

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БУДІВНИЦТВА І
АРХІТЕКТУРИ**

Автоматизації і інформаційних технологій
(факультет)

Кібербезпеки та комп'ютерної інженерії
(назва випускової кафедри)

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗДОБУВАЧА СТУПЕНЯ ВИЩОЇ ОСВІТИ БАКАЛАВР**

на тему:

Аналіз та оцінка варіантів апаратного забезпечення компонентів
комп'ютерної мережі.

Пампуха Дмитро Олександрович
(прізвище, ім'я та по батькові здобувача повністю)

Київ 2026р.

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ**

Автоматизації і інформаційних технологій
(факультет)

Кібербезпеки та комп'ютерної інженерії
(назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

Делембовський М.М.

«__» _____ 2026 року

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗДОБУВАЧА СТУПЕНЯ ВИЩОЇ ОСВІТИ БАКАЛАВР**

Аналіз та оцінка варіантів апаратного забезпечення компонентів
комп'ютерної мережі
(назва)

Я як здобувач вищої освіти КНУБА розумію і підтримую політику закладу з академічної доброчесності. Я не надавав(-ла) і не одержував(-ла) недозволену допомогу під час підготовки цієї роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Здобувач Пампуха Дмитро Олександрович
(прізвище, ім'я та по батькові повністю)

123 «Комп'ютерна інженерія»
(спеціальність)

Комп'ютерні системи і мережі
(освітня програма)

Група КСМ -22

Керівник Ізмайлова Ольга Василівна
(прізвище та ініціали)

доцент, кандидат технічних наук
(вчене звання, науковий ступінь)

Рецензент _____
(прізвище та ініціали)

Ідентичність підтверджую

Київ 2026р.

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ**

Факультет: Автоматизації і інформаційних технологій

Випускова кафедра: Кібербезпеки та комп'ютерної інженерії

Ступінь вищої освіти: Бакалавр

Спеціальність: 123 «Компютерна інженерія»

Освітня програма: Комп'ютерні системи і мережі

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Делембовський М.М.

« ____ » _____ 2026 року

**З А В Д А Н Н Я
ДО ВИКОНАННЯ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ЗДОБУВАЧА
СТУПЕНЯ ВИЩОЇ ОСВІТИ БАКАЛАВР**

Пампуха Дмитро Олександрович
(прізвище, ім'я та по батькові здобувача)

1. Тема роботи: «Аналіз та оцінка варіантів апаратного забезпечення компонентів компютерної мережі» затверджена наказом ректора КНУБА №577/22-15/13.2/26 від 14.05.2026
2. Керівник роботи: Ізмайлова Ольга Василівна
(прізвище, ім'я та по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
3. Термін подання здобувачем роботи до захисту: травень 2026 року
4. Зміст пояснювальної записки за розділами:
 - Р.1 Аналіз технологічних вимог та апаратних рішень для управління мережею підприємства
 - Р.2 Порівняльний аналіз та вибір апаратного забезпечення комп'ютерної мережі
 - Р.3 Багатокритеріальна оцінка варіантів апаратного забезпечення комп'ютерної мережі
5. Графічні матеріали за розділами:
 - Р.1 Роль апаратного забезпечення
 - Р.2 Порівняння архітектур та систем управління мережею
 - Р.3 Методологія багатокритеріальної оцінки апаратного забезпечення

6. Консультанти розділів кваліфікаційної випускної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Перевірів	
		дата	підпис
Розділ 1.			
Розділ 2.			
Розділ 3.			

7. Календарний план виконання роботи:

Види робіт та їх зміст	Дата виконання
Розділ 1.	06.04.2026
Розділ 2.	27.05.2026
Розділ 3.	11.05.2026
Остаточне оформлення роботи	01.06.2026
Направлення роботи для перевірки на плагіат	10.06.2026
Попередній захист роботи на випусковій кафедрі	08.06.2026
Направлення роботи на рецензування	

8. Дата видачі завдання _____

Керівник

(підпис)

Ізмайлова О.В.

(прізвище та ініціали)

Бакалавр

(підпис)

Пампуха Д.О.

(прізвище та ініціали)

РЕЗЮМЕ (SUMMARY) до кваліфікаційної випускної роботи здобувача:		Пампуха Дмитро Олександрович Pamukha Dmytro Oleksandrovych (ПІБ здобувача українською та англійською)	
ЗВО	Київський національний університет будівництва і архітектури		
Тема (українською та англійською)	Аналіз та оцінка варіантів апаратного забезпечення компонентів компютерної мережі Analysis and evaluation of hardware support options for computer network components		
Освітній ступінь	Бакалавр		
Факультет	Автоматизації і інформаційних технологій		
Випускова кафедра	Кібербезпеки та комп'ютерної інженерії		
Спеціальність	123 «Компютерна інженерія»		
Освітня програма	Комп'ютерні системи і мережі		
Керівник	Ізмайлова Ольга Василівна		
Обсяг роботи:	пояснювальна записка, стор.	розділів	презентація, кількість слайдів
	72	3	15
Розділ 1	Аналіз технологічних вимог та апаратних рішень для управління мережею підприємства		
Розділ 2	Порівняльний аналіз та вибір апаратного забезпечення комп'ютерної мережі		
Розділ 3	Багатокритеріальна оцінка варіантів апаратного забезпечення комп'ютерної мережі		
Висновки по роботі:	Проведено порівняльний аналіз апаратних рішень Cisco, MikroTik та Ubiquiti за критеріями продуктивності, безпеки, відмовостійкості та вартості. Розроблено модель багатокритеріальної оцінки на основі методів TOPSIS та аналізу ієрархій та реалізовано програмний засіб з веб- інтерфейсом для автоматизованого вибору оптимального мережевого обладнання.		
Ключові слова: Keywords:	комп'ютерна мережа, апаратне забезпечення, багатокритеріальна оцінка, метод TOPSIS, метод аналізу ієрархій, комутатор, маршрутизатор, критична інфраструктура, Cisco, MikroTik, Ubiquiti.		

АНОТАЦІЇ

Пампуха Дмитро Олександрович на тему: Аналіз та оцінка варіантів апаратного забезпечення компонентів комп'ютерної мережі. Кваліфікаційна робота здобувача ступеня вищої освіти – бакалавра. За спеціальністю 123 «Комп'ютерна інженерія», освітня програма «Комп'ютерні системи і мережі». Кафедра кібербезпеки та комп'ютерної інженерії, Київський національний університет будівництва і архітектур

Бакалаврська робота присвячена аналізу та оцінці варіантів апаратного забезпечення компонентів комп'ютерної мережі підприємства критичної інфраструктури. Проведено порівняльний аналіз рішень Cisco, MikroTik та Ubiquiti за критеріями продуктивності, безпеки, відмовостійкості та сукупної вартості володіння. Розроблено логіко-математичну модель на основі методів TOPSIS та аналізу ієрархій. Реалізовано програмний засіб з веб-інтерфейсом для автоматизованого вибору оптимального мережевого обладнання.

Ключові слова: комп'ютерна мережа, апаратне забезпечення, багатокритеріальна оцінка, метод TOPSIS, метод аналізу ієрархій, комутатор, маршрутизатор, критична інфраструктура, Cisco, MikroTik, Ubiquiti.

Загальний обсяг роботи: 105 сторінка, 3 розділи, 15 рисунків, 29 таблиць, 25 джерел.

ANNOTATION

Pamukha Dmytro Oleksandrovykh Topic: Analysis and Evaluation of Hardware Options for Computer Network Components. Qualification Thesis for the degree of higher education – Bachelor's degree. Specialty: 123 "Computer Engineering". Educational Program: Computer Systems and Networks Department of Cybersecurity and Computer Engineering. Kyiv National University of Construction and Architecture

The Bachelor's thesis is devoted to the analysis and evaluation of hardware options for the computer network components of a critical infrastructure enterprise. A comparative analysis of Cisco, MikroTik, and Ubiquiti solutions was conducted based on the criteria of performance, security, fault tolerance, and total cost of ownership (TCO). A logical-mathematical model was developed based on the TOPSIS method and the Analytic Hierarchy Process (AHP). A software tool with a web interface was implemented for the automated selection of optimal network equipment.

Keywords: computer network, hardware, multi-criteria evaluation, TOPSIS method, Analytic Hierarchy Process (AHP), switch, router, critical infrastructure, Cisco, MikroTik, Ubiquiti.

Total volume of the thesis: 105 pages, 3 chapters, 15 figures, 29 tables, 25 references.

Зміст

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ	10
ВСТУП	11
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ВИМОГ ТА АПАРАТНИХ РІШЕНЬ ДЛЯ УПРАВЛІННЯ МЕРЕЖЕЮ ПІДПРИЄМСТВА... 13	
1.1. Роль апаратного забезпечення у забезпеченні керованості мережі	13
1.2. Огляд сучасних архітектур комп'ютерних мереж та вимог до їх компонентів	15
1.3. Порівняльний аналіз програмно-апаратних комплексів управління (Cisco, MikroTik, Ubiquiti).....	17
Висновки до розділу 1	20
РОЗДІЛ 2. ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТА ВИБІР АПАРАТНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КОМП'ЮТЕРНОЇ МЕРЕЖІ	22
2.1. Аналіз недоліків комп'ютерної мережі підприємства.....	22
2.2. Огляд та порівняння сучасних апаратних рішень для модернізації мережі.....	24
2.3. Обґрунтування вибору обладнання та розрахунок вартості модернізації	27
Висновки до розділу 2	29
РОЗДІЛ 3. БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНА ОЦІНКА ВАРІАНТІВ АПАРАТНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КОМП'ЮТЕРНОЇ МЕРЕЖІ. 31	
3.1. Цільова установка	31
3.2. Функції програми.....	32
3.3. Діаграма прецедентів програмного засобу.....	34
3.4. Діаграма діяльності алгоритму роботи програмного засобу....	36
3.5. Діаграма класів програмного засобу.....	41
3.6. Формування інформаційної платформи	44

3.6.1. Альтернативні варіанти апаратних засобів	44
3.6.2. Критерії порівняльного оцінювання	45
3.6.3. Профіль апаратного засобу	46
3.6.4. Шкала оцінювання критеріїв	47
3.7. Встановлення значень критеріальних показників	47
3.8. Встановлення ваг критеріїв.....	49
3.9. Відсів варіантів апаратного забезпечення.....	52
3.10. Математична постановка задачі багатокритеріальної оцінки	54
3.11. Обчислення TOPSIS.....	59
3.12. Відображення рейтингу.....	62
3.13. Програмне забезпечення системи	63
3.13.1 Вибір та характеристика мови програмування.....	63
3.13.2 Алгоритм реалізації програмних модулів	65
3.13.3 Структура програмного забезпечення	71
Висновки до розділу 3	79
ВИСНОВКИ.....	81
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	83
ДОДАТОК А. Лістинг файлу app.py	86
ДОДАТОК Б. Лістинг файлу topsis.py	92
ДОДАТОК В. Лістинг файлу templates/index.html	96
ДОДАТОК Г. Лістинг файлу templates/scores.html	98
ДОДАТОК Д. Лістинг файлу templates/weights.html.....	100
ДОДАТОК Е. Лістинг файлу templates/results.html	103

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ

VLAN - Virtual Local Area Network, технологія логічної сегментації мережі на каналному рівні.

SNMP - Simple Network Management Protocol, протокол для моніторингу та управління мережевими пристроями.

PoE / PoE+ - Power over Ethernet, технологія передачі електроживлення разом з даними по кабелю Ethernet.

ASIC - Application-Specific Integrated Circuit, спеціалізована інтегральна схема для апаратної обробки трафіку.

SDN - Software Defined Networking, концепція програмно-визначених мереж

TCO - Total Cost of Ownership, сукупна вартість володіння.

IBN - Intent-Based Networking, мережа на основі намірів.

OSI - Open Systems Interconnection, модель взаємодії відкритих систем.

GUI - Graphical User Interface, графічний інтерфейс користувача.

CLI - Command Line Interface, інтерфейс командного рядка.

ВСТУП

Мережева інфраструктура підприємства - це не та частина ІТ на яку звертають увагу поки вона працює. Проблеми починаються тоді коли обладнання не витримує навантаження, не підтримує потрібні функції або просто застаріло - і виявляється це зазвичай у найневідповідніший момент. Для об'єктів енергетичної інфраструктури це особливо критично: збій мережі тут це не просто простій офісу а потенційна загроза для систем від яких залежить електропостачання споживачів.

У 2025-2026 роках вимоги до апаратної бази мереж суттєво зросли. Масове впровадження Wi-Fi 7, перехід на 10-гігабітні з'єднання між рівнями мережі та зростання кількості підключених пристроїв означає що обладнання яке ще кілька років тому вважалось достатнім сьогодні може стати вузьким місцем. При цьому питання не зводиться до "купити найдорожче" - надлишкова потужність так само шкідлива для бюджету як недостатня для продуктивності.

Окрема проблема - зв'язок між апаратним забезпеченням і системами управління. Сучасні інструменти моніторингу, сегментації трафіку та контролю доступу реалізують свій потенціал лише тоді коли апаратна база підтримує їх на рівні чіпів і протоколів. Вибір обладнання без урахування цього зв'язку - поширена помилка яка дається взнаки вже на етапі впровадження.

Об'єктом дослідження є мережева інфраструктура енергетичного підприємства змодельована на прикладі НЕК "Укренерго".

Предметом дослідження є критерії та методи оцінювання апаратного забезпечення комп'ютерної мережі - технічні характеристики мережевого обладнання, методи багатокритеріального аналізу та принципи вибору комутаторів і маршрутизаторів для мережі критичної інфраструктури.

Метою роботи є комплексний аналіз варіантів апаратного забезпечення та розробка програмного засобу багатокритеріальної оцінки що забезпечить

обґрунтований вибір обладнання для ефективного управління доступом, сегментації користувачів і моніторингу мережевої активності підприємства.

У роботі виконано:

1. Аналіз технологічних вимог та сучасних архітектур комп'ютерних мереж
2. Порівняльний аналіз апаратно-програмних комплексів управління провідних виробників мережевого обладнання – Cisco, MikroTik та Ubiquiti
3. Виявлення недоліків поточної мережевої інфраструктури НЕК "Укренерго" та обґрунтування варіантів модернізації
4. Розробку логіко-математичної моделі на основі методу TOPSIS та методу аналізу ієрархій для багатокритеріальної оцінки апаратного забезпечення
5. Реалізацію програмного засобу оцінювання з веб-інтерфейсом на основі Python та Flask

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ВИМОГ ТА АПАРАТНИХ РІШЕНЬ ДЛЯ УПРАВЛІННЯ МЕРЕЖЕЮ ПІДПРИЄМСТВА

1.1 Роль апаратного забезпечення у забезпеченні керованості мережі

На перший погляд здається, що керованість мережі - це питання програмного забезпечення. Але достатньо спробувати налаштувати сегментацію трафіку на некерованому комутаторі, щоб зрозуміти: без відповідної апаратної бази адміністратор просто не має інструментів для роботи. Апаратне забезпечення в цьому контексті - це не фізична основа мережі, а межа того, що взагалі можливо реалізувати.

Перше, де це проявляється - підтримка рівнів моделі OSI. Перехід від звичайного некерованого комутатора до пристрою рівня L2 або L3 - це не просто апгрейд заліза, а якісна зміна можливостей адміністрування. Наявність виділеного процесора для обробки керуючих пакетів дозволяє реалізувати VLAN-сегментацію за стандартом 802.1Q [14], тобто фізично розділити, наприклад, гостьовий та корпоративний трафік на одному обладнанні. Без цієї апаратної можливості будь-які спроби організувати нормальну політику доступу просто не мають сенсу.

Інший важливий аспект - зворотній зв'язок. Керувати мережею, не бачачи що в ній відбувається, неможливо. Тому підтримка протоколів SNMP та RMON на рівні заліза - це не опція, а базова вимога. Вимоги до технічного захисту інформації в мережах регламентуються відповідними державними стандартами [1]. Окремо варто відзначити NetFlow: ця технологія реалізована безпосередньо в ASIC-чіпах, що дозволяє збирати детальну статистику по потоках трафіку без жодного впливу на продуктивність самого пристрою.

Окремо стоїть питання доступу до обладнання у нештатних ситуаціях. Якщо основний канал зв'язку впав, адміністратор повинен мати можливість підключитися до пристрою в обхід нього - через виділений порт управління. Це так зване out-of-band management, і без фізичної підтримки такого порту в самому пристрої воно просто недоступне. У середовищах з підвищеними

вимогами до доступності, як-от об'єкти енергетичної інфраструктури, out-of-band management перестає бути зручністю і стає вимогою. Якщо основний канал впав через збій саме того обладнання, яке треба налаштувати - без виділеного порту управління або окремої management-мережі адміністратор просто фізично їде на об'єкт. В умовах географічно розподіленої мережі це означає простій, який вимірюється годинами.

Є ще два моменти, які на практиці виявляються важливішими, ніж здається на початку. Перший - PoE. Підтримка Power over Ethernet дозволяє не просто жити точки доступу та IP-телефони через мережевий кабель, а й централізовано керувати їх живленням: перезавантажувати, вимикати за розкладом, реагувати на збої - все це через консоль комутатора. Другий - стекування. Технологія на кшталт StackWise дозволяє об'єднати кілька фізичних комутаторів в один логічний пристрій з єдиною IP-адресою та спільною конфігурацією. Для адміністратора це означає суттєво менше роботи при масштабуванні мережі.

Якщо підсумувати: обладнання визначає стелю можливостей. Скільки б потужних програмних систем управління не було розгорнуто поверх - якщо сам пристрій не підтримує VLAN, не вміє відправляти SNMP-трапи або не має порту управління, мережа залишається некерованою. Саме тому аналіз апаратного забезпечення є відправною точкою, а не другорядним питанням.

За результатами аналізу було сформовано дерево цілей дослідження (рис. 1.1). Головна ідея полягає в тому, що вибір обладнання не може зводитися до порівняння характеристик окремих пристроїв - потрібна система критеріїв, яка охоплює всі ключові аспекти побудови мережі.

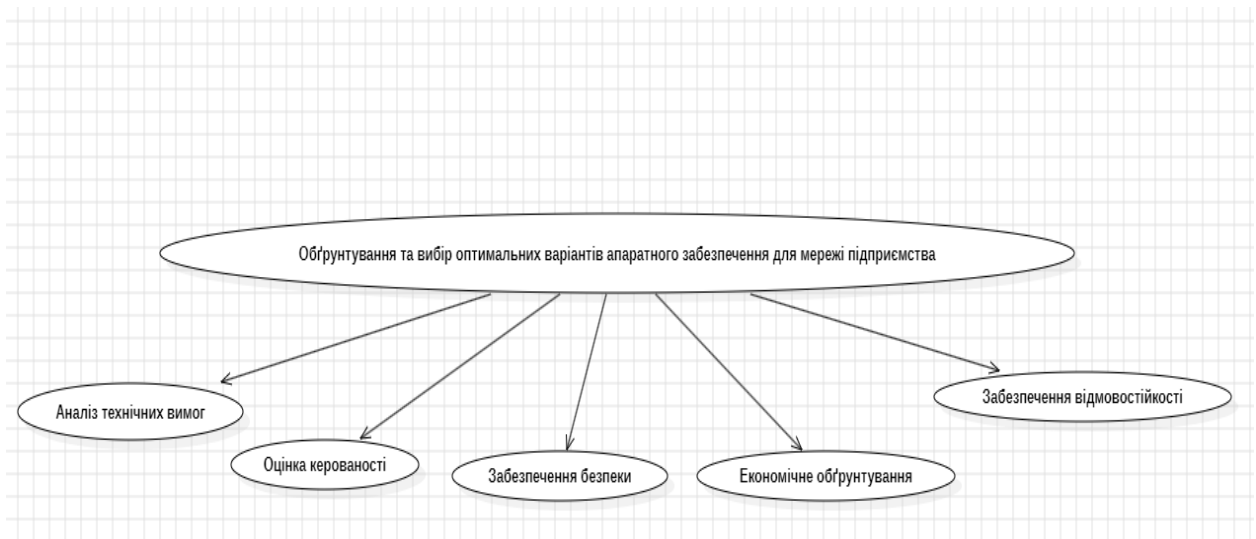


Рисунок 1.1 – Дерево цілей

У роботі виділено п'ять таких критеріїв. Перший - технічні вимоги: визначення потреб у пропускну здатності (1/10/25 Gbps) та підтримці актуальних стандартів бездротового зв'язку. Другий - керованість: наявність підтримки стекування, SNMP-моніторингу та можливостей віддаленого адміністрування. Третій - безпека: апаратна реалізація захисту портів, шифрування трафіку та VLAN-сегментації. Четвертий - економічне обґрунтування, яке включає порівняння вартості рішень різних виробників та оцінку сукупної вартості володіння (TCO). П'ятий - відмовостійкість: резервування живлення, каналів зв'язку та можливість гарячої заміни компонентів.

Саме за цими критеріями у наступних розділах будуть порівнюватися варіанти апаратного забезпечення.

1.2 Огляд сучасних архітектур комп'ютерних мереж та вимог до їх компонентів назви без курсорв

Проектування корпоративної мережі давно вийшло за межі простого з'єднання пристроїв. Сучасні архітектури будуються навколо двох принципів: чіткого розподілу функцій між рівнями обладнання та здатності мережі адаптуватися до змін без повної перебудови інфраструктури.

