

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

(повне найменування закладу вищої освіти)

Навчально-науковий інститут інформаційних технологій і робототехніки

(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра автоматики, електроніки та телекомунікацій

(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи

магістр

(рівень вищої освіти)

на тему Автоматизація розподілу теплової енергії від майнінг-ферм у
локальних системах теплопостачання

Виконав: студент 2 курсу, групи 601МЕ
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Павлій О.Ю.

(прізвище та ініціали)

Керівник Галай В.М.

(прізвище та ініціали)

Рецензент Кислиця С.Г.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

кваліфікаційної роботи магістра

“Автоматизація розподілу теплової енергії від майнінг-ферм у локальних системах тепlopостачання”

Робота містить 85 сторінок, 17 рисунків, 3 таблиці, 18 використаних джерел.

Ключові слова: майнінг-ферма, тепла енергія, автоматизація, теплорозподіл, вентиляція, енергоефективність, CODESYS, мікроклімат.

Об’єктом дослідження є процеси тепловиділення та теплорозподілу в майнінг-фермах. **Предметом** дослідження є автоматизовані системи керування вентиляцією та теплорозподілом у локальних системах тепlopостачання з використанням тепла майнінгового обладнання. **Метою** магістерської роботи є дослідження можливостей використання теплової енергії майнінг-ферми для стабілізації мікроклімату приміщень та розробка автоматизованої системи керування вентиляційними процесами з метою підвищення енергоефективності та безпеки експлуатації обладнання.

У роботі проведено аналіз сучасного стану розвитку майнінгових технологій та їх впливу на енергетичні системи. Розглянуто фізичні процеси тепловиділення в ASIC-обладнанні, а також проаналізовано існуючі системи охолодження та утилізації теплової енергії.

Розроблено алгоритм автоматизованого керування системою теплорозподілу та вентиляції на базі програмного середовища CODESYS. Запропонована система забезпечує моніторинг температурних параметрів, автоматичне регулювання повітряних потоків і реалізацію аварійних режимів захисту обладнання від перегріву. Проведено дослідження роботи системи для майнінгової установки потужністю 10 кВт у приміщенні площею 100 м².

Результати досліджень підтверджують доцільність використання теплової енергії майнінг-ферм у локальних системах тепlopостачання та ефективність застосування автоматизованих систем керування для забезпечення рівномірного теплорозподілу і стабільного мікроклімату.

ABSTRACT

Master's qualification thesis

“Automation of Thermal Energy Distribution from Mining Farms in Local Heat Supply Systems”

The thesis consists of 85 pages, 17 figures, 3 tables, and 18 references.

Keywords: mining farm, thermal energy, automation, heat distribution, ventilation, energy efficiency, CODESYS, microclimate.

The object of the study is the processes of heat generation and heat distribution in mining farms. The subject of the study is automated control systems for ventilation and heat distribution in local heat supply systems using the thermal energy of mining equipment. The aim of the master's thesis is to investigate the possibilities of using thermal energy from mining farms to stabilize indoor microclimate conditions and to develop an automated ventilation control system in order to improve energy efficiency and operational safety.

The thesis analyzes the current state of mining technology development and its impact on energy systems. Physical processes of heat generation in ASIC equipment are considered, as well as existing cooling and thermal energy utilization systems. An automated control algorithm for heat distribution and ventilation systems based on the CODESYS software environment has been developed. The proposed system provides temperature monitoring, automatic regulation of airflows, and implementation of emergency protection modes against equipment overheating. The operation of the system was studied for a 10 kW mining installation located in a 100 m² room.

The research results confirm the feasibility of using thermal energy from mining farms in local heat supply systems and the effectiveness of automated control systems for ensuring uniform heat distribution and a stable microclimate.

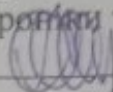
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
Інститут Навчально-науковий інститут інформаційних технологій та
робототехніки

Кафедра Автоматики, електроніки та телекомунікацій

Ступінь вищої освіти Магістр

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри автоматки,
електроніки та телекомунікацій
 О.В. Шефер
«05» вересня 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Павлію Олександрю Юрійовичу

- 1. Тема проєкту (роботи)** «Дослідження та автоматизація розподілу теплової енергії від майнінг-ферм у локальних системах теплопостачання». Керівник проєкту Галай Василь Миколайович, к.т.н., доцент, затверджена наказом вищого навчального закладу №1025 ф.а. від 03.09.2025 року.
- 2. Строк подання студентом проєкту (роботи)** 22.12.2025р.
- 3. Вихідні дані до проєкту (роботи)** Утилізована теплова потужність від 10 кВт; температура теплоносія на подачі 65°C; температура теплоносія на звороті 45°C; перепад температур теплоносія 20°C; точність підтримання температури $\pm 2^\circ\text{C}$; зниження споживання традиційних джерел тепла до 40%; допустима температура роботи обладнання (мін-макс) 20–85°C; положення регулюючого клапана 15–90%.
- 4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити).** 1. Аналіз сучасного стану утилізації теплової енергії майнінг-ферм. 2. Дослідження теплових процесів та показників ефективності майнінг-ферми. 3. Розробка автоматизованої системи розподілу теплової енергії. 4. Моделювання та оцінка ефективності системи.
- 5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових плакатів):** 1. Структурна схема майнінг-ферми як джерела теплової енергії. 2. Принципова схема системи теплопостачання з утилізацією тепла майнінг-ферми. 3. Структурна схема автоматизованої системи керування розподілом теплової енергії. 4. Алгоритм керування системою утилізації теплової енергії. 5. Математична модель системи теплопостачання. 6. Автоматизована система теплопостачання вигляд загальний. 7. Схема підключення датчиків температури та переферійного обладнання. 8. Графіки зміни температури теплоносія при різних режимах роботи.

6. Дата видачі завдання 04.09.2025р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Пор. №	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи			Примітки (плакати)
		Дата	Квартал	Відсоток	
1	Аналіз сучасного стану утилізації теплової енергії майнінг-ферм. Дослідження теплових процесів та показників ефективності майнінг-ферми.	21.10.25	I	20%	Пл. 1-4
2	Розробка автоматизованої системи розподілу теплової енергії. Моделювання та оцінка ефективності системи.	18.11.25	II	60%	Пл. 5-8
3	Оформлення кваліфікаційної роботи	22.12.25	III	100%	

Студент

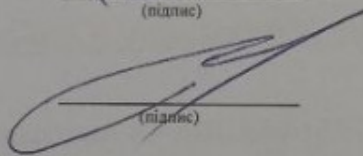


(підпис)

Павлій О.Ю.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи



(підпис)

Галай В.М.

(прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1. РОЗДІЛ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОБЛЕМИ.....	7
1.1 Світовий контекст енергетичної кризи та її вплив на технологічні галузі...7	7
1.2 Енергетичні характеристики сучасних майнінг-ферм.....	10
1.3 Фізичні основи тепловиділення в майнінг-обладнанні.....	12
1.4 Комплексний аналіз проблеми утилізації тепла.....	17
1.5 Аналіз існуючих систем охолодження.....	21
1.6 Проблеми автоматизації теплорозподілу.....	23
1.7 Соціальна та екологічна значущість.....	26
1.8 Технологічний потенціал та перспективи розвитку.....	28
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ.....	32
2.1 Програма для одного приміщення.....	32
2.2 Програма для декількох приміщень.....	36
РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА.....	43
3.1. Розрахунок теплового навантаження від майнінг-ферми.....	43
3.2. Розрахунок потреби у теплі для приміщення.....	43
3.3. Баланс теплової енергії та потенціал утилізації.....	44
3.4. Розрахунок необхідної витрати повітря.....	44
3.5. Розрахунок енергоефективності системи.....	46
3.6. Розрахунок терміну окупності системи.....	47
РОЗДІЛ 4. ВИБІР ОБЛАДНАННЯ.....	49
ПЛК Aqtech 150 IL.....	49
Датчик температури DS18B20.....	51
Вентилятор Vents VK 150.....	53
Вентилятор AC Infinity CLOUDLINE S6.....	56
Модуль MB110-16ДН.....	59
РОЗДІЛ 5. ДОСЛІДНА ЧАСТИНА.....	63
5.1. Методика дослідження.....	63
5.3. Дослідження роботи без автоматизації.....	67
5.4. Дослідження роботи з автоматизацією.....	69

	7
5.5. Узагальнення результатів.....	72
6. МОНТАЖ ОБЛАДНАННЯ.....	77
ВИСНОВОК.....	81
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	83
ДОДАТКИ.....	85

ВСТУП

Стрімкий розвиток цифрових технологій та збільшення світового обсягу обчислювальних операцій призвели до суттєвого зростання попиту на високопродуктивні апаратні засоби. Одним з найбільш енергоємних напрямів стала сфера криптовалютного майнінгу, у якій використовуються спеціалізовані обчислювальні пристрої з високим електроспоживанням. У процесі роботи такі установки виділяють значні обсяги теплової енергії, що у більшості випадків розглядається як побічний продукт і розсіюється у навколишнє середовище без будь-якої користі. Проте саме ця особливість відкриває можливість раціонального використання відхідного тепла майнінгового обладнання у системах теплопостачання та мікроклімату приміщень. [1, 2]

Проблематика енергоефективності в Україні залишається актуальною протягом останніх років у зв'язку зі зростанням вартості енергоресурсів, підвищенням вимог до енергозбереження та потребою у зниженні навантаження на традиційні інженерні системи. Тому пошук альтернативних джерел теплоти, здатних зменшити загальне енергоспоживання будівель, набуває практичного й економічного значення. Використання майнінгових установок як теплогенераторів є одним із прогресивних напрямів розвитку таких технологій, адже фактично вся споживана електроенергія перетворюється на тепло. [8, 12]

Попри очевидний тепловий потенціал майнінг-ферм, їх інтеграція у систему опалення або вентиляції пов'язана з низкою технічних викликів. Одним з головних є надзвичайно інтенсивне тепловиділення, що призводить до швидкого нагрівання приміщень і створення нерівномірних температурних зон. Це може спричинити перегрів обладнання, зниження його ресурсу, а також погіршення умов експлуатації. Для забезпечення стабільного мікроклімату необхідно впроваджувати ефективні системи контролю та регулювання, здатні адаптуватися до динамічних змін температури та теплових потоків.

Сучасні системи автоматизації дозволяють реалізувати алгоритми керування вентиляційним обладнанням, моніторинг температури в різних точках

приміщення, а також оперативне реагування на аварійні ситуації, пов'язані з перегрівом майнера. Застосування промислових методів автоматизації, зокрема використання середовища CODESYS, забезпечує високу точність керування, гнучкість у налаштуваннях та можливість реалізації складних режимів регулювання. Таким чином, автоматизація виступає ключовим елементом у побудові ефективної та безпечної системи теплорозподілу на базі енергії майнінгу. [18]

Дослідження теплого повітряного потоку, створюваного майнінг-фермою, є актуальним для визначення можливостей практичного впровадження таких рішень у житлових, офісних та виробничих приміщеннях. Особливо це стосується обладнання великої потужності — 8–10 кВт і більше, яке здатне забезпечити суттєвий тепловий ефект навіть у просторах приміщеннях площею понад 100 м². Аналіз процесів теплопередачі, поведінки повітряних потоків, а також варіантів інтеграції системи вентиляції дозволяє оцінити перспективність таких технологій у реальних умовах.

