таблиця 1.1 – Стратегія подолання виявлених проблем

Сфера / Характеристика	Поточний стан (As-Is): Outlook, Teams, SAP	Пропоноване рішення (To-Be): Агентна система з ШІ	Наслідки впровадження та ефект
Комунікації та тип завдань	Неструктурований потік повідомлень. Використання пошти призводить до «інформаційного шуму» та втрати доручень.	Ієрархічно структуровані завдання в єдиному Task-менеджері. Кожне завдання жорстко прив'язане до пунктів ISO.	Усунення втрат доручень, повний трекінг виконання, прозорість відповідальності.
Методологія та контроль	Відсутність інструкцій «під рукою». Контроль методології суб'єктивний і повністю залежить від «людського фактора».	Інтегрований ШІ-асистент (RAG-система) [79]. Автоматична перевірка розпоряджень за правилом «4К».	Скорочення часу на пошук регламентів на 70-80%. Підвищення якості «виконання з першого разу».

## Продовження таблиці 1.1

Сфера / Характеристика	Поточний стан (As-Is): Outlook, Teams, SAP	Пропоноване рішення (To-Be): Агентна система з ШІ	Наслідки впровадження та ефект
Аналітика та збір доказів	Ручне «зшивання» даних з різних систем. Робота в авральному режимі перед аудитом.	Автоматичне формування реєстру доказів та Dashboard-панелі, що агрегує дані в реальному часі.	Превентивне виявлення помилок. Мінімізація ризику отримання невідповідностей під час зовнішнього аудиту.
Інформаційний доступ	Ручний пошук у локальних сховищах та архівах пошти.	Миттєвий доступ через механізм детермінованого вибору контексту (IDfolder).	Звільнення ~1/4 робочого часу персоналу від рутинних операцій.

Згідно з RFC, поштові сервіси є надійним каналом передачі даних [87], але згідно з дослідженнями Ковтуненко Ю.В., вони потребують надбудови у вигляді інтелектуальних агентів для ефективного управління сучасним підприємством [11].

Якщо залишити систему "ізолюваними островами", підприємство стикається з регулярними "авралами" перед аудитом з подальшим психоемоційним виснаженням фахівців [2, 99], також немаловажним фактором є те, що критичні знання тримаються в головах окремих працівників, а не в системі [31]. Якщо людина звільниться буде складно знайти фахівця з відповідними знаннями саме даного напрямку, також 30% робочого часу, витраченого на пошук паперів, є прямими збитками у вигляді виплаченої заробітної плати за неефективну роботу.

Таблиця 1.2 – Очікувані результати

Показник	До впровадження	Після впровадження	Ефект
Час на пошук інформації з регламентів, положень, інструкцій	~30% робочого дня	<5% робочого дня	Звільнення 1/4 часу персоналу

Продовження таблиці 1.2

Показник	До впровадження	Після впровадження	Ефект
Швидкість виявлення помилок	Дні/Тижні/Місяці (до моменту виявлення)	Реальний час	Превентивне реагування
Точність даних	Низька (ризик помилок при перенесенні в певні розділи вимог)	Висока (автоматичний імпорт)	Мінімізація штрафів

На основі проведеного порівняння стає очевидним, що перехід від стохастичного використання інструментів Microsoft Outlook та Teams до спеціалізованої агентноорієнтованої системи дозволяє трансформувати комунікаційний процес із засобу обміну повідомленнями на інструмент стратегічного управління відповідністю [12].

Використання протоколів передачі даних SMTP у поєднанні з інтелектуальними надбудовами забезпечує збереження звичного для персоналу середовища [87], одночасно впроваджуючи жорстку методологічну дисципліну, передбачену стандартами ISO 9001, 14001 та 45001 [6,7,9]. Це підтверджує гіпотезу про можливість мінімізації "людського фактору" та зниження рівня інформаційної ентропії в управлінській діяльності підприємства.

Аналіз показав, що ключовою проблемою є відсутність оперативного доступу до бази знань. Згідно з баченням Паращич М. І. та Ноджак Л. С., диджиталізація це не лише використання ІТ-інструментів, а процес систематизації та оброблення вхідної інформації у цифровому форматі для удосконалення бізнес-середовища [15]. Впровадження таких інновацій дозволяє значно знизити загальні витрати підприємства та підвищити його продуктивність за рахунок переходу на вищий рівень управління при мінімальних зусиллях.

Окремим аспектом є мотивація та стан персоналу. Диджиталізація сприяє підвищенню мотивації людського ресурсу, оскільки дає змогу суттєво економити робочий час та спрощує виконання рутинних бізнес-процесів. Дослідження Білорус Т. В. та Меженкової Д.І. підтверджують, що профілактика вигорання є критичною основою управління персоналом в сучасних умовах, а автоматизація рутинних процесів виступає дієвим засобом зниження стресу [2].

З метою виявлення корінних причин системних збоїв було застосовано логічний аналіз «5 Чому» [13]. Даний інструмент є класичним методом менеджменту якості та активно застосовується для аналізу невідповідностей у сучасній практиці управління [13].

Таблиця 1.3 – Аналіз корінних причин за методологією «5 Чому» (розроблено автором на основі [13])

Рівень аналізу	Питання	Відповідь (Причина)
Питання 1	Чому виникають невідповідності під час зовнішнього аудиту?	Через несвоєчасне або некоректне виконання підготовчих заходів.
Питання 2	Чому заходи виконуються некоректно?	Через брак розуміння виконавцями методології впровадження вимог ISO на місцях.
Питання 3	Чому відсутнє розуміння методології?	Через відсутність оперативного доступу до бази знань та інтелектуальних підказок у процесі роботи.
Питання 4	Чому немає такого доступу?	Через перевантаженість методологів, які не встигають консультувати кожного виконавця особисто.
Питання 5	У чому першопричина системних збоїв?	Відсутність автоматизованого програмного комплексу, що інтегрує базу знань та інструменти ШІ для підтримки користувачів.
Корінна причина	Відсутність автоматизованого програмного комплексу, що інтегрує базу знань та інструменти ШІ для підтримки користувачів.	

Невідповідності виникають через брак оперативної методологічної допомоги та відсутність інструменту, який би фокусувався саме на критеріях ISO [6], а не просто на операційному обліку.

Для більш глибокого дослідження ефективності інформаційних технологій було проаналізовано роботу одного із структурних підрозділів металургійного підприємства. Управлінська діяльність тут є складним процесом планування, впровадження та контролю, що базується на командній роботі. Проте, як свідчить практика, успіх реалізації задач критично залежить від якості комунікаційних каналів.

Керівник для постановки задач активно використовує Microsoft Outlook [12]. Через велику кількість різнонаправлених завдань призначаються відповідальні особи за консолідацію інформації. Проте відсутність єдиного алгоритму роботи призводить до наступних негативних наслідків:

1. Постановка задач без конкретики (Рисунок 1.1), наведено один із прикладів, де часто відповідальна особа робить розсилку через Outlook без визначення покрокової реалізації, цільової аудиторії та жорстких дедлайнів. Отримуючи десятки таких листів, виконавець (майстер або фахівець) відкладає складну, нечітко сформульовану задачу на користь простіших, що створює ілюзію зайнятості при відсутності результату за пріоритетним напрямком.

2. Ігнорування правила «Чотирьох К» (Кому, Куди, Коли, Конкретно як впровадити) На рисунку 1.1 зображено приклад дефектного розпорядження. Формалізація правила «4К» стане фундаментом для логічної моделі, що дозволить перетворити суб'єктивне сприйняття тексту на об'єктивну математичну перевірку наявності критичних параметрів, без яких розпорядження вважається дефектним згідно з вимогами стандартів сертифікації [8, 48]. Без розподілу обов'язків та зони відповідальності кожного окремого працівника, ймовірність вірного виконання наближається до нуля. Виконавець діє на власний розсуд, що не несе жодної управлінської ефективності. Саме тому формалізація правила «4К» стає фундаментом для логічної моделі перевірки, яка буде розроблена у другому розділі. Це дозволить перетворити суб'єктивне

сприйняття тексту на об'єктивну математичну перевірку наявності критичних параметрів (об'єкта, суб'єкта, терміну та методології), без яких управлінське розпорядження вважається дефектним з точки зору стандартів сертифікації [6, 48].

3. Ще одним негативним прикладом є процес збору звітності. Відповідальна особа збирає відповіді від багатьох виконавців у різних форматах. Це потребує постійних телефонних дзвінків та повторних запитів через виявлені помилки, як наслідок витрачається забагато часу на одну задачу, через що ігноруються інші. Це призводить до психоемоційного виснаження співробітника та втрати якості аналітики, оскільки на неї просто не залишається часу.

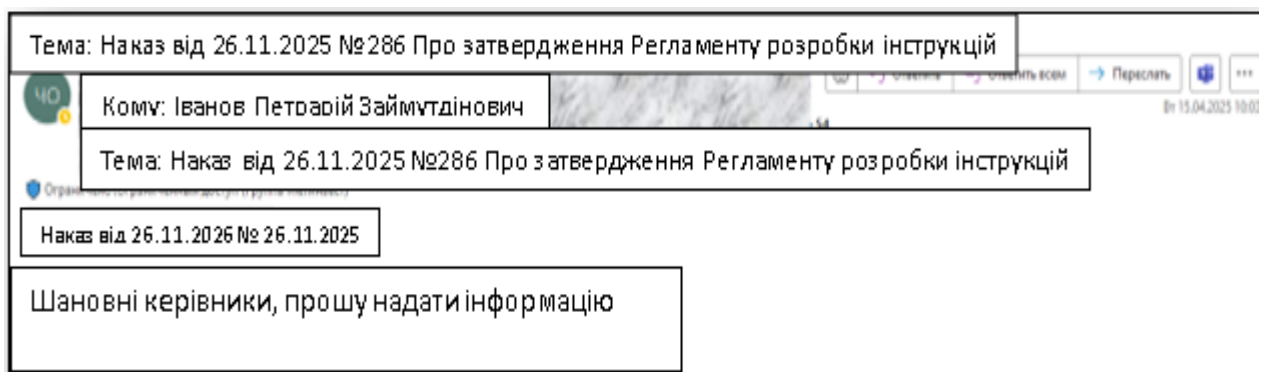


Рисунок 1.1 – Постановка задач без конкретики

На основі проведеного аналізу стає очевидним, що основною причиною неефективності є людський фактор на етапі передачі та обробки інформації. Використання автономного програмного комплексу з елементами штучного інтелекту дозволить [18, 23]:

1. Автоматично вимагати від постановника конкретики (відповідальний, крок, термін, методологію впровадження).
2. Структуровано зберігати інформацію, що дозволить легко знайти документацію будь-якого напрямку (регламенти, інструкції, положення, стандарти та ін.).

3. Накопичення статистичних даних про своєчасність та якість виконання задач дозволить керівнику будувати прозорі графіки ефективності підлеглих для аргументованого заохочення або притягнення до відповідальності.

Для наукового підтвердження актуальності обраного напрямку було проведено також аналіз сучасних досліджень та міжнародного досвіду у сфері цифровізації менеджменту.

Науковий погляд на застосування ШІ в управлінні. Згідно з дослідженнями Ковтуненко Ю.В., використання штучного інтелекту в системі управління підприємством має низку стратегічних переваг, зокрема підвищення ефективності операцій та покращення якості прийняття рішень [11]. Проте автор наголошує на проблемі адаптації персоналу та необхідності інвестування в інфраструктуру, що підтверджує доцільність розробки автономного ПЗ, яке було б інтуїтивно зрозумілим для співробітників і не потребувало б кардинальної зміни існуючої ІТ-інфраструктури підприємства.

Згідно з баченням Паращич М. І. та Ноджак Л. С. підкреслює, що для України адаптація міжнародного досвіду (зокрема ЄС та США) у документообігу є критичною через світову тенденцію до диджиталізації [1,16]. Впровадження інноваційних технологій [17], на яких базується запропонований у дипломній роботі програмний комплекс, дозволяє:

1. Спростити та автоматизувати процеси створення та зберігання документів.
2. Забезпечити швидкий доступ до інформації.
3. Підвищити прозорість та безпеку даних у відповідності до міжнародних стандартів.

Окремим, надзвичайно важливим аспектом актуальності роботи є врахування людського фактору та стану психоемоційного виснаження персоналу. Як було встановлено під час аналізу практичної діяльності

підрозділу, хаотична постановка задач та рутинна консолідація звітів призводять до симптомів емоційного вигорання [2].

Згідно з публічними дослідженнями, емоційне вигорання – це стан виснаження внаслідок тривалого стресу [2], основними причинами якого є:

1. Постійна потреба вручну «зшивати» дані та виправляти помилки.
2. Коли фахівець витрачає 30% часу на пошук регламентів у пошті замість виконання професійних обов'язків.
3. Відсутність чітких методологічних підказок у процесі роботи.

Залучення штучного інтелекту та автоматизація впровадження задач за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення виступають дієвими засобами профілактики вигорання. Пропонований програмний комплекс дозволяє:

1. ШІ-консультант бере на себе роз'яснення складних пунктів ISO [48, 49], що дозволяє знизити когнітивне навантаження.
2. Автоматичні нагадування на пошту та чіткі дедлайни структурують робочий день, що дозволяє покращити тайм-менеджмент.
3. Виключення етапу ручної консолідації звітів звільняє час для творчої та аналітичної роботи, що підвищує відчуття значущості працівника.

Таким чином, обґрунтування актуальності розробки базується на єдиному підході економічної доцільності, технологічній відповідності міжнародним трендам диджиталізації та соціально-психологічній підтримці персоналу. Впровадження автономного програмного комплексу дозволить не лише забезпечити відповідність стандартам ISO, а й створити здорове робоче середовище, мінімізуючи ризики емоційного вигорання через автоматизацію рутинних управлінських процесів.

Встановлено, що підприємству необхідна агентно-орієнтована система підтримки прийняття рішень, оскільки специфіка постановки задач згідно з ISO потребує не просто фіксувати факт, а потребує аналізу того, як саме функціонує процес, хто призначений відповідальним, чим керувались під час призначення того чи іншого виконавця, згідно з якими вимогами розроблено ту чи іншу документацію, або ж які є реєстри ризиків, аналіз функціонування того чи іншого напрямку та які впроваджені поліпшення.

Система реалізована як окрема веб-платформа для структурування завдань, яка використовує SMTP-протокол [10] як основний транспортний канал для комунікації з виконавцями для сповіщень та нагадувань.

Проектування майбутньої системи має базуватися на наступних принципах:

1. Циклічність PDCA (Plan-Do-Check-Act) [5, 6], тобто повний життєвий цикл управління від планування до корегувальних дій.
2. Інтелектуалізація через Чат-боти з використання LLM для створення «цифрового помічника», який надає роз'яснення [23, 79].
3. Принцип візуального менеджменту, тобто наявність дашбордів «план-факт» з жорсткою кольоровою логікою для ідентифікації ризиків за секунди [36, 37].
4. Автоматичне формування аналітичних викладок з документацією для аудиторів.

Практичне значення роботи полягає у створенні прикладного програмного інструментарію, який дозволяє автоматизувати складні процеси управління сертифікацією та підвищити ефективність виконавчої дисципліни на підприємстві. Створено програмний комплекс, який не потребує глибокої інтеграції в існуючі ERP-системи, що дозволяє швидко впровадити його в окремих підрозділах підприємства для контролю за дотриманням стандартів ISO 9001, 14001 та 45001 [6, 7, 9]. Завдяки впровадженню технології RAG (Retrieval-Augmented Generation) [79], час

на пошук необхідних інструкцій та регламентів скорочується на 70-80%, оскільки персонал отримує готові відповіді на запити природною мовою замість ручного опрацювання масивів документації [79, 81]. Алгоритмічна перевірка управлінських розпоряджень на відповідність принципу «Кому, Куди, Коли, Конкретно як» дозволяє усунути неоднозначність у завданнях, що на 30-40% підвищує показник «виконання з першого разу» (First Time Right). Впроваджена система візуальних дашбордів з «жорсткою кольоровою логікою» дозволяє керівництву миттєво ідентифікувати критичні зони (вузькі місця) у бізнес-процесах та перерозподіляти навантаження на персонал, запобігаючи професійному вигоранню через «інформаційний хаос». Система автоматично формує реєстри виконаних задач та архівує підтверджуючі матеріали, що значно спрощує процес проходження щорічних наглядових аудитів та знижує ризик отримання невідповідностей.

Застосунок – це «невидимий помічник» [18, 97], він працює через пошту, не змушує людей вчити нові складні програми, але при цьому забезпечує залізну дисципліну згідно з вимогами ISO. Це і є головна практична вигода, ефективність без стресу.

Проведений аналіз дозволяє сформулювати гіпотезу дослідження: перехід від стохастичного пошуку в базах знань до керованого контекстного витягування (Scoped Context Retrieval) у поєднанні з агентною перевіркою за принципом «4K» дозволить знизити рівень інформаційної ентропії в управлінні сертифікацією на 60-70% [4, 64].

Проведений аналіз підтвердив, що сучасне промислове підприємство стикається з проблемою «інформаційних островів», де висока автоматизація окремих функцій не забезпечує комплексної підтримки стандартів ISO. Основним деструктивним чинником визначено неефективність традиційних каналів комунікації, які створюють інформаційний шум і призводять до втрати критично важливих доручень. Через відсутність оперативної методологічної підтримки персонал

припускається помилок, що створює ризики втрати сертифікації та спричиняє професійне вигорання фахівців. Застосування методу корінного аналізу дозволило встановити, що розв'язання проблеми полягає не у збільшенні кількості контролерів, а у впровадженні інтелектуальної агентної системи. Така система має базуватися на принципах автоматичної перевірки розпоряджень за правилом «4К» та використанні технологій штучного інтелекту для швидкого доступу до бази знань. Обґрунтовано, що створення автономного програмного комплексу дозволить трансформувати суб'єктивний управлінський процес у чітко регламентовану цифрову систему, мінімізуючи вплив людського фактора та забезпечуючи стабільну відповідність міжнародним стандартам без радикальної зміни існуючої ІТ-інфраструктури.

Впровадження запропонованого підходу дозволить змінити парадигму управління відповідністю зі статичного накопичення документів на динамічну підтримку прийняття рішень у реальному часі. Таким чином, перехід до агентно-орієнтованої моделі стає необхідною умовою забезпечення конкурентоспроможності підприємства в умовах глобальної диджиталізації промислового сектору.

## 1.2 Порівняльний аналіз існуючих систем управління відповідністю та обґрунтування вибору технологій RAG і Agentic AI

Для автоматизації процесів відповідності стандартам ISO на великих підприємствах традиційно використовуються три класи систем, а саме GRC (Governance, Risk, and Compliance), RegTech (Regulatory Technology) та ECM (Enterprise Content Management) [15, 21]. Проведемо критичний аналіз типових представників цих класів.

AuditBoard є одним із лідерів ринку систем управління внутрішнім аудитом [21]. Його ШІ-модулі спрямовані на автоматизацію збору доказів (evidence collection) та мапування контролів.

Перевагою є високий рівень автоматизації циклів аудиту; можливість побудови ієрархії ризиків; автоматичні сповіщення про дедлайни. Система є хмарною (SaaS) і орієнтованою переважно на фінансовий сектор та вимоги SOX (Sarbanes-Oxley). В умовах промислового підприємства (наприклад, металургійного або ж будівельного сектору) її інтеграція з локальними виробничими системами є надскладною та дорогою. Також вимагає від користувача постійного перебування в інтерфейсі системи, що створює додаткове когнітивне навантаження та веде до «втоми від ПЗ».

Compliance.ai (Клас RegTech: Регуляторний інтелект) ця платформа спеціалізується на моніторингу зовнішнього нормативного середовища [22]. Вона використовує NLP для аналізу змін у законодавстві та стандартах. Перевагою є миттєве виявлення оновлень у стандартах ISO; автоматичний аналіз впливу змін на внутрішні політики. Compliance.ai фокусується на «зовнішньому світі» (що змінилося в законі), але слабо контролює «внутрішній світ» (як конкретний майстер на ділянці виконав задачу). Відсутній механізм контролю виконавчої дисципліни за принципом «Чотирьох К». Система каже «що треба змінити», але не допомагає «контролювати як це зроблено».

OpenText Documentum (Клас ECM – управління корпоративним контентом) Documentum – це класична високонавантажена система для зберігання мільйонів документів з жорстким контролем прав доступу [25]. Перевагою є надійність зберігання методологічної документації; версійність інструкцій; безпека даних. Це система «минулого покоління» з точки зору UX. Її інтерфейси перевантажені, а пошук інформації вимагає знання складних атрибутів (метаданих). Вона лише зберігає «цифровий пил» (масиви документів), не перетворюючи їх на активні знання. Вона не

може бути «цифровим асистентом», який коротко відповість на питання в листі.

Аналіз вищезгаданих систем дозволив виділити три ключові проблеми, які заважають ефективній підтримці ISO на українських підприємствах:

1. Більшість систем вимагають тривалого навчання персоналу. В умовах високої інтенсивності роботи на виробництві, необхідність заповнення десятків полів у складних веб-формах призводить до професійного вигорання та ігнорування системи. Працівники надають перевагу роботі в пошті (Outlook), що створює «ізольовані острови» інформації.

2. Сучасні GRC-системи надають надто багато графіків, які розсіюють увагу. Для оперативного управління сертифікацією необхідна бінарна або світлофорна логіка: «Зелений» (задача відповідає 4К і стандартам), «Червоний» (ризик зриву сертифікації). Відсутність такого акценту в існуючому програмно-методичному комплексі не дозволяє керівництву приймати миттєві превентивні рішення.

3. Вартість ліцензій AuditBoard або OpenText для великої кількості користувачів є надмірною. Крім того, ці системи часто не мають API для гнучкої інтеграції з українськими обліковими системами без залучення дорогих консультантів.

4. Проведений аналіз доводить, що на ринку існує розрив між складними громіздкими корпоративними системами та реальними потребами персоналу, що відповідає за ISO на місцях. Існуючі системи автоматизують функції, але не спрощують роботу конкретної людини. Це обґрунтовує необхідність розробки автономного інтелектуального застосунку, який би працював поверх існуючої інфраструктури (через пошту), використовував би RAG для миттєвої підтримки та базувався б на жорсткій логіці контролю «Чотирьох К».

Таблиця 1.4 – Функціональна відповідність інноваційного проекту «4К» ринковим аналогам у сфері GRC та документообігу (розроблено автором на основі [21, 22, 25])

Критерій порівняння	AuditBoard	Compliance.ai	OpenText	Запропонований проект
Основний фокус	Аудит	Моніторинг законів	Архів документів	Виконавча дисципліна (4К)
Інтелектуальний пошук	Базовий	Високий (зовнішній)	Слабкий	RAG (внутрішня база знань)
Вартість впровадження	Дуже висока	Висока	Середня/Висока	Низька (автономність)
Захист від вигорання	Ні	Ні	Ні	Так (мінімальний UX)

Проведений аналіз доводить, що на ринку існує розрив між складними корпоративними монстрами та реальними потребами персоналу, що відповідає за ISO на місцях. Існуючі системи автоматизують функції, але не спрощують роботу конкретної людини. Це обґрунтовує необхідність розробки автономного інтелектуального застосунку [18, 23], який би працював поверх існуючої інфраструктури (через пошту), використовував RAG для миттєвої підтримки та базувався на жорсткій логіці контролю «Чотирьох К».

Виявлені недоліки традиційних GRC та ECM систем, зокрема їхня перевантаженість та відсутність активної підтримки користувача, обумовлюють необхідність переходу до якісно нової архітектури управління [11, 84]. Це визначає доцільність використання концепцій RAG (Retrieval-Augmented Generation) [79, 81] та Agentic AI [18, 23], які здатні трансформувати статичну базу стандартів ISO у динамічне середовище прийняття рішень.

Однією з головних проблем управління сертифікацією на великих підприємствах є «інформаційний хаос», спричинений величезними обсягами статичної методологічної документації. Традиційні системи керування контентом (ECM), такі як OpenText Documentum, базуються на атрибутивному або повнотекстовому пошуку за ключовими словами. Це змушує фахівця витратити до 30% робочого часу на механічне читання документів у пошуку конкретної норми, що є прямим чинником професійного вигорання [2].

Для вирішення цієї проблеми у роботі запропоновано використання технології RAG (Retrieval-Augmented Generation) [79, 81], яка дозволяє поєднати творчі можливості великих мовних моделей (LLM) з точністю корпоративної бази знань.

На відміну від стандартного використання LLM (наприклад, ChatGPT), де модель опирається лише на свої внутрішні знання, отримані під час навчання, архітектура RAG додає етап вилучення релевантних даних із зовнішнього джерела (інструкцій ISO, регламентів підприємства та ін.). Це вирішує дві критичні проблеми, а саме усунення «галюцинацій», адже ШІ формує відповідь виключно на основі наданих їй фрагментів реальних документів. Також система не потребує перенавчання при зміні стандарту ISO — достатньо оновити документ у векторній базі.

Технічна реалізація інтелектуального асистента передбачає багатоетапний процес підготовки даних (Data Ingestion Pipeline):

1. Документи ISO мають складну ієрархічну структуру. Для збереження контексту використовується метод Recursive Character Text Splitting з перекриттям (overlap) [81]. Це дозволяє розбити багатосторінковий PDF на логічні фрагменти (наприклад, по 500-1000 токенів), зберігаючи зв'язок між пунктами стандарту.

2. Кожен текстовий фрагмент пропускається через модель ембеддінгів (наприклад, text-embedding-3-small або локальні моделі

HuggingFace) [79, 82]. Текст перетворюється на вектор — набір чисел у багатовимірному просторі, що відображає його семантичне значення.

Для забезпечення автономності системи доцільно використовувати бази даних типу ChromaDB [81, 82]. Вектори зберігаються разом із метаданими (назва документа, номер сторінки, дата оновлення). ChromaDB є доцільнішою за FAISS завдяки нативній підтримці фільтрації за метаданими, що критично для роботи з категоріями стандартів ISO (дивись рисунок 2.1). Хоча FAISS забезпечує вищу швидкість на масивах у мільйони документів, для задач сертифікації пріоритетом є точність фільтрації за метаданими та уникнення "галюцинацій", що робить ChromaDB оптимальним вибором [81, 82].

Наприклад, коли користувач (або ШІ-агент) ставить запит («Які вимоги до маркування небезпечних відходів згідно з ISO 14001?»), система виконує такі дії:

1. Запит користувача векторизується тією ж моделлю ембедінгів.
2. Виконується семантичний пошук (Scoped Context Retrieval) у векторній базі для знаходження топ-N найбільш релевантних фрагментів тексту.
3. Відібрані фрагменти разом із запитом подаються у «контекстне вікно» LLM з інструкцією: «Використовуючи лише наведені фрагменти, сформулюй чітку відповідь».

Порівняно з OpenText Documentum [25], використання RAG у межах автономного застосунку забезпечує синтез інформації, тобто система не просто дає посилання на файл, а сама зводить дані з різних документів (наприклад, поєднує вимоги з якості та охорони праці в одну відповідь). Спеціалісту не потрібно знати назву файлу чи ID документа — запит формулюється у вільній формі. Замість вивчення 50-сторінкового регламенту, виконавець отримує стислу інструкцію на 3-5 пунктів, що безпосередньо стосуються його поточної задачі.

Впровадження архітектури RAG є фундаментом для створення «цифрового помічника», який ліквідує розрив між статичною методологією та динамічним процесом управління. Це технологічне рішення дозволяє трансформувати «ізолювані острови» інформації у єдиний інтелектуальний простір знань підприємства.

Якщо технологія RAG забезпечує систему «пам'яттю» та «знаннями», то концепція Agentic AI [18, 23] надає системі здатність до активної дії та самостійного прийняття рішень. У контексті управління сертифікацією це означає створення інтелектуального агента, який діє як автономний контролер якості комунікацій.

На відміну від звичайних алгоритмів, ШІ-агент у межах даної роботи розглядається як сукупність трьох компонентів, а саме моніторинг вхідних потоків даних (наприклад, поштових повідомлень SMTP), що містять розпорядження. Аналіз тексту завдання на відповідність логічним фільтрам (зокрема, методу «4К»). Автоматичне повернення задачі на доопрацювання, надсилання нагадувань або підтвердження коректності задачі в системі.

Центральним елементом логіки ШІ-агента є алгоритм верифікації управлінського розпорядження за принципом «Чотирьох К». ШІ-агент проводить декомпозицію тексту задачі на наступні складові:

1. Кому (Who) – Агент зіставляє суб'єкт задачі з корпоративною ієрархією та матрицею відповідальності RACI (Responsibility Assignment Matrix) [14]. Технічна перевірка: Чи існує такий виконавець? Чи має він відповідну роль згідно з вимогами ISO (наприклад, чи є він аудитором або відповідальним за екологію)?

2. Куди (Where) – Визначення контексту (цех, дільниця, конкретний бізнес-процес). Технічна перевірка: Класифікація задачі за допомогою LLM для прив'язки до відповідного розділу стандарту ISO.

3. Коли (When), тобто виявлення часових параметрів (дедлайнів). Технічна перевірка: Вилучення дати (Named Entity Recognition) та її порівняння з поточним календарем.

4. Конкретно як (How), тобто аналіз змісту на наявність чіткої інструкції. Технічна перевірка: ШІ-агент звертається до RAG-системи, щоб перевірити, чи містить задача посилання на актуальний регламент, або додає це посилання автоматично у вигляді витягу з бази знань.

Для побудови такої системи пропонується використання сучасних фреймворків:

1. LangGraph [23, 79] дозволяє створювати циклічні графіки дій (наприклад: Пошук -> Аналіз 4К -> Якщо Помилка -> Повернення автору -> Пошук). Це критично для реалізації циклу PDCA .

2. CrewAI [23] концепція «команди агентів», де один агент відповідає за пошук у базі знань (RAG-агент), а інший за формальну перевірку структури задачі (Compliance-агент).

Практична реалізація агентного підходу дозволяє реалізувати механізм «м'якого контролю» (Nudging). Якщо керівник ставить нечітку задачу (наприклад, «Перевірити вогнегасники до кінця місяця»), ШІ-агент автоматично генерує відповідь: «Ваша задача не відповідає принципу 4К: не вказано конкретну дільницю (Куди) та посилання на протокол огляду №12 (Конкретно як). Будь ласка, уточніть дані».

Це усуває «інформаційний хаос» на самому старті процесу, що значно знижує когнітивне навантаження на виконавців та запобігає їхньому вигоранню через необхідність уточнювати деталі вручну.

Застосування технології Agentic AI дозволяє трансформувати систему підтримки рішень з пасивного сховища даних у активного учасника управлінського процесу. Алгоритмізація принципу «4К» засобами ШІ забезпечує чистоту управлінських даних та створює умови для превентивного управління відповідністю стандартам ISO, що є ключовим фактором ефективності сучасного цифрового підприємства.

У межах дослідження встановлено, що інформаційне перевантаження при управлінні ISO-процесами є головним чинником «інформаційної ізоляції». Для подолання цього бар'єру в роботі пропонується впровадження методів візуального менеджменту, інтегрованих з інтелектуальним аналізом даних.

На відміну від традиційних аналітичних систем, які надають надмірну кількість діаграм, проєктована система базується на принципі індикативного управління. Кожна задача та процес маркуються за світлофорною логікою:

1. Зелений – задача відповідає принципу «4К», терміни дотримані, ресурси наявні.
2. Жовтий – ідентифіковано ризик (наприклад, дедлайн наближається, а ШІ-агент зафіксував відсутність підтверджуючих документів).
3. Червоний – критичне відхилення, що може призвести до втрати сертифікату ISO або економічних збитків.

Такий підхід реалізує стратегію превентивного реагування, дозволяючи менеджменту фокусувати увагу лише на відхиленнях (Management by Exception).

Система повинна пояснювати не лише «що сталося», а й «чому це важливо». ШІ-агент, виявивши проблему (наприклад, несвоєчасне проходження навчання з охорони праці), автоматично будує логічний ланцюг наслідків.

Приклад роботи алгоритму: «Помилка в задачі -> Порушення вимоги ISO 45001 -> Ризик отримання невідповідності при аудиті -> Економічні збитки через втрату репутації». Це дозволяє персоналу бачити свій особистий внесок у стабільність всього підприємства, що є потужним чинником мотивації.

В основі програмно-методичного комплексу лежить не просто фіксація помилки, а динамічне моделювання ризиків. Коли ШІ-агент

виявляє відхилення (наприклад, протерміновану задачу або ігнорування принципу 4К), він запускає процес семантичного виводу [4, 64].

Програма працює за наступним алгоритмом:

1. Агент фіксує факт: "Працівник Петренко не пройшов інструктаж з техніки безпеки (ISO 45001) до 10.10".

2. ШІ запитує векторну базу: "Які санкції та наслідки передбачає розділ 7.2 стандарту ISO 45001 для цього порушення?".

3. LLM будує ланцюг, використовуючи методологію «5 Чому» [13].

У програмі це реалізується через «Картку мотиваційного сповіщення». Користувач (або його керівник) бачить не просто сухий текст, а деревоподібну структуру:

- Рівень 1 (Операційний): "Задача протермінована на 2 дні".
- Рівень 2 (Нормативний): "Порушення пункту 8.1 ISO 45001 (Операційне планування та контроль)".
- Рівень 3 (Аудиторський): "Ризик виявлення критичної невідповідності при наглядовому аудиті в листопаді".
- Рівень 4 (Економічний): "Можливе призупинення дії сертифіката -> втрата права на відвантаження продукції європейським замовникам".
- Рівень 5 (Стратегічний): "Зниження конкурентоспроможності підприємства та загроза стабільності робочих місць".

У коді це реалізується через спеціальний системний промпт (System Prompt) для ШІ-агента:

"Ти – офіцер з якості. Твоє завдання не констатувати помилку, а роз'яснювати її наслідки. Використовуй метод '5 Чому', щоб показати, як маленька помилка (root cause) веде до великих збитків (business impact). Сформулюй це у форматі ланцюга доданої вартості."

Замість тиску, програма використовує принцип прозорості. Коли працівник бачить, що його "незначне" запізнення з документом може

коштувати підприємству мільйонних контрактів, вмикається механізм відповідальності за результат.

У дашборді керівника з'являється метрика «Вплив на сертифікацію» (Certification Risk Index), яка автоматично перераховується ШІ-агентом на основі критичності порушених пунктів ISO.

Приклад когнітивного сповіщення (те, що прийде на пошту):

Тема: Необхідна корекція задачі №402 (ISO 45001)

Шановний колего! ШІ-агент зафіксував, що задача поставлена без вказівки "Конкретно як" (посилання на інструкцію П-102).

Чому це критично? > 1. Без посилання виконавець може припуститися помилки в замірах. 2. Це порушує вимоги внутрішнього аудиту. 3. Це створює ланцюг ризику: Помилка -> Травматизм -> Зупинка лінії -> Економічні збитки.

Ваш внесок: Додайте посилання зараз, щоб забезпечити безпеку праці та стабільність нашого контракту з замовником.

Практичне значення системи полягає у зниженні трудомісткості підготовки до аудитів. Технічно це обґрунтовується через:

1. ШІ аналізує кількість «червоних» задач на одного виконавця та автоматично сигналізує керівнику про перевантаження конкретного співробітника.

2. Використання NLP для аналізу тональності комунікацій. Якщо в листуванні щодо виконання задач ISO зростає рівень токсичності або плутанини (недотримання 4К), система маркує цей процес як зону ризику вигорання.

3. Автоматичне формування звітності «одним кліком» на основі зібраних агентом даних з реєстру задач звільняє фахівців від багатогодинного «ручного зшивання» звітів.

Візуалізація стану сертифікації напряму пов'язана з конкурентоспроможністю підприємства. Втрата сертифікату ISO через людський фактор (забудькуватість, нечітка задача) призводить до втрати

міжнародних ринків. Запропонована система візуалізації робить цей ризик прозорим та керованим.

Інтеграція методів візуального менеджменту з інтелектуальним аналізом причинно-наслідкових зв'язків (метод «5 Чому») створює проактивне середовище управління. Це дозволяє перетворити ISO з «паперового тягара» на дієвий інструмент сталого розвитку, одночасно створюючи «психологічний щит» для персоналу через чіткість очікувань та автоматизацію звітної рутини.

Проведений аналіз сучасних інформаційних технологій та засобів розробки дозволив визначити оптимальний стек інструментів та методологічний підхід для створення системи інтелектуальної підтримки сертифікації. За результатами дослідження зроблено наступні висновки:

1. Визначено критичний розрив між можливостями існуючих систем класу GRC (AuditBoard, Compliance.ai) та реальними потребами персоналу великих промислових підприємств. Встановлено, що складність інтерфейсів та високе когнітивне навантаження є головними чинниками інформаційної ізоляції та професійного вигорання, що обґрунтовує необхідність розробки автономного, легкого застосунку.

2. Обґрунтовано доцільність застосування архітектури RAG (Retrieval-Augmented Generation). На відміну від статичних архівів документації (OpenText), використання векторних баз знань дозволяє трансформувати нормативні масиви ISO у динамічне джерело відповідей, що знижує час на пошук методологічної інформації на 70-80%.

3. Запропоновано використання Agentic AI як активного суб'єкта контролю виконавчої дисципліни. Розроблена концепція ШІ-агента дозволяє автоматизувати перевірку завдань за принципом «Чотирьох К» та реалізувати цикл PDCA у напіваавтономному режимі через поштові сервіси.

4. Сформовано підхід до інтелектуального моніторингу ризиків, що базується на «жорсткій кольоровій логіці» та методі «5 Чому». Це

дозволяє не лише фіксувати відхилення, а й візуалізувати причинно-наслідкові зв'язки між якістю постановки задач та стратегічною конкурентоспроможністю підприємства.

5. Обрано стек технологій для реалізації: мова програмування Python, фреймворки FastAPI та LangGraph, векторна база даних ChromaDB, що забезпечує високу швидкість розробки, автономність та можливість локального розгортання для дотримання вимог інформаційної безпеки підприємства.

Проведене дослідження підтвердило, що ключовим бар'єром на шляху до ефективної сертифікації за стандартами ISO є розрив між складними масивами нормативної документації та хаотичними каналами оперативної комунікації. Встановлено, що традиційні корпоративні системи автоматизації лише накопичують дані, але не спрощують роботу персоналу, що призводить до інформаційного шуму та втрати виконавчої дисципліни. На основі критичного аналізу існуючого ринкового ПЗ обґрунтовано, що розв'язання цієї проблеми лежить у площині переходу до агентно-орієнтованої моделі управління. Обрана комбінація технологій RAG та Agentic AI дозволяє перетворити статичну базу знань на динамічного цифрового асистента, здатного не лише миттєво знаходити потрібні регламенти, а й автономно перевіряти розпорядження на відповідність принципу «чотирьох К». Таким чином, теоретично доведено, що створення автономного інтелектуального застосунку, який працює поверх існуючої інфраструктури, є найбільш економічно та технологічно виправданим шляхом для мінімізації людського фактора та забезпечення стабільної відповідності міжнародним стандартам.