Класичним підходом, який досі залишається стандартом для більшості корпоративних середовищ, є ієрархічна трирівнева модель [11,16]. Кожен рівень виконує конкретну роль і висуває свої вимоги до заліза. На рівні доступу головне - щільність портів і підтримка PoE+, адже саме тут підключаються кінцеві пристрої: робочі станції, IP-телефони, точки доступу. Рівень агрегації забезпечує об'єднання потоків і міжвланову маршрутизацію, тому тут критичні L3-функції та підтримка агрегації каналів. Ядро мережі працює з максимальними обсягами трафіку і не може собі дозволити затримок - звідси вимоги до інтерфейсів 40/100 Gbps та апаратного резервування модулів живлення.

Поряд з ієрархічною моделлю, особливо в середовищах дата-центрів та великих офісів, набуває поширення архітектура Spine-Leaf. Її перевага - передбачувана однакова затримка між будь-якими двома вузлами мережі та проста горизонтальна масштабованість: щоб розширити мережу, достатньо додати новий Leaf-комутатор і підключити його до всіх Spine-вузлів.

Водночас Spine-Leaf має і зворотній бік: кількість з'єднань зростає квадратично зі збільшенням вузлів, що означає суттєво вищі витрати на кабельну інфраструктуру порівняно з ієрархічною моделлю. Для невеликих і середніх підприємств це часто робить архітектуру економічно недоцільною, незважаючи на технічні переваги.

Окремо варто зупинитися на технологічних вимогах, які стали актуальними саме зараз. Поширення Wi-Fi 7 створило реальну проблему: точки доступу нового покоління просто "упираються" у гігабітний порт комутатора, тому підтримка Multi-Gigabit Ethernet (2.5G/5G) на рівні доступу перестала бути екзотикою. Енергоефективність за стандартом IEEE 802.3az [15] напряду впливає на TCO, що важливо при економічному обґрунтуванні вибору обладнання. Нарешті, інтеграція з системами централізованого управління - Cisco DNA, Aruba Central тощо - вимагає від комутаторів програмованих чіпів з підтримкою SDN, інакше пристрій просто не зможе повноцінно працювати в такому середовищі.

Таким чином, вибір архітектури мережі безпосередньо визначає вимоги до конкретного апаратного забезпечення. Трирівнева модель передбачає різnorідний парк обладнання з різними функціональними вимогами на кожному рівні, тоді як Spine-Leaf вимагає уніфікованих комутаторів з підтримкою ESMР та BGP на рівні заліза. Саме тому аналіз варіантів апаратного забезпечення неможливий без попереднього визначення архітектурної моделі.

1.3 Порівняльний аналіз програмно-апаратних комплексів управління (Cisco, MikroTik, Ubiquiti)

Вибір обладнання сьогодні рідко зводиться до характеристик окремого пристрою - значну роль відіграє екосистема управління, яку пропонує виробник. Три виробники, що розглядаються в цьому розділі, представляють принципово різні підходи до того, як має виглядати адміністрування мережі.

Cisco будує свою архітектуру навколо концепції Intent-Based Networking: адміністратор формулює політику - система сама розгортає її на всі пристрої. Центральна роль тут належить Cisco DNA Center [8], а апаратна частина - комутатори серії Catalyst 9000 - проектується саме під цей контролер. Специфічні ASIC-чіпи, які це забезпечують, суттєво впливають на вартість, але натомість дають максимальну стабільність і глибоку аналітику трафіку. Це рішення для тих, хто готовий платити за автоматизацію і не хоче займатися ручним налаштуванням кожного вузла.

Під час стажування в Укренерго було зафіксовано саме такий сценарій: корпоративна мережа підприємства побудована на обладнанні Cisco Catalyst, що дозволяє централізовано керувати політиками доступу через єдиний контролер. В умовах критичної інфраструктури це виявляється принциповим - ціна відмови або некоректного налаштування вузла мережі тут незрівнянно вища, ніж в звичайному офісному середовищі. Для наочної демонстрації було розроблено спрощену модель сегменту цієї мережі у середовищі Cisco Packet Tracer (рис. 1.2): топологія включає рівень доступу на базі комутаторів Cisco Catalyst 2960-24TT, сервер моніторингу Zabbix, шлюз на базі

маршрутизатора Cisco 2911 та окремий комутатор серверної ферми. Така структура відображає реальний розподіл сегментів - користувацький трафік, серверна зона та вихід до зовнішньої мережі розділені на рівні комутації, що відповідає принципам VLAN-сегментації розглянутим у попередньому підрозділі.

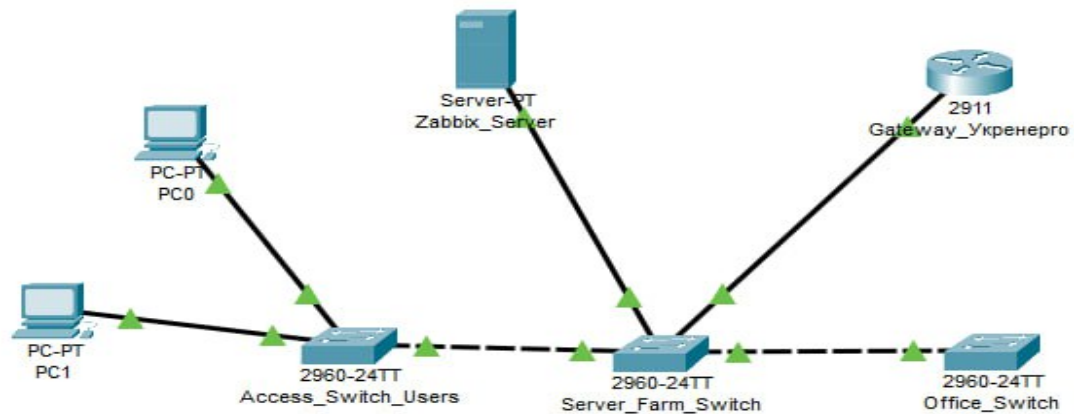


Рисунок 1.2 – Модель сегменту корпоративної мережі Укренерго

MikroTik іде в протилежний бік. RouterOS відкриває адміністратору доступ до низькорівневих налаштувань, яких у Cisco просто немає у відкритому доступі [17]. Реалізувати складну схему маршрутизації або нестандартний сценарій фільтрації трафіку тут можна на обладнанні, яке коштує в рази дешевше. Інструменти управління - WinBox і The Dude - функціональні, але не інтуїтивні. Головне обмеження: централізоване управління великою кількістю пристроїв без додаткових скриптів і налаштувань тут не передбачено "з коробки", що при масштабуванні стає відчутною проблемою.

Ubiquiti обирає третій шлях - ставку на простоту і візуалізацію. UniFi Controller дає єдиний веб-інтерфейс для всієї мережі, і більшість операцій виконується без жодного рядка команд [25]. Це особливо зручно при розгортанні мереж з великою кількістю точок доступу. Зворотній бік -

залежність від контролера: керувати окремим пристроєм поза його межами суттєво складніше, що обмежує гнучкість у нестандартних ситуаціях.

Таблиця 1.1 – Порівняльний аналіз програмно-апаратних комплексів управління

Критерій	Cisco (Enterprise)	MikroTik (SMB/Pro)	Ubiquiti (Visual/WiFi)
Складність управління	Висока (потребує сертифікації)	Висока (CLI/WinBox)	Низька (GUI-орієнтована)
Централізація	Повна (через DNA/ISE)	Часткова (The Dude/Scripts)	Повна (UniFi Controller)
Вартість заліза	Висока	Низька	Середня
Гнучкість налаштувань	Дуже висока	Екстремальна	Середня

Як видно з результатів порівняння (табл. 1.1), жоден з виробників не є універсально кращим - кожен оптимальний для свого сценарію. Cisco виправданий там, де критична автоматизація і є бюджет на ліцензії та сертифікованих спеціалістів. MikroTik - там де потрібна гнучкість при обмежених коштах і є технічна компетенція. Ubiquiti закриває задачу швидкого розгортання Wi-Fi-інфраструктури без глибокої мережевої експертизи.

Висновки до розділу 1:

Проаналізовано роль апаратного забезпечення у забезпеченні керуваності комп'ютерних мереж підприємства. Встановлено, що оптимізація апаратної бази безпосередньо впливає на продуктивність бізнес-процесів – навіть найдосконаліше програмне забезпечення працюватиме неефективно за наявності застарілого або неправильно налаштованого обладнання.

Визначено, що керуваність мережі закладається на рівні апаратного забезпечення. Підтримка VLAN (Virtual Local Area Network – віртуальна локальна мережа), SNMP, NetFlow та наявність виділених ASIC-процесорів є базовими умовами для побудови інфраструктури з повноцінними можливостями адміністрування, а не додатковими опціями.

Проведено аналіз сучасних архітектур комп'ютерних мереж. Встановлено що ієрархічна модель Core-Distribution-Access залишається стандартом для корпоративного середовища. Поширення Wi-Fi 7 суттєво підвищило вимоги до рівня доступу – підтримка Multi-Gigabit Ethernet стала необхідністю а не побажанням.

Виконано порівняльний аналіз програмно-апаратних комплексів управління трьох виробників. Cisco забезпечує максимальну автоматизацію ціною високого бюджету, MikroTik – гнучкість при обмежених коштах але з високими вимогами до кваліфікації адміністратора, Ubiquiti – простоту розгортання але з обмеженою гнучкістю поза контролером. Жоден варіант не є універсальним – вибір визначається конкретними умовами та вимогами.

Сформовано систему критеріїв оцінювання апаратного забезпечення що охоплює продуктивність, безпеку, відмовостійкість та сукупну вартість володіння. Ця система є основою для порівняльного аналізу конкретних варіантів обладнання у наступному розділі.

Обґрунтовано актуальність розробки програмного засобу для багатокритеріальної оцінки та вибору апаратного забезпечення комп'ютерних мереж підприємства.

Практичним підтвердженням зроблених висновків слугує досвід стажування в НЕК "Укренерго" де корпоративна мережа побудована на обладнанні Cisco Catalyst з централізованим управлінням. В умовах критичної енергетичної інфраструктури такий вибір є обґрунтованим – висока вартість рішення компенсується надійністю, глибиною моніторингу та можливістю централізованого контролю політик доступу.

РОЗДІЛ 2. ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТА ВИБІР АПАРАТНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КОМП'ЮТЕРНОЇ МЕРЕЖІ

2.1. Аналіз недоліків комп'ютерної мережі підприємства

Мережева інфраструктура Укренерго, змодельована в рамках переддипломної практики, базується на комутаторах Cisco Catalyst 2960-24TT та маршрутизаторі Cisco 2911. Незважаючи на те, що це обладнання свого часу було надійним рішенням, сьогодні воно має ряд суттєвих обмежень, які стають критичними для об'єкта енергетичної інфраструктури.

Перше і головне обмеження - робота виключно на рівні L2 моделі OSI. Cisco Catalyst 2960 не підтримує [5] міжвланову маршрутизацію на рівні самого комутатора. Це означає що для передачі трафіку між різними сегментами мережі - наприклад між користувацькою зоною і серверною фермою - весь трафік змушений підніматися до маршрутизатора. При зростанні навантаження це створює вузьке місце і збільшує затримки.

Друге обмеження - пропускна здатність портів. Cisco Catalyst 2960-24TT забезпечує швидкість до 1 Gbps, що на момент випуску було достатньо. Однак масове впровадження Wi-Fi 7 та зростання обсягів трафіку між серверами вимагає підтримки 10 Gbps з'єднань вже на рівні доступу, яких 2960 не має.

Третє обмеження - обмежені можливості безпеки. Cisco Catalyst 2960 підтримує лише базовий Port Security, тоді як сучасні вимоги до захисту критичної інфраструктури передбачають апаратне шифрування трафіку MACsec та динамічний контроль доступу через TrustSec. Відсутність апаратного шифрування суперечить вимогам систем управління інформаційною безпекою [2]. Без цього мережа залишається вразливою до атак на рівні канального рівня.

Четверте обмеження - відсутність повноцінного стекування. Технологія стекування в 2960 суттєво обмежена порівняно з сучасними рішеннями, що ускладнює побудову відмовостійкої інфраструктури без додаткового обладнання.

Щодо маршрутизатора Cisco 2911 - його продуктивність обмежена пропускною здатністю до 100 Mbps при включеному шифруванні, що є критичним недоліком для шлюзу мережі підприємства такого масштабу як Укренерго. Крім того, 2911 знятий з виробництва і більше не отримує оновлень безпеки від Cisco, що створює додаткові ризики для критичної інфраструктури.

Таким чином, поточна мережева інфраструктура має чотири ключові недоліки: відсутність L3 маршрутизації на рівні доступу, недостатня пропускна здатність, обмежені функції безпеки та застаріле обладнання без підтримки виробника. Саме ці недоліки визначають вимоги до нового обладнання яке буде розглянуто в наступному підрозділі.

Для більш детального аналізу варто розглянути маршрутизатор Cisco 2911 окремо. Цей пристрій відноситься до серії ISR G2 і був актуальним рішенням для середніх підприємств у період 2010-2015 років. Однак з точки зору сучасних вимог він має кілька критичних обмежень.

Продуктивність маршрутизатора суттєво падає при включенні функцій шифрування. Якщо без шифрування 2911 може обробляти до 100 Mbps трафіку, то при активованому VPN або IPSec ця цифра значно знижується, що є неприйнятним для шлюзу мережі підприємства критичної інфраструктури.

Окремою проблемою є підтримка сучасних протоколів управління. Cisco 2911 має обмежену сумісність з платформою Cisco DNA Center, що унеможлиблює його інтеграцію в єдину систему централізованого управління мережею. Для Укренерго де централізований контроль є принциповою вимогою це суттєвий недолік.

Нарешті, Cisco 2911 офіційно знятий з продажу і переведений в режим обмеженої підтримки. Це означає що нові патчі безпеки більше не випускаються, що для об'єкта критичної інфраструктури створює неприйнятні ризики кібербезпеки.

2.2. Огляд та порівняння сучасних апаратних рішень для модернізації мережі.

Виявлені в попередньому підрозділі недоліки поточної інфраструктури визначають конкретні вимоги до нового обладнання: підтримка L3 маршрутизації на рівні доступу, пропускна здатність не менше 10 Gbps, апаратне шифрування трафіку та сумісність з системами централізованого управління. На основі цих вимог розглядаються три альтернативні рішення від різних виробників.

Комутатори

Cisco Catalyst 9200 є прямим наступником [7] серії 2960 і усуває всі виявлені недоліки. Перехід на рівень L3 дозволяє виконувати міжвланову маршрутизацію безпосередньо на комутаторі без залучення маршрутизатора. Підтримка StackWise-160 забезпечує [6] об'єднання до восьми комутаторів у єдиний логічний пристрій з автоматичним перемиканням при відмові одного з них. Апаратна реалізація TrustSec та MACsec закриває питання безпеки на рівні каналного рівня. Головний недолік - висока вартість, яка може сягати 2000-3000 доларів за пристрій (табл.2.1.).

MikroTik CRS326-24G-2S+RM є повноцінним керованим комутатором з підтримкою L3 маршрутизації та 10 Gbps uplink портами. RouterOS[20] надає широкі можливості налаштування, а вартість пристрою в десять разів нижча ніж у Cisco 9200 [18,19]. Однак відсутність апаратного шифрування MACsec та обмежена підтримка корпоративних протоколів безпеки роблять його менш придатним для критичної інфраструктури. Оптимальний вибір для середнього бізнесу з обмеженим бюджетом.

Ubiquiti UniFi USW-Pro-24 орієнтований на середній сегмент і відрізняється простотою розгортання через контролер UniFi. Підтримує L3 функції та має зручний веб-інтерфейс управління. Проте як і MikroTik не має апаратного шифрування корпоративного рівня, а залежність від контролера ускладнює управління в нестандартних ситуаціях. Найкраще підходить для офісних мереж з великою кількістю точок доступу.

Маршрутизатори

Cisco ISR 4331 є актуальним представником серії ISR четвертого покоління і усуває ключові недоліки 2911. Пропускна здатність до 300 Mbps при активованому шифруванні - втричі більше ніж у попередника. Повна сумісність з Cisco DNA Center [9] дозволяє інтегрувати маршрутизатор у єдину систему централізованого управління. Модульна архітектура дає можливість розширювати функціонал без заміни всього пристрою. Пристрій отримує актуальні оновлення безпеки що критично для об'єктів критичної інфраструктури.

MikroTik RB4011iGS+RM забезпечує продуктивність маршрутизації до 4 Gbps при вартості близько 200 доларів. Підтримує всі основні протоколи маршрутизації та має вбудований 10 Gbps SFP+ порт. Однак відсутність інтеграції з корпоративними системами управління та обмежені можливості апаратного шифрування роблять його менш придатним для мережі рівня Укренерго.

Ubiquiti UniFi Gateway Pro забезпечує просте розгортання через контролер UniFi і добре інтегрується з іншим обладнанням Ubiquiti. Однак функціонал корпоративного рівня суттєво обмежений порівняно з Cisco ISR 4331.

Таблиця 2.1 – Порівняльний аналіз комутаторів

Критерій	Cisco Catalyst 2960 (поточний)	Cisco Catalyst 9200	MikroTik CRS326	Ubiquiti USW-Pro-24
Рівень OSI	L2	L3	L3	L3
Швидкість портів	1 Gbps	1/10/25 Gbps	1 Gbps / 10 Gbps uplink	1 Gbps / 10 Gbps uplink
Апаратне шифрування	Відсутнє	MACsec / TrustSec	Відсутнє	Відсутнє

Критерій	Cisco Catalyst 2960 (поточний)	Cisco Catalyst 9200	MikroTik CRS326	Ubiquiti USW-Pro-24
Стекування	Обмежене	StackWise-160	Обмежене	Відсутнє
Інтеграція з DNA Center	Часткова	Повна	Відсутня	Відсутня
Вартість	\$200-400 (вживаний)	\$2000-3000	\$200-300	\$400-600
Підходить для	Застаріле	Критична інфраструктура	Середній бізнес	Малий бізнес

Аналіз (табл. 2.1) показує що Cisco Catalyst 9200 є єдиним рішенням яке повністю відповідає вимогам критичної інфраструктури - підтримує L3 маршрутизацію, апаратне шифрування та повноцінне стекування. MikroTik CRS326 є економічно привабливою альтернативою для середнього бізнесу, однак відсутність MACsec та TrustSec робить його непридатним для мережі рівня Укренерго. Ubiquiti USW-Pro-24 оптимальний для малих офісних мереж але не відповідає корпоративним вимогам безпеки.

Таблиця 2.2 - Порівняльний аналіз маршрутизаторів

Критерій	Cisco 2911 (поточний)	Cisco ISR 4331	MikroTik RB4011	Ubiquiti UXG-Pro
Пропускна здатність	до 100 Mbps	до 300 Mbps	до 4 Gbps	до 3.5 Gbps
Апаратне шифрування	Базове	Повне	Обмежене	Обмежене
Підтримка DNA Center	Відсутня	Повна	Відсутня	Відсутня

Критерій	Cisco 2911 (поточний)	Cisco ISR 4331	MikroTik RB4011	Ubiquiti UXG-Pro
Оновлення безпеки	Знятий з підтримки	Активна підтримка	Активна підтримка	Активна підтримка
Вартість	\$200-400 (вживаний)	\$1500-2500	\$150-200	\$300-500
Підходить для	Застаріле	Критична інфраструктура	Середній бізнес	Малий бізнес

Як видно з (табл. 2.2), Cisco ISR 4331 є очевидним вибором для заміни застарілого 2911 - втричі вища продуктивність при шифруванні, активна підтримка виробника та повна інтеграція з DNA Center. MikroTik RB4011 має вражаючу пропускну здатність за низькою ціною але відсутність корпоративних функцій безпеки та інтеграції з системами управління виключає його з розгляду для Укренерго. Ubiquiti UXG-Pro підходить для простих офісних сценаріїв але не для периметру мережі критичної інфраструктури.

2.3 Обґрунтування вибору обладнання та розрахунок вартості модернізації

За результатами порівняльного аналізу проведеного в попередньому підрозділі для модернізації мережевої інфраструктури Укренерго пропонується наступне рішення: заміна комутаторів Cisco Catalyst 2960 на Cisco Catalyst 9200 та маршрутизатора Cisco 2911 на Cisco ISR 4331. Такий вибір обумовлений кількома ключовими факторами.

По-перше, Cisco Catalyst 9200 є єдиним з розглянутих варіантів який повністю відповідає вимогам безпеки для об'єктів критичної інфраструктури - апаратне шифрування MACsec [13] та динамічний контроль доступу TrustSec є обов'язковими вимогами для мережі енергетичного підприємства.

По-друге, перехід на L3 комутацію дозволить розвантажити маршрутизатор і зменшити затримки при передачі трафіку між сегментами мережі.

По-третє, підтримка StackWise-160 забезпечить відмовостійкість на рівні доступу без додаткових витрат на резервне обладнання.

Щодо маршрутизатора - Cisco ISR 4331 забезпечує продуктивність до 300 Mbps при активованому шифруванні, що втричі перевищує можливості поточного Cisco 2911. Повна сумісність з Cisco DNA Center дозволить інтегрувати всю мережеву інфраструктуру в єдину систему централізованого управління.