Загалом, взаємодія між майнінговим обладнанням та системами мікроклімату формує новий підхід до раціонального використання енергії. Поєднання високопродуктивних обчислювальних систем із технологіями автоматизованого теплоконтролю може суттєво знизити експлуатаційні витрати на опалення, підвищити рівень комфортності та безпеки, а також мінімізувати екологічний вплив за рахунок ефективнішого використання енергоресурсів.

У цій роботі розглядаються теплотехнічні характеристики майнінгової установки потужністю 10 кВт, особливості її роботи у приміщенні площею 100 м², а також розробка та дослідження автоматизованої системи керування температурою на базі програмного забезпечення CODESYS. Значну увагу приділено аналізу динаміки нагріву повітря, ефективності автоматичних алгоритмів, роботі аварійного охолодження та оцінці рівномірності теплорозподілу. [18]

Метою роботи є дослідження можливостей використання теплової енергії майнінг-ферми для стабілізації мікроклімату та підвищення енергоефективності

приміщень, а також розробка алгоритмів автоматизованого керування вентиляційними системами для забезпечення безпечної та економічно обґрунтованої експлуатації обладнання.

Наукова новизна роботи полягає у поєднанні високопотужного майнінгового обладнання з адаптивними алгоритмами автоматичного регулювання, що дозволяє розглядати майнер як елемент низькотемпературної системи теплопостачання.

Практична значущість полягає у можливості використання результатів роботи для проектування систем мікроклімату з використанням тепла майнінгу, оптимізації енергоспоживання підприємств та підвищення ресурсу обчислювального обладнання.

Таким чином, введення до дослідної частини магістерської роботи окреслює ключові проблеми, актуальність та можливості застосування майнінг-ферм як джерел теплової енергії, а також визначає необхідність впровадження автоматизованих систем контролю для забезпечення їх ефективної та безпечної роботи.

1. РОЗДІЛ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОБЛЕМИ

1.1 Світовий контекст енергетичної кризи та її вплив на технологічні галузі

Глобальна енергетична криза, що загострилася внаслідок геополітичної нестабільності, структурних змін енергетичних ринків і зростання попиту на електроенергію, стала одним із визначальних викликів сучасної цивілізації. В умовах переходу до цифрової економіки, коли більшість технологічних процесів базується на електронних обчисленнях, питання енергоефективності набуває стратегічного значення.

За даними Міжнародного енергетичного агентства (IEA), світове споживання електроенергії зростає на 2,5–3,5 % щорічно, і значну частку цього приросту формують енергоємні цифрові технології. Одним із найдинамічніших секторів, який створює суттєве навантаження на енергетичну інфраструктуру, є криптовалютний майнінг. Його розвиток супроводжується експоненційним збільшенням споживання електроенергії та відповідно зростанням екологічного навантаження. [1, 2]

Згідно з аналітичними оцінками Кембриджського університету, щорічне енергоспоживання мережі Bitcoin перевищує 150 ТВт·год, що більше, ніж енергетичне споживання окремих розвинених країн, таких як Аргентина чи Нідерланди. Ця тенденція вимагає пошуку інноваційних рішень для підвищення енергоефективності, оптимізації використання електричних ресурсів і мінімізації негативного впливу на енергосистеми. [3]

Особливо актуальним це питання є для енергетичної системи України, яка перебуває у процесі масштабної трансформації, модернізації та адаптації до нових технологічних викликів. Впровадження систем утилізації теплової енергії, що утворюється в процесі майнінгу, може стати одним із напрямів підвищення загальної ефективності енергетичного сектора.

Розвиток криптовалютної індустрії супроводжувався суттєвими технологічними змінами в апаратному забезпеченні, яке використовується для

обчислення хеш-функцій. Початкові етапи майнінгу ґрунтувалися на використанні звичайних центральних процесорів (CPU), здатних виконувати необхідні криптографічні операції, проте з низькою ефективністю. У процесі зростання складності обчислень і підвищення вимог до продуктивності CPU були поступово замінені графічними процесорами (GPU), які забезпечували кращу паралельну обробку даних.



Рисунок 1.1 — ASIC-майнер

Подальша еволюція призвела до появи спеціалізованих пристроїв — **FPGA (Field Programmable Gate Array)**, що дозволили суттєво збільшити швидкість обчислень завдяки можливості оптимізації під конкретні алгоритми. Проте справжній технологічний прорив відбувся із запровадженням **ASIC (Application-Specific Integrated Circuit)** — інтегральних схем, розроблених виключно для виконання конкретних криптографічних алгоритмів (наприклад, **SHA-256** для *Bitcoin* чи **Ethash** для *Ethereum*).

Архітектура та принципи роботи ASIC-майнерів

ASIC-майнери являють собою високоспеціалізовані обчислювальні системи, створені для максимально ефективного виконання повторюваних операцій хешування. Їхня архітектура включає низку оптимізованих елементів:

- Високопродуктивні обчислювальні ядра, спроектовані для паралельної обробки криптографічних функцій;
- Системи охолодження, що базуються на теплових трубках і високоефективних радіаторах;
- Блоки живлення з коефіцієнтом корисної дії (ККД) 90–95 %;
- Мікроконтролери для моніторингу температурних режимів та управління енергоспоживанням;
- Мережеві інтерфейси для підключення до пулів майнінгу та віддаленого адміністрування.

Сучасні моделі демонструють надзвичайно високі показники обчислювальної потужності. Зокрема, **Bitmain Antminer S19 XP** і **Whatsminer M50** досягають 140 TH/s (терахешів за секунду) при споживанні 3000–5500 Вт електроенергії. Для порівняння, перші ASIC-пристрої 2013 року забезпечували лише 60 GH/s при споживанні 400 Вт. Таким чином, за десятиріччя продуктивність зросла більш ніж у 2000 разів при відносно помірному зростанні енергоспоживання. [5, 6, 14]

Ключові переваги та обмеження ASIC-архітектури

Основною перевагою ASIC-обладнання є надзвичайна енергоефективність,

яка визначається мінімізацією зайвих обчислень і повною оптимізацією мікросхеми під один алгоритм. Проте вузька спеціалізація має і суттєві недоліки: такі пристрої не універсальні й не можуть бути переналаштовані для інших типів обчислень. [15]

Серед ключових характеристик сучасних ASIC можна виділити:

- Високу щільність транзисторів — до кількох мільярдів елементів на одному кристалі (технологічні норми 5–7 нм);
- Високу густину енергоспоживання — 100–150 Вт/см²; [10, 16]
- Оптимізовану структуру живлення та охолодження, що забезпечує стабільність у межах температур 60–85°C; [10, 11]
- Високий коефіцієнт продуктивності — до 21–23 Дж/терахеш. [5, 6]

Таким чином, еволюція від CPU до ASIC відображає загальну тенденцію розвитку цифрових технологій — перехід від універсальних рішень до високоспеціалізованих апаратних комплексів, орієнтованих на максимальну енергоефективність.

1.2 Енергетичні характеристики сучасних майнінг-ферм

Майнінг-ферми сучасного типу є складними технічними комплексами, що поєднують велику кількість високопродуктивних обчислювальних пристроїв, системи електроживлення, охолодження та моніторингу. Їхня експлуатація супроводжується значним енергоспоживанням, що безпосередньо впливає на економічну ефективність і стабільність енергомереж. [13]

Загальні параметри споживання електроенергії

Типова майнінг-ферма середнього масштабу містить від 10 до 100 одиниць ASIC-обладнання, кожна з яких споживає від 3 до 5,5 кВт. Таким чином, сумарне навантаження на електромережу становить 30–500 кВт, що можна порівняти з енергоспоживанням невеликого промислового підприємства або житлового кварталу, який включає 200–300 квартир.

При безперервній роботі така ферма споживає близько 720–12 000 кВт·год

електроенергії на добу, що формує значні витрати й потребує стабільного електропостачання. У багатьох випадках майнінгові комплекси оснащуються резервними джерелами живлення або працюють у регіонах з надлишковими потужностями енергогенерації.

Показники енергоефективності

Основним критерієм енергоефективності майнінг-обладнання є питомі витрати енергії на обчислення одного терахешу, що вимірюються в Джоулів на терахеш (J/TH). Сучасні моделі демонструють такі показники:

- Bitmain Antminer S19 XP — 21,5 J/TH;
- MicroBT Whatsminer M50S — 26 J/TH;
- Canaan Avalon 1366 — 29 J/TH.

У порівнянні з попередніми поколіннями пристроїв (50–70 J/TH) енергоефективність покращилася майже втричі. Це стало можливим завдяки вдосконаленню технологічних процесів виробництва чіпів, зменшенню розмірів транзисторів до 5–7 нм і застосуванню високоефективних блоків живлення з ККД понад 90 %.

Енергетичний баланс та теплові втрати

Характерною особливістю майнінгу є те, що практично вся споживана електроенергія перетворюється на теплову енергію. Частка корисної енергії, яка безпосередньо витрачається на виконання обчислень, становить лише 2–5 %, тоді як 95–98 % енергії виділяється у вигляді тепла. [8, 12]

Таким чином, для ферми потужністю 100 кВт відхідна теплова потужність становить 95–98 кВт, що відповідає тепловому потоку невеликої котельні. Це створює потенціал для вторинного використання тепла, наприклад для систем опалення або нагріву води, що дозволяє підвищити загальну енергоефективність об'єкта.

Вплив зовнішніх факторів

На енергетичну ефективність майнінг-ферм істотно впливають такі фактори:

- Температура навколишнього середовища. При підвищенні температури знижується ефективність охолодження, збільшується енергоспоживання вентиляторів або насосів.
- Вологість повітря. Висока вологість підвищує ризик корозії й деградації контактних елементів.
- Якість електроживлення. Нестабільна напруга або гармонічні спотворення можуть знижувати ККД блоків живлення.
- Рівень пилового забруднення. Пил зменшує тепловіддачу й погіршує ефективність вентиляції.

Для забезпечення стабільної роботи ферми застосовуються системи автоматичного моніторингу, які відстежують температуру, навантаження та стан обладнання в реальному часі.

1.3 Фізичні основи тепловиділення в майнінг-обладнанні

Тепловиділення в майнінг-обладнанні є наслідком фундаментальних електрофізичних процесів, що відбуваються в напівпровідникових структурах інтегральних схем. Розуміння механізмів формування теплових втрат є необхідною умовою для оптимізації конструкції ASIC-чипів, систем охолодження та підвищення енергоефективності майнінгових ферм.

Усі процеси, пов'язані з перетворенням електричної енергії на тепло, підпорядковуються законам електродинаміки та термодинаміки. Головним джерелом тепловиділення в обчислювальних пристроях є джоулеві втрати, що виникають під час проходження електричного струму через провідникові й напівпровідникові елементи. [8, 9]

Механізми тепловиділення

У сучасних ASIC-чипах, виготовлених за техпроцесами 5–7 нм, струм через окремі транзистори може сягати кількох міліампер. З урахуванням того, що кількість транзисторів у мікросхемі перевищує мільярд, сумарний струм споживання одного пристрою може досягати 30–40 А, що формує значні теплові потоки. [5]

Основні джерела теплових втрат поділяються на кілька рівнів:

- На рівні кристала кремнію — внаслідок руху носіїв заряду через кристалічну решітку;
- На рівні міжз'єднань — через опір мідних або алюмінієвих провідників;
- На рівні корпусу — через тепловий опір між кристалом, термоінтерфейсом і корпусом чіпа.