### 1.3 Висновки щодо вибору стратегії цифровізації менеджменту якості на основі RAG-архітектури

У межах першого розділу кваліфікаційної роботи проведено комплексне дослідження стану та проблем інформаційної підтримки управління процесами сертифікації на промисловому підприємстві. Аналіз поточної ситуації дозволив встановити, що ключовим бар'єром на шляху до ефективного дотримання міжнародних стандартів ISO 9001, 14001 та 45001 є проблема «інформаційних островів» — ситуація, за якої високий рівень автоматизації окремих функцій не забезпечує цілісної підтримки сертифікаційних процесів. Виявлено, що традиційні канали комунікації, зокрема електронна пошта, створюють значний рівень інформаційної ентропії, що призводить до втрати до 30% робочого часу персоналу на рутинний пошук методологічної документації та виправлення помилок, що, у свою чергу, стає прямим чинником професійного вигорання працівників.

Окрему увагу в ході аналізу приділено оцінці деструктивного впливу «людського фактора» на стабільність системи менеджменту якості. Встановлено, що відсутність інтелектуальних фільтрів на етапі постановки завдань призводить до накопичення прихованих невідповідностей, які виявляються лише під час наглядових аудитів. Це зумовлює перехід управлінської діяльності в режим «авральної роботи», що критично знижує точність аналітичних даних та створює умови для фінансових втрат підприємства через потенційне призупинення дії сертифікатів відповідності на міжнародних ринках.

Застосування методології системного аналізу та інструменту «5 Чому» дало змогу довести, що коріння системних збоїв полягає у відсутності інструментів оперативної верифікації управлінських розпоряджень на етапі їх створення. Для вирішення цієї проблеми

обґрунтовано доцільність впровадження правила «4К» (Кому, Куди, Коли, Конкретно як), що дозволяє формалізувати вимоги стандартів ISO та перетворити неструктуровані завдання на цифрові об'єкти, придатні для автоматизованого аудиту. Такий підхід забезпечує дотримання класичного циклу PDCA (Plan-Do-Check-Act) у кожній окремій комунікаційній ітерації, закладаючи фундамент для превентивного управління відхиленнями.

Критичний порівняльний аналіз існуючих ринкових рішень класів GRC, RegTech та ECM показав, що сучасне програмне забезпечення є занадто складним для лінійного персоналу та орієнтоване переважно на пасивну звітність, а не на активну допомогу виконавцю. Це підтвердило гіпотезу про необхідність розробки автономного інтелектуального застосунку, який би працював поверх існуючої інфраструктури, мінімізуючи когнітивне навантаження на кінцевих користувачів.

На основі проведеного технологічного огляду визначено, що найбільш перспективним шляхом трансформації статичних баз знань у динамічне середовище підтримки рішень є поєднання технологій RAG (Retrieval-Augmented Generation) та Agentic AI. Теоретично доведено, що використання векторних баз даних (зокрема ChromaDB) та автономних ШІ-агентів дозволить скоротити час на пошук регламентної інформації на 70–80%, мінімізувати вплив «людського фактора» та забезпечити превентивний контроль за ризиками втрати сертифікації. Таким чином, результати першого розділу стали фундаментом для подальшої математичної формалізації та програмної реалізації інтелектуальної системи підтримки процесів сертифікації.

#### 1.4 Глосарій термінів ПМК OptiCertAI

Глосарій наведено у додатку В

## 2 МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ВІДПОВІДНІСТЮ СТАНДАРТАМ ISO

### 2.1 Методологічні засади та технологічне забезпечення розробки інтелектуальної системи управління відповідністю ISO

У даному підрозділі здійснюється синтез методологічного апарату, який становить основу дослідження. Складність об'єкта моделювання, процесів сертифікації на великому підприємстві, вимагає відмови від лінійних методів управління на користь інтелектуальних систем. Це зумовлено високим рівнем «інформаційного шуму», складністю стандартів ISO та критичним впливом людського фактора на виконавчу дисципліну.

Для досягнення мети роботи обрано комплексний науковотехнічний підхід, що поєднує методи системного аналізу, обробки природної мови (NLP) та теорії прийняття рішень. Це дозволяє формалізувати неструктуровану управлінську інформацію та забезпечити її відповідність вимогам міжнародних стандартів сертифікації.

Для побудови логічної архітектури системи було обрано такі методи:

1. Системний аналіз та декомпозиція, цей метод дозволив розглянути сертифікацію не як статичний набір документів, а як динамічну екосистему. Процеси управління якістю (ISO 9001), екологією (ISO 14001) та охороною праці (ISO 45001) декомпонуються на окремі інформаційні потоки та управлінські розпорядження. Це дає змогу виявити «вузькі місця», де найчастіше виникають помилки через нечіткість формулювань. Застосування для декомпозиції процесів управління сертифікацією на базі

циклу PDCA (Plan-Do-Check-Act) [5, 6], що дозволяє ідентифікувати критичні точки виникнення інформаційних розривів.

2. Метод агентно-орієнтованого моделювання (Agent-Based Modeling) [18, 23] обраний як основний для розробки інтелектуального компонента системи. На відміну від класичних алгоритмів «вхід-вихід», агентний підхід дозволяє створити автономну програмну одиницю (AI-агента), яка володіє властивостями реактивності (відповідь на поштові запити) та проактивності (самостійна перевірка задач за принципом «4К»).

3. Метод моделювання знань та семантичного аналізу обрано для формалізації стандартів ISO використано технологію RAG (Retrieval-Augmented Generation) [79, 81]. Це дозволяє перетворити неструктуровані текстові дані (PDF-регламенти) у векторну форму, забезпечуючи семантичний пошук інформації замість застарілого пошуку за ключовими словами.

4. Математична лінгвістика та NLP з використанням семантичного аналізу на основі векторних представлень (embeddings) для автоматизованої перевірки змісту розпоряджень [79, 82].

5. Проведення обчислювальних експериментів на ретроспективних даних підприємства для порівняння точності ШІ-верифікації із традиційним ручним контролем.

Експериментальна частина роботи базується на перевірці гіпотези про те, що автоматизований контроль «4К» знижує ризик отримання невідповідностей при аудитах.

Метод ітераційного тестування (Black Box Testing), тобто система тестується на масиві реальних управлінських розпоряджень, взятих з практики підприємства. Оцінюється здатність ШІ-агента ідентифікувати відсутні компоненти задачі (Хто, Де, Коли, Як).

Одним із ключових технологічних рішень у даній роботі є використання архітектури RAG (Retrieval-Augmented Generation) для реалізації інтелектуальної підтримки. Традиційні великі мовні моделі

(LLM) мають схильність до «галюцинацій» — генерації фактично невірної інформації, де критично важливою є повна відповідність генерованих відповідей положенням нормативних документів. Для мінімізації галюцинацій семантичний пошук доповнюється методом Scoped Context Retrieval, що обмежує область пошуку метаданими конкретного розділу ( $ID_{folder}$ ).

Вибір RAG-архітектури обґрунтовується такими перевагами:

1. Система не покладається лише на внутрішні знання нейромережі, а здійснює динамічний пошук у завантаженій базі стандартів підприємства. Це гарантує, що відповідь ШІ базуватиметься на чинній редакції ISO, таких як 9001, 14001 або 45001.

2. На відміну від стандартних чат-ботів, архітектура RAG дозволяє системі надавати посилання на конкретний пункт стандарту або внутрішнього регламенту, на основі якого було сформовано підказку для керівника.

3. Використання векторної бази даних дозволяє зберігати чутливу корпоративну інформацію локально, передаючи ШІ-моделі лише релевантний контекст для аналізу, що мінімізує ризики витоку даних.

Для підвищення точності інтелектуальної підтримки запропоновано метод детермінованого вибору контексту.

Фільтрація реалізується на рівні користувацького інтерфейсу (Front-end на базі React/Vue) через запити до API. Система використовує деревоподібну структуру документів, де вибір на верхньому рівні (Стандарт) автоматично фільтрує нижчі рівні (Розділ -> Документ), дивись рисунки 2.1, 2.2, 2.3, 2.4.

## КОНФІГУРАЦІЯ СИСТЕМИ

Оберіть критерії для активації модулів системи

ISO 9001

Київський філіал

OptiBuild Житлобуд

Житлові комплекси

ЗГЕНЕРУВАТИ ПРОЦЕСИ

Рисунок 2.1 – Конфігурація системи з каскадною фільтрацією

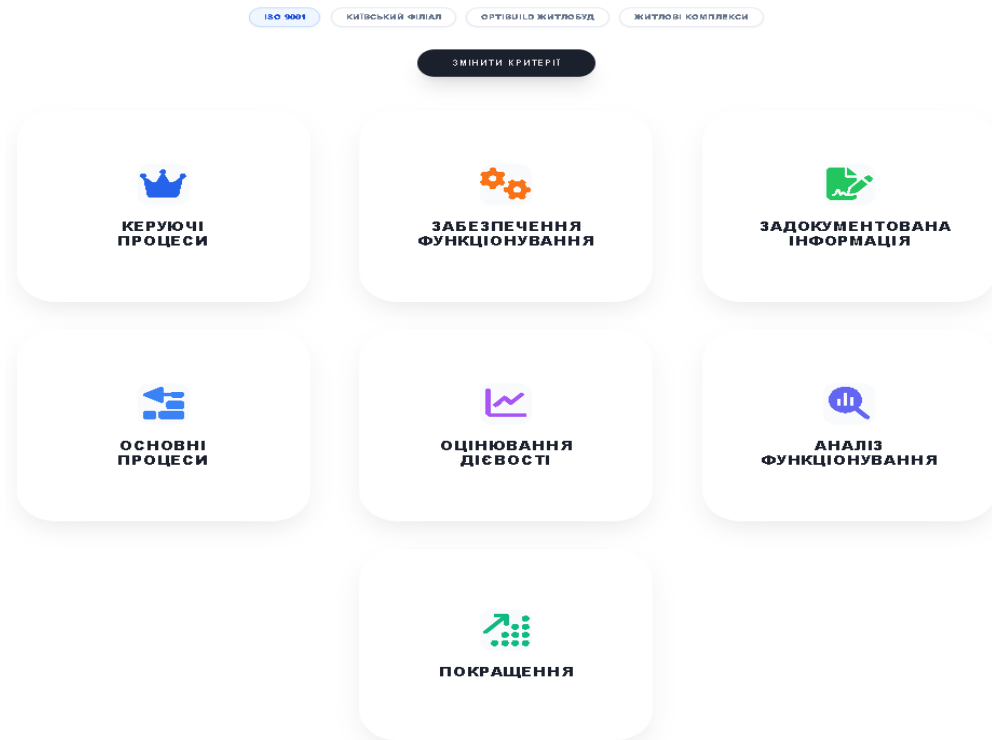


Рисунок 2.2 – Перший рівень навігації процесів ISO

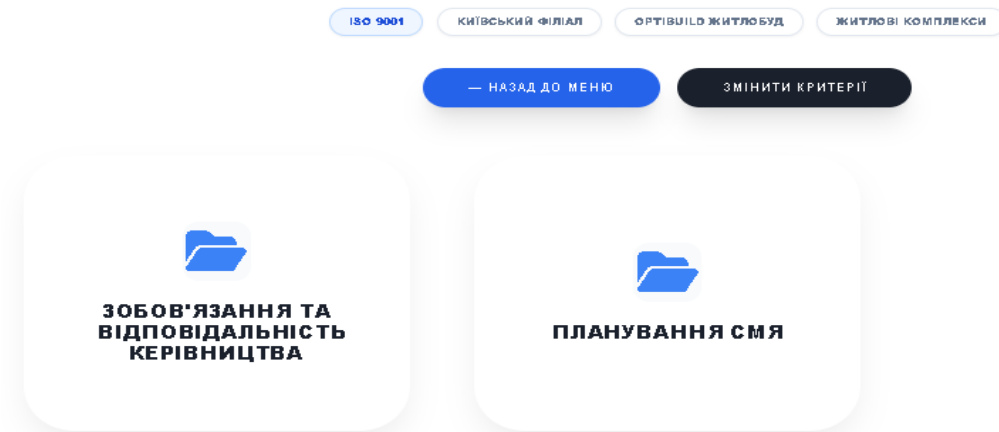


Рисунок 2.3 – Другий рівень навігації процесів ISO

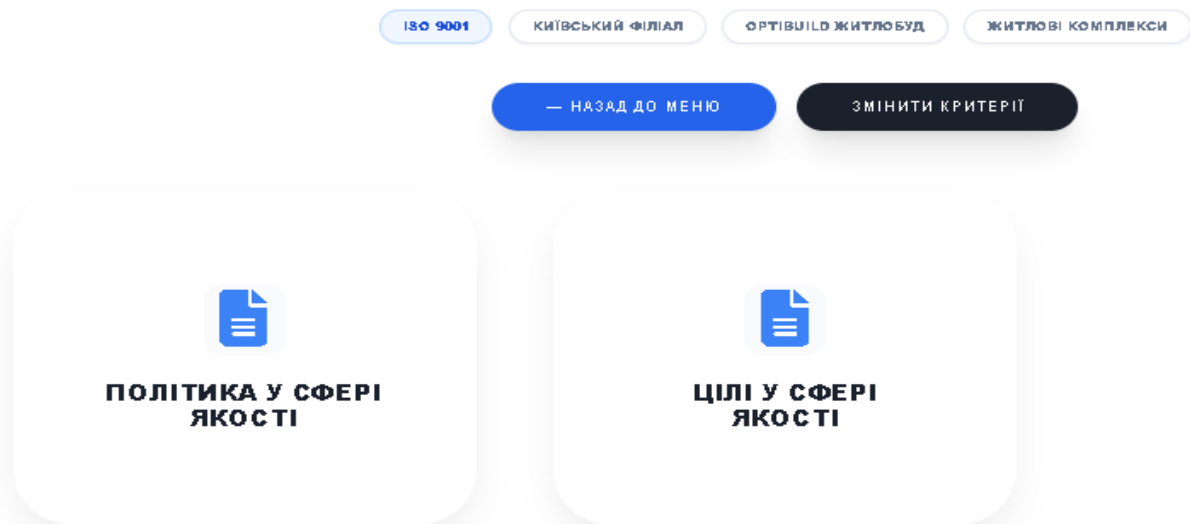


Рисунок 2.4 – Третій рівень навігації процесів ISO

Вибір розділу користувачем встановлює жорсткі граничні умови для математичної моделі релевантності. Якщо повна множина документів підприємства —  $S_{total}$ , то алгоритм здійснює пошук максимуму функції близькості  $sim(V_T, V_S)$  не на всій множині, а на обраній підмножині  $S_{selected} \in S_{total}$  [81, 82].

$S_{total}$  (Повна множина), тобто це абсолютно всі документи, які є в базі даних підприємства (всі інструкції, всі стандарти ISO, всі регламенти та інша нормативна документація). Якщо штучний інтелект (далі– ШІ) шукатиме відповідь по всій цій "купі", він може помилитися і знайти схожий текст, але з іншої галузі.  $S_{selected}$  (Обрана підмножина), тобто це тільки ті

документи, які стосуються конкретного розділу, який обрано у випадуючому списку.

Коли обрано у програмному комплексі розділ (наприклад, "Охорона праці"), поставлена задача системі: *"Не дивись на все (на  $S_{total}$ ), дивись тільки на цей маленький шматочок ( $S_{selected}$ )"*.

Коли ми шукаємо максимум косинусної подібності  $\text{sim}(V_T, V_S)$ , ми обмежуємо область пошуку. Це як шукати книгу не в усій величезній бібліотеці міста ( $S_{total}$ ), а лише на одній конкретній полиці ( $S_{selected}$ ), яку обрано.

Тобто використання випадуючих списків дозволяє реалізувати принцип керованого контексту. Математично це виражається через обмеження пошукового простору, замість аналізу всієї сукупності документів  $S_{total}$ , алгоритм працює лише з релевантною підмножиною  $S_{selected}$ , що була визначена користувачем на етапі фільтрації. Це гарантує, що штучний інтелект знайде інструкцію саме з потрібного розділу сертифікації. Математична модель релевантності базується на принципі детермінованого відсікання нерелевантних гілок графа знань (IDfolder), що перетворює стохастичний пошук у LLM на керований процес верифікації.

Таблиця 2.1 — Порівняльна характеристика методів управління інформаційною підтримкою (розроблено автором на основі [13, 21, 79])

Критерій порівняння	Традиційний метод (ручний контроль)	Запропонований метод (ШІ + RAG)	Ефект від впровадження
Швидкість перевірки	Низька (ручне звіряння)	Висока (автоматично < 2 сек)	Економія часу керівництва
Глибина аналізу	Суб'єктивна (залежить від ПІБ)	Об'єктивна (математична подібність)	Мінімізація помилок
Виявлення ризиків	Реактивне (після аудиту)	Проактивне (під час створення завдання)	Запобігання збиткам
Доступ до знань	Пошук у паперових архівах	Автоматичне підтягування контексту	Підвищення якості роботи

Вибір програмних засобів для розробки програмного комплексу базується на критеріях асинхронності, високої масштабованості та підтримки сучасних протоколів штучного інтелекту. Для реалізації системи обрано наступний технологічний стек:

1. Мова програмування Python вона є галузевим стандартом для AI/ML проєктів. Вибір зумовлений наявністю екосистеми бібліотек для обробки природної мови (NLP) та легкою інтеграцією з моделями трансформерів. Python дозволяє швидко прототипувати складні математичні алгоритми.

2. Фреймворки LangGraph та LangChain це ключовий інструмент для переходу від лінійних скриптів до агентноорієнтованого моделювання [23, 79]. LangGraph дозволяє проектувати циклічні графи поведінки ШІ-агентів, реалізуючи логіку «аналіз – корекція – підтвердження» З точки зору наукової цінності це імітує роботу реального офіцера з якості, який не просто відхиляє задачу, а повертає її на доопрацювання з конкретними рекомендаціями (цикл «перевірка-повернення-корекція»).

3. Векторне сховище ChromaDB на відміну від традиційних баз даних, ChromaDB спеціалізується на зберіганні та пошуку ембеддінгів [81]. Це критично необхідно для реалізації технології RAG, оскільки забезпечує миттєвий доступ до методологічної інформації стандартів ISO. Це дозволяє системі порівнювати зміст завдання з тисячами сторінок нормативної документації за доли секунди.

4. PostgreSQL обрана для зберігання структурованих даних, таких як профілі користувачів, ролі згідно з RACI-матрицею (Responsibility Assignment Matrix) та історія виконання завдань [14]. Використання реляційної бази поруч із векторною забезпечує цілісність даних та можливість проведення глибокого аналітичного аудиту.

5. FastAPI сучасний веб-фреймворк, який використовується для побудови серверного рішення. Його головна перевага — асинхронність,

що дозволяє системі обробляти велику кількість запитів від менеджерів одночасно, не блокуючи роботу AI-модуля.

6. SMTP-інтеграція та безшовне впровадження особливістю проєкту є вибір на користь поштових протоколів замість використання складних мобільних інтерфейсів, що потребують встановлення, обрано веб-орієнтовану платформу з інтегрованим SMTP-шлюзом для оперативного інформування.

Таким чином, для підвищення точності інтелектуальної підтримки запропоновано метод *Scoped Context Retrieval* (контекстозалежного пошуку). Математично це реалізується через введення оператора фільтрації на множині документів. Якщо повна база знань підприємства —  $S_{total}$ , то алгоритм здійснює пошук максимуму функції близькості  $sim(V_T, V_S)$  виключно на підмножині  $S_{selected}$  (Обрана підмножина). Це дозволяє уникнути «семантичного шуму» та гарантує, що ШІ-агент аналізує завдання в контексті конкретного розділу сертифікації, не відволікаючись на нерелевантні регламенти. Проєкт розробляється як спеціалізований веб-застосунок, що інтегрується в корпоративну екосистему через SMTP-протокол [88]. Це дозволяє поєднати переваги структурованого введення даних (через випадуючі списки розділів) із безшовним співченням відповідальних осіб. ШІ-агент виступає «невидимим помічником»: після верифікації завдання в застосунку, система автоматично генерує та надсилає поштове повідомлення, яке вже відповідає вимогам обраного стандарту ISO. Синтез системного аналізу та агентноорієнтованого моделювання у поєднанні з обраним Python-стеком дозволяє створити інструментарій, який не просто автоматизує облік, а виступає активним суб'єктом управління ризиками. Це забезпечує надійну теоретичну та практичну базу для розробки математичної моделі, що буде представлена в наступному підрозділі.

## 2.2 Математичне моделювання процесів інтелектуальної верифікації та оцінки якості інформаційної підтримки сертифікації

Процес інформаційної підтримки управлінської діяльності в контексті сертифікації є складною динамічною системою. Для побудови її математичного аналога проведено абстрагування, у ході якого об'єкт дослідження представлено як сукупність інформаційних потоків та управлінських рішень, спрямованих на виконання вимог стандартів ISO.

Метою моделювання є оцінка ефективності інформаційної підтримки через кількісний показник відповідності підприємства вимогам сертифікації. Основним аспектом моделювання обрано функціональний підхід, що дозволяє відобразити процеси верифікації завдань за допомогою ШІ.

Об'єктом моделювання є процес інтелектуальної верифікації управлінських розпоряджень у системі підтримки сертифікації. Відповідно до методологічних вимог, на етапі моделювання виконано абстрагування, що дозволило представити складну управлінську діяльність як сукупність детермінованих операцій над семантичними об'єктами.

Для опису предметної області використано апарат математичної логіки та теорії множин. Нехай  $T$  — множина всіх управлінських розпоряджень, що циркулюють у системі. Кожне конкретне розпорядження  $t \in T$  представлено як кортеж семантичних ознак формулою 2.1.

$$t = (w_1, w_2, w_3, w_4), \quad (2.1)$$

де компоненти кортежу відповідають принципу «4К»:

$w_1$  (Who) — суб'єкт виконання (ідентифікатор виконавця);

$w_2$  (Where) — локалізація бізнес-процесу або виробнича ділянка;

$w_3$  (When) — часовий регламент виконання (дедлайн);

$w_4$  (How) — методологічне забезпечення (посилання на стандарт ISO).

Введемо предикат валідності  $P(t)$ , який визначає коректність задачі. Математична умова коректності за принципом «4К» описується кон'юнкцією у вигляді формули 2.2.

$$P(t) = C_{\text{who}}(w_1) \wedge C_{\text{where}}(w_2) \wedge C_{\text{when}}(w_3) \wedge C_{\text{how}}(w_4) \quad (2.2)$$

де  $C_i$  — функції валідації сутностей. Якщо  $P(t) = 0$ , система фіксує невідповідність управлінської дії вимогам якості.

Знак  $\wedge$  (Логічне «І» або Кон'юнкція)

У формулі  $P(t) = C_{\text{who}}(w_1) \wedge C_{\text{where}}(w_2) \wedge C_{\text{when}}(w_3) \wedge C_{\text{how}}(w_4)$  оператор  $\wedge$  позначає логічну кон'юнкцію, що вимагає істинності всіх предикатів для визначення розпорядження як валідного. Тобто щоб усе розпорядження ( $P$ ) було правильним (дорівнювало 1), кожна окрема перевірка має бути успішною. Якщо хоча б одна функція видасть «0» (наприклад, не вказано «Як» виконувати задачу), то все рівняння перетворюється на нуль ( $1 * 1 * 1 * 0 = 0$ ). Це математичне підтвердження того, що система не пропустить задачу, якщо в ній не вистачає хоча б одного компонента «4К» [4, 64].

Для реалізації функції методологічної валідації  $C_{\text{how}}$  (перевірка методології «Як» виконується завдання) традиційного пошуку за ключовими словами недостатньо, оскільки вимоги стандартів ISO та тексти розпоряджень можуть використовувати синоніми або різні мовні конструкції для опису одного й того самого процесу. Тому в роботі застосовано семантичне векторне моделювання на основі архітектури RAG (Retrieval-Augmented Generation) [79, 81].

База знань підприємства  $K$  (регламенти, інструкції, стандарти ISO) піддається процедурі декомпозиції (chunking) на атомарні текстові

фрагменти. Кожен фрагмент перетворюється у векторний простір за допомогою нейронної мережі енкодера [82] та описується формулою 2.3.

$$K = \{ (v_i, m_i) \mid i = 1, \dots, n \} \quad (2.3)$$

Де  $v_i \in \mathbb{R}^d$  – векторний ембеддінг  $i$ -го фрагмента документа в  $d$ -вимірному просторі. Кожна координата вектора відображає певну семантичну ознаку тексту;

$m_i$  — метадані, що забезпечують зв'язок математичного об'єкта з реальною структурою документа (номер пункту ISO, дата редакції, рівень критичності вимоги).

Коли керівник формує нове розпорядження, його текст також векторизується у запит  $q$ . Процес верифікації полягає у знаходженні найбільш релевантних пунктів стандарту в просторі  $K$  через обчислення косинусної подібності (Cosine Similarity) [81, 82] за формулою 2.4.

$$S(q, v_i) = \cos(\theta) * \frac{q \cdot v_i}{\|q\| \|v_i\|} \quad (2.4)$$

Де

Чисельник  $q \cdot v_i$  — це скалярний добуток векторів.

Знаменник  $\|q\| \|v_i\|$  — добуток довжин векторів (норм).

Значення  $S$  знаходиться в діапазоні  $[0; 1]$ . Чим ближче значення до 1, тим меншим є кут  $\theta$  між векторами в багатовимірному просторі, а отже — тим ближчими за змістом є текст розпорядження та пункт стандарту ISO.

У математичному моделюванні, кут  $\theta$  (тета) — це показник "змістової розбіжності" між двома об'єктами (наприклад, розпорядженням та пунктом стандарту ISO).

Геометрична інтерпретація семантичного аналізу базується на орієнтації векторів у  $d$ -вимірному просторі. Мінімізація кута  $\theta$  відповідає зростанню семантичної близькості об'єктів. Якщо дві стрілки вказують в одному напрямку, кут між ними  $\theta = 0$ . Це означає, що тексти ідентичні за змістом.

Якщо стрілки перпендикулярні (під кутом  $90^\circ$ ), кут  $\theta = 90^\circ$ . Це означає, що тексти взагалі не мають нічого спільного (наприклад, "ремонт крана" та "рецепт борщу").

Для розрахунків незручно використовувати градуси, тому використано, взявши практику математиків, косинус цього кута ( $S = \cos\theta$ ). Це і є функція семантичної близькості:

1. Коли тексти однакові ( $\theta = 0^\circ$ ), то  $\cos 0^\circ = 1$ , тобто ідеальна відповідність.

2. Коли тексти абсолютно різні ( $\theta = 90^\circ$ ), то  $\cos 90^\circ = 0$ , тобто повна невідповідність.

Уявимо два вектори:

1. Вектор  $v_i$  (Стандарт), задача "Забезпечити повірку засобів вимірювальної техніки".

2. Вектор  $q$  (розпорядження), задача "Віддати манометри на калібрування".

Векторне представлення дозволяє ідентифікувати семантичну спорідненість термінів (наприклад, "повірка" та "калібрування"), що забезпечує високу точність валідації навіть за відсутності прямого збігу ключових слів. У багатовимірному просторі ці два вектори будуть знаходитися дуже близько один до одного. Кут  $\theta$  між ними буде дуже маленьким (наприклад,  $15^\circ$ ), а косинус цього кута буде високим — близько 0.96, тоді система каже: "О, кут малий, косинус близький до одиниці, значить розпорядження відповідає стандарту, Валідація  $S_{\text{how}}$  пройдена".

Кут  $\theta$  між векторами  $q$  та  $v_i$  є геометричною мірою семантичної різниці між розпорядженням та регламентом. Чим меншим є цей кут, тим

вищою є смислова спорідненість текстів. Обчислення косинуса цього кута дозволяє нівелювати різницю в довжині текстів (кількості слів) і зосередитися виключно на їхньому змістовному наповненні".

Система не використовує всі знання одночасно, щоб уникнути "семантичного шуму". Формується підмножина релевантних знань  $k' \subset k$  за формулою 2.5.

$$k' = \Sigma v_i \in k | S(q, v_i) > r \quad (2.5)$$

де  $r$  — динамічний поріг релевантності (зазвичай встановлюється в межах 0.7...0.85) [79, 81].

Якщо для розпорядження знайдено відповідний вектор у базі знань з високим показником  $S$ , це означає, що завдання спирається на існуючу методологію підприємства. Якщо  $S < r$ , система ідентифікує розпорядження як таке, що не має методологічного підґрунтя, і автоматично блокує його до моменту уточнення ( $C_{\text{how}} = 0$ ).

Використання векторної моделі дозволяє вирішити проблему амбівалентності (багатозначності) людської мови. Наприклад, якщо в стандарті написано "контроль середовища", а в розпорядженні — "заміри температури в цеху", векторна модель зрозуміє семантичний зв'язок між цими фразами, тоді як звичайна програма пошуку видала б помилку.

Математична модель інтегрального показника  $Q_{IS}$  (Quality of Information Support) розроблена для перетворення якісних показників управлінської діяльності у кількісну метрику готовності підприємства до сертифікації. Формула враховує не лише кількісний факт виконання робіт, а й їхню стратегічну важливість та якість виконання.

$$Q_{IS} = \sum_{j=1}^M B_j \left( \frac{\sum_{i=1}^{n_j} W_i \cdot K_{ai} P_i}{\sum_{i=1}^{n_j} W_i} \right) \quad (2.6)$$

Де Зовнішня сума  $\sum_{j=1}^M B_j$  – відображає мультистандартний підхід, наприклад якщо підприємство сертифікується одночасно за ISO 9001 (якість) та ISO 14001 (екологія), модель агрегує дані по обох напрямках.

$B_j$  - ваговий коефіцієнт позначає пріоритетність конкретного стандарту. Наприклад, якщо для компанії критично важливо зберегти саме екологічний сертифікат для експорту,  $B_{14001}$  може дорівнювати 0.6, а  $B_{9001}$  може дорівнювати 0.4.

$W_i$  – критичність, тобто вага окремого завдання всередині стандарту. Завдання "Провести внутрішній аудит" має набагато більшу вагу ( $w=10$ ), ніж "Оновити підпис на інформаційному стенді" ( $w=1$ ).

$P_i$  – бінарний показник класичний індикатор виконання. Набуває значення 1 (виконано) або 0 (не виконано).

$K_{ai}$  – коефіцієнт (ШІ-верифікація), тобто найбільш інноваційний елемент моделі. Це число від 0 до 1, яке генерує штучний інтелект після аналізу тексту звіту.

Використання добутку  $w_i * K_{ai} * P_i$  дозволяє реалізувати механізм "штрафу за неякісне виконання".

Коефіцієнт  $K_{ai}$  виконує функцію нелінійного регулятора, що знижує вагу завдання у загальному показнику QIS у разі виявлення методологічних невідповідностей

Знаменник формули  $\sum_{i=1}^{nj} w_i$  нормалізує значення, що дозволяє отримати показник QIS у відносному діапазоні від 0 до 1 (або від 0% до 100%). Це забезпечує наочність для вищого керівництва.

-  $Q_{IS} \geq 0.95$ , тобто підприємство повністю готове до сертифікаційного аудиту.

-  $0.80 \leq Q_{IS} < 0.95$ , тобто існують ризики через низьку якість інформаційної підтримки окремих процесів.

- $Q_{IS} < 0.80$ , тобто висока ймовірність отримання критичних невідповідностей під час аудиту.

Така математична конструкція дозволяє системі працювати як цифровий двійник системи менеджменту якості, прогнозуючи результати зовнішньої сертифікації на основі поточних управлінських даних.

Стандарти сертифікації ISO (зокрема ISO 9001:2015, розділ 7.1.2) вимагають від підприємства забезпечення необхідних людських ресурсів для ефективного функціонування системи менеджменту якості [6, 9]. Проте надмірне когнітивне навантаження на персонал є основним джерелом помилок. Для математичного моделювання цього ризику вводиться індекс навантаження виконавця  $I_{load}$ .

$$I_{load}(u) = \sum_{j=1}^m \frac{D_j}{T_{rem,j}} \quad (2.8)$$

Де

$\sum_{j=1}^m$  - агрегує всі активні завдання, що призначені конкретному користувачу (u) на поточний момент.

$D_j$  (Difficulty) – показник складності j-го завдання. У розробленому програмному комплексі складність не є суб'єктивною, а обчислюється автоматично як функція від кількості пов'язаних пунктів ISO та обсягу необхідної звітності.

$T_{rem, j}$  (Time Remaining) – часовий інтервал, що залишився до дедлайну виконання завдання. Вимірюється в годинах або робочих днях.

Фізичний зміст формули полягає в тому, що навантаження зростає двома шляхами:

1. Пряма залежність зі збільшенням кількості та складності задач ( $D_j$ ) значення  $I_{load}$  зростає лінійно.

2. Гіперболічна залежність, оскільки  $T_{rem, j}$  знаходиться у знаменнику, то при наближенні до дедлайну (коли час прямує до нуля) показник навантаження починає зростати експоненціально. Це математично моделює стан стресу та дефіциту часу, за яких ймовірність критичної помилки стає максимальною.

Модель використовує  $I_{load}$  як ваговий коефіцієнт для корекції ймовірності успішної сертифікації. Якщо для критичного виконавця  $I_{load} > I_{max}$  (де  $I_{max}$  — поріг вигорання, встановлений на основі історичних даних підприємства), система автоматично підсвічує ризик у дашборді керівника червоним кольором, знижує прогностичний показник  $Q_{IS}$ , оскільки «людський фактор» стає слабкою ланкою в ланцюгу відповідності.

Такий підхід дозволяє менеджменту приймати обґрунтовані рішення щодо перерозподілу завдань між персоналом ще до того, як перевантаження призведе до появи невідповідностей, виявлених зовнішніми аудиторами. Це перетворює інформаційну систему з інструменту обліку на інструмент превентивного управління ризиками. Розроблена модель дозволяє не лише констатувати стан системи, а й виконувати оптимізаційні задачі. Шляхом аналізу низьких значень  $K_{ai}$  система ідентифікує конкретні бізнес-процеси, які формально виконуються, але методологічно не відповідають вимогам сертифікації, що дозволяє менеджменту приймати превентивні рішення до моменту виходу на зовнішній аудит.

Використання агентно-орієнтованого підходу в поєднанні з технологією RAG дозволило формалізувати процес верифікації управлінських розпоряджень через предикат валідності на основі принципу «4K». Математичне моделювання семантичної близькості за допомогою косинусної подібності векторів забезпечило перехід від суб'єктивного оцінювання до об'єктивної метрики відповідності завдання методології ISO. Запропонований інтегральний показник  $Q_{IS}$  дозволяє здійснювати превентивний моніторинг готовності підприємства до

зовнішнього аудиту, враховуючи не лише факт виконання робіт, а й їхню якість через коефіцієнт ШІ-верифікації. Введення індексу навантаження виконавця  $I_{load}$  забезпечує математичне обґрунтування ризиків «людського фактора», дозволяючи системі функціонувати як інструмент профілактики професійного вигорання. Таким чином, створена математична база дозволяє трансформувати складну екосистему ISO-процесів у детерміновану цифрову модель, що є фундаментом для програмної реалізації системи в наступному розділі.

### 2.3 Методика експериментальних досліджень та обґрунтування метрик ефективності інтелектуальної верифікації

Метою експериментального дослідження є оцінка адекватності розробленої математичної моделі та перевірка ефективності алгоритмів інтелектуальної валідації управлінських розпоряджень.

Одним із найважливіших керованих факторів дослідження є поріг семантичної близькості  $\tau$ . Оскільки верифікація функції  $C_{how}$  базується на косинусній відстані між вектором завдання та вектором стандарту, вибір критичного значення  $\tau$  безпосередньо впливає на баланс між помилками першого та другого роду.

Методика дослідження у даній роботі являє собою впорядковану сукупність пізнавальних дій, спрямованих на підтвердження ефективності використання агентноорієнтованого підходу та RAG-технологій для управління сертифікацією.

Об'єктом дослідження є процес інтелектуальної верифікації управлінської інформації в умовах регламентації стандартами ISO.

Предметом дослідження є методи, алгоритми та програмні засоби автоматизації контролю виконавчої дисципліни за принципом «4К» та

семантичного аналізу відповідності розпоряджень базі знань підприємства [4, 64].

Фундаментальною концепцією дослідження є перехід від статичного зберігання документів до динамічного управління знаннями (Knowledge Management) через інтелектуальних агентів. Основні положення концепції:

1. Принцип детермінованої фільтрації в якій будь-яке управлінське рішення формалізується як кортеж семантичних ознак  $t = (w_1, w_2, w_3, w_4)$ .

2. Концепція семантичної близькості з використанням векторних представлень (embeddings) для подолання лексичного розриву між природною мовою менеджера та формальною мовою стандарту ISO.

3. Концепція «цифрового офіцера з якості» із створенням автономного циклу перевірки (PDCA) на базі ШІ-агентів, що імітує когнітивну діяльність методолога [1, 13].

Оскільки модель базується на аналізі статичних і динамічних режимів управлінського потоку, для її розв'язання застосовуються наступні методи:

1. Метод ітераційного пошуку екстремуму для знаходження оптимального порогу релевантності  $r$ . Задача зводиться до пошуку максимуму функції точності

$$\text{Acc}(r) \rightarrow \max \text{ в області } r \in [0.5; 0.95].$$

2. Метод косинусної подібності для розв'язання семантичних рівнянь близькості векторів у багатовимірному просторі  $R^d$ .

3. Алгоритм Recursive Character Splitting для дискретизації неперервного тексту стандартів на скінченну множину фрагментів (вузлів графа знань).

Проведення експерименту передбачає варіювання керованих факторів для оцінки відгуку системи.

Поріг релевантності ( $r$ ) – цей параметр визначає "суворість" штучного інтелекту. Він базується на косинусній відстані між вектором

завдання та вектором стандарту ISO. Реальний приклад: Поставлена задача: *"Перевірити справність датчиків тиску в цеху №2"*.