Для оцінки економічної доцільності модернізації розраховується сукупна вартість володіння (TCO) на період п'яти років.

Таблиця 2.3 – Розрахунок вартості модернізації

Стаття витрат	Поточне рішення	Після модернізації
Комутатори (3 шт.)	\$900 (вживані 2960)	\$7500 (нові 9200)
Маршрутизатор	\$300 (вживаний 2911)	\$2000 (новий ISR 4331)
Ліцензії та підтримка (5 років)	\$1000	\$3500
Витрати на обслуговування (5 років)	\$4000	\$2000
Ризики простою (5 років)	\$8000	\$1000
Загальний TCO (5 років)	\$14200	\$16000

Аналіз (табл. 2.3) показує що різниця в TCO за п'ять років становить лише близько 1800 доларів на користь поточного рішення. Однак ця різниця нівелюється якщо врахувати що поточне обладнання знято з підтримки виробника і не отримує оновлень безпеки. Для об'єкта критичної

інфраструктури потенційні втрати від одного серйозного інциденту кібербезпеки або тривалого простою мережі багаторазово перевищують різницю у вартості обладнання.

Таким чином модернізація мережевої інфраструктури Укренерго на базі Cisco Catalyst 9200 та Cisco ISR 4331 є економічно обґрунтованим рішенням яке забезпечує відповідність сучасним вимогам безпеки, продуктивності та керованості мережі критичної інфраструктури.

Висновки до розділу 2:

Аналіз недоліків поточної мережевої інфраструктури НЕК "Укренерго" показав що поточне обладнання - комутатори Cisco Catalyst 2960 та маршрутизатор Cisco 2911 - має чотири ключові обмеження: робота виключно на рівні L2, недостатня пропускна здатність, відсутність апаратного шифрування та застаріла програмна база без підтримки виробника. Для об'єкта критичної енергетичної інфраструктури це створює неприйнятні ризики як з точки зору продуктивності так і кібербезпеки.

Порівняльний аналіз трьох виробників - Cisco, MikroTik та Ubiquiti – підтвердив, що лише рішення Cisco повністю відповідає вимогам мережі такого рівня. MikroTik є економічно привабливою альтернативою для середнього бізнесу, Ubiquiti - для малих офісних мереж, однак жоден з них не забезпечує необхідного рівня безпеки та інтеграції з корпоративними системами управління.

Розрахунок ТСО показав що різниця у вартості між поточним та модернізованим рішенням за п'ять років становить близько 1800 доларів - незначна сума порівняно з потенційними втратами від інциденту кібербезпеки або тривалого простою мережі критичної інфраструктури.

Результатом розділу є обґрунтований вибір обладнання для модернізації: Cisco Catalyst 9200 на рівні доступу та Cisco ISR 4331 як шлюз мережі. Практична реалізація цього рішення буде продемонстрована в наступному розділі засобами Cisco Packet Tracer.

Виконано багатоваріантний вибір апаратного забезпечення - для кожного компонента мережі розглянуто три альтернативні варіанти від різних виробників. За результатами порівняльного аналізу з урахуванням технічних вимог, вимог безпеки та економічних показників обрано оптимальне рішення для мережі критичної інфраструктури.

РОЗДІЛ 3. БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНА ОЦІНКА ВАРІАНТІВ АПАРАТНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КОМП'ЮТЕРНОЇ МЕРЕЖІ

3.1. Цільова установка

Сучасні підприємства стикаються з необхідністю регулярного оновлення мережевої інфраструктури в умовах постійного зростання вимог до продуктивності, безпеки та керованості мереж. Прийняття рішення про вибір апаратного забезпечення є складною багатокритеріальною задачею, оскільки жоден варіант обладнання не є ідеальним за всіма параметрами одночасно. Традиційний підхід до вибору обладнання на основі суб'єктивного порівняння характеристик має суттєві недоліки - він не враховує відносну важливість різних критеріїв та не забезпечує математично обґрунтованого результату. Актуальність застосування методів багатокритеріальної оцінки для вибору програмних та апаратних рішень підтверджується сучасними дослідженнями [4].

Для об'єктів критичної інфраструктури, таких як енергетичні підприємства, ця проблема набуває особливої гостроти [3]. Некоректний вибір обладнання може призвести до збоїв у роботі мережі, що в умовах енергетичної інфраструктури означає пряму загрозу для систем електропостачання споживачів. Водночас надмірні витрати на обладнання з характеристиками що перевищують реальні потреби є невиправданим використанням бюджету підприємства.

Метою розробки програмного інструментарію є автоматизація процесу багатокритеріальної оцінки варіантів апаратного забезпечення комп'ютерної мережі підприємства. Програмний засіб реалізує логіко-математичну модель на основі методу TOPSIS та забезпечує підтримку прийняття рішень при виборі мережевого обладнання з урахуванням вимог критичної інфраструктури.

Розроблений програмний засіб вирішує наступні задачі. По-перше, формалізація процесу оцінювання - всі кроки від визначення критеріїв до отримання підсумкового рейтингу виконуються за чітким математичним

алгоритмом що виключає суб'єктивність. По-друге, врахування мінімальних вимог - програма автоматично відсіває варіанти що не відповідають мінімально допустимим значенням профілю апаратного засобу. По-третє, комплексне оцінювання - метод TOPSIS дозволяє одночасно враховувати відхилення від ідеального та найгіршого рішення що забезпечує більш точний результат порівняно з методом простої зваженої суми. По-четверте, прозорість результату - користувач бачить не лише підсумковий рейтинг але й проміжні розрахунки що дозволяє перевірити обґрунтованість рекомендації.

Об'єктом автоматизації є процес вибору мережевого комутаційного обладнання та маршрутизаторів для корпоративної мережі підприємства. Предметом розробки є програмний засіб що реалізує метод TOPSIS для багатокритеріальної оцінки апаратних засобів з урахуванням профілю вимог до обладнання.

Практична цінність програмного засобу полягає в тому що він може бути використаний ІТ-спеціалістами та інженерами мережевої інфраструктури для обґрунтованого вибору обладнання при плануванні модернізації корпоративної мережі. Результати роботи програми є документально підтвердженим обґрунтуванням вибору що важливо при погодженні бюджету на закупівлю обладнання з керівництвом підприємства.

3.2. Функції програми

Програмний засіб реалізує п'ять основних функцій які відповідають етапам процесу багатокритеріальної оцінки апаратного забезпечення.

Функція 1 - Формування інформаційної платформи

Користувач вводить перелік апаратних засобів що розглядаються із зазначенням назви, ідентифікатора та виробника. Далі визначає критерії оцінювання з кодами та ваговими коефіцієнтами, встановлює шкалу оцінювання та формує профіль апаратного засобу з ідеальними та мінімально допустимими значеннями по кожному критерію. Саме ці дані є вхідними для

всіх подальших розрахунків. Коректність сформованої інформаційної платформи безпосередньо визначає якість кінцевого результату оцінювання.

Профіль апаратного засобу включає два типи граничних значень по кожному критерію. Ідеальне значення відповідає характеристикам еталонного пристрою що повністю задовольняє всі вимоги критичної інфраструктури - воно використовується методом TOPSIS як точка відліку при визначенні ідеального рішення v^+ (формула 3.11). Мінімально допустиме значення є нижньою межею вимог - пристрої що не досягають цього порогу хоча б по одному критерію автоматично виключаються з розгляду до початку розрахунку TOPSIS (формула 3.6).

Функція 2 - Встановлення значень критеріальних показників

На основі сформованої шкали оцінювання експерт виставляє бальні оцінки для кожного апаратного засобу по кожному критерію. Програма формує матрицю оцінок розміром $n \times m$ де n - кількість альтернатив, m - кількість критеріїв. Оцінювання виконується методом безпосереднього експертного оцінювання - експерт порівнює реальні технічні характеристики пристрою з описом шкали і виставляє відповідний бал від 1 до 5 (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 Шкала оцінювання критеріїв

Бал	Оцінка	Опис
5	Відмінно	Повністю відповідає вимогам критичної інфраструктури із значним запасом
4	Дуже добре	Відповідає вимогам із невеликим запасом для розширення
3	Задовільно	Відповідає поточним вимогам без запасу
2	Погано	Частково відповідає вимогам, є суттєві обмеження
1	Неприйнятно	Не відповідає мінімальним вимогам

Застосування єдиної шкали для всіх критеріїв забезпечує об'єктивність порівняльного оцінювання незалежно від фізичної одиниці виміру критерію.

Функція 3 - Відсів варіантів

Програма автоматично порівнює оцінки кожного апаратного засобу з мінімально допустимими значеннями профілю. Перевірка виконується по кожному критерію послідовно. Якщо хоча б по одному критерію оцінка нижча за мінімально допустиме значення - апаратний засіб виключається з подальшого розгляду. Користувач отримує повідомлення про причину виключення із зазначенням конкретного критерію який не відповідає вимогам. До наступного етапу передаються лише варіанти що повністю відповідають профілю вимог.

Функція 4 - Встановлення ваги критеріїв

Програма реалізує метод аналізу ієрархій для математично обґрунтованого розрахунку вагових коефіцієнтів критеріїв. Користувач заповнює матрицю попарних порівнянь критеріїв за шкалою від 1 до 9 де кожне значення відображає відносну важливість одного критерію порівняно з іншим. На основі цієї матриці програма розраховує нормалізований власний вектор який визначає вагу кожного критерію. Такий підхід забезпечує математично обґрунтований розподіл ваг на відміну від суб'єктивного їх призначення.

Функція 5 - Комплексна оцінка за методом TOPSIS

Програма виконує повний розрахунок методу TOPSIS у п'ять кроків: нормалізація матриці оцінок, зважування нормалізованих значень, визначення ідеального та найгіршого рішення, розрахунок евклідових відстаней від кожної альтернативи до ідеальної та найгіршої точок, обчислення підсумкового показника відносної близькості S_i . Результат відображається у вигляді рейтингової таблиці з рекомендацією оптимального варіанту апаратного забезпечення.

3.3 Діаграма прецедентів програмного засобу багатокритеріальної оцінки апаратного забезпечення

Діаграма прецедентів є одним з основних засобів UML-моделювання і відображає функціональні вимоги до програмного засобу з точки зору

кінцевого користувача. На відміну від діаграми класів яка описує внутрішню структуру системи, діаграма прецедентів показує що система робить і для кого - без деталізації способу реалізації.

Основними елементами діаграми прецедентів є актори та прецеденти. Актор - це зовнішня сутність що взаємодіє з системою: людина, інша програма або апаратний пристрій. Прецедент - це завершена послідовність дій яку система виконує у відповідь на запит актора і яка приносить йому конкретний результат. Зв'язки між акторами та прецедентами показують хто ініціює яку дію.

У програмному засобі багатокритеріальної оцінки апаратного забезпечення визначено п'ять прецедентів що відповідають п'яти етапам процесу оцінювання описаним у підрозділі 3.2. Кожен прецедент відповідає одній функції програми - від формування інформаційної платформи до відображення підсумкового рейтингу.

Діаграма прецедентів (рис. 3.3) відображає функціональні можливості програмного засобу з точки зору взаємодії акторів із системою. Визначено двох акторів: ІТ-спеціаліст та Система. Перенесла над рисунком

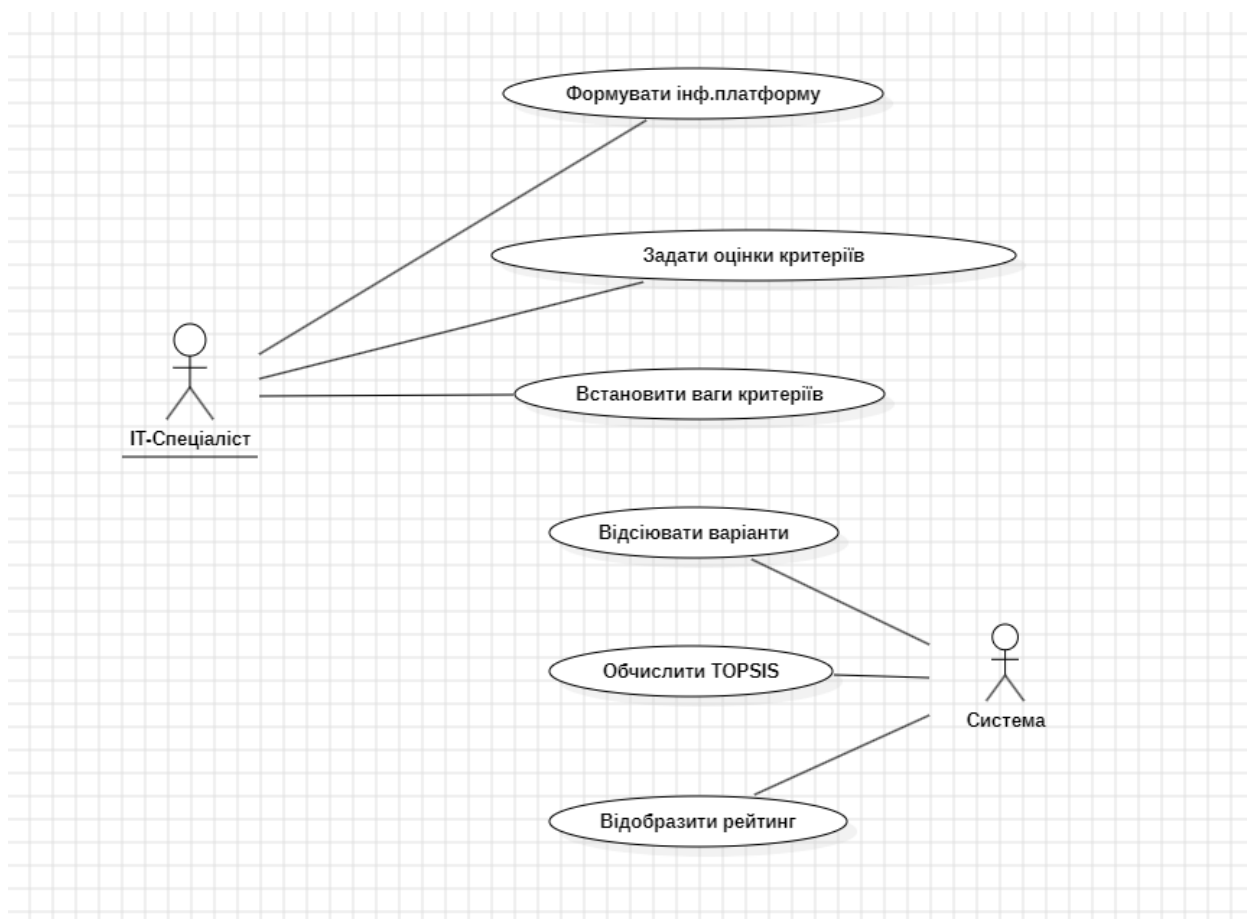


Рисунок 3.3 – Діаграма прецедентів

ІТ-спеціаліст є основним актором і ініціює три прецеденти вручну. На початку роботи він формує інформаційну платформу - вводить перелік апаратних засобів, визначає критерії оцінювання та встановлює профіль вимог. Після цього задає оцінки критеріїв для кожного пристрою відповідно до п'ятибальної шкали. Потім встановлює ваги критеріїв через заповнення матриці попарних порівнянь методу АНП.

Актор Система є допоміжним і виконує три прецеденти автоматично після отримання вхідних даних від ІТ-спеціаліста. Система відсіює варіанти апаратних засобів що не відповідають мінімально допустимим значенням профілю, після чого виконує комплексну оцінку за методом TOPSIS та відображає підсумковий рейтинг альтернатив з рекомендацією оптимального варіанту.

Послідовний характер взаємодії відображає логіку роботи програми: кожен наступний прецедент може бути виконаний лише після успішного завершення попереднього. Такий підхід виключає можливість некоректного використання системи та гарантує отримання обґрунтованого результату оцінювання.

3.4 Діаграма діяльності алгоритму роботи програмного засобу багатокритеріальної оцінки апаратного забезпечення

Діаграма діяльності є засобом UML-моделювання що відображає динамічний аспект роботи системи - послідовність дій, умови переходу між ними та паралельні потоки виконання. На відміну від діаграми прецедентів яка показує що система робить, діаграма діяльності показує як саме виконується кожен процес - крок за кроком від початку до завершення.

Основними елементами діаграми діяльності є дії, розгалуження та початкова і кінцева точки. Дія - це атомарний крок обробки що виконується системою або користувачем. Розгалуження (ромб) позначає точку прийняття рішення де подальший шлях залежить від умови. Початкова точка (заповнене коло) позначає старт процесу, кінцева точка (коло з обідком) - його завершення.

У програмному засобі багатокритеріальної оцінки діаграма діяльності охоплює повний цикл роботи - від введення вхідних даних ІТ-спеціалістом до відображення підсумкового рейтингу. Діаграма містить десять дій та два розгалуження що відповідають двом ключовим точкам прийняття рішень: перевірці відповідності пристрою профілю вимог та перевірці наявності допущених варіантів після відсіву.

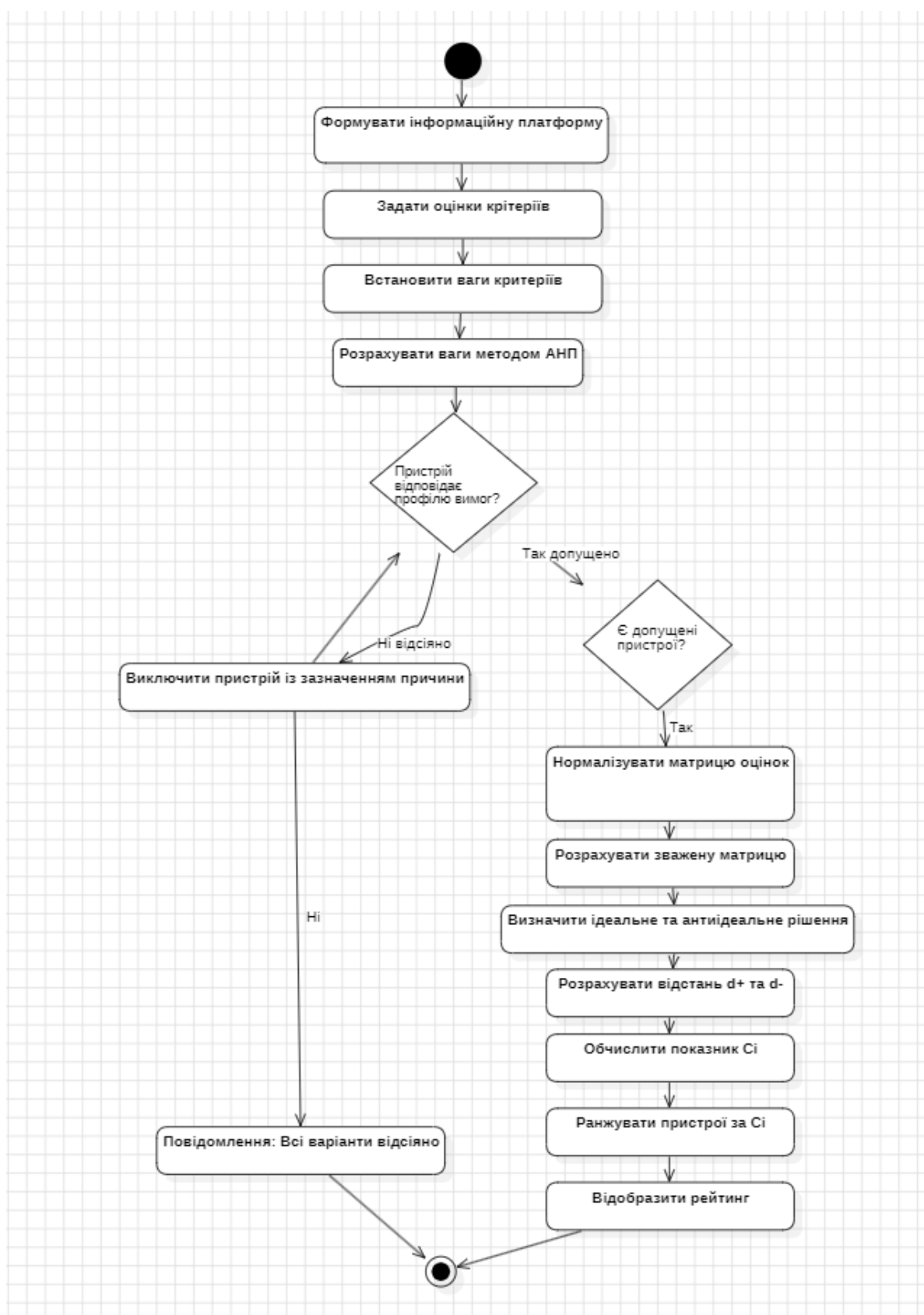


Рисунок 3.4 – Діаграма діяльності алгоритму оцінки обладнання методом TOPSIS

Діаграма діяльності програмного засобу багатокритеріальної оцінки (рис. 3.4) відображає послідовність дій системи від введення вхідних даних до отримання підсумкового рейтингу апаратного забезпечення.

