

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Комп'ютерних наук
(повна назва)

Кафедра Системотехніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)

Розробка методу оцінювання надійності побутової техніки для
інформаційної системи сервісного центру
(тема)

Виконав:

здобувач 2 курсу, групи ІТПм-24-1

Меденцев Артем Романович

(прізвище, власне ім'я, по батькові)

Спеціальність 122 Комп'ютерні науки

(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Інформаційні технології
проектування

(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Калита Н.І.

(посада, власне ім'я, прізвище)

Допускається до захисту

Зав. кафедри

(підпис)

Гребеннік І.В.

(власне ім'я, прізвище)

2025 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Комп'ютерних наук

Кафедра Системотехніки

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 122 Комп'ютерні науки
(код і повна назва)

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Інформаційні технології проєктування
(повна назва освітньої програми)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

«8» грудня 2025 р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві Меденцеву Артему Романовичу
(прізвище, власне ім'я, по батькові)


- Тема роботи Розробка методу оцінювання надійності побутової техніки для інформаційної системи сервісного центру затверджена наказом університету від «24» листопада 2025р. № 1058 Ст
- Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії «18» червня 2024 р.
- Вихідні дані до роботи оцінювання надійності побутових технічних пристроїв; вхідні дані: параметри експлуатації побутових пристроїв, ІС сервісного центру; ПК з 16 ГБ оперативної пам'яті та Windows 10 Pro, Python 3.11, React.js, Tailwind CSS, JavaScript.
- Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі 1. Вступ; 2. Аналіз предметної області; 2.1 Інформаційні системи сервісного центру: структура, класифікація та вимоги; 2.2 Аналіз функціональних можливостей аналогічних систем; 2.3 Визначення основних показників для оцінювання якості побутової техніки; 2.4 Постановка задачі дослідження; 3. Розробка методу комплексного оцінювання надійності техніки; 3.1 Розробка методу комплексної оцінки побутової техніки; 3.2 Індекс економічної доцільності; 3.3 Індекс надійності; 4. Розробка та аналіз методу на основі жорстких порогів; 4.1 Розробка та аналіз методу на основі жорстких порогів; 4.2 Розробка та аналіз методу на основі нечіткої моделі; 4.3 Розробка та аналіз моделі на основі методу аналізу ієрархій та метод розрахунку відстані до ідеального рішення; 5 Порівняльний аналіз ефективності розроблених моделей; 5.1 Формування контрольної вибірки даних та розрахунок вхідних параметрів; 5.2 Розробка вебзастосунку СППР; 5.3 Результати моделювання прийняття рішень; 5.4 Аналіз чутливості моделей до зміни значень; 6. Висновки.


5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій: Скріншоти з функціоналом подібних систем; Графіки Гаусових функцій належності та поверхня рішень нечіткої моделі; Скріншоти коду для реалізації моделей; Таблиці з даними для тестування та їх результатами; Скріншоти інтерфейсу розробленого вебзастосунку.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Проведення аналізу предметної області	11.11.2025 – 14.11.2025	Виконано
2	Розробка методу комплексного оцінювання надійності техніки	14.11.2025 – 18.11.2025	Виконано
3	Розробка та аналіз методу на основі жорстких порогів	18.11.2025 – 24.11.2025	Виконано
4	Порівняльний аналіз ефективності розроблених моделей	24.11.2025 – 02.12.2025	Виконано
5	Захист кваліфікаційної роботи в екзаменаційній комісії	10.12.2025	Виконано

Дата видачі завдання « 24 » листопада 2025 р.

Здобувач 
(під

Керівник роботи 
(підпис)

проф. Калита Н.І.
(посада, власне ім'я, прізвище)

Я, як студент ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

8.11.2025



Кваліфікаційна робота не містить відомостей заборонених до відкритого опублікування.

Керівник кваліфікаційної роботи _____ проф. Калита Н.І



Кваліфікаційна робота виконана у відповідності до стандартів, що діють в Україні.

Керівник кваліфікаційної роботи _____ проф. Калита Н.І.



Попередній захист проведено 8 грудня 2025 р.

Керівник кваліфікаційної роботи _____ проф. Калита Н.І.



РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота: 69 с., 23 рис., 2 табл., 28 джерел, 2 додатки.

АНАЛІЗ НАДІЙНОСТІ ПОБУТОВОЇ ТЕХНІКИ, ВЕБДОДАТОК,
МЕТОД ОЦІНКИ, НЕЧІТКА МОДЕЛЬ, CRM СИСТЕМА, PYTHON.

Об'єктом дослідження є процес прийняття рішень в управлінні життєвим циклом технічних пристроїв.

Предметом дослідження являються моделі та методи оцінювання надійності побутової техніки в задачі «ремонт чи заміна».

Метою роботи є розробка методу комплексного оцінювання надійності та визначення його ефективності у результаті порівняльного аналізу моделей підтримки прийняття рішень на основі жорстких порогів, нечіткої логіки та методу аналізу ієрархій.

Методами дослідження є: системний підхід, методи підтримки прийняття рішень, математичне моделювання та об'єктно-орієнтоване програмування.

Магістерська робота містить аналіз предметної області управління життєвим циклом техніки, опис розробленого методу комплексного оцінювання надійності, розробку та порівняння моделей жорстких порогів, ANPTOPSIS та нечіткої моделі.

Ця робота може бути використана при розробці та модернізації інформаційних систем сервісних центрів з ремонту побутової техніки для автоматизації процесу діагностики та надання обґрунтованих рекомендацій клієнтам щодо доцільності ремонту.

ABSTRACT

Master's thesis: 69 pp., 23 fig., 2 tabl., 28 sources, 2 attachments.

CRM SYSTEM, EVALUATION METHOD, FUZZY MODEL, PYTHON, RELIABILITY ANALYSIS OF HOUSEHOLD APPLIANCES, WEB APPLICATION.

The object of the study is the decision-making process in the management of the life cycle of technical equipment.

The subject of the study is models and methods of decision support in the information system of a household appliance service center.

The purpose of the master's thesis is to improve the effectiveness of management decisions in service centers by developing a method for assessing the reliability of household appliances and a comparative analysis of decision support models for the repair or replace task.

The research methods are: a systematic approach, decision support methods, mathematical modeling, and object-oriented programming.

The master's thesis contains an analysis of the subject area of equipment life cycle management, a description of the developed method of comprehensive reliability assessment, the development and comparison of hard threshold models, AHPTOPSIS, and fuzzy models.

This work can be used in the development and modernization of information systems for service centers that repair household appliances to automate the diagnostic process and provide customers with informed recommendations on the advisability of repairs.

ЗМІСТ

Скорочення та умовні позначки.....	9
Вступ.....	10
1 Аналіз предметної області.....	12
1.1 Інформаційні системи сервісного центру: структура, класифікація та вимоги.....	12
1.2 Аналіз функціональних можливостей аналогічних систем.....	14
1.3 Визначення основних показників для оцінювання якості побутової техніки.....	17
1.4. Постановка задачі дослідження.....	19
2 Розробка методу комплексного оцінювання надійності техніки.....	22
2.1 Розробка методу комплексної оцінки побутової техніки.....	22
2.2 Індекс економічної доцільності.....	22
2.3 Індекс надійності.....	24
2.3.1 Обґрунтування визначення показників нормативних показників та коефіцієнта чутливості.....	26
3 Розробка та аналіз методу на основі жорстких порогів.....	29
3.1 Розробка та аналіз методу на основі жорстких порогів.....	29
3.2 Розробка та аналіз методу на основі нечіткої моделі.....	32
3.2.1 Розробка моделі на основ алгоритму Мамдані.....	32
3.2.2 Програмна реалізація методу нечіткого висновку.....	40
3.3 Розробка та аналіз моделі на основі методу аналізу ієрархій та метод розрахунку відстані до ідеального рішення.....	44
3.3.1. Обґрунтування вибору методів багатокритеріального аналізу.....	44
3.3.2. Визначення вагових коефіцієнтів критеріїв.....	45
3.3.3 Ранжування альтернатив методом TOPSIS.....	46
3.3.4. Програмна реалізація та аналіз результатів методу АНРТОПСІС.....	47

4 Порівняльний аналіз ефективності розроблених моделей.....	51
4.1 Формування контрольної вибірки даних та розрахунок вхідних параметрів.....	51
4.2 Розробка вебзастосунку СППР.....	53
4.3 Результати моделювання прийняття рішень.....	54
4.4. Аналіз чутливості моделей до зміни значень.....	60
Висновки.....	65
Перелік джерел посилання.....	67
Додаток А Графічний матеріал.....	70
Додаток Б Використаний код.....	84

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

БД – база даних;

ІС – інформаційна система;

СППР – система підтримки прийняття рішень;

СУБД – система управління базами даних;

АНР – analytic hierarchy process;

CRM – customer relationship management;

MCDM – multi-criteria decision making;

NIS – negative ideal solution;

OLAP – online analytical processing;

PIS – positive ideal solution;

TOPSIS – technique for order of preference by similarity to ideal solution.

ВСТУП

Сучасний ринок побутової техніки характеризується надзвичайною динамічністю, широким асортиментом та інтенсивним впровадженням нових технологій. Водночас, зі зростанням складності пристроїв, питання їх якості, довговічності та, зокрема, надійності є важливими для споживачів та виробників. У цьому контексті сервісні центри та ремонтні майстерні відіграють унікальну роль. Вони є не лише суб'єктами господарювання, що надають послуги з ремонту, але й первинними джерелами цінних емпіричних даних про реальну експлуатацію, типові несправності та слабкі місця техніки.

Щоденна діяльність сервісного центру генерує великі масиви даних: інформація про клієнтів, моделі техніки, що надходить у ремонт, деталізовані описи поломок, перелік використаних запчастин, вартість та тривалість ремонту. Однак у більшості існуючих бізнес-процесів цей масив даних використовується переважно для операційних завдань: ведення обліку замовлень, розрахунку з клієнтами та управління складськими запасами. Аналітичний потенціал цих даних залишається майже нереалізованим.

Рішення про доцільність ремонту, формування складського запасу запчастин чи надання рекомендацій клієнту щодо подальшої експлуатації часто приймаються менеджером або майстром на основі суб'єктивного досвіду та інтуїції. Відсутність формалізованого, об'єктивного методу оцінювання надійності конкретної моделі техніки на основі накопиченої історії ремонтів є значною проблемою.

Автоматизація збору даних вже є стандартом, але наступний логічний крок, а саме автоматизація аналізу та перетворення цих даних на знання – відсутня. Таким чином, розробка методу, який би дозволив на основі статистики сервісного центру розраховувати об'єктивний показник

надійності та інтегрувати цей метод в існуючу систему сервісного центру, є актуальною науково-прикладною задачею. Це дозволить перейти від простої фіксації поломок до прогнозування «поведінки» техніки, оптимізації витрат на ремонт та надання обґрунтованих рекомендацій клієнтам, підвищуючи якість послуг сервісного центру.

Об'єктом дослідження є процес прийняття рішень в управлінні життєвим циклом технічних пристроїв.

Предметом дослідження являються моделі та методи оцінювання надійності побутової техніки в задачі «ремонт чи заміна».

Метою роботи є розробка методу комплексного оцінювання надійності та визначення його ефективності у результаті порівняльного аналізу моделей підтримки прийняття рішень на основі жорстких порогів, нечіткої логіки та методу аналізу ієрархій.

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

1.1 Інформаційні системи сервісного центру: структура, класифікація та вимоги

Інформаційна система (ІС) [1] сервісного центру являє собою інтегрований програмно-апаратний комплекс, призначений для автоматизації, моніторингу та аналізу всіх основних бізнес-процесів підприємства. Вона є ядром, що об'єднує операційну діяльність: прийом замовлень, робота майстрів, склад та управлінський облік.

Структура типової ІС сервісного центру зазвичай будується за клієнт-серверною архітектурою [2] і включає декілька основних компонентів.

Сервер бази даних (БД) – центральне сховище всієї інформації. Зазвичай, використовуються реляційні системи управління базами даних (СУБД) [3], які зберігають дані про клієнтів, техніку, замовлення, виконані роботи, використані запчастини, фінансові транзакції тощо.

Сервер застосунку – це компонент, що реалізує основну бізнес-логіку системи, а саме обробку запитів від клієнтів, розрахунок вартості ремонту, оновлення статусів замовлень, управління правами доступу.

Клієнтський інтерфейс, а саме робоче місце користувача, реалізоване найчастіше у вигляді вебдодатку. Він надає інструменти для взаємодії з системою для різних ролей: адмін-менеджера для прийому та обліку замовлень, майстра для діагностики та ведення ремонтних робіт, та, іноді, клієнта для перегляду статусу свого замовлення.

Класифікація ІС сервісних центрів може проводитись за кількома ознаками:

а) за характером обробки даних: більшість існуючих систем є OLTP системами [4]. Вони оптимізовані для швидкої обробки великої кількості коротких транзакцій – реєстрація нового замовлення, списання запчастини зі складу, закриття замовлення та друк чека.

б) за функціональним призначенням: переважно це системи

автоматизації операційної діяльності та управлінського обліку. Їхня головна мета – прискорити та впорядкувати поточну роботу.

в) за програмно-апаратною платформою – ця ознака визначає, на якому обладнанні та під управлінням яких операційних систем функціонує ІС. Сучасні рішення часто комбінують декілька підходів:

- десктопні класичні програми, що встановлюються безпосередньо на стаціонарні комп'ютери або ноутбуки;

- веб-орієнтовані, найбільш поширений сьогодні варіант, де доступ до системи відбувається через веб-браузер, вони не вимагають встановлення на клієнтський комп'ютер і доступні з будь-якого пристрою;

- мобільні спеціалізовані додатки для смартфонів та планшетів, що зазвичай використовуються виїзними майстрами для доступу до замовлень, оновлення статусів та перегляду складських залишків у реальному часі.

- кросплатформні рішення, розроблені для одночасної роботи на декількох платформах.

Аналіз типової архітектури таких інформаційних систем виявляє суттєву прогалину. Незважаючи на наявність деталізованих баз даних та підсистем для операційної діяльності, у більшості з них відсутні інтегровані компоненти OLAP або системи підтримки прийняття рішень. Саме ці системи призначені для складного аналізу накопичених даних, пошуку закономірностей та надання управлінських рекомендацій, що є критично важливим для ефективного управління ремонтними процесами.

Вимоги до сучасної ІС сервісного центру включають певні функціональні та нефункціональні. Функціональні вимоги:

- автентифікація та авторизація користувачів;
- ведення єдиної бази клієнтів та історії їхніх звернень;
- облік замовлень на ремонт: реєстрація техніки, опис заявленої несправності, призначення виконавця, відстеження поточного статусу;
- ведення бази діагностики поломок та варіантів ремонту;
- управління складом запчастин;

- формування таких вихідних документів, як бланк замовлення, акт виконаних робіт, чек на оплату, гарантійний талон;

- генерація базової фінансової звітності;

Нефункціональні вимоги:

- надійність, а саме стабільність роботи, мінімізація збоїв, що критично для операційної діяльності;

- безпека персональних даних клієнтів та комерційної інформації, а також обов'язкове впровадження механізмів резервного копіювання даних;

- масштабованість – здатність системи справлятися зі зростанням обсягу даних без втрати продуктивності;

- інтегрованість, тобто можливість підключення нових модулів, наприклад, розроблюваного методу оцінки надійності, який повинен мати доступ до бази даних замовлень для проведення розрахунків.

1.2 Аналіз функціональних можливостей аналогічних систем

На ринку програмного забезпечення для сфери обслуговування та ремонту існує значна кількість готових рішень, спрямованих на автоматизацію бізнес-процесів. Найпоширенішим класом таких систем є Customer Relationship Management (CRM) системи [5], адаптовані під специфіку сервісних центрів. Ці системи допомагають організаціям керувати клієнтськими даними та автоматизувати процеси обслуговування. До типових представників таких систем можна віднести такі продукти, як ServiceMax [6], RepairShopr [7] та FieldPulse [8]. На рисунках 1.1-1.3 зображено опис основних функції цих CRM систем.

