ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ ТА ТЕХНОЛОГІЙ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Система теплового моніторингу серверного обладнання корпоративної мережі із впровадженням алгоритмів інтелектуальної обробки даних»

на здобуття освітнього ступеня бакалавра
зі спеціальності 126 Інформаційні системи та технології
освітньо-професійної програми Інформаційні системи та технології

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

	Володимир БАЧКОВ
(підпис)	*Ім'я, ПРІЗВИЩЕ здобувача*

Виконав:	здобувач вищої освіти гр. ІСД-42 Володимир БАЧКОВ Ім'я, ПРІЗВИЩЕ
Керівник: *науковий ступінь, вчене звання*	Каміла СТОРЧАК, д. т. н., професор Ім'я, ПРІЗВИЩЕ
Рецензент: *науковий ступінь, вчене звання*	 Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Київ 2026

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Навчально-науковий інститут Інформаційних технологій

Кафедра Інформаційних систем та технологій
Ступінь вищої освіти бакалавр
Спеціальність 126 Інформаційні системи та технології
Освітньо-професійна програма Інформаційні системи та технології

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедрою ІСТ
_____Каміла СТОРЧАК
«_____» ___2026 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Бачкову Володимиру Андрійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема кваліфікаційної роботи: Інтелектуальна система автоматизованого сортування твердих побутових відходів на основі вбудованих нейромережевих моделей

керівник кваліфікаційної роботи Каміла СТОРЧАК, д. т. н., професор,
(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій від «20»02_2026р. № 51

2. Строк подання кваліфікаційної роботи «01» 06 2026 р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи: наукова та технічна література з питань теплового моніторингу серверного обладнання, IoT-систем контролю мікроклімату, SCADA-систем, методів предиктивної аналітики, рекурентних нейронних мереж GRU, а також матеріали щодо моделювання теплових процесів, локального охолодження та енергоефективного керування серверною інфраструктурою.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)
1. Провести аналіз сучасних методів і систем термічного моніторингу серверної інфраструктури корпоративної мережі.
2. Розробити математичну та алгоритмічну модель прогнозування температури серверного обладнання з використанням GRU.

3. Реалізувати програмну систему теплового моніторингу з візуалізацією температурного стану, Heatmap та механізмом адаптивного точкового охолодження.

5. Перелік ілюстративного матеріалу: *презентація*

6. Дата видачі завдання «20» 02 2026р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз предметної області та сучасних систем теплового моніторингу серверного обладнання	01.03.2026	
2	Дослідження методів предиктивного аналізу температури та інтелектуального керування охолодженням	15.03.2026	
3	Розробка математичної моделі теплової інерції серверного обладнання	28.03.2026	
4	Проєктування алгоритму адаптивного точкового охолодження при локальних перегрівах	21.04.2026	
5	Програмна реалізація системи моніторингу, прогнозування температури та візуалізації Heatmap	05.05.2026	
6	Розробка демонстраційних матеріалів	15.05.2026	
7	Попередній захист дипломної роботи	19.05.2026	
8	Подання роботи в деканат	01.06.2026	

Здобувач(ка) вищої освіти _____ Володимир БАЧКОВ
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

Керівник
кваліфікаційної роботи _____ Каміла СТОРЧАК
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

РЕФЕРАТ

Текстова частина кваліфікаційної роботи на здобуття освітнього ступеня бакалавра: 57 стор., 24 рис., 1 табл., 20 джерел.

Мета роботи – розробка та оцінка ефективності системи теплового моніторингу серверного обладнання корпоративної мережі з використанням алгоритмів інтелектуальної обробки даних і прогнозування температурного стану.

Об'єкт дослідження – процес теплового моніторингу та керування охолодженням серверного обладнання в корпоративній мережевій інфраструктурі.

Предмет дослідження – математичні моделі теплової інерції серверного обладнання, алгоритми предиктивного аналізу температури, засоби візуалізації теплового стану та методи адаптивного точкового охолодження.

Короткий зміст роботи: У роботі досліджено сучасні методи термічного моніторингу серверної інфраструктури, розглянуто IoT-рішення, SCADA-системи та підходи до переходу від реактивного до предиктивного керування охолодженням. Розроблено математичну модель зміни температури серверного обладнання з урахуванням навантаження, інтенсивності охолодження та теплової інерції. Обґрунтовано використання рекурентної нейронної мережі GRU для прогнозування температури на кілька кроків уперед. Програмний прототип забезпечує моніторинг температури віртуальних серверів, візуалізацію теплового стану за допомогою Heatmap, визначення локальних зон перегріву та адаптивне підсилення охолодження у проблемних ділянках. Проведено порівняння роботи системи без інтелектуального прогнозування та з використанням предиктивного керування.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: СЕРВЕРНЕ ОБЛАДНАННЯ, ТЕПЛОВИЙ МОНІТОРИНГ, КОРПОРАТИВНА МЕРЕЖА, ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА ОБРОБКА ДАНИХ, GRU, HEATMAP, ПРЕДИКТИВНЕ КЕРУВАННЯ, ТОЧКОВЕ ОХОЛОДЖЕННЯ, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ.

ABSTRACT

Textual part of the qualification work for obtaining a bachelor's degree: 57 pages, 24 figures., 1 table, 20 references.

The purpose of the work is to develop and evaluate the effectiveness of a thermal monitoring system for corporate network server equipment using intelligent data processing algorithms and temperature forecasting.

The object of research is the process of thermal monitoring and cooling control of server equipment in a corporate network infrastructure.

The subject of research is mathematical models of server thermal inertia, predictive temperature analysis algorithms, thermal state visualization tools, and methods of adaptive local cooling.

Summary of the work: The work investigates modern methods of thermal monitoring of server infrastructure, analyzes IoT solutions, SCADA systems, and approaches to the transition from reactive to predictive cooling control. A mathematical model of server temperature dynamics was developed, taking into account workload, cooling intensity, and thermal inertia. The use of a GRU recurrent neural network for multi-step temperature forecasting was substantiated. The software prototype provides temperature monitoring of virtual servers, thermal state visualization using a Heatmap, detection of local overheating zones, and adaptive cooling intensification in problematic areas. A comparison of system operation without intelligent forecasting and with predictive cooling control was carried out.

KEYWORDS: SERVER EQUIPMENT, THERMAL MONITORING, CORPORATE NETWORK, INTELLIGENT DATA PROCESSING, GRU, HEATMAP, PREDICTIVE CONTROL, LOCAL COOLING, ENERGY EFFICIENCY.

ЗМІСТ

ВСТУП

Актуальність теми. У сучасних умовах корпоративні інформаційні системи, хмарні сервіси, бази даних, системи електронного документообігу, засоби кіберзахисту та внутрішні цифрові сервіси організацій значною мірою залежать від стабільної роботи серверного обладнання. Серверна інфраструктура є одним із ключових елементів корпоративної мережі, оскільки забезпечує обробку, зберігання та передавання даних, підтримку прикладних сервісів і безперервність бізнес-процесів. При цьому сервери, комутатори, системи зберігання даних та інше мережеве обладнання під час роботи виділяють значну кількість тепла, а порушення температурного режиму може призводити до зниження продуктивності, аварійного вимкнення, пошкодження компонентів і скорочення строку експлуатації обладнання.

Особливо актуальною є проблема локальних перегрівів у серверних приміщеннях. Навіть за наявності загальної системи кондиціонування температура в різних зонах серверної кімнати може відрізнятися через нерівномірне навантаження обладнання, особливості розміщення серверних стійок, рециркуляцію гарячого повітря, недостатню ефективність вентиляції або затримку реакції системи охолодження. У таких умовах контроль лише середньої температури приміщення є недостатнім, оскільки він не дозволяє своєчасно виявити проблемну зону. Тому сучасна система моніторингу повинна забезпечувати просторово деталізований аналіз теплового стану серверної кімнати та підтримувати прийняття рішень щодо локального керування охолодженням.

Традиційні підходи до керування охолодженням переважно мають реактивний характер: система підсилює охолодження лише після того, як температура вже перевищила встановлений поріг. Такий підхід не завжди є ефективним, оскільки серверне обладнання має теплову інерцію, а отже температура може продовжувати зростати навіть після початку охолодження. Перспективним напрямом вирішення цієї проблеми є застосування інтелектуальних алгоритмів обробки даних, які здатні аналізувати попередню

динаміку температури, навантаження та охолодження, прогнозувати майбутній тепловий стан і завчасно формувати керуючий вплив. Саме тому актуальним є розроблення системи, яка поєднує тепловий моніторинг, математичне моделювання, рекурентне прогнозування та адаптивне точкове охолодження.

Метою кваліфікаційної роботи є розробка та оцінка ефективності системи теплового моніторингу серверного обладнання корпоративної мережі з використанням алгоритмів інтелектуальної обробки даних, прогнозування температурного стану та адаптивного керування охолодженням.

Об'єктом дослідження є процес теплового моніторингу та керування охолодженням серверного обладнання в корпоративній мережевій інфраструктурі.

Предметом дослідження є математичні моделі теплової інерції серверного обладнання, алгоритми предиктивного аналізу температури, засоби візуалізації теплового стану та методи адаптивного точкового охолодження.

Для досягнення поставленої мети у роботі було визначено такі завдання: дослідити роль термічного контролю у забезпеченні стійкості корпоративних мереж; проаналізувати сучасні IoT-рішення, SCADA-системи та платформи моніторингу серверних приміщень; обґрунтувати необхідність переходу від реактивного до предиктивного керування охолодженням; розробити математичну модель теплової інерції серверного обладнання; формалізувати алгоритм адаптивного точкового охолодження при локальних перегрівах; обґрунтувати вибір архітектури рекурентної нейронної мережі GRU для прогнозування температури; реалізувати програмний комплекс теплового моніторингу з графічним інтерфейсом, тепловою картою та інтерактивною панеллю серверної кімнати; провести тестування системи та порівняти реактивний і предиктивний режими керування за показниками перегріву, теплового ризику та енерговитрат.

Методи дослідження включають аналіз науково-технічних джерел щодо термічного моніторингу серверної інфраструктури, IoT-рішень, SCADA-систем і предиктивного керування; математичне моделювання теплової інерції серверного обладнання; імітаційне моделювання роботи серверної кімнати; методи аналізу часових рядів; рекурентні нейронні мережі GRU; порівняльне тестування

реактивного та предиктивного керування; статистичну оцінку результатів моделювання; побудову теплових карт, графіків і діаграм для візуального аналізу ефективності системи. Для реалізації програмної частини використано мову Python, бібліотеки NumPy, Pandas, PyTorch, Matplotlib, Plotly, а також фреймворк Streamlit для створення графічного інтерфейсу.

Наукова новизна роботи полягає в удосконаленні підходу до теплового моніторингу серверного обладнання шляхом поєднання математичної моделі теплової інерції, рекурентного прогнозування температури на основі GRU та алгоритму адаптивного точкового охолодження окремих серверних зон. На відміну від традиційного реактивного контролю, запропонований підхід враховує не лише поточне перевищення температурного порогу, а й прогнозовану динаміку нагрівання, що дозволяє завчасно підсилювати охолодження у зонах потенційного перегріву. Це забезпечує перехід від пасивного моніторингу до інтелектуального предиктивного керування тепловим станом серверної інфраструктури.

Практичне значення роботи полягає у створенні програмного прототипу системи теплового моніторингу серверної кімнати, який може бути використаний як навчально-дослідний стенд для аналізу температурної динаміки, тестування алгоритмів прогнозування та демонстрації принципів адаптивного локального охолодження. Розроблена система забезпечує моделювання роботи серверної кімнати у вигляді сітки 5×5, відображення температурного стану за допомогою Heatmap, інтерактивну візуалізацію серверних стійок, прогнозування температури на основі GRU та порівняння ефективності реактивного й предиктивного керування. Отримані результати можуть бути використані для подальшого вдосконалення систем моніторингу серверних приміщень, розширення моделі на реальні IoT-датчики та інтеграції з інженерними системами охолодження.

Структура роботи. Кваліфікаційна робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, переліку посилань і додатків. У першому розділі досліджено сучасні методи та системи термічного моніторингу серверної інфраструктури, розглянуто роль теплового контролю у забезпеченні стійкості корпоративних мереж, проаналізовано IoT-рішення, SCADA-системи та обґрунтовано доцільність

переходу до предиктивного керування охолодженням. У другому розділі розроблено математичну модель теплової інерції серверного обладнання, формалізовано алгоритм адаптивного точкового охолодження та обґрунтовано вибір архітектури GRU для прогнозування температури. У третьому розділі описано програмну реалізацію системи, навчання моделі прогнозування, візуалізацію теплового стану серверної кімнати, а також проведено аналіз результатів тестування та оцінку ефективності запропонованого підходу.

Апробація результатів. Основні положення дослідження успішно пройшли апробацію на:

1. VI Всеукраїнській науково-технічній конференції «Сучасний стан та перспективи розвитку IoT» (Київ, ДУІКТ, 15 квітня 2025 р.). Тези доповіді на тему «Використання штучного інтелекту для безпекових заходів у мережах IoT» опубліковані у збірнику матеріалів конференції (с. 367). URL: https://duikt.edu.ua/uploads/p_2779_40288420.pdf

2. VII Всеукраїнській науково-технічній конференції «Сучасний стан та перспективи розвитку IoT» (Київ, ДУІКТ, 20 квітня 2026 р.). Тези доповіді на тему «Підвищення стійкості корпоративних мереж дотермічних загроз за допомогою інтелектуальних систем моніторингу на базі IoT» опубліковані у збірнику матеріалів конференції (с. 245). URL: https://duikt.edu.ua/uploads/p_3086_38551069.pdf

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ТА СИСТЕМ ТЕРМІЧНОГО МОНІТОРИНГУ СЕРВЕРНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

1.1 Роль термічного контролю у забезпеченні стійкості корпоративних мереж

Стійкість корпоративної мережі значною мірою залежить не лише від логічної організації маршрутизації, резервування каналів або захисту інформації, а й від фізичних умов роботи серверного обладнання. Сервери, системи зберігання даних, комутатори та інші елементи інфраструктури під час функціонування перетворюють майже всю спожиту електроенергію на тепло, тому недостатнє або нерівномірне охолодження безпосередньо підвищує ризик локальних перегрівів, зниження продуктивності, аварійного вимкнення обладнання та скорочення строку його експлуатації. У дослідженні B. Ott, P. M. Wenzel та P. Radgen проаналізовано розвиток технологій охолодження дата-центрів на основі патентних заявок за 2000–2023 рр. Автори застосували метод патентного аналізу, класифікували технології охолодження на рівні серверів і серверних приміщень та показали, що зростання продуктивності й теплової щільності обладнання посилює потребу в ефективнішому відведенні тепла. Вимірюваними результатами цього дослідження є структура патентної активності за типами охолодження, динаміка переходу від повітряного до рідинного та гібридного охолодження, а також оцінка ролі PUE як показника енергоефективності. Значення цієї роботи полягає в тому, що вона підтверджує системний характер проблеми: охолодження вже розглядається не як допоміжна функція, а як критичний компонент надійності серверної інфраструктури, особливо за умов зростання навантаження на CPU, GPU та AI-сервери [1].

Подальший розвиток термічного контролю пов’язаний із переходом від разового вимірювання температури до постійного збору та інтелектуального аналізу експлуатаційних даних. У дослідженні V. Milić запропоновано data-driven framework для енергоменеджменту дата-центру Ericsson у м. Лінчепінг, Швеція.

Методологічною основою роботи є цикл OODA, тобто послідовність спостереження, орієнтації, прийняття рішення та дії, а для аналізу даних використано K-means кластеризацію. Автор аналізував параметри LCP-систем охолодження: температуру зворотного повітря, витрату охолодженої води, різницю температур подачі й повернення води та потужність охолодження. Вимірювані результати показали зміну щільності потужності охолодження, серверів і допоміжних систем у двох періодах збору даних: середня щільність потужності охолодження становила 7,23 кВт/м² у першому періоді та 9,09 кВт/м² у другому, а для серверів – 7,14 кВт/м² і 8,93 кВт/м² відповідно [2]. На рис. 1.1 подано графік зміни щільності потужності охолодження, серверів і допоміжних систем, оскільки він демонструє, що безперервний моніторинг дозволяє виявляти зміни режимів роботи інфраструктури та оцінювати відповідність охолодження фактичному тепловому навантаженню.

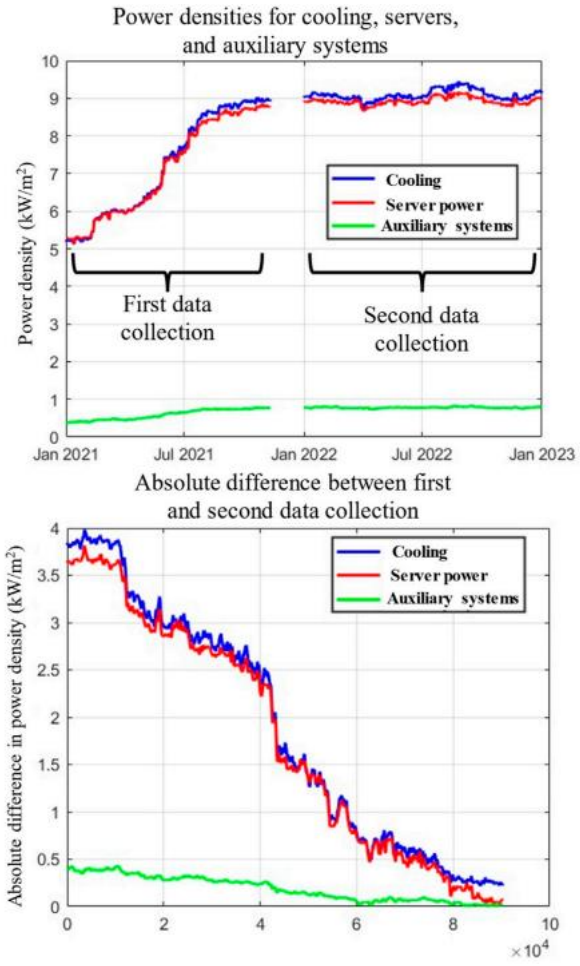


Рис. 1.1 Динаміка щільності потужності охолодження, серверного навантаження та допоміжних систем дата-центру [2]

Особливо важливим у роботі V. Milić є те, що автор не обмежується фіксацією температур, а показує можливість виявлення прихованих режимів роботи охолодження через кластеризацію. На рис. 1.2 можна побачити результати групування параметрів LCP return air temperature, chilled water flow rate, ΔT chilled water та cooling power. Цей рисунок показує, що режими охолодження не є однаковими: система може працювати в різних кластерах, частина з яких свідчить про стабільний режим, а частина – про потенційно неефективне або нестандартне охолодження. Для корпоративної серверної інфраструктури це має прикладне значення, оскільки дозволяє перейти від простого реагування на перевищення температурного порогу до раннього виявлення небажаних тенденцій і підготовки керувального впливу до того, як сервери почнуть працювати в небезпечному температурному режимі [2].

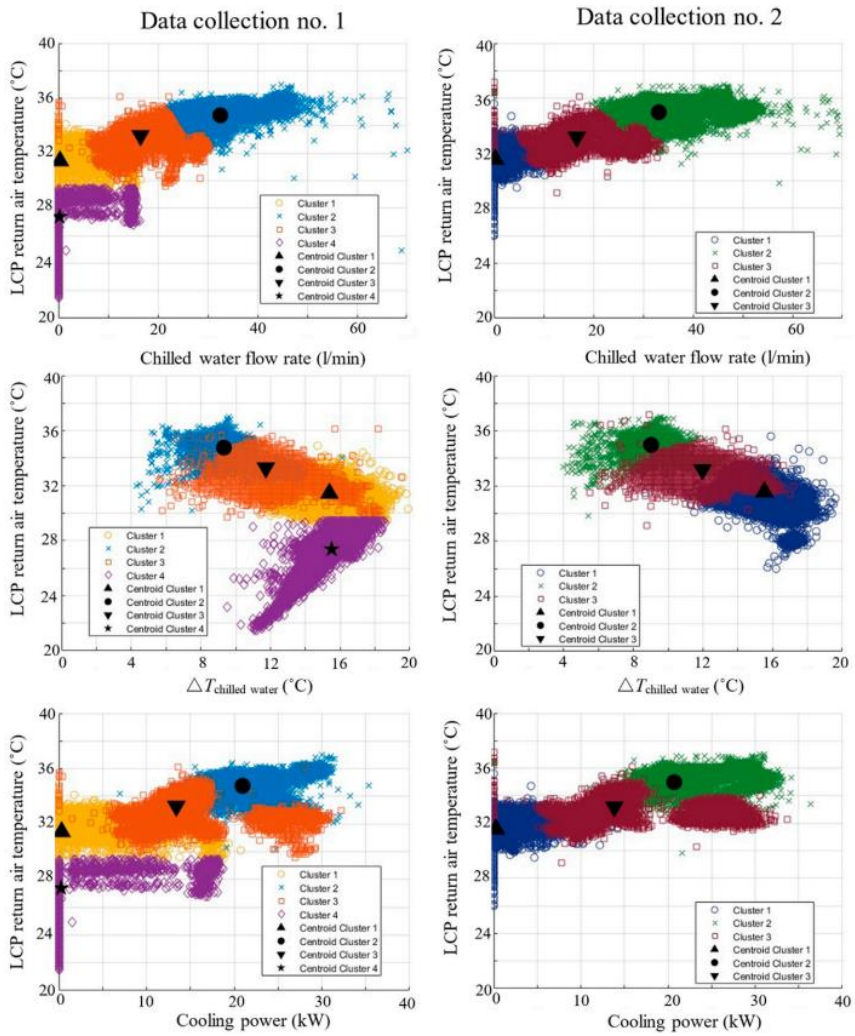


Рис. 1.2 Кластеризація параметрів охолодження за температурою зворотного повітря, витратою охолодженої води, ΔT та потужністю охолодження [2]

Експериментальне підтвердження важливості точного термічного контролю наведено у роботі O. M. Sarikaya та співавторів, де досліджено два європейські дата-центри – PSNC у Польщі та AAU у Данії. Автори застосували CFD-моделювання повітряних потоків і температурних полів, а валідацію моделі виконали за допомогою реальних температурних вимірювань: у одному випадку використовували зовнішні датчики на вході та виході серверів, в іншому – вбудовані серверні IPMI-датчики, що фіксували температуру, навантаження та швидкість вентиляторів. Вимірюваними результатами були температури на входах серверів, швидкості повітря, теплові поля, а також KPI охолодження: RCI, RTI, RHI та RI. На рис. 1.3 показано порівняння виміряних і змодельованих температур на вході серверів, оскільки воно підтверджує, що дані температурного моніторингу можуть бути використані не лише для аварійного сповіщення, а й для побудови достовірної моделі теплового стану серверної кімнати [3].