Теплофізичні процеси в напівпровідниках

На мікроскопічному рівні основними процесами, що спричиняють тепловиділення, є:

- Рекомбінація носіїв заряду у р–n переходах, під час якої частина енергії переходить у тепло. Величина цього ефекту визначається шириною забороненої зони напівпровідника. Для кремнію вона становить 1,12 еВ при кімнатній температурі.
- Квантове тунелювання електронів через потенційні бар'єри в нанорозмірних транзисторах. Цей ефект посилюється при зменшенні товщини діелектричного шару до кількох атомарних шарів, що призводить до додаткових втрат.
- Розсіювання на фононах, яке відбувається під час руху електронів крізь кристалічну решітку. Це основний механізм утворення тепла в напівпровідникових структурах. Інтенсивність розсіювання зростає зі збільшенням густини струму й температури.

Теплопередача в багатошарових структурах

Сучасні ASIC-чіпи складаються з багатошарових систем, у яких теплопередача здійснюється послідовно через декілька матеріалів:

Таблиця 1.1. - Теплопровідність шарів конструкції ASIC-чипів

Шар конструкції	Тип матеріалу	Теплопровідність, Вт/(м·К)

Кристал кремнію	Напівпровідник	148
Термоінтерфейс	Полімер/композит	1–10
Теплорозподільна пластина	Мідь	400
Субстрат (керамічний або органічний)	Діелектрик	20–30

Для типових чіпів густина теплового потоку досягає 100–150 Вт/см², що у 2–3 рази перевищує показники для універсальних процесорів (CPU). Така висока щільність потоку пояснюється інтенсивною паралельною обробкою даних, коли одночасно активуються мільйони обчислювальних ядер. [10, 16]

Температурні режими та обмеження

Робочі температури кристалів ASIC зазвичай знаходяться в межах 60–85°C, що є компромісом між стабільністю роботи та довговічністю пристрою. При перевищенні 95°C спостерігаються процеси деградації напівпровідникових структур, які скорочують життєвий цикл обладнання. [10, 11]

На тепловий режим впливають такі чинники:

- Тепловий опір “кристал–корпус” — 0,1–0,5 К/Вт;
- Ефективність системи охолодження (повітряної, рідинної або імерсійної);
- Температура навколишнього середовища;
- Вологість і швидкість руху повітря.

Раціональне керування цими параметрами дозволяє знизити ризик перегріву й забезпечити оптимальний тепловий баланс, що є передумовою стабільного функціонування майнінгових систем.

Теплові характеристики та потенціал утилізації від майнінг-ферм

Майнінг-ферми є потужними джерелами низькопотенційного тепла, яке утворюється в результаті інтенсивної роботи напівпровідникових компонентів. Ефективне використання цієї енергії є важливою складовою стратегії підвищення загальної енергоефективності криптовалютної індустрії. [7]

Основним джерелом теплової енергії в ASIC-майнерах є джоулеві втрати, які виникають унаслідок протікання електричного струму через резистивні елементи напівпровідникових структур. [8, 9]

Для сучасних технологічних норм 5 нм, які використовуються в новітніх моделях ASIC, густина електричного струму сягає критичних значень, що призводить до інтенсивного нагрівання кристала та необхідності застосування високоефективних систем охолодження.

Температурні характеристики майнінг-обладнання

Температурні показники сучасних ASIC-майнерів такі:

- Температура ядра кристала — 60–85°C (оптимальний робочий діапазон); [10, 11]
- Критична температура деградації — 95–110°C;
- Температура повітря на виході з системи охолодження — 45–65°C;
- Рекомендована температура навколишнього середовища — 25–35°C.

Теплова потужність обладнання залежить від його моделі. [5,6]

Таблиця 1.2. - Потужність типових ASIC-майнерів

Модель обладнання	Споживана потужність, Вт	Обчислювальна потужність, TH/s
Bitmain Antminer S19j Pro	2950–3050	100–104
Bitmain Antminer S19 XP	3100–4100	140–150
MicroBT Whatsminer M50	3200–5200	120–130

Енергетичний баланс майнінг-ферми

Для ферми загальною потужністю 100 кВт енергетичний баланс має такий вигляд:

Таблиця 1.3. - Енергетичний баланс ферми

Показник	Значення
Загальна споживана електрична потужність	100 кВт
Корисна обчислювальна потужність	2–5 кВт (2–5%)
Теплові втрати	95–98 кВт (95–98%)
Ефективність використання первинної енергії	2–5%

Отже, переважна частина енергії (до 98 %) вивільняється у вигляді тепла, яке може бути використане як вторинний енергоресурс.

Потенційні напрями утилізації теплової енергії

Системи опалення приміщень.

Ферма потужністю 100 кВт має тепловий потенціал, достатній для:

- опалення 10–15 житлових будинків площею 120–150 м² кожен;
- обігріву офісних приміщень площею 800–1000 м²;
- підтримання температури у промислових цехах площею 600–800 м².

Промислове застосування тепла.

Низькопотенційне тепло можна використовувати для:

- сушіння сільськогосподарської продукції;
- підігріву технологічної води;
- підтримання мікроклімату у теплицях.

Технології утилізації тепла

Повітря–повітряні теплообмінники:

- Коефіцієнт теплопередачі — 30–50 Вт/(м²·К);
- Ефективність рекуперації — 60–75%;
- Температурний напір — 15–25°C.

Повітря–рідинні теплообмінники:

- Коефіцієнт теплопередачі — 50–100 Вт/(м²·К);
- Ефективність — 70–85%;
- Перевага — можливість транспортування тепла на відстань.

Теплові насоси:

- Коефіцієнт перетворення (COP) — 3–5;
- Підвищення температури — 20–40°C;
- Вихідна температура теплоносія — 65–85°C.

Економічний та екологічний ефект

Економічна ефективність:

- Вартість природного газу — 0,5–0,7 €/м³;
- Теплотворна здатність — 9–11 кВт·год/м³;
- Річна економія для ферми 100 кВт — 8000–12 000 €.

Енергетична економія на охолодженні:

- Підвищення енергоефективності систем охолодження — 15–25%;
- Зменшення споживання електроенергії — 10–20%.

Екологічний ефект:

- Зменшення викидів CO₂ — 150–200 т/рік; [4, 13]
- Еквівалент скорочення викидів від 30–40 автомобілів.

Основні технічні обмеження

- Низький температурний потенціал (45–65°C) — обмежує сфери застосування;
- Сезонність теплового навантаження — влітку попит на тепло знижується;
- Необхідність складної інтеграції в існуючі системи тепlopостачання;
- Високі капітальні витрати на початковому етапі впровадження (500–1000 \$/кВт).

1.4 Комплексний аналіз проблеми утилізації тепла

Відхідне тепло — це частина енергії, що вивільняється в процесі функціонування промислових або технологічних систем і не використовується для корисної роботи. Відповідно до принципів термодинаміки, під час будь-якого перетворення енергії завжди виникають теплові втрати, які зазвичай розсіюються в навколишнє середовище. Раціональне використання цієї енергії є ключовим завданням сучасної енергетики, орієнтованої на сталий розвиток.

Основні джерела відхідного тепла

- Енергетика.
На теплових електростанціях (ТЕС) і атомних електростанціях (АЕС) у вигляді теплоносія скидається до 50–65 % енергії первинного палива. Ці об'єкти є найбільшими концентраторами відхідного тепла у світовій енергетиці.
- Промисловість.
Металургійна, цементна, хімічна, нафтопереробна та скляна промисловість утворюють значні обсяги відхідного тепла через димові гази, охолодження агрегатів та побічні технологічні процеси.
- Транспорт.
Двигуни внутрішнього згоряння мають ККД лише 20–40 %, решта енергії палива розсіюється у вигляді тепла.
- Інформаційна інфраструктура.
Центри обробки даних (ЦОД), майнінг-ферми, системи кондиціонування

та холодильні установки постійно відводять великі обсяги низькопотенційного тепла, яке здебільшого не використовується повторно.

Ключові бар'єри ефективної утилізації тепла

Технологічні бар'єри:

- Низький температурний потенціал. Значна частина відхідного тепла має температуру нижче 250°C, що робить його непридатним для традиційних паротурбінних систем. Необхідне використання спеціалізованих технологій, таких як органічний цикл Ренкіна (ORC), теплові насоси або абсорбційні холодильні установки.
- Проблема акумулювання. Утворення та споживання тепла не збігаються у часі. Для вирівнювання енергетичного балансу потрібні масштабні накопичувачі теплової енергії, однак їхня реалізація часто є економічно та технічно складною.
- Корозійні та забруднювальні процеси. Теплоносії промислових систем часто містять абразивні частинки або хімічно агресивні речовини, що знижують довговічність теплообмінників і ускладнюють їхню експлуатацію.

Економічні бар'єри

- Високі капітальні витрати (CAPEX).
Установки для утилізації тепла (модулі ORC, котли-утилізатори, системи теплообміну) потребують значних інвестицій, термін окупності яких часто перевищує 5–10 років.
- Інфраструктурні обмеження.
Для транспортування тепла до споживачів необхідне створення теплових мереж, що суттєво підвищує загальну вартість проєкту.
- Відносна дешевизна первинних енергоносіїв.
У країнах з низькою ціною на газ або вугілля економічна мотивація для впровадження технологій утилізації тепла є недостатньою.

Організаційні та регуляторні бар'єри

- Відсутність синергії між учасниками ринку.
Підприємства, які генерують тепло, і потенційні його споживачі часто не мають механізмів співпраці, а також є нестача інформації про можливості взаємодії.
- Недосконала законодавча база.
Відсутність стабільних тарифів на енергію, вироблену з відхідного тепла, та слабка система податкових стимулів знижують інтерес бізнесу до інвестицій у такі проєкти.
- Організаційна інерція.
Для більшості підприємств енергоефективність не є пріоритетом, адже головна увага зосереджується на основному виробництві.

Перспективні шляхи вирішення

Технологічні інновації:

- Розробка високоефективних теплообмінників з композитних і наноструктурованих матеріалів, стійких до агресивних середовищ;
- Вдосконалення технологій роботи з низькопотенційним теплом, зокрема систем на базі органічного циклу Ренкіна (ORC);
- Створення модульних накопичувачів теплової енергії на основі розплавлених солей, твердих матеріалів або хімічних реакцій зворотного типу.

Економічні та політичні механізми

- Запровадження державних програм співфінансування проєктів утилізації відхідного тепла;
- Використання зелених тарифів та податкових пільг для енергії, отриманої з вторинних джерел;
- Створення фінансових стимулів для підприємств, що впроваджують технології енергоефективності.

Системне планування та інтеграція

- Розвиток еко-індустріальних парків, де тепло від одного підприємства використовується іншим;
- Інтеграція джерел відхідного тепла в міські енергетичні системи з метою формування локальних теплових кластерів;
- Впровадження цифрових платформ моніторингу для управління потоками теплової енергії в реальному часі.