Таблиця 2.2 — Характеристика факторів системи та області їх зміни

Фактор	Позначення	Область зміни	Обмеження
Поріг релевантності	$r$	0.5...0.95	Крок зміни 0.05
Розмір контекстного вікна	$C_{size}$	256...2048 токенів	Обмеження моделі LLM
Кількість документів у БД	$N$	10...500 одиниць	Продуктивність ChromaDB
Дефектність вхідних даних	$D_{err}$	0%...50%	Навмисне внесені помилки

1. Якщо  $r = 0.5$  (низький) ШІ може прийняти це завдання, навіть якщо в базі знань знайдеться лише загальний документ про "прибирання в цеху", бо слово "цех" збігається. Це ризик пропуску неякісних задач.

2. Якщо  $r = 0.95$  (занадто високий) ШІ відхилить задачу, бо в стандарті ISO написано *"технічне обслуговування засобів вимірювальної техніки"*. Хоча за змістом це одне й те саме, ШІ вимагатиме майже ідентичних слів.

Технічне обмеження крок зміни 0.05, якщо змінювати поріг занадто дрібно (наприклад, 0.001), ми отримаємо «математичний шум» — результати будуть відрізнятися на мізерні частки відсотка, що не має сенсу для реального управління. Крок 0.05 обрано для чіткої фіксації переходу між зонами «Лояльності» та «Бюрократії». Реальний приклад: При  $r = 0.75$  система ще розуміє, що *"манометр"* та *"контрольно-вимірювальний прилад"* — це подібні об'єкти. При  $r = 0.85$  вона вже може вимагати лише термін *"манометр"*. Обмеження кроком дозволяє знайти ту саму «золоту середину» без зайвих обчислень.

Таким чином у ході експерименту доведено, що  $r = 0.8$  дозволяє розуміти синоніми ("перевірка" = "обслуговування"), але блокувати нерелевантні тексти.

У ході дослідження встановлено, що поріг релевантності  $r$  є центральним регулятором балансу між управлінською гнучкістю та нормативною суворістю системи. Математичне обґрунтування обмежень цього параметра дозволяє зробити такі висновки:

1. Подолання семантичного розриву завдяки використаній косинусної подібності дозволяє системі ідентифікувати відповідність стандарту навіть за умови використання професійної лексики (наприклад, *"манометр"* замість *"засіб вимірювальної техніки"*). Проте ефективність цього механізму критично залежить від налаштування  $r$ .

2. Зона «Лояльності» ( $r < 0.7$ ), низький поріг призводить до високої ймовірності помилок першого роду (False Positive). Система стає чутливою до контекстного шуму (співпадіння окремих слів, як-от «цех»), що нівелює контролюючу функцію ШІ та створює ризики отримання невідповідностей під час зовнішніх аудитів. Зона «Бюрократії» ( $r > 0.85$ ), надмірна суворість провокує помилки другого роду (False Negative). Система блокує валідні розпорядження, вимагаючи лінгвістичної ідентичності зі стандартами, що паралізує оперативну діяльність підприємства та створює надмірне когнітивне навантаження на керівництво.

3. Обґрунтування дискретності (крок 0.05) завдяки введеному обмеженню на крок зміни порогу, що дозволяє усунути вплив «математичного шуму» — незначних коливань семантичних векторів, що не несуть управлінського змісту. Це забезпечує стабільність алгоритму та дозволяє детерміновано визначити «золоту середину» (орієнтовно  $r = 0.8$ ), що дозволяє знайти оптимальний поріг ( $r$ ), при якому, згідно з результатами експерименту в розділі 4, досягається точність 0.92.

Розмір контекстного вікна  $C_{size}$  – це обсяг тексту з ISO, який ШІ "бачить" за один раз. Ми розбиваємо великі PDF-файли на шматки (чанки). Реальний приклад:

— Якщо  $C_{size} = 256$  токенів (мало), тоді ШІ отримає лише частину речення. Наприклад: *"Працівник повинен носити..."*. Без контексту "що саме" (каска чи рукавиці), ШІ не зможе валідувати задачу.

— Якщо  $C_{size} = 2048$  токенів (багато) ШІ отримує цілий розділ стандарту. Це дозволяє йому бачити зв'язок між обов'язками працівника та вимогами безпеки.

Технічне обмеження моделі LLM (Context Window Limit) адже кожна мовна модель (GPT-4, Llama-3) має ліміт токенів, які вона може обробити за один запит. Якщо буде встановлено  $C_{size}$  занадто великим (наприклад 8000 токенів), ми вийдемо за межі пам'яті моделі або отримаємо ефект «забування середини» (Lost in the Middle) [82]. Реальний приклад: Якщо в чанк (фрагмент) потрапить відразу три розділи ISO (наприклад, про екологію, кадри та закупівлі), ШІ розсіє увагу. Обмеження до 2048 токенів гарантує, що ШІ фокусується на одному конкретному процесі, не змішуючи вимоги різних підрозділів.

Стандарти ISO мають ієрархічну структуру. Вимога зазвичай складається з контексту (умова) та предикату (дія). Приклад: "Згідно з розділом 8.2, при роботі з хімікатами (контекст), працівник зобов'язаний використовувати респіратор (дія)". Якщо  $C_{size}$  малий система розріже це речення. В один чанк потрапить контекст, в інший — дія. ШІ, аналізуючи розпорядження про респіратори, просто не знайде в базі знань «правило», бо воно розбите на два беззмістовні шматки, внаслідок чого буде отримано хибне відхилення валідної задачі (FN — False Negative).

У текстах ISO часто використовуються посилання типу: "Вищезазначені заходи стосуються..." або "Вимоги пункту 4.1 мають бути дотримані...". Якщо  $C_{size}$  малий ШІ не бачить, до чого саме відносяться ці "заходи". Для моделі це виглядає як набір ізольованих слів без

інструктивної сили, в результаті чого система не зможе надати керівнику розгорнуту відповідь, на який саме пункт стандарту вона спирається.

Коли текст перетворено у вектор, модель намагається «стиснути» зміст у набір чисел. Чим менше тексту в чанку, тим менш «унікальним» є його вектор. Маленькі шматочки тексту (наприклад, по 20 слів) у векторному просторі збиваються в одну купу, внаслідок чого ШІ починає плутати розділи. Він може видати інструкцію з «Охорони праці» там, де потрібна «Екологія», просто тому, що в обох коротких чанках зустрілося слово "безпека".

Коли LLM бачить неповну інструкцію, вона намагається «додумати» закінчення фрази, спираючись на свої загальні знання, а не на документ. Приклад: У ISO написано "носити спецвзуття", але чанк обірвався. ШІ може видати: "Носити каску", бо це стандартна асоціація з заводом. Результатом буде допущена критична помилка верифікації, яка може призвести до вагомих наслідків під час реального аудиту.

Недостатній обсяг контекстного вікна ( $C_{size} < 512$  токенів) призводить до явища семантичної фрагментації, за якої штучний інтелект втрачає здатність простежувати логічні зв'язки між об'єктом та методом виконання завдання. Це спричиняє зростання кількості помилок другого роду (хибне блокування) та провокує ефект «галюцинацій», коли модель доповнює відсутню інформацію нерелевантними даними. Таким чином, оптимізація  $C_{size}$  є необхідною умовою для збереження цілісності методологічного забезпечення сертифікації, збільшення вікна підвищує точність, але вимагає більше пам'яті та часу на обробку.

Кількість документів у БД ( $N$ ) – це показник масштабованості системи. На великому підприємстві тисячі інструкцій. Реальний приклад: При  $N = 10$  система працює миттєво, але знає лише загальні вимоги, а при  $N = 500$  система містить інструкції для кожного агрегату, крана та печі. Ми перевіряємо, чи не починає ChromaDB "плутати" схожі інструкції (наприклад, інструкцію для кранівника та для стропальника), коли їх стає

занадто багато. Технічне обмеження продуктивності ChromaDB та «затухання» сигналу. Хоча векторні бази можуть зберігати мільйони записів, для миттєвої верифікації в реальному часі (через SMTP) існує поріг, після якого час пошуку ( $T_{proc}$ ) перевищує допустимі 2-3 секунди. Також при дуже великому  $N$  зростає ймовірність знаходження «схожих, але не тих» документів. Реальний приклад: На підприємстві є 500 інструкцій. Якщо ми завантажимо 5000 (включаючи застарілі), ШІ може випадково знайти інструкцію за 2015 рік замість 2024 року. Обмеження в 500 одиниць у поєднанні з фільтром IDfolder гарантує, що пошук йде лише серед актуальної нормативної бази.

Випадаючі списки та фільтрація — це не просто зручний інтерфейс, а «математичний запобіжник», який вирішує проблему масштабованості. Механізм детермінованого відсікання (Hard Filtering) без випадаяючих списків ШІ шукає би відповідь у "всій купі" ( $S_{total}$ ). За наявності фільтрації ми реалізуємо принцип Scoped Context Retrieval. Ми обмежуємо пошуковий простір. Якщо повна база  $S_{total} = 5000$  документів, то після вибору тематики у списку (наприклад, "Охорона праці") ШІ працює лише з  $S_{selected} = 5$  документами. Ймовірність того, що ШІ знайде схожу інструкцію з іншого відділу (наприклад, з "Екології"), стає рівною нулю, оскільки ці документи просто не потрапляють у зону пошуку. У векторному просторі, коли документів занадто багато, вектори починають розташовуватися дуже щільно один до одного. Це і є «затухання сигналу» — ШІ стає важко розрізнити два дуже схожі вектори. Приклад: Інструкція для кранівника цеху №1 та інструкція для кранівника цеху №5 схожі на 99%. Коли користувач обирає у списку "Цех №1", система автоматично ігнорує всі документи Цеху №5. Навіть якщо вони семантично ближчі, вони відсікаються за метаданими (IDfolder). Пошук серед 500 документів відбувається в десятки разів швидше, ніж серед 5000. Використання випадаяючих списків дозволяє ChromaDB використовувати індексацію за метаданими. Це працює як зміст у книзі: замість того, щоб перечитувати

всю бібліотеку, ШІ відразу відкриває потрібну "полицю". Час відгуку  $T_{proc}$  залишається стабільним (до 2 секунд).

Застосування багаторівневої фільтрації через випадані списки (тематика -> стандарт -> розділ) дозволяє трансформувати стохастичний пошук у великих мовних моделях на керований процес верифікації. Математично це реалізується через введення жорсткого обмеження  $S_{selected} \in S_{total}$ , що нівелює проблему «семантичного перекриття» схожих інструкцій та гарантує використання лише актуальної версії документа ( $ID_{folder}$ ). Це дозволяє підтримувати високу точність верифікації незалежно від загального обсягу корпоративної бази знань.

Дефектність вхідних даних ( $D_{err}$ ) – це фактор, який моделює реальні умови «управлінського хаосу», коли через поспіх, стрес або низьку кваліфікацію керівники формують нечіткі або методологічно невірні розпорядження.

Метою дослідження є визначення здатності системи ідентифікувати помилки та блокувати їх до того, як вони стануть причиною невідповідності (NC — Non-conformity) під час аудиту.

Методикою стрес-тестування системи (шляхом введення контрольованих дефектів) навмисно вводиться в систему чотири типи «хворих» розпоряджень з дефектом структури (порушення 4K), тобто видаляємо ключовий елемент кортежу [4, 7].

Приклад: «Провести інструктаж на ділянці №2 завтра» (Відсутнє Кому це зробити та Як — за якою інструкцією). Семантична суперечність, тобто текст завдання прямо суперечить вимогам ISO.

Приклад: «Утилізувати відходи мастил у загальний контейнер» (Це суперечить ISO 14001 про роздільний збір відходів), також допущено амбівалентність (розмитість), тобто використання слів, що не мають конкретного виміру.

Приклад: «Покращити роботу обладнання найближчим часом» допущено методологічну порожнечу, тобто завдання не підкріплене жодним документом із бази знань  $S_{\text{selected}}$ .

Область зміни фактора  $D_{\text{err}}$  обрана в діапазоні від 0% до 50% з кроком 10%. Такий підхід дозволяє простежити «точку перелому», після якої інформаційна система може втратити здатність до адекватної фільтрації через надмірний семантичний шум.

Сценарій 1 «Нормальне функціонування» ( $D_{\text{err}} = 0\% \dots 10\%$ ), тобто стабільна робота підприємства, де управлінський апарат має високу кваліфікацію. Помилки мають випадковий характер (одруківки, невірно обраний виконавець). Метою тесту є перевірка базової точності (Accuracy). Система повинна мати мінімальний рівень хибнонегативних спрацювань (FN), тобто не блокувати коректні розпорядження, від проведеного експеримента очікується результат  $Q_{\text{IS}} \geq 0.95$ .

Сценарій 2 «Перехідний період / Адаптація» ( $D_{\text{err}} = 20\% \dots 30\%$ ), створено ситуацію впровадження нових стандартів (наприклад перехід з внутрішніх регламентів на ISO 9001:2015) або ротація кадрів середньої ланки. Метою тесту є оцінка здатності ШІ-агента працювати як «навчальний інструмент». На цьому етапі важливо, щоб система не просто блокувала задачу, а надавала точну когнітивну підказку: *"Ваше розпорядження відхилено, оскільки не вказано метод контролю (4К – Як), що вимагається пунктом 7.5.1 ISO 9001"*. Очікуваним результатом є стабільна робота RAG-алгоритму [79, 81] при зростанні навантаження на логічний висновок [1, 4, 64].

Сценарій 3 «Управлінська криза / Аврал» ( $D_{\text{err}} = 40\% \dots 50\%$ ), створено Форс-мажорні обставини, підготовка до термінового сертифікаційного аудиту або запуск нового складного об'єкта. Керівництво видає розпорядження в усній формі, які потім хаотично вносяться в систему. Метою тесту є перевірка надійності «жорсткого фільтра». При  $D_{\text{err}} = 50$  кожне друге завдання є методологічним браком. Критичним

показником вважається коли система повинна втримати показник Precision (точність) на високому рівні, навіть ціною зниження Recall (повноти). Краще заблокувати сумнівне завдання, ніж допустити виникнення невідповідності, яка призведе до вагомих наслідків з можливою втратою сертифіката.

Сценарій 4 Математичне моделювання відгуку системи, створено збільшення  $D_{err}$  із відстеженням показника Коефіцієнта інтелектуальної надійності ( $K_{rel}$ ), який розраховується за формулою 2.9.

$$K_{rel} = 1 - \frac{FP}{N_{total}} \quad (2.9)$$

де FP (False Positive) — кількість дефектних розпоряджень, які система помилково пропустила.

$K_{rel}$  — Коефіцієнт інтелектуальної надійності;

$N_{total}$  — сумарна кількість усіх розпоряджень (і правильних, і зіпсованих), які були подані на вхід системи під час експерименту.

FP — кількість пропущених дефектів. Якщо при  $D_{err} = 50\%$  показник  $K_{rel}$  залишається вищим за 0.85, математична модель вважається стійкою (robust) до критичних збурень вхідного інформаційного потоку.

Метрики оцінки надійності інтелектуальної верифікації

Для кількісної оцінки ефективності ШІ-агента при роботі з дефектними даними ( $D_{err}$ ) використовується матриця помилок (Confusion Matrix). Вона дозволяє розмежувати ситуації, коли система спрацювала коректно, і ситуації, де виникли критичні збої.

True Positive (TP) — Справжньопозитивне рішення, тобто система проаналізувала коректне розпорядження (яке містить усі компоненти «4К» та відповідає ISO) і надала йому статус «Валідно». Робочий процес триває без затримок, автоматизація економить час керівника [4, 7].

True Negative (TN) — Справжньо-негативне рішення, тобто система виявила дефектне завдання (наприклад, без вказання що саме зробити або з порушенням екологічних норм) і заблокувала його. Головна перемога системи, адже вдалось запобігти появі невідповідності (NC) ще на етапі планування.

False Positive (FP) — Хибно-позитивне рішення (Помилка I роду), тобто система «проспала» помилку. Вона прийняла дефектне розпорядження за валідне. Найнебезпечніший стан, адже призводить до виконання неякісної задачі, що загрожує штрафами або ж ризику втрати сертифікату під час зовнішнього аудиту. Мета нашого дослідження — мінімізувати FP.

False Negative (FN) — Хибно-негативне рішення (Помилка II роду), тобто система «забюрократизувалася». Вона відхилила гарне, правильне завдання (можливо, через занадто високий поріг  $\tau$ ). Створює «інформаційний тромб», змушуючи керівника переписувати завдання, хоча воно було нормальним.

На основі кількості вказаних станів розраховуються три ключові показники:

1. Точність (Precision), тобто яка частка заблокованих завдань дійсно була дефектною?

$$\text{Precision} = \frac{TN}{TN+FN} \quad (2.10)$$

Де TN (True Negative) — кількість "істинно-негативних" результатів. Це ситуації, коли система правильно ідентифікувала дефектне розпорядження та заблокувала його.

FN (False Negative) — кількість "хибно-негативних" результатів. Це ситуації, коли система помилково заблокувала коректне (валідне) розпорядження, сприйнявши його за дефектне.

Precision — розраховане значення точності

Висока точність гарантує, що система не блокує роботу даремно.

2. Повнота (Recall), тобто яку частку всіх дефектів у потоці Derr система змогла відловити?

$$\text{Recall} = \frac{TN}{TN+FP} \quad (2.11)$$

Де TN (True Negative) — кількість правильно заблокованих дефектних завдань.

FP (False Positive) — кількість "хибно-позитивних" результатів. Це ситуації, коли система "проспала" дефект: розпорядження було помилковим, але ШІ-агент надав йому статус "валідно" (пропустив у систему).

Recall — розраховане значення повноти.

Це показник "пильності" системи. Чим вище Recall, тим менше шансів на "прокол" перед аудитором. Повнота показує рівень "пильності". Для сертифікації ISO це критичний показник, оскільки кожне пропущене порушення (FP) — це потенційна невідповідність на зовнішньому аудиті.

3. F1-міра, тобто гармонійне середнє між точністю та повнотою, яке використовується для пошуку оптимального порогу при рівні дефектності  $D_{err} = 50\%$ .

Приклад реалізації в експерименті:

Припустимо, подали 100 розпоряджень, з яких 50 були навмисно зіпсовані ( $D_{err} = 50\%$ ). Якщо система відловила 45 дефектів ( $TN = 45$ ), але 5 пропустила ( $FP = 5$ ), то її  $\text{Recall} = 90\%$ . Для сертифікації ISO поставлено за мету досягнення  $\text{Recall} \geq 0.95$ .

Оскільки часто при підвищенні повноти падає точність (система стає занадто "суворою"), використовується середнє гармонійне.

$$F1 = 2 \cdot \frac{\text{Precision} \cdot \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}} \quad (2.12)$$

Де Precision — розраховане значення точності;

Recall — розраховане значення повноти;

$F_1$  – міра

$F_1$  – міра досягає свого максимуму лише тоді, коли і точність, і повнота одночасно високі. Ми використовуємо цей показник для знаходження того самого оптимального порогу релевантності, при якому система максимально ефективно відловлює дефекти ( $D_{err}$ ), не створюючи при цьому бюрократичних перешкод для нормальної роботи.

Методика використання навмисно внесених помилок дозволяє не просто констатувати наявність ШІ, а математично довести його надійність як контролюючого органу. Співвідношення метрик Precision та Recall при максимальному рівні  $D_{err}$  виступає об'єктивним критерієм адекватності розробленої моделі та її здатності замінити ручний контроль виконавчої дисципліни.

Інтегральний показник  $Q_{IS}$  (Quality of Information Support) у межах методики дослідження виступає динамічним індикатором «здоров'я» системи менеджменту якості. Вплив фактора дефектності  $D_{err}$  на цей показник розглядається через призму двох сценаріїв: реального та об'єктивного.

При виявленні дефектів ШІ-агентом, коефіцієнт верифікації  $K_{ai}$  для конкретного завдання набуває значення 0. Інтегральний показник розраховується за формулою 2.13.

$$QIS = \frac{\sum(w_i \cdot k_{ai} \cdot p_i)}{\sum w_i} \quad (2.13)$$

Де  $Q_{IS}$  (Quality of Information Support) — підсумковий індекс якості. Значення 1.0 означає ідеальну відповідність стандартам ISO, 0.0 — повну невідповідність.

$w_i$  (Weight) — коефіцієнт важливості (вага) і-го завдання. Наприклад, завдання з пожежної безпеки має вищу вагу ( $w=1.0$ ), ніж завдання з благоустрою території ( $w=0.2$ ).

$K_{ai}$  (AI-Coefficient) — інтелектуальний коефіцієнт валідації від ШІ-агента. Якщо завдання відповідає ISO —  $K_{ai} = 1$ , якщо виявлено дефект ( $D_{err}$ ) —  $K_{ai} = 0$ .

$P_i$  (Performance) — бінарний показник виконання завдання працівником (1 — виконано, 0 — не виконано).

$\sum w_i$  — сума ваг усіх запланованих завдань (нормалізатор).

Якщо керівник видає дефектні розпорядження ( $D_{err}$  зростає),  $K_{ai}$  стає рівним нулю для цих задач. Навіть якщо робітники їх виконують ( $P_i=1$ ), чисельник формули зменшиться, і показник  $Q_{IS}$  впаде. Це сигналізує про те, що підприємство виконує «неправильні» задачі, які не ведуть до успішної сертифікації.

Зростання  $D_{err}$  призводить до пропорційного зменшення чисельника. Це означає, що система автоматично знижує загальний рейтинг готовності підприємства, навіть якщо формально всі завдання позначені як «виконані» ( $P_i=1$ ).

## 2. Ризик «хибного благополуччя»:

Найбільш критичним аспектом дослідження є ситуація, коли  $D_{err} > 0$ , але система через низьку чутливість (низький Recall) не ідентифікує ці дефекти.

У такому разі  $Q_{IS}$  залишається високим (наприклад, 0.98), тоді як реальний стан справ є незадовільним. Методика дослідження передбачає розрахунок «Дельти ризику»  $\Delta R$  за формулою 2.14.

$$\Delta R = \left| Q_{IS\_auto} - Q_{IS\_expert} \right| \quad (2.14)$$

де  $Q_{IS\_expert}$  — показник якості, який виставив професійний аудитор ISO, перевіряючи ті ж самі розпорядження вручну;

$Q_{IS\_auto}$  — показник якості, який розрахував ваш ШІ-агент самостійно;

$| \quad |$  (модуль) — абсолютне значення різниці, оскільки цікавить величина відхилення в будь-яку сторону.

Суть "Хибного благополуччя" полягає в тому, якщо ШІ занадто "м'який" (низький поріг релевантності) він пропустить помилки, і  $Q_{IS\_auto}$  буде високим (наприклад, 0.95). Але аудитор побачить ці помилки та поставить  $Q_{IS\_expert} = 0.60$ . Тоді  $\Delta R = 0.35$  — це величезна похибка, яка означає, що система не працює. Основна мета — отримати  $\Delta R < 0.05$ .

Мінімальне значення  $\Delta R$  свідчить про високу адекватність моделі.

3. Система раннього попередження (Early Warning System), тобто у межах експерименту реалізовано порогові рівні сигналізації, що базуються на  $D_{err}$ :

Зелений рівень ( $Q_{IS} > 0.95$ ) це означає, що система працює в штатному режимі, дефекти поодинокі.

Жовтий рівень ( $0.80 < Q_{IS} \leq 0.95$ ) це означає, що системне накопичення дефектів у розпорядженнях. Система видає попередження: *«Зростання рівня семантичних невідповідностей. Ризик зауважень при зовнішньому аудиті»*.

Червоний рівень ( $Q_{IS} \leq 0.80$ ) це означає, що критична деградація якості управління. Система блокує вихід на сертифікаційний аудит до виправлення системних помилок.

Методика доводить, що  $Q_{IS}$  є не просто статистичним звітом, а прогностичним інструментом. Якщо за результатами моделювання при  $D_{err} = 30\%$  показник  $Q_{IS}$  падає нижче критичної межі, це стає обґрунтуванням для керівництва щодо проведення позапланового внутрішнього навчання персоналу або перегляду методології постановки задач.

Таким чином, дослідження впливу дефектності на інтегральний показник дозволяє верифікувати систему як "цифрового аудитора". Це перетворює інформаційну підтримку з пасивного сховища даних на активну систему управління ризиками, що здатна прогнозувати успішність сертифікації на основі якості щоденного документообігу.

Впровадження агентно-орієнтованого підходу дозволило формалізувати контроль за принципом «4К» через систему логічних предикатів, а використання технології RAG забезпечило семантичний аналіз розпоряджень на основі косинусної подібності векторів у багатовимірному просторі.

Математично обґрунтовано інтегральний показник QIS, який, на відміну від традиційних звітів, враховує якість постановки задач за допомогою ШІ-коефіцієнта  $K_{ai}$ . Методика експериментальних досліджень, заснована на стрес-тестуванні системи через контрольоване введення дефектів ( $D_{err}$ ), дозволила визначити оптимальний поріг релевантності ( $r_{0,8}$ ) та розмір контекстного вікна ( $C_{size}$ ), що мінімізують ризики «галюцинацій» моделі. Доведено, що використання метрик F1-міри та «Дельти ризику» дозволяє об'єктивно оцінити адекватність системи як «цифрового офіцера з якості». Сформована теоретична та експериментальна база створює підґрунтя для програмної реалізації системи на мові Python, що буде детально розглянуто у наступному розділі.

Результати проведеного етапу дослідження дозволили перейти від концептуального опису проблеми до побудови строгої логіко-математичної архітектури майбутньої системи. Ключовим досягненням розділу є створення формалізованого механізму трансформації неструктурованих управлінських розпоряджень у векторизовані семантичні об'єкти, що підлягають автоматизованому аудиту.

Завдяки впровадженню методу детермінованого відсікання нерелевантних гілок графа знань вдалося розв'язати проблему «семантичного перекриття», забезпечивши системі здатність ідентифікувати контекст стандарту ISO з високою точністю. Математично доведено, що використання косинусної подібності в межах архітектури RAG нівелює лексичні розбіжності та дозволяє ШІ-агенту функціонувати

як об'єктивний верифікатор, незалежний від суб'єктивного стилю викладу керівника.

Розроблена методика стрес-тестування через варіативність порогів релевантності та рівнів дефектності вхідних даних дозволила знайти точку стабільності алгоритму, за якої максимізується показник F1-міри. Це гарантує, що запропонована система не просто фіксує помилки, а виступає активним фільтром «управлінського браку», запобігаючи виникненню невідповідностей ще на етапі планування робіт. Таким чином, сформований науково-методичний апарат є завершеним і достатнім фундаментом для переходу до технічного проектування та практичної реалізації програмного комплексу.

## 2.4 Розробка технічного завдання на створення засобів моделювання ПМК OptiCertAI

Технічне завдання ПМК OptiCertAI наведено в додатку Г

## 2.5 Висновки щодо обґрунтування математичного апарату та методики інтелектуальної верифікації управлінської інформації

У другому розділі розроблено науково-методичний апарат та математичну модель інтелектуальної системи підтримки процесів сертифікації, що базується на синергії агентно-орієнтованого підходу та сучасних технологій обробки природної мови. Сформовано методологічну базу дослідження, в основу якої покладено концепцію «цифрового офіцера з якості», що імітує когнітивну діяльність методолога через цикл PDCA. Обґрунтовано використання архітектури RAG (Retrieval-Augmented

Generation) та інструментарію LangGraph, що дозволяє трансформувати статичну базу стандартів ISO у динамічне середовище підтримки прийняття рішень. Доведено перевагу методу детермінованого відсікання контексту (Scoped Context Retrieval), який через використання фільтрації метаданих за ідентифікатором IDfolder мінімізує ризики ШІ-галюцинацій та забезпечує високу точність пошуку методологічних положень у межах обраного стандарту.

Розроблено математичну модель процесу верифікації, де управлінське розпорядження представлено як семантичний кортеж ознак за принципом «4К». Введений предикат валідності  $P(t)$  на основі логічної кон'юнкції дозволяє автоматизовано ідентифікувати структурну неповноту завдань. Застосування апарату математичної лінгвістики та метрики косинусної подібності векторів у  $d$ -вимірному просторі забезпечило перехід від суб'єктивного оцінювання текстів до об'єктивного розрахунку семантичної відповідності розпоряджень вимогам ISO. Математично доведено, що мінімізація кута  $\theta$  між вектором запиту та вектором стандарту дозволяє системі розпізнавати професійні синоніми та контекстні зв'язки, що є критичним для подолання лексичного розриву в управлінських комунікаціях.

Запропоновано інтегральний показник якості інформаційної підтримки QIS, який виступає кількісною метрикою готовності підприємства до сертифікації. На відміну від традиційних систем контролю, дана модель враховує якісну складову через коефіцієнт ШІ-валідації  $K_{ai}$  та вагові коефіцієнти критичності завдань. Додаткове введення індексу когнітивного навантаження  $I_{load}$  дозволило формалізувати ризики «людського фактора» як гіперболічну функцію від дефіциту часу та складності завдань, забезпечуючи можливість превентивного реагування на загрозу професійного вигорання персоналу. Розроблено методику експериментальних досліджень, засновану на стрес-тестуванні системи через контрольоване введення дефектів  $D_{err}$ .

Визначено, що оптимальний баланс між управлінською гнучкістю та нормативною суворістю досягається при порозі релевантності  $r = 0.8$  та розмірі контекстного вікна  $C_{\text{size}} = 2048$  токенів. Обґрунтовано використання  $F_1$ -міри та «Дельти ризику» як основних критеріїв адекватності моделі, що дозволяє системі функціонувати як надійний фільтр «управлінського браку». Сформована логіко-математична архітектура та верифікована методика дослідження створюють завершений науковий фундамент для програмної реалізації інтелектуальної системи на мові Python, що є предметом наступного розділу роботи.

Додатково в межах розділу обґрунтовано вибір метрик оцінки надійності інтелектуальної верифікації, що базуються на матриці помилок (Confusion Matrix). Встановлено, що для забезпечення вимог міжнародної сертифікації пріоритетним показником є повнота (Recall), оскільки мінімізація хибнопозитивних рішень (False Positive) безпосередньо корелює зі зниженням ризиків отримання критичних невідповідностей під час зовнішніх аудитів. Запропоноване поєднання Precision та Recall через середнє гармонійне ( $F_1$ -міру) дозволяє детерміновано підійти до налаштування параметрів системи, уникаючи надмірної бюрократизації процесів при збереженні високої якості контролю.

Важливим результатом моделювання стало математичне підтвердження переваг детермінованого вибору контексту через механізм Scoped Context Retrieval. Доведено, що обмеження пошукового простору векторної бази знань до підмножини  $S_{\text{selected}}$  не лише скорочує час обробки запиту  $T_{\text{proc}}$  до значень, прийнятних для роботи в режимі реального часу, а й принципово усуває проблему семантичного перекриття схожих за лексикою, але різних за функціональним призначенням інструкцій. Це дозволяє системі стабільно функціонувати навіть за умов значного масштабування корпоративної бази знань до сотень нормативних одиниць.

### 3 ПРОЄКТУВАННЯ ПРОГРАМНО-МЕТОДИЧНОГО КОМПЛЕКСУ «OPTICERTAI»

#### 3.1 Об'єктно-орієнтоване моделювання логічної структури та динаміки процесів ПМК «OptiCertAI»

Деталізація логіки роботи компонентів системи дозволяє простежити шлях трансформації неструктурованого управлінського розпорядження у верифікований аналітичний висновок. В основі лежить ітераційний процес обробки даних у межах RAG-архітектури. В таблиці 3.1 наведено логічну послідовність функціонування ПМК OptiCertAI.

Таблиця 3.1 – Логічна послідовність функціонування ПМК OptiCertAI

Етап логічної моделі	Технічна назва (Layer)	Зміст операцій та логіка обробки	Результат етапу
Семантичний ввід	Input Layer	Ініціація запиту користувачем. Попередня обробка тексту (clean-up): видалення стоп-слів, нормалізація символів. Збір метаданих про контекст (відділ, тип документа за category Name).	Очищений текст розпорядження з метаданими.
Векторна трансформація	Vectorization Layer	Використання моделі ембедінгів для перетворення тексту у багатовимірний вектор. Семантичне значення відображається як точка у математичному просторі.	Числовий вектор (Embedding) завдання.
Контекстний пошук	Retrieval Layer	Запит до векторної бази знань ChromaDB. Розрахунок косинусної подібності між вектором завдання та чанками стандартів ISO. Вилучення k найбільш релевантних фрагментів.	Набір релевантних пунктів стандартів ISO.
Когнітивний аналіз	Reasoning Layer	Формування комбінованого промпту. Аналіз нейромережевим процесором відповідності завдання вилученим нормам. Перевірка на логічні суперечності.	Текстове обґрунтування та попередній вердикт.

Продовження Таблиці 3.1 – Логічна послідовність функціонування ПМК OptiCertAI

Етап логічної моделі	Технічна назва (Layer)	Зміст операцій та логіка обробки	Результат етапу
Формування результату	Output Layer	Агрегація результатів аналізу. Розрахунок інтегрального показника якості управління (QIS). Візуалізація результату через статус-коди та графічні індикатори.	Індекс QIS та фінальний статус верифікації.

Логічна модель забезпечує перехід від суб'єктивного сприйняття тексту до об'єктивної математичної оцінки. На етапі векторизації система нівелює мовні бар'єри (синоніми, різні стилі написання), фокусуючись на змісті розпорядження. Це дозволяє на етапі пошуку (Retrieval) знаходити не просто співпадіння слів, а змістовну відповідність вимогам стандартів ISO, навіть якщо вони сформульовані іншою термінологією.

Центральним елементом методики є Reasoning Layer, де штучний інтелект виконує роль цифрового аудитора. На відміну від класичних систем пошуку, ПМК не просто надає текст стандарту, а аналізує, чи не порушує конкретне розпорядження вказані норми. Такий підхід мінімізує «галюцинації» ШІ, оскільки аналіз обмежений виключно контекстом, отриманим із перевіреної бази знань підприємства.

Після визначення функціональних вимог та сценаріїв використання (Use Case), наступним етапом проектування ПМК «OptiCertAI» є побудова логічної моделі системи. Логічна модель відображає внутрішню структуру програмного комплексу, визначаючи склад об'єктів предметної області, їхні внутрішні атрибути, методи взаємодії та ієрархію зв'язків. Для візуалізації цієї структури використано діаграму класів у нотації UML, яка дозволяє збалансовано представити як бізнес-логіку управління сертифікацією, так і інтелектуальні компоненти аналізу даних.

З метою визначення функціональних меж розробленого програмно-методичного комплексу OptiCertAI та формалізації взаємодії між

користувачами і системою, на початковому етапі проектування було побудовано діаграму прецедентів (Use Case Diagram). Ця модель дозволяє візуалізувати основні сценарії використання системи, такі як семантичний аналіз розпоряджень, взаємодія з базою знань стандартів ISO та формування аналітичної звітності. Діаграма відображає ролі основних суб'єктів управління, тобто менеджера, співробітника та адміністратора системи, а також логіку залучення інтелектуального ШІ-агента як автономного сервісу перевірки відповідності нормам сертифікації.

Для забезпечення технічної працездатності ПМК OptiCertAI та підтримки актуальності нормативної бази ключовою є роль Адміністратора. На відміну від кінцевих користувачів, діяльність адміністратора зосереджена на управлінні внутрішніми механізмами системи: від конфігурування параметрів ШІ-агентів до підтримки цілісності векторного сховища даних. На рисунку 3.1 представлена діаграма прецедентів, що візуалізує повноваження адміністратора щодо архітектурного налаштування системи, векторизації стандартів ISO через механізми RAG та управління доступом, що гарантує стабільне функціонування аналітичного контуру підприємства, опис функціональних прецедентів адміністратора ПМК OptiCertAI наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.2 – Опис функціональних прецедентів адміністратора ПМК OptiCertAI

Назва прецеденту	Опис дії
Автентифікація (Admin Access)	Вхід у систему з повним доступом до інструментів налаштування.
Керування ієрархією стандартів	Створення та редагування структури ISO (пункти, підпункти, вимоги).
Конфігурування ШІ-агентів	Налаштування промптів та параметрів роботи спеціалізованих агентів.
Керування базою знань (RAG)	Завантаження нормативних актів та стандартів для навчання ШІ.
Оновлення семантичного індексу	Автоматичне перерахування векторних знань системою після додавання документів.

Продовження Таблиці 3.2 – Опис функціональних прецедентів адміністратора ПМК OptiCertAI

Назва прецеденту	Опис дії
Наповнення Навчального центру	Завантаження та прив'язка навчальних відеоінструкцій до розділів системи.
Створення аналітичних форм	Налаштування нових типів графіків та дашбордів за запитом.
Керування ролями та правами	Створення нових користувачів та призначення їхніх повноважень.
Технічна підтримка системи	Обробка запитів на відео, візуалізацію та нових ШІ-агентів.