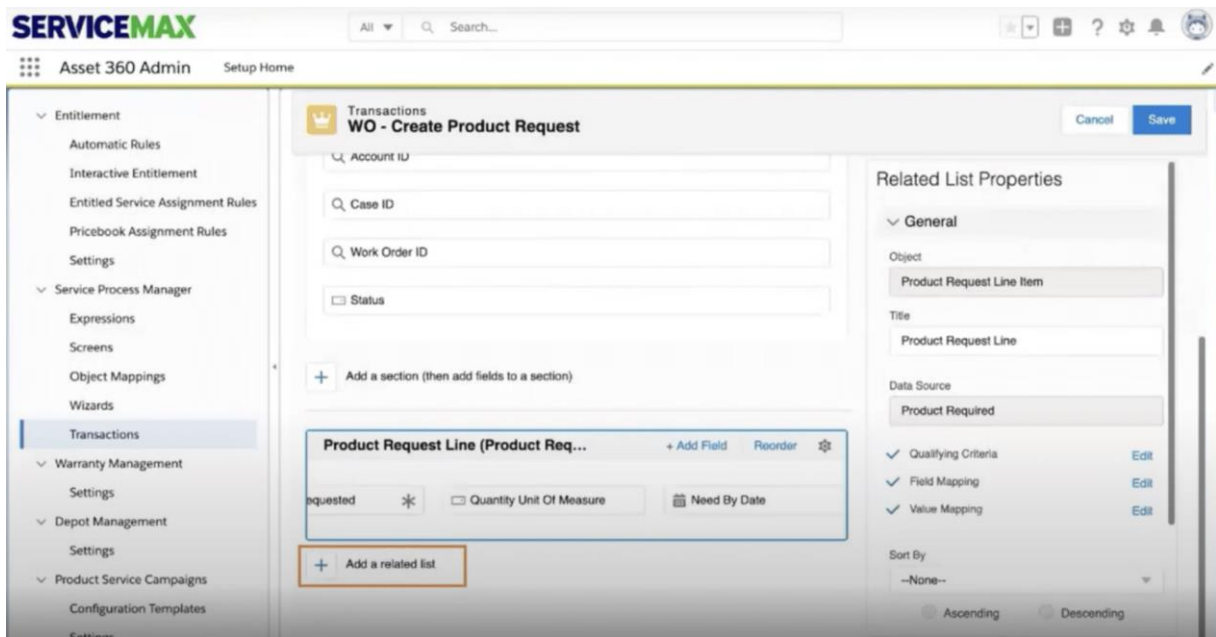



Рисунок 1.1 – Основні функції CRM системи ServiceMax



[Features](#)
[Pricing](#)
[Integrations](#)
[Industries](#)
[Testimonials](#)
[Cell Phone Repair](#)
[Blog](#)
[Contact](#)
[FAQ](#)
[Login](#)

Sign Up

Robust Inventory System

Inventory that was rebuilt from the ground up in 2015 to support the most advanced workflows including; batch tracking, RMA and return tracking, rework tracking, tons more. If a job comes back (even years later) you'll have the ability to pull up the exact Purchase Order that product was bought from, so you can determine the vendor and all the product instance attributes.

- Track stock levels and receive reorder reminders
- Barcode labels for single or full inventory list
- Easy CSV import / export for bulk updates
- Cost averaging for variable price items
- Change history for tracking employee updates

- Track cost, retail, and wholesale pricing
- Specify taxed and non-taxed items
- Attach warranties to inventory items
- Customizable product categories with reporting
- Vendor and PO system

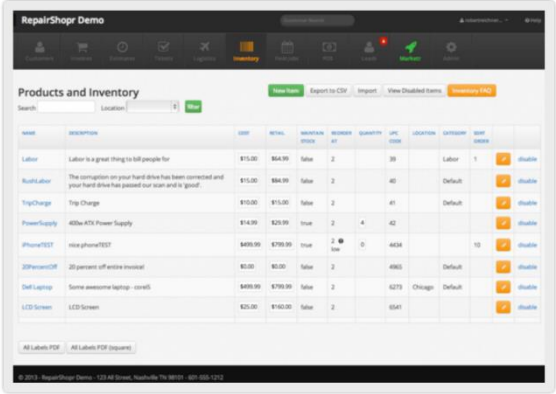


Рисунок 1.2 – Основні функції CRM системи FieldPulse

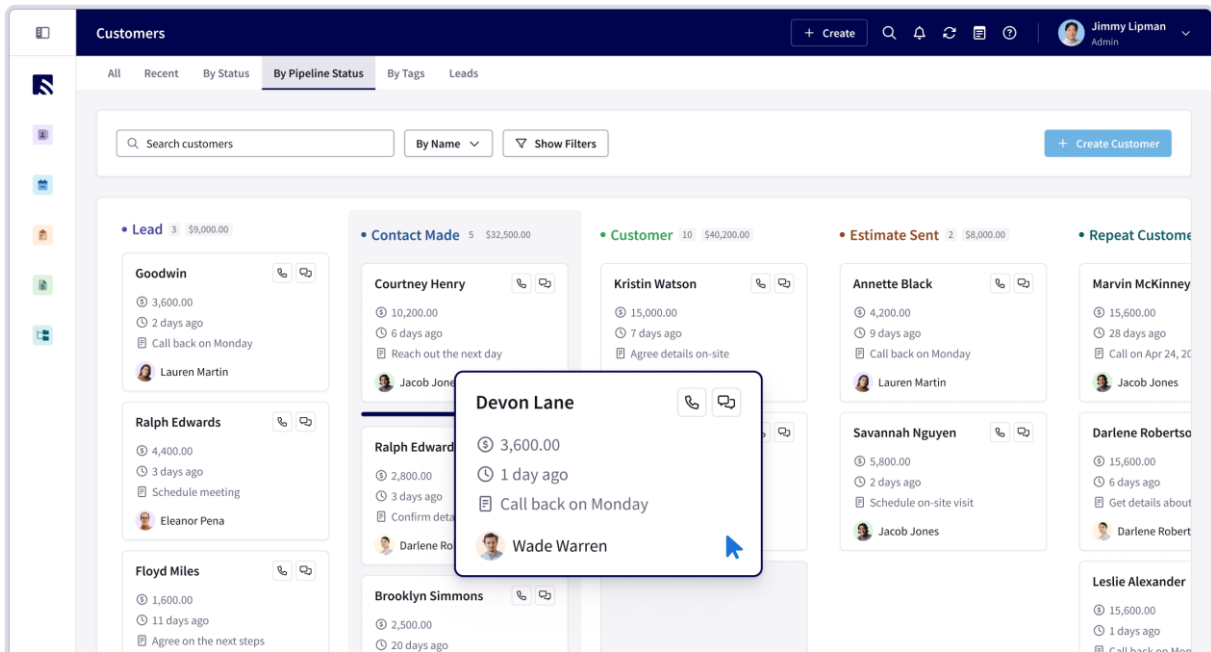


Рисунок 1.3 – Основні функції CRM системи RepairShop

Базовий функціонал наведених систем здебільшого покриває операційні потреби сервісного центру:

- зберігання інформації про клієнтів та їхні замовлення;
- планування та відстеження ремонтних робіт;
- управління запасами необхідних запчастин;
- генерація базових звітів про виконану роботу.

Однак, незважаючи на широкий спектр можливостей, що вони пропонують, детальний аналіз виявляє суттєвий недолік – жодна з цих CRM-систем не має вбудованих спеціалізованих інструментів для глибокого аналізу якості та надійності побутової техніки, що проходить через сервісний центр.

Такі системи не є універсальними рішеннями для повноцінного управління всією діяльністю сервісу і в аналітичному розрізі. Вони орієнтовані виключно на автоматизацію взаємодії з клієнтами та управління персоналом. Можливості аналітики в них, як правило, обмежуються простою статистикою: кількість ремонтів за період або найпопулярніша послуга. Вони не дають відповіді на питання: «Яка об'єктивна оцінка

надійності моделі X?» або «Чи варто рекомендувати клієнту ремонт, базуючись на історії відмов техніки цього класу?»).

Таким чином, на ринку існує чітко виражений функціональний розрив. Існуючі ІС є ефективними інструментами для обліку операційної діяльності, але не для аналізу та підтримки прийняття рішень. Цей розрив підкреслює необхідність розробки окремого методу, який можна було б інтегрувати в подібні системи, збагативши їх функціоналом для об'єктивного оцінювання надійності техніки на основі накопичених даних.

У кваліфікаційній роботі бакалавра [9] було розроблено базову інформаційну модель сервісного центру та проаналізовано основні бізнес-процеси. Однак, питання автоматизованої оцінки надійності техніки у контексті системи підтримки прийняття рішень залишилося поза межами того дослідження.

1.3 Визначення основних показників для оцінювання якості побутової техніки

Рішення «ремонт чи заміна» є класичною задачею менеджменту та інженерії. Це складне, напівструктуроване завдання, що вимагає врахування багатофакторної інформації. Прийняття такого рішення власником, менеджером або майстром часто є суб'єктивним і базується на особистому досвіді або спрощених евристичних правилах, що не гарантує оптимального результату. Це підкреслює актуальність розробки інформаційних систем підтримки прийняття рішень, здатних надати об'єктивну та обґрунтовану рекомендацію.

Однією з основних задач, що вимагає підтримки прийняття рішень, є вибір між ремонтом та заміною техніки. Для її вирішення теоретично можуть застосовуватись моделі різної складності: порогові, або інтелектуальні [10]. Проблемою є те, що в рамках цієї предметної області відсутній їхній порівняльний аналіз цих моделей. Не досліджено, як саме

вибір типу моделі впливає на якість, обґрунтованість та економічні наслідки наданих рекомендацій.

Для розробки об'єктивного методу оцінювання, необхідно спершу визначити ключові показники, які підлягають вимірюванню. Ці показники повинні комплексно описувати стан техніки з точки зору як інженерії, так і економіки. Як показує практика сервісних центрів та теоретичні основи, основними факторами, що впливають на рішення, є технічні, економічні та експлуатаційні фактори.

Перший основний технічний фактор це ремонтпридатність, а саме принципова можливість відновлення працездатного стану. Це властивість техніки, що полягає в пристосованості до підтримки та відновлення працездатного стану шляхом виявлення та усунення несправностей [11]. У контексті предметної області, що розглядається, показник ремонтпридатності зазвичай є експертним, і як правило бінарним – «так» або «ні», що відповідає рішенням ремонтувати або ні.

Другий основний технічний фактор це надійність. Це властивість виробу зберігати працездатність протягом певного часу в заданих умовах експлуатації. Це один з основних показників, що відображає, наскільки техніка відповідає терміну служби, розрахованому розробником.

Третім основним технічним фактором є довговічність – це властивість об'єкта зберігати працездатний стан до настання граничного стану при встановленій системі обслуговування. Кількісно цей показник виражається через технічний ресурс або термін служби.

До економічних факторів відносяться вартість ремонту, заміни та володіння технікою:

- вартість ремонту – це сукупна вартість діагностики, запчастин та роботи;

- вартість заміни або ринкова ціна – це вартість придбання, доставки та введення в експлуатацію нового аналогічного обладнання;

- загальна вартість володіння – це сукупні витрати, що включають не

лише початкову купівлю, але й усі майбутні витрати на енергоспоживання, обслуговування та ремонти.

До факторів експлуатації відносяться:

- інтенсивність використання – навантаження на обладнання, що безпосередньо впливає на швидкість зносу;
- моральний знос, тобто поява на ринку нових, більш ефективних чи функціональних моделей, що робить старе обладнання менш привабливим, навіть якщо воно працездатне.

Вимірювання цих двох факторів на практиці є нетривіальною задачею, оскільки об'єктивні дані часто відсутні. Навантаження рідко фіксується напряму. Для його оцінки зазвичай використовуються опосередковані показники, такі як середня кількість циклів на тиждень або кількість осіб у домогосподарстві. Деякі сучасні моделі техніки можуть зберігати таку статистику у сервісних логах, але це не є загальною практикою.

Моральний знос можна оцінити через порівняння вартості ремонту з вартістю придбання нового аналогічного пристрою. Також враховується поява на ринку моделей з суттєво кращими характеристикам або припинення виробництва запасних частин для поточної моделі.

Існуючі ІС сервісних центрів, як правило, фіксують лише вартість ремонту та, іноді, ринкову ціну. Інші, не менш важливі фактори, ігноруються. Розроблюваний метод покликаний усунути цей недолік шляхом введення комплексної оцінки, яка агрегує ці фактори у зрозумілі, кількісні показники.

1.4. Постановка задачі дослідження

На основі проведеного аналізу предметної області та існуючих інформаційних систем, можна сформулювати ключову проблему, яка потребує вирішення. Сучасні сервісні центри оперують значними обсягами

даних про ремонти, однак процес прийняття рішень щодо доцільності відновлення техніки залишається значною мірою суб'єктивним та залежним від людського фактору. Відсутність формалізованих методів оцінювання надійності та економічної ефективності призводить до ситуацій, коли клієнтам рекомендують ремонт техніки, яка вже вичерпала свій ресурс, або, навпаки, заміну пристрою, який ще міг би ефективно функціонувати.

Існуючі методи підтримки прийняття рішень, такі як прості порогові правила, часто не враховують нелінійний характер залежностей між вартістю ремонту, віком техніки та історією її відмов. Водночас більш складні підходи, що базуються на інтелектуальному аналізі даних, рідко інтегруються в типові інформаційні системи через складність реалізації та налаштування. Таким чином, виникає протиріччя між необхідністю підвищення якості управлінських рішень та відсутністю доступних інструментів для їх підтримки в рамках операційної діяльності сервісного центру.

Вирішення цієї задачі дозволить не лише оптимізувати бізнес-процеси сервісних центрів, але й підвищити рівень довіри з боку клієнтів завдяки прозорості та обґрунтованості наданих рекомендацій.

В якості пристроїв побутової техніки розглядаються пральні машини, холодильники, посудомийні машини, кавоварки. Сервісні центри по їх обслуговуванню мають таку інформацію:

- середня ринкова ціна на нову аналогічну m -ту модель техніки C^m ;
- очікуваний термін служби певної категорії пристрою T_{norm} ;
- фактичний час експлуатації пристрою T_{life} ;
- сумарна вартість всіх попередніх ремонтів та обслуговування даного екземпляра або середня для моделі R^t .
- загальна кількість зафіксованих ремонтів n для даного екземпляра;
- очікувана кількість ремонтів для певної категорії пристрою n_{norm}
- загальний час експлуатації техніки у роках.

З метою прийняття рішення щодо доцільності або недоцільності

ремонту необхідно розробити метод комплексного оцінювання надійності пристрою та обрати модель прийняття рішення, ґрунтуючись на отриманих показниках. Для вирішення цієї задачі необхідно:

- а) визначити показники оцінювання надійності побутової техніки;
- б) визначити та обґрунтувати способи їх кількісного оцінювання;
- в) дослідити застосування декількох моделей прийняття рішень, зокрема на основі методів жорстких порогів, нечіткої моделі та багатокритеріального аналізу.
- г) за результатами обчислювальних експериментів розробити рекомендації застосування досліджених моделей прийняття рішень у практичних ситуаціях застосування в ІС сервісних центрів.

2 РОЗРОБКА МЕТОДУ КОМПЛЕКСНОГО ОЦІНЮВАННЯ НАДІЙНОСТІ ТЕХНІКИ

2.1 Розробка методу комплексної оцінки побутової техніки

Запропонований метод полягає у розрахунку двох інтегральних індексів, що надають комплексну оцінку стану побутової техніки:

- індекс економічної доцільності (Q);
- індекс надійності (N).

На відміну від суб'єктивних оцінок майстрів ці індекси враховують всю накопичену історію експлуатації та ремонтів конкретної моделі, що дозволяє приймати значно більш обґрунтовані рішення.

Обидва індекси розраховуються таким чином, щоб були приведеними до інтуїтивно зрозумілої шкали від 0 до 10, де 10 це – ідеальний стан, тобто техніка абсолютно надійна та економічно вигідна, а 0 це – критичний стан і техніка вкрай ненадійна та економічно недоцільна. В подальшому ці показники використовуються, зокрема, як вхідні дані у методах надання оцінки для СППР або для простої та наочної візуалізації в інтерфейсі ІС сервісного центру.

2.2 Індекс економічної доцільності

Індекс економічної доцільності відповідає на питання: «Наскільки економічно виправданим є володіння цією технікою, враховуючи, скільки вже було витрачено на її ремонти?». Він безпосередньо пов'язує сукупні витрати на ремонт із вартістю повної заміни.

Вхідними даними, які доступні в усіх ІС сервісних центрів, для визначення індексу економічної доцільності є:

- середня ринкова ціна на нову аналогічну модель техніки;
- сумарна вартість всіх попередніх ремонтів та обслуговування даного екземпляра або середня для моделі.

В основі індексу лежить коефіцієнт вартості володіння (2.1), який показує, яку частку від ціни нового пристрою вже склали витрати на ремонт:

$$K_v = \frac{R_t}{C_m} \quad (2.1)$$

де K_v – коефіцієнт вартості володіння;

R_t – сумарна вартість всіх попередніх ремонтів та обслуговування;

C_m – середня ринкова ціна на нову аналогічну модель техніки.

Якщо $K_v = 0$, це означає, що ремонтів не було, тобто ідеальна ситуація.

Якщо $K_v = 1$, це означає, що сумарно на ремонти вже витрачено стільки ж, скільки коштує новий пристрій, чим менше K_v , тим краще.

Для приведення цього коефіцієнта до шкали 0-10, де 10 є найкращим показником, використовується функція експоненційного спадання. Це відображає той факт, що кожна наступна гривня, витрачена на ремонт, зменшує економічну доцільність нелінійно, тобто перший ремонт є нормальним, але п'ятий – критичний.