Проблема утилізації теплових відходів має комплексний характер і вимагає поєднання технічних, економічних та організаційних заходів. Її вирішення сприятиме не лише підвищенню енергоефективності економіки, але й зменшенню негативного впливу на довкілля. Розвиток технологій утилізації тепла від майнінг-ферм може стати важливим кроком у напрямі сталого енергетичного розвитку та інтеграції цифрових технологій у систему раціонального використання енергоресурсів.

1.5 Аналіз існуючих систем охолодження

Системи охолодження є невід'ємним компонентом майнінг-ферм, оскільки забезпечують стабільний тепловий режим роботи обладнання та запобігають деградації напівпровідникових структур. Вибір методу відведення тепла залежить від потужності пристроїв, щільності розміщення, кліматичних умов і вимог до енергоефективності.

Основними параметрами, які визначають якість системи охолодження, є:

- коефіцієнт тепловіддачі;
- рівень енергоспоживання допоміжного обладнання (вентиляторів, насосів);
- стабільність температурного режиму;
- можливість утилізації відпрацьованого тепла.

Повітряне охолодження

Повітряне охолодження є найпоширенішим способом відведення тепла з ASIC-пристроїв. Система базується на примусовій циркуляції повітря через радіатори

або ребра охолодження за допомогою вентиляторів.

Переваги:

- відносно низька вартість реалізації;
- простота конструкції та обслуговування;
- можливість масштабування системи без значних витрат.

Недоліки:

- низька ефективність тепловідведення при високих температурах навколишнього середовища;
- підвищений рівень шуму (до 80–90 дБ);
- значне енергоспоживання вентиляторів (до 10 % від загального споживання ферми);
- обмежені можливості рекуперації тепла.

Технічні характеристики:

- Коефіцієнт теплопередачі: 10–25 Вт/(м²·К);
- Ефективність тепловідведення: 60–70 %;
- Оптимальний температурний діапазон роботи: до 35°C навколишнього середовища.

Рідинне охолодження

Рідинне охолодження (liquid cooling) ґрунтується на використанні теплоносія (води, гліколю або спеціальних діелектричних рідин), який циркулює через теплові пластини або блоки, закріплені безпосередньо на кристалах ASIC.

Переваги:

- ефективніше тепловідведення порівняно з повітряним охолодженням;
- нижча робоча температура обладнання (на 15–25°C менше);
- зниження рівня шуму;
- можливість утилізації тепла через теплообмінники або системи опалення.

Недоліки:

- складність конструкції та необхідність герметизації контурів;
- потреба у насосному обладнанні та системах контролю витоків;
- вищі капітальні витрати.

Технічні параметри:

- Коефіцієнт теплопередачі: 50–100 Вт/(м²·К);
- Ефективність тепловідведення: 85–90 %;
- Енергоспоживання допоміжних систем: 3–5 % від загального.

Рідинні системи дедалі частіше використовуються у промислових майнінг-центрах, оскільки вони дають змогу стабілізувати теплові режими та зменшити витрати на охолодження.

Імерсійне охолодження

Імерсійне (занурювальне) охолодження є найефективнішою технологією серед наявних рішень. Її принцип полягає у повному зануренні електронних компонентів у діелектричну рідину, яка має високу теплоємність і добру теплопровідність.

Переваги:

- рівномірне відведення тепла з усіх поверхонь компонентів;
- мінімальний шум і пилове забруднення;
- можливість повної рекуперації тепла для опалення або промислових потреб;
- подовження терміну служби обладнання за рахунок стабільного теплового режиму.

Недоліки:

- висока вартість впровадження (до 1000 \$/кВт);
- необхідність використання спеціальних непровідних рідин;
- складність обслуговування та утилізації теплоносія.

Технічні характеристики:

- Коефіцієнт теплопередачі: 100–250 Вт/(м²·К);

- Ефективність тепловідведення: понад 95 %;
- Температура теплоносія: 45–65°C;
- Можливість використання для підігріву води або опалення безпосередньо.

Імерсійне охолодження сьогодні розглядається як перспективний напрям для побудови енергоефективних і екологічно стійких майнінг-ферм, здатних поєднувати обчислювальні процеси з тепловою утилізацією.

1.6 Проблеми автоматизації теплорозподілу

Автоматизація процесів розподілу теплової енергії в майнінг-фермах є одним із ключових напрямів підвищення їх енергоефективності. Незважаючи на високий технічний рівень сучасних майнінг-систем, питання ефективного управління тепловими потоками залишається відкритим. Основною проблемою є відсутність інтегрованих рішень, здатних одночасно забезпечувати стабільний тепловий режим, енергетичну оптимізацію та утилізацію відхідного тепла.

Складність завдання полягає в тому, що майнінгове обладнання генерує тепло нерівномірно, а його кількість залежить від навантаження, алгоритму майнінгу, температури середовища та ефективності охолодження. Система автоматизації має реагувати на зміну цих параметрів у реальному часі, забезпечуючи оптимальний баланс між охолодженням і тепловою утилізацією.

Основні недоліки існуючих систем

На сучасному етапі більшість майнінг-ферм використовують локальні або ручні системи регулювання температури, що не враховують специфіку динамічних теплових процесів. Основні проблеми таких систем:

- Відсутність адаптивних алгоритмів управління. Системи працюють за фіксованими параметрами, не враховуючи зміни зовнішніх умов чи навантаження на обладнання.
- Відсутність інтеграції з системами теплопостачання. Теплова енергія розсіюється в навколишнє середовище замість її спрямування для корисного використання.

- Неможливість динамічного балансування теплових потоків. У багатьох випадках частина обладнання перегрівається, тоді як інша працює при знижених температурах.
- Недостатній рівень моніторингу та аналітики. Більшість систем не мають механізмів прогнозування чи аналізу теплового стану обладнання.

Система автоматизації теплорозподілу повинна враховувати такі ключові параметри:

- Температура ядра ASIC-чипів (T_1): підтримується в межах 60–80°C;
- Температура навколишнього середовища (T_2): контролюється для забезпечення ефективної тепловіддачі;
- Температура теплоносія в системах утилізації (T_3): оптимальний діапазон 45–65°C;
- Витрата повітря або рідини через охолоджувальні елементи (Q): регулюється залежно від поточного теплового навантаження;
- Швидкість обертання вентиляторів чи насосів (ω): визначається алгоритмом оптимізації енергоспоживання.

Вимоги до систем управління

Для забезпечення ефективної роботи майнінгової ферми система автоматизації має відповідати таким вимогам:

- Адаптивність. Здатність реагувати на зміни теплових і електричних параметрів у режимі реального часу.
- Енергоефективність. Мінімізація власного споживання енергії при максимальному збереженні стабільності температурного режиму.
- Інтегрованість. Можливість взаємодії з іншими системами — електроживлення, вентиляції, тепlopостачання.
- Безпечність. Забезпечення термічної стабільності обладнання та запобігання перегріву.
- Інтелектуальна аналітика. Використання алгоритмів машинного

навчання для прогнозування змін теплового навантаження.

Проблеми реалізації автоматизованих систем

Розробка ефективної системи автоматизації стикається з низкою технічних та організаційних викликів:

- Відсутність стандартизованих рішень. Для кожної ферми потрібна індивідуальна розробка з урахуванням конфігурації обладнання.
- Складність моделювання теплових процесів. Висока щільність розміщення елементів ускладнює побудову точних моделей теплопередачі.
- Потреба у високоточних датчиках. Для ефективного контролю необхідно використовувати термопари з точністю не менше $\pm 0,1^\circ\text{C}$.
- Інтеграція з системами утилізації. Узгодження алгоритмів охолодження та рекуперації тепла вимагає складного управління потоками енергії.

Напрями вдосконалення

Для вирішення зазначених проблем доцільним є впровадження інтелектуальних систем автоматизації на базі мікроконтролерів і датчиків IoT.

Такі системи здатні:

- здійснювати розподілене керування температурними зонами;
- підтримувати оптимальний режим охолодження з урахуванням навантаження;
- передавати дані до аналітичних платформ, що дозволяють прогнозувати поведінку системи;
- регулювати напрям теплових потоків для утилізації надлишкової енергії.

Реалізація автоматизованих систем керування теплорозподілом відкриває перспективу створення енергоефективних, саморегульованих майнінг-комплексів, які не лише зменшують споживання електроенергії, а й підвищують загальну стабільність роботи та безпеку обладнання.

1.7 Соціальна та екологічна значущість

Перетворення майнінг-ферм на енергоефективні комплекси має важливе соціально-економічне значення. Використання відхідного тепла дозволяє суттєво знизити навантаження на енергомережі та сприяє формуванню децентралізованої, стійкої до зовнішніх факторів енергетичної інфраструктури.

Соціальні переваги впровадження технологій утилізації тепла:

- Підвищення енергетичної незалежності місцевих громад.
Використання тепла від майнінг-ферм для опалення житлових будинків і об'єктів соціальної інфраструктури зменшує залежність від централізованого теплопостачання й імпорتنих енергоносіїв.
- Створення нових робочих місць.
Розробка, монтаж та експлуатація систем рекуперації тепла потребують залучення інженерів, технічних спеціалістів і обслуговуючого персоналу.
- Сприяння розвитку децентралізованих енергетичних систем.
Інтеграція майнінг-ферм у локальні енергетичні кластери відкриває можливості для створення автономних енергетичних зон з мінімальними втратами енергії.
- Зменшення енергетичних витрат населення.
Завдяки утилізації тепла можна забезпечити опалення житлових будинків за нижчими тарифами або навіть на безоплатній основі при наявності партнерських угод із майнінговими компаніями.

Екологічний аспект

Екологічна значущість утилізації тепла полягає у зменшенні споживання первинних енергоносіїв і скороченні викидів парникових газів. Енергія, яка раніше розсіювалась у навколишнє середовище, може бути використана повторно — для опалення, підігріву води чи виробничих потреб.

Основні екологічні переваги:

- Зменшення вуглецевого сліду.
Застосування утилізованого тепла знижує потребу в спалюванні

природного газу або вугілля, що прямо впливає на скорочення викидів CO₂. Для майнінг-ферми потужністю 100 кВт потенційне скорочення викидів становить 150–200 тонн CO₂ на рік, що еквівалентно викидам 30–40 легкових автомобілів.

- Підвищення ефективності використання енергоресурсів.

Використання тепла, яке раніше втрачалось, підвищує загальний коефіцієнт використання енергії до 80–90 %, що відповідає рівню найсучасніших енергоефективних технологій.

- Зменшення теплового забруднення навколишнього середовища.

Замість розсіювання тепла в атмосферу воно спрямовується на утилізацію, що сприяє стабілізації локальних мікрокліматичних умов, особливо в густонаселених районах.

- Оптимізація структури енергоспоживання.

Перехід до комбінованих систем енергопостачання з використанням вторинного тепла дозволяє скоротити споживання традиційних енергоносіїв до 20–30 %.

Вплив на сталий розвиток

У контексті цілей сталого розвитку ООН (SDG), технології утилізації тепла від майнінг-ферм безпосередньо відповідають таким напрямкам:

- SDG 7 — Доступна та чиста енергія: підвищення ефективності використання енергоресурсів і розвиток відновлюваних джерел тепла;
- SDG 9 — Інновації та інфраструктура: стимулювання науково-технічного прогресу в галузі цифрової енергетики;
- SDG 12 — Відповідальне споживання та виробництво: повторне використання енергетичних ресурсів;
- SDG 13 — Боротьба зі зміною клімату: зменшення викидів CO₂ та інших парникових газів.