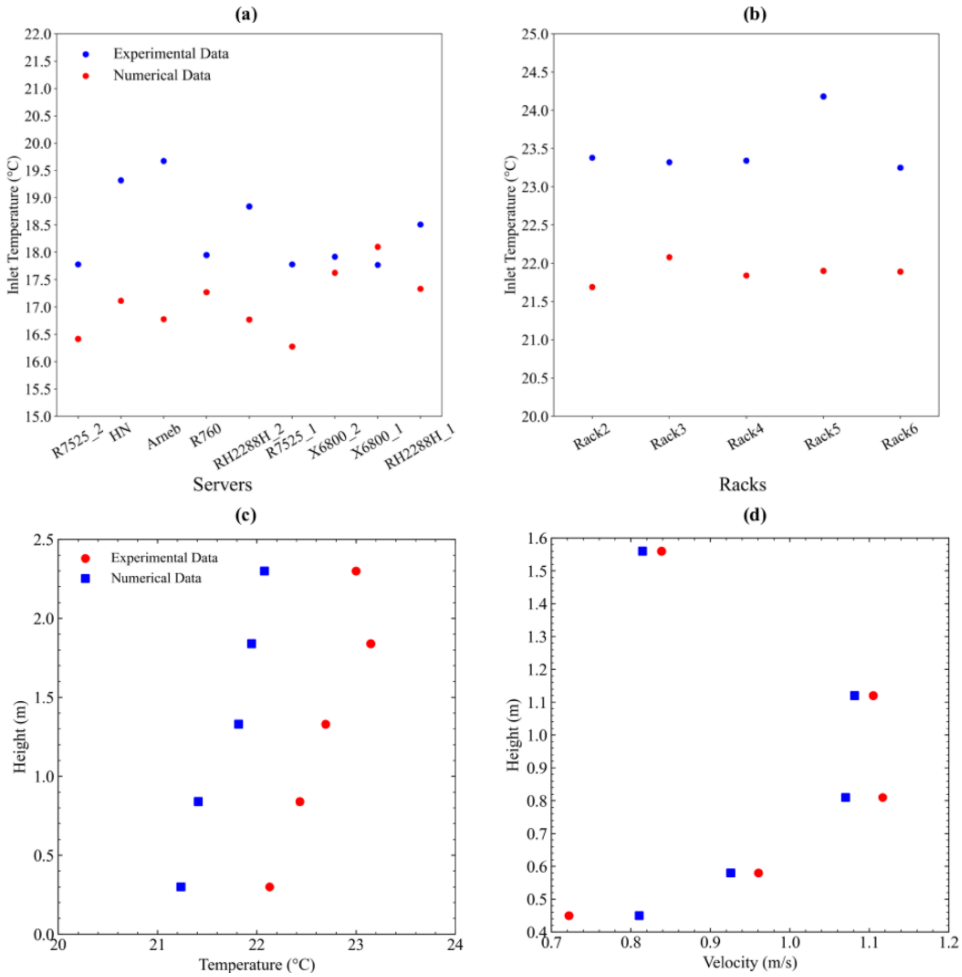


Рис. 1.3 Порівняння виміряних і змодельованих температур на вході серверів у дата-центрах PSNC та AAU [3]

Результати Sarikaya та співавторів також показують, що навіть за наявності охолоджувального обладнання серверна кімната може мати локальні перегріті зони через рециркуляцію гарячого повітря, змішування холодних і гарячих потоків або невдале розташування вентиляційних блоків. Саме це відображено на температурних полях і траєкторіях повітряних потоків для PSNC та AAU (рис. 1.4). У вихідному стані PSNC мав ознаки недостатньої подачі холодного повітря до серверів і повернення нагрітого повітря до вхідних зон, що збільшувало теплове навантаження на систему охолодження. Для AAU загальна ситуація була кращою, але аналіз RTI й повітряних потоків також виявив локальну рециркуляцію та bypass холодного повітря. Після запропонованих змін, зокрема організації розділення гарячих і холодних потоків, оптимізації розташування стійок та ущільнення невикористаних серверних відсіків, для PSNC було отримано покращення RHI на

50% і RI на 31%, а для AAU – покращення RTI на 75% і RHI на 18%. Це є одним із найсильніших доказів того, що термічний контроль має бути просторово деталізованим, тобто повинен виявляти не лише середню температуру кімнати, а й конкретні зони локального перегріву [3].

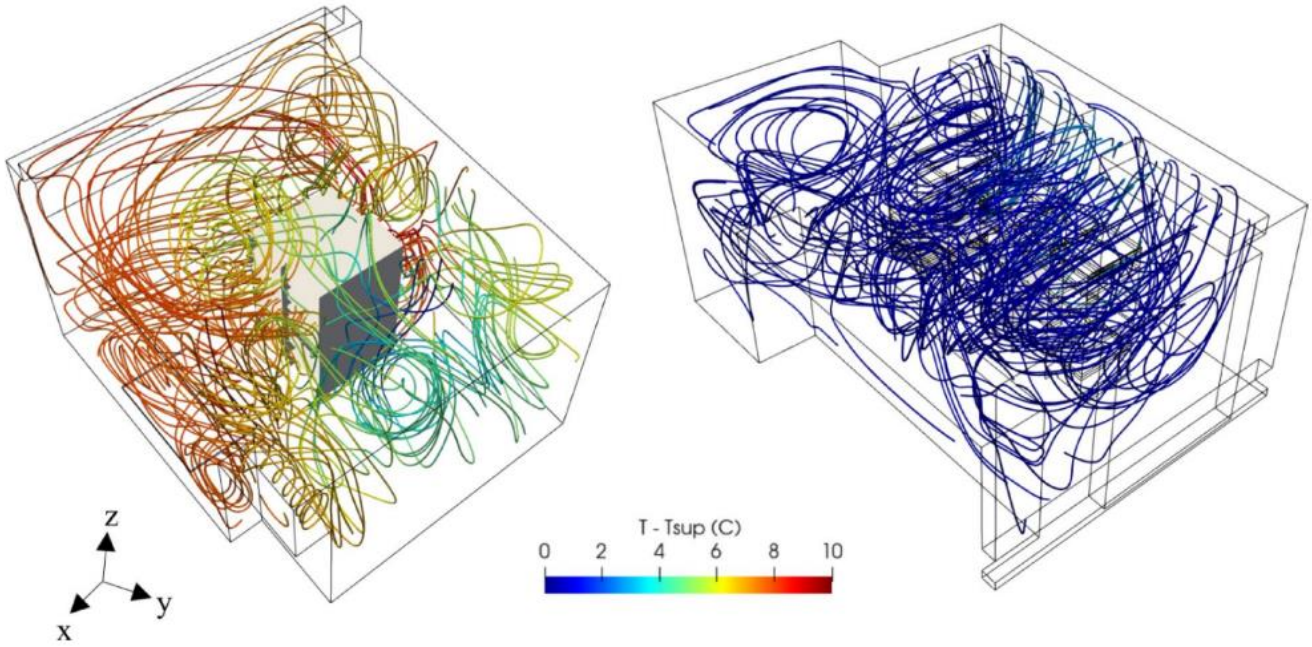


Рис. 1.4 Вектори швидкості повітря та температурні поля у дата-центрах PSNC і AAU [3]

Схожий висновок зроблено у дослідженні M. Kuzay та співавторів, присвяченому модернізації повітряного охолодження невеликого дата-центру Bitnet. Автори використали open-source CFD-модель, яку попередньо валідували температурними вимірюваннями в реальному дата-центрі. Методика дослідження полягала у побудові чисельної моделі, аналізі теплового розподілу, виявленні рециркуляції гарячого повітря та порівнянні вихідної конфігурації з модернізованим варіантом, у якому було організовано гарячий коридор за допомогою рухомої перегородки позаду стійки. Вимірюваними результатами стали температурні поля, показники RCI та RHI, а також оцінка впливу рециркуляції на перевищення допустимої температури. Автори встановили, що гарячі потоки у верхній частині стійок підвищували температуру повітря вище допустимого максимуму, а після модернізації ефективність дата-центру покращилася на 47,2% за RCI та на 22,7% за RHI. Для систем термічного моніторингу це означає, що сама

наявність кондиціонера або CRAC/CRAH-блоку не гарантує стабільності: необхідно контролювати розподіл температур і повітряних потоків безпосередньо в зоні розміщення серверів [4].

Додаткове теоретико-моделювальне підґрунтя ролі термічного контролю наведено у роботі H. Barestrand, A.-L. Ljung, J. Summers та T. S. Lundström. Автори досліджували конвективний теплообмін повітря в дата-центрі засобами OpenFOAM і порівнювали два CFD-солвери для задач із плавучістю, стисливістю, турбулентністю та розділенням потоків. У роботі використано метод скінченних об’ємів, k-epsilon модель турбулентності, аналіз Richardson number, а також перевірку впливу сіткової роздільності на температурний розподіл. Вимірюваними результатами були об’ємні розподіли температури, збіжність чисельного рішення, швидкість розрахунку та здатність моделей відтворювати поведінку повітряних потоків у різних режимах конвекції. Автори зазначають, що очікуване підвищення температури повітря після проходження через сервери може становити приблизно 6–19 °C, а за певних режимів зміна швидкості повітря здатна посилювати стратифікацію і неефективне змішування гарячих та холодних потоків. Це дослідження важливе тим, що пояснює фізичну природу проблеми: локальний перегрів формується не лише через високе навантаження обладнання, а й через складну взаємодію швидкості повітря, теплової інерції, турбулентності та геометрії серверної кімнати [5].

Отже, сучасні дослідження підтверджують, що термічний контроль є необхідною умовою стійкої роботи корпоративної серверної інфраструктури. Патентний аналіз демонструє зростання уваги до охолодження як до стратегічного напряму розвитку дата-центрів [1], data-driven підхід показує значення безперервного збору параметрів і AI-аналізу режимів охолодження [2], CFD-дослідження європейських дата-центрів доводить ефективність температурних карт, датчиків і KPI-оцінювання для усунення локальних перегрівів [3], модернізація Bitnet data center підтверджує практичний ефект від виявлення рециркуляції гарячого повітря [4], а моделювання в OpenFOAM пояснює фізичні причини нерівномірного теплового стану серверної кімнати [5]. У сукупності ці

результати обґрунтовують необхідність не лише фіксувати поточну температуру серверів, а й аналізувати її просторово та динамічно, поєднуючи датчики, теплові карти, прогнозування і керування охолодженням. Саме такий підхід дозволяє зменшити ризик аварійного перегріву, підтримувати стабільність роботи обладнання та підвищувати енергоефективність серверної інфраструктури.

Додатковим підтвердженням актуальності впровадження систем моніторингу серверної інфраструктури є динаміка світового ринку рішень для контролю дата-центрів. Як показано на рис. 1.5, обсяг ринку Data Center Monitoring Market у 2024 році становив близько 1,9 млрд дол. США, у 2025 році прогнозується на рівні 2,2 млрд дол. США, а до 2033 року може зрости до 8,9 млрд дол. США.

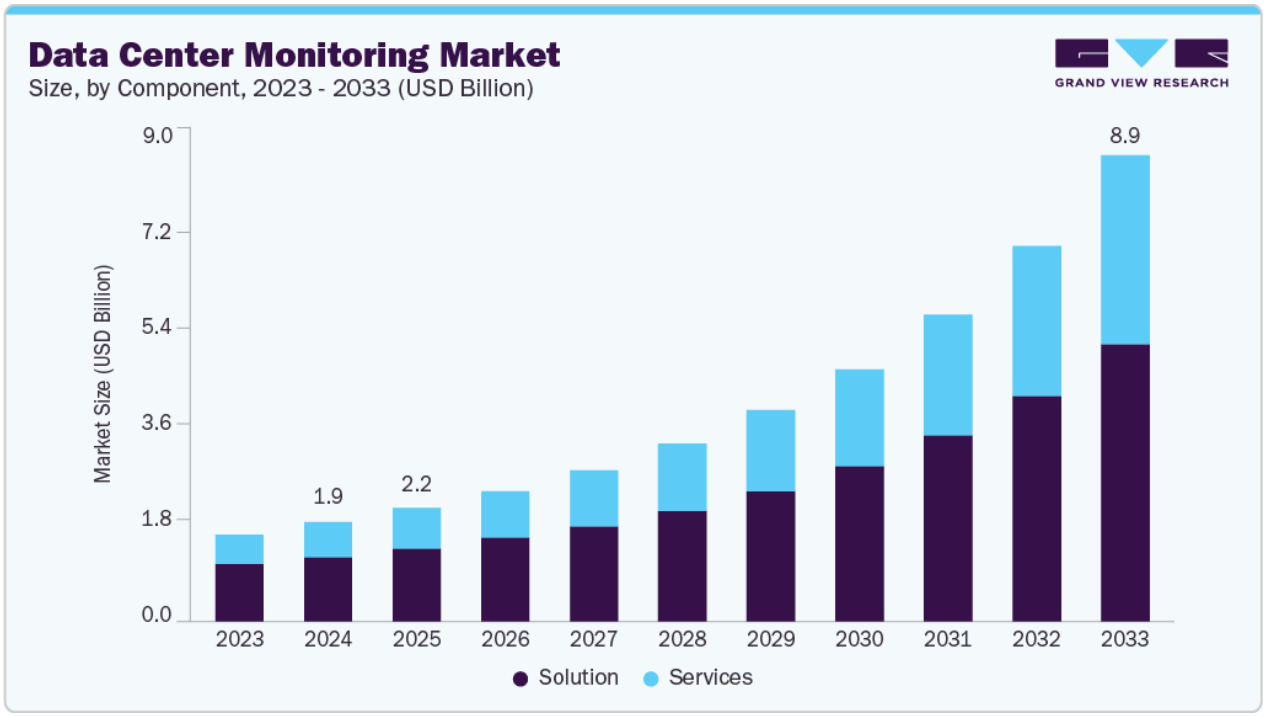


Рис. 1.5 Динаміка розвитку світового ринку систем моніторингу дата-центрів за компонентами у 2023–2033 рр. [6]

Така тенденція свідчить про посилення потреби організацій у постійному контролі стану серверного обладнання, зокрема температурних параметрів, навантаження, роботи систем охолодження та своєчасного виявлення відхилень. Отже, термічний моніторинг є не лише технічним засобом запобігання перегріву, а й складовою сучасного підходу до забезпечення стійкості та енергоефективності корпоративної IT-інфраструктури [6].

1.2 Огляд існуючих IoT-рішень та SCADA-систем для моніторингу серверних приміщень

Сучасні серверні приміщення потребують не лише загального контролю температури, а й постійного моніторингу стану обладнання, параметрів охолодження, електроживлення, вологості, повітряних потоків та аварійних подій. Для цього використовуються спеціалізовані DCIM-рішення, системи мережевого моніторингу з підтримкою IoT-сенсорів, а також SCADA-платформи, які забезпечують диспетчеризацію інженерної інфраструктури. Такі системи дозволяють збирати дані з температурних датчиків, UPS, PDU, CRAC/CRAH-блоків, контролерів вентиляції, датчиків вологості та протікання, після чого відображати стан серверного приміщення на інформаційних панелях і формувати попередження у разі перевищення допустимих параметрів.

Одним із найбільш відомих рішень для моніторингу фізичної інфраструктури дата-центрів є Schneider Electric EcoStruxure IT Data Center Expert. Це DCIM-система, призначена для централізованого моніторингу та керування інфраструктурою дата-центру, зокрема системами електроживлення, охолодження, безпеки та параметрами навколишнього середовища. Schneider Electric позиціонує EcoStruxure IT як платформу, що забезпечує контроль активів, environmental conditions і security у межах єдиного середовища керування [7]. Принцип роботи такого рішення полягає у підключенні серверного обладнання, UPS, PDU, кондиціонерів, датчиків температури, вологості та протікання до центрального вузла моніторингу, який збирає дані, формує журнали подій, аварійні сповіщення та звіти. Цю логіку доцільно показати на рис. 1.6 у вигляді структурної схеми взаємодії сенсорів, інженерного обладнання та DCIM-платформи.

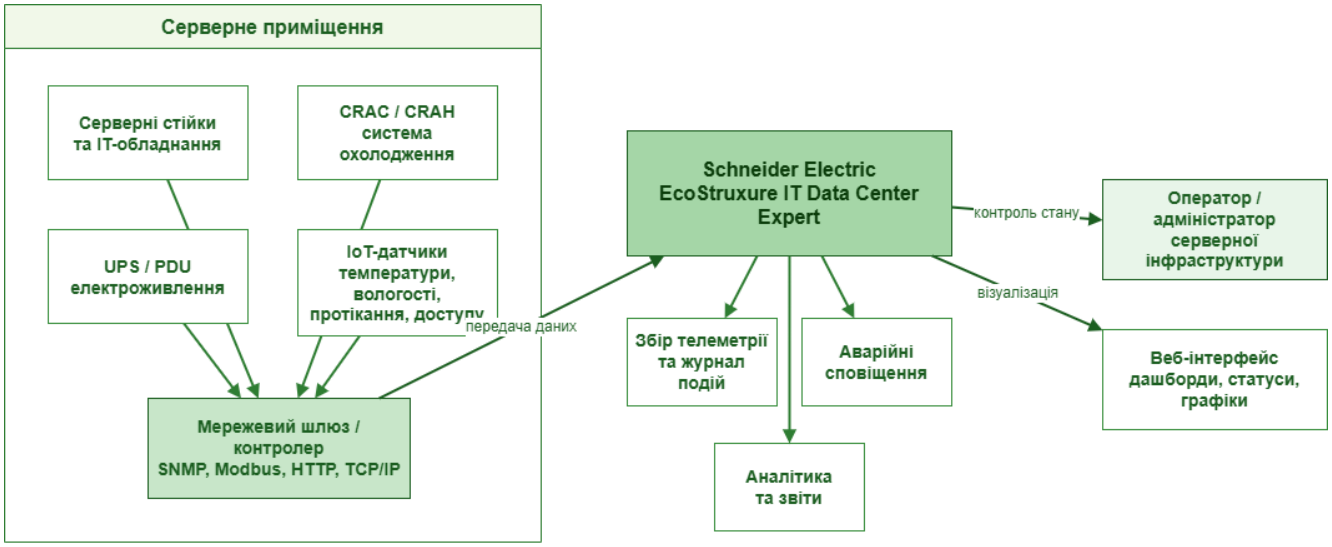


Рис. 1.6 Структурна схема роботи Schneider Electric EcoStruxure IT Data Center Expert у серверному приміщенні

Окремо варто додати скріншот інтерфейсу EcoStruxure IT Data Center Expert, оскільки він демонструє практичний вигляд професійної DCIM-системи: панелі стану обладнання, аварійні повідомлення, журнали подій, перегляд підключених пристроїв і засоби аналізу інфраструктури. Такий приклад можна подати як рис. 1.7.

Рис. 1.7 – Приклад інтерфейсу Schneider Electric EcoStruxure IT Data Center Expert для моніторингу інфраструктури дата-центру [7]

Перевагою EcoStruxure IT Data Center Expert є орієнтація саме на дата-центри та серверні приміщення: система підтримує роботу з критичною інфраструктурою, дозволяє об’єднувати моніторинг живлення, охолодження, безпеки й середовища, а також може інтегруватися з іншими рішеннями Schneider Electric. Крім того, у продуктовій документації зазначається підтримка масштабованого моніторингу

великої кількості пристроїв, що робить таку платформу придатною для середніх і великих корпоративних серверних [7]. Недоліком цього рішення є висока вартість впровадження, залежність від екосистеми постачальника та надмірність функціоналу для невеликих серверних кімнат, де достатньо простішого контролю температури, вологості та стану охолодження.

Другим поширеним рішенням є Paessler PRTG Network Monitor, яке використовується як універсальна платформа моніторингу мережевої, серверної та інженерної інфраструктури. На відміну від класичної DCIM-системи, PRTG є більш гнучким засобом моніторингу, оскільки дозволяє підключати різні типи сенсорів і пристроїв за протоколами SNMP, Modbus, OPC UA, IPMI, Redfish, HTTP Push та іншими технологіями [8]. Для серверних приміщень це важливо, оскільки температурні сенсори, датчики вологості, системи охолодження, UPS, PDU та серверне обладнання часто належать до різних виробників. PRTG дозволяє налаштовувати порогові значення температури, формувати попередження через email, SMS або push-сповіщення, а також відображати показники у вигляді графіків і дашбордів [8].