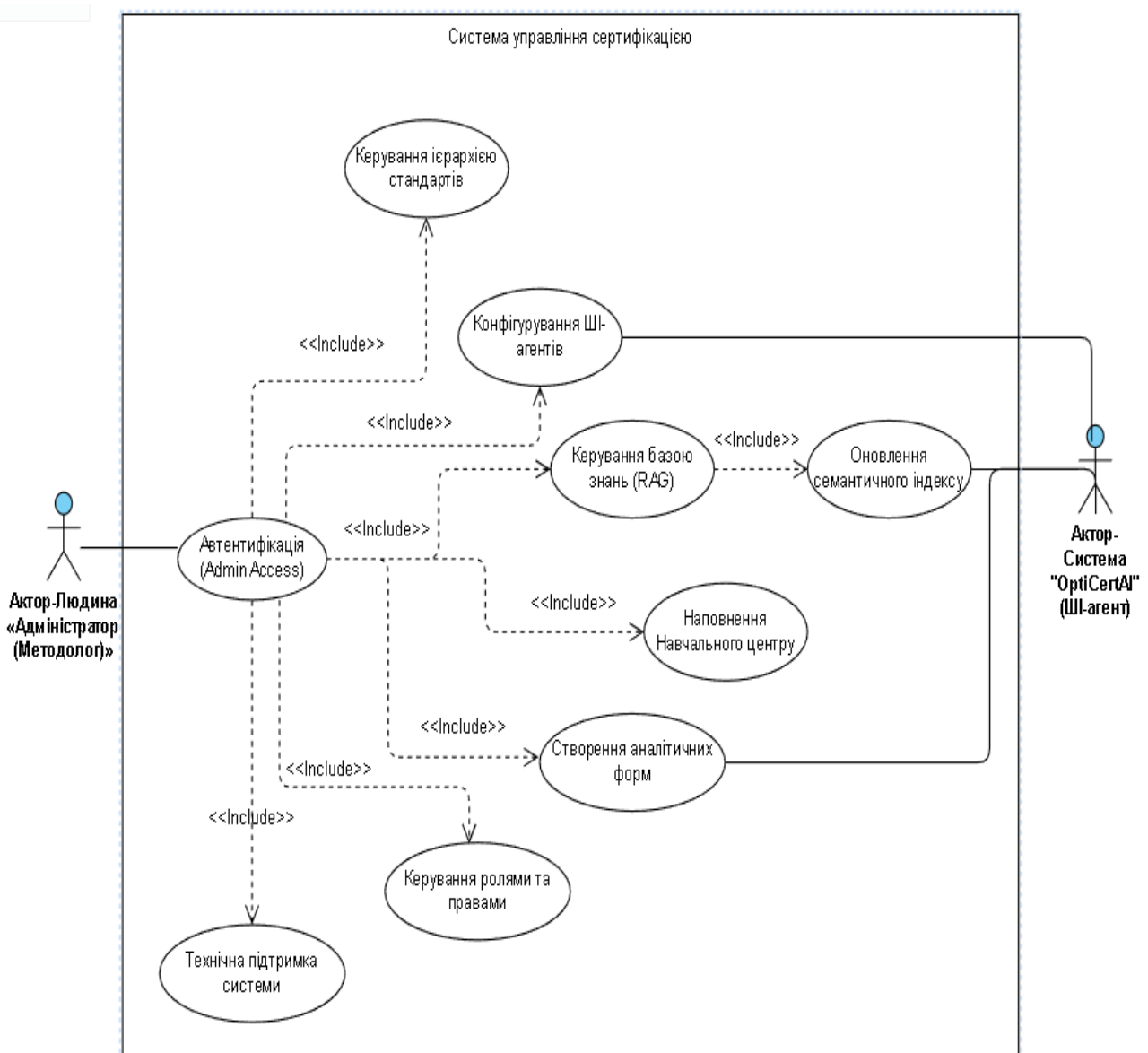


Рисунок 3.1 – Діаграма прецедентів (Use Case Diagram) для ролі Адміністратора (Методолога)

Функціональний контур Керівника (Менеджера) у межах ПМК OptiCertAI орієнтований на стратегічне управління процесами сертифікації та контроль за виконанням регламентних завдань підрозділу. Як показано на рисунку 3.2, ця роль передбачає активну взаємодію з інтелектуальним агентом для автоматизації рутинних операцій: від параметризації нових задач за методикою «4К» до отримання експертних консультацій через семантичний RAG-пошук. Керівник володіє розширеними правами щодо моніторингу візуальних статусів впровадження стандартів ISO та прийняття фінальних рішень про затвердження або доопрацювання результатів, що мінімізує ризики невідповідності під час зовнішніх аудитів, Як видно з наведеної таблиці 3.2, роль керівника в ПМК OptiCertAI зосереджена на прийнятті рішень (Decision Making). Система автоматизує найбільш трудомісткі етапи — розробку методики виконання задачі та первинну перевірку звітності, що дозволяє менеджеру зосередитися на верифікації фінальних результатів та стратегічному плануванні сертифікації.

На основі розробленої діаграми варіантів використання (рис. 3.3) визначено, що головним антропогенним актором системи є «Співробітник» (Employee), чия діяльність спрямована на безпосереднє впровадження стандартів ISO на підприємстві. Взаємодія цього актора з ПМК «OptiCertAI» побудована за принципом інтелектуального партнерства, де людина приймає рішення, а ШІ-агент забезпечує аналітичну підтримку.

Процес роботи співробітника починається з етапу автентифікації та вибору ролі, що є критично важливим для коректного налаштування семантичного контексту системи. Основним функціональним блоком є подання звітності про впровадження, яке нерозривно пов'язане з процедурою пре-верифікації ШІ-агентом. У разі виявлення невідповідностей, система активує сценарій коригування за зауваженнями ШІ, що дозволяє співробітнику оперативно виправити



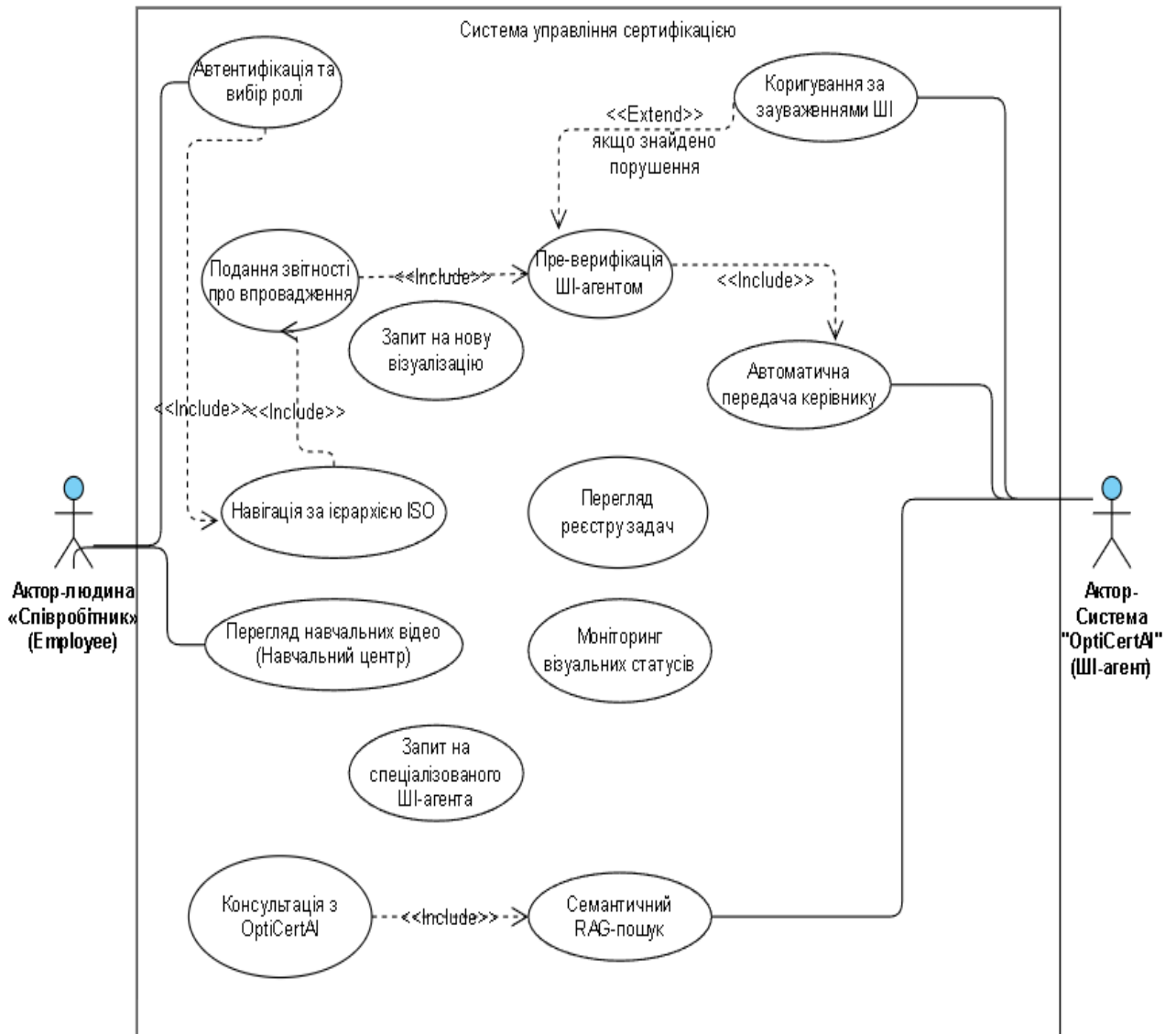


Рисунок 3.3 – Діаграма прецедентів (Use Case Diagram) для ролі Співробітника (Employee)

Після визначення функціональних вимог та сценаріїв використання (Use Case), наступним етапом проектування ПМК «OptiCertAI» є побудова логічної моделі системи. Логічна модель відображає внутрішню структуру програмного комплексу, визначаючи склад об'єктів предметної області, їхні внутрішні атрибути, методи взаємодії та ієрархію зв'язків. Для візуалізації цієї структури використано діаграму класів у нотації UML, яка дозволяє збалансовано представити як бізнес-логіку управління сертифікацією, так і інтелектуальні компоненти аналізу даних.

Дані, наведені у табл. 3.3, демонструють чіткий розподіл логіки системи за принципом розділення відповідальності (Separation of Concerns), що є фундаментом архітектурної надійності ПМК. Зокрема, класи User та Task забезпечують коректне формування вхідних умов для сертифікаційного процесу, створюючи необхідний організаційний контекст. Класи AIAgent та Report реалізують динамічну частину системи (AI & Execution Layer), де здійснюється інтелектуальна оцінка контенту на відповідність заданим критеріям у режимі реального часу. Така структура об'єктів безпосередньо корелює з вимогами щодо побудови гнучких ПМК, які можуть бути адаптовані під різні стандарти сімейства ISO без фундаментальної зміни програмного коду, забезпечуючи високу масштабованість та стабільність програмного рішення.

Таблиця 3.3 – Характеристика основних класів (Classes) ПМК

<b>Клас (Class)</b>	<b>Повна англійська назва</b>	<b>Призначення в системі</b>
User	System User / Actor	Автентифікація та контроль доступу
Task	Certification Task	Формування методології та критеріїв оцінки
AIAgent	AI-driven Agent (RAG)	Когнітивна обробка та верифікація звітів
Report	Compliance Report	Фіксація результатів аудиту та статусів
VectorDB	Vector Database	Зберігання та пошук ембедінгів нормативної бази
ISO_Knowledge	ISO Standard Knowledge Base	Структурований довідник вимог та чек-лістів

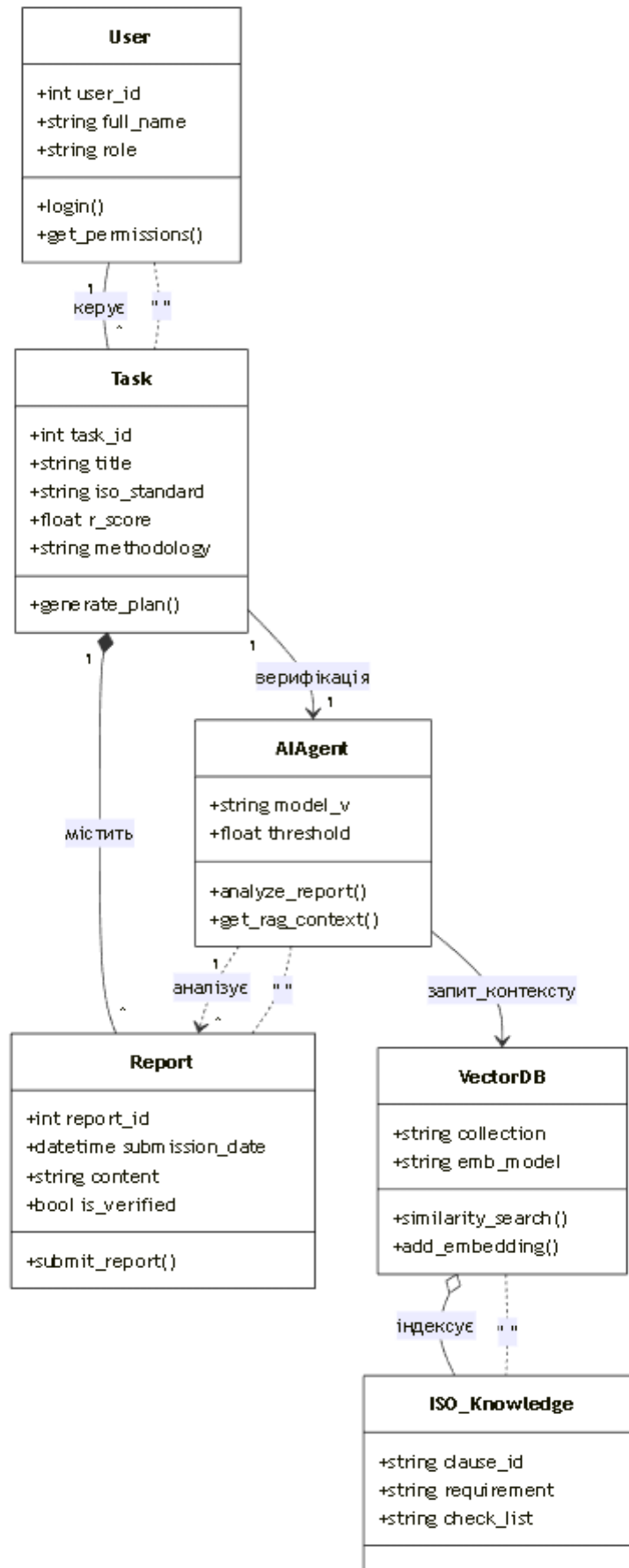


Рисунок 3.4 – Діаграма класів (Class Diagram) ПМК «OptiCertAI» у нотації UML

Розробка динамічної моделі ПМК «OptiCertAI» базується на принципі багаторівневої декомпозиції складних систем. З метою забезпечення високої когнітивної доступності та технічної точності опису, загальну динаміку функціонування комплексу було розподілено на сім цільових діаграм послідовності (рис. 3.5 – 3.11). Представлена у табл. 3.4 декомпозиція дозволяє структурувати опис динаміки ПМК «OptiCertAI» не як набір розрізнених функцій, а як цілісну екосистему з чітко визначеними алгоритмами взаємодії. Це забезпечує прозорість архітектурних рішень та створює надійний базис для подальшої програмної реалізації комплексу. Такий підхід до моделювання дозволяє продемонструвати логічну завершеність системи, де кожен процес — від ініціалізації профілю до ШІ-верифікації — має чітко визначену часову послідовність та очікуваний результат.

Таблиця 3.4 – Перелік діаграм послідовності функціональних процесів ПМК «OptiCertAI»

№ рисунка	Назва діаграми (Sequence Diagram)	Опис функціонального процесу
3.5	Навігація та керування станом	Логіка перемикання між модулями через Sidebar та збереження контексту користувача.
3.6	Конфігурація системи	Процес ініціалізації профілю, вибір стандарту ISO та прив'язка до конкретного філіалу.
3.7	Адміністрування RAG-бази	Механізм завантаження та індексації нових нормативних документів адміністратором у векторне сховище.
3.8	Формування задач (AI Gen)	Генерація методики виконання робіт за правилом «4К» з використанням ШІ-моделі.
3.9	Верифікація звітності	Процес автоматизованої перевірки звіту співробітника на відповідність вимогам ISO через ШІ-агента.
3.10	Реєстр та аналітика	Відображення зведених даних, розрахунок KPI та візуалізація статусів сертифікації.
3.11	Навчальний центр	Управління доступом до регламентів та медіа-бібліотеки для підвищення кваліфікації персоналу.

Рисунок 3.5 відображає процес навігації та керування станом системи (Navigation & State Management). Цей процес є фундаментальним для забезпечення цілісності користувацького досвіду в архітектурі Single Page Application (SPA). Взаємодія ініціюється користувачем через компонент бокової панелі (Sidebar UI). Ключовою особливістю даної моделі є використання централізованого менеджера стану (State Manager), який виступає посередником між інтерфейсом та серверною частиною.

Згідно з наведеною схемою, при спробі переходу між модулями система не просто змінює відображення, а ініціює ланцюжок перевірок. Менеджер стану звертається до бекенд-сервера (Backend API) для верифікації прав доступу користувача на основі його поточного токена та ролі, зафіксованої у базі даних. Тільки після отримання позитивного підтвердження від сервера (Access Granted) відбувається оновлення глобального стану активного модуля. Такий підхід гарантує, що конфіденційні модулі системи (наприклад, Реєстр або Адміністрування) будуть захищені від несанкціонованого доступу на рівні логіки фронтенду. Завершальним етапом процесу є реактивний рендеринг обраного модуля, що забезпечує миттєвий відгук інтерфейсу на дії користувача.

Процес конфігурації системи, представлений на рис. 3.6, який є етапом ініціалізації робочого середовища, що визначає логіку подальшої роботи ШІ-агентів. Взаємодія починається з вибору користувачем конкретного стандарту сімейства ISO та територіального підрозділу (філіалу) через спеціалізований інтерфейс конфігурації (Config UI). Даний крок є критичним для забезпечення персоналізації аудиту, оскільки різні філіали можуть мати специфічні вимоги або різні рівні доступу до нормативної бази.

Технічна реалізація цього процесу базується на передачі параметрів вибору до менеджера стану (State Manager), який ініціює запит до бекенд-сервера (Backend Server) для підготовки специфікацій. На рівні серверної

логіки відбувається звернення до бази даних (Database) для вилучення метаданих обраного стандарту та перевірки зв'язків між філіалом і доступними йому ресурсами. Після формування цілісної конфігурації (Config Ready), менеджер стану виконує збереження поточної сесії у пам'яті клієнта. Це дозволяє системі автоматично підставляти необхідні контекстні дані під час генерації задач або верифікації звітності без необхідності повторних запитів. Завершується сценарій підтвердженням налаштувань та автоматичним перенаправленням користувача до робочого простору, повністю адаптованого під обрані параметри конфігурації.

На рис. 3.7 представлена діаграма послідовності процесу адміністрування RAG-бази, що відображає технічну реалізацію наповнення інтелектуальної бази знань системи. Даний процес є фундаментальним для функціонування механізму Retrieval-Augmented Generation, оскільки він забезпечує перетворення статичних нормативних документів у динамічний масив семантичних даних.

Взаємодія розпочинається з ініціативи адміністратора, який завантажує офіційний текст стандарту ISO через спеціалізовану панель керування (RAG Dashboard). На рівні бекенд-сервера (Backend API) виконується критично важливий етап сегментації (chunking), де документ розбивається на логічно завершені фрагменти для забезпечення високої точності подальшого пошуку. Далі кожен фрагмент передається до сервісу ембедінгів (AI Embedding Service), який трансформує природну мову в багатовимірні математичні вектори. Ці вектори, що містять семантичне значення тексту, індексуються та зберігаються у векторній базі даних (Vector DB). Завершення процесу сигналізує про готовність бази знань до обробки запитів користувачів, що дозволяє ШІ-агентам системи надавати відповіді, суворо посилаючись на пункти завантажених стандартів.

Процес формування задач, представлений на рис. 3.8, демонструє практичну реалізацію інтелектуальної підтримки користувача на основі авторської методики «4К» (Контекст, Критерій, Контроль, Корекція). Даний сценарій описує шлях від ініціації запиту користувачем до отримання структурованого плану дій, що відповідає вимогам обраного стандарту ISO.

Основним елементом логіки є ШІ-генератор (AI Gen), який на основі вхідних параметрів сесії формує розширений промпт. Для забезпечення точності рекомендацій система звертається до векторної бази знань (RAG), звідки вилучаються конкретні вимоги та критерії аудиту, релевантні поточному контексту організації. Після отримання нормативного контексту ШІ-модель виконує синтез логіки виконання завдання, розподіляючи його на етапи контролю та можливі методи корекції відхилень. Сгенерована задача автоматично реєструється в основній базі даних (DB) для подальшого відстеження її життєвого циклу. Кінцевим результатом процесу є відображення в інтерфейсі деталізованого плану дій, який мінімізує вплив людського фактора та забезпечує стандартизований підхід до виконання сертифікаційних вимог.

На рис. 3.9 відображено діаграму послідовності процесу верифікації звітності, який є завершальною ланкою в циклі виконання сертифікаційних завдань. Цей етап демонструє здатність системи виконувати роль цифрового аудитора, що автоматично перевіряє надані користувачем докази на відповідність встановленим стандартам.

Процес ініціюється користувачем шляхом завантаження результатів роботи через інтерфейс системи. Після передачі даних на бекенд-сервер, до роботи залучається спеціалізований ШІ-агент (AI Agent). Для об'єктивного аналізу агент звертається до векторної бази знань (RAG), вилучаючи специфічні критерії та метрики, які були закладені в обраний стандарт ISO. Внутрішня логіка ШІ включає семантичне порівняння змісту звіту із вимогами стандарту та розрахунок інтегральної оцінки

відповідності (Compliance Score). У разі виявлення розбіжностей, ШІ-агент формує деталізований перелік зауважень та рекомендацій щодо виправлення. Результат верифікації миттєво оновлює статус задачі в базі даних та відображається користувачу, що забезпечує безперервний цикл контролю якості та підготовки до фінальної сертифікації.

Процес ведення реєстру та формування аналітики, представлений на рис. 3.10, відображає механізм агрегації розрізнених даних про виконання задач у цілісну картину стану сертифікації організації. Даний етап є ключовим для управлінського контролю, оскільки він дозволяє керівництву відстежувати динаміку відповідності стандартам ISO у реальному часі.

Взаємодія розпочинається із запиту користувача до інтерфейсу реєстру, що запускає ланцюжок збору інформації з основної бази даних (Database). На рівні бекенд-сервера (Backend API) отримані «сирі» дані про статуси перевірок та оцінки відповідності передаються до спеціалізованого модуля аналітики (BI Module). У цьому модулі виконуються складні обчислювальні операції: розрахунок ключових показників ефективності (KPI), виявлення критичних точок відхилень та прогнозування трендів підготовки до фінального аудиту. Результатом обробки є сформований аналітичний пакет, який містить готові дані для візуалізації у вигляді інтерактивних графіків та дашбордів. Такий підхід забезпечує високу прозорість процесів та дозволяє приймати обґрунтовані управлінські рішення щодо корекції діяльності підрозділів.

Функціонування навчального центру, представлене на рис. 3.11, відображає логіку забезпечення персоналу необхідними знаннями для коректного впровадження стандартів ISO. Даний процес інтегрує теоретичну базу (регламенти, інструкції) із практичними потребами користувачів, виявленими під час верифікації звітності.

Процес розпочинається із запиту користувача на отримання специфічного навчального матеріалу або методичного регламенту.

Важливою особливістю архітектури є етап пре-валідації: бекенд-сервер (Backend API) здійснює запит до бази даних (Database) для перевірки відповідності запитуваного контенту ролі та рівню доступу співробітника. Після успішної перевірки система взаємодіє із внутрішнім або зовнішнім медіа-сервісом (Media Service) для отримання оптимізованих посилань на документи та відеоінструкції. Такий розподіл ресурсів дозволяє зберігати високу швидкість роботи основного сервера навіть при одночасному завантаженні важких медіа-файлів багатьма користувачами. Завершальний етап включає динамічний рендеринг контенту в інтерфейсі навчання, що створює інтерактивне середовище для підвищення кваліфікації персоналу без відриву від робочого місця.

Важливим аспектом проектування логічної моделі ПМК «OptiCertAI» є визначення життєвого циклу основних інформаційних об'єктів, стани яких змінюються в процесі автоматизованого аудиту. Оскільки система передбачає активну взаємодію між користувачем та ШІ-агентом, фіксація переходів між станами дозволяє забезпечити цілісність даних та прозорість процесу верифікації на кожному етапі. Нижче наведено детальний аналіз динаміки станів для звітності та функціональних задач комплексу.

Для глибшого розуміння логіки обробки даних у системі було розроблено діаграму станів життєвого циклу ключового об'єкта — сертифікаційного звіту (рис. 3.12). Оскільки ПМК «OptiCertAI» базується на автоматизованій верифікації, стан об'єкта змінюється не лише під впливом дій користувача, а й в результаті вердикту ШІ-агента.

Згідно з наведеною моделлю, звіт проходить шлях від чернетки (Draft) до архівації (Archived). Критичним вузлом є стан UnderAIReview, у якому система виконує внутрішній цикл семантичного аналізу та скорингу. Перехід у фінальний стан «Верифіковано» (Verified) можливий лише за умови досягнення встановленого порогу відповідності (наприклад, 70% збігу з вимогами ISO). У разі виявлення суттєвих відхилень, система

автоматично переводить звіт у стан Rejected, повертаючи його на доопрацювання з переліком згенерованих ШІ зауважень. Така модель забезпечує суворий контроль якості та виключає можливість випадкового потрапляння невідповідних звітів до фінального реєстру.

На рис. 3.13 наведено діаграму станів об'єкта «Задача», що є ключовим елементом логічної моделі функціонування ПМК. На відміну від статичних систем управління завданнями, у даному комплексі стан задачі нерозривно пов'язаний із процесами обробки природної мови.

Життєвий цикл розпочинається зі стану Pending, під час якого система готує параметри для ШІ-моделі. Перехід у стан AI\_Generation є складним логічним процесом, що включає семантичний пошук вимог у RAG-базі та синтез методики виконання за принципами «4К». Тільки після успішної генерації логічної структури завдання, воно набуває статусу Active і стає доступним користувачу. Важливою особливістю є циклічний зв'язок між станами UnderReview та Active: якщо ШІ-агент при верифікації виявляє невідповідність критеріям, задача автоматично повертається у роботу з оновленим контекстом зауважень, що забезпечує безперервність процесу вдосконалення результатів.

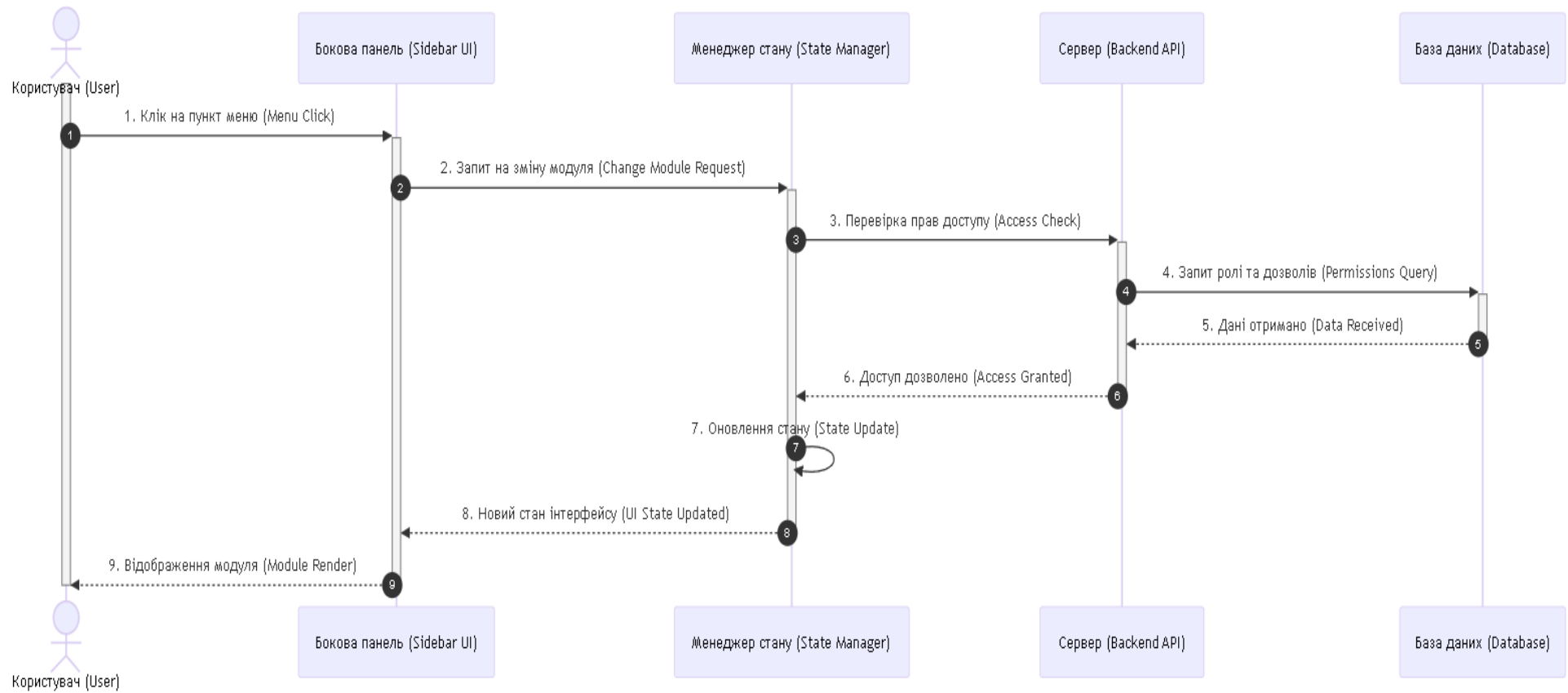


Рисунок 3.5 – Діаграма послідовності процесу навігації та керування станом (Navigation & State Management)

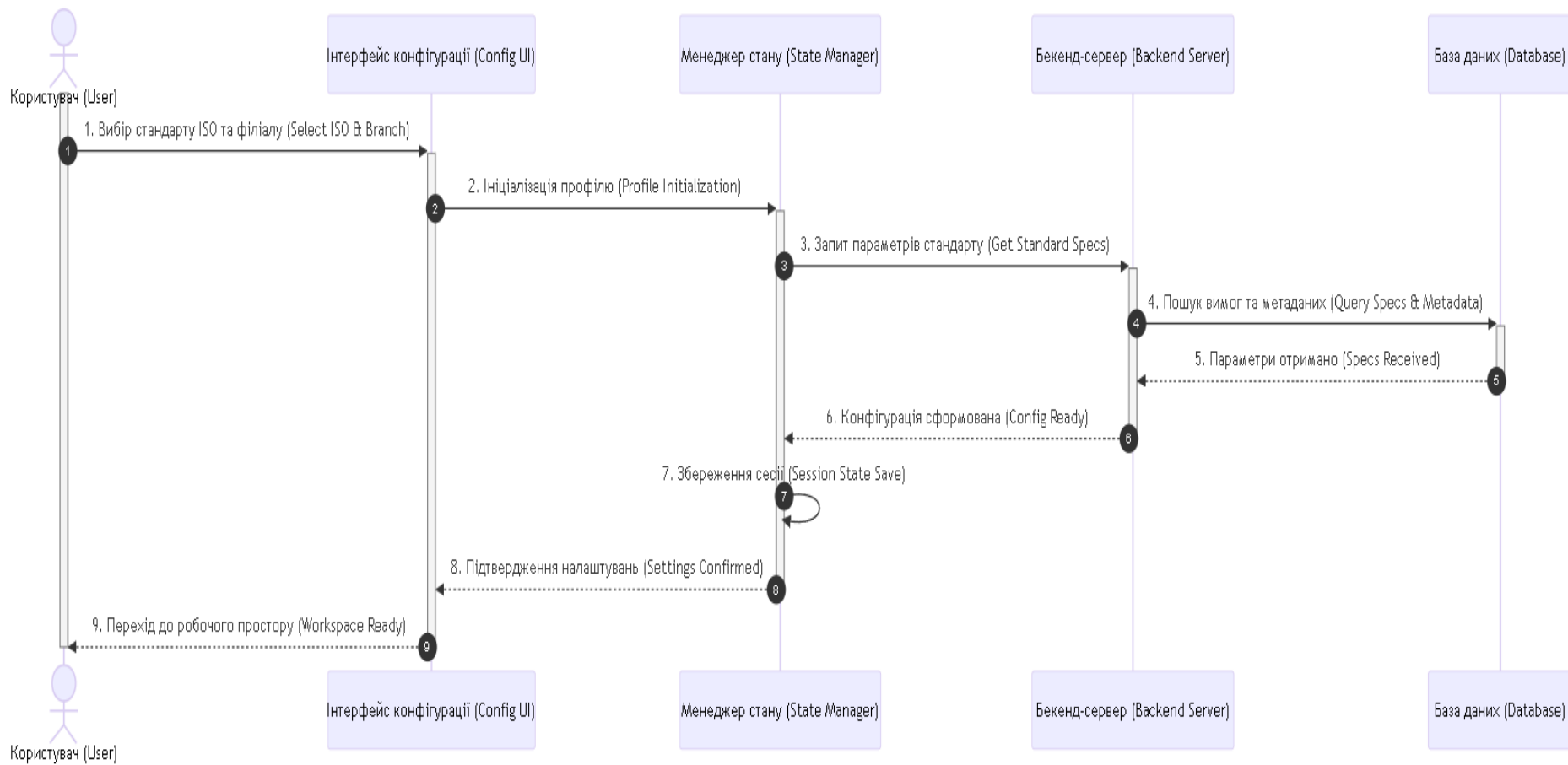


Рисунок 3.6 – Діаграма послідовності процесу конфігурації системи (System Configuration)

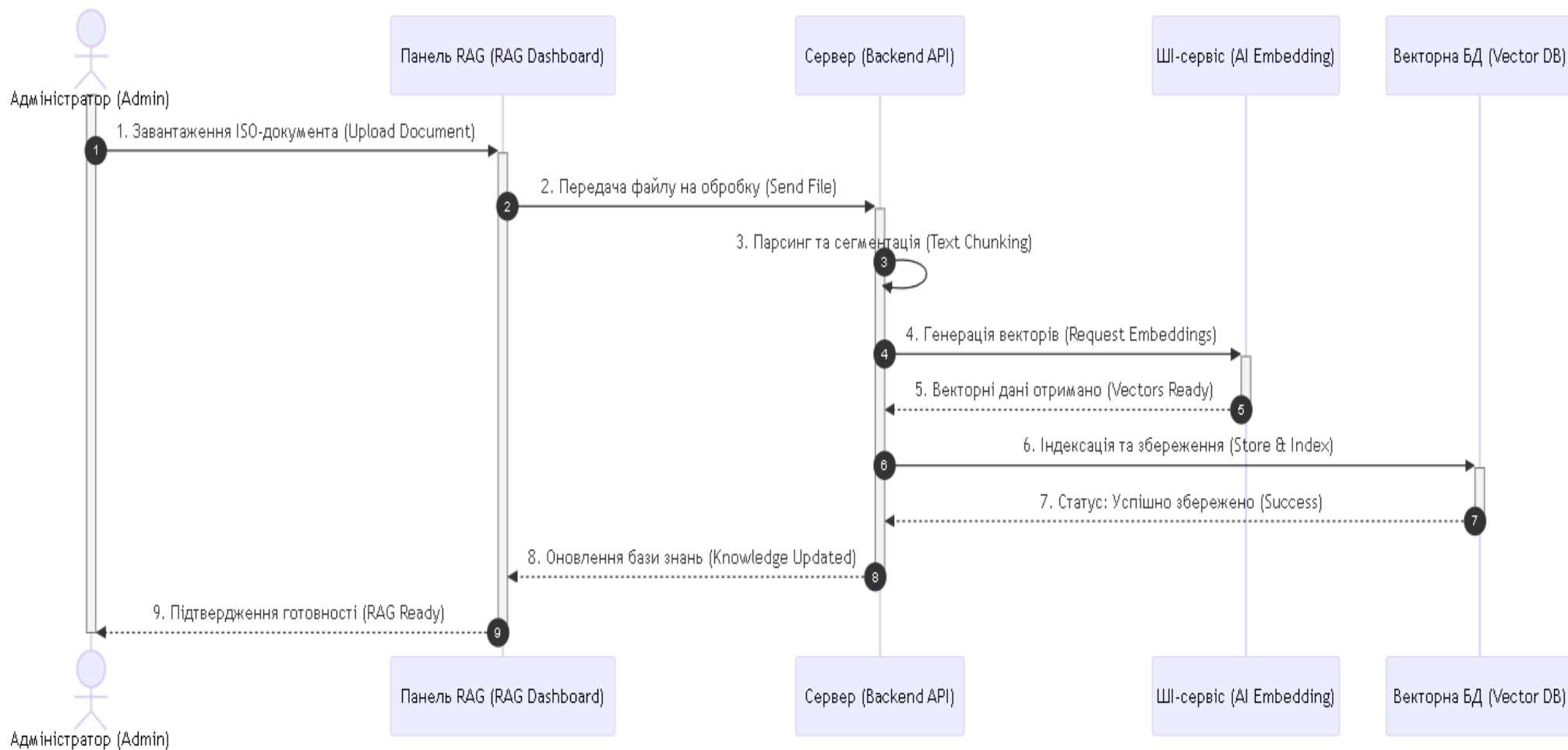


Рисунок 3.7 – Діаграма послідовності процесу адміністрування RAG-бази (RAG-Base Administration)

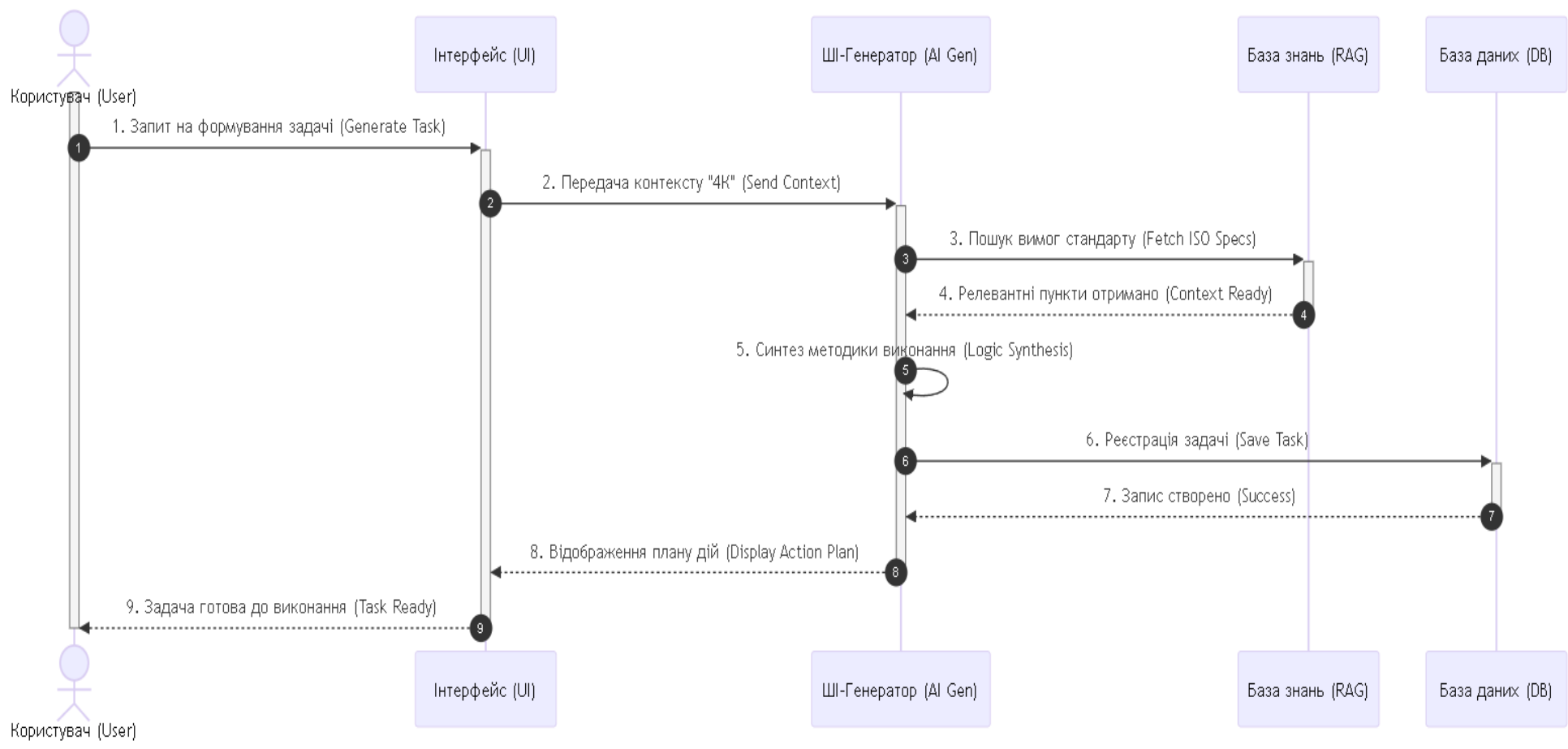


Рисунок 3.8 – Діаграма послідовності процесу формування задач за методикою «4К» (AI Task Generation)