Для аналізу економічної доцільності ремонту побутової техніки пропонується ввести індекс економічної доцільності, який обчислимо за формулою (2.2):

$$Q = 10 * e^{-k*K_v} \quad (2.2)$$

де Q – індекс економічної доцільності;

e – основа натурального логарифма;

k – коефіцієнт чутливості;

K_v – коефіцієнт вартості володіння;

R_t – сумарна вартість всіх попередніх ремонтів та обслуговування;

C_m – середня ринкова ціна на нову аналогічну модель техніки.

При використанні даної формули буде отримано відповіді у шкалі від

0 до 10, тобто нова техніка, де $R_t = 0$, та $Q = 10$ – оцінка 10 з 10. При ситуації, де ремонти склали половину ціни техніки $R_t = 0,5$, та $Q = 6.06$ – оцінка буде 6 з 10. При ситуації, де ремонти зрівнялись з ціною нової моделі де $R_t = 1$, та $Q = 3.67$ – оцінка приблизно 3.5 з 10. Цей індекс надає інформативну та загально зрозумілу відповідь на питання економічної доцільності ремонту техніки, оскільки він має чітко визначений, нелінійний та має обґрунтований діапазон значень.

Коефіцієнт k у формулі індексу Q визначає, наскільки сильно індекс реагує на накопичення витрат на ремонт. Хоча розробка складної кореляції між k та ринковою ціною C_m дуже складна та багаторівнева задача, цей коефіцієнт залишається експертним параметром, що налаштовується в інформаційній системі, але для середнього значення використовується значення $k = 1$. Це дозволяє сервісному центру впровадити диференційовану бізнес-логіку: для бюджетних категорій техніки встановлюється високий k , що швидко знижує індекс Q навіть при малих витратах, а для преміальних категорій – низький k , що робить модель більш толерантною до дорогих, але виправданих ремонтів, розрахованих на довгий термін служби.

2.3 Індекс надійності

Індекс надійності надає відповідь на питання частоти виходу техніки за ладу і оцінює безпосередньо надійність, ігноруючи вартість, та базується на частоті відмов.

Вхідними даними, які доступні в усіх ІС сервісних центрів є:

- загальна кількість зафіксованих ремонтів або відмов для даного екземпляра;
- загальний час експлуатації техніки у роках.

Оскільки надійність не можна виміряти лише кількістю ремонтів, ключовим показником є середній час безвідмовної роботи або його обернена величина – частота відмов. Для приведення показника індексу

надійності до шкали 0-10 пропонується обчислювати його за формулою (2.3), де для кожної категорії техніки наприклад для пральних машин або холодильників сервісний центр може визначити очікуваний нормативний термін служби та очікувану кількість ремонтів за цей термін. Наприклад, для пральної машини преміум-класу нормативний термін служби дорівнює 10 років, а очікувана кількість ремонтів – 2 ремонти. Для бюджетної – 5 років та 3 ремонти.

$$F_{norm} = \frac{n/T_{life}}{n_{norm}/T_{norm}} \quad (2.3)$$

де F_{norm} – нормалізована частота відмов;

n – фактична кількість ремонтів;

T_{life} – фактичний час експлуатації;

n_{norm} – очікувана кількість ремонтів для цієї категорії;

T_{norm} – очікуваний термін служби для цієї категорії.

F_{norm} показує, у скільки разів фактична частота відмов n/T_{life} гірша або краща за очікувану n_{norm}/T_{norm} . Наприклад, якщо показник $F_{norm} = 1$, то техніка ламається як очікувалось, а якщо показник $F_{norm} = 0.5$, то техніка ламається у 2 рази рідше. Тепер ми можемо привести цей показник до індексу надійності з отриманням значення на шкалі 0-10, використовуючи формулу (2.4), аналогічну з індексом економічної доцільності експоненційну функцію:

$$N = 10 * e^{-p * F_{norm}} \quad (2.4)$$

де N – індекс надійності;

e – основа натурального логарифма;

p – коефіцієнт чутливості;

F_{norm} – нормалізована частота відмов.

До переваг даних методів можна віднести:

- комплексність – оцінка враховує не один, а два ключових аспекти – економічний та технічний;

- об'єктивність, бо метод базується на кількісних даних, що накопичуються в ІС сервісного центру, а не на суб'єктивній думці майстра;

- нормованість – обидва індекси приводяться до єдиної шкали 0-10, що дозволяє легко їх порівнювати, візуалізувати та використовувати у більш складних моделях;

- гнучкість, завдяки коефіцієнтам та нормативам, метод можна тонко налаштувати під різні категорії техніки та різні ринкові умови.

Розглянуті два індекси формують аналітичну основу, яка є ядром розроблюваного методу оцінювання надійності та є суттєвим кроком вперед у порівнянні з простим обліком ремонтів.

2.3.1 Обґрунтування визначення показників нормативних показників та коефіцієнта чутливості

Запропонований підхід є гнучким, однак для його практичного запуску в інформаційній системі сервісного центру необхідно визначити початкові, або базові, значення для двох ключових нормативів: T_{norm} – нормативний термін служби для категорії техніки, та n_{norm} – нормативна кількість ремонтів за цей термін. Ці показники неможливо отримати безпосередньо з поточних операційних даних сервісного центру, оскільки вони є узагальненими, зовнішніми орієнтирами. Для визначення очікуваного терміну служби перш ніж аналізувати конкретні бренди, важливо встановити базовий статистичний горизонт очікуваного терміну служби. Ці дані, хоч і узагальнені, слугують відправною точкою. Проблема полягає в тому, що дані про очікуваний термін служби значно варіюються залежно від джерела, що підкреслює складність методології їх розрахунку. Наприклад, дані від Міжнародної асоціації сертифікованих домашніх

інспекторів InterNACHI [12], надають такі діапазони:

- пральні машини 7-12 років;
- холодильники 9-13 років;
- посудомийні машини 9 років.

Водночас дані на основі «23-го щорічного портрету індустрії США» [13] демонструють значно більш оптимістичну картину з вищими середніми значеннями:

- пральні машини 8-13 років;
- холодильники 10-16 років;
- посудомийні машини 9-14 років.

Європейські джерела [14] також демонструють схожі тенденції, але зі своїми розбіжностями, часто оцінюючи термін служби пральних машин та холодильників у 8-12 років. Для цілей нашої моделі, T_{norm} приймається як експертна усереднена оцінка, що базується на цих галузевих діапазонах, наприклад, T_{norm} для пральної машини – 10 років, для холодильника – 12 років.

Визначення n_{norm} – очікувана кількість ремонтів є складнішою задачею, оскільки такі специфічні дані рідко публікуються у відкритих галузевих звітах. Цей показник є експертною оцінкою, яку формує сам сервісний центр, виходячи з власного досвіду та бізнес-логіки. Наприклад, для преміальної категорії техніки з $T_{norm} = 12$ років, очікувана кількість ремонтів n_{norm} може бути встановлена на рівні 1-2. Водночас для бюджетної техніки може бути 2-3.

Варто зазначити, що на надійність впливає безліч інших факторів, наприклад, інженерна складність конструкції, інтенсивність експлуатації клієнтом та якість профілактичного обслуговування. Однак, моделювання всіх цих факторів вимагало б надзвичайно деталізованих даних, збір яких є непрактичним для операційної діяльності більшості сервісних центрів.

Показники T_{norm} та n_{norm} є необхідними агрегованими показниками для запуску моделі. Найважливішим є те, що запропонований метод не

вимагає, щоб ці нормативи були статичними. Навпаки, сервісні центри повинні використовувати ці галузеві дані лише як початкову точку. З часом, накопичуючи власну історію ремонтів, в інформаційній системі можливе автоматичне перераховування та уточнення цих нормативів, роблячи оцінки індексу надійності дедалі точнішими та релевантнішими до реалій конкретного регіону та парку техніки, що обслуговується.

Коефіцієнт чутливості p у формулі індексу надійності не є статичною величиною – він регулює ступінь довіри до нормативних даних. Як показує аналіз, дані про очікуваний термін служби T_{norm} значно варіюються. Коефіцієнт p має відображати цю невизначеність, наприклад для категорій з широким розкидом нормативів, як пральні машини, де наша впевненість у T_{norm} низька, коефіцієнт p має бути нижчим, наприклад 0,7 – це послаблює відхилення від нечіткого нормативу. Для категорій, де джерела згодні і розкид вузький, як посудомийні машини, наша впевненість у T_{norm} висока. Тут коефіцієнт p має бути вищим, наприклад 1.2, оскільки будь-яке відхилення від чіткого нормативу є більш значущим.

3 РОЗРОБКА ТА АНАЛІЗ МЕТОДУ НА ОСНОВІ ЖОРСТКИХ ПОРОГІВ

3.1 Розробка та аналіз методу на основі жорстких порогів

Будь-яке складне дослідження, що передбачає порівняння методів, вимагає визначення базової моделі. У контексті підтримки прийняття рішень в сервісному центрі, такою базовою моделлю є метод жорстких порогів. Цей підхід є прямою формалізацією та автоматизацією тих емпіричних правил, які досвідчені майстри або менеджери використовують інтуїтивно у повсякденній діяльності. Його головна задача – усунути суб'єктивний фактор та застосовувати єдине, жорстко визначене правило до кожного випадку. Цей метод не претендує на глибокий аналіз чи прогнозування, а слугує для швидкого бінарного сортування "так або ні". Незважаючи на свою простоту, він є необхідним першим кроком до автоматизації та відправною точкою для порівняння з більш досконалими моделями, які будуть розроблені в наступних розділах.

У рамках цього дослідження буде розроблено та проаналізовано два варіанти цього методу: класичну порогову модель [15], засновану виключно на поточній вартості, та розширену порогову модель, що використовує розроблені мною аналітичні індекси Q та N . Класична порогова модель на основі вартості – це найпоширеніше та найпростіше правило, що застосовується у сфері послуг та ремонту, базується виключно на одному економічному показнику: співвідношенні вартості поточного ремонту та ринкової ціни нового обладнання.

Логіка моделі формалізується через перевірку умови економічної недоцільності відновлення. Рекомендація замінити техніку на нову формується у випадку виконання такої нерівності:

$$C > K * C_m \quad (3.1)$$

де C – вартість поточного ремонту;

C_m – ринкова ціна техніки;

K – пороговий коефіцієнт доцільності, який зазвичай дорівнює 0.5.

В іншому випадку, якщо умова не виконується система рекомендує ремонт.

Обґрунтування порогу K лежить суто в економічній площині. Вважається, що якщо вартість відновлення працездатності перевищує половину вартості нового пристрою, такий ремонт є економічно невиправданим ризиком. Клієнт вкладає значні кошти в старий пристрій, не отримуючи жодних гарантій щодо його подальшої надійності та ігноруючи фактор морального зносу.

Ця модель є суто реактивною – вона реагує лише на поточну проблему, повністю ігноруючи всю попередню історію експлуатації обладнання. Недоліком класичної моделі є те, що вона ігнорує надійність техніки. Вона б рекомендувала ремонтувати пристрій, який ламається щомісяця, доки кожна окрема поломка є дешевою. Цю проблему частково вирішує застосування розроблених індексів економічної доцільності та надійності. Використання цих індексів у рамках методу жорстких порогів являє собою більш просунутий, проактивний підхід, оскільки рішення приймається на основі всієї накопиченої історії пристрою.

Логіка моделі полягає у встановленні критичних порогових значень для кожного індексу. Обидва індекси нормовані до шкали від 0 до 10. Спираючись на математичне обґрунтування індексів, ми можемо визначити такі пороги: порогове значення для Q – встановлюємо на рівні 4.0. Як було показано, значення $Q=3.67$ відповідає ситуації, коли сумарні витрати на ремонти вже зрівнялися з ринковою ціною. Таким чином, поріг у 4.0 є обґрунтованою точкою для прийняття рішення.

Порогове значення для N – встановлюємо на рівні 5.0. Значення $N=$

3.67 відповідає ситуації, коли техніка ламається як очікувалося. Поріг, встановлений трохи вище – у 5.0, означає, що ми рекомендуємо заміну для будь-якої техніки, надійність якої є гіршою за середньо-очікувану або навіть просто середньою. Тоді розширена порогова модель формалізується наступним чином: якщо індекс $Q < 4.0$ або індекс $N < 5.0$, то рекомендація заміни, інакше – рекомендація ремонту.

Використання логічного оператора «або» є ключовим. Це робить модель чутливою до будь-якого критичного фактора: ми рекомендуємо заміну, якщо техніка стала економічно не вигідною, навіть якщо вона надійна, або якщо вона стала вкрай ненадійною, навіть якщо ремонти були дешевими.

Метод жорстких порогів, незважаючи на свою простоту, має чітко визначені переваги та недоліки, які роблять його ідеальною точкою для початку аналізу. До переваг методу можна віднести:

- прозорість та інтерпретованість – логіка «якщо, то» є абсолютно зрозумілою як для розробника, так і для кінцевого користувача;
- простота реалізації, метод вимагає мінімальних обчислювальних ресурсів та легко реалізується в будь-якій інформаційній системі;
- об'єктивність, яка усуває людський фактор та гарантує однакове застосування правил до всіх клієнтів та випадків;

До недоліків методу можна віднести:

- негнучкість, оскільки метод є абсолютно бінарним і не розрізняє ситуації «трохи гірше» та «набагато гірше»;
- проблема межових значень – модель створює штучну прірву, наприклад, у розширеній моделі, пристрій з індексами $Q = 4.1$ та $N = 5.1$ надає результат ремонт, а пристрій $Q = 3.9$ та $N = 4.9$ – результат заміна: ці приклади сприймаються системою як абсолютно різні, хоча в реальності вони є практично однаковими;
- ризик субоптимальних рішень, бо через негнучкість метод часто даватиме контрінтуїтивні або економічно не вигідні рекомендації у

складних, межових значення, де потрібен компроміс.

Саме ці фундаментальні недоліки, насамперед проблема межових значень, обумовлюють необхідність дослідження та розробки більш гнучких методів, які будуть розглянуті в наступних розділах.

3.2 Розробка та аналіз методу на основі нечіткої моделі

3.2.1 Розробка моделі на основ алгоритму Мамдані

У попередньому розділі було розроблено та проаналізовано метод підтримки прийняття рішень на основі жорстких порогів. Його головним та фундаментальним недоліком є проблема межових значень. Модель, що базується на правилі «якщо N менше 5.0 то заміна», поводитиметься абсолютно по-різному для двох практично однакових випадків: $N = 5.1$ – ремонт та $N = 4.9$ – заміна. Така бінарна, негнучка логіка не відображає реального процесу прийняття рішень, де експерт завжди оперує "сірими зонами". Менеджер сервісного центру оперує нечіткими поняттями: «цей ремонт досить дорогий» або «надійність цієї моделі здається низькою». Саме для формалізації та автоматизації такого типу знань ідеально підходить апарат нечіткої логіки.

Нечітка логіка дозволяє системі оперувати поняттями, що не мають чітких меж, та приймати плавні, зважені рішення. Метою даного розділу є розробка моделі нечіткого висновку, яка:

- усуває недоліки методу жорстких порогів;
- використовує розроблені індекси Q та N як вхідні параметри;
- надає на виході не бінарну відповідь, а гранульовану кількісну оцінку, що дозволяє приймати набагато більш обґрунтовані рішення.

Для реалізації моделі було обрано класичний та найпоширеніший алгоритм Мамдані [16], який є інтуїтивно зрозумілим та легко інтерпретованим.

Процес побудови моделі складається з чотирьох основних етапів:

- фазифікація, або визначення вхідних/вихідних змінних та їх функцій належності;
- формування бази правил;
- агрегація, тобто активація правил;
- дефазифікація, отримання чіткого вихідного значення.

На основі аналізу предметної області та логіки, закладеної у попередніх моделях, було визначено три головні вхідні змінні, які є достатніми для прийняття комплексного рішення, та одну вихідну змінну.

Вхідними змінними у моделі є:

- індекс економічної доцільності Q – кількісний показник, який характеризує загальні економічні витрати на володіння технікою;
- індекс надійності N – кількісний показник, який характеризує технічну надійність та частоту відмов;
- вартість поточного ремонту C – кількісний показник, який не враховується в індексах Q та N напряму, але є вирішальним для поточного рішення.

Вихідна змінна – рішення, тобто комплексна оцінка «рівень доцільності заміни» у діапазоні 0-100, де 0 – абсолютно доцільний ремонт, а 100 – абсолютно доцільна заміна.

Фазифікація – це процес перетворення чітких вхідних значень у ступінь належності до нечітких лінгвістичних термів. Для цього кожна вхідна та вихідна змінна описується набором функцій належності. На відміну від лінійно-сегментних функцій, у даній моделі було прийнято рішення використати Гаусові функції належності [17]. Цей вибір базується на припущенні, що лінгвістичні терміни «середній» або «високий» не мають гострих кутів, натомість, вони мають природну розмитість з одним ідеальним центром та плавною зоною невизначеності. Це дозволяє створити більш плавну поверхню рішень.