Таким чином, реалізація систем утилізації теплової енергії у майнінгових фермах не лише підвищує енергоефективність криптовалютної індустрії, але й

має значний позитивний вплив на соціальне та екологічне середовище. Вона сприяє формуванню нової моделі енергоспоживання, що поєднує цифрові технології з принципами сталого розвитку.

1.8 Технологічний потенціал та перспективи розвитку

Технологічний потенціал розробки систем утилізації теплової енергії від майнінг-ферм полягає у поєднанні інноваційних підходів з сучасними досягненнями у сфері енергоефективності, автоматизації та управління тепловими потоками.

Комплексне впровадження таких рішень дає змогу:

- підвищити загальний коефіцієнт використання енергії (ККЕ) до 80–90 %, що є показником високоефективних енергетичних систем;
- зменшити енергетичні втрати під час охолодження обладнання;
- інтегрувати процеси утилізації тепла у локальні системи тепlopостачання або промислові технологічні цикли;
- створити передумови для цифрової трансформації енергетики, де інформаційні та енергетичні потоки керуються єдиною системою управління.

Завдяки сучасним сенсорним технологіям, автоматизованим системам моніторингу та алгоритмам штучного інтелекту з'являється можливість створення адаптивних систем теплорозподілу, які працюють у режимі саморегуляції. Такі рішення забезпечують оптимізацію роботи майнінг-ферми з урахуванням змін зовнішніх умов і внутрішнього навантаження.

Перспективи розвитку технологій утилізації тепла

Подальший розвиток технологій утилізації тепла від майнінг-ферм пов'язаний із такими тенденціями:

- Гібридні енергетичні комплекси.

Поєднання майнінгових ферм із тепловими насосами, сонячними

коллекторами або системами накопичення енергії створює синергетичний ефект, що дозволяє забезпечити безперервне та ефективне енергопостачання.

- Децентралізовані теплові мережі.

Використання відпрацьованого тепла для живлення локальних тепломереж або житлових комплексів зменшує навантаження на центральні системи опалення та втрати при транспортуванні енергії.

- Сезонне акумулювання теплової енергії.

Впровадження підземних акумуляторів, термохімічних систем і матеріалів з фазовим переходом дозволить зберігати тепло, отримане взимку, для використання в інші сезони.

- Використання нових теплоносіїв.

Перспективним напрямом є застосування діелектричних нанорідин з підвищеною теплопровідністю, що збільшує ефективність передачі тепла на 20–30 %.

- Енергоефективні будівлі нового покоління.

Інтеграція майнінг-ферм безпосередньо в інженерні системи будівель (data centers as heating hubs) відкриває можливість створення комбінованих об'єктів, які одночасно генерують обчислення й тепло для опалення.

Науково-технічна перспектива

З точки зору наукових досліджень, перспективними напрямками є:

- моделювання теплових процесів у багатошарових структурах ASIC-чипів з урахуванням нанорозмірних ефектів;
- розробка математичних моделей теплорозподілу, що враховують стохастичну природу навантаження в майнінгових системах;
- створення оптимізаційних алгоритмів керування, які поєднують енергетичні та економічні критерії ефективності.

Реалізація таких досліджень сприятиме формуванню нової генерації

інтелектуальних енергетичних систем, у яких відхідне тепло перетворюється на цінний енергетичний ресурс.

Потенціал розвитку технологій утилізації тепла від майнінг-ферм є значним як у технічному, так і в економічному аспектах. Застосування інтелектуальних систем керування, високоефективних теплообмінників та гібридних енергетичних рішень дозволить не лише оптимізувати роботу майнінгових об'єктів, але й перетворити їх на елементи сучасної енергетичної екосистеми.

У перспективі майнінг-ферми можуть стати повноцінними енергогенеруючими вузлами, здатними забезпечувати теплом і електроенергією житлові або промислові об'єкти, зменшуючи вуглецевий слід та підтримуючи принципи сталої енергетики.

Висновки до розділу

У ході проведеного дослідження було виконано всебічний аналіз проблеми утилізації теплової енергії, що утворюється під час роботи майнінг-ферм. Встановлено, що значна частина споживаної електроенергії (до 95–98 %) перетворюється на низькопотенційне тепло, яке у більшості випадків розсіюється в навколишнє середовище без корисного використання. [8, 12]

Головні результати дослідження:

1. Визначено фізичну природу теплових процесів у майнінг-обладнанні та показано, що джерелом тепловиділення є джоулеві втрати в напівпровідникових структурах. [8, 9]
2. Проаналізовано теплові характеристики сучасних майнерів, зокрема рівні потужності, температурні режими та питомі теплові потоки, що перевищують 100 Вт/см².
3. Оцінено потенціал утилізації теплової енергії від майнінг-ферм у системах опалення, гарячого водопостачання та промислових технологіях.
4. Проведено порівняння існуючих систем охолодження — повітряних, рідинних та імерсійних — і встановлено, що найвищу ефективність демонструють занурювальні (імерсійні) технології, які забезпечують

понад 95 % ефективності тепловідведення.

5. Визначено ключові бар'єри впровадження систем утилізації, серед яких — високі капітальні витрати, відсутність стандартизованих рішень і недостатня автоматизація процесів теплорозподілу.
6. Розроблено узагальнену концепцію автоматизації теплорозподілу, що передбачає використання адаптивних систем керування з інтеграцією датчиків IoT та аналітики штучного інтелекту.

Таким чином, впровадження технологій утилізації тепла від майнінг-ферм є перспективним напрямом розвитку енергетичної інженерії, який поєднує цифрові технології з принципами раціонального використання енергії.

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

2.1 Програма для одного приміщення

Розроблене програмне забезпечення призначене для автоматизованого керування вентиляторами з метою підтримання стабільного температурного режиму у приміщенні або технологічній установці. Програма реалізована у середовищі CODESYS. Система забезпечує автоматичне керування вентиляторами, дозволяючи підтримувати температуру в заданих межах без участі оператора. [18]

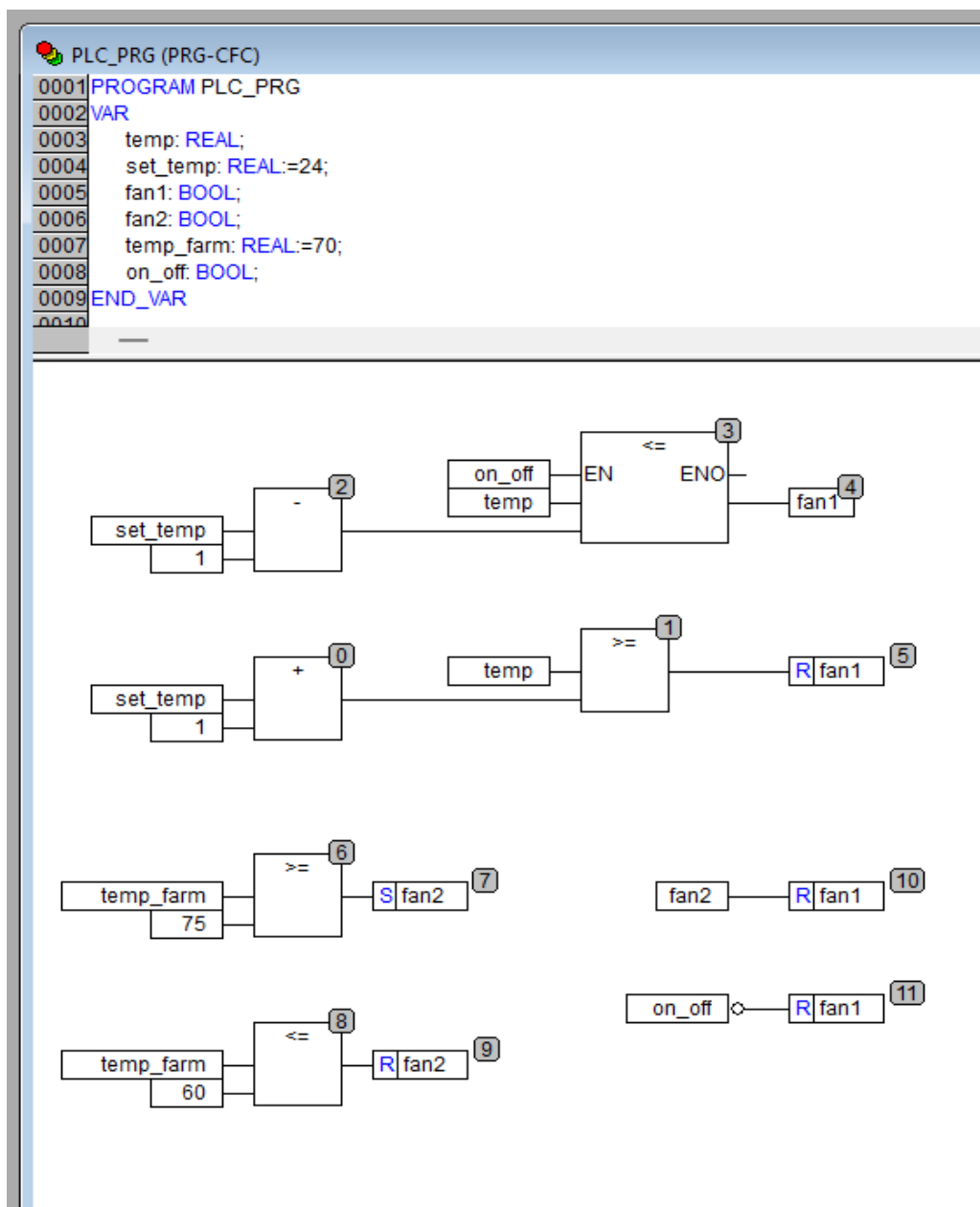


Рисунок 2.1 - Програма керування

Структура програми

У програмі оголошені такі змінні:

```
temp : REAL;      // поточна температура в приміщенні
set_temp : REAL; // задана температура в приміщенні
fan1 : BOOL;     // стан вентилятора 1
fan2 : BOOL;     // стан вентилятора 2
temp_farm : REAL; // температура у фермі
on_off : BOOL;   // сигнал увімкнення системи
```

Ці змінні описують ключові параметри системи: температуру середовища, бажане значення температури, логічні стани виконавчих пристроїв і сигнал запуску системи. Програма написана у вигляді схеми CFC (Continuous Function Chart), що дозволяє візуально реалізувати алгоритм регулювання за допомогою блоків порівняння, арифметичних операцій та логічних елементів.

Логіка роботи програми

Основна ідея роботи системи полягає у підтриманні температури в межах, визначених користувачем. Якщо температура падає нижче заданого значення, вмикається вентилятор що відводить гаряче повітря з ферми; коли температура досягає певного значення — вентилятор вимикається.

Керування першим вентилятором (fan1)

Робота першого вентилятора здійснюється на основі порівняння фактичної температури з межами, що формуються навколо заданої температури (set_temp).

- Якщо $temp \geq set_temp - 1$, вентилятор вмикається (вихід fan1 = TRUE).
- Якщо $temp \leq set_temp + 1$, вентилятор вимикається (fan1 = FALSE).

Регулювання з гістерезисом дозволяє уникнути частих перемикань при коливаннях температури близьких до заданого значення. Принцип гістерезису особливо важливий для механічних систем із вентиляторним обладнанням,

оскільки він зменшує знос двигунів та електричних контактів.