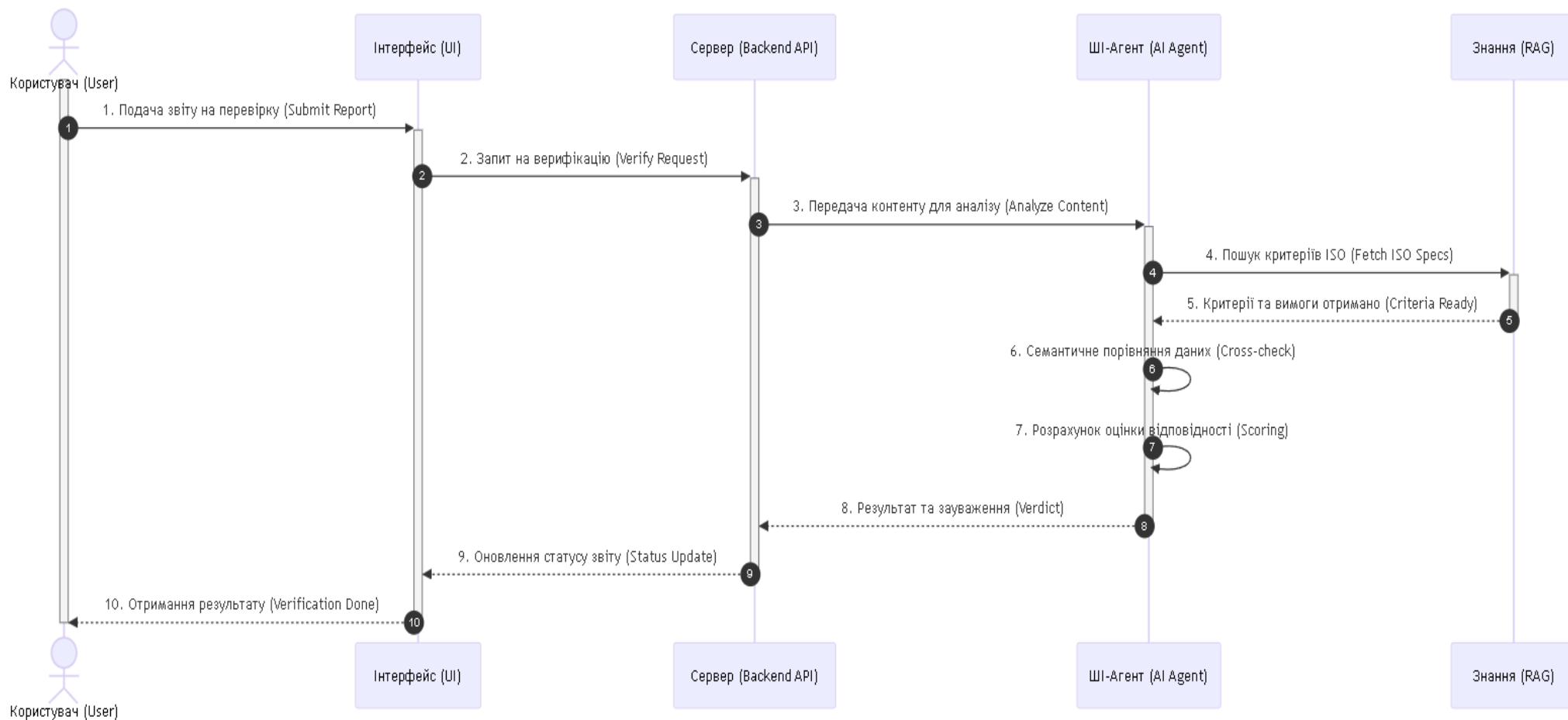


Рисунок 3.9 – Діаграма послідовності процесу верифікації звітності (AI Verification)

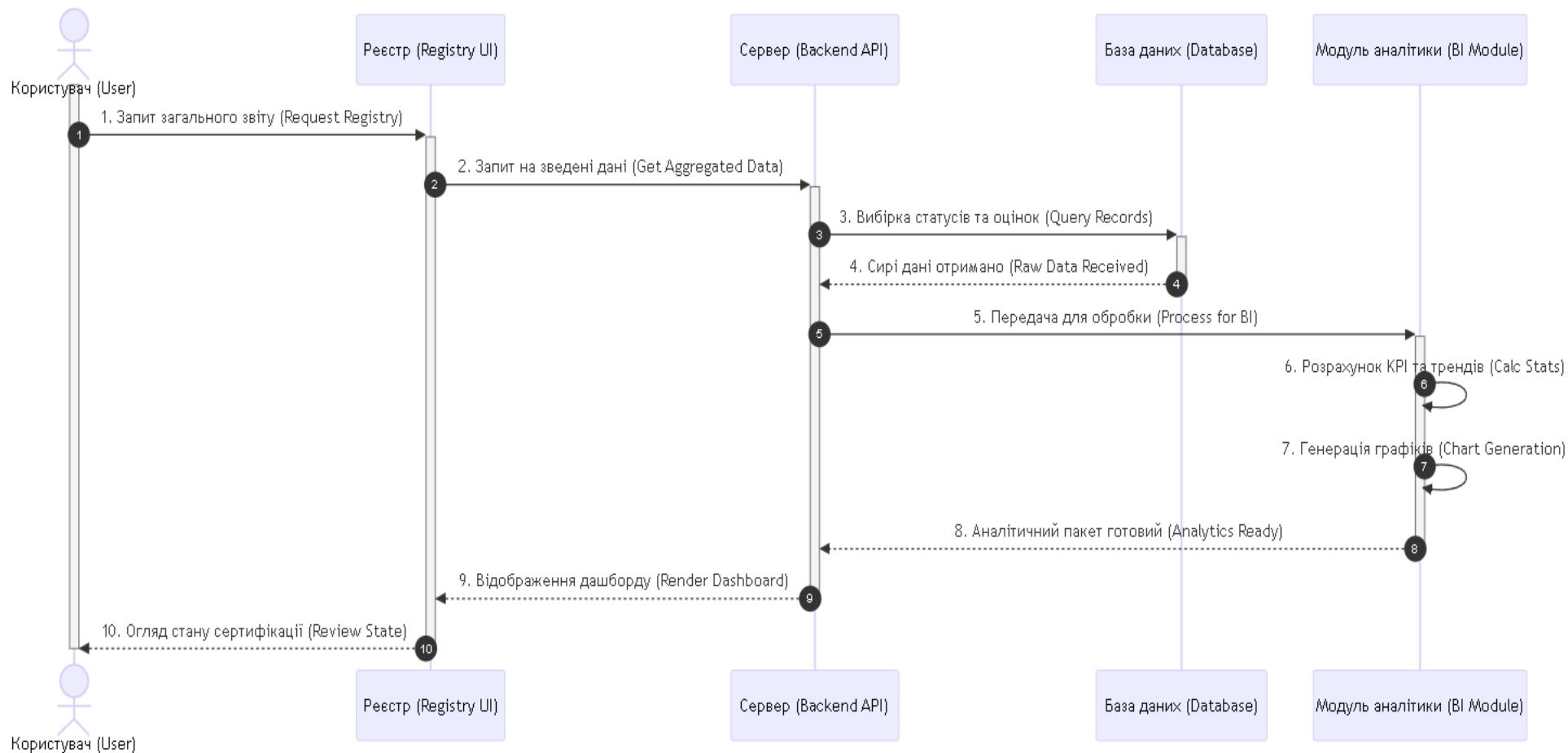


Рисунок 3.10 – Діаграма послідовності процесу ведення реєстру та аналітики (Registry & Analytics)

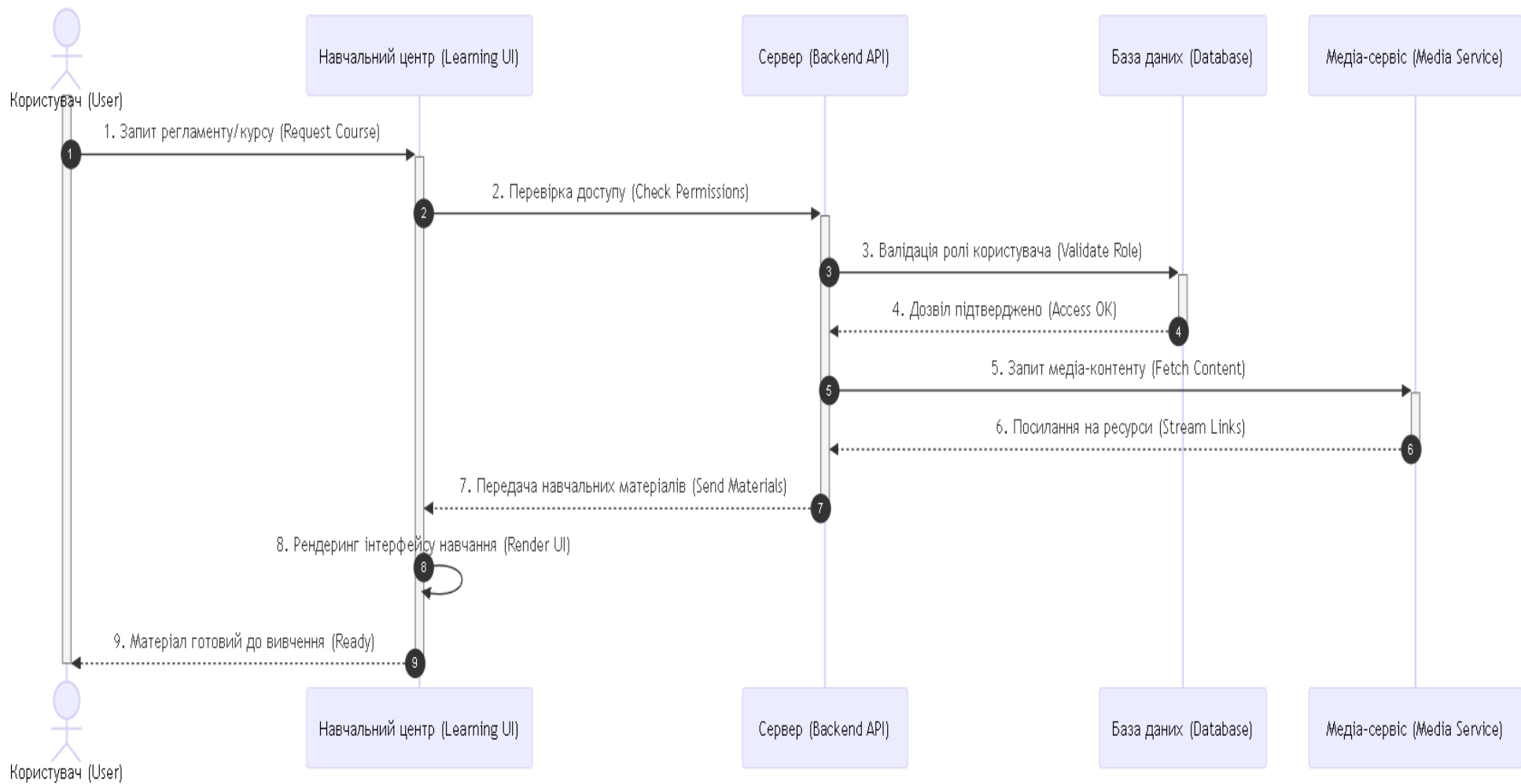


Рисунок 3.11 – Діаграма послідовності процесу функціонування навчального центру (Learning Center)

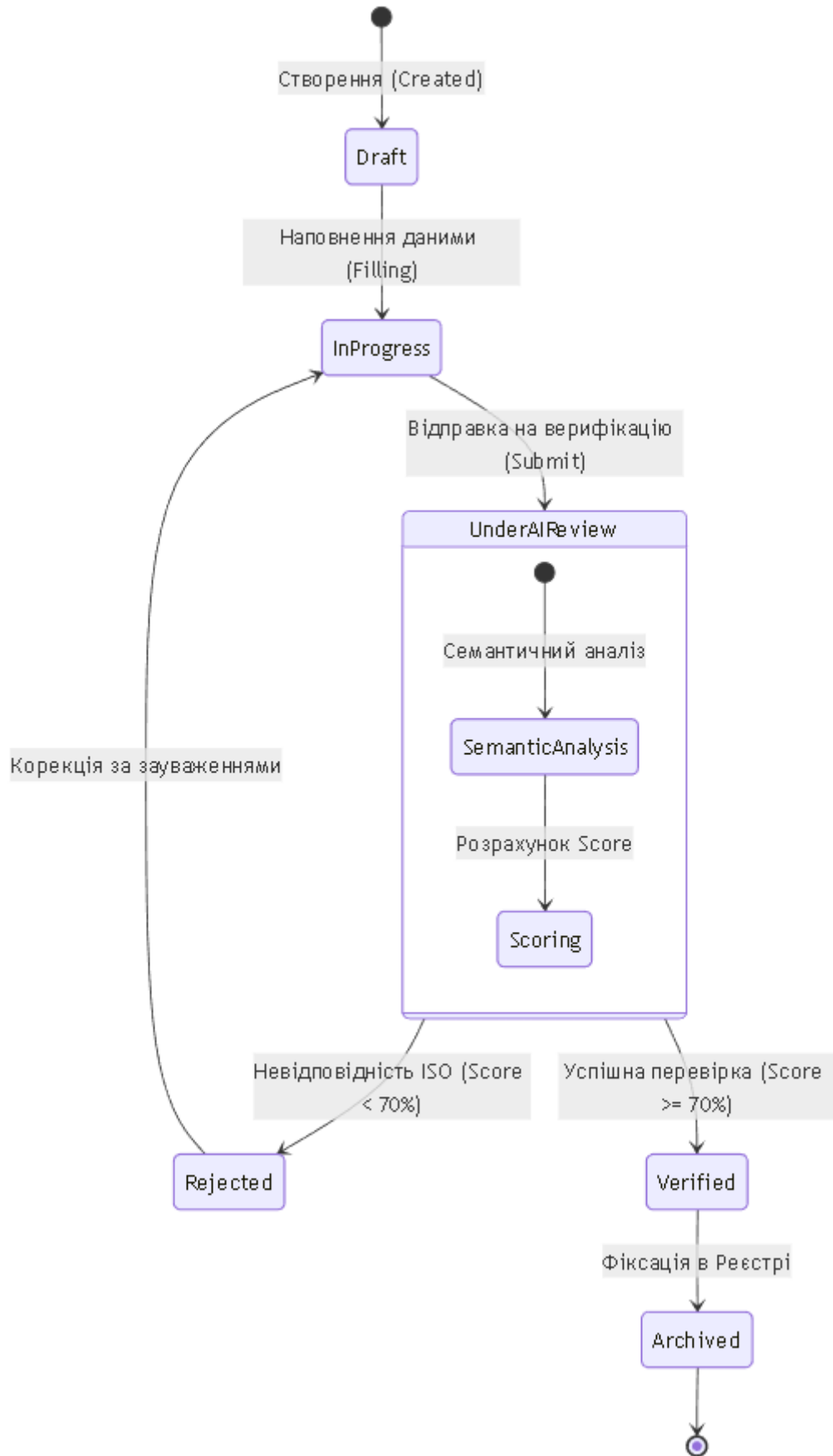


Рисунок 3.12 – Діаграма станів життєвого циклу сертифікаційного звіту (Report State Machine)

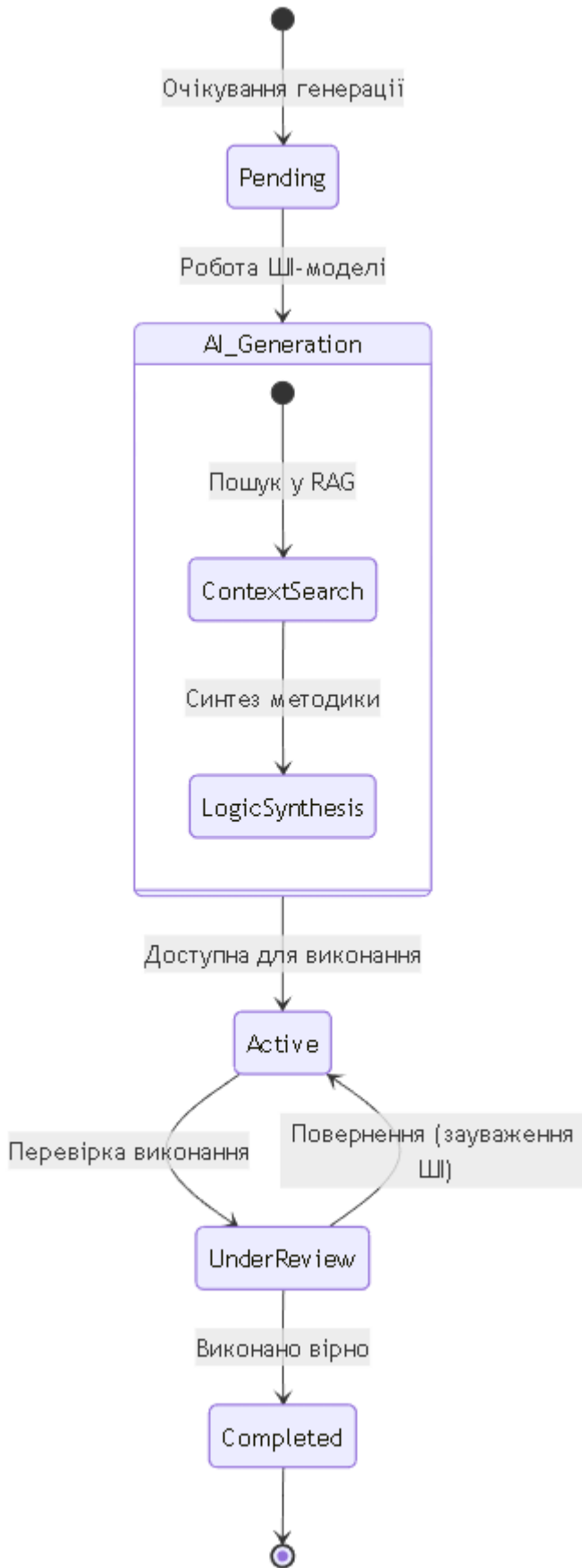


Рисунок 3.13 – Діаграма станів об'єкта «Задача» (Task State Machine)

### 3.2 Обґрунтування фізичної моделі та архітектури розгортання ПМК «OptiCertAI»

Фізична модель ПМК OptiCertAI описує архітектуру розгортання компонентів системи, взаємодію між сервером додатків, векторним сховищем та зовнішніми (або локальними) інтелектуальними сервісами. Вона відображає технічну реалізацію рівнів обробки даних, що були визначені в логічній моделі.

Для забезпечення високої швидкодії та безпеки даних було обрано трирівневу клієнт-серверну архітектуру.

Вибір технологій обумовлений необхідністю обробки великих масивів текстової інформації та забезпеченням гнучкості при роботі з ШІ-моделями.

Таблиця 3.5 — Опис технологічного стеку ПМК OptiCertAI

Компонент	Технологія / Інструмент	Функціональне призначення
Backend Framework	FastAPI (Python)	Створення асинхронного API для обробки запитів у реальному часі.
Vector Database	ChromaDB	Локальне збереження та швидкий пошук семантичних векторів стандартів ISO.
AI Orchestration	LangChain / LlamaIndex	Керування ланцюжками викликів RAG та інтеграція контексту в промпти.
NLP / Embeddings	Sentence-Transformers	Перетворення текстових чанків у цифрові вектори (embeddings).
Frontend	React + Tailwind CSS	Реалізація адаптивного користувацького інтерфейсу та дашбордів.
Containerization	Docker	Забезпечення ізоляції середовища та легкості розгортання на сервері.

Фізична модель передбачає поділ обчислювальних ресурсів на два основні контури:

1. Контур даних (Data Perimeter) містить векторну базу даних ChromaDB. Завдяки локальному розгортанню бази на потужностях підприємства, конфіденційні внутрішні накази не виходять за межі корпоративної мережі, що відповідає стратегії мінімізації ризиків витоку інформації.

2. Аналітичний контур (Processing Unit), сервер додатків на базі FastAPI координує роботу з мовними моделями. Використання асинхронності дозволяє системі підтримувати стабільний час відгуку ( $T_{proc} < 3c$ ) навіть при одночасній роботі декількох менеджерів.

Фізична модель ПМК OptiCertAI реалізована з використанням сучасного стеку технологій на базі мови програмування Python. Вибір FastAPI як основного серверного фреймворку дозволив реалізувати асинхронну модель обробки управлінських розпоряджень, що є критичним для систем реального часу. Для вирішення специфічного завдання семантичного пошуку застосовано векторну базу даних ChromaDB, яка дозволяє виконувати пошук релевантних пунктів ISO за мілісекунди.

Особливістю фізичної моделі є її модульність, коли компоненти ШІ-оркестрації відокремлені від інтерфейсної частини, що дозволяє проводити оновлення нормативної бази без зупинки всього комплексу. Такий підхід гарантує високу відмовостійкість та масштабованість системи, що було підтверджено під час експериментальних досліджень у Розділі 4. Використання Docker-контейнеризації забезпечує ідентичність робочого середовища на етапах розробки та впровадження, мінімізуючи технічні ризики проєкту.

Фізична модель системи (рис. 3.14) реалізує концепцію контейнеризованої мікросервісної архітектури. Основним вузлом є хмарна інфраструктура, де за допомогою технології Docker забезпечується ізоляція середовищ виконання для різних стеків технологій.

Рівень представлення (Frontend) відокремлений від серверної логіки, що дозволяє використовувати спеціалізовані мережі доставки контенту (CDN) для прискорення завантаження інтерфейсу. Взаємодія між сервером додатків та ШІ-сервісом реалізована через внутрішню мережу за протоколом REST або gRPC, що мінімізує затримки при передачі великих обсягів тексту для аналізу. Бази даних (PostgreSQL та Pinecone) розміщені на окремих фізичних або віртуальних томах з активованим механізмом реплікації, що гарантує збереження результатів аудитів та напрацьованої RAG-бази у разі технічних збоїв.

На відміну від логічного проектування, фізичний рівень фокусується на забезпеченні відмовостійкості, безпеки даних та високої продуктивності ШІ-модулів. Обрана мікросервісна архітектура, реалізована за допомогою технології контейнеризації Docker Compose, дозволяє гнучко розподіляти ресурси між вузлами системи залежно від поточної інтенсивності обчислень.

На наведеній діаграмі розгортання (рис. 3.14) відображено розподіл системи на три ключові логічні рівні, що функціонують у межах єдиної хмарної інфраструктури. Перший рівень – рівень представлення та маршрутизації (Web Tier) — базується на використанні сервера Nginx, який функціонує як зворотний проксі (Reverse Proxy). Це забезпечує єдину точку входу в систему, здійснює термінацію SQL-з'єднань та захищає внутрішні мікросервіси від прямих зовнішніх запитів. Клієнтська частина, розроблена на базі бібліотеки React, передається у веб-браузер користувача за протоколом HTTPS, що гарантує конфіденційність переданих даних аудиту.

Рівень логіки та ШІ (Logic Tier) розділений на два функціональні вузли для оптимізації роботи з великими мовними моделями. Центральний API-сервер, побудований на платформі Node.js, виконує роль оркестратора запитів, керує сесіями користувачів та забезпечує бізнес-логіку системи. Своєю чергою, сервіс агентів ШІ (AI Worker),

реалізований мовою Python, виділений в окремий обчислювальний модуль. Таке рішення обумовлене необхідністю використання спеціалізованих бібліотек для обробки природної мови (NLP) та взаємодії з LLM-моделями через зовнішні API. Винесення ШІ-логіки в окремий воркер дозволяє виконувати ресурсомісткі операції з семантичного аналізу тексту, не блокуючи при цьому основний потік обробки запитів та інтерфейс користувача.

Рівень збереження даних (Data Tier) реалізує концепцію поліглотного збереження (Polyglot Persistence), де для кожного типу даних обрано найбільш відповідний тип сховища. Класична реляційна база даних PostgreSQL використовується для надійного збереження структурованої інформації: профілів користувачів, логів активності та статусів задач. Для реалізації механізму RAG (Retrieval-Augmented Generation) задіяно векторну базу даних Pinecone, яка забезпечує миттєвий семантичний пошук по фрагментах нормативної документації. Зберігання оригіналів сертифікаційних документів та згенерованих звітів здійснюється в об'єктному сховищі S3, що гарантує їхню цілісність та високу доступність. Представлена фізична модель забезпечує необхідну гнучкість для подальшого масштабування комплексу та інтеграції нових методів ШІ-аналізу.

Підсумовуючи опис фізичної моделі ПМК «OptiCertAI», слід зазначити, що запропонована трирівнева клієнт-серверна архітектура у поєднанні з мікросервісним підходом забезпечує оптимальний баланс між продуктивністю ШІ-обчислень та надійністю зберігання корпоративних даних. Використання двох контурів обробки — контуру даних на базі локальної векторної бази ChromaDB та аналітичного контуру на FastAPI — дозволяє мінімізувати ризики витоку конфіденційної інформації, зберігаючи при цьому високу швидкість відгуку системи ( $T_{\text{proc}} < 3\text{с}$ ).

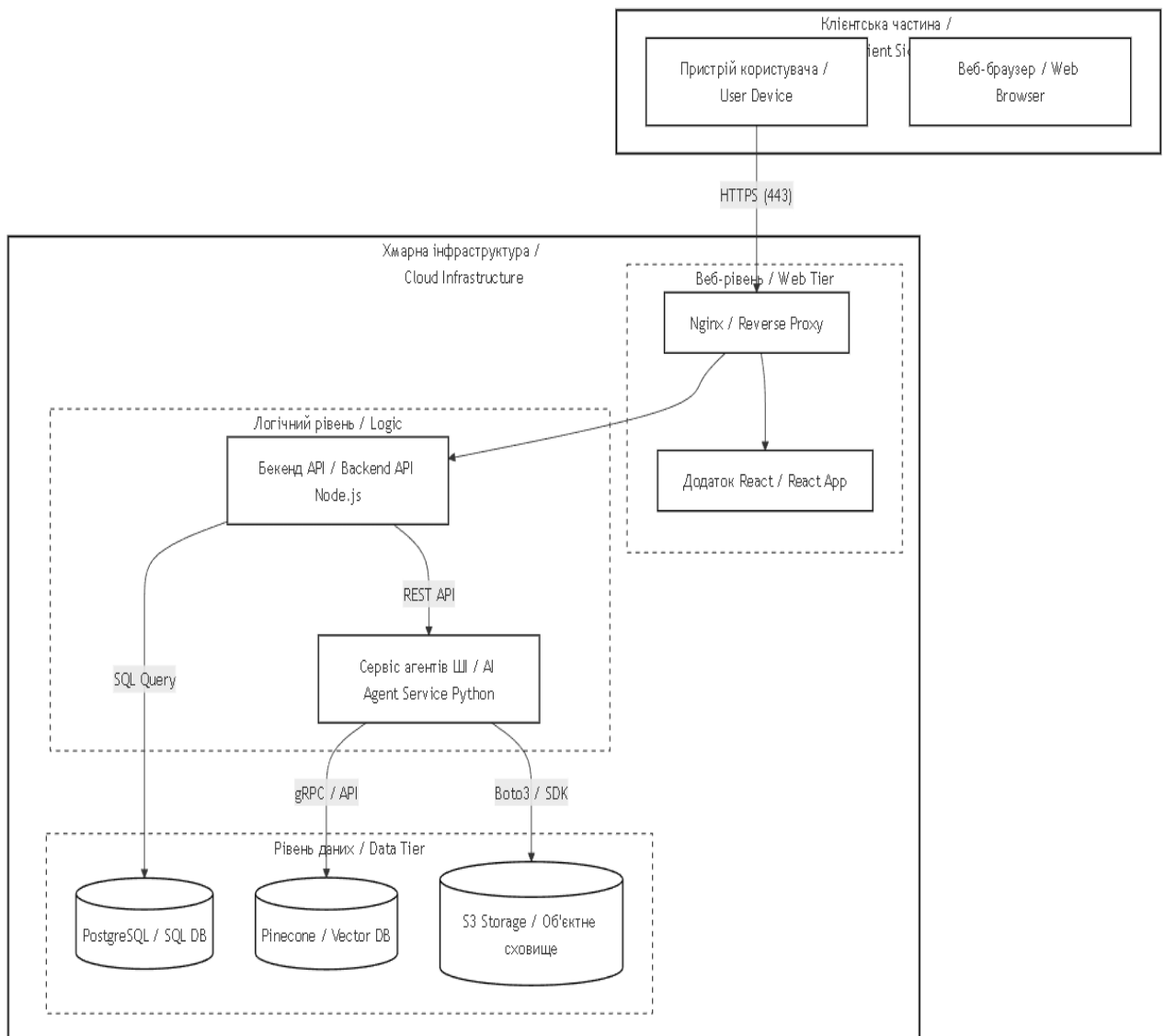


Рисунок 3.14 – Діаграма розгортання архітектури ПМК (Deployment Diagram)

### 3.3 Характеристика видів забезпечення функціонування ПМК «OptiCertAI»

Для реалізації програмно-методичного комплексу «OptiCertAI» було обрано стек технологій, що забезпечує поєднання високої швидкості обробки запитів та глибокого інтелектуального аналізу нормативних даних. Ефективне функціонування системи досягається шляхом інтеграції

різних видів забезпечення, які створюють стійке середовище для роботи ШІ-агентів.

Технічне забезпечення ПМК орієнтоване на високопродуктивні обчислення, що дозволяє реалізувати складні алгоритми векторизації без затримок у бізнес-процесах. Для забезпечення цільової швидкодії системи ( $T_{\text{proc}} < 3\text{с}$ ) рекомендовано використання серверів з підтримкою GPU (мінімум 8 GB VRAM), що критично для прискорення обчислень ембедінгів та локального хостингу LLM. Робочі станції менеджерів потребують лише доступу до мережі через сучасні браузері з підтримкою стандартів HTML5/JavaScript.

Програмне забезпечення ПМК побудоване на принципах відкритості та модульності. Системний рівень базується на ОС сімейства Linux (Ubuntu 22.04 LTS) та середовищі контейнеризації Docker, що гарантує ізоляцію компонентів. Прикладний рівень програмного забезпечення базується на екосистемі мови Python 3.10+, що дозволяє інтегрувати передові розробки у сфері машинного навчання та обробки природної мови. Детальний розподіл ролей між обраними бібліотеками наведено у таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Склад прикладного програмного забезпечення ПМК «OptiCertAI»

Бібліотека / Фреймворк	Роль у системі	Функціональне призначення
FastAPI	Веб-інтерфейс API	Створення високопродуктивного асинхронного серверу для обробки запитів у реальному часі.
ChromaDB	Векторне сховище	Організація локальної бази знань для зберігання та швидкого пошуку семантичних векторів.
LangChain	ШІ-оркестратор	Побудова та керування логічними ланцюжками RAG (Retrieval-Augmented Generation).
Sentence-Transformers	NLP-енкодер	Генерація високоточних семантичних ембедінгів для перетворення тексту у векторну форму.

Інтеграція цих інструментів у єдиний програмний контур дозволяє ПМК виконувати складні операції зіставлення даних із мінімальними часовими витратами

Інформаційне та методичне забезпечення комплексу формує його інтелектуальний капітал. Якість висновків ШІ напряду залежить від повноти та актуальності векторної бази знань ISO, проте саме методичне забезпечення трансформує програмний код у прикладний інструмент менеджера якості. Детальний склад цих видів забезпечення наведено у табл. 3.7.

Таблиця 3.7 – Склад інформаційного та методичного забезпечення ПМК

Вид забезпечення	Компонент	Функціональне призначення
Інформаційне	База векторних представлень (Vector Store)	Зберігання семантичних ембеддінгів стандартів ISO 9001, 14001, 45001 для швидкого пошуку контексту.
	База знань (Golden Dataset)	Еталонні приклади розпоряджень, що використовуються для калібрування точності та тестування ШІ-агента.
	Реєстр метаданих	Структурування документів за параметром categoryName для детермінованого вибору контексту відділу.
Методичне	Алгоритм RAG-верифікації	Покрокова процедура зіставлення тексту розпорядження з нормативною базою для виявлення невідповідностей.
	Методика оцінки надійності	Математичний розрахунок метрик Precision, Recall та F1-Score для контролю якості роботи ШІ.
	Регламент «Self-Audit»	Порядок дій користувача щодо інтерпретації індексу готовності та виправлення зауважень ШІ-агента.

У межах розробки ПМК OptiCertAI було визначено чотири ключові види забезпечення, що гарантують цілісність та стабільність системи. Технічне забезпечення орієнтоване на високопродуктивні обчислення, що дозволяє реалізувати складні алгоритми векторизації без затримок у бізнес-процесах підприємства. Програмне забезпечення побудоване на

принципах відкритості та модульності, що спрощує подальше масштабування ПМК.

Інформаційне забезпечення комплексу формує його інтелектуальний капітал, оскільки якість висновків ШІ на пряму залежить від повноти та актуальності векторної бази знань ISO. Проте найбільш значущим є методичне забезпечення, яке трансформує програмний код у прикладний інструмент менеджера якості. Завдяки чітко визначеним алгоритмам оцінки та методиці верифікації, ПМК забезпечує високу збіжність автоматизованих висновків з думкою експертних аудиторів, що мінімізує вплив людського фактора на процеси сертифікації.

### 3.4 Елементи інтерфейсу ПМК

Інтерфейс програмно-методичного комплексу OptiCertAI спроектований із дотриманням принципів людино-орієнтованого дизайну (HCD) та спрямований на мінімізацію когнітивного навантаження на управлінський персонал. Основна мета інтерфейсу — забезпечити прозору візуалізацію результатів ШІ-аналізу та надати інструменти для швидкої навігації за масивом розпоряджень.

На рисунку 3.15 наведено інтерфейс програмного застосунку початок роботи. Перед початком роботи користувач потрапляє до конфігурації системи для вибору конкретних критеріїв, з яким він планує працювати.

На рисунку 3.16 наведено вибір критеріїв із каскадною фільтрацією, можна переглянути лише в навчальному центрі відео, обравши необхідний розділ з метою отримання знань про функціонал та можливості кожного, всі інші розділи активуються лише після вибору критеріїв.