Гаусова функція визначається двома параметрами: центром – середне

значення та стандартним відхиленням – сігма, яке визначає ширину або ступінь розмиття терму. Параметри центру та сігми були підібрані таким чином, щоб імітувати логіку оригінальних жорстких порогів, але у згладженій формі.

Функції належності для Індексу Q :

- низька (Low), де `gaussmf` центр = 0, сігма = 2.5;
- середня (Medium), де `gaussmf` центр = 5, сігма = 1.5;
- висока (High), де `gaussmf` центр = 10, сігма = 2.5.

Центри Low та High розташовані на краях, а Medium – рівно посередині 5. Ширина сігма = 1.5 для Medium робить цей терм досить вузьким, що відповідає логіці сірої зони. Гаусові функції належності для індексу Q зображені на рисунку 4.1:

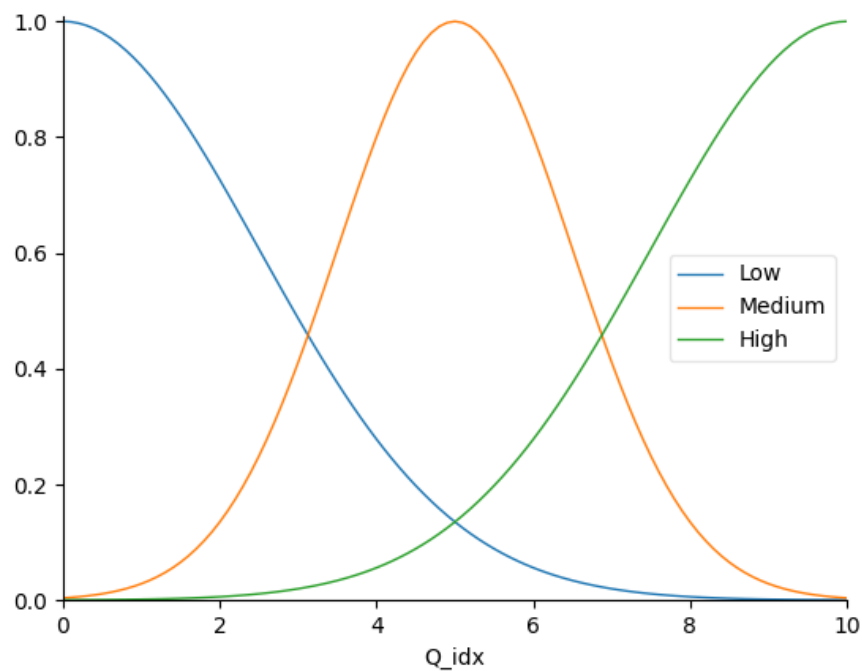


Рисунок 3.1 – Гаусові функції належності для індексу Q

Функції належності для Індексу N :

- низька (Low), де `gaussmf` центр = 0, сігма = 3.0;
- середня (Medium), де `gaussmf` центр = 5.5, сігма = 1.5;
- висока (High), де `gaussmf` центр = 10, сігма = 2.0.

Особливу увагу приділено налаштуванню індексу надійності N . Для реалізації логіки у попередньому розділі, де поріг надійності $N = 5.0$ був важливішим за поріг $Q = 4.0$, центр функції Medium було зміщено до 5.5. Це робить модель більш чутливою до падіння надійності: значення $N = 5.0$ тепер має вищу ступінь належності до терму Low, ніж до Medium, що посилює вплив надійності на кінцеве рішення. Гаусові функції належності для індексу N зображені на рисунку 4.2:

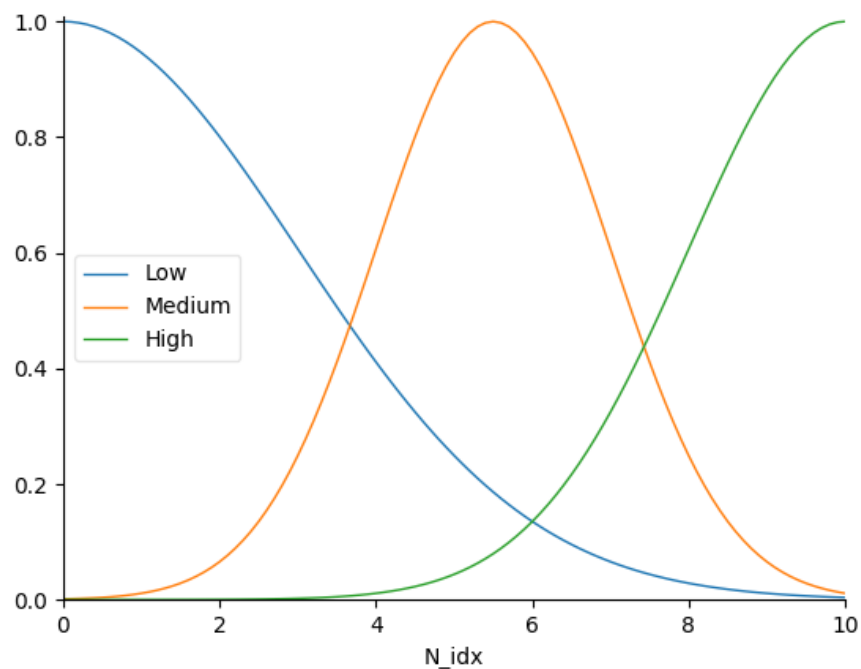


Рисунок 3.2 – Гаусові функції належності для індексу N

Функції належності для C :

- низька (Low), де `gaussmf` центр = 0, сігма = 20;
- середня (Medium), де `gaussmf` центр = 50, сігма = 12;
- висока (High), де `gaussmf` центр = 100, сігма = 20.

Центр Medium чітко відповідає класичному 50% порогу, а ширина сігма = 12 створює реалістичну сіру зону навколо нього. Гаусові функції належності для C зображені на рисунку 4.3:

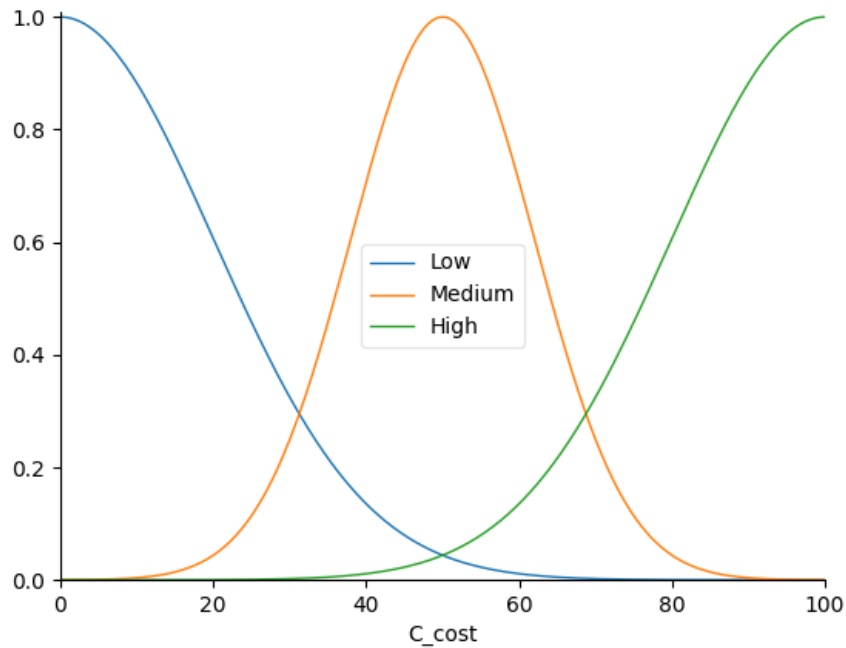


Рисунок 3.3 – Гаусові функції належності для індексу C

Розглянемо функції належності для вихідного рішення. Для надання більш деталізованих рекомендацій було розроблено 5 вихідних термів:

- краще провести ремонт (Strong_Repair), де `gaussmf` центр=0, `сігма` =10);
- ремонт доцільний (Weak_Repair), де `gaussmf` центр=30, `сігма` = 7);
- розглянути (Consider), де `gaussmf` центр=50, `сігма` = 5);
- заміна у наступну поломку (Weak_Replace), де `gaussmf` центр = 70, `сігма`=7);
- термінова заміна (Strong_Replace), де `gaussmf` центр = 100, `сігма` = 10).

Центри 0, 30, 50, 70, 100 чітко розділяють 5 рівнів рекомендацій. Ширина `сігма` = 5 для Consider обрана вужчою, щоб зробити сіру зону більш чіткою та визначеною. Гаусові функції належності для вихідного рішення зображені на рисунку 4.4:

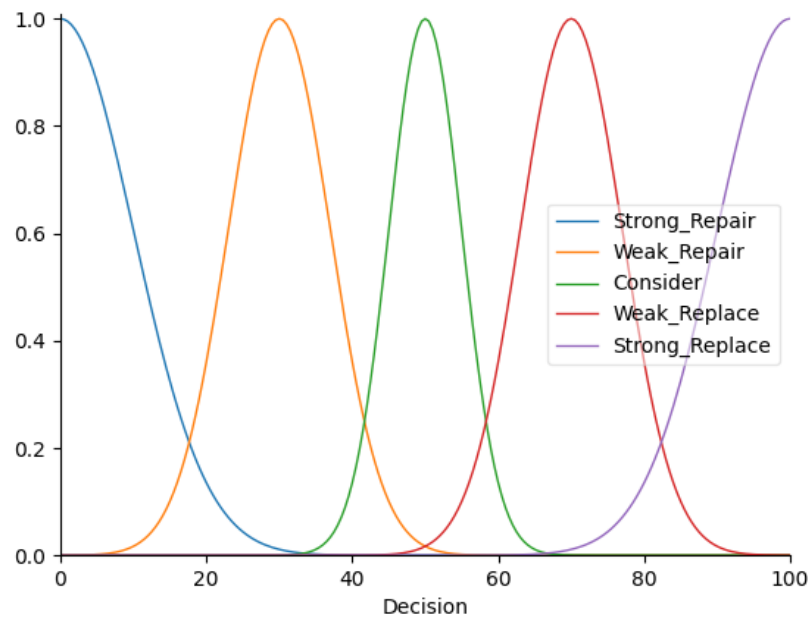


Рисунок 3.4 – Гаусові функції належності для вихідного рішення

Формування бази правил – це основа системи, що формалізує експертні знання у вигляді набору правил «якщо, то». На відміну від жорстких порогів, тут комбінувати фактори та призначати небінарні виходи. База правил розроблена для охоплення основних сценаріїв, з якими стикається майстер:

а) якщо Q – High, N – High та C – Low, то рішенням буде Strong_repair і це ідеальний випадок. Техніка надійна, економічно виправдана, поточний ремонт дешевий, тобто однозначно ремонтувати;

б) якщо Q – Low, N – Low, тоді рішенням є Strong_replace, тобто якщо сума ремонтів перевищила вартість або є вкрай ненадійною, то будь-який подальший ремонт, незалежно від його поточної вартості, є недоцільним;

в) якщо C – High, то рішенням є Strong_replace, і це є правилом дорогого ремонту, тобто якщо поточний ремонт коштує надто дорого – він недоцільний, навіть якщо техніка до цього була ідеальною;

г) якщо Q – Medium, N – Medium і C – Medium, то рішенням є Consider, тобто «50 на 50». Всі три параметри знаходяться у сірій зоні. Модель видає невизначений результат, центрований навколо 50.

д) якщо Q – High, N – Low, C – Low, тоді маємо *Weak_replace*, що є основним правилом, що демонструє силу нечіткої логіки. C – Low означає, що поточний ремонт дешевий, Q – High – загальна економіка ще в нормі, а N – Low, тобто надійність вже критично низька. Метод жорстких порогів тут би порекомендував ремонт, а нечітка модель дає складнішу рекомендацію *Weak_replace*, що близько 70 балів, тобто на практиці заміна у наступну поломку. Цей дешевий ремонт ще можна зробити, але загалом пристрій вже ненадійний і варто готуватися до заміни.

е) якщо Q це High та N це High та C це Medium, то це *Weak_repair* – надійна техніка, але недешевий ремонт. Техніка хороша, але поточний ремонт, наприклад 50% ціни змушує задуматись. Модель дає рекомендацію *Weak_repair*

є) якщо Q це Medium та N це Medium та C це Low, то це *Weak_repair*, середня техніка, ремонт дешевий, що є вирішальним фактором, попри середні показники Q та N .

Після розробки правил переходимо до етапу дефазифікації. Коли вхідні дані проходять через базу правил, на виході ми отримуємо нечітку множину. Етап дефазифікації перетворює цю нечітку множину на єдине чітке число. Для цього використовується найпоширеніший метод центру тяжіння [18]. Цей метод знаходить центр мас отриманої фігури на вихідній шкалі. Він є стійким і дає плавний, нелінійний результат, що добре агрегує всі фактори.

Для аналізу поведінки розробленої системи було побудовано поверхню рішень. Оскільки ми маємо 3 входи та 1 вихід, візуалізація можлива лише у тривимірному просторі, для чого один із вхідних параметрів має бути зафіксований. Побудована поверхня рішень зображена на рисунку 4.5:

Поверхня Рішень при $C_{\text{cost}} = 50\%$ (Гаусова модель)

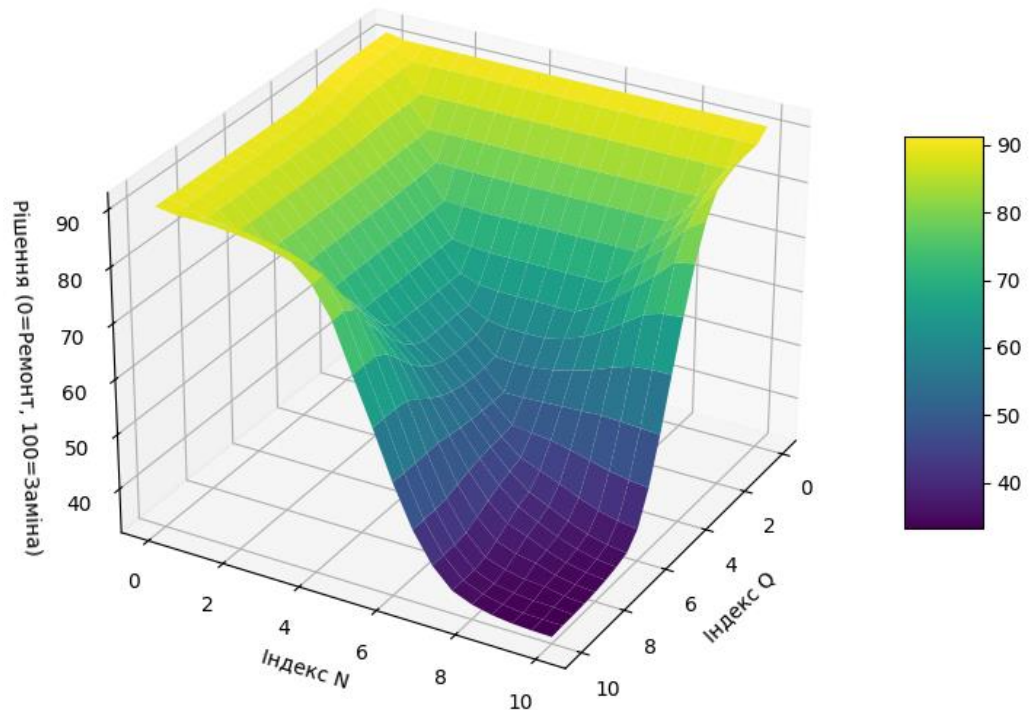


Рисунок 3.5 – Поверхня рішень при $C = 50\%$

При аналізі цього графіку можна помітити повну відсутність різких меж характерних для методу жорстких порогів. Поверхня є плавною, що підтверджує гнучкість моделі. Використання Гаусових функцій робить цю плавність ще більш вираженою порівняно з лінійно-сегментними функціями.

Правий верхній кут, де значення Q та N дорівнюють 10 навіть при ремонті у 50%, якщо техніка була ідеальною, модель дає оцінку приблизно 35, тобто `Weak_Repair`, що є логічним рішенням.

У нижньому лівому куті, наприклад де Q або $N < 4$ поверхня різко, але плавно піднімається до високих значень `Strong_Replace`, що демонструє активацію правила б.

Центр, де значення $Q = 5$ та $N = 5.5$, як і очікувалось, при $C = 50\%$ модель видає значення рівно 50, тобто `Consider`, що підтверджує коректну роботу.

Проведемо тестування, для інтерпретації числових результатів використаємо функцію-інтерпретатор. Для прикладу, при $Q = 9$, $N = 8$, $C = 15\%$ – рівень доцільності заміни буде дорівнювати 18.29. Це Rong_Repair – ідеальний випадок для ремонту. Гаусова модель коректно зважила всі правила і дала низьку оцінку, що підтверджує доцільність ремонту.