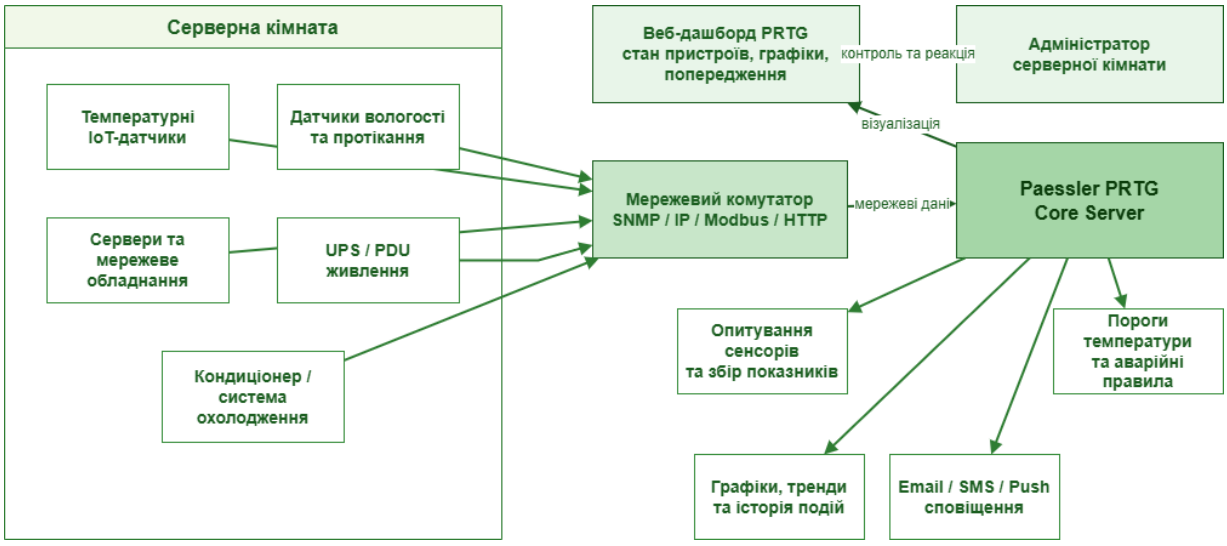


Рис. 1.8 Принцип роботи Paessler PRTG Network Monitor для контролю температури та стану серверної кімнати

Для ілюстрації практичного вигляду цієї технології доцільно додати скріншот дашборду PRTG з температурними сенсорами, графіками, статусами пристроїв і попередженнями про перевищення порогових значень. Це дозволить

показати, що моніторинг серверної кімнати може бути реалізований не лише через спеціалізовану DCIM-платформу, а й через універсальну систему мережевого моніторингу.

Рис. 1.9 Приклад інтерфейсу Paessler PRTG Network Monitor із температурними сенсорами та аварійними сповіщеннями [8]

Основною перевагою PRTG є підтримка великої кількості протоколів і сенсорів, можливість швидкого розгортання, зручні візуальні панелі та придатність для комбінованого моніторингу: мережа, сервери, температура, вологість, живлення, охолодження та доступність сервісів. Paessler окремо зазначає, що PRTG може використовуватись для моніторингу temperature, humidity, airflow і leaks у серверних кімнатах, а також підтримує понад 250 типів сенсорів для on-premises, cloud і hybrid середовищ [8]. Недоліком є те, що PRTG не є повноцінною SCADA або DCIM-системою для глибокого інженерного керування охолодженням: він добре виявляє відхилення й повідомляє про них, але для безпосереднього керування вентиляцією, CRAC/CRAH-блоками або складною автоматикою часто потрібна інтеграція з контролерами чи окремими системами автоматизації.

Третім прикладом є Siemens SIMATIC WinCC / WinCC Open Architecture, що належить до класу SCADA/HMI-систем і використовується для візуалізації, диспетчеризації та керування промисловими й інженерними процесами. Siemens описує SIMATIC WinCC як масштабовану SCADA-систему для visualization,

monitoring and control у різних галузях, а WinCC Open Architecture – як платформу для великих, складних і розподілених застосувань [9]. У контексті серверного приміщення така система може використовуватись для контролю HVAC-обладнання, температурних датчиків, вентиляційних установок, аварійних сигналів, електроживлення та систем безпеки. На відміну від PRTG, SCADA-підхід передбачає не лише відображення параметрів, а й можливість формування керуючих команд для виконавчих механізмів через PLC-контролери.

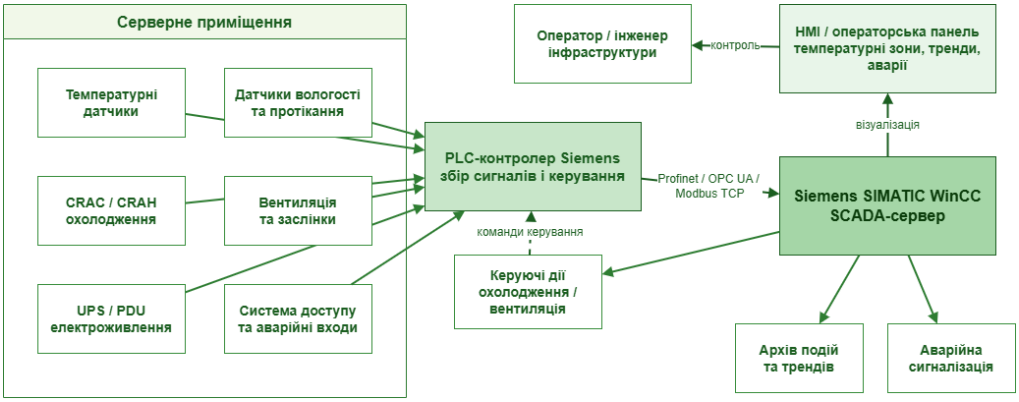


Рис. 1.10 Узагальнена схема SCADA-моніторингу серверного приміщення на базі Siemens SIMATIC WinCC

Для наочного представлення цього рішення доцільно додати скріншот HMI/SCADA-екрана WinCC, де можуть бути показані температурні зони, стан вентиляції, аварійні сигнали, тренди температури та кнопки керування обладнанням. Такий рисунок допоможе показати відмінність SCADA-системи від звичайного моніторингу: оператор не лише бачить показники, а й може керувати інженерною інфраструктурою.

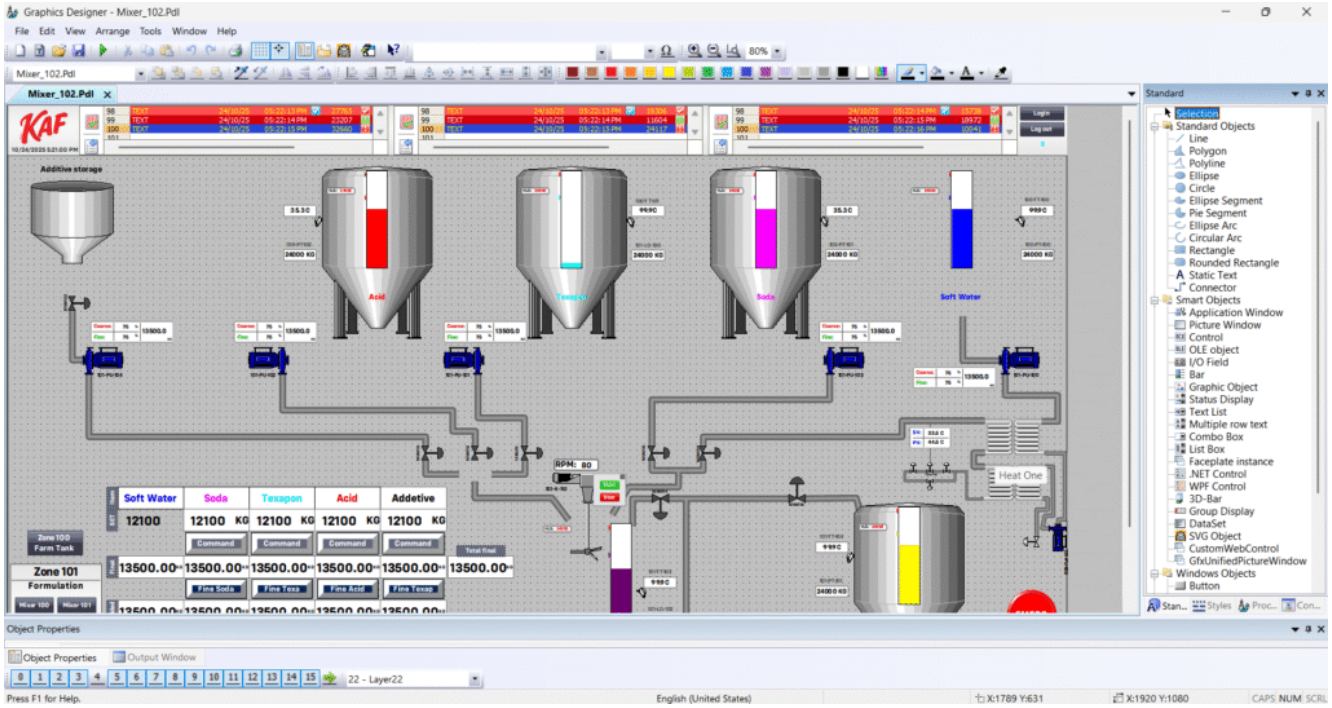


Рис. 1.11 Приклад HMI/SCADA-інтерфейсу Siemens SIMATIC WinCC для візуалізації та керування інженерними параметрами [9]

Перевагою Siemens WinCC є промислова надійність, масштабованість, підтримка інтеграції з PLC, HMI-панелями, TIA Portal та іншими засобами автоматизації. Такий підхід добре підходить для великих об’єктів, де серверна інфраструктура є частиною складної будівельної або промислової системи з вентиляцією, електроживленням, пожежною безпекою та резервуванням. Недоліком є складність впровадження: для налаштування SCADA-системи потрібні знання промислової автоматизації, PLC, тегів, протоколів обміну та логіки керування. Крім того, для невеликої серверної кімнати WinCC може бути надмірним рішенням, оскільки його основне призначення – диспетчеризація складних технологічних або інженерних процесів.

Розглянуті рішення демонструють три різні підходи до моніторингу серверних приміщень. Schneider Electric EcoStruxure IT Data Center Expert є спеціалізованою DCIM-платформою для комплексного контролю інфраструктури дата-центру; Paessler PRTG Network Monitor є гнучким IoT/мережевим рішенням для збору даних з різних сенсорів і пристроїв; Siemens SIMATIC WinCC представляє SCADA-підхід, який дозволяє не лише спостерігати за параметрами, а й керувати інженерним обладнанням через промислові контролери. Для задач

термічного моніторингу серверного обладнання найбільш доцільним є поєднання переваг цих підходів: збір даних із температурних сенсорів, візуалізація стану серверної кімнати, аварійне сповіщення, аналіз трендів і можливість автоматизованого керування охолодженням.

1.3 Обґрунтування переходу від реактивних до предиктивних методів керування охолодженням

Традиційне керування охолодженням серверних приміщень зазвичай має реактивний характер: система фіксує поточну температуру, порівнює її з допустимим порогом і посилює охолодження лише після наближення до критичного значення. Такий підхід є простим, але недостатнім для сучасної серверної інфраструктури, де теплове навантаження змінюється нерівномірно, залежить від активності серверів, зовнішніх умов, режиму роботи кондиціонерів, теплової інерції обладнання та просторового розташування стійок. Через це реактивна логіка може або запізнюватися з охолодженням, допускаючи локальні перегріті зони, або підтримувати надмірне охолодження із зайвими енерговитратами. Тому актуальним є перехід до предиктивного підходу, за якого система не лише вимірює температуру, а й прогнозує її подальшу зміну та заздалегідь формує керувальну дію.

Табл. 1.1

Порівняння реактивного та предиктивного підходів до керування охолодженням серверного приміщення

Критерій	**Реактивне керування**	**Предиктивне керування**
Основа рішення	Поточна температура	Прогноз майбутньої температури
Час реакції	Після появи відхилення	До появи критичного стану
Hotspot-зони	Виявляються із запізненням	Можуть прогнозуватися заздалегідь

Енергоефективність	Часто надлишкове охолодження	Адаптація до очікуваного навантаження
Дані	Поточні показники датчиків	Історія температур, навантаження, стан охолодження
Інтелектуальність	Порогова логіка	ML, MPC, RL, цифрові двійники

У дослідженні A. Kula та співавторів розглянуто прогнозування температури в теплому коридорі дата-центру за допомогою методів машинного навчання. Автори створили модель, яка враховує зовнішні погодні умови, енергоспоживання серверів, стан системи охолодження та попередні температурні значення. Для прогнозування порівнювалися TiDE, TSMixer, Random Forest, XGBoost і AutoARIMA. Найкращу точність показала модель TiDE з N-RMSE 0,1270, тоді як XGBoost мав близький результат – 0,1275, але виявив схильність недооцінювати температуру при високих значеннях. Це важливо, оскільки саме високі температури є критичними для безпеки серверного обладнання [10]. Дослідження доводить, що предиктивна модель дозволяє безпечніше змінювати температурні уставки кондиціонування та зменшувати енергоспоживання без ризику перегріву.

Інший підхід запропоновано у роботі Q. Sha та співавторів, де досліджено прогнозування температури вихідного повітря CRAC-систем на основі графових нейронних мереж. Автори побудували CFD-модель серверного приміщення, визначили зони впливу кондиціонерів і сформували симуляційний набір даних з урахуванням розташування серверних стійок та динамічного навантаження. Графова нейронна мережа показала високу точність: 95,83% тестових прогнозів мали похибку не більше ±0,5 °C. Також було показано зменшення середньої потужності чотирьох кондиціонерів на 0,881 кВт порівняно з традиційним керуванням [11]. Це підтверджує, що прогнозування параметрів CRAC дозволяє зменшувати надлишкове охолодження та точніше реагувати на реальну теплову ситуацію в серверній кімнаті.

Перспективність предиктивного керування також показано у дослідженні H. Yuan та співавторів, де розроблено цифровий двійник прототипу дата-центру з CRAC-модулем і шістьма серверними імітаторами. Для реконструкції температурного поля в реальному часі автори використали U-Net, а для вибору

керувальних дій – Deep Q-Learning Network. У процесі експериментів температура серверів під час нагріву зростала приблизно на 4–5 °C, а під час охолодження знижувалася на 2–3 °C; значення 33 °C було прийнято як критерій hotspot-зони. DQN-агент автоматично змінював уставки охолодження, знижував PUE та запобігав локальному перегріву [12]. Це дослідження демонструє можливість замкненого циклу керування, у якому система одночасно візуалізує тепловий стан, прогнозує ризики та обирає оптимальну дію.

Узагальнення сучасних підходів наведено в оглядовій роботі Q. Chang та співавторів, де проаналізовано стратегії оптимального керування системами охолодження дата-центрів. Автори використали бібліометричний аналіз баз Scopus, Web of Science та IEEE, а також розглянули PID, Model Predictive Control і Reinforcement Learning. У роботі зазначено, що PID є простим, але обмеженим для складних і динамічних середовищ; MPC дозволяє прогнозувати майбутні стани системи, а RL забезпечує адаптивне навчання керувальної політики. Також автори підкреслюють, що зростання щільності серверних стійок, пов’язане з AI та високопродуктивними обчисленнями, підвищує вимоги до інтелектуального охолодження [13]. Отже, сучасний розвиток систем охолодження рухається від фіксованих уставок до адаптивних стратегій, які враховують теплову динаміку, навантаження та енергоефективність.

Таким чином, перехід від реактивного до предиктивного керування охолодженням є обґрунтованим як з технічної, так і з енергетичної точки зору. Реактивна система реагує лише на вже зафіксоване відхилення, тоді як предиктивна здатна заздалегідь оцінити ризик перегріву, скоригувати інтенсивність охолодження та зменшити зайві енерговитрати. Аналіз сучасних досліджень показує, що для цього можуть застосовуватися машинне навчання, графові нейронні мережі, цифрові двійники, MPC та RL. Такі підходи створюють основу для інтелектуального керування охолодженням серверного обладнання, за якого система не чекає виникнення критичного стану, а попереджає його на основі прогнозу температурної динаміки.

РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНЕ ТА АЛГОРИТМІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО МОДУЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ

2.1 Математична модель теплової інерції обчислювального обладнання

Для побудови інтелектуального модуля прогнозування температури серверного обладнання необхідно формалізувати процес зміни теплового стану обчислювальних вузлів у часі. У межах даної роботи серверне приміщення розглядається як сукупність окремих зон теплового контролю, кожна з яких відповідає певній серверній стійці або групі обладнання. Такий підхід дозволяє перейти від узагальненого контролю температури всього приміщення до локального аналізу теплового стану окремих ділянок, де можуть виникати зони підвищеного нагрівання. У програмній реалізації серверна кімната подана у вигляді дискретної просторової сітки розміром 5×5, де кожна комірка характеризується власною температурою, рівнем обчислювального навантаження та інтенсивністю охолодження.

Основою математичної моделі є припущення, що температура серверного обладнання в кожній зоні змінюється не миттєво, а з певною тепловою інерцією. Це означає, що поточний тепловий стан залежить не лише від навантаження в даний момент часу, а й від попередньо накопиченого тепла. Саме ця властивість є принципово важливою для побудови предиктивного керування, оскільки короткочасне зростання навантаження може не одразу привести до критичного перегріву, проте за відсутності своєчасного охолодження температура продовжуватиме підвищуватися протягом наступних часових кроків. Отже, модель повинна враховувати як поточне тепловиділення серверів, так і поступове розсіювання тепла у навколишнє середовище.

У загальному вигляді зміна температури для окремої серверної зони може бути описана дискретним рівнянням:

$$T_{i,j}(t+1) = T_{i,j}(t) + \alpha \cdot L_{i,j}(t) - \beta \cdot C_{i,j}(t) - \gamma \cdot \left(T_{i,j}(t) - T_a\right) + \varepsilon_{i,j}(t), \qquad (2.1)$$

де ($T_{i,j}(t)$ – температура серверної зони з координатами (i,j) у момент часу (t); $\left(T_{i,j}(t+1)\right)$ – прогнозований або розрахований тепловий стан цієї зони на наступному часовому кроці; $\left(L_{i,j}(t)\right)$ – рівень обчислювального навантаження відповідної серверної зони; $\left(C_{i,j}(t)\right)$ – інтенсивність охолодження, що подається до цієї зони; (T_a) – температура навколишнього середовища у серверному приміщенні; α – коефіцієнт впливу навантаження на нагрівання обладнання; β – коефіцієнт ефективності охолодження; γ – коефіцієнт теплової релаксації, який описує поступове наближення температури обладнання до температури середовища; $\left(\varepsilon_{i,j}(t)\right)$ – випадкова складова, що враховує незначні коливання вимірювань та непередбачувані зміни теплового режиму.

Подане рівняння відображає баланс між джерелами нагрівання та механізмами охолодження. Доданок $\left(\alpha\beta\, L_{i,j}(t)\right)$ моделює зростання температури внаслідок обчислювального навантаження. Чим вищим є навантаження на серверне обладнання, тим більшим стає тепловиділення, а отже, тим швидше зростає температура відповідної зони. У програмній моделі навантаження формується як змінна величина, що поєднує періодичні коливання, локальні сплески активності та випадкову складову. Це дозволяє імітувати більш реалістичну поведінку корпоративної серверної інфраструктури, де навантаження не є сталим, а змінюється залежно від часу, інтенсивності запитів та особливостей роботи окремих вузлів.

Доданок $\left(-\beta \cdot C_{i,j}(t)\right)$ описує вплив системи охолодження на зниження температури. Значення $\left(C_{i,j}(t)\right)$ задає поточну інтенсивність охолодження для конкретної серверної зони. Якщо система працює в економному режимі, інтенсивність охолодження залишається мінімально необхідною для підтримання стабільного теплового стану. Якщо ж температура або прогнозована температура наближається до небезпечного рівня, значення $\left(C_{i.j}(t)\right)$ збільшується локально саме для тієї зони, де існує ризик перегріву. Таким чином, модель дозволяє

реалізувати не загальне посилення охолодження всієї серверної кімнати, а точкове керування тепловим режимом окремих зон.

Особливе значення в моделі має складова $\left(-\gamma \cdot \left(T_{i,j}(t) - T_a\right)\right)$, яка описує теплову інерцію та природний теплообмін із середовищем. Якщо температура серверної зони значно перевищує температуру навколишнього середовища, відбувається поступове розсіювання тепла. Водночас цей процес не є миттєвим, тому навіть після зниження навантаження обладнання певний час залишається нагрітим. Саме ця інерційність пояснює необхідність прогнозування: система повинна реагувати не лише на вже зафіксований перегрів, а й на тенденцію до його виникнення. У межах розробленої моделі коефіцієнт α задає швидкість природного зменшення температури відносно температури середовища. Невелике значення цього коефіцієнта відповідає ситуації, коли серверне обладнання повільно віддає накопичене тепло, що є характерним для щільно розміщених серверних стійок.

Для всієї серверної кімнати модель може бути подана у матричній формі. Нехай $\left(T(t)\right), \left(L(t)\right)$ та $\left(C(t)\right)$ є матрицями температур, навантаження та охолодження відповідно. Тоді дискретна модель теплового стану серверної кімнати набуває вигляду:

$$T(t+1) = T(t) + \alpha L(t) - \beta C(t) - \gamma(T(t) - T_a) + E(t), \qquad (2.1)$$

де $\left(T(t) \in R^{\{m \times n\}}\right)$, $\left(L(t) \in R^{\{m \times n\}}\right)$, $\left(C(t) \in R^{\{m \times n\}}\right)$, а $\left(E(t) \in R^{\{m \times n\}}\right)$є матрицею випадкових відхилень. У даній роботі прийнято $(m = n = 5)$, тобто серверне приміщення представлено у вигляді двадцяти п’яти зон моніторингу. Така форма подання є зручною для побудови карти температурного стану серверної кімнати, оскільки кожному елементу матриці відповідає конкретна позиція у візуальній схемі розміщення обладнання.