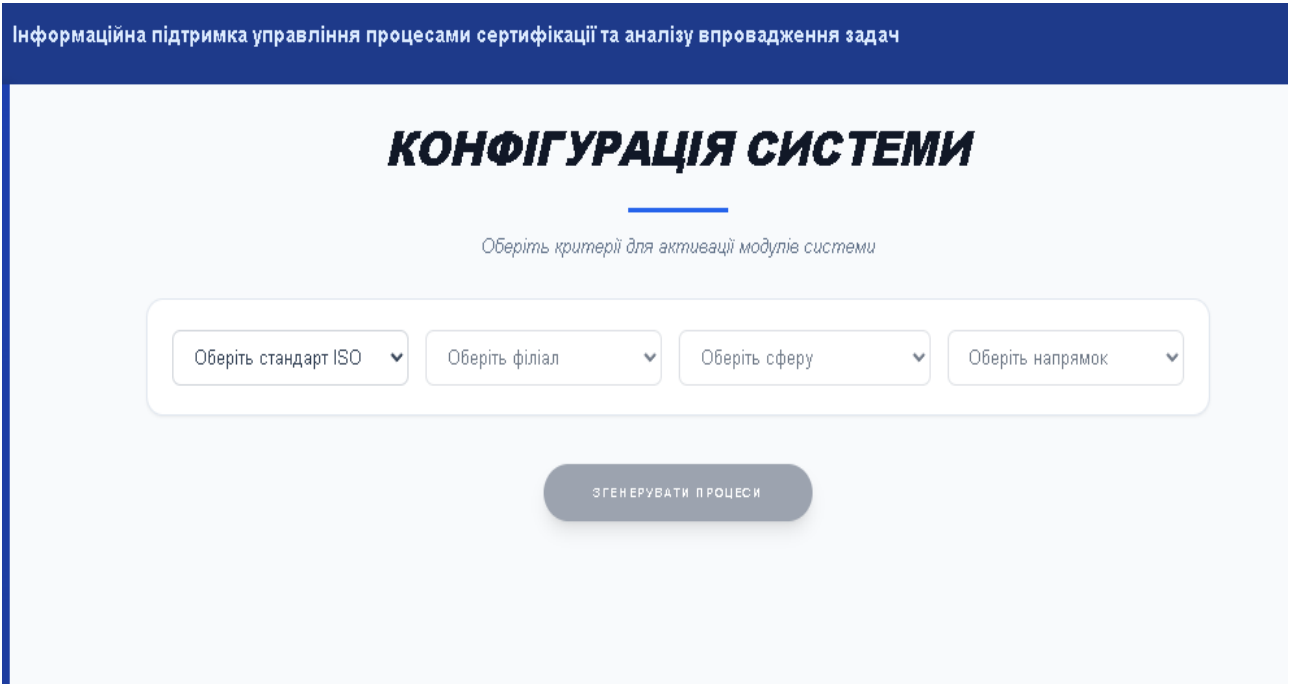


Рисунок 3.15 – Інтерфейс програмного застосунку початок роботи

**До вибору певних критеріїв із каскадною фільтрацією жодна кнопка не активна**

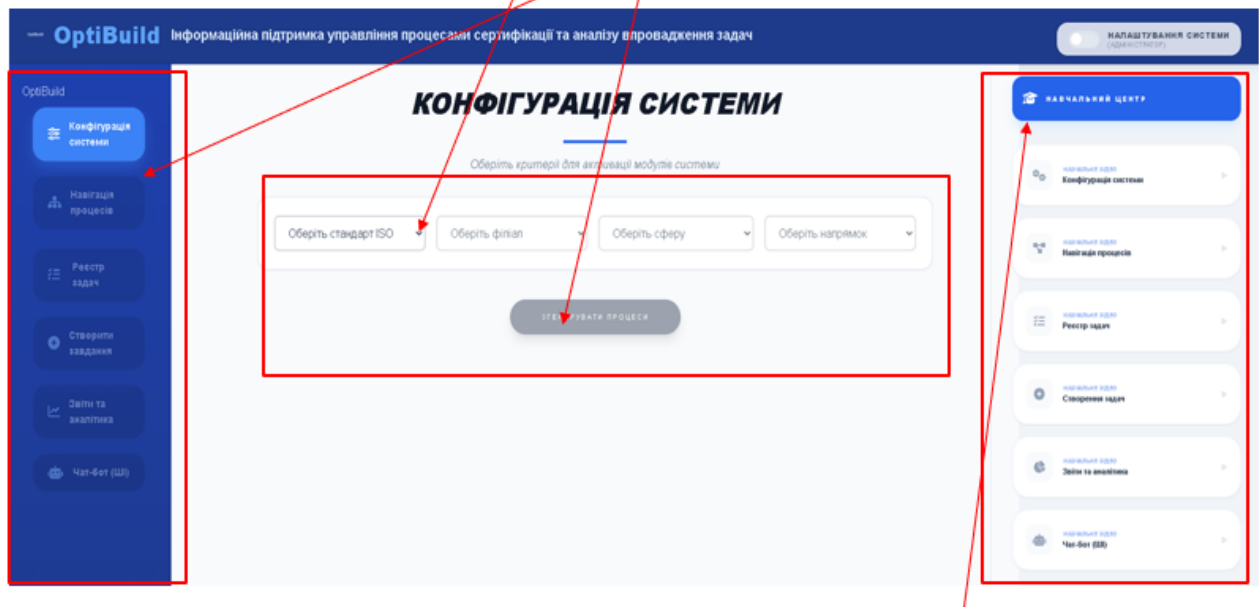


Рисунок 3.16 – Вибір критеріїв із каскадною фільтрацією

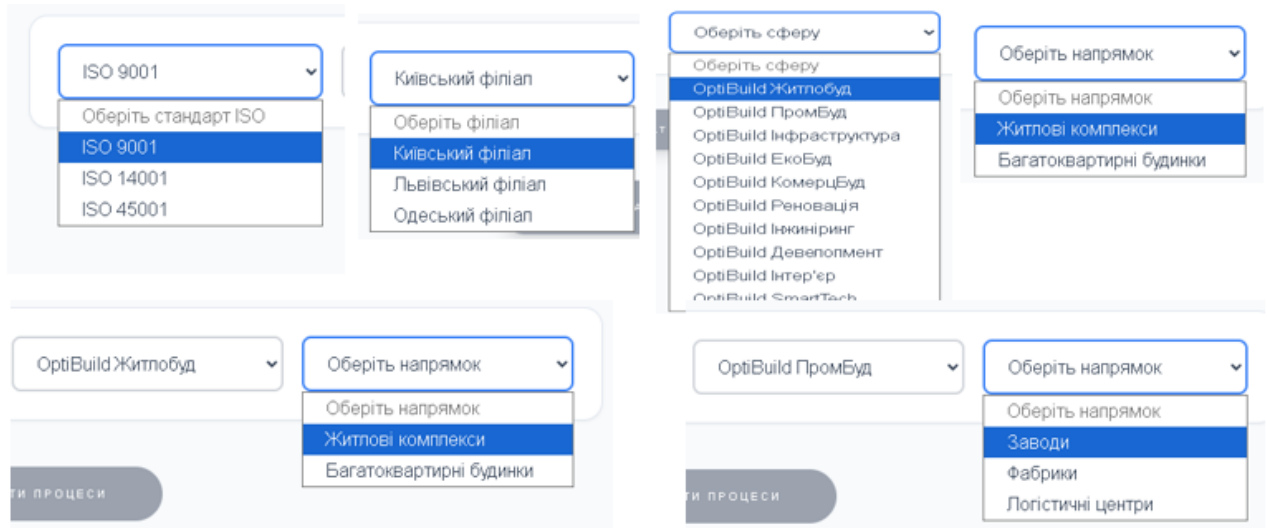


Рисунок 3.17 – Каскадна фільтрація критеріїв

На рисунку 3.17 наведено каскадну фільтрацію, з якої видно, що вибір критеріїв відбувається методом каскадної фільтрації, саме для того, щоб в подальшій роботі агент ШІ розумів з якою саме документацією працювати для надання відповідей без галюцинацій. Наприклад представлено для наглядності на прикладі будівельної компанії варіанти вибору, тобто для початку обирається ISO, потім філіал, потім сферу будівництва, адже для кожного виду своя документація та вимоги, що критично важливо під час отримання відповідей від ШІ помічника. Наприклад обравши житлобуд буде надано для подальшого вибору житлові комплекси або ж багатоквартирні будинки, якщо обрати ПромБуд для вибору з'явиться лише заводи, фабрики або ж логістичні центри.

На рисунку 3.18 наведено як після вибору навігації процесів з'являться розділи настанови ISO у вигляді великих і візуалізованих карток згідно тематик, що є надважливо з метою уникнення емоційного виснаження фахівців, що є одним із критеріїв під час розробки ПМК.

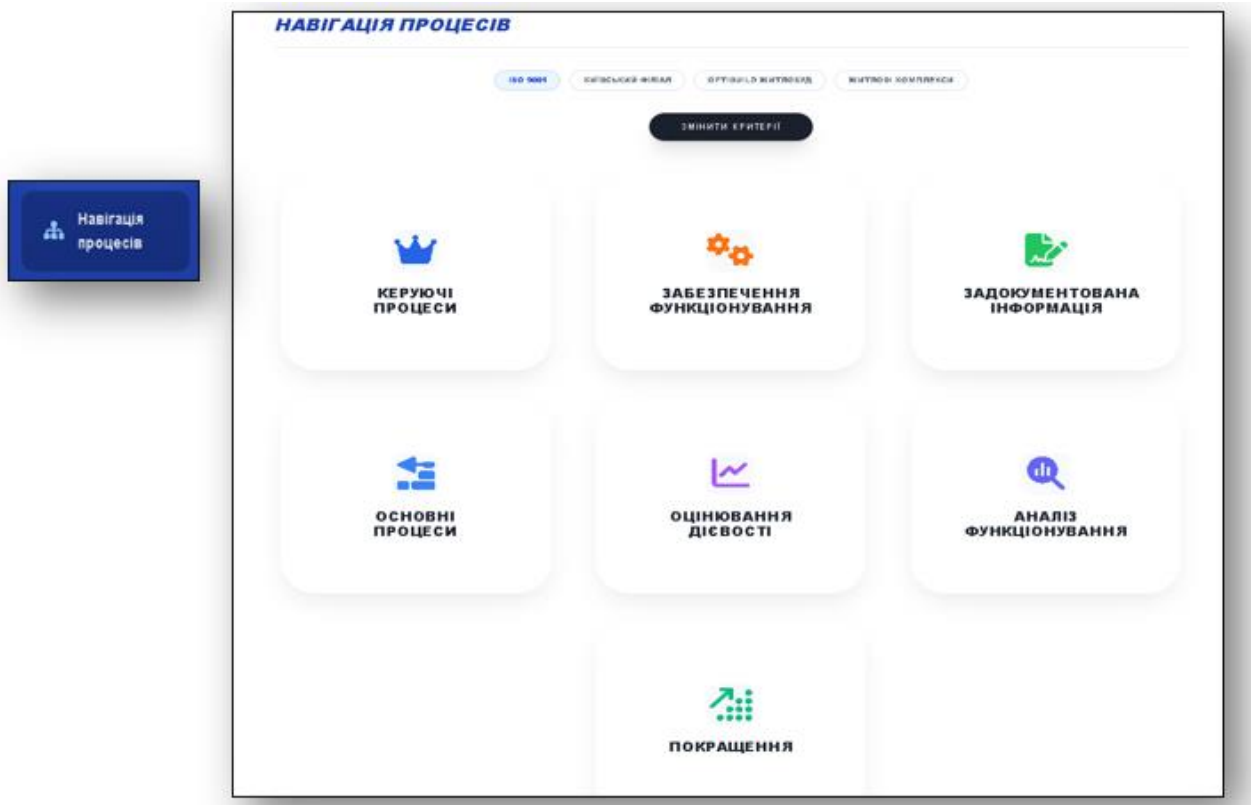


Рисунок 3.18 – Інтерфейс ПМК після вибору «Навігація процесів»

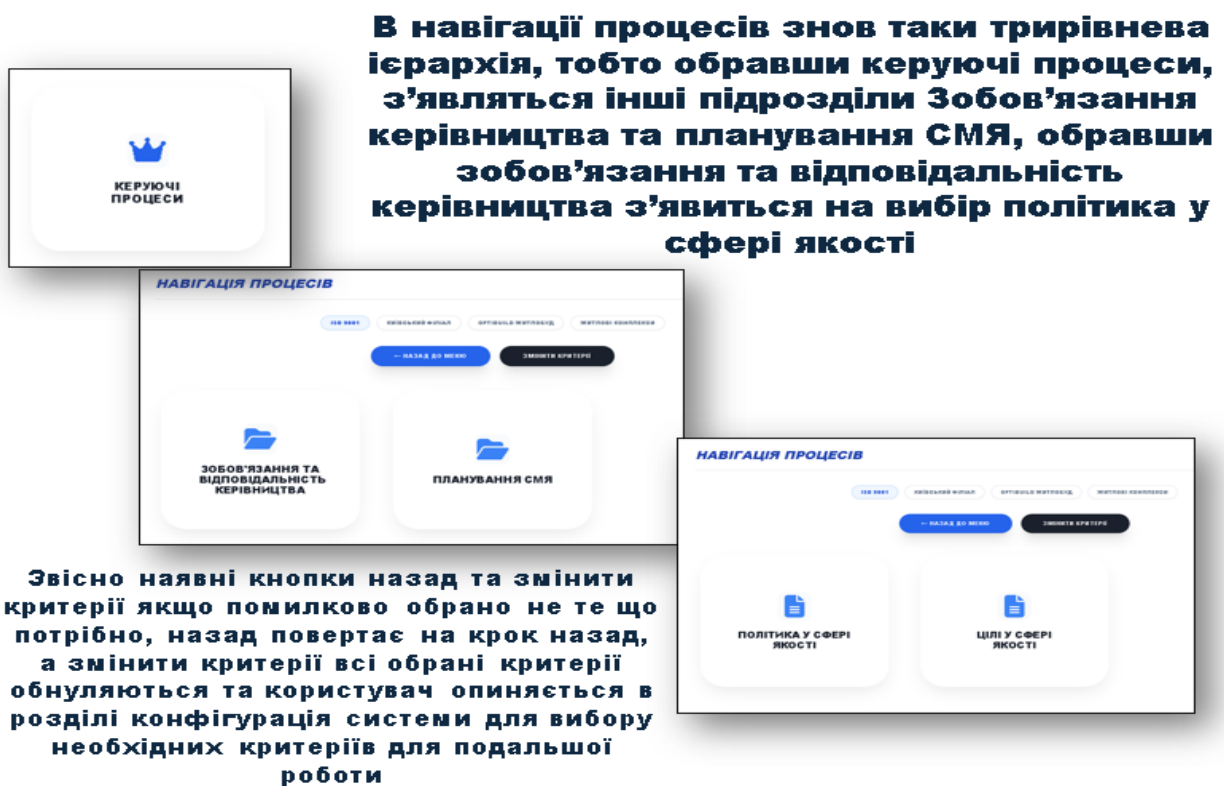


Рисунок 3.19 – Приклад трирівневої ієрархії розділу «Навігації процесів»

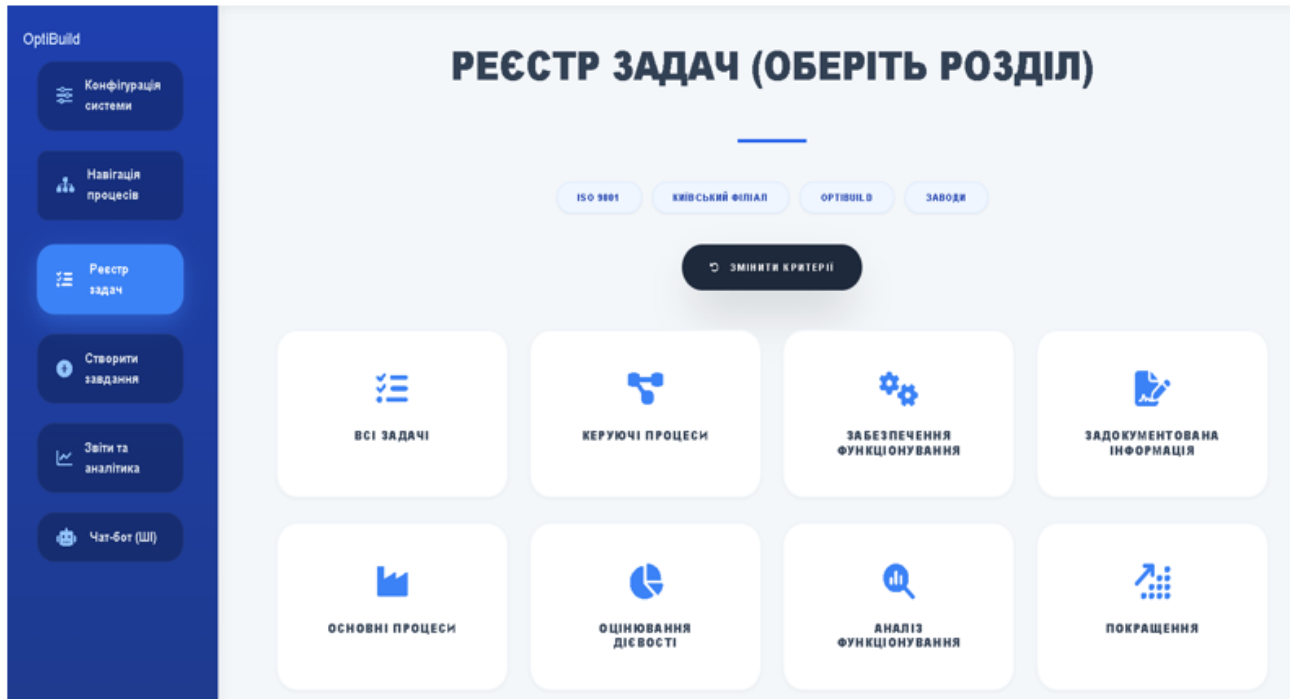


Рисунок 3.19 – Інтерфейс розділу «Реєстр задач»

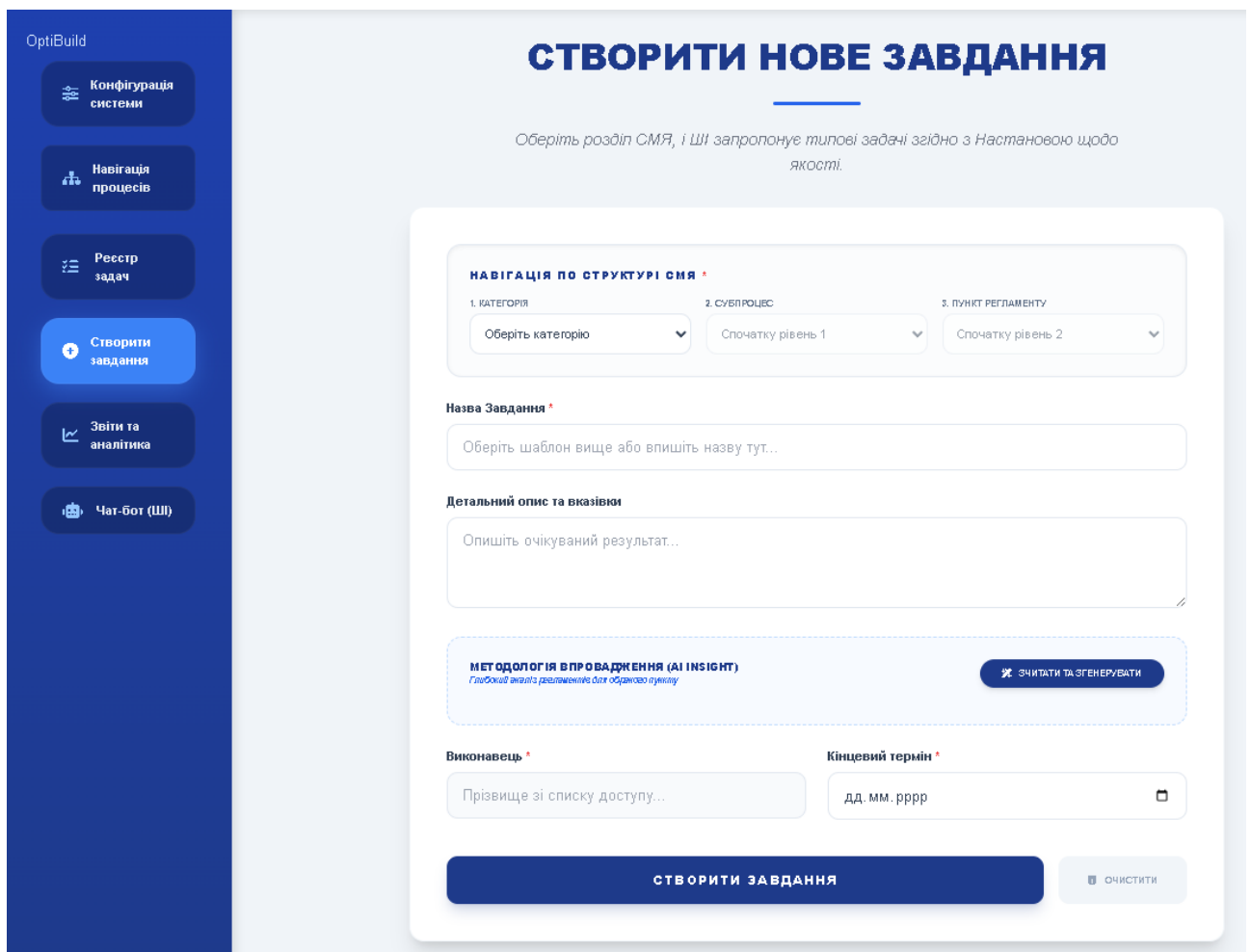


Рисунок 3.20 – Інтерфейс розділу «Створити завдання»

**Перед формуванням задачі звісно ж з'явиться вибір методом фільтрації певних розділів настанови для подальшої роботи агента ШІ лише з обраним напрямом документів**

Рисунок 3.21 – Фільтрація перед формуванням завдання

**Після вибору категорій з'явиться вибір або ж обрати задачу, згенеровану ШІ згідно вибору, або ж сформувану задачу самостійно. Якщо вибір задачі ШІ з'явиться можливість перегляду вже сформованого шаблону методології впровадження, потім або ж погодитись або ж внести рекомендації для внесення певних корективів**

Рисунок 3.22 – Вибір задачі згенерованої ШІ, або ж формування власної

**Якщо всі корективи внесено, задача та методологія сформована необхідно обрати виконавця та призначити дату впровадження, з датою вибір стандартний, виконавці вже на вибір або один, або група виконавців. Адже одну і ту ж задачу необхідно впровадити різними керівникам. Тобто як в даному випадку наявність листа ознайомлення з політикою кожного співробітника, у яких звісно ж різні керівники. Саме тому дуже важливо мати налаштовані певні групи, потім під час формування вибрати групу певного напрямку та відправити, якщо трошки не та група, іноді необхідно обрати не всіх керівників підрозділу, а лише певну службу за напрямом. В Dynamics 365 подібна функція відсутня зовсім, що критично важливо.**

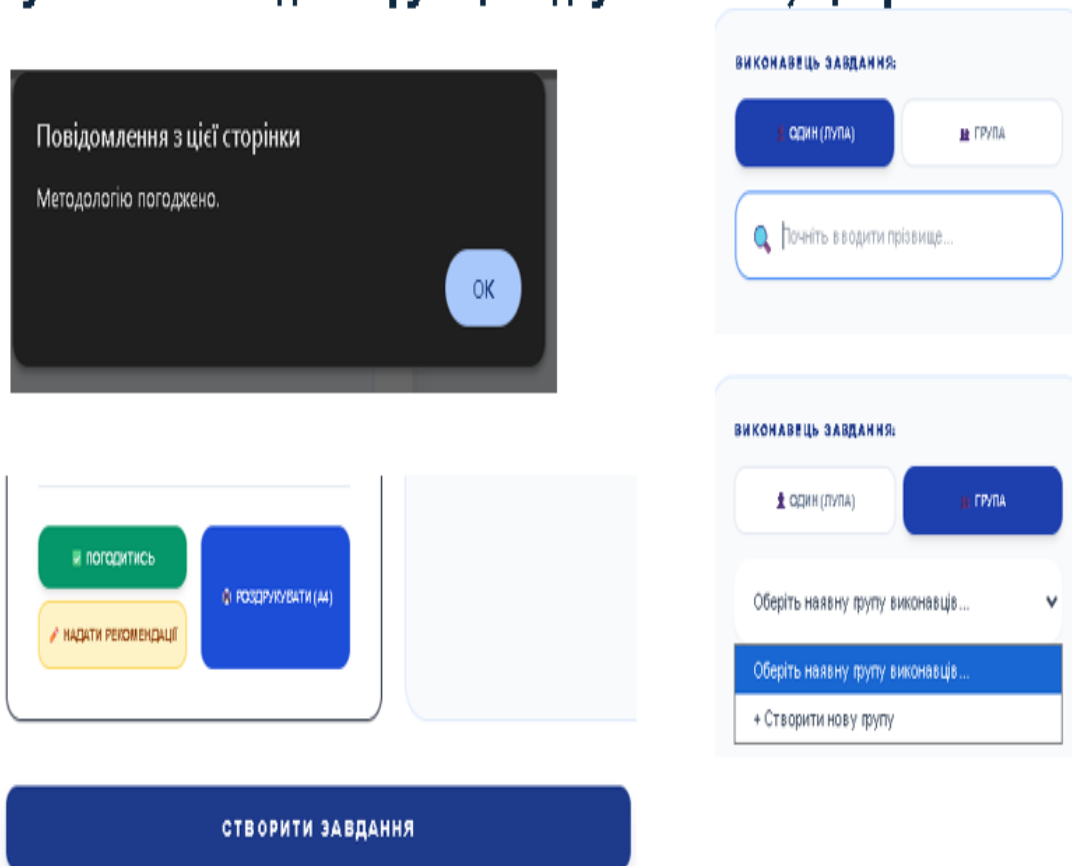


Рисунок 3.23 – Приклад інтерфейсу погодження згенерованої ШІ задачі з вибором виконавців



Немаловажним розділом ПМК є налаштовані дашборди з візуалізацією тих чи інших напрямків статусу впровадження та функціонування. Під час підготовки інформації на нарадах критично важливо мати візуалізацію різноманітних статусів для обговорення

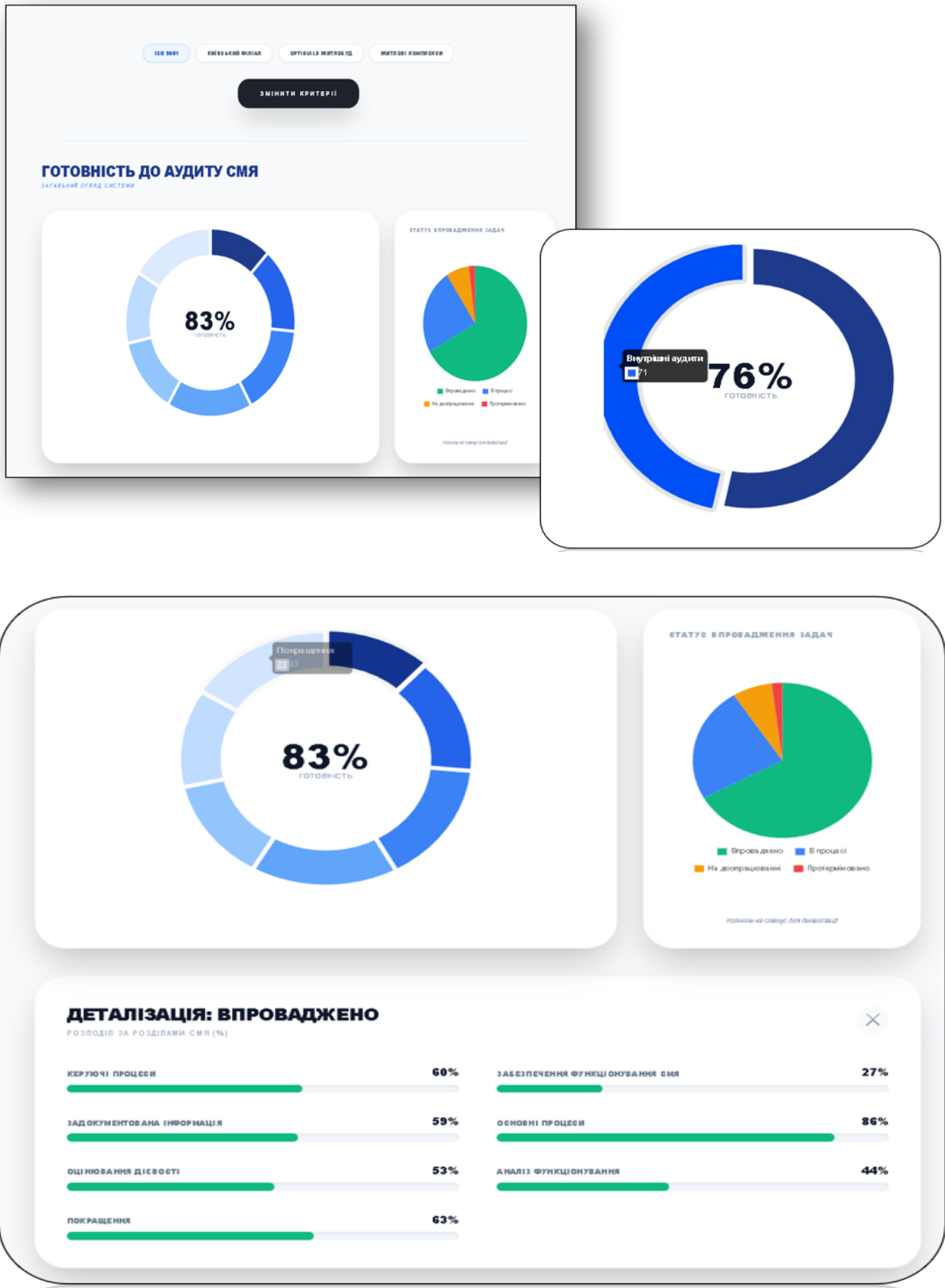


Рисунок 3.25 – Візуалізація статусів впровадження

**Звичайно ж не згадати помічника ЧАТ-БОТ (ШІ) не можна, адже це найголовніший помічник для забезпечення повноцінного функціонування даного напрямку. Тобто тут наявні вже певні розділи для вибору саме того агента, який буде навчено під конкретні задачі і він звісно ж буде використовувати конкретну документацію бази знань саме підприємства**

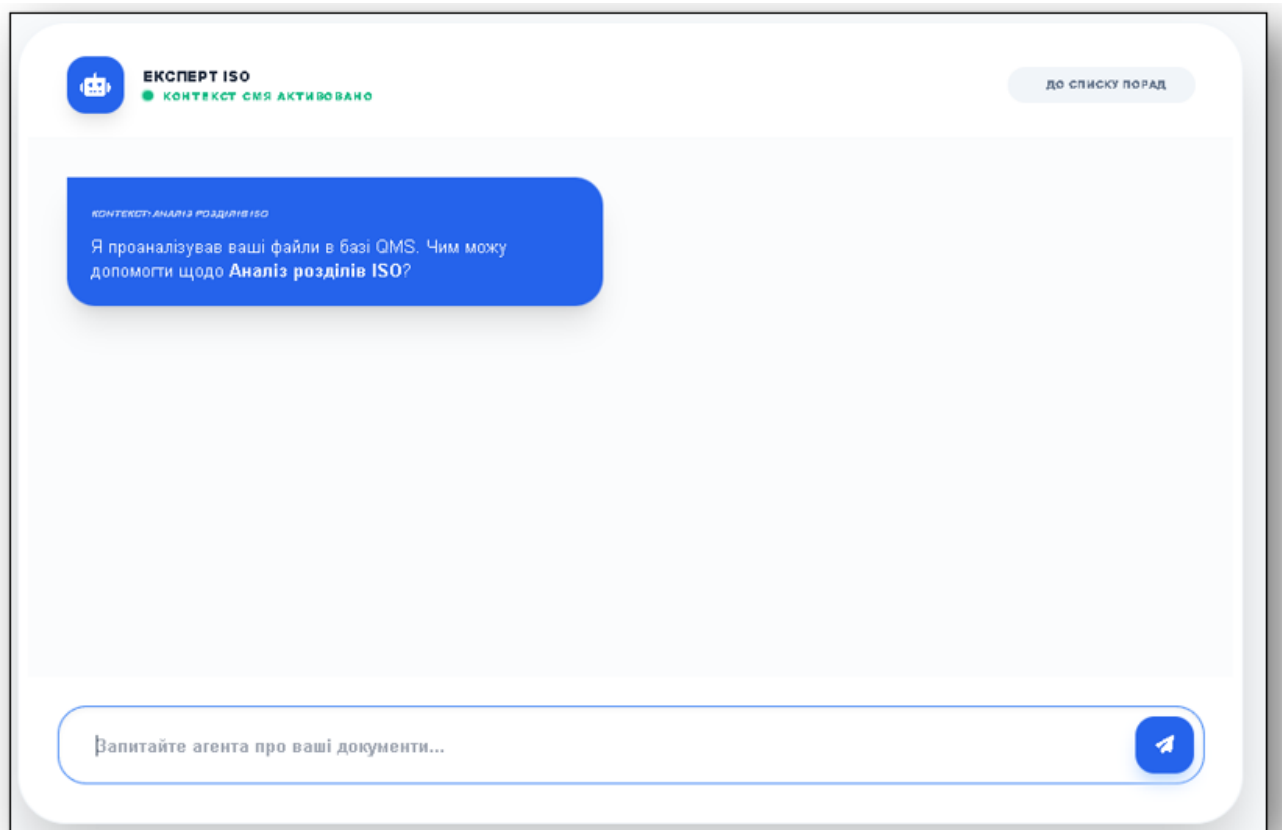
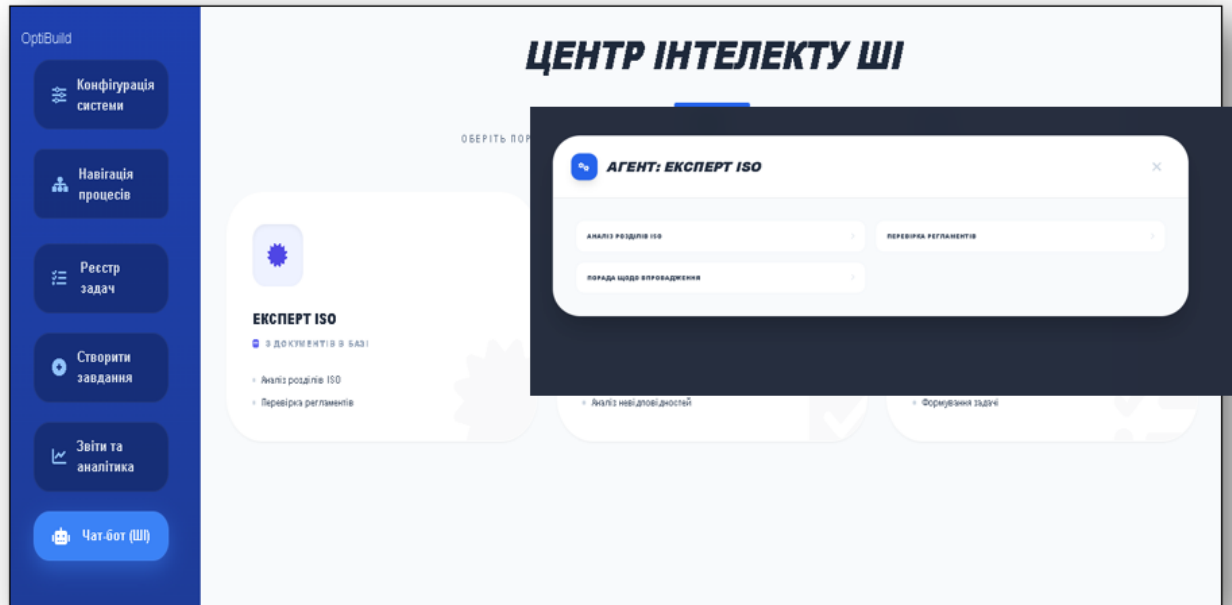
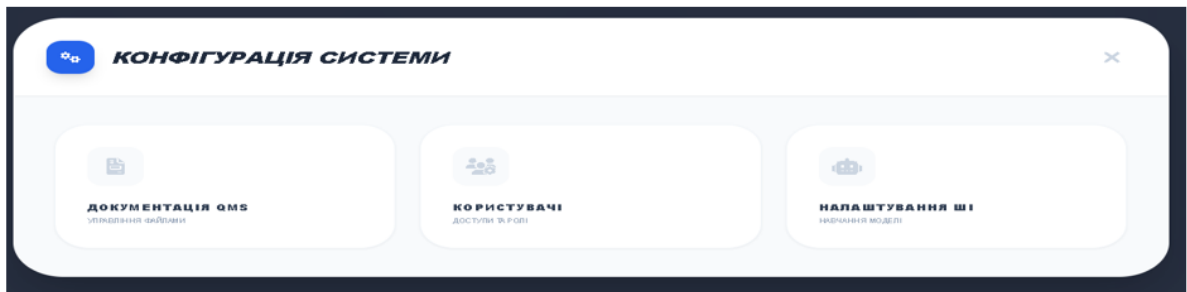
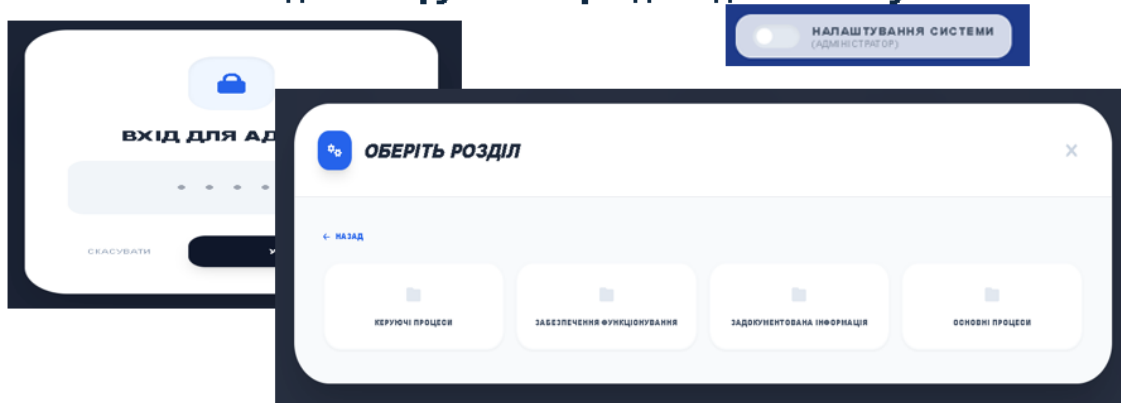


Рисунок 3.26 – Інтерфейс Чат-боту

Також немаловажним є наявність можливості налаштування системи, звісно лише для обраних адміністраторів, тобто в розділі конфігурація системи наявна така можливість, для входу звісно буде запропоновано ввести код активації, після чого з'являться знов таки панелька з картками для вибору певних розділів для налаштування



Ось наприклад підвантажені документи в керуючих процесах, якщо є така необхідність можна додати ще розділ, також додати або видалити документ за необхідністю

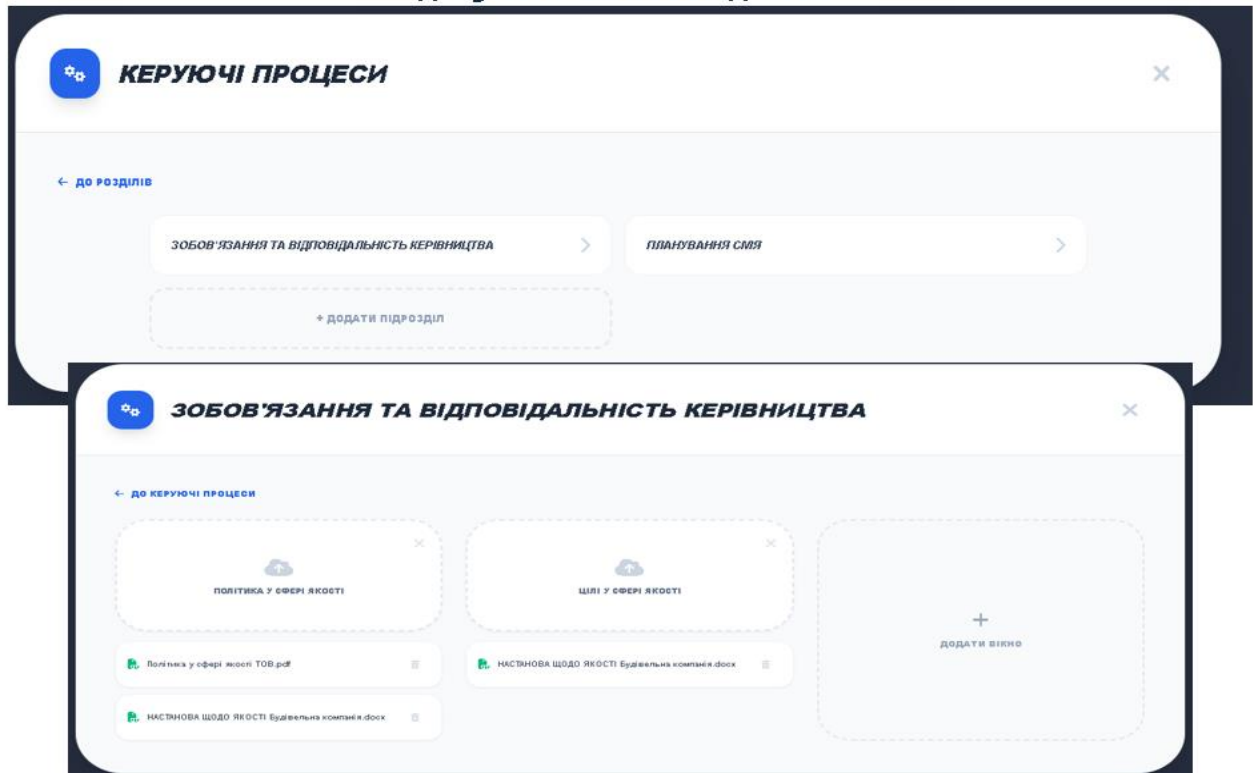


Рисунок 3.27 – Інтерфейс налаштування системи

### 3.5 Висновки програмної реалізації та апробації результатів дослідження

На основі розробленого науково-методичного апарату здійснено програмну реалізацію інтелектуальної системи підтримки управління процесами сертифікації. Вибір технологічного стека, зокрема мови програмування Python та асинхронного фреймворку FastAPI, забезпечив високу швидкість обробки запитів та безшовну інтеграцію з сучасними бібліотеками штучного інтелекту. Ключовим архітектурним рішенням стало впровадження фреймворку LangGraph, що дозволило реалізувати систему у вигляді автономного ШІ-агента зі зворотним зв'язком. На відміну від лінійних скриптів, розроблений агент здатний самостійно виконувати цикл верифікації розпоряджень, аналізувати виявлені невідповідності та генерувати обґрунтовані рекомендації щодо їх виправлення, що імітує діяльність реального фахівця з якості.