Діаграма містить такі елементи (табл. 3.2):

Таблиця 3.2 – Елементи діаграми діяльності

№	Елемент	Тип	Опис
1	Початок	Початкова точка	Запуск програмного засобу
2	Формувати інформаційну платформу	Дія	Введення пристроїв, критеріїв, профілю
3	Задати оцінки критеріїв	Дія	Заповнення матриці оцінок $n \times m$
4	Встановити ваги критеріїв	Дія	Заповнення матриці попарних порівнянь
5	Розрахувати ваги методом АНП	Дія	Автоматичний розрахунок за формулою (3.8)
6	Пристрій відповідає профілю?	Розгалуження	Перевірка мінімальних вимог за формулою (3.6)
7	Виключити пристрій	Дія	Відсів із зазначенням причини
8	Є допущені пристрої?	Розгалуження	Перевірка підмножини A^*
9	Вивести повідомлення	Дія	Всі варіанти відсіяно - завершення
10	Нормалізувати матрицю оцінок	Дія	Розрахунок за формулою (3.9)
11	Розрахувати зважену матрицю	Дія	Розрахунок за формулою (3.10)
12	Визначити ідеальне та	Дія	Формули (3.11) та (3.12)

№	Елемент	Тип	Опис
	антиідеальне рішення		
13	Розрахувати відстані d^+ та d^-	Дія	Формули (3.13) та (3.14)
14	Обчислити показник C_i	Дія	Розрахунок за формулою (3.15)
15	Ранжувати пристрої за C_i	Дія	Сортування за формулою (3.16)
16	Відобразити рейтинг	Дія	Виведення результатів користувачу
17	Кінець	Кінцева точка	Завершення роботи програми

Процес розпочинається з формування інформаційної платформи - ІТ-спеціаліст вводить перелік пристроїв, визначає критерії оцінювання та профіль мінімально допустимих вимог. Після цього виставляються бальні оцінки для кожного пристрою по кожному критерію та заповнюється матриця попарних порівнянь для розрахунку вагових коефіцієнтів методом АНП.

Перше розгалуження реалізує функцію відсіву варіантів - система перевіряє кожен пристрій на відповідність профілю мінімальних вимог. Пристрій що не відповідає хоча б одному критерію виключається із зазначенням конкретної причини. Перевірка виконується для всіх пристроїв послідовно.

Друге розгалуження перевіряє чи залишилися допущені пристрої після відсіву. Якщо всі варіанти виключено - система виводить відповідне повідомлення і завершує роботу. Якщо допущені пристрої є - виконується послідовний розрахунок методом TOPSIS: нормалізація матриці оцінок, побудова зваженої матриці, визначення ідеального та антиідеального

рішення, розрахунок евклідових відстаней та обчислення показника відносної близькості C_i за формулою (3.15).

Завершальним етапом є ранжування допущених пристроїв за спаданням показника C_i та відображення підсумкового рейтингу з рекомендацією оптимального варіанту апаратного забезпечення.

3.5 Діаграма класів програмного засобу багатокритеріальної оцінки апаратного забезпечення

Діаграма класів є центральним засобом UML-моделювання що відображає статичну структуру програмного засобу - з яких класів він складається, які дані зберігає кожен клас та як класи пов'язані між собою. На відміну від діаграми діяльності яка показує послідовність дій, діаграма класів показує архітектуру системи - її будову а не поведінку.

Основними елементами діаграми класів є класи та зв'язки між ними. Кожен клас має три секції: назву, атрибути (дані що зберігає клас) та методи (дії що клас виконує). Атрибути і методи позначаються знаком "+" якщо вони публічні - доступні іншим класам, або знаком "-" якщо вони приватні - доступні лише всередині класу.

Зв'язки між класами відображають відносини між об'єктами системи. Асоціація (суцільна стрілка) означає що один клас використовує інший. Композиція (стрілка з ромбом) означає що один клас є частиною іншого і не може існувати без нього. Числа біля стрілок показують кількісні відношення - наприклад "1 до 0..*" означає що одному об'єкту може відповідати довільна кількість інших.

Програмний засіб багатокритеріальної оцінки апаратного забезпечення складається з шести класів що відповідають основним сутностям предметної області: Система, ТипПристрою, Пристрій, КритерійОцінювання, ПрофільКритерію та ЗначенняПоказника. Кожен клас має чітко визначену відповідальність що забезпечує модульність та зрозумілість архітектури програмного засобу.

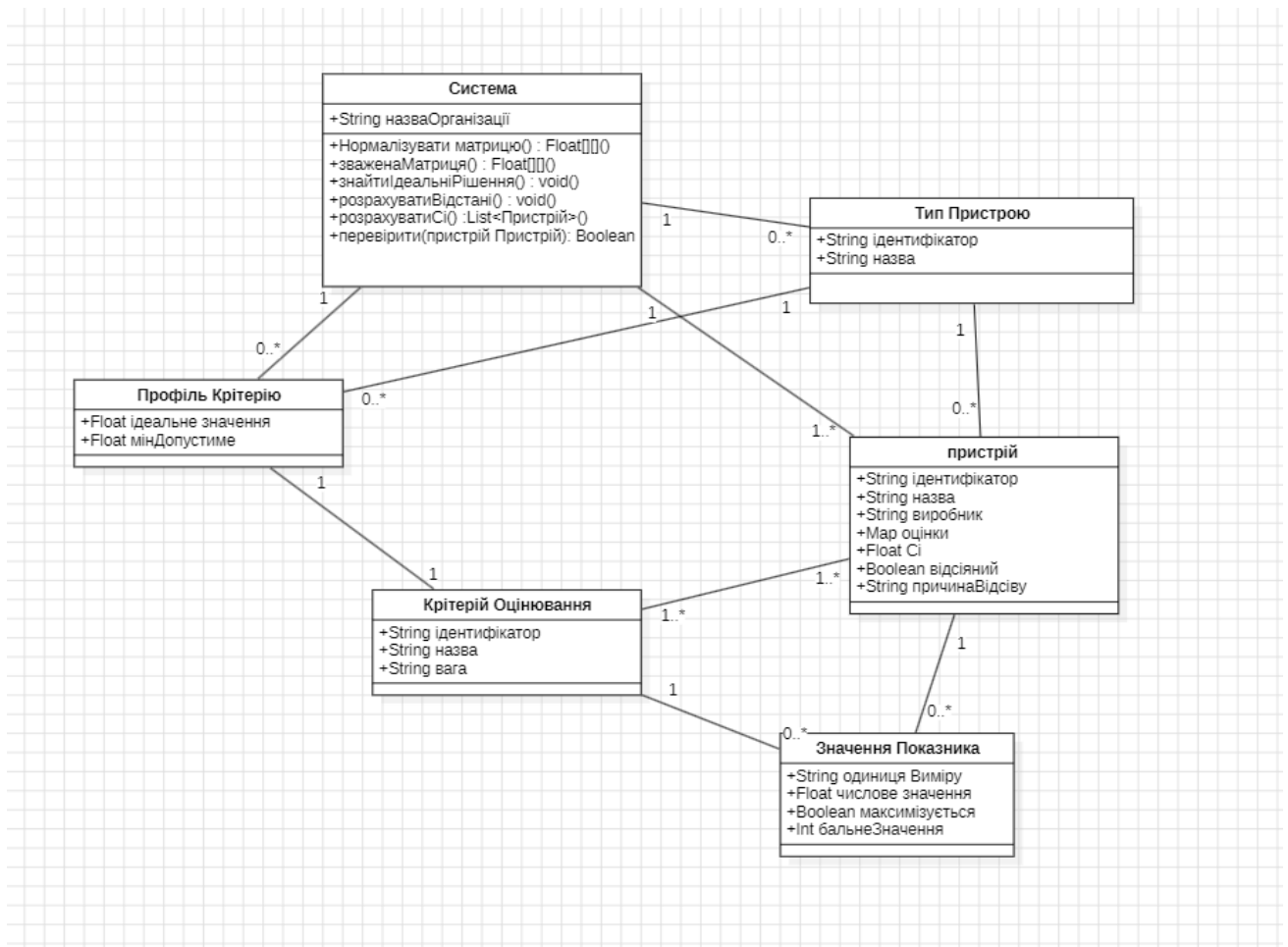


Рисунок 3.5 – Діаграма класів

Діаграма класів програмного засобу багатокритеріальної оцінки (рис. 3.5) відображає структуру основних класів системи та зв'язки між ними.

Центральним класом є Система, який реалізує основну обчислювальну логіку. Він послідовно виконує шість операцій: нормалізацію матриці оцінок, зважування, визначення ідеальних рішень, розрахунок відстаней, обчислення підсумкового показника Ci та перевірку відповідності пристроїв мінімальним вимогам профілю.

Клас ТипПристрою визначає категорію обладнання - комутатор або маршрутизатор. Один тип може включати багато пристроїв, що відображається зв'язком один до багатьох між ТипПристрою та Пристрій.

Клас Пристрій зберігає повну інформацію про апаратний засіб: ідентифікатор, назву, виробника, оцінки по критеріях виставлені експертом, а також результати оцінювання - показник Сі, місце в рейтингу, ознаку відсіву та причину відсіву якщо пристрій не відповідає мінімальним вимогам.

Клас КритерійОцінювання описує один критерій з його ідентифікатором, назвою та ваговим коефіцієнтом. Один критерій може мати багато значень показників - по одному для кожного пристрою.

Клас ПрофільКритерію зберігає граничні значення для конкретного критерію: ідеальне значення та мінімально допустиме. Система використовує ці значення при перевірці пристроїв - якщо оцінка пристрою по будь-якому критерію нижча за мінДопустиме, пристрій виключається з подальшого розгляду.

Клас ЗначенняПоказника зберігає конкретну оцінку пристрою за певним критерієм: одиницю виміру, числове значення, ознаку максимізації та бальне значення за шкалою від 1 до 5. Зв'язок багато до багатьох між Пристрій та КритерійОцінювання реалізується саме через цей клас - кожна комбінація пристрій-критерій має своє ЗначенняПоказника.

Для ілюстрації реалізації прецедентів при розв'язанні задачі оцінки апаратного забезпечення мережі НЕК "Укренерго" розглянемо взаємодію класів на конкретному прикладі.

Об'єкт класу Система створюється з атрибутом назваОрганізації = "НЕК Укренерго". Об'єкт класу ТипПристрою з назвою "Комутатор" пов'язується з чотирма об'єктами класу Пристрій - SW-01 (Cisco Catalyst 2960), SW-02 (Cisco Catalyst 9200), SW-03 (MikroTik CRS326) та SW-04 (Ubiquiti USW-Pro-24).

Для кожного пристрою створюється шість об'єктів класу ЗначенняПоказника - по одному для кожного критерію оцінювання. Наприклад для SW-02 об'єкт ЗначенняПоказника по критерію K1 матиме: одиницяВиміру = "Gbps", числовеЗначення = 5, максимізується = true, бальнеЗначення = 5.

Шість об'єктів класу ПрофільКритерію зберігають граничні значення - наприклад для К3 (підтримка L3): $\text{ідеальнеЗначення} = 5$, $\text{мінДопустиме} = 3$. Коли Система викликає метод перевірити() для SW-01 - оцінка по К3 дорівнює 1 що менше за $\text{мінДопустиме} = 3$, тому SW-01 отримує відсіяний = true та причинаВідсіву = "К3: оцінка 1 < мінімум 3".

Після відсіву Система виконує метод розрахуватиCi() для допущених пристроїв SW-02, SW-03, SW-04. За результатами розрахунку SW-02 отримує $C_i = 1.000$ та місце = 1, SW-03 - $C_i = 0.065$ та місце = 2, SW-04 - $C_i = 0.053$ та місце = 3.

3.6 Формування інформаційної платформи

Для проведення багатокритеріальної оцінки апаратного забезпечення комп'ютерної мережі необхідно сформувати інформаційну платформу яка включає чотири складові: перелік альтернативних варіантів обладнання, систему критеріїв порівняльного оцінювання, шкалу оцінювання критеріїв та профіль апаратного засобу.

3.6.1. Альтернативні варіанти апаратних засобів

Для порівняльного аналізу визначено вісім альтернативних варіантів апаратного забезпечення - чотири комутатори та чотири маршрутизатори (табл. 3.3).

Таблиця 3.3 – Альтернативні варіанти апаратних засобів

Ідентифікатор	Назва	Виробник
SW-01	Cisco Catalyst 2960-24TT	Cisco Systems
SW-02	Cisco Catalyst 9200	Cisco Systems
SW-03	MikroTik CRS326-24G-2S+RM	MikroTik
SW-04	Ubiquiti UniFi USW-Pro-24	Ubiquiti
RT-01	Cisco 2911	Cisco Systems
RT-02	Cisco ISR 4331	Cisco Systems
RT-03	MikroTik RB4011iGS+RM	MikroTik

Ідентифікатор	Назва	Виробник
RT-04	Ubiquiti UniFi Gateway Pro	Ubiquiti

Комутатори позначені ідентифікаторами SW, маршрутизатори - RT. SW-01 та RT-01 є поточним обладнанням мережі що розглядається, решта варіантів - альтернативи для модернізації.

3.6.2. Критерії порівняльного оцінювання

Для оцінювання апаратних засобів визначено шість критеріїв які охоплюють ключові аспекти вибору мережевого обладнання для критичної інфраструктури (табл. 3.4).

Таблиця 3.4 – Критерії порівняльного оцінювання комутаторів

Код	Назва критерію	Одиниця виміру	Вага
K1	Максимальна пропускна здатність	Gbps	0.25
K2	Швидкість пересилання пакетів	Mpps	0.20
K3	Підтримка L3 маршрутизації	1/0	0.20
K4	Наявність апаратного шифрування	1/0	0.25
K5	Підтримка стекування	1/0	0.15
K6	Вартість	USD	0.10

Найвищу вагу мають критерії пропускної здатності та апаратного шифрування - по 0.25, що відображає пріоритети безпеки та продуктивності для мережі критичної інфраструктури.

Таблиця 3.5 – Критерії порівняльного оцінювання маршрутизаторів

Код	Назва критерію	Одиниця виміру	Вага
K1	Пропускна здатність при шифруванні	Mbps	0.25
K2	Продуктивність маршрутизації	Mpps	0.20
K3	Підтримка DNA Center	1/0	0.20
K4	Наявність апаратного шифрування	1/0	0.25
K5	Активна підтримка виробника	1/0	0.10

Код	Назва критерію	Одиниця виміру	Вага
К6	Вартість	USD	0.10

Аналогічно комутаторам (табл. 3.5), найвищу вагу отримують пропускна здатність при шифруванні та наявність апаратного захисту, оскільки маршрутизатор є точкою виходу мережі і першою лінією захисту периметру.

3.6.3. Профіль апаратного засобу

Профіль комутатора з ідеальними та мінімально допустимими значеннями по кожному критерію наведено в (табл. 3.6).

Таблиця 3.6 – Профіль комутатора

Критерій	Ідеальне значення	Мінімально допустиме
К1 Пропускна здатність	1000+ Gbps	100 Gbps
К2 Швидкість пересилання	100+ Mpps	20 Mpps
К3 Підтримка L3	1	1
К4 Апаратне шифрування	1	0
К5 Стекування	1	0
К6 Вартість	мінімальна	до \$3000

Мінімально допустиме значення К3 встановлено на рівні 1 - підтримка L3 маршрутизації є обов'язковою вимогою і комутатори без неї автоматично виключаються з розгляду.

Профіль маршрутизатора наведено в (табл. 3.7).

Таблиця 3.7 – Профіль маршрутизатора

Критерій	Ідеальне значення	Мінімально допустиме
К1 Пропускна здатність при шифруванні	300+ Mbps	100 Mbps
К2 Продуктивність маршрутизації	5+ Mpps	1 Mpps
К3 Підтримка DNA Center	1	0
К4 Апаратне шифрування	1	1

Критерій	Ідеальне значення	Мінімально допустиме
К5 Підтримка виробника	1	1
К6 Вартість	мінімальна	до \$2500

Критерії К4 та К5 мають мінімально допустиме значення 1 - апаратне шифрування та активна підтримка виробника є обов'язковими для маршрутизатора мережі енергетичного підприємства.

3.6.4. Шкала оцінювання критеріїв

Для кожного критерію застосовується п'ятибальна шкала оцінювання (табл. 3.8).

Таблиця 3.8 – Шкала оцінювання критеріїв

Бали	Оцінка	Опис
5	Відмінно	Повністю відповідає вимогам критичної інфраструктури із значним запасом
4	Дуже добре	Відповідає вимогам із невеликим запасом для розширення
3	Задовільно	Відповідає поточним вимогам без запасу
2	Погано	Частково відповідає вимогам, є суттєві обмеження
1	Неприпустимо	Не відповідає мінімальним вимогам

Дана шкала застосовується однаково для всіх критеріїв та всіх альтернативних варіантів обладнання що забезпечує об'єктивність порівняльного оцінювання.

3.7. Встановлення значень критеріальних показників

На даному етапі експерт виставляє бальні оцінки для кожного апаратного засобу по кожному критерію відповідно до шкали оцінювання визначеної у підрозділі 3.6.4. Результатом є матриця оцінок розміром $n \times m$ де n - кількість пристроїв, m - кількість критеріїв (табл. 3.9).

Оцінювання виконується методом безпосереднього експертного оцінювання - експерт порівнює реальні технічні характеристики пристрою з описом шкали і виставляє відповідний бал від 1 до 5. Основою для виставлення оцінок є порівняльний аналіз технічних характеристик обладнання проведений у розділі 2.

Таблиця 3.9 – Матриця оцінок комутаторів

Пристрій	K1	K2	K3	K4	K5	K6
SW-01 Cisco Catalyst 2960	2	2	1	1	2	5
SW-02 Cisco Catalyst 9200	5	5	5	5	5	1
SW-03 MikroTik CRS326	3	3	4	1	2	4
SW-04 Ubiquiti USW-Pro-24	3	3	4	1	1	3

Обґрунтування оцінок комутаторів:

SW-01 отримав низькі оцінки по K3 (підтримка L3) та K4 (апаратне шифрування) оскільки Cisco Catalyst 2960 працює виключно на рівні L2 і не підтримує апаратне шифрування MACsec. Висока оцінка по K6 (вартість) пояснюється низькою ціною вживаного обладнання.

SW-02 отримав максимальні оцінки по всіх критеріях крім вартості - Cisco Catalyst 9200 повністю відповідає вимогам критичної інфраструктури і є найдорожчим варіантом.

SW-03 та SW-04 отримали середні оцінки - обидва підтримують L3 маршрутизацію але не мають апаратного шифрування корпоративного рівня MACsec та TrustSec.

Матриця оцінок маршрутизаторів наведена в (табл. 3.10).

Таблиця 3.10 – Матриця оцінок маршрутизаторів

Пристрій	K1	K2	K3	K4	K5	K6
RT-01 Cisco 2911	2	2	1	2	1	5
RT-02 Cisco ISR 4331	5	4	5	5	5	1
RT-03 MikroTik RB4011	4	5	1	2	4	5

Пристрій	K1	K2	K3	K4	K5	K6
RT-04 Ubiquiti Gateway Pro	4	3	1	2	4	4

Обґрунтування оцінок маршрутизаторів:

RT-01 отримав критично низькі оцінки по K3 (підтримка DNA Center) та K5 (підтримка виробника) - Cisco 2911 знятий з підтримки виробника і не інтегрується з сучасними системами централізованого управління.

RT-02 отримав максимальні або близькі до максимальних оцінки по всіх критеріях - Cisco ISR 4331 забезпечує продуктивність до 300 Mbps при шифруванні та повністю підтримується виробником.

RT-03 та RT-04 мають хорошу пропускну здатність але отримали низькі оцінки по K3 та K4 через відсутність підтримки DNA Center та обмежені можливості апаратного шифрування.

3.8. Встановлення ваг критеріїв

Для математично обґрунтованого визначення вагових коефіцієнтів критеріїв застосовується метод аналізу ієрархій (АНП). На відміну від суб'єктивного призначення ваг, метод АНП базується на попарному порівнянні критеріїв між собою що забезпечує узгодженість та обґрунтованість отриманих коефіцієнтів.

Експерт заповнює матрицю попарних порівнянь за шкалою від 1 до 9 де кожне значення відображає відносну важливість одного критерію порівняно з іншим. Значення 1 означає що критерії однаково важливі, значення 9 - абсолютна перевага одного критерію над іншим. Матриця є оберненосиметричною: якщо K1 вдвічі важливіший за K2 то K2 вдвічі менш важливий за K1 (табл. 3.11).

Таблиця 3.11 – Матриця попарних порівнянь критеріїв комутаторів

	K1	K2	K3	K4	K5	K6
K1	1	2	1	1	3	3
K2	1/2	1	1	1/2	2	3

	K1	K2	K3	K4	K5	K6
K3	1	1	1	1	3	3
K4	1	2	1	1	3	3
K5	1/3	1/2	1/3	1/3	1	2
K6	1/3	1/3	1/3	1/3	1/2	1

Розрахунок вагових коефіцієнтів виконується у два кроки. Спочатку нормалізується кожен стовпець матриці - кожне значення ділиться на суму свого стовпця. Потім для кожного рядка обчислюється середнє значення нормалізованих елементів - це і є ваговий коефіцієнт критерію (табл. 3.12).