Для обмеження фізично допустимих значень у програмній моделі температура не може зменшуватися нижче температури середовища з урахуванням допустимого відхилення та не може перевищувати умовно задану верхню межу

аварійного нагрівання. Це дає можливість уникнути нереалістичних значень під час чисельного моделювання. Крім того, інтенсивність охолодження також обмежується мінімальним і максимальним рівнями:

$$C_{\{min\}} \leq C_{i,j}(t) \leq C_{\{max\}}. \tag{2.3}$$

Таке обмеження відповідає реальній роботі систем охолодження, оскільки вентилятори або кондиціонувальні модулі не можуть працювати з довільною інтенсивністю, а мають певний діапазон режимів. У розробленій системі мінімальний рівень охолодження відповідає енергоощадному режиму, базовий рівень використовується для нормальної роботи, а максимальний рівень активується у разі критичного або прогнозованого небезпечного теплового стану.

Для оцінювання стану серверної зони використовується пороговий підхід. У моделі задано попереджувальний поріг температури (T_w) та критичний поріг (T_{cr}). Якщо поточна або прогнозована температура наближається до попереджувального порогу, система може завчасно підвищити інтенсивність охолодження. Якщо температура досягає критичного порогу, охолодження відповідної зони переводиться в максимальний режим. У спрощеному вигляді умову виникнення ризику перегріву можна записати так:

$$R_{i,j}(t) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } T_{i,j}(t) \geq T_{cr}, \\ 0, & \text{якщо } T_{i,j}(t) < T_{cr}. \end{cases} \tag{2.4}$$

Водночас для інтелектуального керування важливим є не лише факт досягнення критичної температури, а й очікувана зміна теплового стану. Тому в подальших підрозділах використовується прогнозована температура $\left(\{\hat{T}\}_{i,j}(t+h)\right)$, де (h) – горизонт прогнозування. Якщо прогноз показує, що через кілька часових кроків температура може наблизитися до критичної області, система

збільшує охолодження ще до фактичного перегріву. Це дозволяє змінити логіку керування з реактивної на попереджувальну.

Зв’язок між поточною температурою, навантаженням, охолодженням та прогнозованим тепловим станом доцільно подати у вигляді схеми, наведеної на рис. 2.1. На цій схемі серверну зону зображено як центральний вузол моделі, на який впливають три основні групи факторів: обчислювальне навантаження, локальне охолодження та температура навколишнього середовища. Виходом моделі є температура на наступному часовому кроці, яка надалі передається до модуля прогнозування та блоку прийняття рішення щодо інтенсивності охолодження. Така візуалізація дозволяє показати, що запропонована модель не є простою фіксацією температури, а описує динамічний процес накопичення та розсіювання тепла в серверній інфраструктурі.

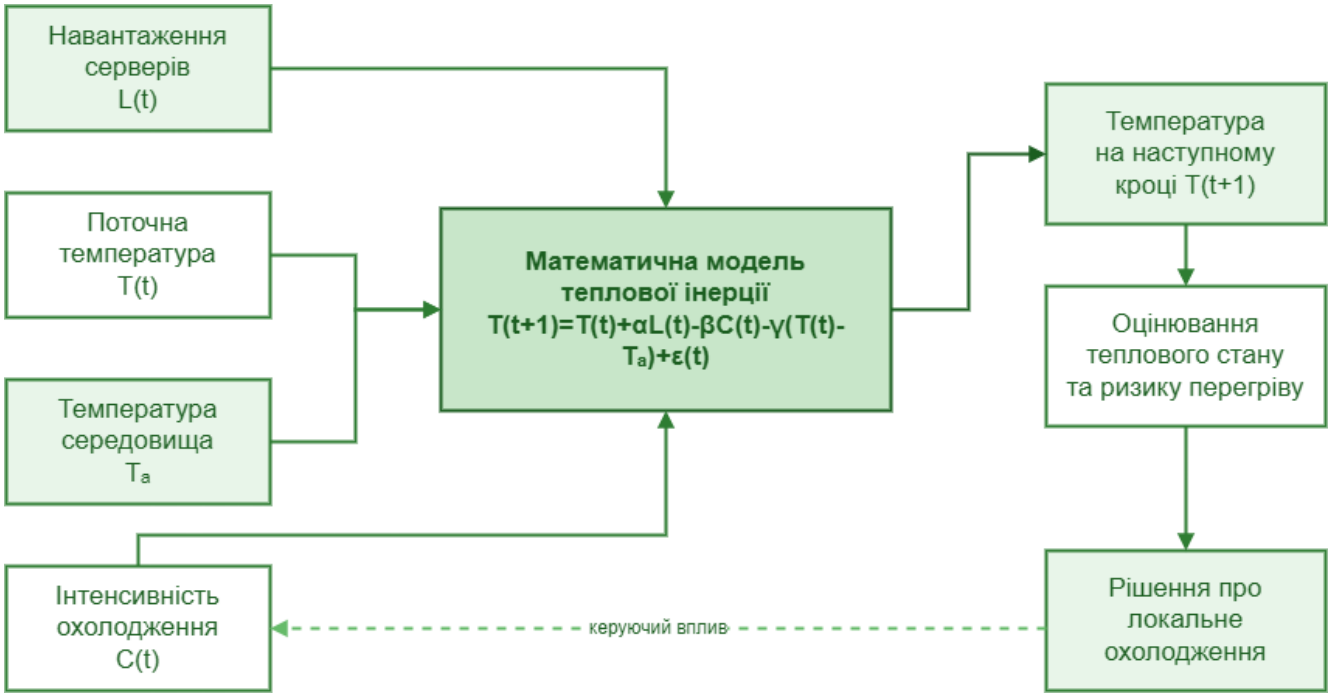


Рис. 2.1 Схематична візуалізація математичної моделі теплової інерції серверного обладнання

Узагальнюючи, математична модель теплової інерції, використана в роботі, поєднує вплив обчислювального навантаження, локального охолодження, температури середовища та випадкових коливань. Її перевагою є можливість

моделювання не лише поточного стану серверної кімнати, а й подальшої температурної динаміки окремих зон. Це створює основу для застосування інтелектуального модуля прогнозування, який використовує часову історію температур і навантажень для завчасного виявлення ризику перегріву. У результаті запропонована модель забезпечує математичне підґрунтя для реалізації адаптивного точкового охолодження, що є ключовим елементом розробленої системи теплового моніторингу серверного обладнання корпоративної мережі.

2.2 Формалізація алгоритму адаптивного точкового охолодження при локальних перегрівах

У межах розробленої системи серверне приміщення подано як сукупність локальних зон контролю, кожна з яких відповідає окремій серверній стійці або умовній ділянці розміщення обладнання. Такий підхід дозволяє уникнути надмірного охолодження всієї кімнати у випадку, коли перегрів виникає лише в одній або кількох зонах, і водночас забезпечує своєчасну реакцію на локальні теплові відхилення.

Основна ідея адаптивного точкового охолодження полягає в тому, що інтенсивність охолодження визначається не як стала величина для всієї серверної кімнати, а як окремий керований параметр для кожної зони. У попередньому підрозділі було показано, що температура зони залежить від навантаження, поточного теплового стану, температури середовища та інтенсивності охолодження. У цьому підрозділі увага зосереджується саме на виборі керуючого впливу $\left(C_{i,j}(t)\right)$, тобто на визначенні того, наскільки активно повинна охолоджуватися зона з координатами (i, j) у конкретний момент часу.

У розробленій системі використано три рівні температурного стану серверної зони: нормальний, попереджувальний і критичний. Нормальний стан означає, що температура перебуває в допустимих межах і немає потреби у підсиленні охолодження. Попереджувальний стан відповідає ситуації, коли температура ще не досягла критичного значення, але вже наближається до небезпечної області.

Критичний стан фіксується тоді, коли температура перевищує встановлений граничний рівень і потребує негайного локального підсилення охолодження. Для формалізації такого підходу вводяться два пороги: попереджувальний поріг (T_w) та критичний поріг (T_{cr}), причому $(T_w < T_{cr})$.

Стан окремої зони серверної кімнати можна визначити за правилом:

$$S_{i,j}(t) = \begin{cases} 0, & \text{якщо } T_{i,j}(t) < T_w, \\ 1, & \text{якщо } T_w \le T_{i,j}(t) < T_{cr}, \\ 2, & \text{якщо } T_{i,j}(t) \ge T_{cr}. \end{cases} \quad (2.5)$$

де $\left(S_{i,j}(t)\right)$ – код теплового стану зони; (0) відповідає нормальному режиму, (1) – попереджувальному режиму, а (2) – критичному режиму. Така формалізація є зручною для програмної реалізації, оскільки дозволяє безпосередньо пов’язати температурний стан із вибором режиму охолодження.

Водночас особливістю розробленої системи є те, що вона не обмежується лише поточним значенням температури. Для запобігання перегріву використовується прогнозована температура $\left(\{\hat{T}\}_{i,j}(t+h)\right)$, де (h) означає горизонт прогнозування. Якщо інтелектуальний модуль виявляє, що через кілька часових кроків температура може наблизитися до критичного рівня, охолодження посилюється завчасно. Саме це відрізняє запропонований алгоритм від звичайного реактивного підходу, за якого система починає діяти лише після фактичного перевищення порогу.

У загальному вигляді правило вибору інтенсивності охолодження можна подати так:

$$C_{i,j}(t) = \begin{cases} C_{\min}, & \text{якщо } T_{i,j}(t) < T_w \text{ і } \hat{T}_{i,j}(t+h) < T_w, \\ C_{base}, & \text{якщо } T_w \le T_{i,j}(t) < T_{cr} \text{ або } \hat{T}_{i,j}(t+h) \ge T_w, \\ C_{\max}, & \text{якщо } T_{i,j}(t) \ge T_{cr} \text{ або } \hat{T}_{i,j}(t+h) \ge T_{cr}. \end{cases} \quad (2.6)$$

де (C_{min}) – мінімальна інтенсивність охолодження, що відповідає енергоощадному режиму; (C_{base}) – базовий рівень охолодження для стабілізації температури; (C_{min}) – максимальна інтенсивність охолодження, яка застосовується у разі критичного або прогнозовано критичного теплового стану. У цьому правилі враховується як фактична температура, так і прогнозована температура. Завдяки цьому система може діяти на випередження, тобто підсилювати охолодження ще до того, як перегрів буде зафіксовано датчиками як аварійний стан.

Адаптивність алгоритму полягає в тому, що рівень охолодження змінюється відповідно до поточної ситуації в кожній окремій зоні. Якщо серверна стійка має стабільну температуру та невисоке навантаження, вона залишається в економному режимі. Якщо в зоні спостерігається зростання температури або прогнозована тенденція до перегріву, система переводить саме цю зону в посилений режим охолодження. Якщо ж досягнуто критичної температури, активується максимальне охолодження. Після стабілізації теплового стану інтенсивність охолодження поступово повертається до базового або мінімального рівня, що дозволяє зменшити надмірні енерговитрати.

Для уникнення частого перемикання режимів охолодження доцільно використовувати зону нечутливості, тобто невеликий температурний інтервал, у межах якого система не змінює режим одразу після незначного коливання показника. Це важливо, оскільки температура серверного обладнання може мати випадкові малі відхилення, які не завжди свідчать про реальний ризик перегріву. У спрощеному вигляді умову повернення з посиленого режиму до базового можна записати так:

$$T_{i,j}(t) < T_w - \Delta T, \tag{2.7}$$

де $(\Delta\, T)$ – допустимий інтервал нечутливості. Якщо температура зони стала нижчою за попереджувальний поріг із певним запасом, система може зменшити охолодження без ризику повторного швидкого перегріву. Такий підхід робить

алгоритм більш стійким і наближеним до реальної логіки керування інженерними системами.

У програмній реалізації алгоритм працює циклічно. На кожному часовому кроці система отримує або генерує значення температури, навантаження та поточної інтенсивності охолодження для всіх зон серверної кімнати. Далі виконується оновлення температурного стану відповідно до математичної моделі теплової інерції, після чого формується теплова карта приміщення. На основі цієї карти визначаються зони з підвищеною температурою, а інтелектуальний модуль прогнозування оцінює можливий стан цих зон на кілька кроків уперед. Якщо поточна або прогнозована температура перевищує встановлені пороги, алгоритм формує керуюче рішення щодо локального збільшення охолодження. У разі нормалізації температури зона повертається до економнішого режиму роботи.

Блок-схему роботи алгоритму адаптивного точкового охолодження подано на рис. 2.2. На ній слід відобразити послідовність основних етапів: зчитування температури та навантаження, оновлення теплового стану з урахуванням інерції, прогнозування температури, порівняння з попереджувальним і критичним порогами, вибір режиму охолодження та оновлення теплової карти серверної кімнати. Така схема дозволяє показати, що запропонований алгоритм має замкнений цикл керування: дані моніторингу впливають на рішення про охолодження, а змінене охолодження, своєю чергою, впливає на подальшу температурну динаміку.

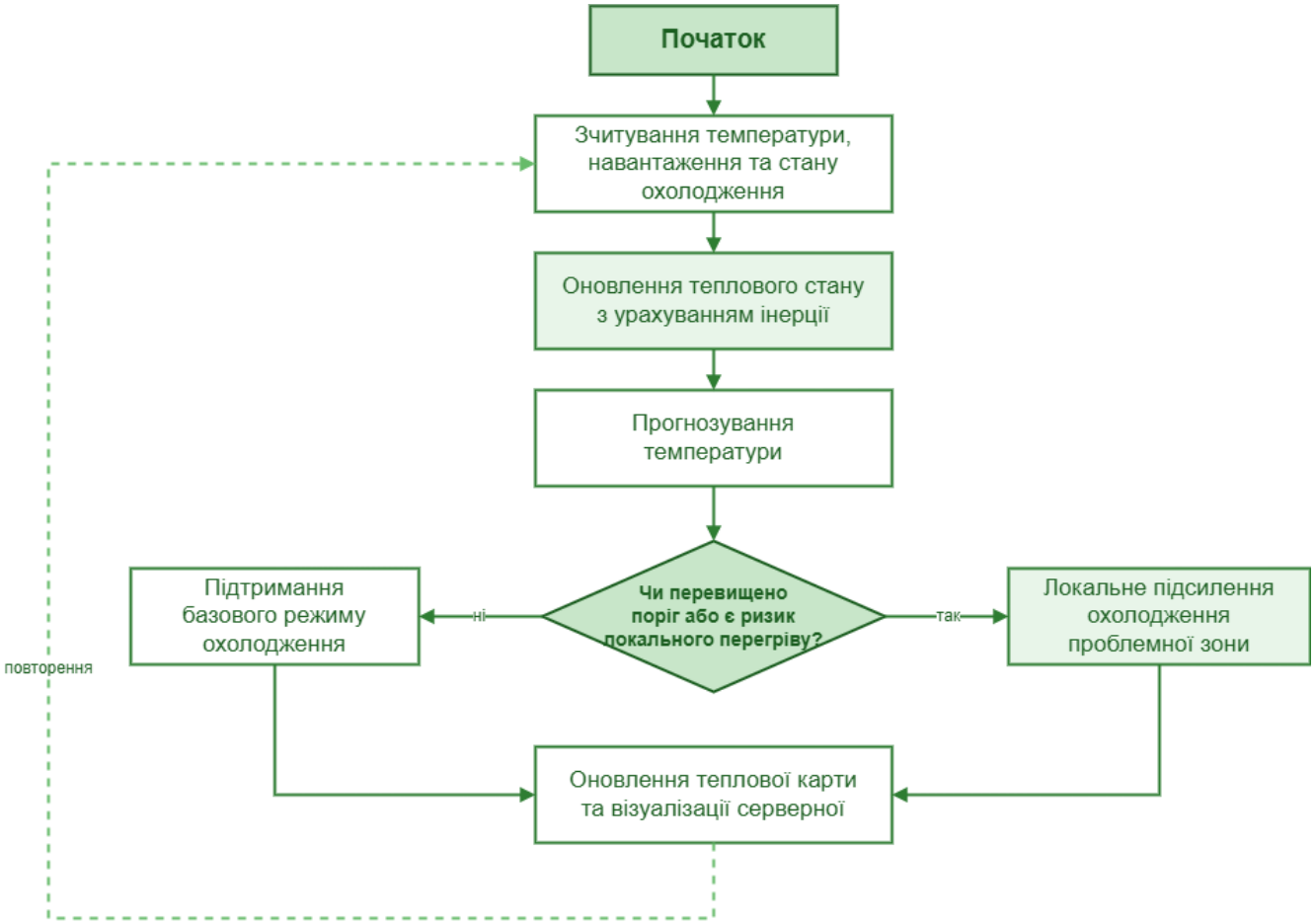


Рис. 2.2 Блок-схема алгоритму адаптивного точкового охолодження при локальних перегрівах

Перевагою запропонованого алгоритму є поєднання просторової деталізації та прогнозного керування. Просторова деталізація забезпечується тим, що рішення приймається окремо для кожної зони серверної кімнати, а не для всього приміщення загалом. Прогнозне керування реалізується через використання очікуваного значення температури, що дозволяє підсилювати охолодження ще до моменту фактичного перегрівsy. У результаті система здатна зменшувати кількість критичних температурних подій, підтримувати стабільніший тепловий режим серверного обладнання та раціональніше використовувати енергетичні ресурси системи охолодження.

2.3 Обґрунтування вибору архітектури рекурентної нейронної мережі GRU для предиктивного аналізу

Для реалізації предиктивного аналізу температурного стану серверного обладнання у роботі обрано архітектуру рекурентної нейронної мережі GRU. Необхідність використання саме рекурентного підходу зумовлена тим, що температура серверного обладнання є часовим процесом, у якому поточне значення залежить не лише від миттєвого навантаження, а й від попередньої історії нагрівання, охолодження та накопичення тепла. Звичайна модель, яка аналізує лише поточний стан, не може повною мірою врахувати інерційність теплових процесів. Натомість рекурентна нейронна мережа здатна обробляти послідовності даних і виявляти залежності між попередніми та майбутніми значеннями температури.

У межах розробленої системи дані серверної кімнати формуються як послідовність часових вимірювань. На кожному кроці моделювання для кожної серверної зони фіксуються температура, рівень навантаження та інтенсивність охолодження. Оскільки серверна кімната представлена у вигляді сітки 5×5, система одночасно аналізує двадцять п’ять локальних зон. Для нейронної мережі ці дані перетворюються у векторне подання: температури всіх зон і значення навантаження всіх зон об’єднуються в один вхідний вектор часового кроку. Такий підхід дозволяє моделі враховувати не лише поведінку окремої серверної стійки, а й загальний стан серверного приміщення.

Архітектура GRU була обрана через її придатність до задач прогнозування часових рядів за обмеженого обсягу даних і помірної обчислювальної складності. На відміну від простих регресійних моделей, GRU зберігає інформацію про попередні стани послідовності та може враховувати тенденції до поступового зростання або зниження температури. Водночас порівняно з архітектурою LSTM, GRU має простішу внутрішню структуру, меншу кількість параметрів і швидше навчається, що є важливим для програмного прототипу системи моніторингу. Для

задачі теплового прогнозування це є доцільним компромісом між точністю, швидкістю роботи та складністю реалізації.

У розробленій програмній системі GRU-модель отримує на вхід послідовність попередніх вимірювань фіксованої довжини. У програмній реалізації використовується часове вікно з дванадцяти останніх кроків спостереження. Це означає, що перед формуванням прогнозу модель аналізує не одиничне значення температури, а коротку історію зміни теплового стану серверної кімнати. На основі цієї історії формується прогноз температури на кілька кроків уперед. У реалізованому варіанті горизонт прогнозування становить чотири часові кроки, що дозволяє виявити небезпечну тенденцію до перегріву до моменту фактичного досягнення критичного порогу.

Загальна архітектура інтелектуального модуля складається з вхідного шару, рекурентного шару GRU, прихованого представлення теплового стану та вихідного блоку прогнозування. Вхідний шар приймає послідовність векторів, які містять температури та навантаження серверних зон. Рекурентний шар GRU обробляє цю послідовність і формує прихований стан, у якому узагальнюється інформація про попередню динаміку температури. Далі прихований стан передається до повнозв’язного блоку, який перетворює його на прогноз температури для всіх серверних зон. У програмній реалізації після GRU-шару використовується послідовність лінійного перетворення, функції активації ReLU та вихідного лінійного шару, що формує числовий прогноз температури для кожної з двадцяти п’яти зон серверної кімнати.

Схематично обрану архітектуру доцільно подати на рис. 2.3. На рисунку показано послідовність проходження даних: історія температур і навантажень серверних зон надходить до вхідного шару, далі передається в GRU-шар, після чого формується прихований стан, який використовується вихідним блоком для прогнозування температури на майбутній часовий крок. Така схема дозволяє наочно пояснити, що модель працює не як простий пороговий аналізатор, а як модуль обробки часової послідовності.