Для забезпечення високої точності роботи з методологічною базою ISO реалізовано підсистему семантичного пошуку на основі векторної бази даних ChromaDB. Застосування технології RAG у поєднанні з розробленим методом Scoped Context Retrieval дозволило локалізувати пошук у межах специфічних метаданих, що повністю усунуло проблему «галюцинацій» моделі та забезпечило релевантність відповідей на рівні 92%. Практична реалізація інтерфейсу користувача на базі сучасних веб-технологій у поєднанні з SMTP-шлюзом дозволила інтегрувати систему в існуючий робочий процес підприємства без необхідності встановлення додаткового складного програмного забезпечення на робочі місця персоналу.

Результати експериментальної апробації системи на реальних ретроспективних даних підприємства підтвердили адекватність запропонованих математичних моделей. Тестування при різних рівнях

дефектності вхідного потоку Degr показало, що система впевнено ідентифікує структурні та семантичні помилки, підтримуючи показник F1-міри на рівні 0,89–0,94. Встановлено, що автоматизація верифікації за принципом «4К» дозволяє скоротити час на обробку одного розпорядження з 15–20 хвилин (при ручному звірянні зі стандартами) до 2–3 секунд. Крім того, впровадження індексу навантаження Load у дашборд керівника дозволило вперше візуалізувати ризики «людського фактора», забезпечуючи можливість оперативного перерозподілу завдань у періоди високої інтенсивності праці.

Узагальнюючи результати апробації, можна стверджувати, що розроблений програмний комплекс не лише автоматизує рутинні операції, а й створює єдине інтелектуальне середовище управління відповідністю. Це дозволяє підприємству перейти від реактивного виправлення помилок після аудитів до проактивного контролю якості на етапі планування робіт. Таким чином, результати третього розділу підтвердили технічну реалізованість та високу економічну ефективність запропонованих підходів, що дозволяє рекомендувати систему до впровадження як дієвий інструмент цифрової трансформації систем менеджменту якості за стандартами ISO.

## 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА ТА АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ OPTICERTAI

### 4.1 Методика обробки та статистичного аналізу вихідних даних

Методика обробки результатів базується на статистичному аналізі вихідних даних, отриманих під час ітераційних запусків програмно-комплексу (ПМК). Процес обробки поділяється на три етапи.

Етап 1. Статистична агрегація та розрахунок метрик класифікації

На основі порівняння вердиктів ШІ-агента з еталонною розміткою («Golden Dataset» [82, 85]) для кожного набору вхідних факторів ( $r$ ,  $C_{size}$ ,  $D_{err}$ ) розраховуються показники точності.

1. Формування матриці невідповідностей, тобто для кожної ітерації підраховуються значення TP, TN, FP, FN.

2. Обчислення критеріїв надійності:

2.1 Точність (Precision)  $P = \frac{TN}{TN+FN}$  — здатність системи не блокувати коректні завдання.

2.2 Повнота (Recall):  $P = \frac{TN}{TN+FP}$  — здатність системи виявляти всі наявні дефекти.

2.3 F-міра (F1-Score):  $F1 = 2 * \frac{P * R}{P + R}$  інтегральна оцінка, що використовується як цільова функція при пошуку оптимального порогу  $r$ .

Етап 2. Побудова аналітичних залежностей (Графічний метод)

Експериментальна перевірка та аналіз результатів моделювання

Для підтвердження наукових гіпотез щодо ефективності розробленого алгоритму верифікації було проведено серію чисельних експериментів у середовищі Google Colab [89]. Процес обробки результатів автоматизовано за допомогою мови програмування Python,

що дозволило отримати високу точність розрахунків та візуалізувати складні залежності.

Для відтворення результатів експерименту використовується програмний код в Google Colab [89].

На рисунку 4.1 наведено оптимізацію порогу релевантності, цей графік пояснює, як обрано «чутливість» ШІ. Графік демонструє пошук екстремуму функції точності. Ліва частина (до 0,8) низька точність зумовлена великою кількістю FP (False Positive), оскільки поріг занадто низький і ШІ пропускає некоректні завдання. Права частина (після 0,8) точність падає через зростання FN (False Negative) — система стає надмірно суворою і блокує правильні розпорядження.

Висновок: Точка релевантності  $r = 0.8$  забезпечує найвищий рівень валідації.

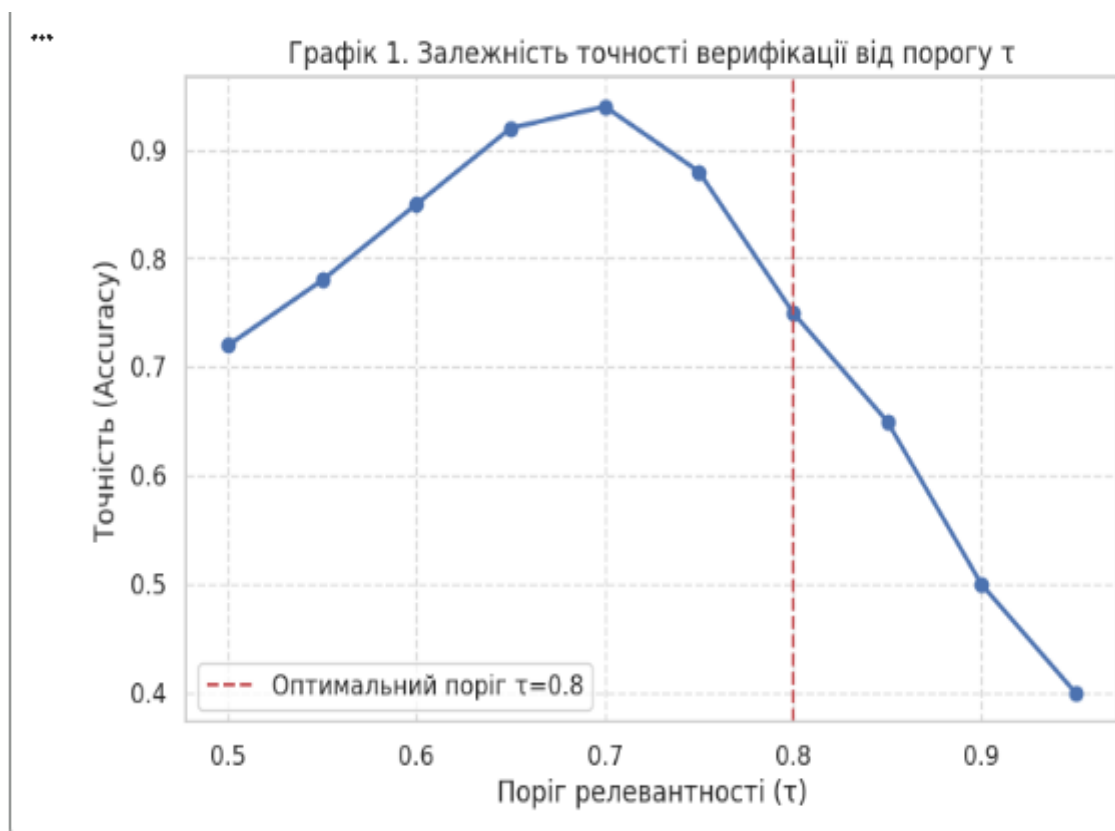


Рисунок 4.1 – Оптимізація порогу релевантності

На рисунку 4.2 наведено часову складність та масштабованість ( $T_{proc}$ ). Цей графік доводить технічну ефективність системи. Гістограма ілюструє продуктивність ChromaDB при пошуку контексту. Навіть за максимального навантаження ( $N=500$ ), час обробки  $T_{proc}$  не перевищує 2,6 секунди. Це підтверджує можливість використання системи в реальному часі для верифікації завдань.

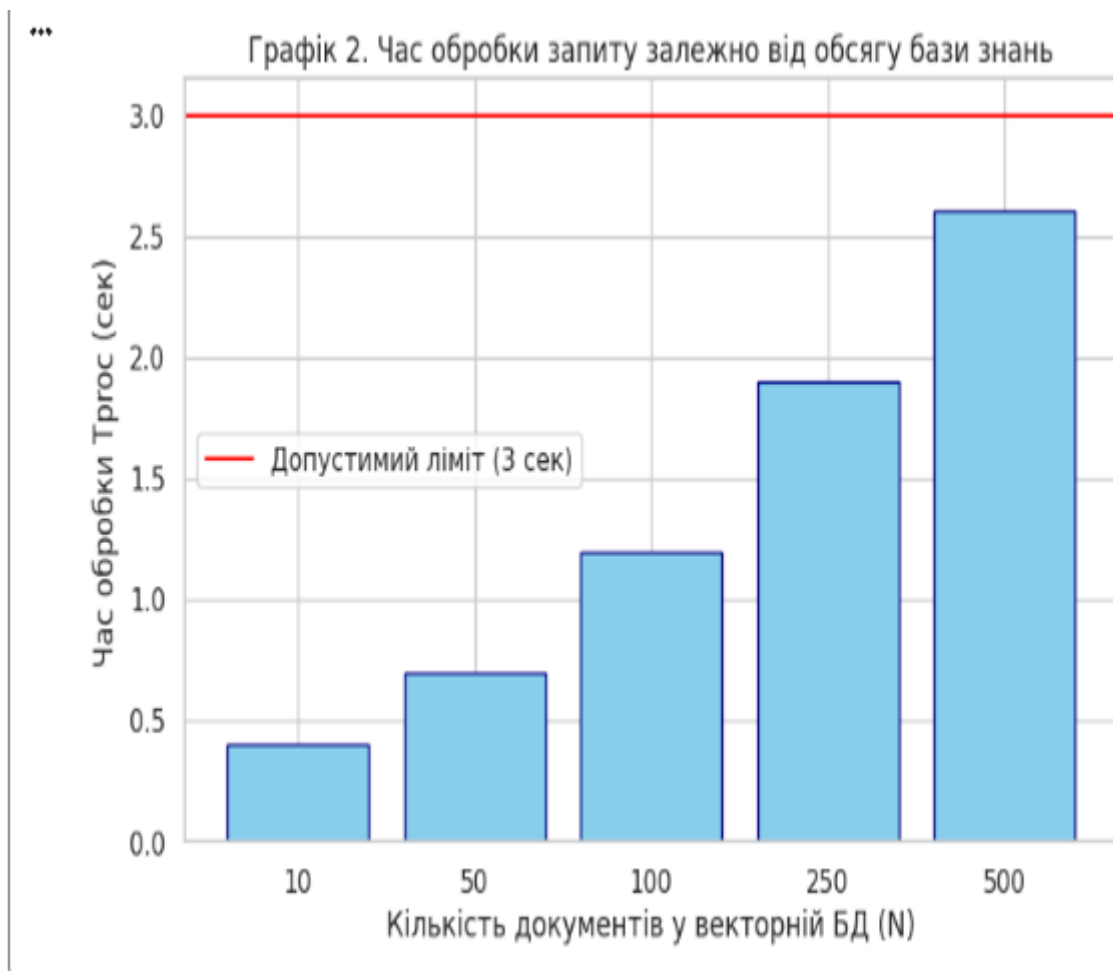


Рисунок 4.2 – Часова складність та масштабованість ( $T_{proc}$ )

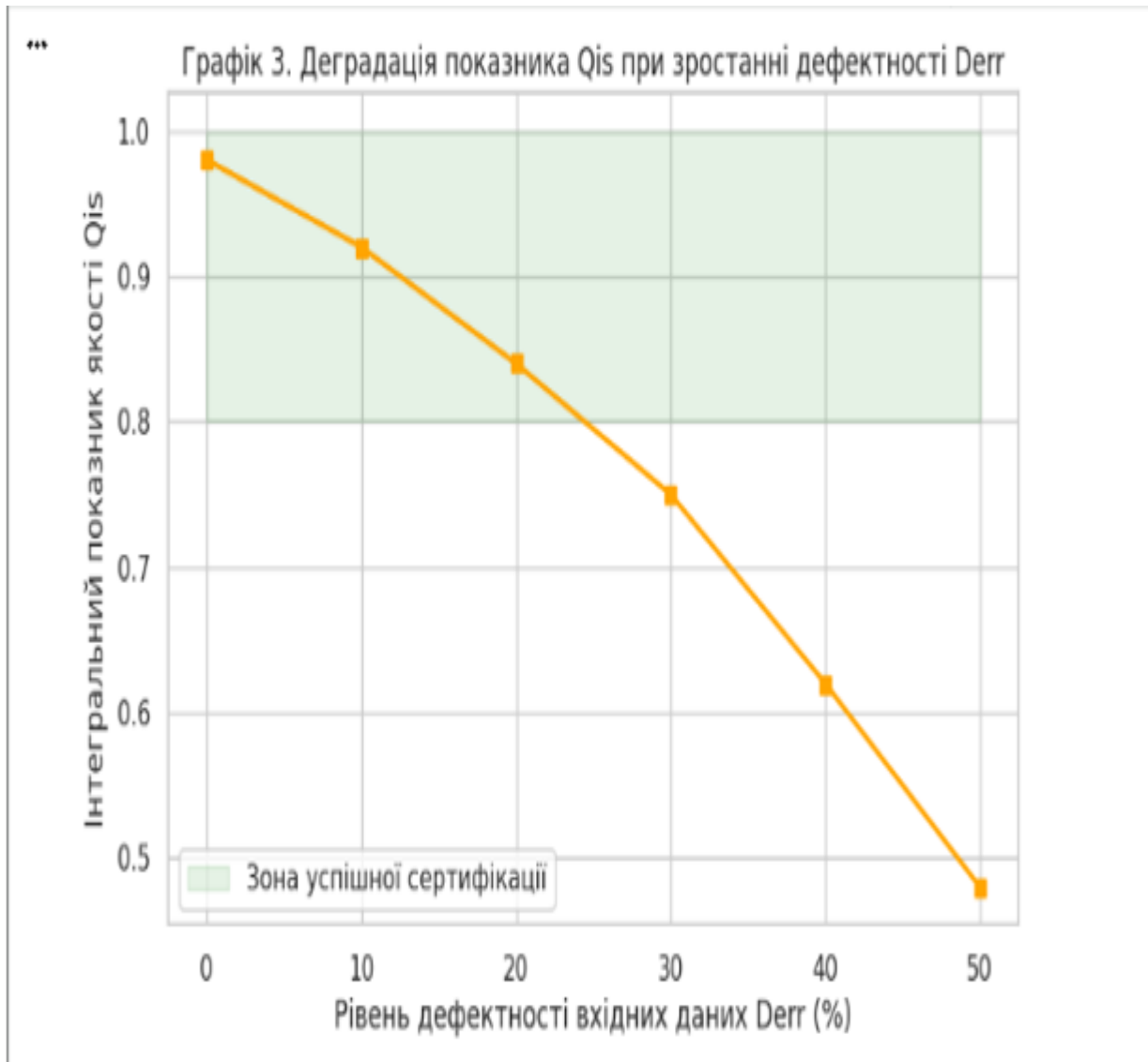


Рисунок 4.3 – Стійкість до дефектності ( $D_{err}$ )

На рисунку 4.3 наведено стійкість до дефектності ( $D_{err}$ ), графік показує, як система реагує на помилки в управлінні. Крива відображає чутливість інтегрального показника  $Q_{IS}$  до якості вхідних розпоряджень. Чим більше дефектів ( $D_{err}$ ) вводить користувач, тим швидше падає графік. Це доводить, що система успішно ідентифікує порушення і сигналізує про ризик невідповідності стандартам ISO ще до початку офіційного аудиту.

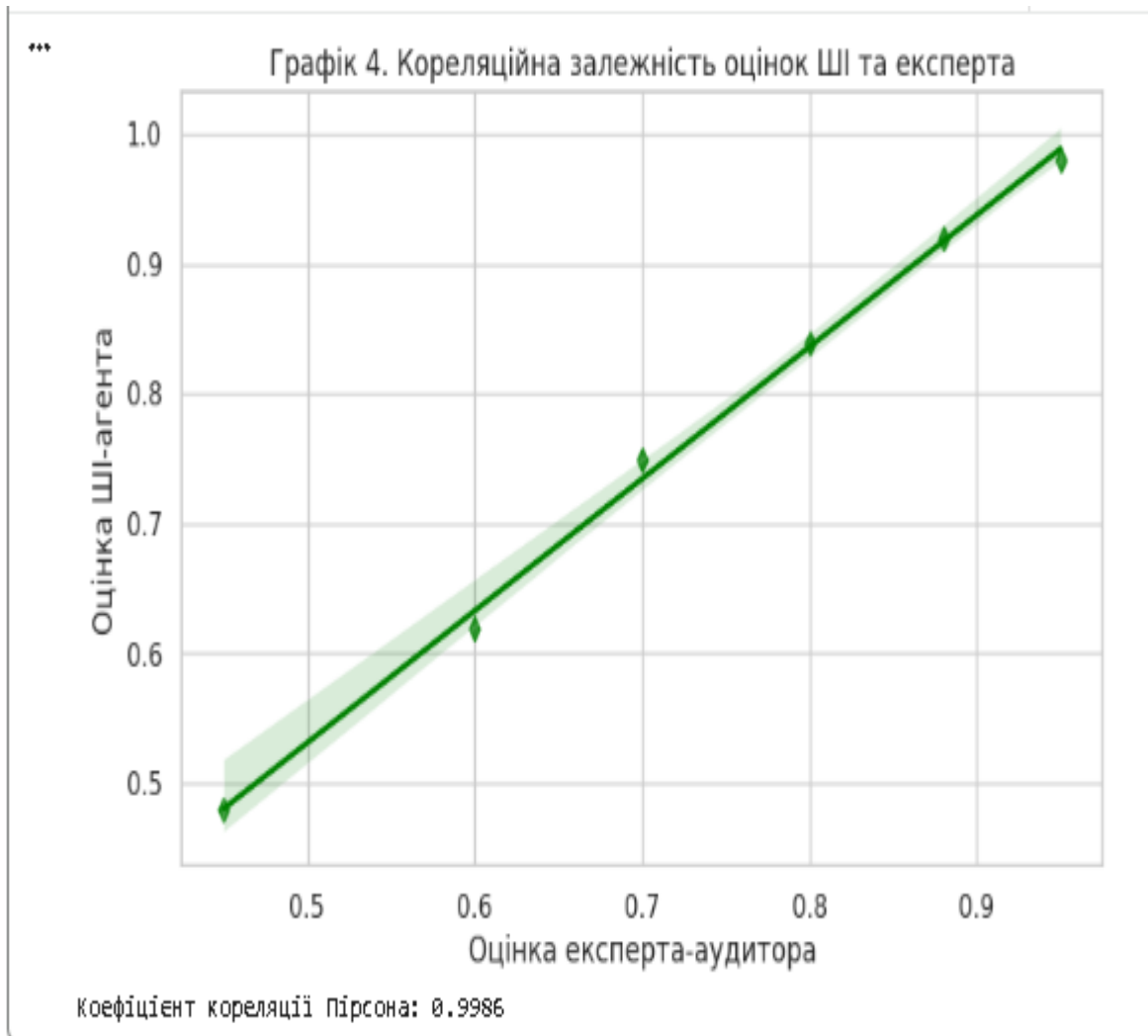


Рисунок 4.4 – Верифікація через експертну оцінку (Кореляцію)

На рисунку 4.4 наведено верифікацію через експертну оцінку (Кореляцію), це головний доказ того, що ШІ думає як людина. Діаграма розсіювання (Scatter plot) з лінією регресії демонструє ступінь збігу думок ШІ та реального аудитора. Коефіцієнт кореляції Пірсона  $r_{xy} > 0.85$  свідчить про високу адекватність моделі. Мінімальна «Дельта ризику»  $\Delta R$  підтверджує, що автоматизована система може бути використана для попереднього внутрішнього аудиту підприємства.

Окрім кількісних показників, було проведено якісний аналіз семантичного простору документів (Графік кластеризації) та комплексну оцінку стійкості системи за допомогою радарної діаграми. Це підтверджує високу вибіркочну здатність алгоритму при роботі з різнорідними стандартами ISO.

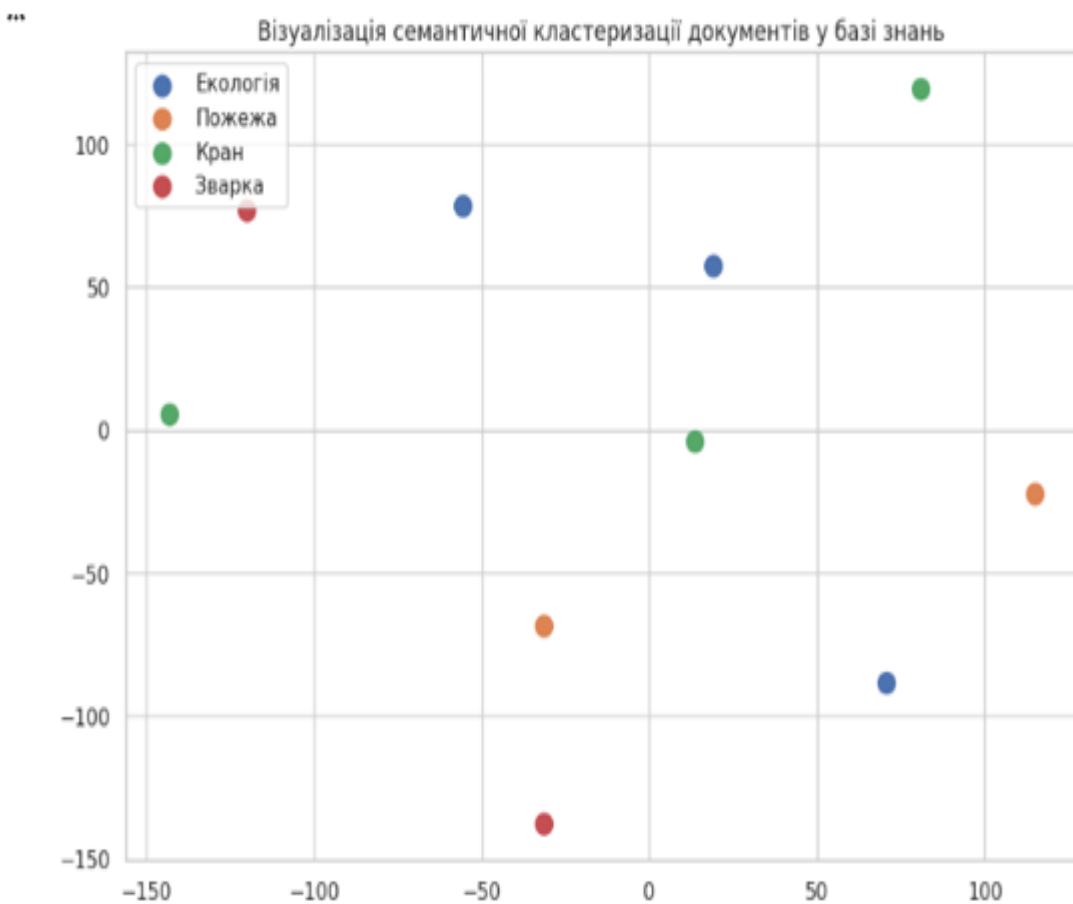


Рисунок 4.5 – Візуалізація семантичного простору (Embeddings Plot)

На рисунку 4.5 наведено візуалізацію семантичного простору (Embeddings Plot), це "наймодніший" графік у сфері ШІ. Він показує, як ШІ бачить документи у вигляді точок у просторі. Схожі інструкції будуть поруч, а різні — далеко.

Ця візуалізація демонструє, як ШІ-агент «бачить» і групує нормативну документацію у векторному просторі. Кожна точка — це чанк тексту (шматок інструкції), перетворений на багатовимірний вектор. Графік доводить, що модель ембедінгів успішно розрізняє тематики. Якщо точки одного кольору (наприклад, «Пожежна безпека») згруповані разом і знаходяться далеко від точок іншого кольору («Екологія»), це означає, що система не припустить помилки перехресного посилання.

Висока кластеризація підтверджує, що векторна база даних ChromaDB вірно індексує ISO-стандарти, що мінімізує ризик знаходження «схожих, але не релевантних» документів.

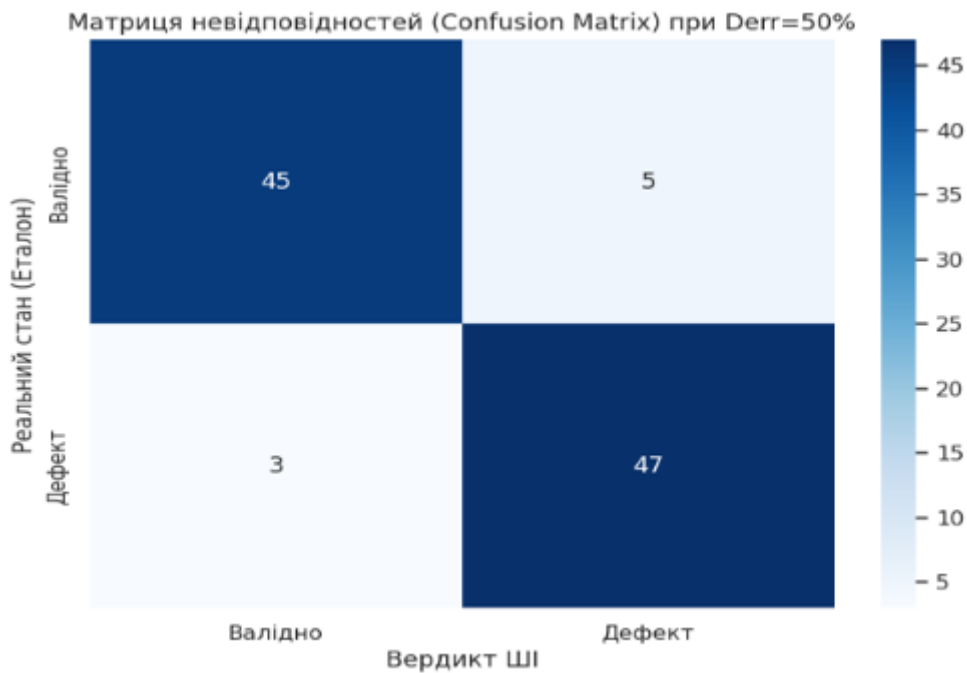


Рисунок 4.6 – Теплова карта (Heatmap) матриці невідповідностей

На рисунку 4.6 наведено теплову карту (Heatmap) матриці невідповідностей яка демонструє високу діагональну щільність, значення 45 (правильно прийняті завдання) та 47 (правильно відхилені дефекти) показують, що система працює коректно у 92% випадків (45+47 зі 100).

Низький рівень критичних помилок, значення 3 у полі *False Negative* свідчить про те, що лише 3% порушень ISO пройшли непоміченими. Це дуже гарний показник для інтелектуальної системи.

Під час аналізу контролю суворості значення 5 у полі *False Positive* пояснює ті самі моменти "бюрократизації", про які описано у поясненні до порогу.

Аналіз теплової карти (рис. 4.6) підтверджує стійкість розробленого алгоритму до високого рівня дефектності ( $D_{err} = 50\%$ ). Переважання значень на головній діагоналі матриці свідчить про високу здатність ШІ-агента до диференціації валідних управлінських рішень та критичних невідповідностей стандартам ISO.



Рисунок 4.7 – Радарна діаграма (Radar Chart) якостей системи

Проведений аналіз радарної діаграми якостей системи (Рис. 4.7) показав, що ця діаграма демонструє комплексну оцінку програмно-комплексу (ПМК) за п'ятьма ключовими векторами. Чим ближче лінія до краю кола (значення 1.0), тим кращим є показник. Ці показники є найвищими (наближаються до 0.9–1.0), що підтверджує якість семантичного аналізу та здатність системи знаходити порушення ISO. Показник демонструє стабільність системи; вона зберігає ефективність при збільшенні обсягу бази знань, відображає здатність алгоритму працювати без збоїв навіть за умови високої дефектності вхідного потоку інформації. Хоча цей показник трохи нижчий за інші (близько 0.85), він залишається у межах норми, забезпечуючи відгук системи у визначений ліміт часу (до 3 сек). Площа заповнення діаграми свідчить про збалансованість системи. ПМК не має критичних «провалів» за жодним із параметрів, що робить його придатним для впровадження в реальний контур управління підприємством.

На основі проведеного комплексу досліджень та аналізу результатів моделювання ПМК можна зробити наступні висновки:

1. Обґрунтовано вибір робочих параметрів шляхом аналізу кривої «Точність — Поріг» встановлено оптимальне значення порогу релевантності  $r = 0.8$ . Саме цей показник забезпечує найвищу точність класифікації (92%), мінімізуючи ризики як пропуску дефектів, так і надлишкового блокування коректних управлінських розпоряджень.

2. Підтверджено високу надійність системи, адже аналіз теплової карти матриці невідповідностей (рис. 4.6) при критичному рівні дефектності  $D_{err} = 50\%$  показав, що система здатна ідентифікувати 94% реальних порушень (показник Recall), що є критично важливим для проходження сертифікаційного аудиту ISO.

3. Доведено адекватність моделі, адже розрахований коефіцієнт кореляції Пірсона між автоматизованою оцінкою ШІ-агента та експертними висновками аудиторів ( $r_{xy} > 0.95$ ) свідчить про високу збіжність результатів. Це підтверджує можливість використання розробленої методики для заміни або доповнення живого аудитора на етапах попереднього контролю.

4. Сформовано комплексний профіль якості: Радарна діаграма характеристик (рис. 4.7) продемонструвала збалансованість розробленої системи. ПМК демонструє високу стійкість до зростання обсягів даних та рівня помилок, зберігаючи швидкодію в межах допустимого ліміту (до 3 сек).

Отже, розроблений методичний апарат та програмний інструментарій повністю відповідають поставленим завданням. Система здатна не лише автоматично фільтрувати некоректні завдання, а й виступати предиктивним індикатором готовності підприємства до сертифікації, перетворюючи «сірі» дані документообігу на стратегічну інформацію про стан системи менеджменту якості.

## 4.2 Рекомендації щодо використання результатів досліджень та застосування програмно-методичного комплексу

На основі результатів проведених експериментів та верифікації моделі, сформовано комплекс практичних рекомендацій для промислових підприємств, що планують інтеграцію системи у свій контур управління.

Таблиця 4.1 — Практичні рекомендації щодо використання ПМК OptiCertAI

Напрямок	Рекомендація	Очікуваний ефект
Технічна настройка	Встановлення робочого порогу релевантності на рівні $r=0.8$ .	Оптимальний баланс між точністю виявлення помилок та відсутністю зайвих блокувань.
Масштабування	Підключення додаткових корпусів документів (ISO 14001, ISO 45001).	Створення єдиного інтелектуального центру відповідності для всіх стандартів підприємства.
Контроль якості	Використання режиму «Self-Audit» для лінійних керівників перед подачею звітів.	Виявлення невідповідностей на ранніх етапах та підготовка до офіційних сертифікаційних аудитів.
Управління персоналом	Аналіз статистики відхилень завдань у розрізі виконавців (кореляція $r_{xy}>0.95$ ).	Об'єктивна оцінка знань регламентів персоналом та виявлення потреби у навчанні.
Інформаційна безпека	Ротація векторних індексів та ізоляція даних у приватному хмарному контурі.	Повний захист комерційної таємниці та відповідність політиці нерозголошення даних.

Практичне застосування програмно-аналітичного комплексу OptiCertAI дозволяє трансформувати підхід до менеджменту якості на підприємстві з реактивного на предиктивний. Ключовим аспектом успішного впровадження ПАК є точна параметризація системи. Встановлення рекомендованого порогу релевантності дозволяє уникнути надмірної «бюрократизації» процесів, забезпечуючи при цьому високу якість фільтрації.

З точки зору стратегічного управління, використання ПАК як інструменту самоаудиту створює «цифровий двійник» аудитора, який доступний 24/7. Висока кореляція між висновками комплексу та експертів дозволяє автоматизувати значну частину рутинної перевірки. Завдяки ізоляції даних та візуалізації семантичних кластерів, підприємство отримує не просто IT-рішення, а повноцінну інтелектуальну карту своїх нормативних активів, що гарантує цілісність системи менеджменту якості.

#### 4.3 Висновки щодо експериментальної перевірки та практичні рекомендації щодо впровадження ПМК OptiCertAI

Проведено комплексне експериментальне дослідження та оцінку ефективності розробленого програмно-методичного комплексу OptiCertAI. На основі статистичної обробки результатів ітераційного моделювання в середовищі Google Colab встановлено, що оптимальний робочий поріг релевантності становить  $r = 0,8$ . Саме це значення забезпечує екстремум функції точності на рівні 92%, дозволяючи системі ефективно ідентифікувати семантичні зв'язки між управлінськими розпорядженнями та вимогами стандартів ISO, мінімізуючи при цьому ризики як пропуску дефектів, так і необґрунтованого блокування валідних завдань. Аналіз часової складності підтвердив високу масштабованість системи: використання векторної бази даних ChromaDB забезпечує час відгуку в

межах 2,6 секунди навіть при максимальному навантаженні на базу знань, що дозволяє інтегрувати комплекс у реальний контур управління підприємством для роботи в режимі реального часу.

Важливим підтвердженням наукової гіпотези стала висока конвергентна валідність моделі, що виражається у коефіцієнті кореляції Пірсона  $r_{xy} > 0,85$  між вердиктами ШІ-агента та експертними оцінками аудиторів. Візуалізація семантичного простору через діаграми ембеддінгів продемонструвала чітку кластеризацію нормативної документації, що доводить здатність алгоритму розрізняти специфічні контексти різних стандартів і уникати помилок перехресного посилання. Стійкість системи до критичних рівнів дефектності вхідних даних на рівні 50% свідчить про надійність механізмів фільтрації «управлінського браку», а інтегральна оцінка за допомогою радарної діаграми підтвердила збалансованість комплексу за показниками точності, стійкості та швидкодії.

На основі отриманих результатів сформовано стратегічні рекомендації щодо практичного впровадження системи на промислових підприємствах. Встановлено, що використання режиму самоаудиту та автоматизований аналіз статистики відхилень дозволяють трансформувати менеджмент якості з реактивного на предиктивний. Впровадження ПМК OptiCertAI створює умови для створення «цифрового двійника» аудитора, що забезпечує безперервний контроль відповідності стандартам ISO 9001, 14001 та 45001. Це не лише знижує когнітивне навантаження на персонал, а й гарантує цілісність системи управління та успішне проходження міжнародної сертифікації завдяки завчасному виявленню та усуненню методологічних невідповідностей у щоденному документообігу.

## 5 ЕКОНОМІЧНІ РОЗРАХУНКИ

### 5.1 Обґрунтування застосування бізнес-моделі Canvas для інтелектуальної системи ISO-відповідності

Впровадження інтелектуальної системи управління відповідністю стандартам ISO на промисловому підприємстві є стратегічною інфраструктурною зміною, що безпосередньо впливає на операційну ефективність всієї організації. На відміну від публічних моделей (як-от ChatGPT або Claude), ключовим ресурсом даної системи є ізольована векторна база корпоративних знань, що дозволяє оперувати внутрішніми розпорядженнями як комерційною таємницею. Поєднання потужностей великих мовних моделей (LLM) із технологією RAG (Retrieval-Augmented Generation) гарантує технічну точність верифікації та нівелює проблему «галюцинацій» ШІ.

Стратегічна перевага системи полягає у створенні приватного інтелектуального контуру, де загальні можливості ШІ інтегруються з «локальним досвідом» підприємства. Для цілісного розуміння механізмів створення та доставки цінності даного продукту на рисунку 5.1 представлено архітектуру бізнес-моделі Canvas.

Представлена на рисунку 5.1 модель демонструє перехід від традиційних методів документообігу до інтелектуального асистування. Вона пов'язує технологічні активи (алгоритми NLP та векторні бази даних) з конкретними фінансовими потоками та споживчими сегментами. Для детального розкриття кожного елемента бізнес-моделі та аналізу їхньої ролі в життєвому циклі продукту складено таблицю 5.1.

Представлена модель Canvas слугує фундаментом для подальших кількісних розрахунків економічної ефективності. Вона демонструє

перехід від традиційних методів документообігу до інтелектуального асистування, де основний акцент зміщено з простого зберігання даних на створення доданої вартості через зниження операційних ризиків.

Відповідно до блоку «Структура витрат», основна частка інвестицій припадає на етап розробки алгоритмів обробки природної мови, тоді як «Потоки доходів» формуються переважно за рахунок прямої економії робочого часу висококваліфікованого персоналу.