У прикладі $Q = 7$, $N = 2$, $C = 20\%$ – рівень доцільності заміни 75.42. Це випадок правила д. Хоча $Q = 7$ не Low і $C = 20\%$ Low, але $N = 2$ Low активувало правило, що призвело до високої оцінки Strong_Replace Модель коректно ідентифікувала ненадійну техніку.

У прикладі $Q = 5$, $N = 5$, $C = 50\%$, рівень доцільності заміни 58.32. Спрацювало правило з Consider. Важливо, що результат не дорівнює рівно 50. Це очікувано, оскільки вхідні дані Q та $N = 5$ не є симетричними для нашої фінальної моделі, бо ідеальна середина для $Q = 5.0$, але для $N = 5.5$. Модель коректно зважила цю різницю і видала результат трохи вище 50.

Розроблений метод на основі нечіткої логіки вирішує проблеми методу жорстких порогів. Він надає гнучку та інтерпретовану оцінку, яка враховує нелінійні залежності та невизначеність вхідних даних. Використання Гаусових функцій робить переходи між станами максимально плавними, що є більш природним для моделювання експертних суджень.

3.2.2 Програмна реалізація методу нечіткого висновку

Для верифікації розробленої теоретичної моделі та проведення експериментальних досліджень було виконано програмну реалізацію методу нечіткого висновку. У якості середовища розробки обрано мову програмування Python [19], яка є стандартом у сфері аналізу даних та наукових обчислень завдяки широкому спектру спеціалізованих бібліотек.

Для роботи з нечіткою логікою використано бібліотеку skfuzzy, яка надає повний набір інструментів для побудови нечітких систем керування,

включаючи генерацію функцій належності, створення правил та механізми дефазифікації. Також використано бібліотеки NumPy для роботи з масивами даних та Matplotlib для візуалізації результатів: побудови графіків функцій належності та 3D-поверхонь рішень.

На першому етапі було визначено вхідні та вихідні лінгвістичні змінні. Для забезпечення високої точності та плавності побудови Гаусових кривих крок дискретизації універсуму було зменшено до 0.1. Визначення вхідних та вихідних даних зображено на рисунку 4.6:

```
Q_idx = ctrl.Antecedent(np.arange(0, 10.1, 0.1), label: 'Q_idx')
N_idx = ctrl.Antecedent(np.arange(0, 10.1, 0.1), label: 'N_idx')
C_cost = ctrl.Antecedent(np.arange(0, 100.5, 0.5), label: 'C_cost')
Decision = ctrl.Consequent(np.arange(0, 100.5, 0.5), label: 'Decision')
```

Рисунок 3.6 – Вхідні та вихідні дані

Програмування функцій належності – відповідно до обраної методики, для всіх термів було застосовано Гаусові функції належності `gaussmf`. Це дозволило реалізувати плавні переходи між станами. Особливістю реалізації стало зміщення центру терму середня надійність до значення 5.5, що робить систему більш суворою до падіння надійності техніки. На рисунку 4.7 зображено визначення Гаусових функцій для індексу надійності та вихідних термів для деталізації рекомендацій:

```

Q_idx['Low'] = fuzz.gaussmf(Q_idx.universe, mean: 0, sigma: 2.5)
Q_idx['Medium'] = fuzz.gaussmf(Q_idx.universe, mean: 5, sigma: 1.5)
Q_idx['High'] = fuzz.gaussmf(Q_idx.universe, mean: 10, sigma: 2.5)

N_idx['Low'] = fuzz.gaussmf(N_idx.universe, mean: 0, sigma: 3.0)
N_idx['Medium'] = fuzz.gaussmf(N_idx.universe, mean: 5.5, sigma: 1.5)
N_idx['High'] = fuzz.gaussmf(N_idx.universe, mean: 10, sigma: 2.0)

C_cost['Low'] = fuzz.gaussmf(C_cost.universe, mean: 0, sigma: 20)
C_cost['Medium'] = fuzz.gaussmf(C_cost.universe, mean: 50, sigma: 12)
C_cost['High'] = fuzz.gaussmf(C_cost.universe, mean: 100, sigma: 20)

Decision['Strong_Repair'] = fuzz.gaussmf(Decision.universe, mean: 0, sigma: 10)
Decision['Weak_Repair'] = fuzz.gaussmf(Decision.universe, mean: 30, sigma: 7)
Decision['Consider'] = fuzz.gaussmf(Decision.universe, mean: 50, sigma: 5)
Decision['Weak_Replace'] = fuzz.gaussmf(Decision.universe, mean: 70, sigma: 7)
Decision['Strong_Replace'] = fuzz.gaussmf(Decision.universe, mean: 100, sigma: 10)

```

Рисунок 3.7 – Визначення Гаусових функцій для індексів та вихідних термів для деталізації рекомендацій

Логічні правила були запрограмовані з використанням операторів AND – мінімум та OR – максимум. База правил покриває основні сценарії прийняття рішень, від ідеального ремонту до категоричної заміни. Реалізація бази правил зображена на рисунку 4.8:

```

rule1 = ctrl.Rule(Q_idx['High'] & N_idx['High'] & C_cost['Low'], Decision['Strong_Repair'])
rule2 = ctrl.Rule(Q_idx['Low'] | N_idx['Low'], Decision['Strong_Replace'])
rule3 = ctrl.Rule(C_cost['High'], Decision['Strong_Replace'])
rule4 = ctrl.Rule(Q_idx['Medium'] & N_idx['Medium'] & C_cost['Medium'], Decision['Consider'])
rule5 = ctrl.Rule(Q_idx['High'] & N_idx['Low'] & C_cost['Low'], Decision['Weak_Replace'])
rule6 = ctrl.Rule(Q_idx['High'] & N_idx['High'] & C_cost['Medium'], Decision['Weak_Repair'])
rule7 = ctrl.Rule(Q_idx['Medium'] & N_idx['Medium'] & C_cost['Low'], Decision['Weak_Repair'])

```

Рисунок 3.8 – Реалізація бази правил

Для отримання чіткого значення використовується метод `compute()`, який виконує агрегацію та дефазифікацію методом центру тяжіння. Отримане числове значення 0–100 проходить через інтерпретатор для виведення зрозумілої текстової рекомендації користувачу. Реалізація

інтерпретатора зображена на рисунку 4.9:

```

decision_ctrl = ctrl.ControlSystem([rule1, rule2, rule3, rule4, rule5, rule6, rule7])
Decision_Simulation = ctrl.ControlSystemSimulation(decision_ctrl)

def interpret_decision(score): 4 usages

    if score < 20:
        return f"({score:.2f})"
    elif score < 35:
        return f"({score:.2f})"
    elif score < 45:
        return f"({score:.2f})"
    elif score < 60:
        return f"({score:.2f})"
    elif score < 85:
        return f"({score:.2f})"
    else:
        return f"({score:.2f})"

Decision_Simulation.input['Q_idx'] = 9.0
Decision_Simulation.input['N_idx'] = 8.0
Decision_Simulation.input['C_cost'] = 15.0
Decision_Simulation.compute()
result1 = Decision_Simulation.output['Decision']
print(f"Приклад: {interpret_decision(result1)}")

```

Рисунок 3.9 – Реалізація інтерпретатора

Реалізований програмний модуль продемонстрував стабільну роботу та коректну обробку вхідних даних, формуючи нелінійну поверхню рішень, що підтверджує переваги використання нечіткої логіки для задач даного класу.

3.3 Розробка та аналіз моделі на основі методу аналізу ієрархій та метод розрахунку відстані до ідеального рішення

3.3.1. Обґрунтування вибору методів багатокритеріального аналізу

Попередні розділи розглядали моделі прийняття рішень, що базуються на жорстких правилах та нечіткій логіці. Хоча нечітка логіка ефективно вирішує проблему невизначеності вхідних даних, вона все ще значною мірою покладається на евристичні правила, сформульовані розробником. У складних ситуаціях, коли критерії прийняття рішень вступають у прямиий конфлікт, наприклад, висока технічна надійність проти високої вартості ремонту, виникає необхідність у застосуванні математично суворих методів, здатних ранжувати альтернативи на основі точної кількісної оцінки. Для вирішення цієї задачі в роботі пропонується гібридний підхід, що поєднує два класичні методи багатокритеріального аналізу рішень – Multi-Criteria Decision Making (MCDM) [20]: метод аналізу ієрархій – Analytic Hierarchy Process (AHP) [21] та метод розрахунку відстані до ідеального рішення – Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) [22].

Вибір саме цієї комбінації зумовлений їхніми комплементарними властивостями. Метод АНР є оптимальним інструментом для першого етапу аналізу – визначення вагових коефіцієнтів критеріїв. Він дозволяє декомпонувати складну проблему на ієрархію та, шляхом попарних порівнянь, математично формалізувати експертну думку щодо того, який фактор є важливішим для бізнесу.

Метод TOPSIS використовується на другому етапі для безпосереднього ранжування альтернатив ремонт або заміна. Його математичний апарат базується на геометричному принципі: найкращою альтернативою вважається та, що має найменшу евклідову відстань до

гіпотетичного ідеального позитивного рішення і найбільшу відстань до ідеального негативного рішення.

Потенційним розширенням даної моделі могло б стати включення четвертого критерію – час виконання ремонту. У реальних умовах тривалість очікування запчастин може стати вирішальним фактором на користь заміни техніки, навіть якщо ремонт є економічно вигідним. Проте в рамках даного дослідження цей показник свідомо виключено з базової моделі. Це пов'язано з високою складністю прогнозування точних термінів постачання компонентів до моменту початку ремонту та відсутністю стандартизованих нормативів у більшості сервісних центрів, що могло б внести значну похибку в розрахунки. Тому модель зосереджується на трьох фундаментальних, вимірюваних показниках: економічній доцільності Q , технічній надійності N та вартості поточного ремонту C .

3.3.2. Визначення вагових коефіцієнтів критеріїв методом АНР

Першим етапом роботи гібридної моделі є встановлення пріоритетів між вхідними параметрами. На відміну від нечіткої логіки, де пріоритети зашиті в правила, АНР дозволяє динамічно змінювати важливість критеріїв залежно від стратегії сервісного центру, наприклад, стратегія максимальної економії для клієнта або стратегія максимальної технічної надійності.

Процедура починається з побудови матриці A попарних порівнянь розміром 3 на 3:

$$A = \begin{matrix} & 1 & 2 & 1 \\ 0.5 & 1 & 0.5 & \\ & 1 & 2 & 1 \end{matrix}$$

Елементи цієї матриці a_{ij} відображають судження експерта щодо переваги i -го критерію над j -м за шкалою Сааті [23] від 1 до 9. Для демонстрації роботи методу в рамках даного дослідження було

змодельовано типову експертну оцінку, яка базується на принципі довгострокової вигоди. Експерти визначили, що індекс економічної доцільності Q є помірно важливішим за індекс надійності N , оскільки сумарні витрати на володіння є більш критичним показником для домогосподарства. Водночас, вартість поточного ремонту C розглядається як рівнозначна або трохи менш важлива за стратегічний індекс Q , але важливіша за поточний показник надійності N , оскільки вимагає негайних фінансових вкладень.

На основі сформованої матриці здійснюється розрахунок власного вектора, який після нормалізації дає шукані вагові коефіцієнти w_j для кожного критерію. Сума всіх вагових коефіцієнтів завжди дорівнює одиниці. Критично важливим етапом методу АНР є перевірка узгодженості експертних суджень. Для цього розраховується індекс узгодженості CI та відношення узгодженості CR . Якщо значення CR не перевищує 0.1, тобто 10%, матриця вважається узгодженою, а отримані ваги – коректними для подальшого використання в алгоритмі TOPSIS. В іншому випадку експерту пропонується переглянути свої судження.

Варто зазначити, що розподіл пріоритетів у запропонованій матриці АНР відображає стратегію власника. На відміну від нечіткої моделі, яка базувалася на інженерному підході та вважала надійність N критичним фактором, дана модель надає перевагу економічній доцільності Q та вартості ремонту. Це моделює ситуацію, коли бюджет домогосподарства є обмеженим, і фінансова вигода від ремонту тут і зараз може переважити ризики повторної поломки в майбутньому.

3.3.3 Ранжування альтернатив методом TOPSIS

Після отримання вектору ваг відбувається перехід до другого етапу – оцінки альтернатив. У контексті задачі сервісного центру існують дві чіткі альтернативи: проведення ремонту та заміна. Алгоритм TOPSIS оперує

матрицею рішень, де рядки відповідають альтернативам, а стовпці – критеріям. Значеннями матриці виступають конкретні показники Q , N та C для даного випадку ремонту. Важливою особливістю є необхідність нормалізації та врахування напрямку оптимізації критеріїв. Індeksi Q та N є критеріями максимізації, тобто чим більше значення, тим краще для володіння технікою, тобто для альтернативи ремонт, тоді як вартість поточного ремонту C є критерієм мінімізації, тобто чим менша вартість, тим краще для ремонту.

Для альтернативи заміни логіка інвертується або ж задаються референтні значення нової техніки максимальні Q та N , повна вартість. Головною ідеєю методу є визначення двох гіпотетичних точок у багатовимірному просторі критеріїв. Ідеальне позитивне рішення – positive ideal solution (PIS) формується з найкращих значень по кожному стовпцю зваженої нормалізованої матриці, а ідеальне негативне рішення – negative ideal solution (NIS) з найгірших. Для кожної реальної альтернативи розраховується евклідова відстань до цих двох точок.

Фінальним результатом роботи алгоритму є розрахунок коефіцієнта відносної близькості C для кожної альтернативи. Цей коефіцієнт приймає значення від 0 до 1. Альтернатива з найвищим значенням C вважається найкращою, оскільки вона одночасно знаходиться найближче до ідеального стану та найдалі від найгіршого сценарію. У нашій системі, якщо $C(\text{Ремонт})$ більше за $C(\text{Заміна})$, система видає рекомендацію ремонтувати, в супроводі числового значення впевненості.

3.3.4. Програмна реалізація та аналіз результатів методу ANPTOPSIS

Для практичного застосування розробленої математичної моделі було створено програмний модуль мовою Python. Вибір інструментарію обумовлений необхідністю виконання складних матричних операцій, для чого оптимально підходить бібліотека NumPy. Вона забезпечує високу

продуктивність обчислень та надає вбудовані методи для лінійної алгебри, що є критично важливим для реалізації методів АНР та TOPSIS.

Процес програмної реалізації було декомпововано на чотири послідовні етапи: визначення експертних переваг, розрахунок вагових коефіцієнтів, формування простору рішень та фінальне ранжування альтернатив.

На першому етапі програмно задається матриця попарних порівнянь. Ця структура даних є цифровим відображенням експертних суджень щодо важливості критеріїв. У лістингу нижче наведено реалізацію матриці, де індекс Q та C визначені як помірно важливіші за надійності N . Наступний блок коду реалізує алгоритм знаходження власного вектора матриці. Для цього виконується нормалізація стовпців матриці з подальшим обчисленням середнього арифметичного для кожного рядка. Отриманий масив `weights` містить нормалізовані ваги, сума яких дорівнює одиниці.

Реалізація матриці АНР та розрахунка вагових коефіцієнтів критеріїв зображена на рисунку 3.10:

```
import numpy as np

def ahp_topsis_model(Q_val, N_val, Cost_val):

    ahp_matrix = np.array([
        [1.0, 2.0, 1.0], # Q
        [0.5, 1.0, 0.5], # N
        [1.0, 2.0, 1.0] # C
    ])

    col_sum = ahp_matrix.sum(axis=0)
    normalized_matrix = ahp_matrix / col_sum
    weights = normalized_matrix.mean(axis=1)
```

Рисунок 3.10 – Реалізація матриці АНР та розрахунка вагових коефіцієнтів критеріїв

Для методу TOPSIS програмно формується матриця рішень, що містить дві альтернативи:

- ремонт, який характеризується поточними розрахованими показниками Q , N та C ;

- заміна моделюється як ідеальна нова техніка з максимальними показниками якості, де Q та N дорівнюють 10 та повною вартістю C дорівнює 100. Оскільки критерії мають різні одиниці виміру, застосовується векторна нормалізація для приведення їх до безрозмірного вигляду. Фінальний етап реалізації включає визначення координат ідеального позитивного PIS та ідеального негативного NIS рішень. Алгоритм враховує напрямки оптимізації: для Q та N кращим є максимум, для C – мінімум. Після цього обчислюються евклідові відстані та коефіцієнт відносної близькості.