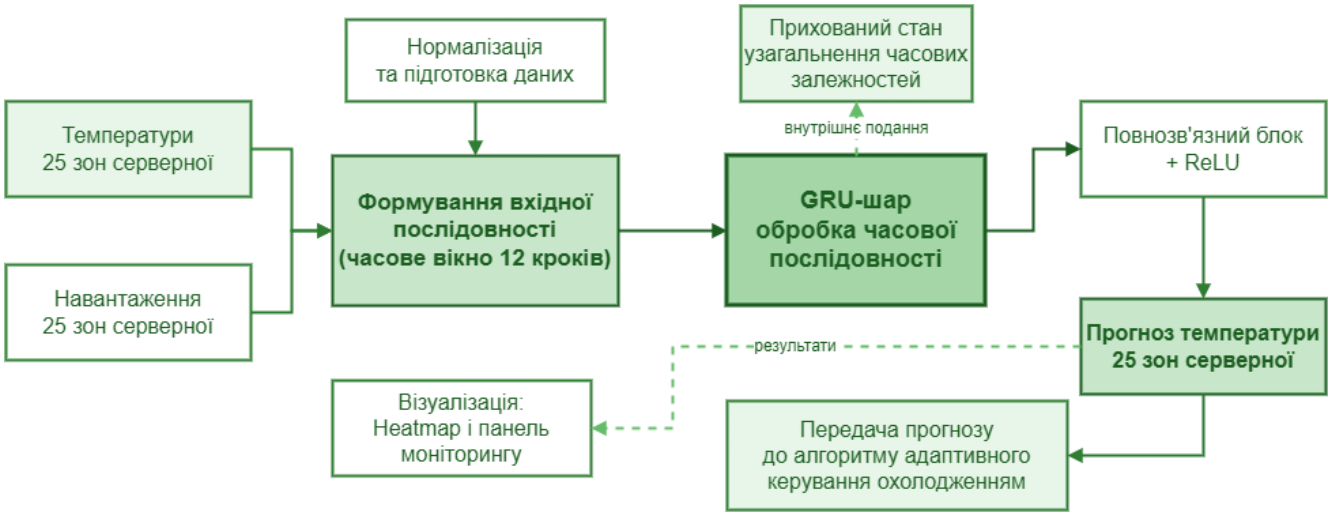


Рис. 2.3 Архітектура GRU-модуля прогнозування температури серверного обладнання

Важливою особливістю GRU є здатність відокремлювати суттєві часові залежності від короткочасних випадкових коливань. У серверній кімнаті температура може змінюватися нерівномірно: інколи зростання спричинене реальним підвищенням навантаження, а інколи – випадковими флуктуаціями або короткочасними змінами умов охолодження. Завдяки рекурентній структурі модель аналізує тенденцію в межах кількох попередніх кроків і не приймає рішення лише за одним випадковим відхиленням. Це особливо важливо для запобігання помилковому вмиканню максимального охолодження, оскільки надмірне реагування на кожне незначне коливання температури може призводити до зайвих енерговитрат.

Принцип роботи нейронної мережі у складі системи можна описати як послідовне перетворення історії спостережень у прогноз майбутнього теплового стану. Спочатку система накопичує дані моніторингу за кілька попередніх часових кроків. Далі ці дані нормалізуються, що дозволяє зменшити вплив різних масштабів температури й навантаження на процес навчання. Після цього підготовлена послідовність подається до GRU-моделі, яка обробляє її як часовий ряд. На виході формується вектор прогнозованих температур, де кожен елемент відповідає конкретній зоні серверної кімнати. Отриманий прогноз передається до алгоритму адаптивного точкового охолодження, який порівнює прогнозовані значення з

попереджувальним і критичним порогами та визначає необхідний режим охолодження.

Роботу нейронної мережі доцільно подати на рис. 2.4 у вигляді графа часової обробки даних (послідовність вхідних спостережень за кілька попередніх моментів часу, їх передавання до GRU-блоку, формування прихованого стану та отримання прогнозу температури). Рис. 2.4 ілюструє саме логіку роботи мережі в часі: як дані з моментів $(t-11, t-10, \ldots, t)$ використовуються для прогнозування майбутнього стану $(t+h)$.

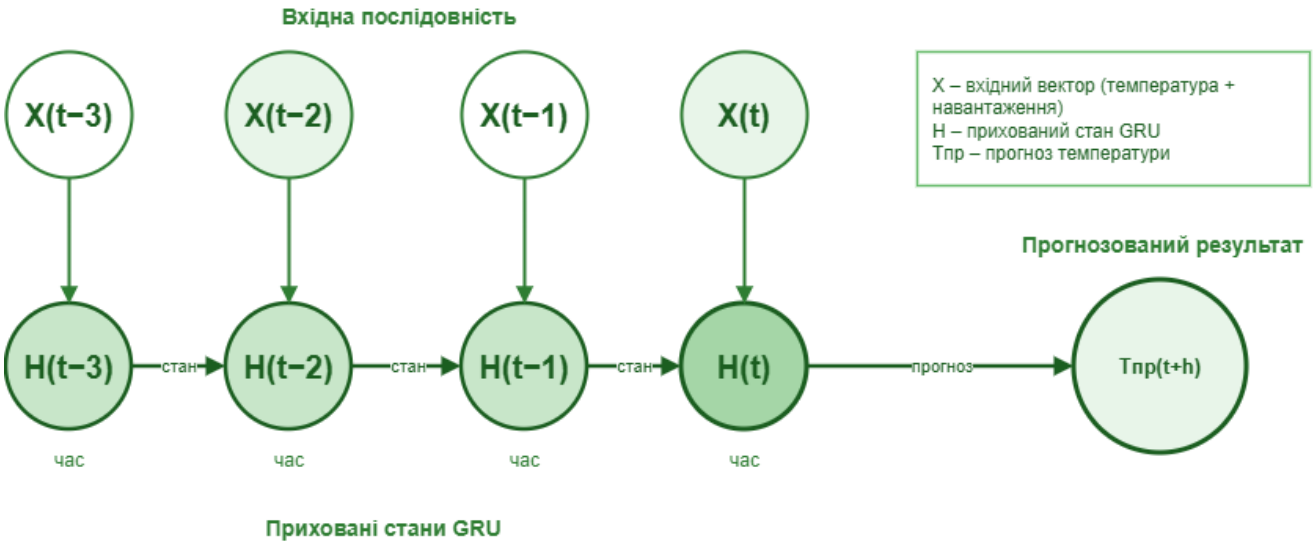


Рис. 2.4 Граф роботи рекурентної нейронної мережі GRU під час прогнозування температури

Навчання моделі виконується на даних, сформованих під час імітаційного моделювання серверної кімнати. Для кожного навчального прикладу формується вхідна послідовність із попередніх значень температури та навантаження, а цільовим значенням є температура серверних зон на майбутньому часовому кроці. Такий підхід відповідає задачі прогнозування часових рядів, де модель повинна навчитися встановлювати зв’язок між попередньою динамікою системи та майбутнім тепловим станом. У процесі навчання використовується функція втрат середньоквадратичної помилки, оскільки задача має регресійний характер і передбачає отримання неперервного числового значення температури.

З технічної точки зору реалізована модель має компактну структуру, що відповідає вимогам дипломного програмного прототипу. Вона не потребує надмірно великого набору параметрів, але водночас дозволяє продемонструвати принцип інтелектуального прогнозування температури. У програмній реалізації використовується прихований розмір GRU-шару, достатній для збереження основних закономірностей у часовій послідовності, після чого результат передається до блоку повнозв'язних перетворень. Така структура є придатною для демонстраційної системи моніторингу, оскільки забезпечує швидке навчання, зрозумілу логіку роботи та можливість інтеграції прогнозу з алгоритмом керування охолодженням.

Обрана архітектура також добре узгоджується з науковою ідеєю роботи, яка полягає у переході від реактивного до предиктивного керування охолодженням. Якщо реактивний підхід реагує лише на вже зафіксоване перевищення температурного порогу, то GRU-модель дозволяє оцінити майбутній стан системи. Завдяки цьому система може заздалегідь активувати локальне охолодження в тій зоні, де очікується перегрів. Саме така логіка забезпечує підвищення стійкості серверної інфраструктури, оскільки небезпечні температурні стани виявляються не після їх виникнення, а на етапі формування ризику.

Додатковою перевагою обраного підходу є можливість масштабування. У межах дипломної роботи серверна кімната подана як сітка 5×5, однак сама логіка формування вхідних послідовностей може бути адаптована до більшої кількості серверних стійок або датчиків. У разі збільшення кількості зон достатньо змінити розмірність вхідного та вихідного векторів моделі, зберігаючи загальний принцип обробки часових даних. Це свідчить про придатність запропонованої архітектури не лише для демонстраційного прототипу, а й для подальшого розширення системи моніторингу.

Програмна реалізація інтелектуального модуля виконана мовою Python [14], що забезпечує зручність роботи з числовими даними, моделюванням, машинним навчанням і візуалізацією результатів. Для чисельних розрахунків і представлення температурних матриць використано NumPy [15], для формування таблиць

результатів і збереження експериментальних даних – Pandas [16]. Рекурентну нейронну мережу GRU реалізовано з використанням PyTorch [17], який забезпечує побудову моделі, навчання, оптимізацію параметрів і виконання прогнозування. Для побудови графіків і збереження результатів експериментів застосовано Matplotlib [18], а для інтерактивної візуалізації серверної кімнати – Plotly [19]. Графічний інтерфейс системи реалізовано за допомогою Streamlit [20], що дозволяє створити зручну панель моніторингу з тепловою картою, показниками температури, індикаторами охолодження та графіками динаміки.

РОЗДІЛ 3. ПРОГРАМНА РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ

3.1 Розробка програмного комплексу для інтелектуального керування охолодженням

У межах кваліфікаційної роботи було розроблено програмний комплекс для теплового моніторингу серверного обладнання корпоративної мережі з елементами інтелектуального керування охолодженням. Основним призначенням програмної системи є імітація роботи серверної кімнати, збір температурних показників, аналіз теплового стану окремих зон, прогнозування можливого перегріву та формування керуючого рішення щодо локального підсилення охолодження. Розроблений програмний комплекс поєднує модуль математичного моделювання теплових процесів, модуль прогнозування температури, блок адаптивного керування охолодженням, підсистему візуалізації та графічний інтерфейс користувача.

Загальна структура програмної розробки побудована за модульним принципом. Такий підхід дозволяє розділити функціональність системи на окремі логічні частини та забезпечити зрозумілу взаємодію між ними. У програмі виділено модуль симуляції серверної кімнати, модуль керування охолодженням, модуль прогнозування температури, модуль проведення експериментів і модуль графічної візуалізації. Кожен із цих компонентів виконує окрему функцію, але в сукупності вони формують єдину систему інтелектуального теплового моніторингу. Узагальнену структуру програмного комплексу наведено на рис. 3.1.

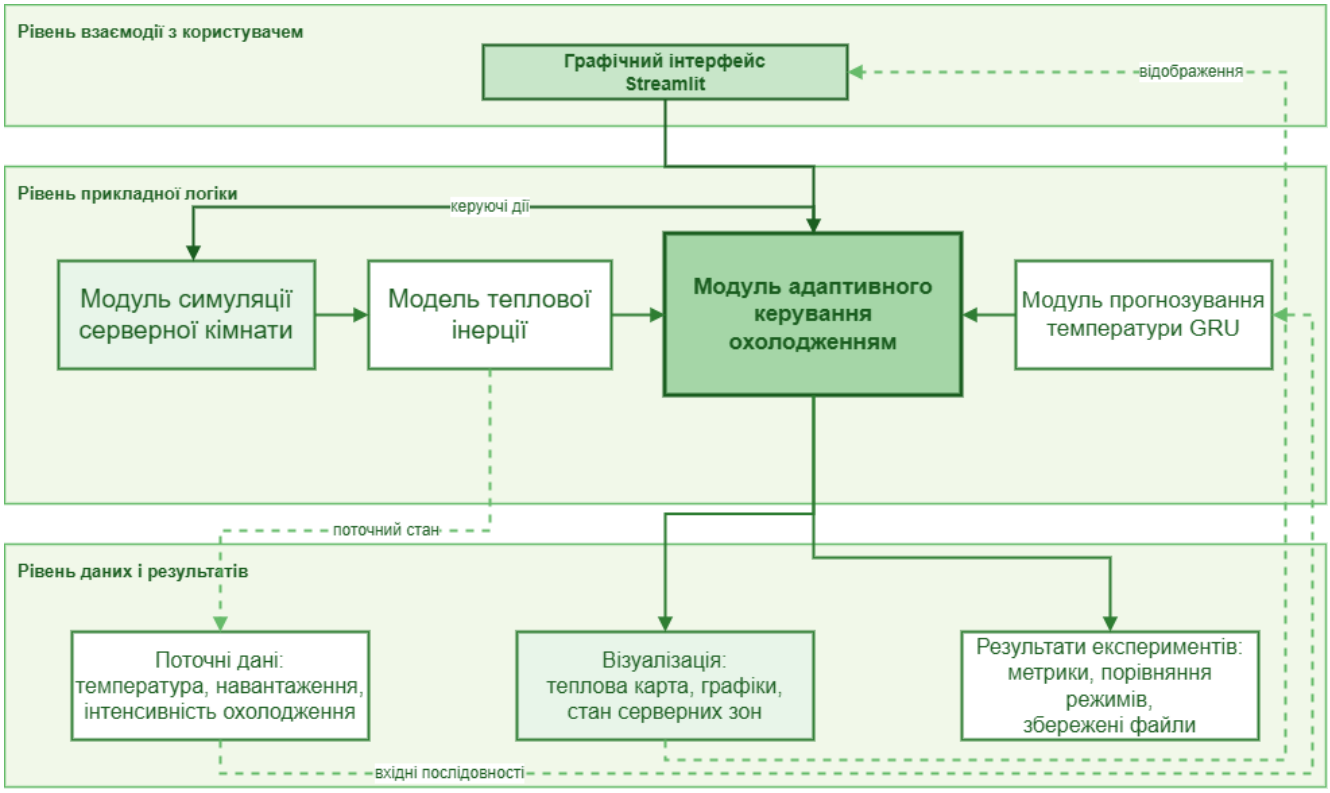


Рис. 3.1 Структура програмного комплексу для інтелектуального керування охолодженням

Модуль симуляції серверної кімнати відповідає за формування віртуального середовища, у якому моделюється робота серверного обладнання. У програмній реалізації серверна кімната подана у вигляді дискретної сітки 5×5, де кожна комірка відповідає окремій серверній зоні або умовній серверній стійці. Для кожної зони зберігаються значення температури, рівня навантаження та інтенсивності охолодження. Така форма подання дозволяє не лише аналізувати середню температуру приміщення, а й виявляти локальні перегріті ділянки, які можуть виникати внаслідок нерівномірного навантаження або недостатнього охолодження.

Основою симуляційного модуля є модель теплової інерції, описана в попередньому розділі. На кожному часовому кроці система оновлює температуру кожної серверної зони з урахуванням попереднього теплового стану, поточного навантаження, інтенсивності охолодження, температури середовища та випадкових малих коливань. Це дозволяє наблизити поведінку віртуальної серверної кімнати до реального процесу, у якому обладнання не нагрівається і не

охолоджується миттєво, а має певну інерційність. Завдяки цьому програмний комплекс може використовуватися не лише як демонстраційний інтерфейс, а й як інструмент для дослідження впливу різних режимів охолодження на теплову стабільність серверної інфраструктури.

Окреме місце в програмній структурі займає блок адаптивного керування охолодженням. Його завдання полягає в аналізі поточних і прогнозованих температурних значень та виборі відповідного режиму охолодження для кожної зони серверної кімнати. У системі передбачено економний, базовий і посилений режим охолодження. Якщо температура серверної зони перебуває в нормальних межах, система підтримує мінімально необхідний рівень охолодження. Якщо температура наближається до попереджувального порогу або прогноз показує ймовірність її зростання, охолодження відповідної зони підсилюється. У разі досягнення критичного порогу активується максимальна інтенсивність охолодження саме для проблемної зони.

Важливою особливістю розробленого програмного комплексу є реалізація не загального, а точкового керування. Це означає, що система не підвищує інтенсивність охолодження для всієї серверної кімнати одночасно, а змінює режим лише там, де зафіксовано або прогнозується ризик перегріву. Такий підхід є більш раціональним з погляду енергоефективності, оскільки дозволяє уникнути надмірного використання охолоджувального обладнання в тих зонах, де температура залишається стабільною. У програмній реалізації це відображено через окрему матрицю інтенсивності охолодження, значення якої оновлюються незалежно для кожної серверної зони.

Модуль прогнозування температури забезпечує перехід від реактивного до предиктивного керування. Якщо звичайна система реагує лише на вже зафіксоване перевищення температурного порогу, то розроблена система враховує очікувану зміну теплового стану. Для цього використовується рекурентна нейронна мережа GRU, яка аналізує послідовність попередніх температурних і навантажувальних значень та формує прогноз температури на кілька часових кроків уперед. Отриманий прогноз передається до блоку керування охолодженням і

використовується для завчасного прийняття рішення. Таким чином, програмний комплекс не лише відображає поточний стан серверної кімнати, а й оцінює можливий розвиток теплової ситуації.

Для демонстрації роботи системи було реалізовано графічний інтерфейс на основі Streamlit. Обраний підхід дозволяє створити інтерактивну панель моніторингу, яка поєднує відображення температурного стану серверної кімнати, графіки динаміки температури, індикатори охолодження та результати прогнозування. Інтерфейс виконує роль візуального середовища, наближеного до диспетчерської панелі моніторингу. Користувач може спостерігати за зміною температури в окремих серверних зонах, бачити зони локального перегріву, оцінювати інтенсивність охолодження та аналізувати, як система реагує на зміну навантаження.

Візуалізація серверної кімнати реалізована у вигляді теплової карти та інтерактивної схеми розміщення серверних зон. Теплова карта дозволяє швидко визначити ділянки з підвищеною температурою, оскільки кожна комірка сітки має власне температурне значення. Інтерактивна схема додатково відображає серверні стійки, поточні температури, статуси зон та індикатори активного охолодження. Це підвищує наочність роботи програмного комплексу та дає змогу використовувати інтерфейс як демонстраційний матеріал під час захисту роботи.

Логіка взаємодії компонентів програмного комплексу має циклічний характер. Спочатку модуль симуляції формує або оновлює значення навантаження та температури для кожної серверної зони. Далі ці дані передаються до модуля прогнозування, який оцінює майбутній температурний стан. Після цього блок адаптивного керування порівнює поточні й прогнозовані значення з установленими порогами та визначає необхідний рівень охолодження. Оновлені значення інтенсивності охолодження повертаються до моделі теплової інерції та впливають на подальшу температурну динаміку. Результати кожного циклу відображаються в інтерфейсі користувача у вигляді графіків, теплової карти та показників стану системи.

Для проведення експериментального дослідження у програмній розробці передбачено окремий сценарій тестування, який дозволяє порівняти роботу системи у двох режимах: без інтелектуального прогнозування та з використанням предиктивного керування. У першому випадку охолодження підсилюється лише після фактичного перевищення температурного порогу, а в другому – система враховує прогноз і може реагувати завчасно. Такий підхід дає змогу отримати вимірювані результати для подальшого аналізу ефективності запропонованого рішення, зокрема кількість подій перегріву, індекс теплового ризику та умовний показник енерговитрат.

3.2 Навчання моделі прогнозування та візуалізація термічного стану

Для реалізації предиктивного аналізу температурного стану серверного обладнання у програмному комплексі було передбачено підготовку часових даних, навчання рекурентної моделі GRU та візуалізацію результатів моніторингу у вигляді теплової карти серверної кімнати. На відміну від звичайного порогового контролю, який реагує лише на вже зафіксоване перевищення температури, запропонований підхід передбачає аналіз попередньої історії температурних змін і навантаження для формування прогнозу майбутнього теплового стану. Це дозволяє використовувати модель не лише для спостереження, а й для підтримки завчасного керування охолодженням.

Підготовка даних для навчання моделі здійснювалася на основі імітаційної роботи серверної кімнати, поданої у вигляді сітки 5×5. Кожна комірка такої сітки відповідає окремій серверній зоні, для якої на кожному часовому кроці формуються значення температури, рівня навантаження та інтенсивності охолодження. Оскільки температура серверного обладнання має інерційний характер, для прогнозування використовувалося не одне поточне значення, а послідовність попередніх спостережень. Такий підхід дає змогу моделі враховувати тенденцію зміни температури, тобто поступове накопичення тепла або стабілізацію після підсилення охолодження.

У процесі формування навчальної вибірки часові дані перетворювалися у послідовності фіксованої довжини. Кожна така послідовність містила інформацію про попередні стани серверної кімнати, а цільовим значенням була температура на майбутньому часовому кроці. До вхідних ознак моделі входили температурні значення серверних зон та показники навантаження, оскільки саме ці параметри найбільш безпосередньо впливають на подальший тепловий стан обладнання. Перед передаванням даних до нейронної мережі вони приводилися до числового формату, придатного для обробки рекурентною моделлю.

Навчання GRU-моделі виконувалося як задача прогнозування часових рядів. Модель отримувала на вхід послідовність попередніх станів серверної кімнати, обробляла її рекурентним шаром і формувала прогноз температури для серверних зон. Перевагою такого підходу є здатність враховувати залежність між попередніми та майбутніми значеннями температури. Це особливо важливо для серверного обладнання, оскільки перегрів часто формується не миттєво, а внаслідок поступового підвищення навантаження або недостатнього охолодження протягом кількох часових кроків.

Результат прогнозування використовується в системі як додатковий інформаційний сигнал для блоку адаптивного точкового охолодження. Якщо прогнозована температура певної зони наближається до попереджувального або критичного порогу, система може підсилити охолодження ще до фактичного виникнення перегріву. Таким чином, навчена модель GRU виконує роль інтелектуального аналітичного компонента, який доповнює математичну модель теплової інерції та дозволяє перейти від реактивної логіки керування до предиктивної.

Для наочного представлення теплового стану серверної кімнати у програмній розробці використано теплову карту. На рис. 3.2 наведено приклад такої карти після застосування предиктивного керування охолодженням. Кожна комірка відповідає окремій серверній зоні, а числове значення всередині неї показує температуру в градусах Цельсія. Така візуалізація дозволяє швидко оцінити

просторовий розподіл температури та виявити локальні ділянки з підвищеним тепловим навантаженням.