Таблиця 3.12 – Розраховані ваги критеріїв комутаторів

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	Вага w_j
K1	0.245	0.294	0.261	0.273	0.231	0.200	0.238
K2	0.122	0.147	0.261	0.136	0.154	0.200	0.160
K3	0.245	0.147	0.261	0.273	0.231	0.200	0.213
K4	0.245	0.294	0.261	0.273	0.231	0.200	0.238
K5	0.082	0.074	0.087	0.091	0.077	0.133	0.086
K6	0.082	0.049	0.087	0.091	0.038	0.067	0.064

Отримані ваги підтверджують пріоритети визначені у підрозділі 3.6.2 - критерії K1 та K4 мають найвищу вагу по 0.238, що відповідає вимогам безпеки та продуктивності мережі критичної інфраструктури.

Матриця попарних порівнянь критеріїв маршрутизаторів наведена в (табл. 3.13).

Таблиця 3.13 – Матриця попарних порівнянь критеріїв маршрутизаторів

	K1	K2	K3	K4	K5	K6
K1	1	2	1	1	3	3
K2	1/2	1	1/2	1/2	2	3
K3	1	2	1	1	2	3
K4	1	2	1	1	3	3
K5	1/3	1/2	1/2	1/3	1	2
K6	1/3	1/3	1/3	1/3	1/2	1

Розраховані ваги критеріїв маршрутизаторів наведені в (табл. 3.14).

Таблиця 3.14 – Розраховані ваги критеріїв маршрутизаторів

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	Вага w_j
K1	0.245	0.256	0.231	0.267	0.261	0.200	0.243
K2	0.122	0.128	0.115	0.133	0.174	0.200	0.145
K3	0.245	0.256	0.231	0.267	0.174	0.200	0.229
K4	0.245	0.256	0.231	0.267	0.261	0.200	0.243
K5	0.082	0.064	0.115	0.089	0.087	0.133	0.095
K6	0.082	0.043	0.077	0.089	0.043	0.067	0.067

Отримані ваги для маршрутизаторів аналогічно показують пріоритет критеріїв пропускної здатності при шифруванні та апаратного захисту - K1 і K4 по 0.243, що відповідає ролі маршрутизатора як першої лінії захисту периметру мережі.

3.9. Відсів варіантів апаратного забезпечення

На даному етапі програмний засіб автоматично перевіряє відповідність кожного апаратного засобу мінімально допустимим значенням профілю визначеного у підрозділі 3.6.3. Перевірка виконується послідовно по кожному критерію - якщо хоча б по одному критерію оцінка пристрою нижча за мінімально допустиме значення, пристрій виключається з подальшого розгляду із зазначенням конкретної причини відсіву.

Формально умова допуску пристрою a_i до подальшого оцінювання записується як:

$$a \in A * \text{якщо } x_{ij} \geq x_j^{\min} \text{ для всіх } j = 1, \dots, m \quad (3.1)$$

де

$x_j^{\min}$ – мінімальне значення профілю по критерію k_j

Результати відсіву неперспективних варіантів комутаторів

Перевірка виконується по профілю комутатора визначеному в (табл. 3.6). Критичною вимогою є K3 - підтримка L3 маршрутизації з мінімально допустимим балом 3 (табл. 3.15).

Таблиця 3.15 – Результати відсіву комутаторів

Пристрій	K1	K2	K3	K4	K5	K6	Результат
SW-01 Cisco Catalyst 2960	2	2	1	1	2	5	Відсіяно
SW-02 Cisco Catalyst 9200	5	5	5	5	5	1	Допущено
SW-03 MikroTik CRS326	3	3	4	1	2	4	Допущено
SW-04 Ubiquiti USW-Pro-24	3	3	4	1	1	3	Допущено

SW-01 (Cisco Catalyst 2960) відсіяно по критерію K3 - оцінка 1 є нижчою за мінімально допустиме значення 3. Пристрій працює виключно на рівні L2 і не підтримує міжвланову маршрутизацію що є обов'язковою вимогою для мережі критичної інфраструктури. До подальшого розрахунку TOPSIS допускаються три комутатори: SW-02, SW-03, SW-04.

Результати відсіву неперспективних варіантів маршрутизаторів

Перевірка виконується по профілю маршрутизатора визначеному в (табл. 3.7). Критичними вимогами є K4 (апаратне шифрування) та K5 (активна підтримка виробника) з мінімально допустимим балом 3 (табл. 3.16).

Таблиця 3.16 – Результати відсіву маршрутизаторів

Пристрій	K1	K2	K3	K4	K5	K6	Результат
RT-01 Cisco 2911	2	2	1	2	1	5	Відсіяно
RT-02 Cisco ISR 4331	5	4	5	5	5	1	Допущено
RT-03 MikroTik RB4011	4	5	1	2	4	5	Відсіяно
RT-04 Ubiquiti Gateway Pro	4	3	1	2	4	4	Відсіяно

RT-01 (Cisco 2911) відсіяно по критерію K5 - оцінка 1 є нижчою за мінімально допустиме значення 3. Пристрій знятий з підтримки виробника і не отримує оновлень безпеки що є неприйнятним для шлюзу мережі критичної інфраструктури.

RT-03 (MikroTik RB4011) та RT-04 (Ubiquiti Gateway Pro) відсіяно по критерію K4 - оцінка 2 є нижчою за мінімально допустиме значення 3. Обидва пристрої мають обмежені можливості апаратного шифрування і не підтримують корпоративні протоколи захисту трафіку необхідні для периметру мережі енергетичного підприємства.

До подальшого розрахунку методом TOPSIS допускається лише один маршрутизатор - RT-02 (Cisco ISR 4331). Цей результат підтверджує

висновки порівняльного аналізу проведеного у розділі 2 - лише рішення Cisco повністю відповідає вимогам мережі рівня Укренерго.

Підсумок відсіву неперспективних варіантів апаратного забезпечення

За результатами перевірки відповідності профілю мінімальних вимог з восьми розглянутих пристроїв до подальшого розрахунку методом TOPSIS допущено чотири варіанти — три комутатори та один маршрутизатор. Підсумок відсіву варіантів апаратного забезпечення наведено в (табл. 3.17).

Таблиця 3.17 – Підсумок відсіву варіантів

Категорія	Всього	Відсіяно	Допущено до TOPSIS
Комутатори	4	1 (SW-01)	3 (SW-02, SW-03, SW-04)
Маршрутизатори	4	3 (RT-01, RT-03, RT-04)	1 (RT-02)

3.10. Математична постановка задачі багатокритеріальної оцінки апаратного забезпечення

Визначення множин

Нехай задано множину альтернативних варіантів апаратного забезпечення:

$$A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}, \quad (3.2)$$

де

A - множина альтернативних варіантів апаратного забезпечення;

n - кількість пристроїв, що розглядаються.

Множина критеріїв оцінювання:

$$K = \{k_1, k_2, \dots, k_m\}, \quad (3.3)$$

де

K - множина критеріїв оцінювання;

m - кількість критеріїв.

Кожному критерію k_j відповідає ваговий коефіцієнт w_j , причому:

$$\sum w_j = 1, w_j > 0, j = 1, \dots, m \quad (3.4)$$

де

w_j - ваговий коефіцієнт j -го критерію;

j - порядковий номер критерію.

Матриця оцінок

Результати експертного оцінювання формують матрицю X розміром $n \times m$:

$$X = [x_{ij}], i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, m \quad (3.5)$$

де

X - матриця експертних оцінок розміром $n \times m$;

x_{ij} - оцінка i -го пристрою за j -м критерієм за шкалою від 1 до 5;

i - порядковий номер пристрою.

Відсів варіантів

Перед застосуванням методу TOPSIS виконується перевірка відповідності кожного пристрою профілю мінімальних вимог:

$$a_i \in A^* \text{ якщо } x_{ij} \geq x_j^{\min} \text{ для всіх } j = 1, \dots, m \quad (3.6)$$

де

A^* - підмножина пристроїв що пройшли відсів ($A^* \subseteq A$);

$x_j^{\min}$ - мінімально допустиме значення профілю за критерієм k_j .

Якщо хоча б для одного критерію умова не виконується - пристрій виключається з подальшого розгляду.

Розрахунок вагових коефіцієнтів методом АНП

Для математично обґрунтованого визначення вагових коефіцієнтів застосовується метод аналізу ієрархій [23]. Будується матриця попарних порівнянь критеріїв B розміром $m \times m$:

$$B = [b_{jl}], \quad \frac{b_{jl}}{b_{lj}} = 1, \quad b_{jj} = 1 \quad (3.7)$$

де

B - матриця попарних порівнянь критеріїв розміром $m \times m$;

b_{jl} - відносна важливість критерію k_j порівняно з критерієм k_l за шкалою від 1 до 9.

Нормалізований власний вектор матриці B визначає вагові коефіцієнти:

$$w_j = \left(\frac{1}{m}\right) \times \frac{\sum(b_{j1})}{\sum(b_{i1})}, j = 1, \dots, m \quad (3.8)$$

де

$\frac{\sum_1 b_{il}}{\sum_i b_{il}}$ - нормалізований елемент j -го рядка матриці B ;

$\sum_i b_{il}$ - сума елементів l -го стовпця матриці B .

Метод TOPSIS

Метод TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) - метод впорядкування переваг за подібністю до ідеального рішення - є одним з найпоширеніших методів багатокритеріального прийняття рішень [12,24]. Метод розроблений Hwang та Yoon [12] у 1981 році і базується на концепції що оптимальна альтернатива повинна мати найменшу відстань до ідеального рішення та найбільшу відстань до антиідеального рішення одночасно.

Ідеальне рішення - це гіпотетичний варіант що має найкращі значення по всіх критеріях одночасно. Антиідеальне рішення навпаки має найгірші значення по всіх критеріях. В реальних задачах жодна альтернатива як правило не є ідеальною - кожна має переваги по одних критеріях і поступається по інших. Метод TOPSIS дозволяє знайти компромісне рішення яке є найближчим до ідеального і найдалшим від антиідеального.

Перевагою методу TOPSIS порівняно з простою зваженою сумою є те що він враховує одночасно два виміри якості альтернативи - наскільки вона близька до найкращого і наскільки далека від найгіршого. Це дозволяє уникнути ситуації коли альтернатива з посередніми оцінками по всіх критеріях отримує вищий рейтинг ніж альтернатива з видатними оцінками по ключових критеріях.

Розрахунок методу TOPSIS виконується у п'ять послідовних кроків. На першому кроці виконується нормалізація матриці оцінок - приведення всіх критеріїв до єдиного безрозмірного масштабу незалежно від їх фізичних одиниць виміру. Це необхідно оскільки критерії мають різні одиниці - пропускна здатність вимірюється в Gbps, вартість в USD, а деякі критерії є бінарними. Без нормалізації критерії з більшими числовими значеннями домінували б над іншими незалежно від їх реальної важливості.

На другому кроці нормалізовані значення множаться на вагові коефіцієнти критеріїв отримані методом АНП. Це дозволяє врахувати що різні критерії мають різну важливість - для мережі критичної інфраструктури безпека і пропускна здатність важливіші за вартість.

На третьому кроці визначаються ідеальне та антиідеальне рішення. Для критеріїв максимізації - пропускна здатність, безпека, стекування - ідеальним є максимальне значення серед усіх альтернатив. Для критерію мінімізації - вартість - ідеальним є мінімальне значення.

На четвертому кроці для кожної альтернативи розраховуються евклідові відстані до ідеального та антиідеального рішення. Евклідова відстань враховує відхилення по всіх критеріях одночасно - це геометрична відстань у багатовимірному просторі критеріїв.

На п'ятому кроці обчислюється показник відносної близькості S_i який є основою для ранжування альтернатив. Показник приймає значення від 0 до 1 - чим ближче до 1 тим альтернатива є кращою.

Крок 1. Нормалізація матриці оцінок:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{(\sum x_{ij}^2)}} , i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, m \quad (3.9)$$

де

r_{ij} - нормалізована оцінка i -го пристрою за j -м критерієм.

Крок 2. Зважена нормалізована матриця:

$$v_{ij} = w_j \times r_{ij} \quad (3.10)$$

де

v_{ij} - зважена нормалізована оцінка і-го пристрою за j-м критерієм.

Крок 3. Ідеальне та антиідеальне рішення:

Для критеріїв максимізації (більше - краще):

$$v_j^+ = \max(v_{ij}), v_j^- = \min(v_{ij}) \quad (3.11)$$

Для критеріїв мінімізації (вартість - менше краще):

$$v_j^+ = \min(v_{ij}), v_j^- = \max(v_{ij}) \quad (3.12)$$

де

v_j^+ - ідеальне значення j-го критерію;

v_j^- - антиідеальне (найгірше) значення j-го критерію.

Крок 4. Евклідові відстані до ідеального та антиідеального рішення:

$$d_i^+ = \sqrt{(\sum (v_{ij} - v_j^+)^2)} \quad (3.13)$$

$$d_i^- = \sqrt{(\sum (v_{ij} - v_j^-)^2)} \quad (3.14)$$

де

d_i^+ - евклідова відстань від і-го пристрою до ідеального рішення;

d_i^- - евклідова відстань від і-го пристрою до антиідеального рішення.

Крок 5. Показник відносної близькості до ідеального рішення:

$$C_i = \frac{d_i^-}{(d_i^+ + d_i^-)}, \text{ де } 0 \leq C_i \leq 1 \quad (3.15)$$

де

C_i - показник відносної близькості і-го пристрою до ідеального рішення.

Прийняття рішення

Альтернативи ранжуються за спаданням показника C_i . Оптимальним вважається пристрій з найбільшим значенням C_i :

$$a^* = \operatorname{argmax}(C_i), i = 1, \dots, n \quad (3.16)$$

де

a^* - оптимальний варіант апаратного забезпечення.

Значення $C_i = 1$ відповідає ідеальному рішення, $C_i = 0$ - найгіршому.

3.11. Обчислення рейтингу варіантів на основі методу TOPSIS

Метод TOPSIS застосовується до підмножини A^* допущених варіантів апаратного забезпечення що пройшли перевірку профілю у підрозділі 3.9. Для комутаторів до розрахунку допущено три альтернативи: SW-02 (Cisco Catalyst 9200), SW-03 (MikroTik CRS326) та SW-04 (Ubiquiti USW-Pro-24). Для маршрутизаторів після відсіву залишився єдиний варіант RT-02 (Cisco ISR 4331) який автоматично отримує найвищий рейтинг як єдиний пристрій що відповідає всім вимогам профілю критичної інфраструктури.

Крок 1. Нормалізація матриці оцінок

Нормалізація виконується за формулою (3.9). Вихідна матриця оцінок комутаторів, що допущені до розрахунку, наведена в (табл. 3.18).

Таблиця 3.18 – Матриця оцінок допущених комутаторів

Пристрій	K1	K2	K3	K4	K5	K6
SW-02	5	5	5	5	5	1
SW-03	3	3	4	1	2	4
SW-04	3	3	4	1	1	3

Для кожного критерію розраховується норма стовпця:

$$K1 = \sqrt{(5^2 + 3^2 + 3^2)} = \sqrt{(25 + 9 + 9)} = \sqrt{43} \approx 6.557$$

$$K2 = \sqrt{(5^2 + 3^2 + 3^2)} = \sqrt{(25 + 9 + 9)} = \sqrt{43} \approx 6.557$$

$$K3 = \sqrt{(5^2 + 4^2 + 4^2)} = \sqrt{(25 + 16 + 16)} = \sqrt{57} \approx 7.550$$

$$K4 = \sqrt{(5^2 + 1^2 + 1^2)} = \sqrt{(25 + 1 + 1)} = \sqrt{27} \approx 5.196$$

$$K5 = \sqrt{(5^2 + 2^2 + 1^2)} = \sqrt{(25 + 4 + 1)} = \sqrt{30} \approx 5.477$$

$$K6 = \sqrt{(1^2 + 4^2 + 3^2)} = \sqrt{(1 + 16 + 9)} = \sqrt{26} \approx 5.099$$

Нормалізована матриця $R = [r_{ij}]$ наведена в (табл. 3.19).

Таблиця 3.19 – Нормалізована матриця оцінок комутаторів

Пристрій	K1	K2	K3	K4	K5	K6
----------	----	----	----	----	----	----

Пристрій	K1	K2	K3	K4	K5	K6
SW-02	0.763	0.763	0.662	0.962	0.913	0.196
SW-03	0.457	0.457	0.530	0.192	0.365	0.784
SW-04	0.457	0.457	0.530	0.192	0.183	0.588

Крок 2. Зважена нормалізована матриця

Зважена матриця розраховується за формулою (3.10) з використанням вагових коефіцієнтів отриманих методом АНП у підрозділі 3.8:

$$w = (0.238; 0.170; 0.226; 0.251; 0.091; 0.069).$$

Результати зваженої нормалізованої матриці наведені в (табл. 3.20).

Таблиця 3.20 – Зважена нормалізована матриця комутаторів

Пристрій	K1	K2	K3	K4	K5	K6
SW-02	0.192	0.130	0.150	0.242	0.083	0.014
SW-03	0.115	0.078	0.120	0.048	0.033	0.054
SW-04	0.115	0.078	0.120	0.048	0.017	0.041

Крок 3. Ідеальне та антиідеальне рішення

Ідеальне та антиідеальне рішення визначаються за формулами (3.11) та (3.12). Критерії K1-K5 максимізуються, K6 (вартість) мінімізується. Результати наведені в (табл. 3.21).

Таблиця 3.21 – Ідеальне та антиідеальне рішення для комутаторів

Критерій	v^+ (ідеальне)	v^- (антиідеальне)
K1	0.192	0.115
K2	0.130	0.078
K3	0.150	0.120
K4	0.242	0.048
K5	0.083	0.017

Критерій	v^+ (ідеальне)	v^- (антиідеальне)
K6	0.014	0.054

Крок 4. Евклідові відстані

Відстані розраховуються за формулами (3.13) та (3.14):

SW-02:

$$d^+ = \sqrt{((0.192 - 0.192)^2 + (0.130 - 0.130)^2 + (0.150 - 0.150)^2 + (0.242 - 0.242)^2 + (0.083 - 0.083)^2 + (0.014 - 0.014)^2)} = 0.000$$

$$d^- = \sqrt{((0.192 - 0.115)^2 + (0.130 - 0.078)^2 + (0.150 - 0.120)^2 + (0.242 - 0.048)^2 + (0.083 - 0.017)^2 + (0.014 - 0.054)^2)} = \sqrt{0.054} \approx 0.232$$

SW-03:

$$d^+ = \sqrt{((0.115 - 0.192)^2 + (0.078 - 0.130)^2 + (0.120 - 0.150)^2 + (0.048 - 0.242)^2 + (0.033 - 0.083)^2 + (0.054 - 0.014)^2)} = \sqrt{0.053} \approx 0.230$$

$$d^- = \sqrt{((0.115 - 0.115)^2 + (0.078 - 0.078)^2 + (0.120 - 0.120)^2 + (0.048 - 0.048)^2 + (0.033 - 0.017)^2 + (0.054 - 0.054)^2)} \approx 0.016$$

SW-04:

$$d^+ = \sqrt{((0.115 - 0.192)^2 + (0.078 - 0.130)^2 + (0.120 - 0.150)^2 + (0.048 - 0.242)^2 + (0.017 - 0.083)^2 + (0.041 - 0.014)^2)} = \sqrt{0.053} \approx 0.230$$

$$d^- = \sqrt{((0.115 - 0.115)^2 + (0.078 - 0.078)^2 + (0.120 - 0.120)^2 + (0.017 - 0.017)^2 + (0.041 - 0.054)^2)} \approx 0.013$$

Крок 5. Показник відносної близькості C_i

Показник C_i розраховується за формулою (3.15):

$$\text{SW-02: } C = \frac{0.232}{(0.000 + 0.232)} = 1.000$$

$$\text{SW-03: } C = \frac{0.016}{(0.230 + 0.016)} = \frac{0.016}{0.246} = 0.0687$$

$$\text{SW-04: } C = \frac{0.013}{(0.230 + 0.013)} = \frac{0.013}{0.243} = 0.0553$$

Підсумковий рейтинг комутаторів за методом TOPSIS наведений в (табл. 3.22).

Таблиця 3.22 – Підсумковий рейтинг комутаторів

Пристрій	d^+	d^-	C_i	Місце
SW-02 Cisco Catalyst 9200	0.000	0.232	1.000	1
SW-03 MikroTik CRS326	0.230	0.016	0.0687	2
SW-04 Ubiquiti USW-Pro-24	0.230	0.013	0.0553	3

Cisco Catalyst 9200 отримав показник $C_i = 1.000$ що відповідає ідеальному рішення - пристрій отримав максимальні оцінки по всіх критеріях крім вартості і повністю відповідає вимогам критичної інфраструктури. MikroTik CRS326 посів друге місце з показником 0.065, Ubiquiti USW-Pro-24 - третє з показником 0.053.

3.12. Відображення рейтингу варіантів

За результатами обчислення методу TOPSIS програмний засіб формує підсумковий рейтинг допущених варіантів апаратного забезпечення та відображає рекомендацію щодо оптимального вибору.

Результати оцінювання комутаторів представлені у вигляді рейтингової таблиці, відсортованої за спаданням показника C_i відповідно до формули (3.16), та наведені в (табл. 3.23).

Таблиця 3.23 – Підсумковий рейтинг комутаторів

Місце	Ідентифікатор	Назва	C_i	Рекомендація
1	SW-02	Cisco Catalyst 9200	1.000	Рекомендовано
2	SW-03	MikroTik CRS326	0.065	-
3	SW-04	Ubiquiti USW-Pro-24	0.053	-

Для маршрутизаторів після відсіву залишився єдиний допущений варіант RT-02 (Cisco ISR 4331) який автоматично отримує перше місце як єдиний пристрій що відповідає всім вимогам профілю критичної інфраструктури.