Реалізація матриці TOPSIS визначення координат ідеального позитивного PIS та ідеального негативного NIS рішень зображена на рисунку 3.11:

```

decision_matrix = np.array([
    [Q_val, N_val, Cost_val],
    [10.0, 10.0, 100.0]
])

norm_decision = decision_matrix / np.sqrt((decision_matrix ** 2).sum(axis=0))
weighted_matrix = norm_decision * weights

pis = np.array([np.max(weighted_matrix[:, 0]), np.max(weighted_matrix[:, 1]), np.min(weighted_matrix[:, 2])])
nis = np.array([np.min(weighted_matrix[:, 0]), np.min(weighted_matrix[:, 1]), np.max(weighted_matrix[:, 2])])

dist_pis = np.sqrt(((weighted_matrix - pis) ** 2).sum(axis=1))
dist_nis = np.sqrt(((weighted_matrix - nis) ** 2).sum(axis=1))

closeness = dist_nis / (dist_pis + dist_nis)

return closeness

```

Рисунок 3.11 – Реалізація матриці TOPSIS визначення координат ідеального позитивного PIS та ідеального негативного NIS рішень

Результати експерименту на тестових даних, де $Q = 6.4$, $N = 5.2$, $C = 38\%$ показали, що модель присвоїла альтернативі ремонт коефіцієнт 0.6241,

а альтернативі заміна – 0.3759. Це інтерпретується як рекомендація до проведення ремонту. Математична природа методу TOPSIS дозволяє чітко аргументувати це рішення: незважаючи на те, що показники надійності техніки знизилися, тобто відбулось віддалення від ідеального позитивного рішення за критерієм N , низька вартість ремонту порівняно з ціною нової техніки переважила на користь відновлення.

Такий підхід забезпечує високу стабільність результатів і, на відміну від порогових методів, дозволяє врахувати відстань поточного стану техніки від ідеального стану нової, надаючи менеджеру єдину інтегральну оцінку для прийняття рішення.

4 ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ РОЗРОБЛЕНИХ МОДЕЛЕЙ

4.1 Формування контрольної вибірки даних та розрахунків вхідних параметрів

Для верифікації розроблених моделей та проведення об'єктивного порівняльного аналізу було сформовано контрольну вибірку реальних кейсів ремонту побутової техніки. Дані для дослідження були систематизовані на основі статистичної інформації, зібраної в рамках аналізу ринкових пропозицій [12] та прайс-листів сервісних центрів [24].

Вибірка включає різнотипну техніку з різними термінами експлуатації, історією поломок та вартістю відновлення, що дозволяє протестувати поведінку моделей у широкому спектрі сценаріїв від очевидних рішень до складних межових ситуацій.

Для кожного екземпляра техніки було проведено попередній розрахунок індексу економічної доцільності Q та індексу надійності N . При розрахунку індексу надійності використовувалися галузеві нормативи терміну служби T_{norm} та очікуваної кількості ремонтів n_{norm} , обґрунтовані специфікою кожної категорії. Зокрема, для пральної машини LG F2J3 у першому кейсі, яка перебуває в експлуатації 3 роки і має першу поломку, індекс надійності N розраховано як 5.6, що свідчить про задовільний стан, тоді як для холодильника Samsung RB37 у другому кейсі віком 8 років із історією в 3 ремонти цей показник становить критичні 2.1 бала.

Індекс економічної доцільності Q для більшості позицій залишається високим, оскільки сумарні витрати на попередні ремонти не перевищували критичних значень відносно поточної ринкової вартості нової техніки.

Первинні дані для аналізу представлені в Таблиці 6.1.

Таблиця 4.1 – Дані для тестування

ID	Модель	Вік	Ціна C_m	Попередні витрати R_t	К-сть поломок n	Поточний ремонт	% від ціни C	Індекс Q	Індекс N
1	Пральна машина LG F2J3	3	18000 грн.	0	1	4500 грн.	25.0%	10.0	5.6
2	Холодильник Samsung RB37	8	25000 грн.	3000	3	12000 грн.	48.0%	8.9	2.1
3	Посудомийна маш. Bosch SMV4	5	21000 грн.	4000	2	8500 грн.	40.5%	8.2	3.4
4	Пральна машина Indesit BWSA	6	11000 грн.	2500	3	6000 грн.	54.5%	7.9	1.8
5	Духова шафа Electrolux EOD	4	14000 грн.	0	1	2500 грн.	17.9%	10.0	7.2

4.2 Розробка вебзастосунку СППР

Для автоматизації процесу оцінювання, проведення експериментального моделювання та візуалізації результатів було розроблено веборієнтований програмний модуль СППР.

Програмний засіб реалізовано у вигляді вебзастосунку з використанням бібліотеки React.js [25]. Для стилізації компонентів інтерфейсу використано CSS-фреймворк Tailwind CSS [26], що забезпечує адаптивність та сучасний вигляд. Математичне ядро системи написано мовою JavaScript [27] і виконується на стороні клієнта в браузері, що забезпечує миттєвий відгук системи на зміну параметрів без необхідності перезавантаження сторінки.

Логіка програми розділена на три основні функціональні блоки, що відповідають розробленим у попередніх розділах теоретичним моделям:

- модуль розрахунку індексів, який відповідає за обчислення показників Q та N на основі вхідних даних про техніку, використовуючи експоненційні залежності та коефіцієнти чутливості;
- модуль нечіткого висновку, який реалізує алгоритм Мамдані і включає програмний опис Гаусових функцій належності, базу правил та механізм дефазифікації методом центру тяжіння;
- модуль багатокритеріального аналізу, який виконує матричні операції для зважування критеріїв методом АНР та розрахунку евклідових відстаней до ідеального рішення методом TOPSIS.

Головне вікно системи імітує робоче середовище CRM-системи сервісного центру і зображено на рисунку 4.1. Менеджер має можливість переглядати реєстр техніки, додавати нові пристрої та ініціювати процес аналізу.

Реєстр Техніки
Поточні замовлення з Таблиці 6.1

ID	МОДЕЛЬ	ВІК / РЕМОНТИ	ПОПЕРЕДНІ ВИТРАТИ (RT)	ЦІНА (СМ) / РЕМОНТ	ДІЯ
#1	LG F2J3 Пральна машина	⌚ 3 р. 🔧 1 раз.	0 ₴	18 000 ₴ Рем: 4 500 ₴	Аналіз →
#2	Samsung RB37 Холодильник	⌚ 8 р. 🔧 3 раз.	3000 ₴	25 000 ₴ Рем: 12 000 ₴	Аналіз →
#3	Bosch SMV4 Посудомийна маш.	⌚ 5 р. 🔧 2 раз.	4000 ₴	21 000 ₴ Рем: 8 500 ₴	Аналіз →
#4	Indesit BWSA Пральна машина	⌚ 6 р. 🔧 3 раз.	2500 ₴	11 000 ₴ Рем: 6 000 ₴	Аналіз →
#5	Electrolux EOD Духова шафа	⌚ 4 р. 🔧 1 раз.	0 ₴	14 000 ₴ Рем: 2 500 ₴	Аналіз →

+ Додати нову техніку

Модель: Ринкова ціна (₴): Ціна ремонту (₴):

Рисунок 4.1 – Основна вкладка СППР

Як видно з рисунку, система надає зведену інформацію про кожну одиницю техніки, включаючи вік, кількість попередніх ремонтів та вартість поточного відновлення. Кнопка «Аналіз» переводить користувача до детального звіту по обраному пристрою.

4.3 Результати моделювання прийняття рішень

Наступним етапом дослідження стало проведення експериментального моделювання, де кожен кейс із Таблиці 6.1 був оброблений трьома методами: методом жорстких порогів, методом нечіткого висновку та гібридним методом АНР TOPSIS. Метою цього етапу є не лише отримання рекомендації, а й порівняння впевненості кожної моделі у своєму рішенні.

Для методу жорстких порогів використовувалося класичне правило: якщо вартість ремонту перевищує 50% або якщо індекс надійності N менше ніж 5.0, рекомендується заміна. Нечітка модель використовувала розроблену базу правил

та Гаусові функції належності для генерації оцінки від 0 до 100. Метод АНР TOPSIS розраховував рейтинг альтернатив на основі стратегії економії бюджету, де економічним факторам надавалася помірною перевага над надійністю.

Аналіз отриманих даних демонструє суттєві відмінності у підходах систем до оцінки одних і тих самих ситуацій. Наприклад, для першого кейсу усі три моделі показали одностайність, рекомендуючи ремонт. Це пояснюється низькою вартістю відновлення – 25% та високими показниками Q та N . Однак у більш складних ситуаціях спостерігається дивергенція рішень. Результати моделювання зведено в порівняльну таблицю 4.2.

Таблиця 4.2 – Таблиця результатів

ID	Метод жорстких порогів	Нечітка модель	АНР TOPSIS
1	Ремонт ($C < 50\%$, $N > 5$)	Ремонт (18.4) «Дуже вигідно»	Ремонт 0.79 та 0.21
2	Заміна ($C = 48\% < 50\%$)	Термінова заміна (87.1) Критично низька N	Ремонт 0.54 та 0.46
3	Заміна (через $N = 3.4 < 5.0$)	Заміна (81.3) «Рекомендація заміни»	Ремонт 0.59 та 0.41
4	Заміна ($C > 50\%$)	Термінова заміна (93) Критично низька N	Заміна 0.47 та 0.53
5	Ремонт	Ремонт (12.5)	Ремонт 0.87 та 0.13

Найбільш показовим для аналізу ефективності моделей є другий кейс з холодильником Samsung. У даній ситуації вартість ремонту становить 48% від ціни нового пристрою, що є високим, але формально прийнятним показником для багатьох власників. Однак історія пристрою з трьома ремонтами за вісім років призвела до падіння індексу надійності $N = 2.1$.

Метод жорстких порогів, орієнтуючись на індекс N видав рекомендацію заміни. Це класичний приклад в управлінні активами: інвестування коштів у ненадійний об'єкт. Модель проігнорувала формальний критерій вартості,

оскільки індекс N був порушений.

Гібридна модель АНР TOPSIS схилилася до рекомендації ремонтувати зі значенням 0.54 проти 0.46. Це пояснюється закладеною в неї стратегією «економіста», де високий індекс економічної доцільності Q дорівнює 8.9 – витрати на володіння ще не критичні та прийнятна вартість ремонту переважили низьку надійність. Ця модель діяла раціонально з точки зору миттєвої економії бюджету, але стратегічно ризиковано.

Модель на основі нечіткої логіки видала категоричну рекомендацію термінової заміни 87.1 із 100. Це стало можливим завдяки спрацюванню правил бази знань, які ідентифікували низький рівень надійності $N = 2.1$ як стоп-фактор. Нечітка модель успішно зімітувала логіку досвідченого інженера, який розуміє, що після третього ремонту ризик повторної відмови зростає експоненціально, і тому інвестувати майже половину вартості нового холодильника в старий є недоцільним. На рисунку 4.2 зображено результат аналізу другого кейсу у вебзастосунку.

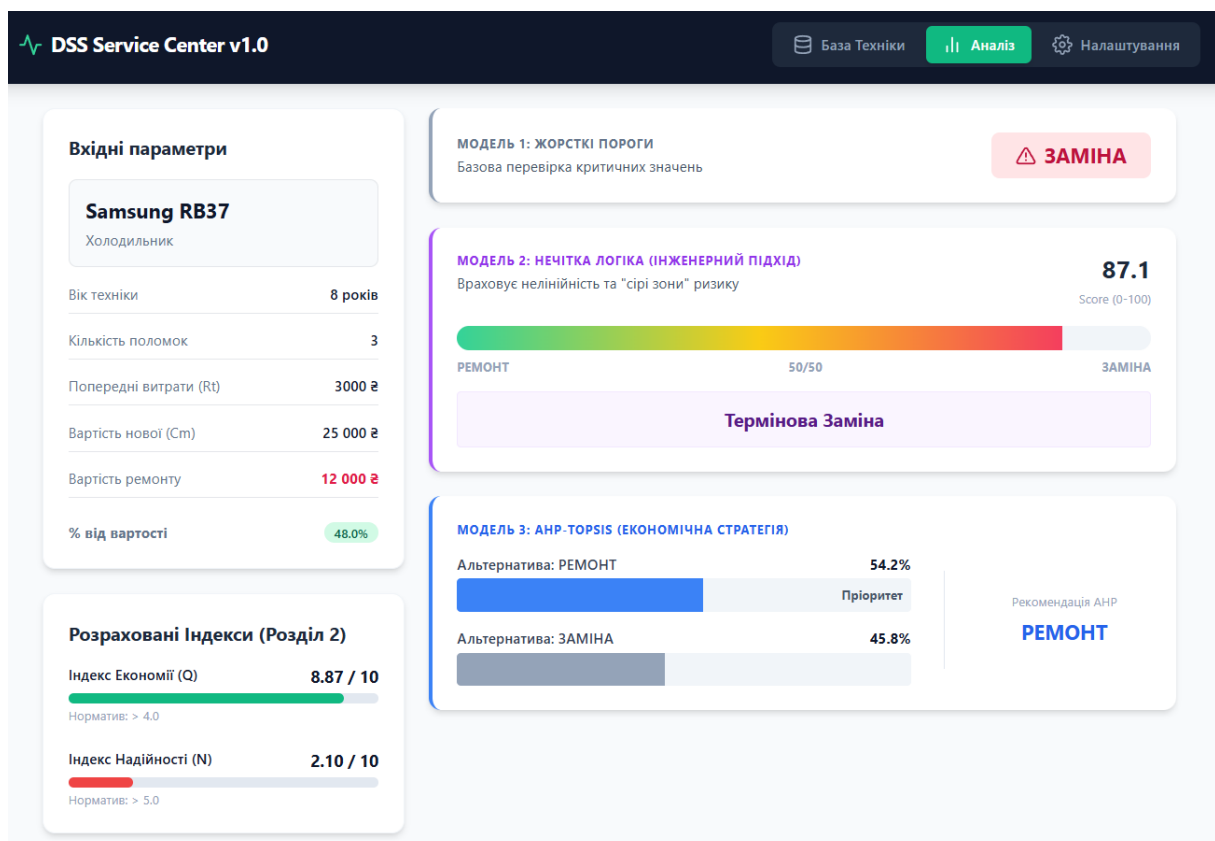


Рисунок 4.2 – Результат аналізу другого кейсу у вебзастосунку

У третьому кейсі з посудомийною машиною Bosch спостерігається ситуація сірої зони. Вартість ремонту 40.5% є комфортною, але надійність N вже викликає занепокоєння. Нечітка модель тут проявила свою гнучкість, видавши рекомендацію заміни – 71.1, що є проміжним, зваженим рішенням, на відміну від категоричних вердиктів інших моделей. На рисунку 4.3 зображено результат аналізу третього кейсу у вебзастосунку.

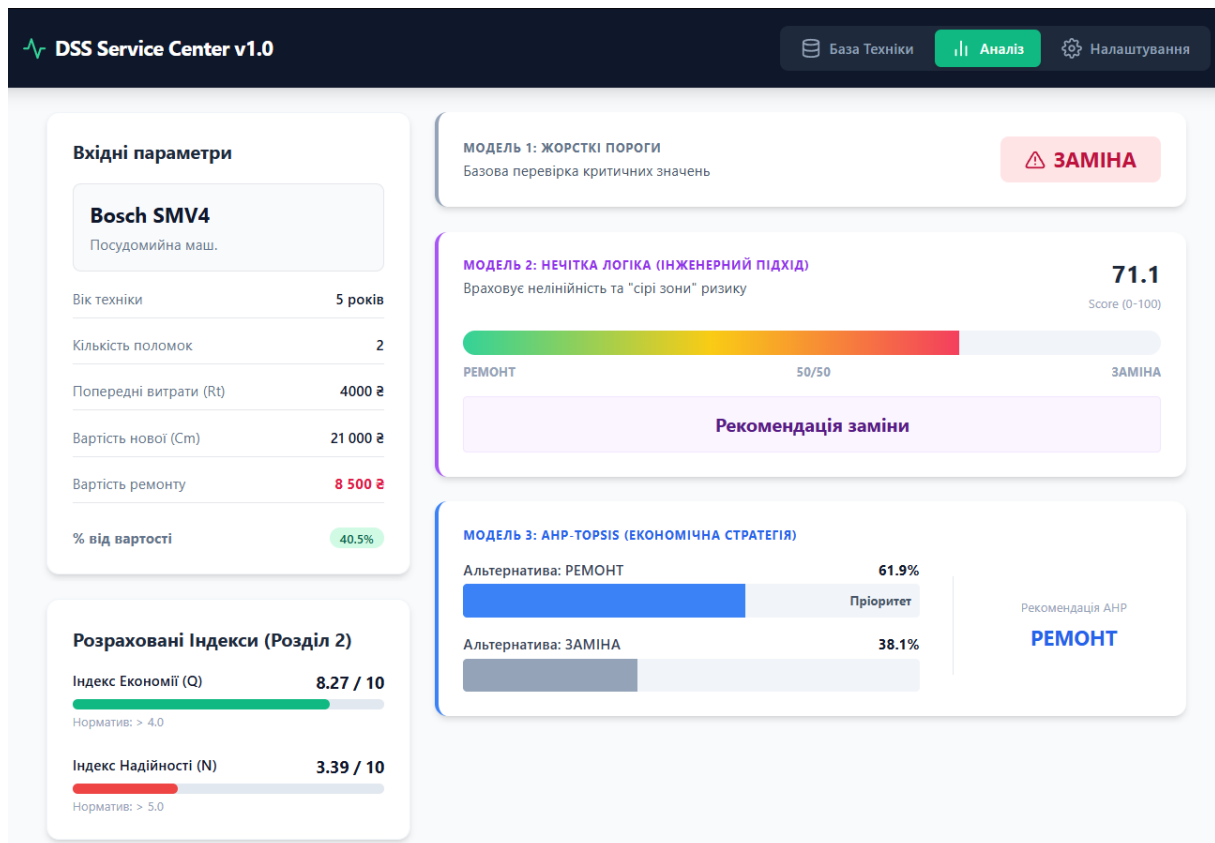


Рисунок 4.3 – Результат аналізу третього кейсу у вебзастосунку

Окремої уваги заслуговують кейси 1 та 5. У цих сценаріях спостерігається повна узгодженість результатів усіх трьох моделей: всі вони однозначно рекомендують ремонт. Цей результат є важливим індикатором адекватності розроблених систем. Він підтверджує, що у ситуаціях з відсутністю конфлікту критеріїв: низька вартість ремонту 17-25%, високий індекс надійності N та ідеальний індекс економічної доцільності Q – моделі не генерують хибних рекомендацій до заміни.