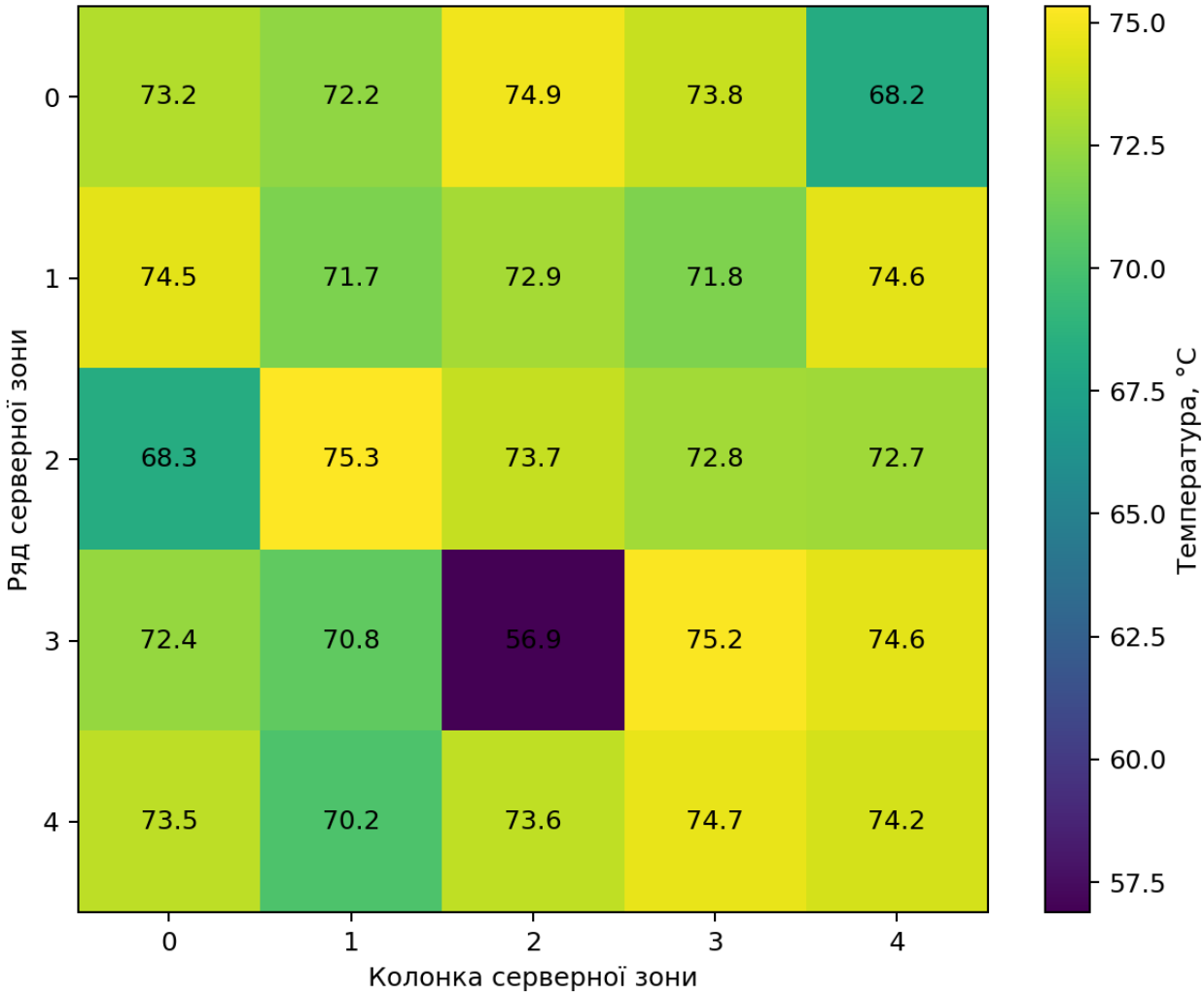


Рис. 3.2 Теплова карта серверної кімнати після предиктивного керування

Аналіз рис. 3.2 показує, що більшість серверних зон після предиктивного керування перебуває в діапазоні приблизно 70–75 °C. Найвищі значення температури спостерігаються в окремих локальних зонах, зокрема в комірках із температурою близько 75,2–75,3 °C. Це свідчить про нерівномірність теплового стану серверної кімнати, що є типовим для серверної інфраструктури з різним рівнем навантаження обладнання. Водночас наявність окремої зони зі значно нижчою температурою, близько 56,9 °C, демонструє вплив локального охолодження або меншого навантаження на певній ділянці. Отже, теплова карта

підтверджує доцільність саме точкового керування, оскільки температура різних зон не є однаковою і потребує просторово диференційованого аналізу.

Окрім теплової карти, у програмній системі передбачено побудову графіків, які дозволяють оцінити якість прогнозування. На рис. 3.3 подано порівняння фактичної температури центральної серверної зони S3-3 із результатом прогнозування GRU-моделі. Такий графік використовується для перевірки того, наскільки прогнозована траєкторія відповідає фактичній температурній динаміці та чи може модель бути використана для завчасного виявлення ризику перегріву.

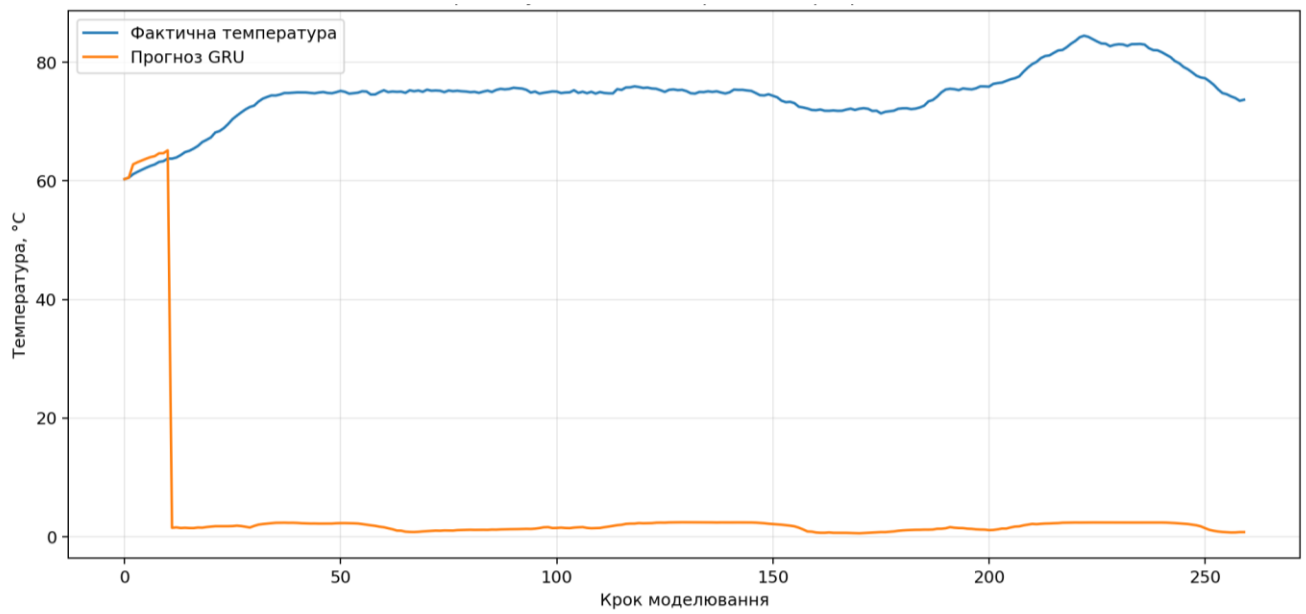


Рис. 3.3 Якість прогнозування температури для центральної серверної зони S3-3

За змістом рис. 3.3 фактична температура центральної серверної зони поступово змінюється в межах приблизно 60–85 °C, що відображає динаміку нагрівання, стабілізації та подальшого зниження температури після впливу системи охолодження. Водночас крива прогнозу GRU на поданому графіку після початкового фрагмента має різке зниження до майже нульових значень. Така поведінка не відповідає фізичному діапазону температур серверного обладнання і може свідчити про технічну помилку під час побудови графіка, зокрема про некоректне зворотне масштабування прогнозованих значень або неправильне зіставлення масиву прогнозу з фактичною температурною шкалою. Тому цей

графік доцільно використовувати як етап контролю коректності роботи модуля прогнозування, а для фінального оцінювання точності моделі необхідно забезпечити відображення прогнозу в тій самій температурній шкалі, що й фактичні дані.

Графічний інтерфейс системи доповнює аналітичні графіки інтерактивною панеллю моніторингу. У ній користувач може спостерігати стан серверних зон, поточні температури, індикатори охолодження, теплову карту та результати прогнозування. Інтерфейс реалізовано у вигляді веб-панелі, що містить бічний блок налаштування параметрів моделі та центральну робочу область для візуалізації результатів. У лівій частині користувач може змінювати кількість кроків моделювання, критичний температурний поріг, поріг прогнозного попередження, коефіцієнти впливу навантаження й охолодження, а також базовий рівень охолодження. Це дозволяє перевіряти поведінку системи за різних умов і демонструвати, як зміна параметрів впливає на тепловий стан серверної кімнати.

На рис. 3.4 наведено вкладку технічної теплової карти, яка відображає поточний розподіл температури та інтенсивність локального охолодження. У цій частині інтерфейсу користувач бачить дві матриці: перша показує температуру в кожній серверній зоні, друга – рівень охолодження, який застосовується до відповідних ділянок. Під тепловими картами додатково виводяться узагальнені показники роботи системи, зокрема поточний максимум температури, середня температура, кількість зон із підсиленим охолодженням і режим прогнозування. Така форма подання є зручною для технічного аналізу, оскільки дає змогу одночасно оцінити і тепловий стан, і реакцію системи охолодження.

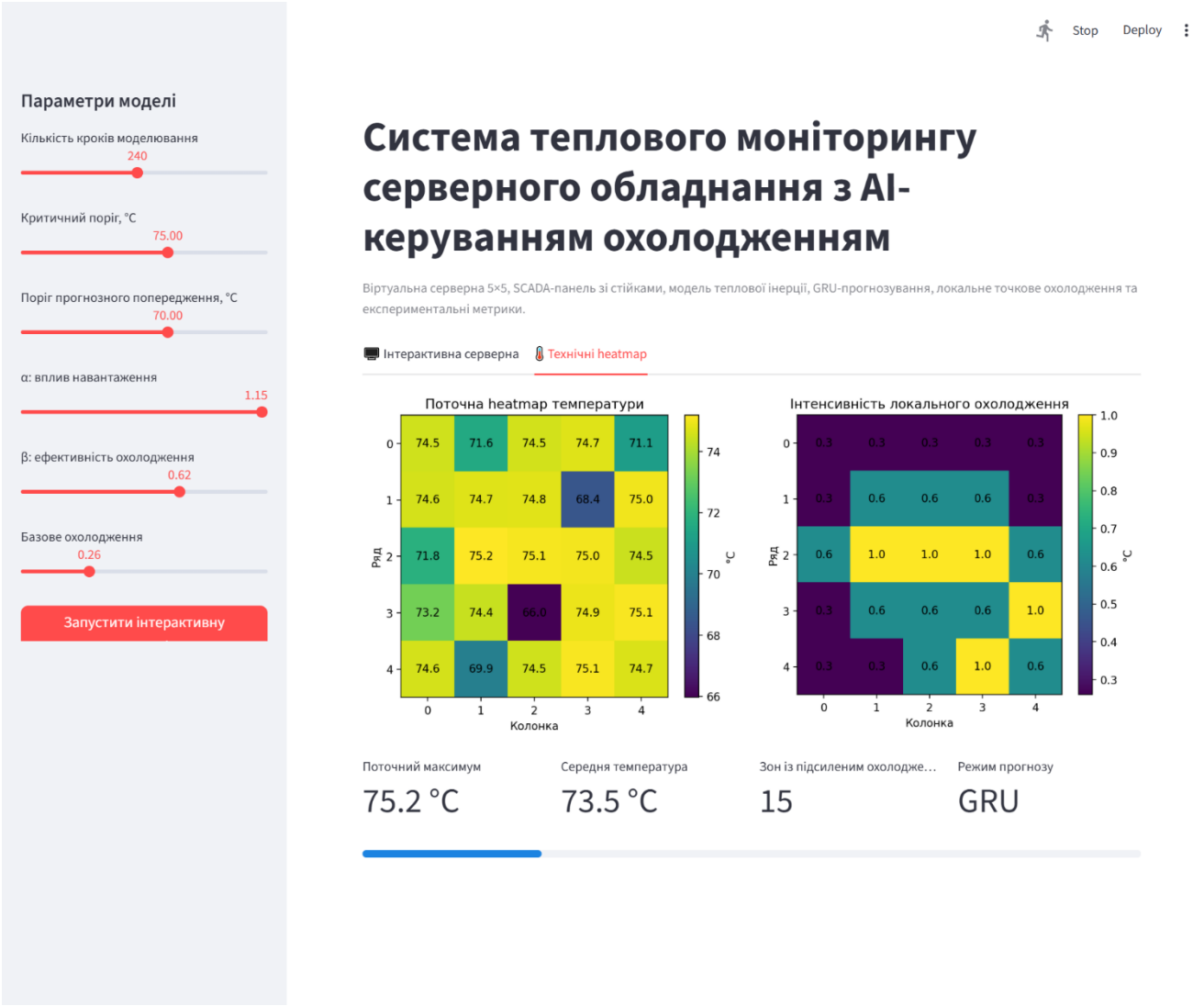


Рис. 3.4 Вкладка технічної теплової карти та інтенсивності локального охолодження

Окрема вкладка інтерфейсу реалізована як умовна інтерактивна панель серверної кімнати, що наведена на рис. 3.5. На ній серверне приміщення подано у вигляді плану з рядами серверних стійок, позначеннями зон, індикаторами кондиціонування, вентиляторами та інформаційною панеллю SCADA/AI. Кожна серверна стійка має власний колірний статус: нормальний, попереджувальний або критичний. Усередині блоків відображаються назва серверної зони, поточна температура та параметри охолодження. Додатково при наведенні на окрему стійку користувач може отримати деталізовану інформацію про її стан: поточну температуру, прогноз GRU, рівень навантаження, інтенсивність охолодження та факт локального підсилення.

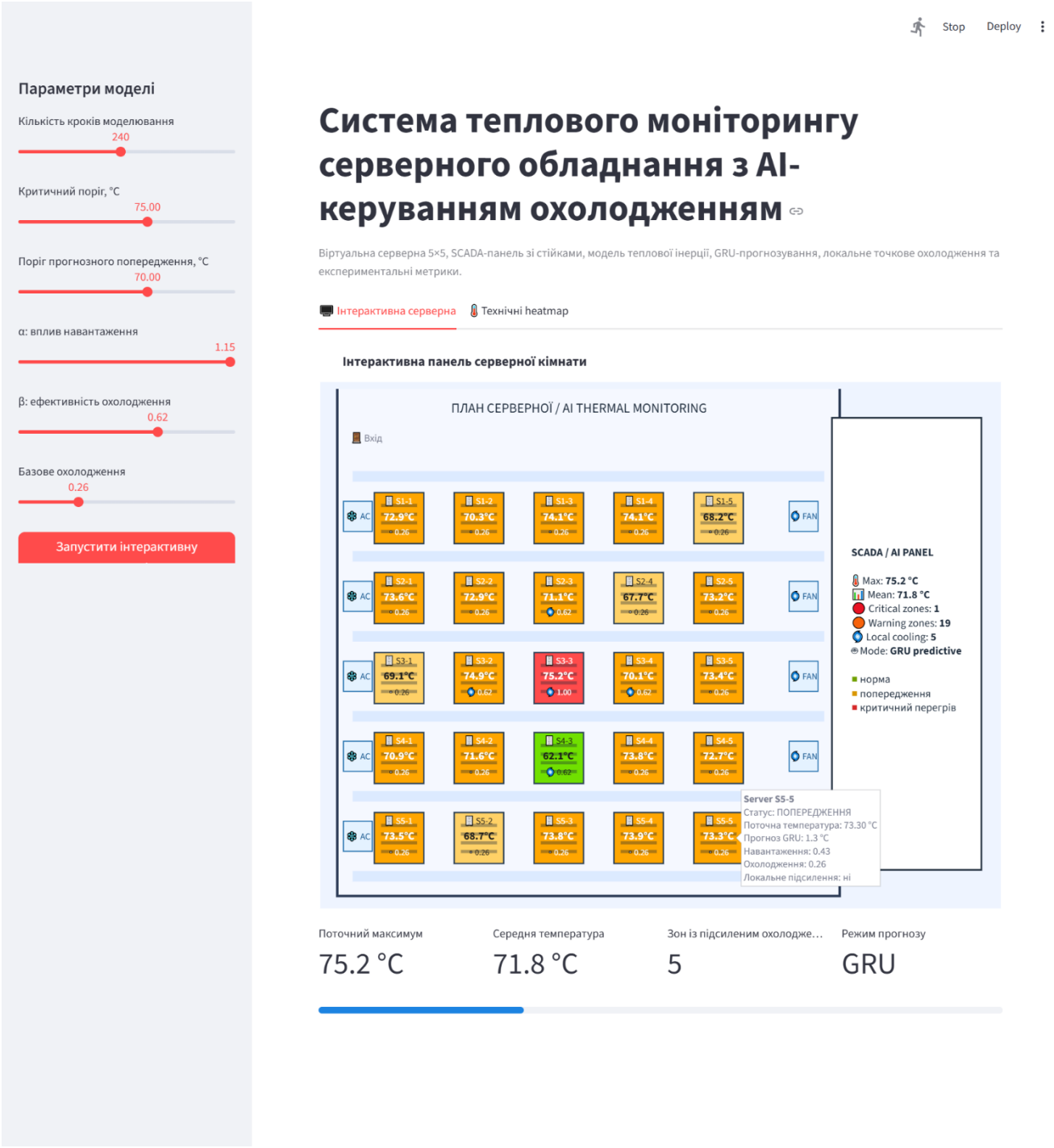


Рис. 3.5 Інтерактивна панель серверної кімнати з візуалізацією стану серверних зон

Програмний комплекс орієнтований не лише на чисельне моделювання, а й на практичну інтерпретацію результатів моніторингу. Технічна теплова карта дозволяє оцінити температурний розподіл у матричній формі, а інтерактивна панель серверної кімнати робить цю інформацію більш наочною для користувача

або адміністратора. Така реалізація наближує програмний комплекс до логіки диспетчерської панелі моніторингу серверної кімнати, де важливо не лише зберігати числові значення, а й швидко інтерпретувати стан обладнання за допомогою візуальних індикаторів, кольорових статусів і узагальнених показників.

3.3 Аналіз результатів тестування та оцінка енергоефективності запропонованого підходу

Для оцінювання ефективності розробленої системи було проведено порівняльне тестування двох режимів керування охолодженням серверної кімнати. Перший режим відповідав реактивному підходу, за якого система підсилювала охолодження лише після фактичного перевищення температурного порогу. Другий режим передбачав використання предиктивного керування на основі GRU-моделі, коли рішення про підсилення охолодження приймалося з урахуванням не лише поточної температури, а й прогнозованого теплового стану серверних зон. Такий підхід дозволяє оцінити практичний ефект від запропонованого алгоритму та визначити, чи забезпечує інтелектуальне керування зменшення кількості перегрівів і теплового ризику.

У процесі тестування аналізувалися максимальні температури серверної кімнати, кількість подій перегріву, інтегральний індекс теплового ризику та умовний індекс енерговитрат на охолодження. Порівняння виконувалося для однакових умов моделювання, що дозволило зіставити реактивну та предиктивну логіку керування. Такий підхід є важливим з наукової точки зору, оскільки дозволяє оцінювати не лише сам факт роботи програмного комплексу, а й ефективність запропонованого алгоритму в кількісних показниках.

На рис. 3.6 наведено порівняння температурного режиму серверної кімнати для реактивного та предиктивного керування. На графіку показано максимальну температуру в серверній кімнаті на кожному кроці моделювання, а також критичний і попереджувальний температурні пороги. Це дозволяє оцінити, як

система поводиться в періоди зростання навантаження та чи здатне предиктивне керування заздалегідь реагувати на ризик перегріву.

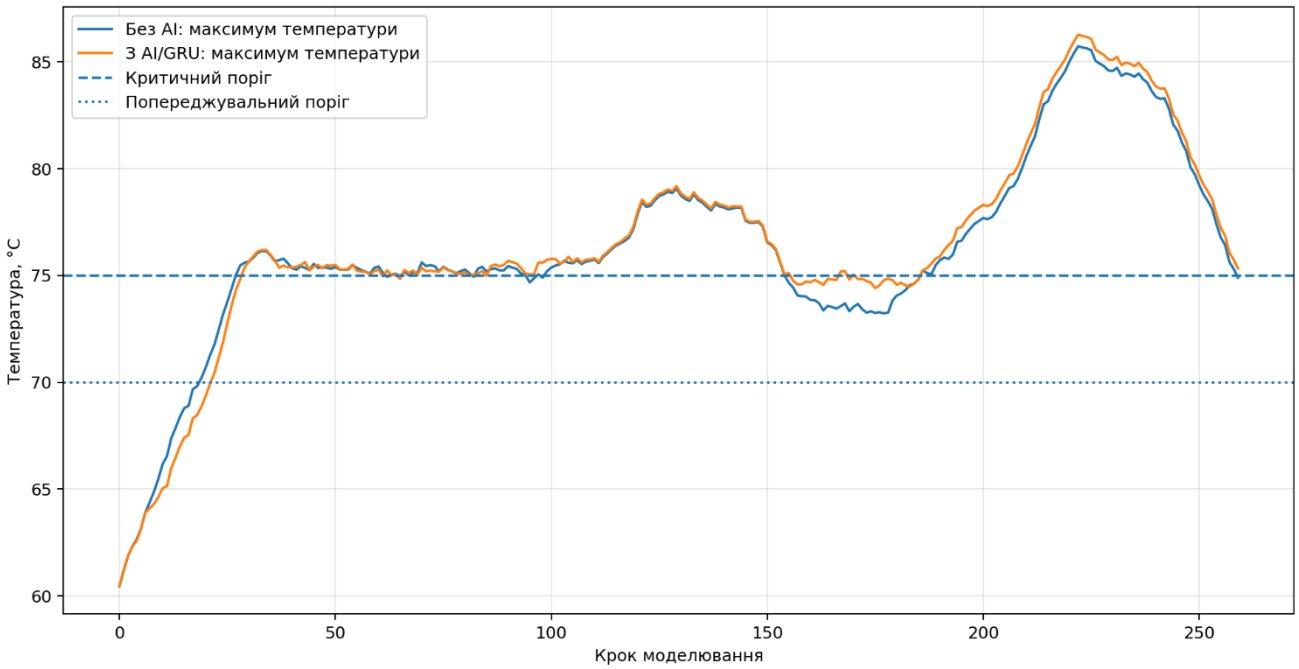


Рис. 3.6 Порівняння температурного режиму при реактивному та предиктивному керуванні

Аналіз рис. 3.6 показує, що в обох режимах температура серверної кімнати має нерівномірну динаміку: спочатку відбувається поступове зростання температури, далі система переходить у режим стабілізації, а в окремих інтервалах виникають повторні піки теплового навантаження. Лінії реактивного та предиктивного керування є близькими, що свідчить про однакові початкові умови моделювання та подібну загальну теплову динаміку. Водночас предиктивний режим відрізняється тим, що керуючий вплив формується не тільки після досягнення критичної температури, а й на основі прогнозу. Саме тому оцінювання ефективності доцільно виконувати не лише за максимальною температурою в окремий момент, а й за сукупністю інтегральних показників: кількістю перегрівів, тепловим ризиком та витратами на охолодження.