Підсумковий рейтинг маршрутизаторів наведений в (табл. 3.24).

Таблиця 3.24 – Підсумковий рейтинг маршрутизаторів

Місце	Ідентифікатор	Назва	Результат
-------	---------------	-------	-----------

Місце	Ідентифікатор	Назва	Результат
1	RT-02	Cisco ISR 4331	Рекомендовано
-	RT-01	Cisco 2911	Відсіяно (К4)
-	RT-03	MikroTik RB4011	Відсіяно (К4)
-	RT-04	Ubiquiti Gateway Pro	Відсіяно (К4)

Результати програмного оцінювання повністю підтверджують висновки порівняльного аналізу проведеного у розділі 2 - для мережі критичної енергетичної інфраструктури рівня Укренерго оптимальним вибором є Cisco Catalyst 9200 на рівні доступу та Cisco ISR 4331 як шлюз мережі.

3.13. Програмне забезпечення системи

3.13.1 Вибір та характеристика мови програмування

Для реалізації програмного засобу багатокритеріальної оцінки апаратного забезпечення обрано мову програмування Python версії 3.x [22] у поєднанні з веб-фреймворком Flask [10].

Обґрунтування вибору Python:

Python є однією з найпоширеніших мов програмування для задач обробки даних та реалізації математичних алгоритмів. Основні переваги що визначили вибір:

- Наявність вбудованих засобів для роботи з математичними обчисленнями - модуль `math` використовується для розрахунку евклідових відстаней та нормалізації матриць методу TOPSIS
- Простота реалізації алгоритмів багатокритеріального аналізу - метод TOPSIS та АНП реалізуються прозоро і читабельно
- Кросплатформеність - програма працює на Windows, Linux та macOS без змін у коді
- Широка підтримка та велика спільнота розробників

Обґрунтування вибору Flask:

Flask - це легкий веб-фреймворк для Python що дозволяє створювати веб-застосунки з мінімальними витратами. Переваги:

- Програма запускається локально командою `python app.py` і відкривається у браузері за адресою `localhost:5000`
- Інтернет-з'єднання не потрібне - все працює на комп'ютері користувача
- Веб-інтерфейс забезпечує зручне введення даних через форми та наочне відображення результатів у вигляді таблиць
- Не потребує встановлення додаткового програмного забезпечення крім Python

Структура програмного засобу:

Структура програмного засобу наведена в (табл. 3.25). Програма складається з двох основних файлів та набору шаблонів інтерфейсу.

Таблиця 3.25 – Структура файлів програмного засобу

Файл	Призначення
app.py	Головний файл - веб-сервер, маршрути, вхідні дані
topsis.py	Математичний модуль - реалізація TOPSIS та АНП
templates/index.html	Головна сторінка - вибір типу обладнання
templates/scores.html	Сторінка введення оцінок
templates/weights.html	Сторінка матриці АНП
templates/results.html	Сторінка результатів та рейтингу

Для формування веб-інтерфейсу програмного засобу використовується мова розмітки HTML5 у поєднанні з шаблонізатором Jinja2 що входить до складу Flask. HTML забезпечує структуру сторінок - таблиці для відображення матриць оцінок та результатів, форми для введення даних користувачем. Jinja2 дозволяє динамічно генерувати HTML-сторінки на основі даних що передаються з Python - наприклад автоматично будувати рядки таблиці для кожного пристрою або критерію без дублювання коду. Таким чином математична логіка повністю відокремлена від інтерфейсу -

файли `topsis.py` та `app.py` містять лише обчислення та маршрутизацію, а файли в папці `templates` відповідають виключно за відображення.

3.13.2 Алгоритм реалізації програмних модулів

Для візуалізації алгоритмів роботи програмного засобу використовуються блок-схеми. Блок-схема - це діаграма на якій зображено процес або алгоритм у вигляді послідовності стандартизованих графічних елементів. Блок вхідних та вихідних даних позначається паралелограмом, блок обчислень - прямокутником, блок прийняття рішень - ромбом, початок та кінець алгоритму - еліпсом.

Програмний засіб складається з трьох основних модулів що реалізують відповідні функції системи: модуль відсіву варіантів, модуль розрахунку вагових коефіцієнтів методом АНП та модуль обчислення методу TOPSIS.

Алгоритм модуля відсіву неперспективних варіантів

Модуль відсіву реалізує функцію `filter_devices()` файлу `topsis.py`. Алгоритм отримує на вході список пристроїв, матрицю оцінок та список критеріїв з мінімально допустимими значеннями. Для кожного пристрою послідовно перевіряється відповідність оцінки по кожному критерію мінімально допустимому значенню профілю. Якщо оцінка по будь-якому критерію нижча за мінімум - пристрій додається до списку відсіяних із зазначенням причини. Якщо всі критерії пройдено успішно - пристрій додається до списку допущених. На виході алгоритм повертає два списки: допущені та відсіяні пристрої.



Рисунок 3.6 – Алгоритм модуля відсіву неперспективних варіантів

Алгоритм модуля розрахунку ваг критеріїв на основі метода аналізу Ієрархій (АНП)

Модуль розрахунку ваг реалізує функцію `calculate_ahp_weights()` файлу `topsis.py`. Алгоритм отримує на вході матрицю попарних порівнянь критеріїв розміром $m \times m$ заповнену експертом. На першому кроці розраховується сума кожного стовпця матриці. На другому кроці кожен елемент матриці ділиться на суму свого стовпця - отримується нормалізована матриця. На третьому кроці для кожного рядка нормалізованої матриці розраховується середнє значення - це і є ваговий коефіцієнт відповідного критерію. На виході алгоритм повертає список вагових коефіцієнтів сума яких дорівнює одиниці.



Рисунок 3.7 – Алгоритм модуля розрахунку ваг методом АНП

Алгоритм модуля обчислення TOPSIS

Модуль TOPSIS реалізує функцію `calculate_topsis()` файлу `topsis.py` і є центральним обчислювальним модулем програмного засобу. Алгоритм отримує на вході список допущених пристроїв, матрицю оцінок та список критеріїв з ваговими коефіцієнтами. (рис. 3.8)

На першому кроці будується матриця оцінок та виконується її нормалізація за формулою (3.10) - для кожного стовпця розраховується евклідова норма і кожен елемент ділиться на неї.

На другому кроці кожен елемент нормалізованої матриці множиться на ваговий коефіцієнт відповідного критерію за формулою (3.9) - отримується зважена нормалізована матриця.

На третьому кроці визначається ідеальне та антиідеальне рішення за формулами (3.11) та (3.12). Для критеріїв максимізації ідеальним є максимальне значення стовпця, для критерію мінімізації (вартість) - мінімальне.

На четвертому кроці для кожного пристрою розраховуються евклідові відстані до ідеального (d^+) та антиідеального (d^-) рішення за формулами (3.13) та (3.14).

На п'ятому кроці обчислюється показник відносної близькості C_i за формулою (3.15). Результати сортуються за спаданням C_i та кожному пристрою присвоюється місце в рейтингу.

На виході алгоритм повертає список пристроїв з показниками d^+ , d^- , C_i та місцем в рейтингу що відображаються на сторінці результатів програмного засобу.

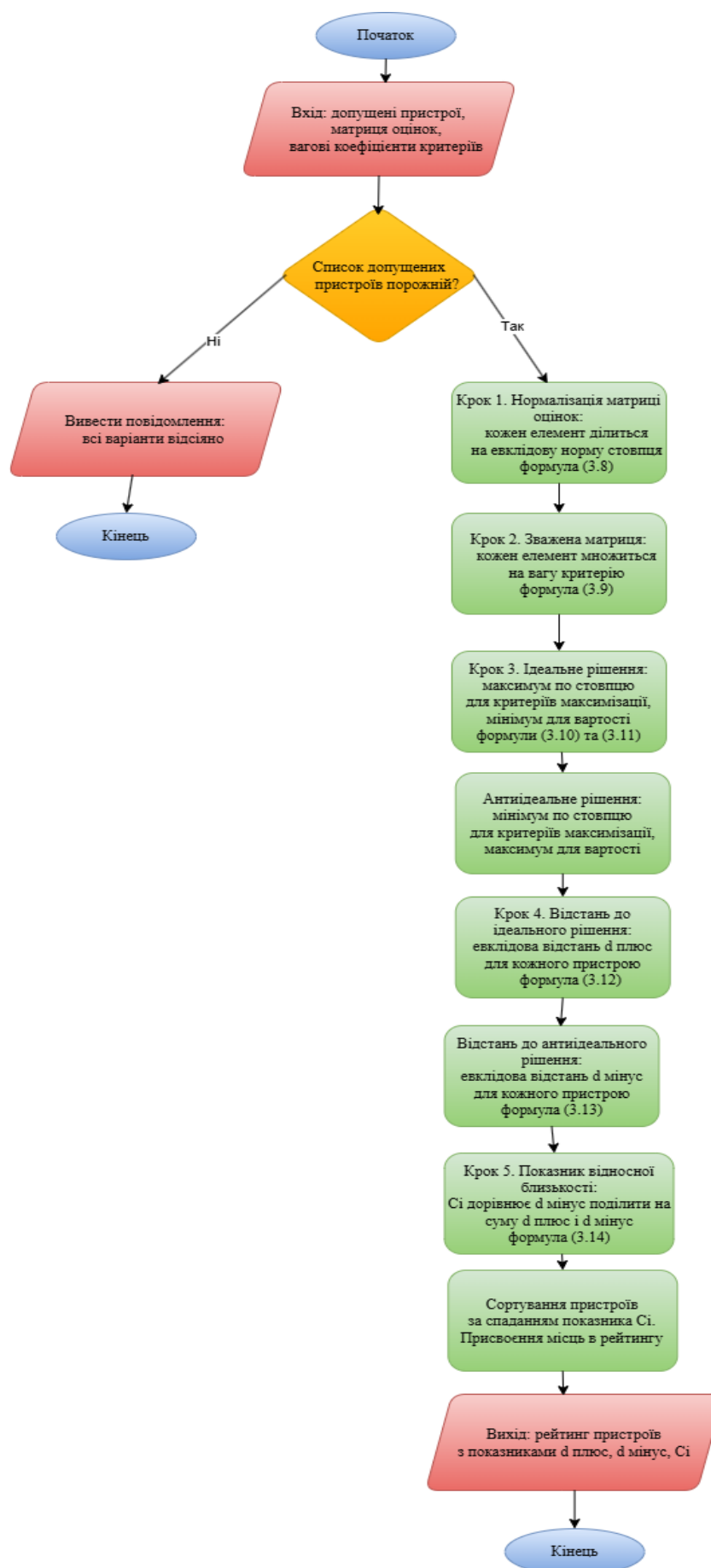


Рисунок 3.8 – Алгоритм модуля обчислення TOPSIS

3.13.3 Структура програмного забезпечення.

Програмний засіб розділений на два основні модулі та чотири модулі інтерфейсу.

Основні модулі:

app.py - модуль веб-сервера та маршрутизації. Відповідає за обробку запитів користувача, передачу даних між сторінками та виклик функцій розрахунку. Містить вхідні дані про пристрої, критерії та оцінки за замовчуванням.

topsis.py - математичний модуль. Містить три функції що реалізують основну обчислювальну логіку системи: `filter_devices()` - відсів варіантів за профілем мінімальних вимог, `calculate_ahp_weights()` - розрахунок вагових коефіцієнтів методом АНП, `calculate_topsis()` - повний розрахунок методу TOPSIS з поверненням показників d^+ , d^- та C_i .

Модулі інтерфейсу (папка templates):

1. `index.html` - головна сторінка, вибір типу обладнання
2. `scores.html` - введення та перегляд оцінок критеріїв
3. `weights.html` - заповнення матриці попарних порівнянь АНП
4. `results.html` - відображення підсумкового рейтингу з показниками d^+ , d^- та C_i та відсіяними варіантами

Взаємодія модулів відбувається наступним чином: користувач через інтерфейс передає дані до `app.py`, який викликає відповідні функції `topsis.py` та передає результати назад до шаблону для відображення.

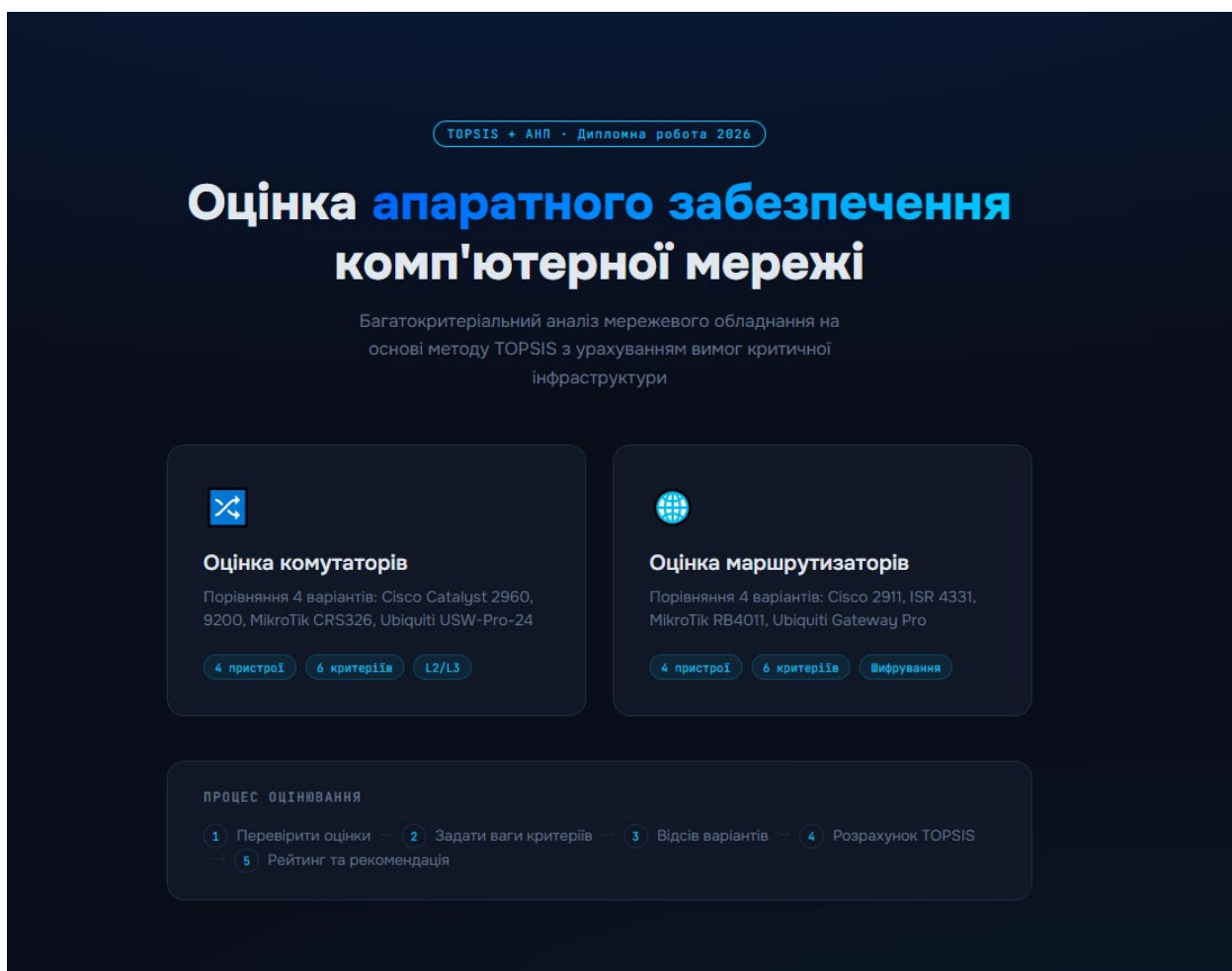


Рисунок 3.9 – Головна сторінка програмного засобу

Головна сторінка програмного засобу (рис. 3.9) відображає два варіанти оцінювання - комутатори та маршрутизатори. Для кожного типу обладнання зазначено кількість пристроїв, кількість критеріїв та ключові характеристики. Знизу відображається покроковий процес оцінювання з п'яти етапів: перевірка оцінок, задання ваг критеріїв, відсів варіантів, розрахунок TOPSIS та відображення рейтингу. Користувач обирає тип обладнання натисканням на відповідну картку.

+ Головна

Оцінка комутаторів

Перевірте або змініть оцінки для кожного пристрою за кожним критерієм.
Оцінки вже заповнені на основі технічних характеристик з розділу 3 дипломної роботи.

5 – Відмінно 4 – Добре 3 – Задовільно 2 – Погано 1 – Неприйнятно

Пристрій	K1 Пропускна здатність (Gbps)	K2 Швидкість пересилання (Mpps)	K3 Підтримка L3 маршрутизації	K4 Апаратне шифрування
Cisco Catalyst 2960-24TT SW-01 · Cisco	2	2	1	1
Cisco Catalyst 9200 SW-02 · Cisco	5	5	5	5
MikroTik CRS326-24G-2S+ SW-03 · MikroTik	3	3	4	1
Ubiquiti UniFi USW-Pro-24 SW-04 · Ubiquiti	3	3	4	1

Перейти до ваг критеріїв →

Рисунок 3.10 – Сторінка введення оцінок комутаторів

Сторінка введення оцінок (рис. 3.10) відображає матрицю оцінок комутаторів розміром $n \times m$ де рядки відповідають пристроям а стовпці критеріям оцінювання. Оцінки заповнені автоматично на основі технічних характеристик обладнання проаналізованих у розділі 2. Зверху відображається шкала оцінювання від 1 до 5. Кожна оцінка представлена випадаючим списком що дозволяє експерту змінити значення якщо це необхідно. Кольорове кодування оцінок забезпечує швидке візуальне сприйняття - оцінка 5 відображається блакитним, 3 жовтим, 1 і 2 червоним. "Після перевірки оцінок користувач натискає кнопку "Перейти до ваг критеріїв". У лівому верхньому куті розміщено посилання "← Головна" що дозволяє повернутися на головну сторінку та розпочати оцінювання іншого типу обладнання.

Ваги критеріїв — Комутатори

Заповніть матрицю попарних порівнянь критеріїв за шкалою 1–9.
Наскільки рядковий критерій важливіший за стовпцевий?
Дзеркальні значення заповнюються автоматично.

1 – однаково важливі · 3 – помірна перевага · 5 – суттєва перевага · 7 – значна перевага · 9 – абсолютна перевага

Критерій	K1	K2	K3	K4	K5	K6
K1 – Пропускна здатність (Gbps)	1	2	1	1	3	3
K2 – Швидкість пересилання (Mbps)	0,50	1	1	0,5	2	3
K3 – Підтримка L3 маршрутизації	1,00	1	1	1	3	3
K4 – Апаратне шифрування	1	2,00	1	1	3	3
K5 – Підтримка стекування	0,33	0,50	0,33	0,33	1	2
K6 – Вартість (менше = краще)	0,33	0,33	0,33	0,33	0,50	1

Розрахувати TOPSIS →

Рисунок 3.11 – Сторінка встановлення ваг критеріїв комутаторів методом АНП

Сторінка встановлення ваг критеріїв (рис. 3.11) відображає матрицю попарних порівнянь розміром 6×6 для критеріїв комутаторів заповнену відповідно до пріоритетів визначених у підрозділі 3.9. Діагональні елементи дорівнюють 1. Елементи нижньої трикутної частини заповнюються автоматично як обернені значення - наприклад $K1 \rightarrow K2 = 2$ тому $K2 \rightarrow K1 = 0.50$. Критерії K1 та K4 отримали вищі оцінки порівняно з іншими - значення 2 і 3 у відповідних стовпцях відображають їх пріоритет як ключових вимог безпеки та продуктивності для мережі критичної інфраструктури. Після натискання кнопки "Розрахувати TOPSIS" система автоматично обчислює вагові коефіцієнти методом АНП - $K1 = 0.238$, $K2 = 0.160$, $K3 = 0.213$, $K4 = 0.238$, $K5 = 0.086$, $K6 = 0.064$ - та виконує повний розрахунок TOPSIS.