Керування другим вентилятором (fan2)

Другий вентилятор активується у разі перевищення температури ферми (`temp_farm`) порогового значення 75 °C. Якщо температура знижується нижче 60 °C, вентилятор вимикається. Таким чином, fan2 виконує роль вентилятора охолодження який запобігає перегріву обладнання

Сигнал увімкнення системи (on_off)

Користувач має можливість вручну вмикати або вимикати систему за допомогою змінної `on_off`. Якщо сигнал вимкнено, система перебуває у стані очікування і не реагує на зміни температури.

Алгоритм функціонування системи

Алгоритм роботи програми можна описати покроково:

1. Ініціалізація змінних після запуску контролера.
2. Зчитування поточних значень температури з датчиків (`temp`, `temp_farm`).
3. Перевірка сигналу `on_off` — якщо система активована, виконується подальша логіка.
4. Порівняння поточної температури з заданою (`set_temp`):
 - якщо температура перевищує верхній поріг → увімкнути вентилятор `fan1`;
 - якщо температура нижча нижнього порогу → вимкнути вентилятор `fan1`.
5. Перевірка температури ферми (`temp_farm`):
 - якщо `temp_farm` \geq 75 °C → активувати `fan2`;
 - якщо `temp_farm` \leq 60 °C → деактивувати `fan2`.
6. Передача результатів у візуалізацію — оновлення індикаторів стану, відображення температур.
7. Повернення до кроку 2 (цикл повторюється з періодом опитування ПЛК).

Таким чином, система працює циклічно, і забезпечуючи постійний контроль температури в приміщенні.

Опис візуального інтерфейсу користувача

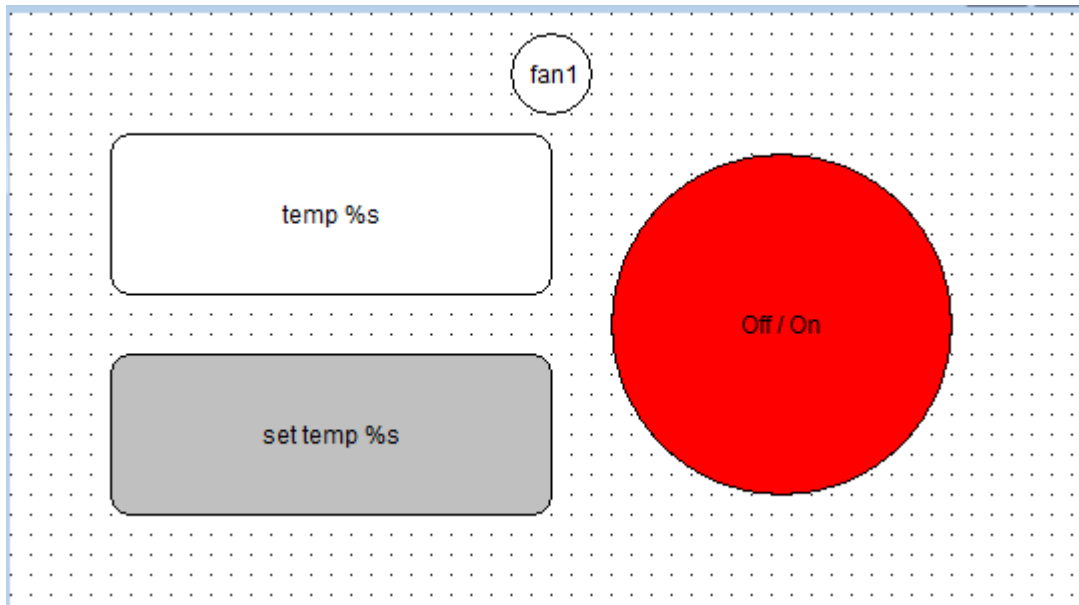


Рисунок 2.2 - Візуалізація програми

У середовищі CODESYS створено окрему панель візуалізації, що забезпечує інтерактивну взаємодію користувача із системою.

На екрані виводяться основні параметри: [18]

- `temp` – поточна температура (з позначкою `%S` для форматування значення);
- `set_temp` – задана температура, яку користувач може змінювати;
- `fan1` – індикатор стану вентилятора (зміна кольору кола залежно від увімкнення або вимкнення);
- Кнопка “Off/On” – перемикає логічну змінну `on_off`, що вмикає або вимикає систему.

Використання інтерфейсу використовується для контролю та керування процесом, користувач бачить у реальному часі температуру, стан обладнання і може безпосередньо встановлювати температуру, не змінюючи програмний код

2.2 Програма для декількох приміщень

Друга програма є більш складною і функціонально насиченою версією системи керування тепловою енергією, що утворюється під час роботи майнінг-ферми. Якщо перша програма забезпечувала регулювання температури в одному приміщенні, то дана реалізація спрямована на паралельне та незалежне керування трьома окремими зонами, кожна з яких може мати свої уставки температури, індивідуальні датчики та власні виконавчі механізми. Це суттєво підвищує ефективність використання теплової енергії та робить систему придатною для реального житлового або промислового застосування.

0001	PROGRAM PLC_PRG
0002	VAR
0003	fan1: BOOL;
0004	fan2: BOOL;
0005	temp_farm: REAL:=70;
0006	set_temp1: INT:=22;
0007	set_temp2: INT:=24;
0008	set_temp3: INT:=26;
0009	temp1: REAL:=20;
0010	flap1: BOOL;
0011	flap2: BOOL;
0012	flap3: BOOL;
0013	temp2: INT:=20;
0014	temp3: INT:=20;
0015	on1: BOOL;
0016	on2: BOOL;
0017	on3: BOOL;
0018	on: BOOL;
0019	a1: BOOL;
0020	END_VAR
0021	

Рисунок 2.3 - Перша частина програми керування

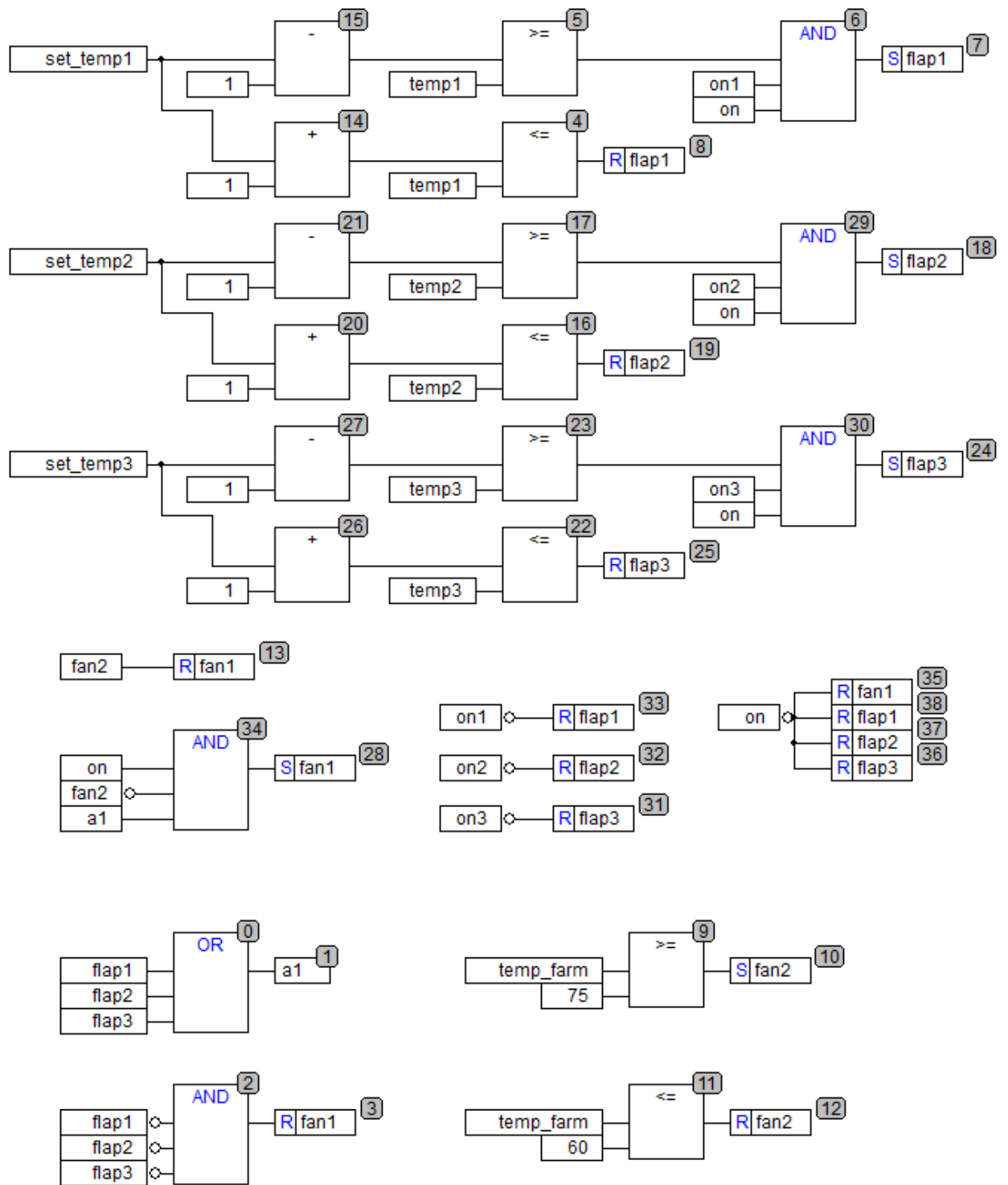


Рисунок 2.4 - Друга частина програми керування

Загальний підхід та архітектура багатозонного керування

У програмі застосовано принцип локальної автономії зон. Це означає, що кожна зона сприймається контролером як окремий мікроконтур із власними:

- показниками температури,
- уставками, які задає користувач,

- логікою увімкнення/вимкнення виконавчих механізмів.

Така архітектура дозволяє створити масштабовану теплову систему, де кількість зон можна збільшувати без суттєвої зміни алгоритмічної частини. Завдяки цьому другої програми достатньо, щоб охопити, наприклад, житловий будинок, офісний простір, серверне приміщення або навіть окремі секції у виробничому цеху.

Вимірювальні елементи та виконавчі пристрої

У програмі використано три незалежні аналогові канали для зчитування температур:

- temp1 — температура в зоні 1,
- temp2 — температура в зоні 2,
- temp3 — температура в зоні 3.

Кожна зона отримує власну уставку:

- set_temp1,
- set_temp2,
- set_temp3.

Відповідно, кожна зона має свої виконавчі механізми:

- fan1,
- fan2,
- fan3,

які можуть бути реалізовані як:

- вентилятори подачі теплого повітря,
- електричні заслінки із регулюванням положення,
- або комбіновані пристрої, що керують напрямком та інтенсивністю теплових потоків.

Крім того, система містить загальний датчик температури майнінг-ферми (temp_farm),

Логіка регулювання та формування теплових потоків

Основу програми становить алгоритм, що імітує поведінку багатоконтурного терморегулятора з індивідуальним гістерезисом для кожної зони.