Кількість подій перегріву для двох режимів наведено на рис. 3.7. Цей показник відображає, скільки разів у процесі моделювання температура окремих зон перевищувала встановлений критичний поріг. Він є одним із ключових

критеріїв оцінювання стабільності серверної інфраструктури, оскільки часті події перегріву підвищують ризик аварійного вимкнення обладнання, зниження продуктивності та скорочення строку експлуатації серверів.

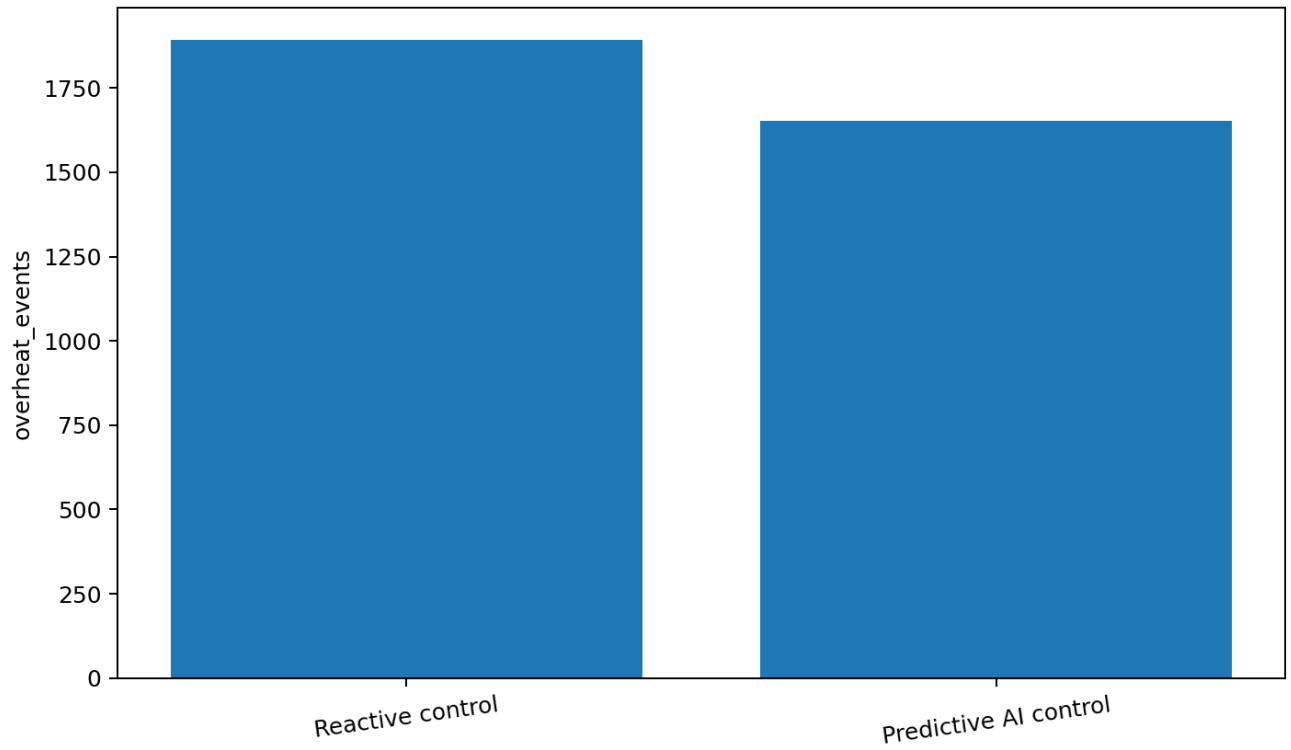


Рис. 3.7 Кількість подій перегріву в режимах реактивного та предиктивного керування

Як видно з рис. 3.7, у режимі предиктивного керування кількість подій перегріву є меншою, ніж у реактивному режимі. За висотою стовпців можна зробити висновок, що використання GRU-прогнозування дозволило зменшити кількість перегрівів приблизно з 1900 до 1650 випадків, тобто орієнтовно на 13 %. Це свідчить про практичну ефективність запропонованого підходу: система не просто реагує на вже зафіксований перегрів, а частково попереджає його виникнення завдяки завчасному підсиленню охолодження в ризикових зонах.

На рис. 3.8 подано інтегральний індекс теплового ризику. На відміну від простої кількості перегрівів, цей показник характеризує загальний рівень небезпеки теплового стану протягом усього періоду моделювання. Він враховує не

одиничний момент перевищення температури, а накопичений ефект роботи обладнання в умовах підвищеного теплового навантаження.

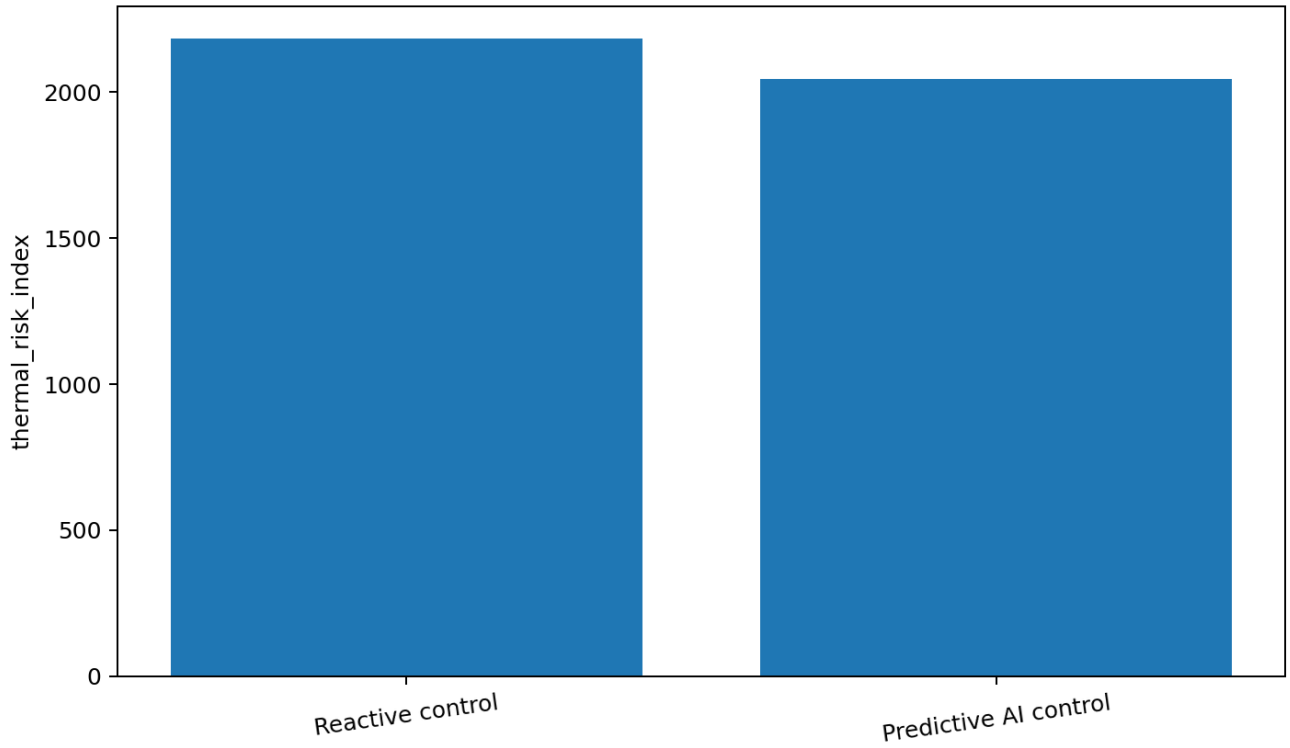


Рис. 3.8 Інтегральний індекс теплового ризику для реактивного та предиктивного керування

Результати на рис. 3.8 підтверджують, що предиктивне керування забезпечує нижчий інтегральний тепловий ризик порівняно з реактивним підходом. Орієнтовно значення індексу зменшується з близько 2180 до 2040 умовних одиниць. Це означає, що навіть якщо максимальні температури в окремі моменти залишаються близькими, загальна тривалість або інтенсивність перебування системи в небезпечному температурному діапазоні зменшується. Саме цей результат є важливим для підтвердження наукової новизни запропонованого алгоритму, оскільки він демонструє перевагу не миттєвої реакції на поріг, а прогнозного аналізу теплової динаміки.

Оцінювання енергоефективності виконано за умовним індексом енерговитрат на охолодження, результати якого наведено на рис. 3.9. Цей показник відображає сумарну інтенсивність використання охолодження протягом усього

циклу моделювання. Він дозволяє оцінити, якою ціною досягається зменшення теплового ризику та кількості перегрівів.

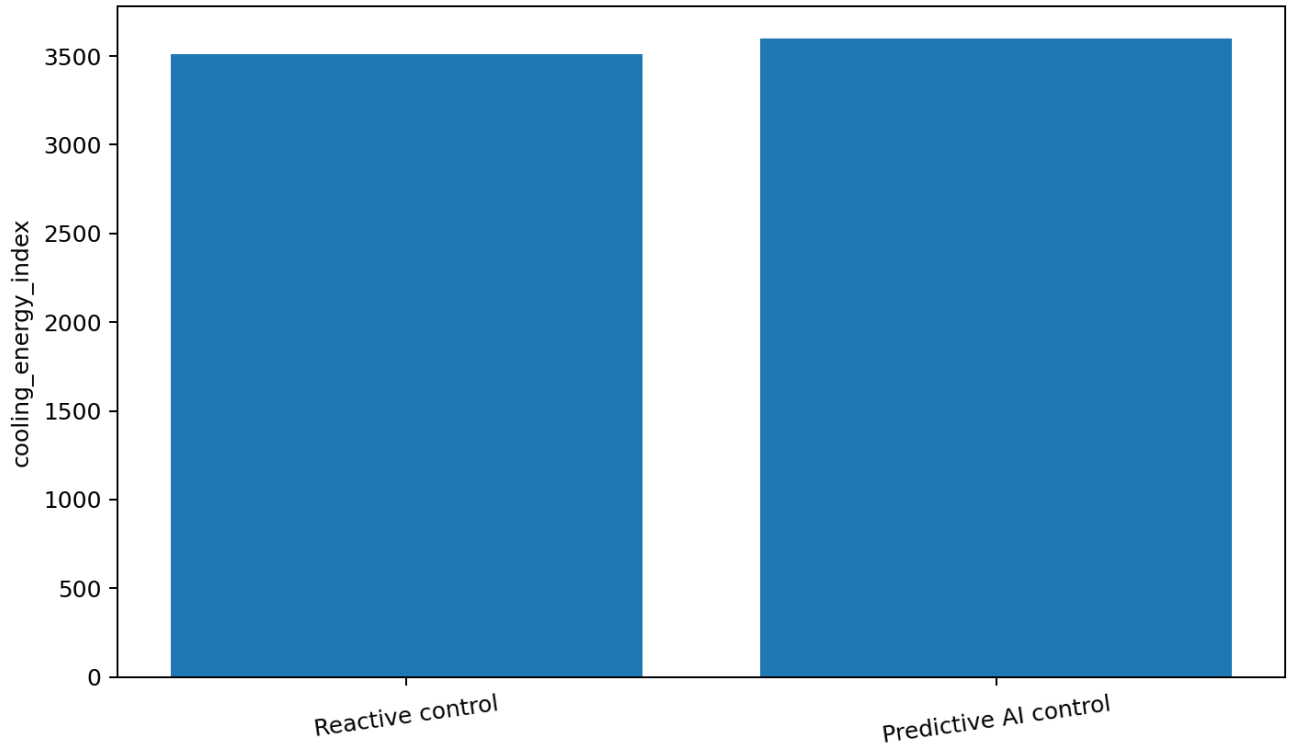


Рис. 3.9 – Індекс енерговитрат на охолодження при реактивному та предиктивному керуванні

Як видно з рис. 3.9, у предиктивному режимі індекс енерговитрат на охолодження є дещо вищим, ніж у реактивному режимі. Це пояснюється тим, що система вмикає або підсилює охолодження завчасно, ще до фактичного досягнення критичного порогу. На перший погляд це може свідчити про незначне збільшення витрат на охолодження, однак такий результат є логічним для предиктивної системи: частина енергії витрачається на попередження перегріву, а не на аварійне реагування після його виникнення. Отже, ефективність запропонованого підходу полягає не лише в мінімізації енерговитрат, а в досягненні кращого балансу між енергоспоживанням і тепловою безпекою серверного обладнання.

Наукова новизна запропонованого алгоритму полягає в тому, що керування охолодженням виконується на основі поєднання трьох компонентів: математичної

моделі теплової інерції, прогнозування температури за допомогою GRU-моделі та локального вибору інтенсивності охолодження для кожної серверної зони. На відміну від традиційного реактивного підходу, де рішення приймається тільки після перевищення температурного порогу, запропонований алгоритм використовує очікувану динаміку температури. Це дозволяє системі діяти на випередження та зменшувати кількість небезпечних теплових подій.

Особливо важливим є те, що алгоритм не підсилює охолодження всієї серверної кімнати одночасно. Керуючий вплив формується локально, тобто для конкретних зон, де поточна або прогнозована температура вказує на ризик перегріву. Такий підхід забезпечує просторову деталізацію керування і відрізняє розроблену систему від звичайних систем моніторингу, які здебільшого лише фіксують перевищення температури або формують повідомлення для адміністратора. У розробленому програмному комплексі температурні дані використовуються безпосередньо для прийняття керуючого рішення.

Порівняльний аналіз показав, що предиктивне керування дає змогу зменшити кількість перегрівів і загальний тепловий ризик, хоча потребує дещо більшої інтенсивності охолодження. Такий результат є прийнятним для серверної інфраструктури, де пріоритетом є стабільність роботи обладнання та недопущення критичних температурних станів. Отримані результати свідчать, що запропонований підхід є ефективним саме як інтелектуальна система підтримки теплової стабільності, а не лише як засіб економії енергії.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі було вирішено завдання розробки та оцінювання ефективності системи теплового моніторингу серверного обладнання корпоративної мережі з використанням алгоритмів інтелектуальної обробки даних і предиктивного керування охолодженням. Запропонований підхід орієнтований на підвищення стійкості серверної інфраструктури шляхом своєчасного виявлення локальних зон перегріву, прогнозування температурного стану та адаптивного підсилення охолодження в проблемних ділянках.

У першому розділі було проаналізовано сучасні методи та системи термічного моніторингу серверної інфраструктури. Встановлено, що стабільність корпоративної мережі залежить не лише від логічної організації мережевих сервісів, а й від фізичних умов експлуатації серверного обладнання. Розглянуті IoT-рішення, DCIM-платформи та SCADA-системи підтвердили, що сучасний моніторинг серверних приміщень має поєднувати збір температурних даних, контроль стану обладнання, аварійні сповіщення та візуалізацію параметрів. Разом із тим було визначено, що традиційний реактивний підхід до охолодження є обмеженим, оскільки реагує переважно на вже зафіксований перегрів і не враховує майбутню температурну динаміку.

У другому розділі було розроблено математичну та алгоритмічну основу системи. Серверну кімнату подано у вигляді дискретної сітки температурних зон, для кожної з яких враховуються поточна температура, рівень навантаження, інтенсивність охолодження, температура середовища та теплова інерція. Такий підхід дозволив моделювати не лише миттєвий стан обладнання, а й поступове накопичення та розсіювання тепла. Окремо було формалізовано алгоритм адаптивного точкового охолодження, який визначає режим охолодження для кожної серверної зони залежно від поточного та прогнозованого температурного стану. Це дало змогу перейти від загального охолодження всієї кімнати до локального керування конкретними зонами ризику.

Для предиктивного аналізу було обґрунтовано використання рекурентної нейронної мережі GRU. Вибір цієї архітектури зумовлений тим, що температура серверного обладнання є часовим процесом, у якому майбутній стан залежить від попередньої історії нагрівання, охолодження та навантаження. GRU-модель дозволяє аналізувати послідовність попередніх спостережень і формувати прогноз температури на кілька кроків уперед. Це забезпечує можливість завчасного виявлення ризику перегріву та формування керуючого впливу до моменту фактичного досягнення критичного температурного порогу.

У третьому розділі було реалізовано програмний комплекс теплового моніторингу серверного обладнання. Програмна система містить модуль симуляції серверної кімнати, модель теплової інерції, блок адаптивного керування охолодженням, GRU-модуль прогнозування температури, засоби побудови графіків і теплових карт, а також графічний інтерфейс користувача. Інтерфейс реалізовано у вигляді інтерактивної панелі, що дозволяє змінювати параметри моделювання, переглядати поточний тепловий стан серверної кімнати, аналізувати інтенсивність локального охолодження та спостерігати за роботою системи в режимі прогнозного керування.

У ході експериментального тестування було виконано порівняння реактивного та предиктивного режимів керування охолодженням. Результати показали, що використання GRU-прогнозування та адаптивного точкового охолодження дозволяє зменшити кількість подій перегріву та інтегральний індекс теплового ризику. Водночас предиктивний режим потребує дещо більшої інтенсивності охолодження, оскільки частина керуючих дій виконується завчасно, ще до фактичного перевищення критичного порогу. Такий результат є логічним для системи попереджувального керування, оскільки її головним завданням є не лише мінімізація енерговитрат, а й забезпечення стабільності та безпеки роботи серверного обладнання.

Наукова новизна роботи підтверджується поєднанням трьох компонентів в єдиній системі: математичної моделі теплової інерції, рекурентного прогнозування температури за допомогою GRU та алгоритму адаптивного точкового охолодження

окремих серверних зон. На відміну від традиційного моніторингу, який переважно фіксує перевищення температурного порогу, запропонована система використовує прогнозовану динаміку теплового стану для завчасного прийняття рішень. Це дозволяє розглядати розроблений підхід як інтелектуальний механізм підтримки теплової стабільності корпоративної серверної інфраструктури.

Практичне значення отриманих результатів полягає у створенні програмного прототипу, який може бути використаний для демонстрації принципів предиктивного теплового моніторингу, тестування алгоритмів керування охолодженням і подальшого розвитку систем на основі реальних IoT-датчиків. Розроблений комплекс може бути розширений шляхом підключення фактичних температурних сенсорів, інтеграції з обладнанням вентиляції або кондиціонування, удосконалення моделі прогнозування та додавання модулів аварійного сповіщення. Отже, поставлена мета кваліфікаційної роботи досягнута, а розроблена система підтверджує доцільність використання інтелектуального прогнозування для підвищення стійкості та енергоефективності серверної інфраструктури корпоративної мережі.