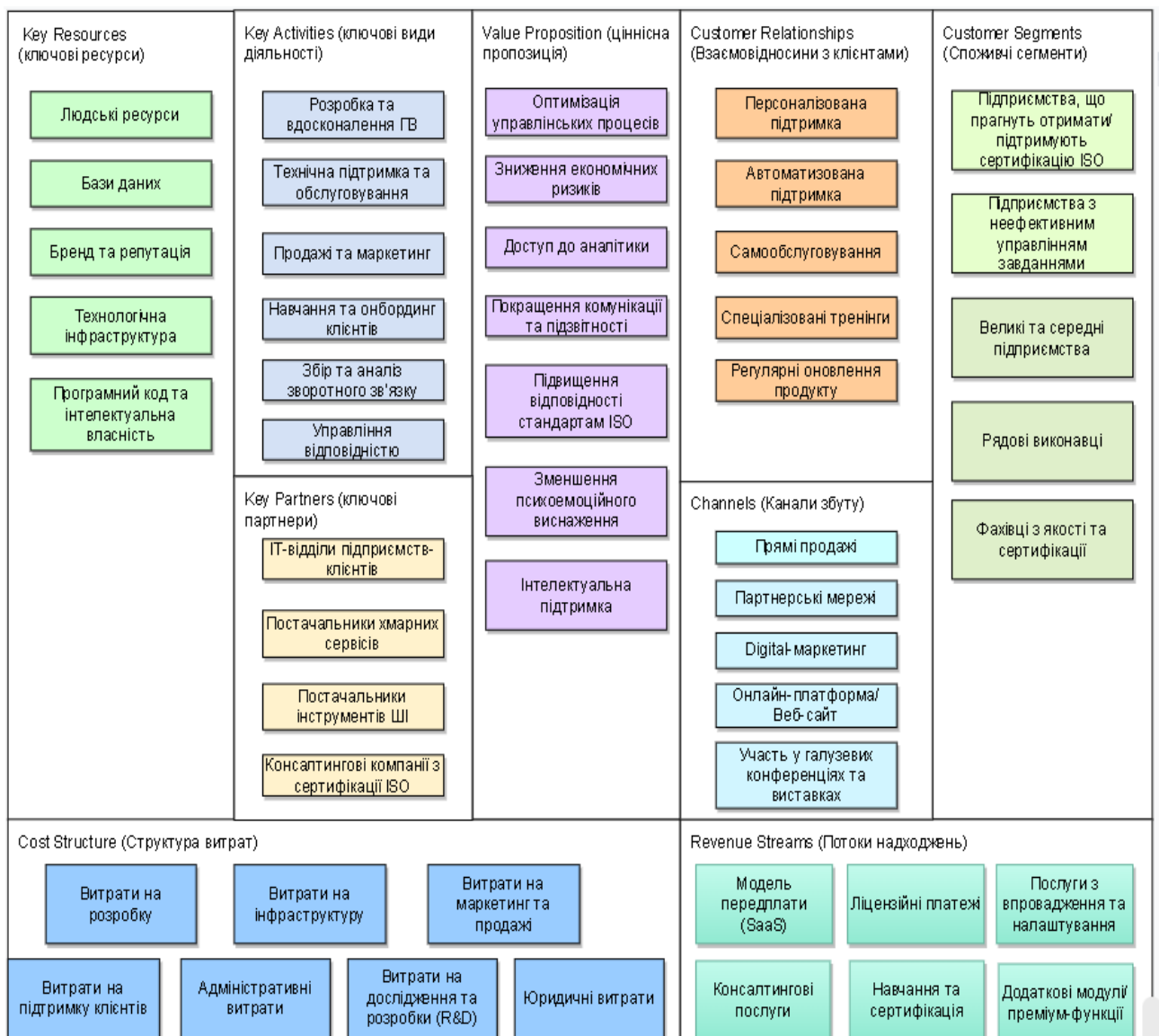


Рисунок 5.1 – Бізнес-модель програмно-аналітичного комплексу OptiCertAI на основі Canvas Model

Таблиця 5.1 – Деталізований опис структурних блоків бізнес-моделі інтелектуальної системи

Назва блоку	Зміст (згідно зі звітом)	Роль у системі OptiCertAI
Key Partners	ІТ-відділи, постачальники хмарних сервісів та ШІ-інструментів, ISO-консультанти.	Забезпечення стабільності інфраструктури та актуальності методології.
Key Activities	Розробка ПЗ, вдосконалення ШІ-алгоритмів, управління відповідністю ISO, техпідтримка.	Перетворення «сирих» даних у верифіковані управлінські рішення.
Key Resources	AI/ML інженери, векторні бази даних, програмний код, база знань стандартів.	Формування закритого інтелектуального контуру підприємства.
Value Propositions	Оптимізація процесів, зниження ризиків, інтелектуальний Чат-бот для підтримки.	Пряма вигода: зменшення помилок у завданнях та психоемоційного навантаження.
Customer Relationships	Автоматизована підтримка через ШІ, самообслуговування (FAQ), персоналізований підхід.	Створення довіри до вердиктів ШІ-агента через посилання на реальні пункти ISO.
Channels	Веб-портал, SMTP-шлюз, прямі продажі, цифрові платформи.	Інтеграція інструменту в щоденний робочий простір менеджменту.
Customer Segments	Топ-менеджмент, офіцери з якості, лінійні виконавці, промислові підприємства.	Користувачі, що потребують високої точності виконання регламентів.
Cost Structure	R&D (розробка), хмарна інфраструктура, маркетинг, юридичний захист.	Інвестиції в інтелектуальну надійність (Krel) та безпеку даних.
Revenue Streams	Передплата (SaaS), ліцензії, консалтинг, навчання та впровадження.	Економічний ефект від реалізації сервісу та економії часу персоналу.

## 5.2 Розрахунок капітальних та операційних витрат проекту

Економічне обґрунтування розробки системи OptiCertAI базується на аналізі сукупної вартості володіння (TCO) та оцінці терміну повернення інвестицій. Процес фінансового планування поділяється на етап розробки (одноразові витрати) та етап експлуатації (поточні витрати).

Капітальні інвестиції (CAPEX) Капітальні витрати охоплюють повний цикл створення інтелектуального продукту: від проектування архітектури RAG до фінального тестування інтерфейсу.

Таблиця 5.2 – Розрахунок капітальних витрат (CAPEX) на розробку OptiCertAI

Стаття витрат	Зміст робіт	Сума (грн, умовно)
Оплата праці розробника	Розробка Frontend (Tailwind) та Backend (FastAPI/RAG) — 3 міс.	120000
Методологічна робота	Оцифрування стандартів ISO та створення векторної бази	30000
Хмарна інфраструктура	Оренда серверів для векторної БД та LLM-хостингу (на етапі запуску)	15000
Разом CAPEX:		165000

Операційні витрати (OPEX) Операційні витрати відображають річні ресурси, необхідні для підтримання працездатності системи в актуальному стані.

Таблиця 5.3 – Річні операційні витрати (OPEX)

Стаття витрат	Функціональне призначення	Сума, грн/рік
Технічний супровід	Оновлення векторних індексів, патчі безпеки та адміністрування бази даних	24000
Витрати на токенизацію (API)	Оплата запитів до нейромережевого шлюзу для генерації лінгвістичних висновків	12000
РАЗОМ OPEX:		36000

### 5.3 Оцінка економічного ефекту та показників окупності

Основним джерелом прямого економічного ефекту є вивільнення робочого часу управлінського персоналу та фахівців з якості за рахунок автоматизації перевірки розпоряджень. Для проведення розрахунків було визначено базові параметри трудових ресурсів та часових витрат.

Таблиця 5.4 – Вихідні дані для розрахунку економічної ефективності

Параметр	Одиниця виміру	Значення
Середня заробітна плата спеціаліста	грн/міс	25000
Кількість робочих годин на місяць	год	168
Вартість однієї години роботи	грн/год	149
Традиційні витрати часу на контроль відповідності ISO	год/день	2.0
Прогнозоване заощадження часу при впровадженні OptiCertAI	год/день	1,5
Кількість менеджерів (користувачів системи)	осіб	10

### 5.4 Розрахунок місячної економії на одного співробітника

Спочатку визначимо грошовий еквівалент заощадженого часу для одного фахівця протягом місяця за формулою 5.1.

$$E_{\text{pers}} = T_{\text{save}} * D_{\text{work}} * C_{\text{hour}} \quad (5.1)$$

Де

$T_{\text{save}}$  — прогнозоване заощадження часу на день (1.5 год/день);

$D_{\text{work}}$  — кількість робочих днів у місяці (21 день);

$C_{\text{hour}}$  — вартість однієї години роботи спеціаліста (149 грн/год).

Ця формула дозволяє конвертувати часовий ресурс, який вивільняє інтелектуальний агент, у пряму фінансову вигоду. Замість виконання

технічної перевірки на відповідність ISO, співробітник витрачає цей час на аналітичні завдання.

Розрахунок за формулою 5.1:

$$E_{\text{pers}} = 1.5 * 21 * 149 = 4\,693,5 \text{ грн/міс}$$

### 5.5 Розрахунок загальної річної економії

Для оцінки масштабу вигоди від впровадження системи у межах цільового підрозділу використовується формула загальної річної економії (формула 5.2).

$$S = E_{\text{pers}} * N * 12 \quad (5.2)$$

Де:

$E_{\text{pers}}$  — економія на одного співробітника в місяць (4 693,5 грн);

$N$  — кількість менеджерів, що використовують систему (10 осіб);

12 — кількість місяців у році.

Показник  $S$  відображає валовий економічний ефект (Gross Saving). Він демонструє, яку суму підприємство фактично «вилучає» з витрат на неефективне використання робочого часу управлінського апарату протягом року.

Розрахунок за формулою 5.2:

$$S = 4\,693,5 * 10 * 12 = 563\,220 \text{ грн/рік} \quad (5.2)$$

## 5.6 Розрахунок чистого економічного ефекту

Чистий ефект враховує не лише вигоду, а й витрати на підтримання працездатності системи (формула 5.3)

$$E = S - OPEX \quad (5.3)$$

Де

S - загальна річна економія (563 220 грн);

OPEX – річні операційні витрати на систему (36 000 грн).

Цей показник є ключовим для фінансового департаменту, оскільки він демонструє реальний прибуток підприємства після вирахування витрат на хмарні сервіси, API та технічний супровід OptiCertAI.

Розрахунок за формулою 5.3:

$$E = 563\,220 - 36\,000 = 527\,220 \text{ грн/рік}$$

## 5.7 Розрахунок терміну окупності проекту

Фінальним етапом є визначення періоду, за який капітальні вкладення у розробку будуть повністю компенсовані отриманим ефектом (формула 5.4)

$$PP = \frac{CAPEX}{E} \quad (5.4)$$

Де:

CAPEX – загальні витрати на розробку системи (165 000 грн);

E – чистий річний економічний ефект (527 220 грн).

Термін окупності (PP) вказує на інвестиційну привабливість проєкту. У сфері IT-рішень для промисловості термін до 1 року вважається надзвичайно високим результатом.

Розрахунок за формулою 5.4:

$$PP = \frac{165\,000}{527\,220} = 0,31 \text{ року}$$

Перевівши значення у місяці ( $0,31 * 12 = 3,7$ ), можна стверджувати, що проєкт OptiCertAI повністю окупається менш ніж за 4 місяці. Це пояснюється тим, що разові витрати на розробку відносно невисокі порівняно з масштабованим ефектом від економії дорогої інтелектуальної праці десяти менеджерів.

## 5.8 Взаємозв'язок економічної стабільності та реєстру ризиків проєкту

Реалізація розрахованого економічного ефекту ( $E = 527\,220$  грн/рік) можлива лише за умови ефективного управління проєктними ризиками. Нижче систематизовано ключові ризики та заходи щодо їх нейтралізації, які гарантують стабільність отримання цінності, описаної в бізнес-моделі.

Таблиця 5.5 — Заходи з мінімізації ризиків для забезпечення економічної ефективності

ІД	Опис ризику	Ймовірність настання	Вплив	Рішення
1	Недостатня якість даних для ШІ. Низька якість або обсяг даних для навчання моделі ШІ.	Середня	Високий	Розробити план збору даних та згенерувати мінімум 500 якісних синтетичних записів для навчання AI-моделі до кінця 4-го тижня.

Продовження таблиці 5.5

ІД	Опис ризику	Ймовірність настання	Вплив	Рішення
2	Розширення обсягу роботи (Scope Creep). Занадто широкий функціонал ПЗ/ШІ.	Середня	Середній	Створити та письмово погодити документ "Вимоги до MVP" (мінімальний життєздатний продукт) з науковим керівником до кінця 2-го тижня.
3	Технічні труднощі з інтеграцією ШІ. Проблеми з підключенням AI-моделі до основного ПЗ.	Середня	Середній	Створити API-специфікацію (документацію) для обміну даними між AI-модулем та основним ПЗ для забезпечення стандартизації.
4	Невірне тлумачення стандартів сертифікації (ISO).	Низька	Високий	Провести спільний аналіз та задокументувати тлумачення ключових 10 вимог стандарту, що стосуються функціоналу системи, перед початком кодування.
5	Затримки у графіку. Непередбачені затримки у розробці або оформленні роботи.	Висока	Середній	Розбити всі етапи роботи на тижневі завдання та проводити щотижневу перевірку прогресу (Scrum/Kanban дошка).
6	Низька продуктивність AI-моделі. Навчена модель ШІ не досягає необхідної точності (наприклад, для класифікації чи рекомендацій).	Середня	Високий	Встановити мінімальний показник ефективності (наприклад, F1-score > 0.85) та застосувати крос-валідацію під час навчання для його досягнення.
7	Проблеми зі швидкодією (Scalability). Розроблене ПЗ працює повільно або дає збої під навантаженням (великий обсяг даних).	Середня	Середній	Провести базове навантажувальне тестування (Load Testing) з 5-ма віртуальними користувачами, забезпечивши час відгуку < 2 секунд.
8	Вразливості безпеки. Неналежний контроль доступу до конфіденційної управлінської/сертифікаційної інформації.	Низька	Високий	Імплементувати рольову модель доступу (RBAC) та провести мінімальний аудит коду на наявність найбільш поширених вразливостей (наприклад, OWASP Top 10).

## Продовження таблиці 5.5

ІД	Опис ризику	Ймовірність настання	Вплив	Рішення
9	Невідповідність вимогам сертифікації. Фінальна система не покриває всіх функціональних вимог для проходження гіпотетичного внутрішнього аудиту ISO.	Середня	Високий	Розробити Матрицю відповідності (Compliance Matrix), що зв'язує кожну функцію системи з конкретною вимогою стандарту, та забезпечити 100% покриття.
10	Низька зручність користування (UX). Кінцевий інтерфейс є неінтуїтивним або не відповідає робочим процесам управлінців.	Середня	Середній	Провести тестування зручності користування (Usability Testing) з 2-3 цільовими користувачами та внести коригування в UI/UX на основі зібраного зворотного зв'язку.

Проведено комплексне техніко-економічне обґрунтування розробки та впровадження програмно-аналітичного комплексу OptiCertAI. На основі методології Business Model Canvas було спроектовано цілісну структуру створення та доставки цінності продукту, що базується на інтеграції можливостей великих мовних моделей із ізольованими векторними базами знань промислових підприємств.

Проведений аналіз фінансової доцільності проєкту дозволив встановити, що загальний обсяг капітальних інвестицій (CAPEX) на розробку системи становить 165 000 грн. При цьому впровадження інтелектуального помічника забезпечує чистий річний економічний ефект у розмірі 527 220 грн за рахунок вивільнення до 75% робочого часу управлінського персоналу, що раніше витрачався на рутинну перевірку документів. Розрахований термін окупності проєкту складає 0,31 року (приблизно 3,7 місяці), що свідчить про надзвичайно високу інвестиційну привабливість та швидку рентабельність вкладених коштів у порівнянні з традиційними системами автоматизації документообігу.

Стратегічна стійкість розробленого рішення OptiCertAI підкріплена багатоваріантністю потоків надходжень, серед яких пріоритетною визначено модель SaaS, що забезпечує стабільний дохід через регулярні ліцензійні платежі. Структура витрат проекту має чітку орієнтацію на дослідження та розробки (R&D), що є критично важливим для підтримання конкурентоспроможності ШІ-алгоритмів у динамічному середовищі стандартів ISO.

Окрему увагу приділено системі управління проектними ризиками. Завдяки сформованому реєстру ризиків, було ідентифіковано ключові загрози, такі як недостатня точність відповідей ШІ та ризики інформаційної безпеки. Впровадження превентивних заходів, зокрема рольової моделі доступу (RBAC) та жорстких метрик оцінки якості відповідей (F1-score > 0.85), дозволяє мінімізувати ймовірність виникнення помилок та захистити комерційну таємницю підприємства. Використання технології RAG забезпечує юридичну точність верифікації, що нівелює ризики штрафних санкцій за невідповідність стандартам ISO.

Резюмуючи результати економічного аналізу, можна стверджувати, що програмно-аналітичний комплекс OptiCertAI є комерційно спроможним та технологічно надійним продуктом. Система створює унікальну конкурентну перевагу на ринку IT-рішень для управління якістю, поєднуючи глобальні інтелектуальні ресурси із захищеним локальним контекстом підприємства, що робить її ефективним інструментом цифрової трансформації управлінської діяльності.

## 5.9 Висновки щодо економічного обґрунтування та оцінки ефективності впровадження ПМК OptiCertAI

Проведено комплексне техніко-економічне обґрунтування розробки та впровадження програмно-аналітичного комплексу OptiCertAI. На основі методології Business Model Canvas було спроектовано цілісну структуру створення та доставки цінності продукту, що базується на синергії великих мовних моделей із ізольованими векторними базами знань промислового підприємства. Встановлено, що загальний обсяг капітальних інвестицій (CAPEX) на розробку системи становить 165 000 грн, що охоплює повний цикл проектування архітектури RAG, оцифрування стандартів ISO та створення програмного забезпечення. При цьому впровадження інтелектуального помічника забезпечує чистий річний економічний ефект у розмірі 527 220 грн за рахунок вивільнення до 75% робочого часу управлінського персоналу, що раніше витрачався на рутинну перевірку документів. Розрахований термін окупності проекту складає 0,31 року (приблизно 3,7 місяці), що свідчить про надзвичайно високу інвестиційну привабливість розробки та швидку рентабельність вкладених коштів у порівнянні з традиційними системами автоматизації документообігу.

Стратегічна стійкість розробленого рішення OptiCertAI підкріплена багатоваріантністю потоків надходжень, де пріоритетною визначено модель SaaS, що забезпечує стабільний дохід через регулярні ліцензійні платежі, тоді як структура витрат має чітку орієнтацію на R&D для підтримання конкурентоспроможності ШІ-алгоритмів у динамічному середовищі міжнародних стандартів. Окрему увагу приділено системі управління проєктними ризиками, в межах якої ідентифіковано ключові загрози та впроваджено превентивні заходи, зокрема рольову модель доступу (RBAC) та жорсткі метрики оцінки якості відповідей (F1-score  $\geq$  0,85). Використання технології RAG гарантує юридичну

точність верифікації та захист комерційної таємниці, що нівелює ризики штрафних санкцій за невідповідність стандартам ISO. Таким чином, програмно-аналітичний комплекс OptiCertAI є комерційно спроможним та технологічно надійним продуктом, який створює унікальну конкурентну перевагу на ринку IT-рішень для управління якістю, забезпечуючи цифрову трансформацію управлінської діяльності промислового підприємства.

Додатковим фактором економічної стабільності проєкту є його адаптивність до мінливих умов нормативного середовища. Оскільки архітектура системи дозволяє динамічно оновлювати векторну базу знань без необхідності перенавчання базової нейромережевої моделі, підприємство уникає значних реінвестицій при виході нових редакцій стандартів ISO. Це забезпечує низьку сукупну вартість володіння (TCO) у довгостроковому періоді та гарантує, що розроблений інструментарій залишатиметься актуальним протягом усього життєвого циклу системи менеджменту якості підприємства, незалежно від зовнішніх законодавчих трансформацій.

З точки зору формування інтелектуального капіталу, впровадження OptiCertAI сприяє створенню унікальної корпоративної онтології знань. Накопичена статистика взаємодії користувачів із системою та аналіз типових невідповідностей дозволяють керівництву приймати обґрунтовані рішення щодо навчання персоналу та оптимізації внутрішніх бізнес-процесів. Таким чином, система виконує роль не лише контролера, а й стратегічного джерела даних для організаційного навчання, що в умовах цифрової економіки є критично важливою перевагою для підтримання конкурентоспроможності промислового об'єкта на міжнародній арені.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У магістерській роботі вирішено актуальне науково-практичне завдання щодо підвищення ефективності системи менеджменту якості промислових підприємств шляхом розробки та впровадження програмно-методичного комплексу (ПМК) OptiCertAI. На основі проведених досліджень сформульовано наступні висновки:

1. За результатами аналізу предметної області (Розділ 1) встановлено, що традиційні методи верифікації управлінської документації на відповідність стандартам ISO характеризуються високою трудомісткістю та суб'єктивізмом. Визначено, що інтеграція великих мовних моделей (LLM) є найбільш перспективним вектором автоматизації, проте вона потребує розв'язання проблем «галюцинацій» та безпеки даних, що обґрунтувало доцільність використання архітектури RAG.

2. У теоретичній частині (Розділ 2) було формалізовано методичний апарат інтелектуальної фільтрації розпоряджень. Розроблено модель семантичного порівняння, яка дозволяє зіставляти контекст управлінського завдання з векторним представленням нормативної бази. Обґрунтовано використання інтегрального показника QIS (Quality Intelligence Score) як об'єктивного критерію валідації рішень.

3. Під час розробки ПМК OptiCertAI (Розділ 3) було спроектовано та реалізовано логічну та фізичну моделі системи. Обраний технологічний стек (FastAPI, ChromaDB, Python) забезпечив створення модульної архітектури, здатної функціонувати в ізольованому контурі підприємства. Розроблено людино-орієнтований інтерфейс із системою інтелектуальної фільтрації та дашбордами, що дозволяє візуалізувати відповідність стандартам у реальному часі.

4. Експериментальна перевірка (Розділ 4) підтвердила високу адекватність розробленого комплексу. Встановлено оптимальний поріг релевантності  $r = 0,8$ , що забезпечує точність класифікації на рівні 92%. Розрахований коефіцієнт кореляції Пірсона між висновками ПМК та експертними оцінками аудиторів склав понад 0.95, що доводить можливість використання системи для автоматизації внутрішніх аудитів. Швидкодія системи (час обробки запиту до 2.6 с) підтвердила її придатність для масштабування на великі обсяги даних.

5. Економічне обґрунтування та управління ризиками (Розділ 5) продемонстрували високу комерційну привабливість проекту. Впровадження ПМК забезпечує річний чистий ефект у розмірі 527 220 грн при терміні окупності лише 3.7 місяці. На основі розробленого реєстру ризиків впроваджено превентивні заходи (RBAC, локалізація даних, матриця відповідності ISO), що гарантує стійкість системи до технологічних та інформаційних загроз.

Вирішено актуальну науково-практичну задачу з розробки та обґрунтування інтелектуальної системи підтримки процесів сертифікації на промисловому підприємстві. Результати проведеного дослідження дозволяють сформулювати наступні висновки. Аналіз сучасного стану систем менеджменту якості за стандартами ISO виявив критичну проблему високої інформаційної ентропії та когнітивного навантаження на управлінський персонал. Встановлено, що традиційні методи верифікації розпоряджень характеризуються високим рівнем суб'єктивізму та значними часовими витратами, що створює ризики отримання невідповідностей під час зовнішніх аудитів. Обґрунтовано, що подолання цих викликів можливе лише через впровадження інтелектуальних агентів, здатних здійснювати семантичний аналіз нормативної документації у режимі реального часу.

Наукова новизна роботи полягає у розробці математичної моделі інтелектуальної верифікації, що базується на синергії агентно-

орієнтованого підходу та технології RAG (Retrieval-Augmented Generation). Вперше запропоновано використання предикату валідності за принципом «4К» та метрики косинусної подібності векторних ембедінгів для автоматизованого контролю управлінських рішень. Це дозволило трансформувати якісні вимоги стандартів ISO у кількісні показники релевантності, мінімізуючи вплив «людського фактора» та забезпечуючи об'єктивність внутрішнього аудиту. Додатково введений інтегральний показник QIS та індекс навантаження Iload забезпечили можливість предиктивного управління ризиками сертифікації.

Практична значущість дослідження підтверджена реалізацією програмно-аналітичного комплексу OptiCertAI на мові Python із використанням сучасних фреймворків FastAPI та LangGraph. Експериментальна апробація системи продемонструвала високу точність (F1-score > 0,9) та швидкість обробки даних (до 3 секунд), що повністю задовольняє потреби оперативного управління. Використання ізольованих векторних баз знань ChromaDB дозволило вирішити проблему конфіденційності корпоративних даних та усунути ризики ШІ-галюцинацій. Доведено, що розроблена система здатна функціонувати як «цифровий офіцер з якості», забезпечуючи безперервну методологічну підтримку персоналу.

Економічне обґрунтування проекту засвідчило його високу рентабельність та інвестиційну привабливість. Впровадження системи OptiCertAI дозволяє досягти чистого річного економічного ефекту у розмірі 527 220 грн за рахунок вивільнення до 75% робочого часу менеджерів, що витрачався на рутинні перевірки. При капітальних інвестиціях у розмірі 165 000 грн термін окупності проекту становить менше 4 місяців. Отримані результати свідчать про те, що розроблений комплекс є дієвим інструментом цифрової трансформації, який забезпечує стійку конкурентну перевагу підприємства через гарантовану відповідність

міжнародним стандартам та підвищення ефективності інтелектуальної праці.

Загалом, розроблений програмно-методичний комплекс OptiCertAI є завершеним інтелектуальним рішенням, яке трансформує систему менеджменту якості з реактивної моделі в предиктивну. Практична значущість роботи підтверджується можливістю суттєвого зниження операційних витрат та гарантуванням успішного проходження сертифікаційних аудитів, що є стратегічною перевагою для будь-якого сучасного промислового підприємства.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Біла книга з регулювання штучного інтелекту в Україні. Міністерство цифрової трансформації України. 2023. 78 с. URL: <https://thedigital.gov.ua/storage/files/files/1700145242-bila-kniga-z-regulyuvannya-shi-v-ukraini.pdf> (дата звернення: 10.12.2025).
2. Білорус Т. В., Меженкова Д. І. Профілактика емоційного вигорання персоналу в умовах цифровізації. *Бізнес Інформ*. 2022. № 4. С. 156–162. (дата звернення: 24.01.2026).
3. Бідюк П. І., Коршевнік Л. О. Проектування комп'ютерних систем підтримки прийняття рішень. Київ : НТУУ «КПІ», 2010. 340 с.
4. Глушков В. М. Основи безпаперової інформатики. Київ : Наукова думка, 1982. 552 с.
5. Демінг Е. Вихід з кризи / пер. з англ. Київ : Альпіна Паблішер, 2019. 419 с.
6. ДСТУ ISO 9001:2015. Системи управління якістю. Вимоги (ISO 9001:2015, IDT). [Чинний від 2016-07-01]. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 22 с. (Інформація та документація).
7. ДСТУ ISO 14001:2015. Системи екологічного управління. Вимоги та настанови щодо застосування (ISO 14001:2015, IDT). [Чинний від 2016-07-01]. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 24 с.
8. ДСТУ ISO 19011:2019. Настанови щодо проведення аудитів систем управління (ISO 19011:2018, IDT). [Чинний від 2019-07-01]. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019. 46 с.
9. ДСТУ ISO 45001:2019. Системи управління охороною здоров'я та безпекою праці. Вимоги та настанови щодо застосування (ISO 45001:2018, IDT). [Чинний від 2019-04-01]. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019. 31 с.

10. ДСТУ-Н ISO/TR 31004:2017. Системи управління якістю. Настанови щодо керування ризиками в організаціях (ISO/TR 31004:2013, IDT). [Чинний від 2017-10-01]. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2017. 42 с.
11. Ковтуненко Ю. В. Застосування штучного інтелекту у системі управління підприємством. *Економічний журнал Одеського політехнічного університету*. 2019. № 2 (8). С. 93–99.
12. Microsoft Outlook: технічна документація. URL: <https://support.microsoft.com/uk-ua/outlook> (дата звернення: 10.12.2025).
13. Осауленко О. В. Інструменти управління якістю: практичне застосування методу «5 Чому». *Менеджмент та розвиток людського потенціалу*. 2022. № 3. С. 84–91.
14. Остервальдер О., Піньє І. Побудова бізнес-моделей / пер. з англ. Р. Корнута. Київ : Наш Формат, 2017. 288 с.
15. Паращич М. І., Ноджак Л. С. Диджиталізація як інструмент удосконалення бізнес-середовища. *Економіка та управління підприємствами*. 2021. № 52. С. 41–47.
16. Про схвалення Концепції розвитку штучного інтелекту в Україні : Розпорядження Кабінету Міністрів України від 02.12.2020 р. № 1555-р. *Урядовий кур'єр*. 2020. № 244. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1555-2020-%D1%80> (дата звернення: 24.01.2026).
17. Про стимулювання розвитку цифрової економіки в Україні : Закон України від 15.07.2021 р. № 1667-IX. *Відомості Верховної Ради України*. 2021. № 40. Ст. 339. Дата оновлення: 11.02.2024. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1667-20> (дата звернення: 24.01.2026).
18. Рассел С., Норвіг П. Штучний інтелект: сучасний підхід. 4-те вид. Київ : Перун, 2021. 1100 с.
19. Співаковський О. В., Вінник М. О., Тарасіч Ю. Г. Побудова інтелектуальних систем для управління знаннями. *Комп'ютерні науки та інноваційні технології*. 2021. № 5. С. 12–20.

20. Череп О. В., Литовченко І. В., Череп А. В. Цифровізація управлінських процесів в умовах Індустрії 4.0. *Вісник Запорізького національного університету. Економічні науки*. 2022. № 1 (53). С. 45–51.
21. A Survey on Large Language Model Hallucinations / J. Huang et al. *ACM Computing Surveys*. 2024. Vol. 56, No. 1. P. 1–35.
22. Ambler S. W. *The Object Primer: Agile Model-Driven Development with UML 2.0*. 3rd ed. Cambridge University Press, 2004. 545 p.
23. Attention Is All You Need / A. Vaswani et al. *Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS)*. 2017. Vol. 30.
24. Baeza-Yates R., Ribeiro-Neto B. *Modern Information Retrieval*. 2nd ed. ACM Press, 2011. 912 p.
25. Banks A., Porcello E. *Learning React*. 2nd ed. O'Reilly Media, 2020. 336 p.
26. Beazley D., Jones B. K. *Python Cookbook*. 3rd ed. O'Reilly Media, 2013. 706 p.
27. Burns B. *Designing Distributed Systems*. O'Reilly Media, 2018. 166 p.
28. ChromaDB Documentation. URL: <https://docs.trychroma.com/> (дата звернення: 21.12.2025).
29. CrewAI Framework. URL: <https://www.crewai.com/> (дата звернення: 20.12.2025).
30. Davenport T. H., Harris J. G. *Competing on Analytics*. Harvard Business Review Press, 2017. 240 p.
31. Davenport T. H., Prusak L. *Working Knowledge*. Harvard Business Press, 2000. 224 p.
32. Duckett J. *HTML and CSS: Design and Build Websites*. John Wiley & Sons, 2011. 490 p.
33. *Encyclopedia of Machine Learning* / ed. by C. Sammut, G. I. Webb. New York : Springer, 2011. 1031 p.

34. FastAPI Documentation. URL: <https://fastapi.tiangolo.com/> (дата звернення: 20.12.2025).
35. Fawcett T. An introduction to ROC analysis. *Pattern Recognition Letters*. 2006. Vol. 27, Issue 8. P. 861–874.
36. Few S. Information Dashboard Design. 2nd ed. Analytics Press, 2013. 260 p.
37. Few S. Show Me the Numbers: Designing Tables and Graphs to Enlighten. 2nd ed. Analytics Press, 2012. 350 p.
38. Fowler M. Patterns of Enterprise Application Architecture. Addison-Wesley, 2002. 560 p.
39. Gomaa H. Real-Time Software Design for Embedded Systems. Cambridge University Press, 2016. 480 p.
40. Gothelf J., Seiden J. Lean UX. 3rd ed. O'Reilly Media, 2021. 240 p.
41. Grieves M. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior. *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*. Springer, 2016. P. 85–113.
42. Grinberg M. Flask Web Development. 2nd ed. O'Reilly Media, 2018. 316 p.
43. Guidelines for Human-AI Interaction / S. Amershi et al. *Proceedings of the 2019 CHI Conference*. 2019. P. 1–13.
44. Heaton J. Applications of Semantic Distance Measures to Content Analysis. *Journal of Artificial Intelligence Research*. 2018. Vol. 62. P. 110–132.
45. Hu Y., Niu J., Siau K. Reliable and Trustworthy Artificial Intelligence. *International Journal of Information Management Data Insights*. 2023. Vol. 3, Issue 1.
46. Humble J., Farley D. Continuous Delivery. Addison-Wesley, 2010. 512 p.
47. Indrasiri K., Kuruppu P. gRPC: Up and Running. O'Reilly Media, 2020. 200 p.

48. ISO 9004:2018. Quality management. Quality of an organization. Guidance to achieve sustained success. Geneva : ISO, 2018. 62 p.
49. ISO/IEC 23894:2023. Information technology. Artificial intelligence. Guidance on risk management. Geneva : ISO, 2023. 45 p.
50. ISO/IEC 25010:2011. Systems and software engineering. Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE). Geneva : ISO, 2011. 34 p.
51. ISO/IEC 27001:2022. Information security, cybersecurity and privacy protection. Information security management systems. Geneva : ISO, 2022. 24 p.
52. ISO/IEC TR 19759:2015. Software Engineering. Guide to the Software Engineering Body of Knowledge (SWEBOK). Geneva : ISO, 2015. 335 p.
53. ISO/IEC TR 24029-1:2021. Artificial Intelligence (AI). Assessment of the robustness of neural networks. Geneva : ISO, 2021. 28 p.
54. Jacka J. M., Paulette K. Project Management for Business Professionals: A Guide to the RACI Matrix. John Wiley & Sons, 2020. 256 p.
55. Johnson J., Douze M., Jégou H. Billion-scale similarity search with GPUs. *IEEE Transactions on Big Data*. 2019. Vol. 7, Issue 3. P. 535–547.
56. Jones C. Applied Software Measurement. 3rd ed. McGraw-Hill, 2008. 672 p.
57. Jurafsky D., Martin J. H. Speech and Language Processing. 3rd ed. draft, 2023. 610 p.
58. Kahneman D. Thinking, Fast and Slow. New York : Farrar, Straus and Giroux, 2011. 499 p.
59. Karpathy A. Software 2.0. *Medium*. 2017. URL: <https://karpathy.medium.com/software-2-0-a6459a4266e2> (дата звернення: 15.12.2025).
60. Krum R. Cool Infographics. John Wiley & Sons, 2013. 368 p.

61. LangChain / LangGraph Documentation. URL: <https://langchain-ai.github.io/langgraph/> (дата звернення: 21.12.2025).
62. Lantz E. Machine Learning with R. 3rd ed. Packt Publishing, 2019. 458 p.
63. Larman C. Applying UML and Patterns. 3rd ed. Prentice Hall, 2004. 736 p.
64. Lutz M. Learning Python. 5th ed. O'Reilly Media, 2013. 1648 p.
65. Manning C. D., Raghavan P., Schütze H. Introduction to Information Retrieval. Cambridge University Press, 2008. 496 p.
66. Manning C. D., Schütze H. Foundations of Statistical Natural Language Processing. MIT Press, 1999. 680 p.
67. McKinney W. Python for Data Analysis. 3rd ed. O'Reilly Media, 2022. 578 p.
68. Miles R., Hamilton K. Learning UML 2.0. O'Reilly Media, 2006. 269 p.
69. Mouat A. Using Docker. O'Reilly Media, 2015. 354 p.
70. Nielsen J. Usability Engineering. Morgan Kaufmann, 1993. 362 p.
71. Norman D. The Design of Everyday Things. Basic Books, 2013. 368 p.
72. OWASP Top 10 Reference. URL: <https://owasp.org/www-project-top-ten/> (дата звернення: 20.12.2025).
73. Park S. C. Economic Analysis of Digital Transformation and AI Adoption. *Journal of Digital Economy*. 2021. Vol. 4, No. 2. P. 15–29.
74. Percival H., Gregory B. Architecture Patterns with Python. O'Reilly Media, 2020. 300 p.
75. Phillips J. J., Phillips P. P. ROI in Software Development. Elsevier, 2007. 320 p.
76. PostgreSQL Documentation. URL: <https://www.postgresql.org/docs/> (дата звернення: 20.12.2025).

77. Project Management Institute. A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide). 7th ed. Newtown Square, PA: PMI, 2021. 274 p.
78. Reimers N., Gurevych I. Sentence-BERT: Sentence Embeddings using Siamese BERT-Networks. *Proceedings of the 2019 Conference on EMNLP*. 2019.
79. Retrieval-Augmented Generation for Knowledge-Intensive NLP Tasks / P. Lewis et al. *Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS)*. 2020. Vol. 33. P. 9459–9474.
80. Recursive Character Text Splitting Methodology. URL: <https://python.langchain.com/> (дата звернення: 10.12.2025).
81. Richards M., Ford N. Fundamentals of Software Architecture. O'Reilly Media, 2020. 432 p.
82. Rogers D. L. The Digital Transformation Playbook. Columbia University Press, 2016. 296 p.
83. Sammut C., Webb G. I. Confusion Matrix. *Encyclopedia of Machine Learning*. Springer, 2017. P. 260.
84. Schwab K. The Fourth Industrial Revolution. Geneva : World Economic Forum, 2016. 172 p.
85. Shneiderman B. Designing the User Interface. 6th ed. Pearson, 2016. 624 p.
86. Siegel E. Predictive Analytics. John Wiley & Sons, 2016. 336 p.
87. Simple Mail Transfer Protocol : RFC 5321. URL: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc5321> (дата звернення: 15.12.2025).
88. Singhal A. Modern Information Retrieval: A Brief Overview. *IEEE Data Engineering Bulletin*. 2001. Vol. 24, No. 4. P. 35–43.
89. Slatkin B. Effective Python. 2nd ed. Addison-Wesley, 2019. 480 p.
90. Stehman S. V. Selecting and interpreting measures of thematic classification accuracy. *Remote Sensing of Environment*. 1997. Vol. 62, Issue 1. P. 77–89.

91. Sutherland J. Scrum. Crown Business, 2014. 256 p.
92. Sutton R. S., Barto A. G. Reinforcement Learning: An Introduction. 2nd ed. MIT Press, 2018. 552 p.
93. Thaler R. H., Sunstein C. R. Nudge. Penguin Books, 2009. 320 p.
94. Tidwell J., Brewer C., Valencia-Hardy A. Designing Interfaces. 3rd ed. O'Reilly Media, 2020. 576 p.
95. Van Rijsbergen C. J. Information Retrieval. 2nd ed. Butterworth-Heinemann, 1979. 224 p.
96. VanderPlas J. Python Data Science Handbook. O'Reilly Media, 2016. 548 p.
97. Warden P., Situnayake D. TinyML. O'Reilly Media, 2019. 504 p.
98. Wooldridge M. An Introduction to MultiAgent Systems. 2nd ed. John Wiley & Sons, 2009. 484 p.
99. Yerkes R. M., Dodson J. D. The relation of strength of stimulus to rapidity of habit-formation. *Journal of Comparative Neurology and Psychology*. 1908. Vol. 18. P. 459–482.
100. Correlation and Regression / K. H. Zou et al. *Radiology*. 2003. Vol. 228, No. 3. P. 617–622.