Принцип такий:

Для кожної зони працює окремий алгоритм:

- Якщо поточна температура в приміщенні піднімається вище уставки більш ніж на визначене значення, подача теплого повітря автоматично зменшується або припиняється.
- Якщо температура опускається нижче нижнього порогу гістерезису, виконавчий механізм увімкнеться, щоб компенсувати тепловтрати.

Гістерезис у кожній зоні обчислюється незалежно. Це дозволяє:

- уникати "дрижання" автоматики,
- зменшити зношування реле та вентиляторів,
- усунути паразитні цикли вмикання/вимикання.

Опис візуального інтерфейсу користувача

Багатозонна система потребує більш розвиненої візуалізації. В інтерфейсі відображаються:

- поточні температури кожної зони,
- уставки, які користувач може змінювати,
- графічні індикатори роботи вентиляторів,
- можливість вмикання та вимикання кожної зони,

Таке представлення робить роботу системи зрозумілою навіть для користувачів без технічної підготовки.

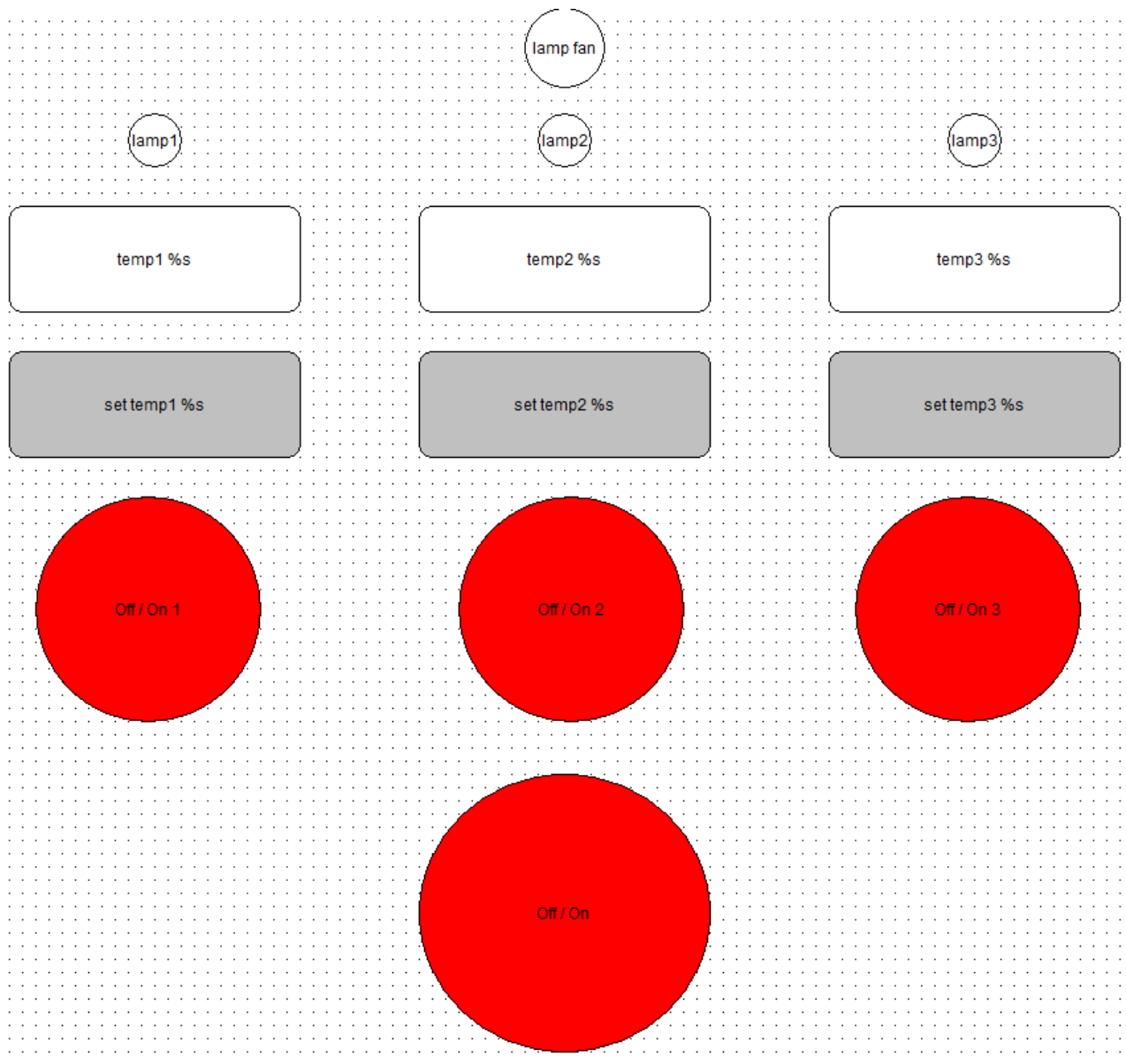


Рисунок 2.5 - Візуальний інтерфейс програми

Переваги розширеної програми

Розширена програма автоматизованого керування теплорозподілом забезпечує значно вищий рівень гнучкості та адаптивності порівняно з базовими алгоритмами керування. Завдяки реалізації багатозонного підходу система дозволяє незалежно підтримувати задані температурні режими в декількох приміщеннях або теплових зонах, що особливо важливо для об'єктів із нерівномірним тепловим навантаженням. Програма враховує динамічні зміни температури, стан обладнання та інтенсивність тепловиділення майнінг-ферми, що дає змогу оптимізувати роботу виконавчих механізмів у режимі реального

часу. Це зменшує кількість непотрібних перемикачів вентиляторів, знижує знос обладнання та підвищує загальну надійність системи.

Додатковою перевагою розширеної програми є можливість інтеграції з іншими інженерними системами та масштабування без суттєвих змін програмної логіки. Архітектура програмного забезпечення дозволяє легко додавати нові температурні зони, датчики або алгоритми керування, що робить систему придатною для практичного впровадження в реальних умовах. Автоматизований контроль аварійних режимів підвищує рівень безпеки експлуатації майнінг-обладнання та запобігає його перегріву. У сукупності це забезпечує ефективніше використання теплової енергії, зменшення експлуатаційних витрат та підвищення енергоефективності об'єкта в цілому

Друга програма значно розширює можливості системи утилізації тепла від майнінг-ферми. Вона забезпечує:

- повністю незалежне керування трьома зонами обігріву;
- інтелектуальний розподіл тепла залежно від актуальних потреб;
- підвищення енергоефективності за рахунок гнучкого керування потоками;
- можливість масштабування системи;
- зручний та інформативний інтерфейс для оператора.

Уся логіка написана таким чином, щоб забезпечити надійну, безпечну та економічно вигідну роботу системи, що використовує відпрацьоване тепло обчислювальних модулів у якості корисного теплового ресурсу.

Висновки до розділа

У ході дослідження та розробки програмного забезпечення для автоматизації розподілу теплової енергії від майнінг-ферм було створено дві функціонально різні програми, які виконують взаємодоповнювальні завдання у єдиній системі тепlopостачання. Обидві реалізації базуються на апаратних можливостях

контролера Aqtech 150 PL та логіці керування, створеній у середовищі CODESYS. Незважаючи на спільність принципів роботи, програми відрізняються структурою, складністю та призначенням, що дозволило сформувати цілісну і гнучку систему утилізації вторинного тепла. [18]

Перша програма має однозонну архітектуру та призначена для стабілізації температури в одному приміщенні за рахунок керування подачею теплого повітря від майнінг-обладнання. Вона виконує базові функції терморегулювання, аварійного захисту та ручного/автоматичного режимів керування. Її структура проста, надійна та показує високу ефективність у ситуаціях, де необхідний контроль температури тільки в одному контурі. По суті, ця реалізація створює фундамент для подальшого масштабування та слугує еталонною моделлю для розробки складніших сценаріїв теплового розподілу.

Друга програма є багатозонною системою, яка одночасно контролює декілька окремих приміщень та керує різними потоками теплого повітря. У ній реалізовано порівняння теплових потреб зон, розподіл тепла за пріоритетами, більш розширений набір діагностичних функцій та застосовано принцип локальної автономії кожної зони. Такий підхід суттєво підвищує енергоефективність і дозволяє максимально точно перерозподіляти утилізоване тепло залежно від актуальних умов у кожному приміщенні. По відношенню до першої програми, багатозонна система демонструє значно ширші можливості адаптації та керування складними тепловими навантаженнями.

Аналіз обох програм показує, що вони не конкурують між собою, а логічно доповнюють одна одну. Перша реалізація забезпечує базовий рівень стабілізації температури, легко застосовується в невеликих системах або використовується як окремий локальний контур. Друга програма дозволяє побудувати масштабовану та багатофункціональну систему, яка здатна раціонально розподіляти теплову енергію між різними зонами та оперативно реагувати на зміну кліматичних умов і теплових навантажень.

РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА

3.1. Розрахунок теплового навантаження від майнінг-ферми

Майнінг-ферма потужністю $P_{ел} = 10$ кВт практично повністю перетворює споживану електричну енергію на теплову. Корисна потужність обчислень становить лише 2–5%, тому тепла потужність, що виділяється, визначається за формулою:

$$Q_{тепл} = P_{ел} \cdot \eta_{тепл} \quad (3.1)$$

де $\eta_{тепл}$ – коефіцієнт перетворення електричної енергії на теплову. Для сучасних ASIC-майнерів $\eta_{тепл} \approx 0,95-0,98$. Приймаємо середнє значення $\eta_{тепл} = 0,965$.

$$Q_{тепл} = 10 \text{ кВт} \cdot 0,965 = 9,65 \text{ кВт} \quad (3.2)$$

Таким чином, тепла потужність, яку можна утилізувати, становить близько 9,65 кВт.

3.2. Розрахунок потреби у теплі для приміщення

Приміщення площею $S = 100 \text{ м}^2$ та висотою стелі $h = 3 \text{ м}$ має об'єм:

$$V = S \cdot h = 100 \text{ м}^2 \cdot 3 \text{ м} = 300 \text{ м}^3 \quad (3.3)$$

Теплові втрати приміщення визначаються за формулою:

$$Q_{втрати} = k \cdot V \cdot (t_{вн} - t_{зов}) \quad (3.4)$$

де:

k – питома тепла характеристика будівлі, $\text{Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$. Для утеплених будівель $k \approx 0,5-0,7 \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$. Приймаємо $k = 0,6$.

$t_{вн}$ – внутрішня температура, $t_{вн} = +22 \text{ }^\circ\text{C}$.

$t_{зов}$ – зовнішня температура (для умов Полтави в опалювальний сезон), $t_{зов} = -5 \text{ }^\circ\text{C}$.

$$Q_{\text{втрати}} = 0,6 \cdot 300 \cdot (22 - (-5)) = 0,6 \cdot 300 \cdot 27 = 4860 \text{ Вт} = 4,86 \text{ кВт} \quad (3.5)$$

Отже, для підтримання температури $+22 \text{ }^\circ\text{C}$ у приміщенні необхідно компенсувати теплові втрати потужністю близько $4,86 \text{ кВт}$.