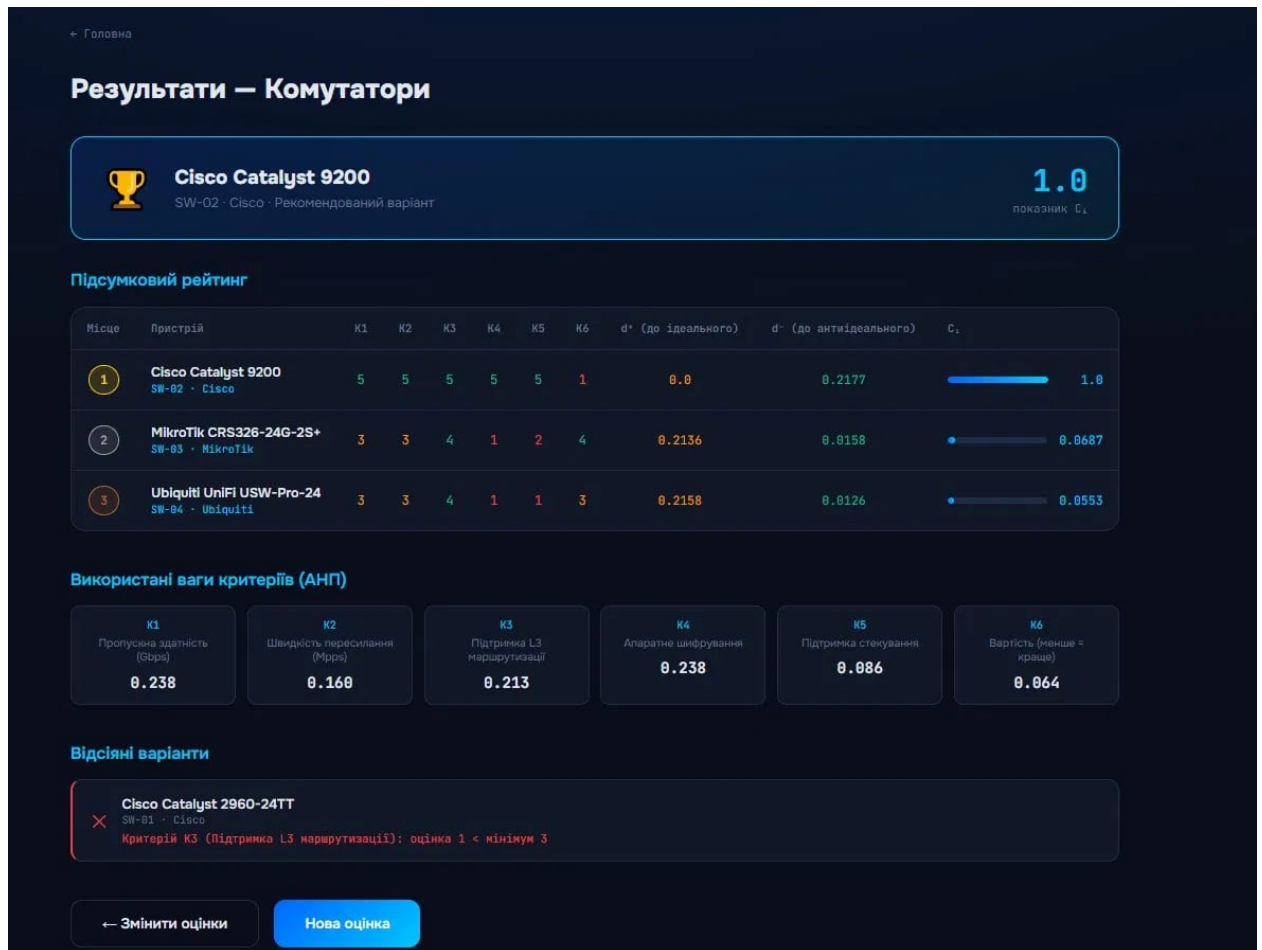


Рисунок 3.12 – Сторінка результатів оцінювання комутаторів

Сторінка результатів (рис. 3.12) відображає підсумки багатокритеріальної оцінки комутаторів з використанням вагових коефіцієнтів розрахованих методом АНП. Рекомендованим варіантом визначено Cisco Catalyst 9200 з показником $C_i = 1.0$ що відповідає ідеальному рішенняю.

Таблиця рейтингу містить для кожного пристрою оцінки по критеріях K1–K6, відстань до ідеального рішення d^+ , відстань до антиідеального рішення d^- та показник C_i . Cisco Catalyst 9200 отримав $d^+ = 0.0$ та $d^- = 0.2177$ що підтверджує його позицію як ідеального рішення. MikroTik CRS326 посів друге місце з $C_i = 0.0687$, Ubiquiti USW-Pro-24 - третє з $C_i = 0.0553$.

Використані ваги критеріїв: K1 = 0.238, K2 = 0.160, K3 = 0.213, K4 = 0.238, K5 = 0.086, K6 = 0.064. У розділі відсіяних варіантів відображається

Cisco Catalyst 2960-24TT - відсіяний по критерію K3 оскільки оцінка 1 є нижчою за мінімально допустиме значення 3.

← Головна

Оцінка маршрутизаторів

Перевірте або змініть оцінки для кожного пристрою за кожним критерієм.
Оцінки вже заповнені на основі технічних характеристик з розділу 3 дипломної роботи.

5 – Відмінно 4 – Добре 3 – Задовільно 2 – Погано 1 – Неприйнятно

Пристрій	K1 Пропускна здатність при шифруванні (Mbps)	K2 Продуктивність маршрутизації (Mpps)	K3 Підтримка DNA Center
Cisco 2911 RT-01 · Cisco	2	2	1
Cisco ISR 4331 RT-02 · Cisco	5	4	5
MikroTik RB4011iGS+RM RT-03 · MikroTik	4	5	1
Ubiquiti UniFi Gateway Pro RT-04 · Ubiquiti	4	3	1

Перейти до ваг критеріїв →

Рисунок 3.13 – Сторінка введення оцінок маршрутизаторів

Сторінка введення оцінок маршрутизаторів (рис. 3.13) відображає матрицю оцінок для чотирьох варіантів: Cisco 2911, Cisco ISR 4331, MikroTik RB4011iGS+RM та Ubiquiti UniFi Gateway Pro. Оцінки заповнені на основі технічних характеристик з розділу 3 дипломної роботи. Cisco ISR 4331 отримав максимальні оцінки по ключових критеріях, тоді як Cisco 2911 має низькі оцінки через застаріле обладнання знято з підтримки виробника. Після перевірки оцінок користувач натискає "Перейти до ваг критеріїв".

← Головна

Ваги критеріїв — Маршрутизатори

Заповніть матрицю попарних порівнянь критеріїв за шкалою 1-9.
Наскільки рядковий критерій важливіший за стовпцевий?
Дзеркальні значення заповнюються автоматично.

1 — однаково важливі · 3 — помірна перевага · 5 — суттєва перевага · 7 — значна перевага · 9 — абсолютна перевага

Критерій	K1	K2	K3	K4	K5	K6
K1 — Пропускна здатність при шифруванні (Mbps)	1	2	1	1	3	3
K2 — Продуктивність маршрутизації (Mpps)	0,50	1	0,5	0,5	2	3
K3 — Підтримка DNA Center	1	2,00	1	1	2	3
K4 — Апаратне шифрування	1	2,00	1	1	3	3
K5 — Активна підтримка виробника	0,33	0,50	0,50	0,33	1	2
K6 — Вартість (менше = краще)	0,33	0,33	0,33	0,33	0,50	1

Розрахувати TOPSIS →

Рисунок 3.14 — Сторінка встановлення ваг критеріїв маршрутизаторів методом АНП

Сторінка встановлення ваг критеріїв маршрутизаторів (рис. 3.14) відображає матрицю попарних порівнянь 6×6 заповнену відповідно до пріоритетів підрозділу 3.9. Критерії K1 та K4 мають вищі оцінки що відображає пріоритет пропускну здатності при шифруванні та апаратного захисту для маршрутизатора як першої лінії захисту периметру мережі. Після натискання "Розрахувати TOPSIS" система обчислює вагові коефіцієнти: $K1 = 0.238$, $K2 = 0.143$, $K3 = 0.223$, $K4 = 0.238$, $K5 = 0.093$, $K6 = 0.065$ та виконує повний розрахунок TOPSIS.

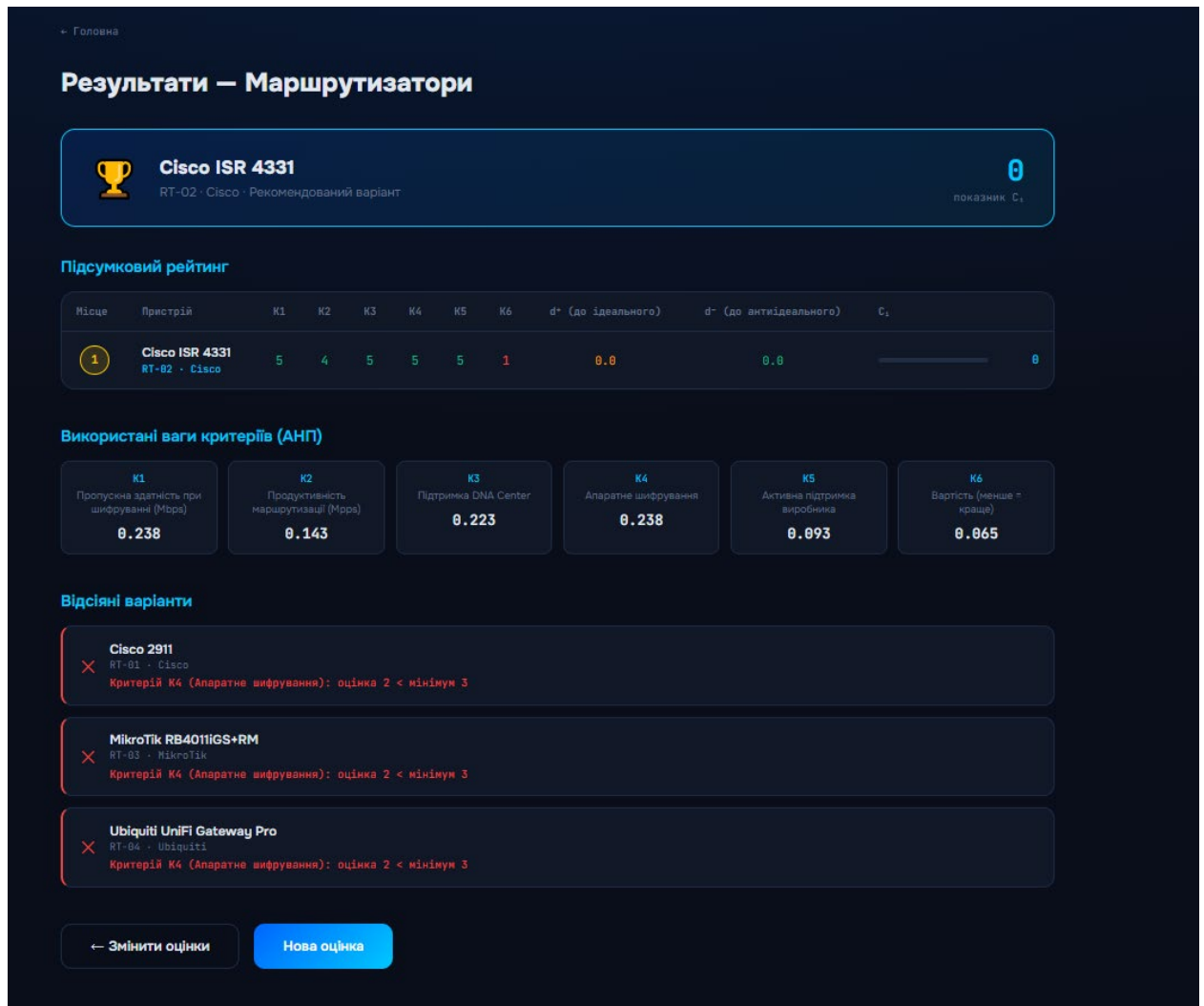


Рисунок 3.15 – Сторінка результатів оцінювання маршрутизаторів

Сторінка результатів маршрутизаторів (рис. 3.15) відображає підсумки багатокритеріальної оцінки. Рекомендованим варіантом визначено Cisco ISR 4331 як єдиний пристрій що пройшов перевірку профілю мінімальних вимог.

Три пристрої відсіяно по критерію K4 (Апаратне шифрування) - Cisco 2911, MikroTik RB4011iGS+RM та Ubiquiti UniFi Gateway Pro отримали оцінку 2 що є нижчою за мінімально допустиме значення 3. Це підтверджує висновки підрозділу 3.9 - лише рішення Cisco корпоративного рівня відповідає вимогам безпеки мережі критичної інфраструктури.

Оскільки після відсіву залишився єдиний допущений варіант - показники d^+ та d^- дорівнюють 0 що є математично коректним результатом

методу TOPSIS при одній альтернативі. Використані вагові коефіцієнти: $K1 = 0.238$, $K2 = 0.143$, $K3 = 0.223$, $K4 = 0.238$, $K5 = 0.093$, $K6 = 0.065$.

Висновки до розділу 3:

Розроблено програмний засіб багатокритеріальної оцінки варіантів апаратного забезпечення комп'ютерної мережі на основі методу TOPSIS з використанням вагових коефіцієнтів визначених методом аналізу ієрархій. Програма реалізована мовою Python з веб-інтерфейсом на базі фреймворку Flask та складається з двох основних модулів - математичного (topsis.py) та модуля веб-сервера (app.py).

Сформовано інформаційну платформу оцінювання що включає вісім альтернативних варіантів апаратного забезпечення (чотири комутатори та чотири маршрутизатори), систему з шести критеріїв оцінювання для кожної категорії обладнання, п'ятибальну шкалу оцінювання та профілі мінімально допустимих вимог.

За результатами автоматичного відсіву варіантів по профілю мінімальних вимог з восьми пристроїв до розрахунку методом TOPSIS допущено чотири: три комутатори (SW-02, SW-03, SW-04) та один маршрутизатор (RT-02). Cisco Catalyst 2960 відсіяно по критерію $K3$ (відсутність підтримки L3), три маршрутизатори - по критерію $K4$ (недостатній рівень апаратного шифрування).

За результатами розрахунку методу TOPSIS серед комутаторів оптимальним визначено Cisco Catalyst 9200 з показником $C_i = 1.000$ що відповідає ідеальному рішення - пристрій отримав максимальні оцінки за всіма критеріями крім вартості та повністю відповідає вимогам критичної інфраструктури. Серед маршрутизаторів єдиним допущеним варіантом визначено Cisco ISR 4331.

Результати програмного оцінювання повністю підтверджують висновки порівняльного аналізу розділу 2 та забезпечують математично обґрунтоване

документальне підтвердження вибору обладнання що є важливим при погодженні бюджету на закупівлю з керівництвом підприємства.

ВИСНОВКИ

Проаналізовано роль апаратного забезпечення у забезпеченні керованості комп'ютерних мереж підприємства та встановлено що оптимізація апаратної бази безпосередньо впливає на продуктивність бізнес-процесів. Визначено що керованість мережі закладається на рівні апаратного забезпечення - підтримка VLAN, SNMP, NetFlow та наявність виділених ASIC-процесорів є базовими умовами для побудови керованої інфраструктури, а не додатковими опціями.

Сформовано систему критеріїв оцінювання апаратного забезпечення, що охоплює продуктивність, безпеку, відмовостійкість та сукупну вартість володіння. Проведено порівняльний аналіз програмно-апаратних комплексів управління трьох виробників — Cisco, MikroTik та Ubiquiti - та встановлено що жоден варіант не є універсальним: вибір визначається конкретними умовами та вимогами об'єкта.

Аналіз поточної мережевої інфраструктури НЕК «Укренерго» виявив чотири ключові обмеження наявного обладнання: роботу виключно на рівні L2, недостатню пропускну здатність, відсутність апаратного шифрування та застарілу програмну базу без підтримки виробника. Для об'єкта критичної енергетичної інфраструктури ці обмеження створюють неприйнятні ризики як з точки зору продуктивності так і кібербезпеки.

Розрахунок ТСО показав що різниця у вартості між поточним та модернізованим рішенням за п'ять років становить близько 1800 доларів - незначна сума порівняно з потенційними втратами від інциденту кібербезпеки або тривалого простою мережі критичної інфраструктури.

Розроблено програмний засіб багатокритеріальної оцінки варіантів апаратного забезпечення на основі методу TOPSIS з ваговими коефіцієнтами визначеними методом аналізу ієрархій. Програма автоматизує повний цикл оцінювання - від формування інформаційної платформи та відсіву варіантів що не відповідають мінімальним вимогам профілю до отримання математично обґрунтованого підсумкового рейтингу альтернатив.

За результатами комплексного оцінювання восьми варіантів апаратного забезпечення визначено оптимальне рішення для модернізації мережі НЕК «Укренерго»: Cisco Catalyst 9200 на рівні доступу з показником $C_i = 1.000$ та Cisco ISR 4331 як шлюз мережі. Результати програмного оцінювання повністю підтверджують висновки порівняльного аналізу та забезпечують документально підтверджене обґрунтування вибору обладнання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ 3396.0-96. Захист інформації. Технічний захист інформації. Основні положення. – Київ : Держстандарт України, 1996. – 8 с.
2. ДСТУ ISO/IEC 27001:2015. Інформаційні технології. Методи захисту. Системи управління інформаційною безпекою. Вимоги (ISO/IEC 27001:2013; Cor 1:2014, IDT). – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. – 22 с.
3. Закон України «Про критичну інфраструктуру» від 16.11.2021 № 1882-IX [Електронний ресурс] – Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1882-20>
4. Тези доповідей Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні інформаційні системи та технології в цифровому суспільстві» (10–11 квітня 2025 р.) / Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця. – Харків : ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2025. URL: https://repository.hneu.edu.ua/bitstream/123456789/36031/1/CONF_%D0%A1_2025%20%282%29.pdf
5. Cisco Catalyst 2960 Series Switches Data Sheet [Електронний ресурс] – Cisco Systems. URL: https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/switches/catalyst-2960-series-switches/product_data_sheet0900aecd806b0bd8.html
6. Cisco Catalyst 9200 Series Switches Configuration Guide [Електронний ресурс] – Cisco Systems. URL: https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/switches/lan/catalyst9200/software/release/17-9/configuration_guide/b-179-9200-cg.html
7. Cisco Catalyst 9200 Series Switches Data Sheet [Електронний ресурс] – Cisco Systems. URL: <https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/switches/catalyst-9200-series-switches/nb-06-cat9200-ser-data-sheet-cte-en.html>
8. Cisco DNA Center [Електронний ресурс] – Cisco Systems. URL: <https://www.cisco.com/c/en/us/products/cloud-systems-management/dna-center/index.html>

9. Cisco Networking Academy. CCNA: Switching, Routing, and Wireless Essentials [Электронный ресурс] – Cisco Systems, 2024. URL: <https://www.netacad.com/launch?id=c0bf5a12-54aa-4008-bf69-8187bab7055d&tab=curriculum&view=a5de9fcb-f221-5621-aceb-1a1d86fa255f>
10. Flask Documentation [Электронный ресурс] – Pallets Projects. URL: <https://flask.palletsprojects.com>
11. Forouzan B. A. Data Communications and Networking with TCP/IP Protocol Suite. – 6th ed. – New York : McGraw-Hill, 2022. – 1264 p. – ISBN 978-0078022098
12. Hwang C. L., Yoon K. Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications. – New York : Springer-Verlag, 1981. – 269 p. – ISBN 978-0387905679
13. IEEE 802.1AE – MAC Security (MACsec) [Электронный ресурс] – IEEE Standards. URL: <https://standards.ieee.org/ieee/802.1AE>
14. IEEE 802.1Q – Bridges and Bridged Networks [Электронный ресурс] – IEEE Standards. URL: <https://standards.ieee.org/ieee/802.1Q>
15. IEEE 802.3-2022 – Ethernet Standard [Электронный ресурс] – IEEE Standards. URL: <https://standards.ieee.org/ieee/802.3>
16. Kurose J. F., Ross K. W. Computer Networking: A Top-Down Approach. – 8th ed. – New Jersey : Pearson, 2021. – 856 p. – ISBN 978-0136681557
17. Lammle T. CCNA Cisco Certified Network Associate Study Guide. – 8th ed. – Indianapolis : Sybex, 2020. – 1200 p. – ISBN 978-1119659365
18. MikroTik CRS326-24G-2S+RM Product Page [Электронный ресурс] – MikroTik. URL: <https://mikrotik.com/product/CRS326-24G-2SplusRM>
19. MikroTik Hardware [Электронный ресурс] – MikroTik. URL: <https://mikrotik.com/hardware>
20. MikroTik RouterOS Documentation [Электронный ресурс] – MikroTik. URL: <https://help.mikrotik.com/docs/display/ROS/RouterOS>

21. Odom W. CCNA 200-301 Official Cert Guide. – Vol. 2. – Indianapolis : Cisco Press, 2020. – 608 p. – ISBN 978-1587147135
22. Python Documentation [Электронный ресурс] – Python Software Foundation. URL: <https://docs.python.org/3>
23. Saaty T. L. The Analytic Hierarchy Process. – New York : McGraw-Hill, 1980. – 287 p. – ISBN 978-0070543713
24. TOPSIS [Электронный ресурс] – Wikipedia, The Free Encyclopedia. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/TOPSIS>
25. Ubiquiti UniFi [Электронный ресурс] – Ubiquiti Inc. URL: <https://ui.com/us/en>

ДОДАТОК А

Лістинг файлу app.py

```
from flask import Flask, render_template, request, session, redirect, url_for
import json

from topos import filter_devices, calculate_topsis, calculate_ahp_weights

app = Flask(__name__)
app.secret_key = 'network_eval_2026'

# Дані за замовчуванням

DEFAULT_SWITCHES = [
    {"id": "SW-01", "name": "Cisco Catalyst 2960-24TT", "manufacturer":
    "Cisco"},
    {"id": "SW-02", "name": "Cisco Catalyst 9200", "manufacturer":
    "Cisco"},
    {"id": "SW-03", "name": "MikroTik CRS326-24G-2S+", "manufacturer":
    "MikroTik"},
    {"id": "SW-04", "name": "Ubiquiti UniFi USW-Pro-24", "manufacturer":
    "Ubiquiti"},
]

DEFAULT_ROUTERS = [
    {"id": "RT-01", "name": "Cisco 2911", "manufacturer": "Cisco"},
    {"id": "RT-02", "name": "Cisco ISR 4331", "manufacturer": "Cisco"},
    {"id": "RT-03", "name": "MikroTik RB4011iGS+RM", "manufacturer":
    "MikroTik"},
    {"id": "RT-04", "name": "Ubiquiti UniFi Gateway Pro", "manufacturer":
    "Ubiquiti"},
]
```