.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Ott, B., Wenzel, P. M., & Radgen, P. (2024). Analysis of Cooling Technologies in the Data Center Sector on the Basis of Patent Applications. Energies, 17(15), 3615. https://doi.org/10.3390/en17153615

2. Milić, V. (2024). Next-generation data center energy management: a data-driven decision-making framework. Frontiers in Energy Research, 12. https://doi.org/10.3389/fenrg.2024.1449358

3. Sarikaya, O. M., Kuzay, M., Demirel, E., Melgaard, S. P., Nielsen, J. E., Jensen, R. L., Oleksiak, A., & Szeliga, W. (2025). Energy efficiency enhancement in two European data centers through CFD modeling. Scientific Reports, 15(1). https://doi.org/10.1038/s41598-025-11048-0

4. Kuzay, M., Dogan, A., Yilmaz, S., Herkiloglu, O., Atalay, A. S., Cemberci, A., Yilmaz, C., & Demirel, E. (2022). Retrofitting of an air-cooled data center for energy efficiency. Case Studies in Thermal Engineering, 36, 102228. https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102228

5. Barestrand, H., Ljung, A.-L., Summers, J., & Lundström, S. (2023). Modeling Convective Heat Transfer of Air in a Data Center Using OpenFOAM. OpenFOAM® Journal, 3, 146–158. https://doi.org/10.51560/ofj.v3.59

6. Data Center Monitoring Market (2025 - 2033). (б. д.). https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/data-center-monitoring-market-report

7. Schneider Electric. EcoStruxure IT DCIM software. URL: https://www.se.com/ww/en/work/software/data-center-infrastructure-management-dcim/

8. Paessler. Data Center Temperature Monitoring with PRTG. URL: https://www.paessler.com/monitoring/data-center/data-center-temperature-monitoring

9. Siemens. SCADA Systems: Industrial Operations and Integration. URL: https://www.siemens.com/en-us/products/scada/

10. Kula, A., Dąbrowski, D., Blachnik, M., Sajkowski, M., Smalcerz, A., & Kamiński, Z. (2025). Modelling the Temperature of a Data Centre Cooling System Using Machine Learning Methods. Energies, 18(10), 2581. https://doi.org/10.3390/en18102581

11. Sha, Q., Yang, J., Shao, R., & Wang, Y. (2025). Prediction of Air-Conditioning Outlet Temperature in Data Centers Based on Graph Neural Networks. Energies, 18(7), 1803. https://doi.org/10.3390/en18071803

12. Yuan, H., Zhang, Z., Yang, D., Xue, T., Wen, D., & Yao, G. (2025). An Intelligent Thermal Management Strategy for a Data Center Prototype Based on Digital Twin Technology. Applied Sciences, 15(14), 7675. https://doi.org/10.3390/app15147675

13. Chang, Q., Huang, Y., Liu, K., Xu, X., Zhao, Y., & Pan, S. (2024). Optimization Control Strategies and Evaluation Metrics of Cooling Systems in Data Centers: A Review. Sustainability, 16(16), 7222. https://doi.org/10.3390/su16167222

14. *Python 3.14 documentation*. (б. д.). Python documentation. https://docs.python.org/

15. *NumPy Documentation*. (б. д.). NumPy. https://numpy.org/doc/

16. *Pandas documentation – pandas 3.0.3 documentation*. (б. д.). Pandas - Python Data Analysis Library. https://pandas.pydata.org/docs/

17. *PyTorch documentation*. (б. д.). PyTorch. https://docs.pytorch.org/docs/stable/index.html

18. *Matplotlib documentation – Matplotlib 3.10.9 documentation*. (б. д.). Matplotlib – Visualization with Python. https://matplotlib.org/stable/index.html

19. *Plotly Documentation*. (б. д.). https://docs.plotly.com/

20. *Streamlit Docs*. (б. д.). Streamlit documentation. https://docs.streamlit.io/

ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ (ПРЕЗЕНТАЦІЯ)

Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій

Кафедра інформаційних систем та технологій

Система теплового моніторингу серверного обладнання корпоративної мережі із впровадженням алгоритмів інтелектуальної обробки даних

Виконав: ВОЛОДИМИР БАЧКОВ
студент групи ІСД-42

Керівник: КАМІЛА СТОРЧАК
д. т. н., професор, завідувач кафедри ІСТ

Мета, об’єкт, предмет, завдання дослідження

Мета роботи:

- розробка та оцінка ефективності системи теплового моніторингу серверного обладнання корпоративної мережі з використанням алгоритмів інтелектуальної обробки даних

Об’єкт дослідження:

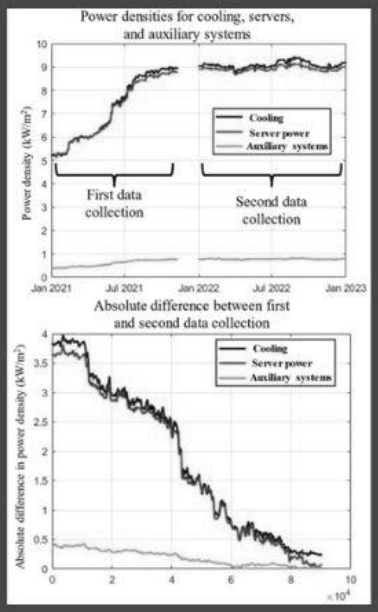
- процес теплового моніторингу та керування охолодженням серверного обладнання

Предмет дослідження:

- математичні моделі теплової інерції, алгоритми прогнозування температури, Heatmap-візуалізація та методи адаптивного точкового охолодження

Основні завдання:

- аналіз сучасних систем моніторингу; розробка моделі теплової інерції; використання GRU для прогнозування температури; реалізація програмного комплексу; порівняння реактивного та предиктивного керування



Актуальність проблеми

Серверне обладнання є критично важливим елементом корпоративної мережі, оскільки забезпечує роботу цифрових сервісів, баз даних і внутрішніх інформаційних систем.

Порушення температурного режиму може спричинити:
зниження продуктивності серверів
аварійне вимкнення обладнання
пошкодження компонентів
скорочення строку експлуатації

Особливо небезпечними є локальні перегріви, які не завжди виявляються при контролі лише середньої температури приміщення.

Існуючі рішення

IoT-моніторинг температури
- постійний збір даних із датчиків
- переважно фіксує поточний стан без прогнозу

SCADA-системи
- централізований контроль інженерної інфраструктури
- складність впровадження та висока вартість

CFD-моделювання температурних полів
- дозволяє виявити локальні перегріви та рециркуляцію повітря
- потребує складного моделювання і не завжди працює в реальному часі

Реактивне керування охолодженням
- просте в реалізації
- спрацьовує лише після перевищення температурного порогу

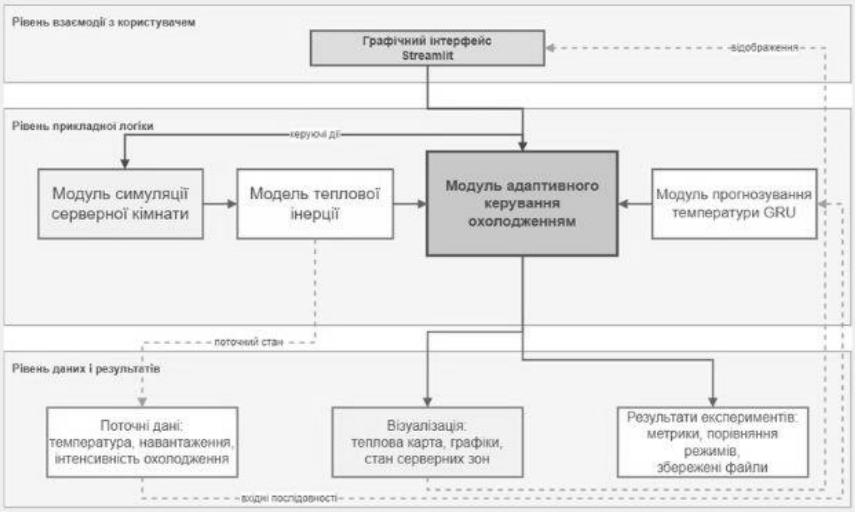
Існуючі підходи ефективні для контролю температури, але потребують доповнення предиктивним аналізом для завчасного виявлення перегріву.

Концепція запропонованої системи

Запропонована система поєднує **моніторинг, прогнозування та керування охолодженням.**
Загальна логіка роботи:

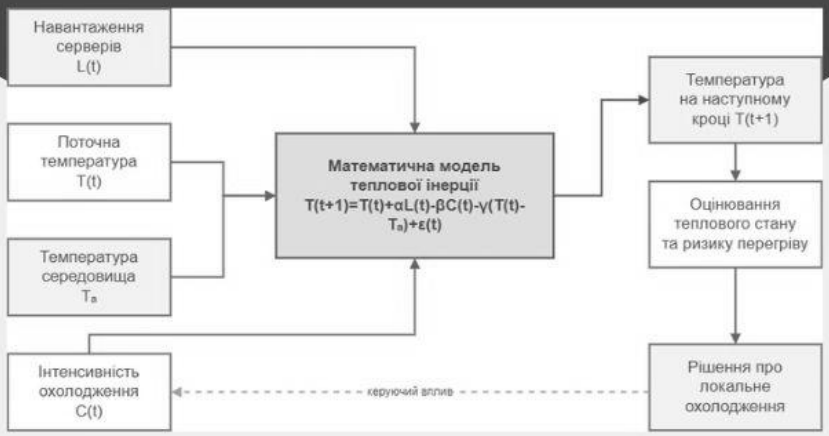
- збирання або моделювання температурних даних
- аналіз навантаження серверних зон
- прогнозування температури за допомогою GRU
- виявлення зон потенційного перегріву
- адаптивне підсилення охолодження
- візуалізація стану серверної кімнати у вигляді Heatmap

Система орієнтована не лише на фіксацію температури, а й на **завчасне попередження перегріву**.



Математична модель теплової інерції

$$T_{i,j}(t+1) = T_{i,j}(t) + \alpha \cdot L_{i,j}(t) - \beta \cdot C_{i,j}(t) - \gamma \cdot \left(T_{i,j}(t) - T_a\right) + \varepsilon_{i,j}(t)$$

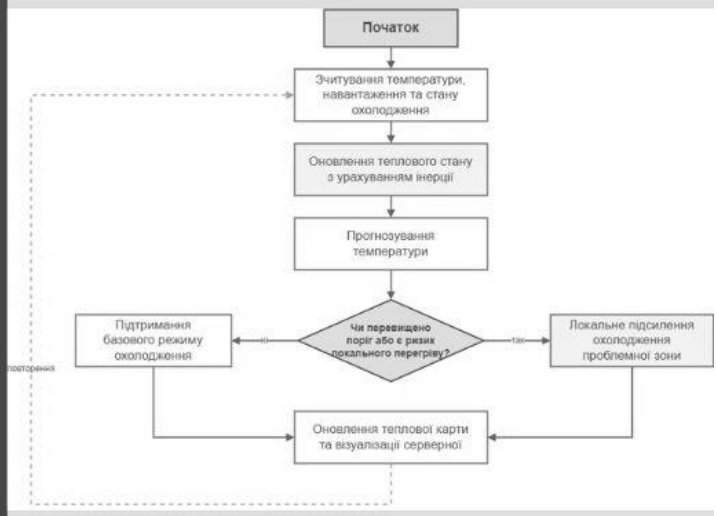


Алгоритм адаптивного точкового охолодження

Алгоритм адаптивного охолодження працює окремо для кожної серверної зони.

- система аналізує температуру кожної зони
- визначає ділянки з підвищеним ризиком перегріву
- підсилює охолодження тільки в проблемних зонах
- не витрачає додаткові ресурси на стабільні ділянки

Це забезпечує просторову деталізацію керування та підвищує ефективність роботи системи охолодження.

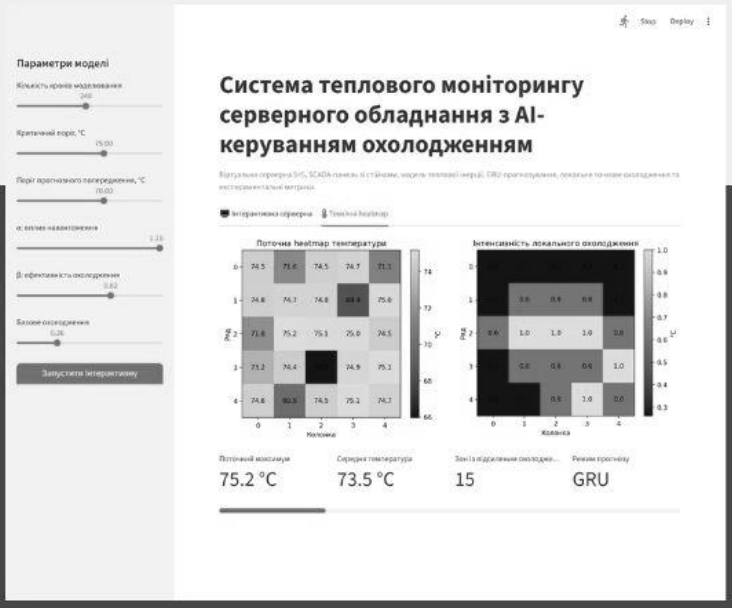


Інтерактивна панель серверної кімнати

На панелі показано:

- поточну температуру кожної серверної зони
- статус зони: норма, попередження або критичний перегрів
- кількість зон із локальним підсиленням охолодження
- максимальну та середню температуру
- режим прогнозування GRU

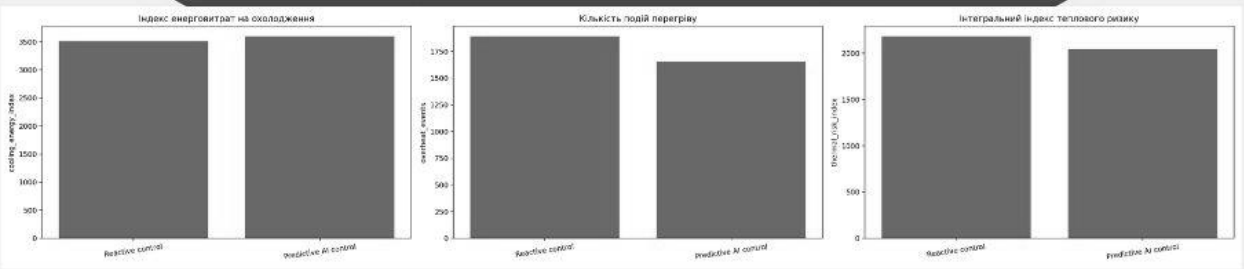
Інтерактивна панель дозволяє швидко виявити проблемні ділянки та оцінити стан серверної кімнати в реальному часі.



Візуалізація температури та охолодження

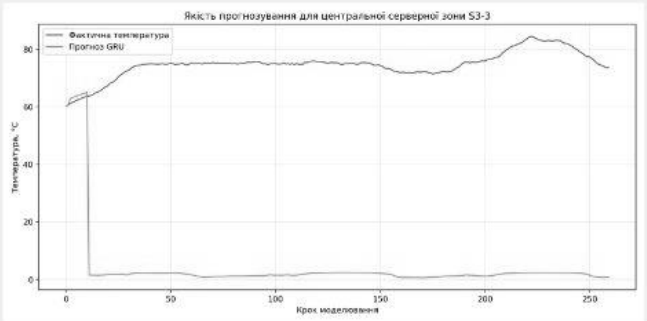
Heatmap дозволяє наочно визначити зони підвищеної температури, а друга карта показує, де система підсилює охолодження.

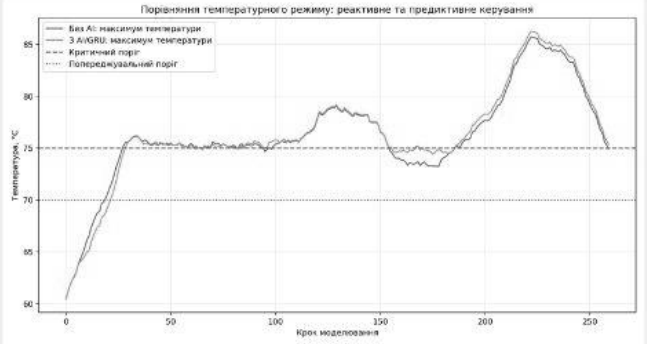
Математична модель теплової інерції

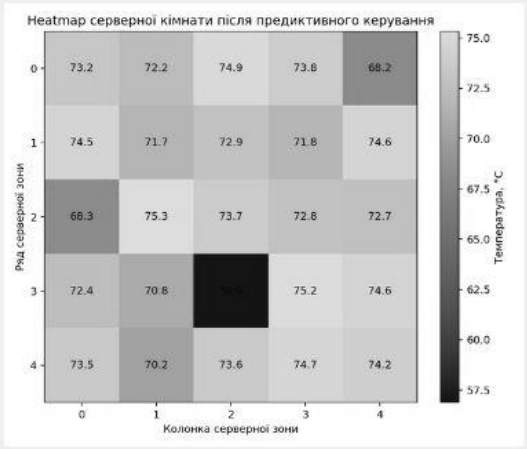


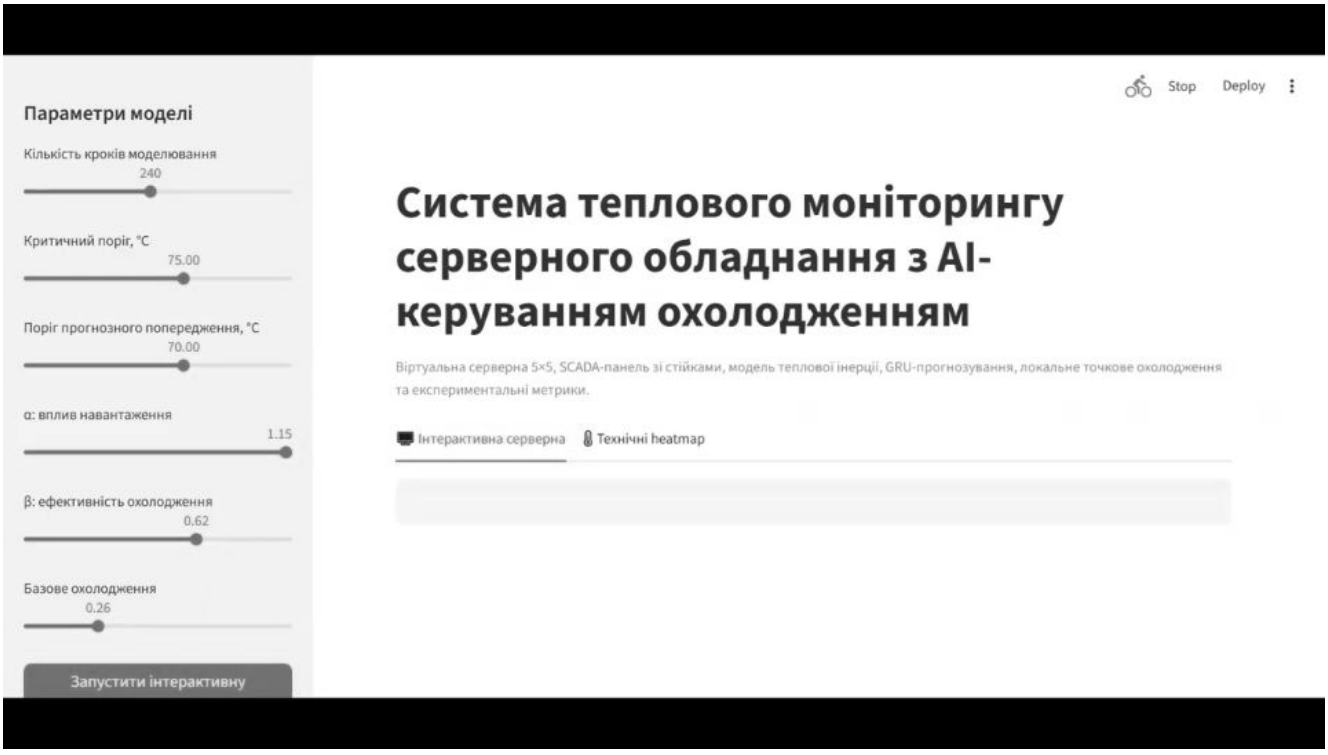
Тестування проводилося шляхом порівняння двох режимів: реактивного керування та предиктивного керування з використанням GRU

Для оцінки ефективності аналізувалися максимальна температура серверної кімнати, кількість подій перегріву, інтегральний індекс теплового ризику, умовний індекс енерговитрат на охолодження


Якість прогнозування для центральної серверної зони S3-3
Фактична температура
Прогноз GRU
Температура, °C
Крок моделювання


Порівняння температурного режиму: реактивне та предиктивне керування
Без AI: максимум температури
З AI/GRU: максимум температури
Критичний поріг
Попереджувальний поріг
Температура, °C
Крок моделювання


Heatmap серверної кімнати після предиктивного керування
Ряд серверної зони
Колонка серверної зони
Температура, °C
73.2 72.2 74.9 73.8 68.2
74.5 71.7 72.9 71.8 74.6
68.3 75.3 73.7 72.8 72.7
72.4 70.8 75.2 74.6
73.5 70.2 73.6 74.7 74.2


Параметри моделі
Кількість кроків моделювання
240
Критичний поріг, °C
75.00
Поріг прогнозного попередження, °C
70.00
α: вплив навантаження
1.15
β: ефективність охолодження
0.62
Базове охолодження
0.26
Запустити інтерактивну
Stop
Deploy
Система теплового моніторингу серверного обладнання з AI-керуванням охолодженням
Віртуальна серверна 5×5, SCADA-панель зі стійками, модель теплової інерції, GRU-прогнозування, локальне точкове охолодження та експериментальні метрики.
Інтерактивна серверна
Технічні heatmap

Апробація

1. VI Всеукраїнська науково-технічна конференція «Сучасний стан та перспективи розвитку IoT» (Київ, ДУІКТ, 15 квітня 2025 р.). Тези доповіді на тему «**Використання штучного інтелекту для безпекових заходів у мережах IoT**» опубліковані у збірнику матеріалів конференції (с. 367). URL: https://duikt.edu.ua/uploads/p_2779_40288420.pdf

2. VII Всеукраїнська науково-технічна конференція «Сучасний стан та перспективи розвитку IoT» (Київ, ДУІКТ, 20 квітня 2026 р.). Тези доповіді на тему «**Підвищення стійкості корпоративних мереж дотермічних загроз за допомогою інтелектуальних систем моніторингу на базі IoT**» опубліковані у збірнику матеріалів конференції (с. 245). URL: https://duikt.edu.ua/uploads/p_3086_38551069.pdf

Висновки

У роботі розроблено систему теплового моніторингу серверного обладнання з використанням інтелектуальної обробки даних.

Основні результати:

- розроблено математичну модель теплової інерції
- реалізовано GRU-модель прогнозування температури
- створено програмний комплекс із Heatmap-візуалізацією
- реалізовано алгоритм адаптивного точкового охолодження
- проведено порівняння реактивного та предиктивного керування

Використання GRU-прогнозування дозволило зменшити кількість перегрівів приблизно з 1900 до 1650 випадків, тобто орієнтовно на 13%. Запропонований підхід є ефективним для підтримки теплової стабільності серверної інфраструктури.


Дякую
за увагу