Гібридна модель АНП TOPSIS у цих випадках показала найвищий рейтинг альтернативи ремонту – 0.79 та 0.87 відповідно, оскільки поточні показники

техніки майже ідентичні показникам ідеального позитивного рішення PIS.

Нечітка модель також спрацювала коректно, активувавши правило для ідеального ремонту Strong_repair та рекомендації ремонту Weak_repair, що свідчить про правильне налаштування функцій належності.

На рисунку 4.4 та 4.5 зображено результат аналізу першого та п'ятого кейсу у вебзастосунку.

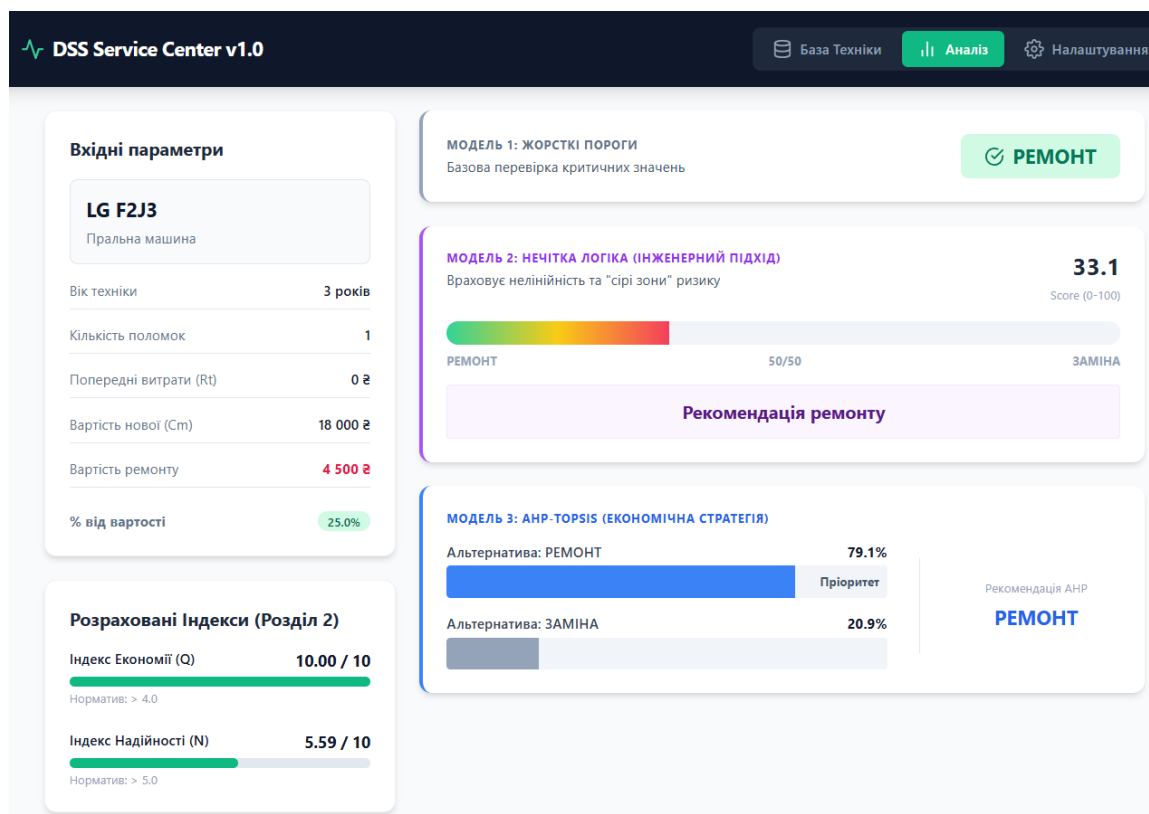


Рисунок 4.4 – Результат аналізу першого кейсу у вебзастосунку

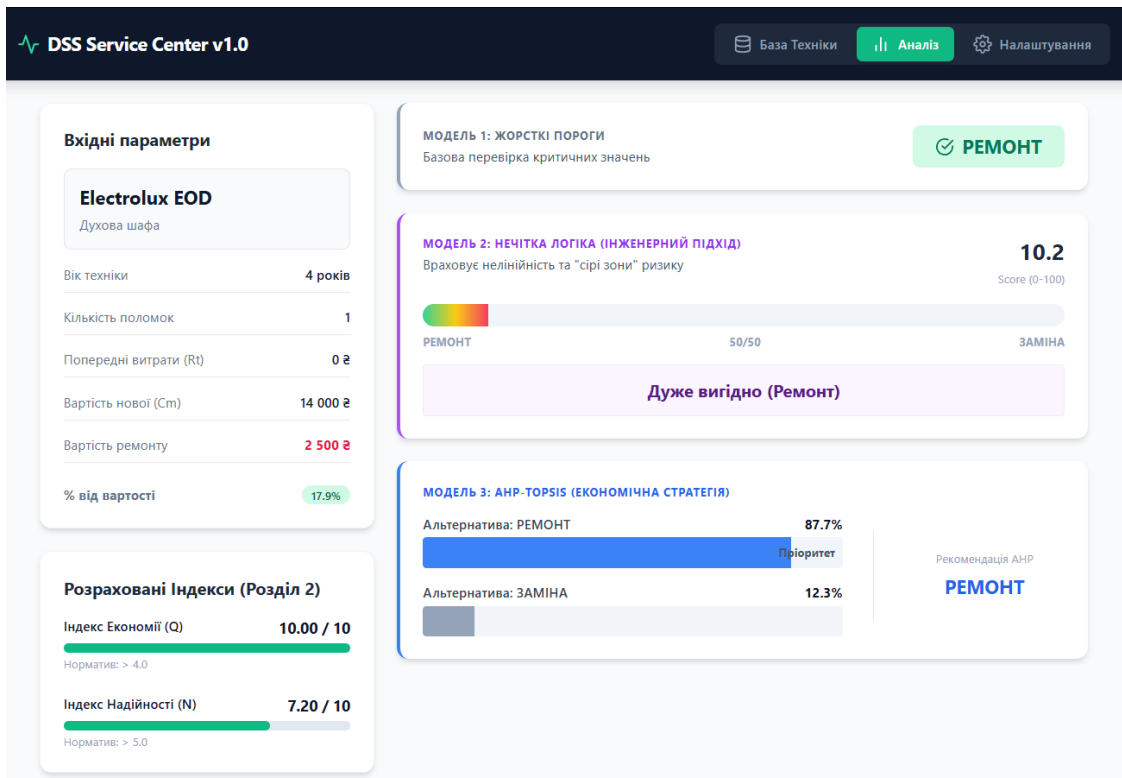


Рисунок 4.5 – Результат аналізу п'ятого кейсу у вебзастосунку

У четвертому кейсі з пральною машиною Indesit розглядалася ситуація протилежна попереднім: техніка має одночасно і високу вартість ремонту у 54.5%, і критично низький рівень надійності N . У цьому випадку всі моделі також дійшли спільного висновку заміна, проте механізм прийняття цього рішення відрізнявся.

Метод жорстких порогів спрацював за обома умовами одночасно: було перевищено ліміт вартості у 50% та порушено ліміт надійності у 5.0.

Модель АНП TOPSIS надала перевагу заміні з рейтингом ремонту 0.48 переважно через високу вагу критерію вартості в матриці експертних порівнянь.

Нечітка модель показала найвищий ступінь впевненості у необхідності заміни серед усіх кейсів у 93. Це пояснюється кумулятивним ефектом бази правил: спрацювало як правило стоп-фактор надійності, так і правило високої вартості.

Цей кейс демонструє, що при наявності кількох критичних недоліків нечітка логіка здатна не просто видати бінарне рішення, а й підсилити його, сигналізуючи про категоричну недоцільність інвестування коштів у відновлення

активу. На рисунку 4.6 зображено результат аналізу четвертого кейсу у вебзастосунку.

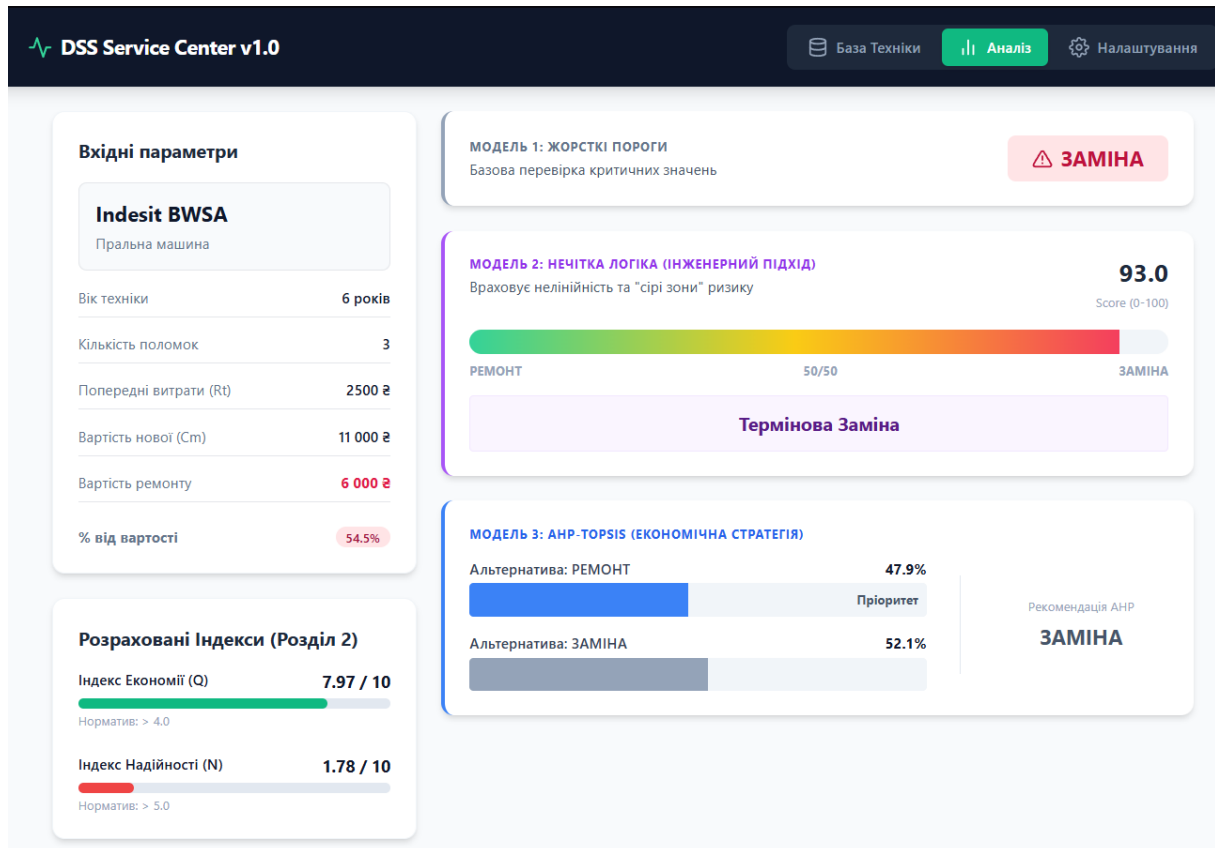


Рисунок 4.6 – Результат аналізу четвертого кейсу у вебзастосунку

4.4. Аналіз чутливості моделей до зміни значень

Для оцінки стійкості моделей було проведено аналіз чутливості на прикладі другого кейсу, штучно збільшивши вартість ремонту на 10% до 14 500 грн, що становить 58% від вартості нового.

Метод жорстких порогів залишив рішення заміни, оскільки була перетнута межа у 50% від вартості та межа значення індекса N .

У нечіткій моделі оцінка зросла з 88.2 до 95. Рішення залишилося тим самим – термінова заміна, але ступінь впевненості зріс. Це свідчить про стабільність моделі: вона вже вважала заміну необхідною через надійність, і зростання ціни лише підтвердило цей висновок.

У моделі АНР TOPSIS рішення інвертувалося – рейтинг ремонту впав з

0.54 до 0.48, змінивши рекомендацію більше в сторону заміни. Це демонструє високу чутливість методу TOPSIS до змін числових значень критеріїв, що є позитивною рисою для точних економічних розрахунків. Результати реакції моделей на зміни значень у другому кейсі зображено на рисунку 4.7.

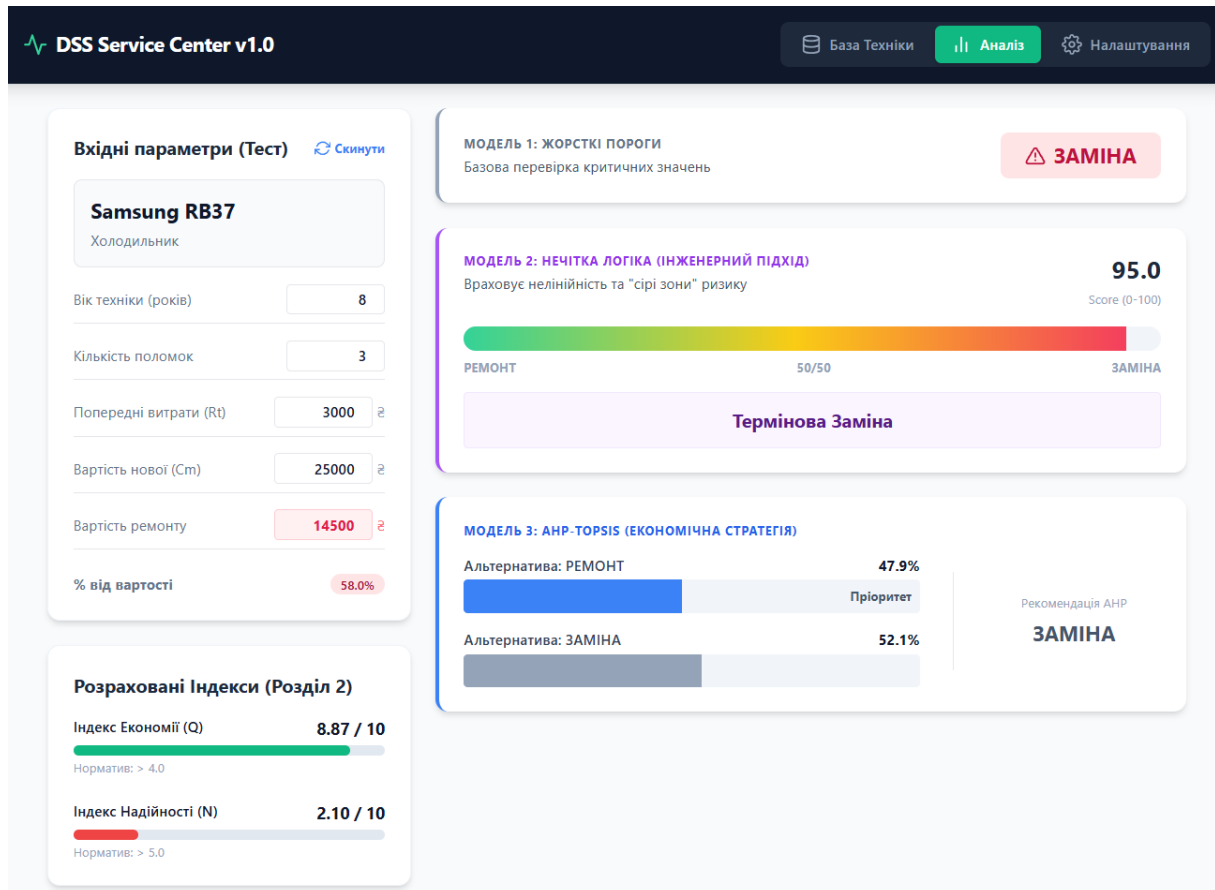


Рисунок 4.7 – Реакція моделей на зміни значень у другому кейсі

Другим сценарієм дослідження стала симуляція впливу морального зносу та ринкових коливань. Часто виникає ситуація, коли вартість ремонту залишається незмінною, проте ціна на нову аналогічну техніку C_m знижується, наприклад через вихід новішого покоління моделей або сезонні знижки. Це підвищує відносну вартість ремонту у відсотковому вираженні, навіть якщо чек із сервісу не змінився.