]

```
SWITCH_CRITERIA = [
    {"code": "K1", "name": "Propuskna zdatnist (Gbps)", "weight": 0.25,
    "minimize": False, "min_score": 1},
    {"code": "K2", "name": "Shvydkist peresilanya (Mpps)", "weight": 0.20,
    "minimize": False, "min_score": 1},
    {"code": "K3", "name": "Pidtrymka L3 marshrutyziatsiyi", "weight": 0.20,
    "minimize": False, "min_score": 3},
    {"code": "K4", "name": "Aparatne shyfruvannya", "weight": 0.25,
    "minimize": False, "min_score": 1},
    {"code": "K5", "name": "Pidtrymka stekuvannya", "weight": 0.10,
    "minimize": False, "min_score": 1},
    {"code": "K6", "name": "Vartist (menshe = krashe)", "weight": 0.10,
    "minimize": True, "min_score": 1},
]
```

```
ROUTER_CRITERIA = [
    {"code": "K1", "name": "Propuskna zdatnist pry shyfr. (Mbps)", "weight":
0.25, "minimize": False, "min_score": 1},
    {"code": "K2", "name": "Produktyvnist marshrutyziatsiyi (Mpps)", "weight":
0.20, "minimize": False, "min_score": 1},
    {"code": "K3", "name": "Pidtrymka DNA Center", "weight": 0.20,
    "minimize": False, "min_score": 1},
    {"code": "K4", "name": "Aparatne shyfruvannya", "weight": 0.25,
    "minimize": False, "min_score": 3},
    {"code": "K5", "name": "Aktyvna pidtrymka vyrobnyka", "weight":
0.10, "minimize": False, "min_score": 3},
    {"code": "K6", "name": "Vartist (menshe = krashe)", "weight": 0.10,
    "minimize": True, "min_score": 1},
]
```

```
]
```

```
DEFAULT_SWITCH_SCORES = {
    "SW-01": [2, 2, 1, 1, 2, 5],
    "SW-02": [5, 5, 5, 5, 5, 1],
    "SW-03": [3, 3, 4, 1, 2, 4],
    "SW-04": [3, 3, 4, 1, 1, 3],
}
```

```
DEFAULT_ROUTER_SCORES = {
    "RT-01": [2, 2, 1, 2, 1, 5],
    "RT-02": [5, 4, 5, 5, 5, 1],
    "RT-03": [4, 5, 1, 2, 4, 5],
    "RT-04": [4, 3, 1, 2, 4, 4],
}
```

```
@app.route('/')
def index():
```

```
    return render_template('index.html')
```

```
@app.route('/evaluate/<device_type>', methods=['GET', 'POST'])
```

```
def evaluate(device_type):
```

```
    if device_type == 'switches':
```

```
        devices = DEFAULT_SWITCHES
```

```
        criteria = SWITCH_CRITERIA
```

```
        scores = DEFAULT_SWITCH_SCORES
```

```
        title = 'Otsinka komutatoryv'
```

```
    else:
```

```
        devices = DEFAULT_ROUTERS
```

```
        criteria = ROUTER_CRITERIA
```

```

scores = DEFAULT_ROUTER_SCORES
title = 'Otsinka marshrutyzatoriv'

if request.method == 'POST':
    new_scores = {}
    for dev in devices:
        new_scores[dev['id']] = []
        for crit in criteria:
            key = f'{dev["id"]}_{crit["code"]}'
            val = int(request.form.get(key, 3))
            new_scores[dev['id']].append(val)
        session[f'{device_type}_scores'] = new_scores
        return redirect(url_for('weights', device_type=device_type))

return render_template('scores.html',
                      devices=devices, criteria=criteria,
                      scores=scores, title=title,
                      device_type=device_type)

@app.route('/weights/<device_type>', methods=['GET', 'POST'])
def weights(device_type):
    if device_type == 'switches':
        criteria = SWITCH_CRITERIA
        title = 'Vahy kryteriyiv - Komutatoryv'
    else:
        criteria = ROUTER_CRITERIA
        title = 'Vahy kryteriyiv - Marshrutyzatoryv'

    n = len(criteria)

```

```

if request.method == 'POST':
    matrix = []
    for i in range(n):
        row = []
        for j in range(n):
            key = f'm_{i}_{j}'
            row.append(float(request.form.get(key, 1.0)))
        matrix.append(row)
    computed_weights = calculate_ahp_weights(matrix)
    session[f'{device_type}_weights'] = computed_weights
    return redirect(url_for('results', device_type=device_type))

return render_template('weights.html',
                       criteria=criteria, n=n,
                       title=title, device_type=device_type)

@app.route('/results/<device_type>')
def results(device_type):
    if device_type == 'switches':
        devices = DEFAULT_SWITCHES
        criteria = SWITCH_CRITERIA
        scores = session.get('switches_scores', DEFAULT_SWITCH_SCORES)
        w_list = session.get('switches_weights', [c['weight'] for c in
SWITCH_CRITERIA])
        title = 'Rezultaty - Komutatoryv'
    else:
        devices = DEFAULT_ROUTERS
        criteria = ROUTER_CRITERIA
        scores = session.get('routers_scores', DEFAULT_ROUTER_SCORES)

```

```

        w_list = session.get('routers_weights', [c['weight'] for c in
ROUTER_CRITERIA])
        title = 'Rezultaty - Marshrutyzatoryv'

    for i, c in enumerate(criteria):
        c['weight'] = w_list[i]

    filtered, excluded = filter_devices(devices, scores, criteria)
    ranked = calculate_topsis(filtered, scores, criteria)

    return render_template('results.html',
                           ranked=ranked, excluded=excluded,
                           criteria=criteria, title=title,
                           device_type=device_type)

if __name__ == '__main__':
    app.run(debug=True)

```

ДОДАТОК Б

Лістинг файлу topsis.py

```

import math

def filter_devices(devices, scores, criteria):
    """Filtratsiya variantiv shcho ne vidpovidayut minimumu."""
    passed = []
    excluded = []
    for dev in devices:
        dev_scores = scores[dev['id']]
        fail_reason = None
        for i, crit in enumerate(criteria):
            if dev_scores[i] < crit['min_score']:
                fail_reason = (f'Kryteriy {crit['code']} ({crit['name']}): "
                               f'otsinka {dev_scores[i]} < minimum {crit['min_score']}')
                break
        if fail_reason:
            excluded.append(**dev, 'reason': fail_reason)
        else:
            passed.append(dev)
    return passed, excluded

def calculate_ahp_weights(matrix):
    """Metod ANP - rozrakhunok vahovykh koefitsiyentiv."""
    n = len(matrix)
    col_sums = [sum(matrix[i][j] for i in range(n)) for j in range(n)]
    normalized = []
    for i in range(n):
        row = [matrix[i][j] / col_sums[j] for j in range(n)]

```

```

        normalized.append(row)
    weights = [sum(normalized[i]) / n for i in range(n)]
    total = sum(weights)
    weights = [w / total for w in weights]
    return weights

def calculate_topsis(devices, scores, criteria):
    """Metod TOPSIS - povnyy rozrakhunok."""
    if not devices:
        return []
    n_dev = len(devices)
    n_crit = len(criteria)

    # Krok 1 - matrytsia otsinok
    matrix = []
    for dev in devices:
        matrix.append(scores[dev['id']])

    # Krok 2 - normalizatsiya
    col_norms = []
    for j in range(n_crit):
        norm = math.sqrt(sum(matrix[i][j] ** 2 for i in range(n_dev)))
        col_norms.append(norm if norm != 0 else 1)
    norm_matrix = []
    for i in range(n_dev):
        row = [matrix[i][j] / col_norms[j] for j in range(n_crit)]
        norm_matrix.append(row)

    # Krok 3 - zvazhena normalizovana matrytsia

```

```

weights = [c['weight'] for c in criteria]
weighted = []
for i in range(n_dev):
    row = [norm_matrix[i][j] * weights[j] for j in range(n_crit)]
    weighted.append(row)

# Krok 4 - idealne ta naygirshe rishennya
ideal_best = []
ideal_worst = []
for j in range(n_crit):
    col = [weighted[i][j] for i in range(n_dev)]
    if criteria[j]['minimize']:
        ideal_best.append(min(col))
        ideal_worst.append(max(col))
    else:
        ideal_best.append(max(col))
        ideal_worst.append(min(col))

# Krok 5 - vidstani do idealnoho ta naygirshoho
dist_best = []
dist_worst = []
for i in range(n_dev):
    db = math.sqrt(sum((weighted[i][j] - ideal_best[j]) ** 2 for j in
range(n_crit)))
    dw = math.sqrt(sum((weighted[i][j] - ideal_worst[j]) ** 2 for j in
range(n_crit)))
    dist_best.append(db)
    dist_worst.append(dw)

# Krok 6 - vidnosna blyzhnist Ci

```

```

results = []
for i, dev in enumerate(devices):
    denom = dist_best[i] + dist_worst[i]
    ci = dist_worst[i] / denom if denom != 0 else 0
    results.append({
        'id':      dev['id'],
        'name':    dev['name'],
        'manufacturer': dev['manufacturer'],
        'Ci':      round(ci, 4),
        'd_plus':  round(dist_best[i], 4),
        'd_minus': round(dist_worst[i], 4),
        'scores':  scores[dev['id']],
    })

results.sort(key=lambda x: x['Ci'], reverse=True)
for rank, r in enumerate(results, 1):
    r['rank'] = rank
return results

```

ДОДАТОК В

Лістинг файлу templates/index.html

```

<!DOCTYPE html>
<html lang="uk">
<head>
<meta charset="UTF-8">
<meta name="viewport" content="width=device-width, initial-scale=1.0">
<title>Otsinka aparatnoho zabezpechennya merezhi</title>
<style>
/* styly interfeysu */
:root {
  --bg: #0a0e1a; --surface: #111827; --border: #1e2d45;
  --accent: #00c8ff; --accent2: #0066ff;
  --text: #e2e8f0; --muted: #64748b;
}
body { background: var(--bg); color: var(--text);
  font-family: 'Onest', sans-serif; min-height: 100vh;
  display: flex; flex-direction: column;
  align-items: center; justify-content: center; padding: 2rem; }
.badge { display: inline-block; font-size: 0.7rem; color: var(--accent);
  border: 1px solid var(--accent); padding: 0.25rem 0.75rem;
  border-radius: 100px; margin-bottom: 1.5rem; }
h1 { font-size: clamp(1.8rem, 4vw, 2.8rem); font-weight: 800; margin-bottom:
0.75rem; }
h1 span { background: linear-gradient(90deg, var(--accent2), var(--accent));
  -webkit-background-clip: text; -webkit-text-fill-color: transparent; }
.cards { display: grid; grid-template-columns: repeat(auto-fit,
minmax(300px, 1fr));
  gap: 1.5rem; width: 100%; max-width: 780px; margin-bottom: 2.5rem; }
.card { background: var(--surface); border: 1px solid var(--border);

```

```

border-radius: 16px; padding: 2rem; text-decoration: none; color: inherit;
transition: border-color 0.2s, transform 0.2s; }
.card:hover { border-color: var(--accent); transform: translateY(-4px); }
</style>
</head>
<body>
<div class="header">
  <div class="badge">TOPSIS + ANP · Diplomna robota 2026</div>
  <h1>Otsinka <span>aparatnoho zabezpechennya</span><br>komp'yuternoyi
  merezhi</h1>
</div>
<div class="cards">
  <a href="/evaluate/switches" class="card">
    <div>Otsinka komutatoryv</div>
    <p>Porivnyannya 4 variantiv: Cisco Catalyst 2960, 9200, MikroTik CRS326,
    Ubiquiti USW-Pro-24</p>
  </a>
  <a href="/evaluate/routers" class="card">
    <div>Otsinka marshrutyзаторiv</div>
    <p>Porivnyannya 4 variantiv: Cisco 2911, ISR 4331, MikroTik RB4011,
    Ubiquiti Gateway Pro</p>
  </a>
</div>
<div class="steps">
  <p>PROTSES OTSINYUVANNYA: 1 - Pereviryt otsinky -&gt; 2 - Zadaty
  vahy -&gt;
  3 - Vidsiv -&gt; 4 - Rozrakhunok TOPSIS -&gt; 5 - Reytrynh</p>
</div>
</body>
</html>

```

ДОДАТОК Г

Лістинг файлу templates/scores.html

```

<!DOCTYPE html>
<html lang="uk">
<head>
<meta charset="UTF-8">
<title>{{ title }}</title>
<style>
:root { --bg: #0a0e1a; --surface: #111827; --border: #1e2d45;
      --accent: #00c8ff; --text: #e2e8f0; --muted: #64748b; }
body { background: var(--bg); color: var(--text);
      font-family: 'Onest', sans-serif; padding: 2rem; }
.container { max-width: 1000px; margin: 0 auto; }
table { width: 100%; border-collapse: collapse; }
thead th { padding: 1rem; font-size: 0.75rem; color: var(--muted);
          border-bottom: 1px solid var(--border); }
tbody td { padding: 0.875rem 1rem; font-size: 0.875rem; }
select { background: var(--bg); border: 1px solid var(--border);
        color: var(--text); padding: 0.4rem; border-radius: 8px; width: 60px; }
.btn { background: linear-gradient(135deg, #0066ff, #00c8ff); color: #fff;
      border: none; padding: 0.875rem 2.5rem; border-radius: 12px;
      font-size: 1rem; font-weight: 600; cursor: pointer; }
</style>
</head>
<body>
<div class="container">
  <a href="/">← Holovna</a>
  <h1>{{ title }}</h1>
  <form method="POST">
    <table>

```

```

<thead>
  <tr>
    <th>Prystrid</th>
    {% for c in criteria %}<th>{{ c.code }} {{ c.name }}</th>{% endfor %}
  </tr>
</thead>
<tbody>
  {% for dev in devices %}
    <tr>
      <td>{{ dev.name }} ({{ dev.id }})</td>
      {% for c in criteria %}
        {% set val = scores[dev.id][loop.index0] %}
        <td>
          <select name="{{ dev.id }}_{{ c.code }}">
            {% for i in range(1,6) %}
              <option value="{{ i }}" {% if i == val %}selected{% endif %}>{{ i
            }}</option>
            {% endfor %}
          </select>
        </td>
      {% endfor %}
    </tr>
  {% endfor %}
</tbody>
</table>
  <button type="submit" class="btn">Pereyty do vah kryteriiv</button>
</form>
</div>
</body>
</html>

```

ДОДАТОК Д

Лістинг файлу templates/weights.html

```

<!DOCTYPE html>
<html lang="uk">
<head>
<meta charset="UTF-8">
<title>{{ title }}</title>
<style>
:root { --bg: #0a0e1a; --surface: #111827; --border: #1e2d45;
      --accent: #00c8ff; --text: #e2e8f0; --muted: #64748b; }
body { background: var(--bg); color: var(--text);
      font-family: 'Onest', sans-serif; padding: 2rem; }
.container { max-width: 900px; margin: 0 auto; }
table { width: 100%; border-collapse: collapse; }
th { padding: 0.875rem; font-size: 0.72rem; color: var(--muted);
     border-bottom: 1px solid var(--border); text-align: center; }
td { padding: 0.75rem; border-bottom: 1px solid var(--border); text-align:
center; }
input[type="number"] { background: var(--bg); border: 1px solid var(--
border);
                      color: var(--text); padding: 0.4rem; border-radius: 6px;
                      width: 60px; text-align: center; }
.btn { background: linear-gradient(135deg, #0066ff, #00c8ff); color: #fff;
      border: none; padding: 0.875rem 2.5rem; border-radius: 12px;
      font-size: 1rem; font-weight: 600; cursor: pointer; }
</style>
<script>
function updateMirror(i, j, val) {
  const mirror = document.querySelector('[name="m_' + j + '_' + i + "']");
  if (mirror && val > 0) mirror.value = (1 / val).toFixed(3);

```

```

}
</script>
</head>
<body>
<div class="container">
  <a href="/">← Holovna</a>
  <h1>{{ title }}</h1>
  <form method="POST">
    <table>
      <thead>
        <tr>
          <th>Kryteriy</th>
          {% for c in criteria %}<th>{{ c.code }}</th>{% endfor %}
        </tr>
      </thead>
      <tbody>
        {% for i in range(n) %}
          <tr>
            <td>{{ criteria[i].code }} - {{ criteria[i].name }}</td>
            {% for j in range(n) %}
              <td>
                {% if i == j %}
                  <span>1</span>
                  <input type="hidden" name="m_{{ i }}_{{ j }}" value="1">
                {% elif i < j %}
                  <input type="number" name="m_{{ i }}_{{ j }}" value="1"
                    min="0.111" max="9" step="0.001"
                    oninput="updateMirror({{ i }}, {{ j }}, this.value)">
                {% else %}
                  <input type="number" name="m_{{ i }}_{{ j }}" value="1"

```

```
        min="0.111" max="9" step="0.001" readonly>
    {% endif %}
</td>
{% endfor %}
</tr>
{% endfor %}
</tbody>
</table>
<button type="submit" class="btn">Rozrakhuvaty TOPSIS</button>
</form>
</div>
</body>
</html>
```

ДОДАТОК Е

Лістинг файлу templates/results.html

```

<!DOCTYPE html>
<html lang="uk">
<head>
<meta charset="UTF-8">
<title>{{ title }}</title>
<style>
:root { --bg: #0a0e1a; --surface: #111827; --border: #1e2d45;
      --accent: #00c8ff; --text: #e2e8f0; --muted: #64748b;
      --success: #10b981; --danger: #ef4444; }
body { background: var(--bg); color: var(--text);
      font-family: 'Onest', sans-serif; padding: 2rem; }
.container { max-width: 1100px; margin: 0 auto; }
.winner { background: rgba(0,102,255,0.15); border: 1px solid var(--accent);
      border-radius: 16px; padding: 1.5rem 2rem; margin-bottom: 2rem;
      display: flex; align-items: center; gap: 1.5rem; }
.winner-ci { margin-left: auto; text-align: right; }
.ci-val { font-size: 2rem; font-weight: 700; color: var(--accent); }
table { width: 100%; border-collapse: collapse; }
thead th { padding: 0.875rem 1rem; font-size: 0.72rem; color: var(--muted);
      border-bottom: 1px solid var(--border); }
tbody td { padding: 0.875rem 1rem; font-size: 0.875rem; }
.ci-bar { width: 100px; height: 6px; background: var(--border);
      border-radius: 100px; overflow: hidden; display: inline-block; }
.ci-bar-fill { height: 100%; background: linear-gradient(90deg, #0066ff,
#00c8ff); }
.excluded-item { background: var(--surface); border-left: 3px solid var(--
danger);
      border-radius: 12px; padding: 1rem; margin-bottom: 0.75rem; }

```

```

</style>
</head>
<body>
<div class="container">
  <a href="/">← Holovna</a>
  <h1>{{ title }}</h1>

  {% if ranked %}
  <div class="winner">
    <div>Trophy</div>
    <div>
      <h3>{{ ranked[0].name }}</h3>
      <p>{{ ranked[0].id }} - {{ ranked[0].manufacturer }} - Rekomendovanyy
variant</p>
    </div>
    <div class="winner-ci">
      <div class="ci-val">{{ ranked[0].Ci }}</div>
      <div>pokaznyk Ci</div>
    </div>
  </div>

  <table>
    <thead>
      <tr>
        <th>Mistse</th><th>Prystrid</th>
        {% for c in criteria %}<th>{{ c.code }}</th>{% endfor %}
        <th>d+</th><th>d-</th><th>Ci</th>
      </tr>
    </thead>
    <tbody>

```

```

{% for r in ranked %}
<tr>
  <td>{{ r.rank }}</td>
  <td>{{ r.name }} ({{ r.id }})</td>
  {% for s in r.scores %}<td>{{ s }}</td>{% endfor %}
  <td>{{ r.d_plus }}</td>
  <td>{{ r.d_minus }}</td>
  <td>
    <div class="ci-bar">
      <div class="ci-bar-fill" style="width:{{ (r.Ci*100)|round|int
}}%"></div>
    </div>
    {{ r.Ci }}
  </td>
</tr>
{% endfor %}
</tbody>
</table>

<h2>Важь критерийив (ANP)</h2>
{% for c in criteria %}
<div>{{ c.code }}: {{ c.name }} - {{ "%.3f"|format(c.weight) }}</div>
{% endfor %}

{% else %}
<p>Немає допущеньих вариантв - всь пристроїв буль видсьїань.</p>
{% endif %}

{% if excluded %}
<h2>Видсьїань вариантв</h2>

```

```

{% for dev in excluded %}
<div class="excluded-item">
  <strong>{{ dev.name }}</strong> ({{ dev.id }})<br>
  <span>{{ dev.reason }}</span>
</div>
{% endfor %}
{% endif %}

<a href="/evaluate/{{ device_type }}">← Zminyty otsinky</a>
<a href="/">Nova otsinka</a>
</div>
</body>
</html>

```