Для експерименту було обрано третій кейс з посудомийною машиною Bosch. Початкові умови: вартість ремонту 8 500 грн., ціна нової 21 000 грн. Відносна вартість 40.5%. У новому сценарії ціна нового аналога знизилася на

20%, до 16 800 грн. Вартість ремонту 8 500 грн. тепер становить 50.6% від нової ціни.

Нечітка модель, де початкова оцінка становила 71.1, тобто рекомендація до заміни. При зростанні відносної вартості ремонту та незначному зниженні індексу Q , вихідне значення плавно зросло до 84.3. Рекомендація залишилася в тій же зоні *Weak_replace*, але з вищим рівнем впевненості. Система продемонструвала стійкість, не змінивши кардинально рішення через перетин формальної межі у 50%, оскільки надійність N залишалася незмінною.

Гібридна модель АНР TOPSIS у даному сценарії цей показала найвищу чутливість до економічних змін. Оскільки в матриці АНР критеріям вартості та економічної доцільності було надано високу вагу, зниження привабливості ремонту – віддалення від PIS за критерієм C призвело до інверсії рейтингу. Показник альтернативи ремонту знизився з 0.61 до 0.47, що призвело до зміни фінальної рекомендації на в сторону заміни. Результати реакції моделей на зміни значень у третьому кейсі зображено на рисунку 4.8.

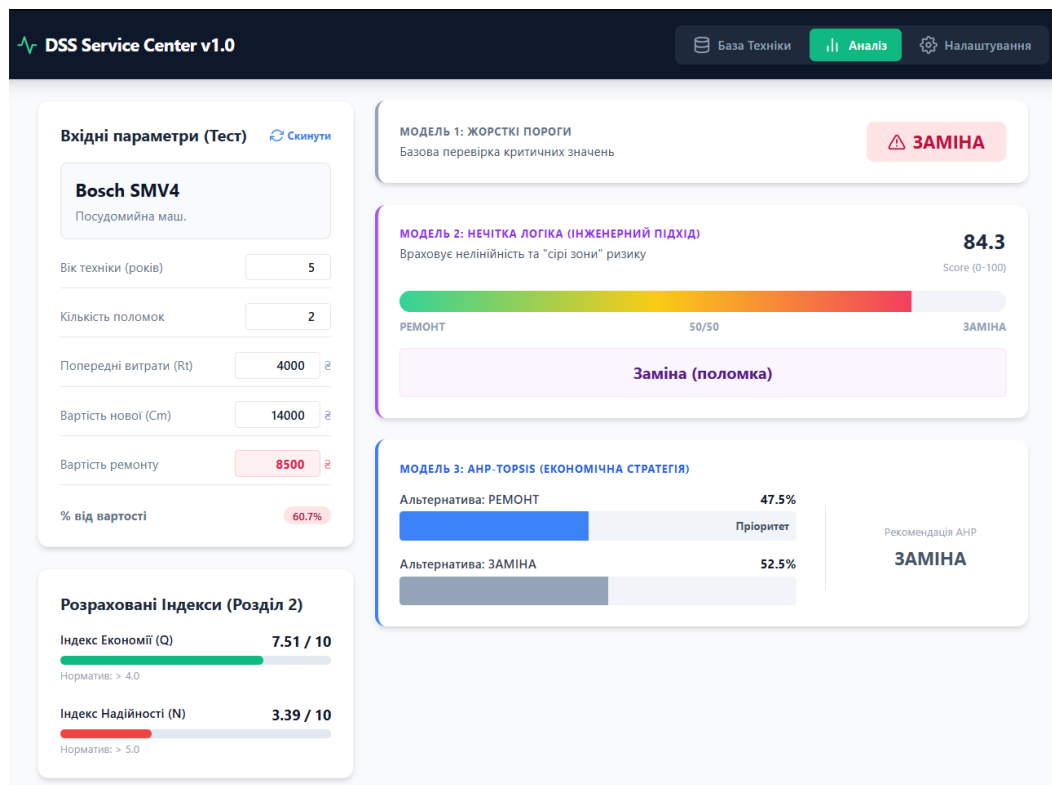


Рисунок 4.8 – Реакція моделей на зміни значень у третьому кейсі

Важливою перевагою розробленої архітектури є гнучкість налаштувань. СППР дозволяє адаптувати логіку прийняття рішень під зміну бізнес-стратегії або ринкових умов без втручання в програмний код. На вкладці «Налаштування», яка зображена на рисунку 4.9, реалізовано панель керування коефіцієнтами математичних моделей.

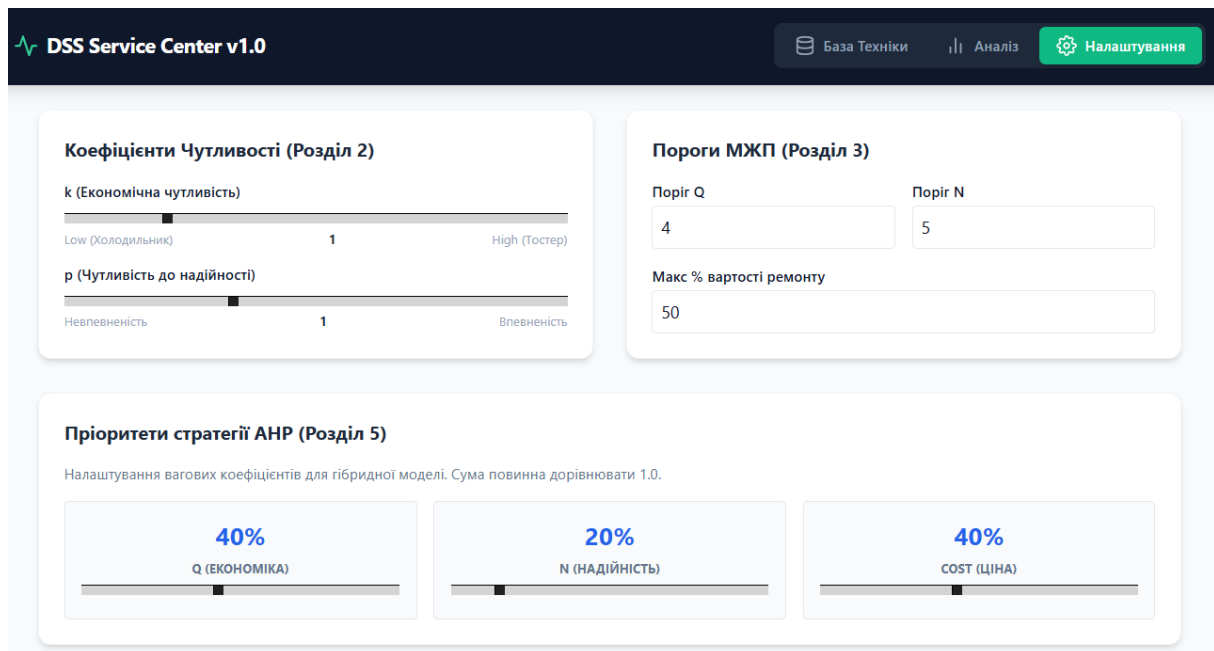


Рисунок 4.9 – Вкладка «Налаштування»

Як показано на рисунку, користувач має можливість коригувати коефіцієнти чутливості, змінюючи повзунки, можна налаштувати модель під різні класи техніки, наприклад збільшити чутливість до надійності для преміальної техніки. Також є можливість встановлювати ліміти для індексів Q , N та допустимого відсотка вартості ремонту для базової моделі. Також, керувати стратегією АНР через інтерактивні повзунки дозволяють змінювати ваги критеріїв економіки, надійності та ціни. Система автоматично перераховує результати аналізу в реальному часі.

Наприклад, якщо на даному екрані змінити пріоритет в АНР, надавши більшу вагу надійності, результат для другого кейсу у моделі рекомендація зміниться з ремонту на заміну, наблизившись до висновків нечіткої моделі.

Порівняльний аналіз підтвердив, що жодна з моделей не є універсальною,

проте кожна має свою сферу ефективного застосування. Метод жорстких порогів доцільно використовувати як фільтр першого рівня для відсіювання очевидних випадків. Модель АНР TOPSIS ідеально підходить для ситуацій, де пріоритетом є суворі економія бюджету, оскільки вона математично точно зважує вартість проти якості.

Найбільш збалансовано та наближено до експертного прийняття рішень проявила себе модель на основі нечіткої логіки. Вона продемонструвала здатність враховувати приховані ризики низьку надійність навіть за сприятливих економічних умов, уникаючи помилок, допущених іншими методами у другому кейсі. Саме нечітка модель рекомендована як ядро інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень сервісного центру, оскільки вона забезпечує найкращий баланс між технічною доцільністю та економічною вигодою.

ВИСНОВКИ

У ході виконання магістерської кваліфікаційної роботи було вирішено актуальну науково-прикладну задачу розробки методу та програмного забезпечення для оцінювання надійності побутової техніки та підтримки прийняття управлінських рішень у сервісних центрах.

Проведено аналіз предметної області управління технічним обслуговуванням та існуючих інформаційних систем сервісних центрів. Встановлено, що більшість CRM-систем обмежуються функціями обліку та моніторингу, не надаючи інструментів для об'єктивного аналізу доцільності ремонту. Визначено необхідність переходу від реактивного обслуговування до стратегії, що базується на аналітиці даних.

Розроблено метод комплексного оцінювання стану побутової техніки, який базується на розрахунку двох інтегральних показників: індексу економічної доцільності та індексу надійності. Запропоновані математичні моделі враховують не лише поточні витрати на ремонт, а й історію експлуатації, вік техніки та галузеві нормативи надійності. Введення коефіцієнтів чутливості дозволило адаптувати метод для різних категорій техніки (від бюджетних до преміальних).

Було розроблено та досліджено три моделі підтримки прийняття рішень. Метод жорстких порогів: продемонстрував простоту реалізації, але виявив суттєві недоліки, такі як проблема межових значень у складних ситуаціях.

Нечітка модель на основі алгоритму Мамдані та Гаусових функцій належності. Довела свою ефективність у роботі з невизначеністю, забезпечивши найбільш збалансовані та обережні рекомендації, особливо у випадках прихованих ризиків повторних відмов.

Гібридна модель АНР-TOPSIS дозволила реалізувати стратегію пріоритету економії бюджету, математично точно зважуючи конфліктуєчі критерії вартості та якості.

Здійснено програмну реалізацію розроблених методів у вигляді веб-орієнтованої СППР. Застосунок, побудований на базі React.js, надає зручний інтерфейс для ведення реєстру техніки, автоматичного розрахунку індексів та візуалізації рекомендацій у реальному часі. Реалізовано модуль налаштувань, що дозволяє адаптувати параметри моделей без втручання в програмний код.

Проведено порівняльний аналіз ефективності моделей на контрольній вибірці реальних кейсів. Результати показали, що впровадження нечіткої логіки дозволяє знизити ризик прийняття помилкових рішень про доцільність ремонту в межових ситуаціях (коли вартість ремонту наближається до 50% від ціни нового пристрою), де прості порогові методи дають збій.

Практичне значення роботи полягає у створенні інструменту, що дозволяє сервісним центрам підвищити якість обслуговування, надаючи клієнтам прозорі та математично обґрунтовані рекомендації щодо подальшої експлуатації техніки. Це сприяє оптимізації витрат споживачів, підвищенню довіри до сервісу та, в глобальному сенсі, зменшенню кількості електронних відходів шляхом запобігання передчасній утилізації ремонтпридатної техніки.

Результати дослідження подані на V Міжнародну науково-практичну конференцію «OPEN SCIENCE NOWADAYS: MAIN MISSION, TRENDS AND INSTRUMENTS, PATH AND ITS DEVELOPMENT», (Вінниця – Відень, 12.12.2025) з публікацією у Міжнародному науковому журналі «Грааль науки» №59, 2025 р. [28].

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Information system: Definition, Examples, & Facts. URL: <https://www.britannica.com/topic/information-system/Computer-software> (дата звернення: 01.11.2025)
2. What is Client-Server System: Architecture, Issues and Challenge of Client-Server System. URL: <https://www.researchgate.net/profile/Sawsan-Ali-6/publication/339340046> (дата звернення: 01.11.2025)
3. What is a relational database? URL: <https://cloud.google.com/learn/what-is-a-relational-database> (дата звернення: 01.11.2025)
4. What is Online Transactional Processing (OLTP)? URL: <https://zilliz.com/glossary/oltp> (дата звернення: 01.11.2025)
5. Customer relationship management system: A must for any home appliances store motivations, proposal and benefits. URL: <https://repositori.tecnocampus.cat/handle/20.500.12367/2344> (дата звернення: 03.11.2025)
6. ServiceMax. URL: <https://www.servicemax.com> (дата звернення: 03.11.2025)
7. Repair Shop. URL: <https://www.repairshopr.com> (дата звернення: 03.11.2025)
8. FieldPulse. URL: <https://www.fieldpulse.com> (дата звернення: 03.11.2025)
9. Меденцев А. Р. Розробка ІТ-сервісу з аналізу якості та надійності побутової техніки інформаційної системи ремонтної майстерні : бак. робота, 2024, 99 с.
10. О. І. Гороховський Інтелектуальні системи : навч. посіб., Вінниця : ВНТУ, 2010. 193 с.
11. Why Is It Important to Measure Maintainability and What Are the Best Ways to Do It? URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7965364> (дата звернення: 05.11.2025)
12. InterNACHI's Standard Estimated Life Expectancy Chart for Homes. URL:

<https://www.nachi.org/life-expectancy.htm> (дата звернення: 06.11.2025)

13. Home Appliance Life Expectancy. URL: <https://www.mrappliance.com/expert-tips/appliance-life-guide> (дата звернення: 06.11.2025)

14. Mehr als nur eine Schraube locker? URL: <https://www.prisma.de/magazin/themen/Defekte-Haushaltsgeraete-Wann-sich-eine-Reparatur-noch-lohnt,16788579> (дата звернення: 07.11.2025)

15. Appliance solutions. Is it Worth Fixing? Your Guide to Appliance Repair Decisions? URL: <https://appliancesolutionsmn.com/is-it-worth-fixing-your-guide-to-appliance-repair-decisions-2/> дата звернення: 09.11.2025)

16. A fuzzy classifier based on Mamdani fuzzy logic system and genetic algorithm. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8924697> (дата звернення: 16.11.2025)

17. Gaussian membership functions are most adequate in representing uncertainty in measurements. URL: <https://www.researchgate.net/profile/Vladik-Kreinovich/publication/23894056> (дата звернення: 17.11.2025)

18. Timothy J. Ross Fuzzy logic with engineering application : 3rd ed., University of New Mexico, USA, 1995. 95-111 с.

19. Python. URL: <https://www.python.org> (дата звернення: 13.11.2025)

20. Юрченко Ю. М., Волкова Н. П. Методика прийняття рішень задач багатокритеріального вибору за допомогою вдосконаленого методу TOPSIS: «Інформатика та математичні методи в моделюванні», Том 14, № 3, 259-267 с.

21. Жигаревич О. К. Метод аналізу ієрархій : Науковий журнал «Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво» Випуск 13, Луцьк, 2013. 14-20 с.

22. Підченко Сергій, Кучерук Оксана, Пивовар Олег, Горященко Костянтин Метод вибору термінального обладнання пасивних оптичних мереж на основі нечіткого багатокритеріального прийняття рішень : науковий журнал «Вісник Хмельницького національного університету», №4, 2024, 448-457 с.

23. Гречко А.В Онтологія метода аналізу ієрархій Сааті : науковий

журнал «Штучний інтелект» Інститут кібернетики В.М. Глушкова, Київ, 2005, 746-757 с.

24. СанСанич ціни на послуги "Ремонт побутової техніки". URL: <https://san-sanych.ua/czini-na-poslugi/posluga-remont-texnika.html> (дата звернення: 20.11.2025)

25. React.js. URL: <https://react.dev> (дата звернення: 20.11.2025)

26. Tailwind CSS. URL: <https://tailwindcss.com> (дата звернення: 20.11.2025)

27. JavaScript. URL: <https://nodejs.org/en> (дата звернення: 20.11.2025)

28. Меденцев А.Р., Калита Н.І. Розробка методу оцінювання надійності пристроїв у системі підтримки прийняття рішень сервісного центру ГРААЛЬ НАУКИ: міжнар. наук. журнал: за матеріалами конф. «OPEN SCIENCE NOWADAYS: MAIN MISSION, TRENDS AND INSTRUMENTS, PATH AND ITS DEVELOPMENT» (Вінниця – Відень, 12 грудня 2021 р.). Вінниця, 2025. №59. С.00-00.