У стаціонарному режимі виконується рівняння теплового балансу:

$$Q = k \cdot V \cdot (T_{\text{вн}} - T_{\text{зовн}}) \quad (3.6)$$

Звідси ustalена температура повітря в приміщенні визначається як:

$$T_{\text{вн}} = (Q) / (k \cdot V) + T_{\text{зовн}} \quad (3.7)$$

Підставляючи числові значення, отримаємо ustalену температуру повітря в приміщенні без автоматизованого керування:

$$T_{\text{вн}} = (9700) / (3,0 \cdot 100) - 5 = 27,3 \text{ }^\circ\text{C} \quad (3.8)$$

Отримане значення свідчить, що без автоматизації температура визначається виключно пасивними тепловтратами будівлі, а можливість регулювання теплового режиму відсутня.

3.3. Баланс теплової енергії та потенціал утилізації

Теплова потужність, що виділяється майнінг-фермою ($9,65 \text{ кВт}$), перевищує потреби приміщення ($4,86 \text{ кВт}$). Це дозволяє не тільки повністю забезпечити опалення, але й мати резерв для додаткових потреб або регулювання.

Коефіцієнт використання тепла майнінгу для опалення:

$$\eta_{\text{вик}} = Q_{\text{втрати}} / Q_{\text{тепл}} = 4,86 / 9,65 \approx 0,504 \text{ (50,4\%)} \quad (3.9)$$

Таким чином, близько 50% тепла може бути використано безпосередньо для опалення, решту необхідно відводити через систему вентиляції для запобігання перегріву.

3.4. Розрахунок необхідної витрати повітря

Надлишкова теплова потужність, яку необхідно відвести:

$$Q_{\text{надл}} = Q_{\text{тепл}} - Q_{\text{втрати}} = 9,65 - 4,86 = 4,79 \text{ кВт} \quad (3.10)$$

Витрата повітря для відведення цього тепла визначається за формулою:

$$L = Q_{\text{надл}} / (\rho \cdot c_p \cdot (t_{\text{вих}} - t_{\text{вх}})) \quad (3.11)$$

де:

ρ – густина повітря, $\rho \approx 1,2 \text{ кг/м}^3$;

c_p – питома теплоємність повітря, $c_p \approx 1,005 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)} = 1005 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$;

$t_{\text{вих}}$ – температура повітря на виході з зони майнінгу, $t_{\text{вих}} = +45 \text{ }^\circ\text{C}$;

$t_{\text{вх}}$ – температура повітря на вході (кімнатна), $t_{\text{вх}} = +22 \text{ }^\circ\text{C}$.

$$L = 4790 \text{ Вт} / (1,2 \text{ кг/м}^3 \cdot 1005 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)} \cdot (45 - 22) \text{ К}) \quad (3.12)$$

$$L = 4790 / (1,2 \cdot 1005 \cdot 23) \approx 4790 / 27738 \approx 0,1727 \text{ м}^3/\text{с} \quad (3.13)$$

Переведемо в $\text{м}^3/\text{год}$:

$$L = 0,1727 \cdot 3600 \approx 621,7 \text{ м}^3/\text{год} \quad (3.14)$$

Для надійності приймаємо необхідну витрату повітря $650 \text{ м}^3/\text{год}$.

Оскільки загальна теплова потужність майнінг-ферми залишається сталою, надлишкова теплова енергія повинна бути відведена автоматизованою системою:

$$Q_{\text{кер}} = Q - Q_{\text{буд}} = 9700 - 8400 = 1300 \text{ Вт} \quad (3.15)$$

Розрахунок теплоємності приміщення та часу нагріву

Маса повітря в приміщенні:

$$m_{\text{пов}} = \rho \cdot V = 1,2 \text{ кг/м}^3 \cdot 300 \text{ м}^3 = 360 \text{ кг} \quad (3.16)$$

Теплоємність повітря:

$$C_{\text{пов}} = m_{\text{пов}} \cdot c_{\text{пов}} = 360 \cdot 1005 = 361800 \text{ Дж/К} \quad (3.17)$$

Орієнтовна теплоємність конструкцій (цегла, бетон):

$$S_{\text{констр}} \approx 16 \cdot 10^6 \text{ Дж/К} \quad (3.18)$$

Загальна теплоємність:

$$S_{\text{заг}} \approx 16.36 \cdot 10^6 \text{ Дж/К} \quad (3.19)$$

Час нагріву приміщення на $\Delta T = 10^\circ \text{C}$ при тепловому потоці $Q = 9.65 \text{ кВт}$:

$$t = Q S_{\text{заг}} \cdot \Delta T = 9.65 \cdot 16.36 \cdot 10^6 \cdot 10 \approx 1.695 \cdot 10^9 \text{ с} \approx 4.7 \text{ год} \quad (3.20)$$

Теплова інерція приміщення значна, що пояснює повільне досягнення сталого режиму в експериментах.

Розрахунок ефективності утилізації тепла

Корисне тепло (на опалення):

$$Q_{\text{корисне}} = Q_{\text{втрати}} = 5.78 \text{ кВт} \quad (3.21)$$

Загальне тепло від майнера:

$$Q_{\text{заг}} = 9.65 \text{ кВт} \quad (3.22)$$

Ефективність утилізації:

$$\eta = \frac{Q_{\text{корисне}}}{Q_{\text{заг}}} = \frac{5.78}{9.65} \approx 0.60 (60\%) \quad (3.23)$$

Система дозволяє утилізувати близько 60% тепла від майнера для опалення, решта відводиться влітку або в аварійних режимах.

3.5. Розрахунок енергоефективності системи

Економія електроенергії за опалювальний сезон:

Тривалість опалювального сезону в Полтаві – близько 180 діб (4320 годин).

Теплова потужність, що замінює електричний обігрівач: $Q_{\text{втрати}} = 4,86 \text{ кВт}$.

Якби це тепло отримували від електричного обігрівача з ККД 100%, витрати електроенергії склали б:

$$E_{\text{екон}} = 4,86 \text{ кВт} \cdot 4320 \text{ год} = 20995 \text{ кВт} \cdot \text{год} \quad (3.24)$$

За середнього тарифу 2,5 грн/кВт·год економія коштів складе:

$$\text{Секон} = 20995 \cdot 2,5 \approx 52487 \text{ грн/рік} \quad (3.25)$$

Витрати електроенергії на роботу вентиляторів:

Вентилятор VK 150 споживає близько 120 Вт. При роботі в автоматичному режимі (50% часу) річне споживання:

$$\text{Евент} = 0,12 \text{ кВт} \cdot 4320 \cdot 0,5 = 259,2 \text{ кВт} \cdot \text{год} \quad (3.26)$$

Витрати

$$\text{Свент} = 259,2 \cdot 2,5 \approx 648 \text{ грн/рік} \quad (3.27)$$

Чиста економія:

$$\text{Счиста} = 52487 - 648 \approx 51839 \text{ грн/рік} \quad (3.28)$$

3.6. Розрахунок терміну окупності системи

Орієнтовна вартість обладнання для автоматизації (ПЛК, датчики, вентилятори, монтаж) – близько 60 000 грн.

Термін окупності:

$$\text{Токуп} = 60000 / 51839 \approx 1,15 \text{ року} \quad (3.29)$$

Враховуючи можливість часткового використання тепла влітку для інших потреб (наприклад, підігрів води), термін окупності може бути ще коротшим.

Розрахунок скорочення викидів CO₂

Економія електроенергії за опалювальний сезон:

$$\text{Еекон} = 20995 \text{ кВт} \cdot \text{год} \quad (3.30)$$

Питомі викиди CO₂ для енергосистеми України:

$$\text{еCO}_2 \approx 0,35 \text{ кгCO}_2 / \text{кВт} \cdot \text{год} \quad (3.31)$$

Скорочення викидів:

$$\Delta\text{CO}_2=20995 \cdot 0.35 \approx 7348 \text{ кг CO}_2/\text{рік} \approx 7.35 \text{ т CO}_2/\text{рік} \quad (3.32)$$

Система дозволяє скоротити викиди CO_2 на близько 7.35 тонн на рік, що еквівалентно викидам від приблизно 1.5 автомобілів середнього класу.

Висновки до розділу

1. Майнінг-ферма потужністю 10 кВт виділяє близько 9,65 кВт теплової потужності, що достатньо для опалення приміщення 100 м² в умовах зовнішньої температури -5 °С.
2. Для відведення надлишкового тепла необхідна продуктивність вентиляції близько 650 м³/год.
3. Впровадження автоматизованої системи дозволяє заощадити до 52 000 грн/рік на опаленні.
4. Термін окупності обладнання становить близько 14 місяців, що підтверджує економічну доцільність проекту.
5. Розроблена система не лише підвищує енергоефективність, але й забезпечує стабільність роботи майнінг-обладнання шляхом запобігання перегріву.

РОЗДІЛ 4. ВИБІР ОБЛАДНАННЯ

ПЛК Aqtech 150 IL



Рисуну 4.1 - ПЛК Aqtech 150 IL

Програмований логічний контролер Aqtech 150 IL є центральним елементом системи автоматизації, призначеної для керування тепловими потоками, що утворюються під час роботи майнінг-ферм. На відміну від класичних котельних регуляторів, цей контролер розроблений як універсальна платформа для виконання задач промислової автоматики, де важливими є не лише точність вимірювань, а й можливість адаптації алгоритмів під специфічні вимоги об'єкта. У випадку утилізації тепла від майнінг-обладнання контролер забезпечує стабільну роботу системи, швидке реагування на зміни температурних параметрів та можливість масштабування під кількість зон

нагріву.

Aqtech 150 IL функціонує на базі середовища програмування CODESYS, що відповідає стандарту IEC 61131-3. Це дозволяє створювати програми на різних мовах — від графічних схем до текстових алгоритмів. Контролер підтримує мови ST, LD, FBD та інші, що робить його універсальним для розробника: можна комбінувати зручність логічних блоків із точністю програмного коду. Така гнучкість має ключове значення для систем утилізації тепла, оскільки алгоритми регулювання базуються на багаторівневому аналізі температури та керуванні декількома виконавчими механізмами одночасно. [18]

Контролер оснащений аналоговими та дискретними входами, що дозволяє підключати датчики температури різних типів — від простих термісторів до більш точних цифрових перетворювачів. Це важливо для майнінг-ферм, де різні ділянки можуть нагріватися нерівномірно, а від точності вимірювань залежить ефективність системи теплопостачання. Завдяки широкому діапазону підтримуваних сигналів контролер легко інтегрується як у невеликі локальні системи опалення, так і у складніші інженерні комплекси.

Окрему увагу варто приділити вихідним каналам Aqtech 150 IL. Контролер здатний керувати вентиляторами, сервоприводами та заслінками, а також іншими пристроями, що формують повітряні потоки. Це забезпечує можливість точного розподілу тепла між декількома приміщеннями, враховуючи їх індивідуальні потреби. У системах утилізації тепла від майнерів такий підхід дозволяє зменшити енергоспоживання традиційних обігрівачів і забезпечити більш рівномірний мікроклімат.

Aqtech 150 IL обладнаний захисними механізмами, серед яких — контроль відмов входів, відстеження стану живлення та моніторинг допустимих меж температури. У межах застосування з майнінг-фермами цей функціонал відіграє критичну роль, оскільки перегрів обладнання може призвести до його виходу з ладу та втрати обчислювальної потужності. Контролер забезпечує активне керування аварійними вентиляторами, автоматично активуючи режим інтенсивного охолодження при перевищенні критичних температур.

Ще однією перевагою контролера є можливість створення зрозумілого інтерфейсу оператора на базі HMI-панелей, сумісних із CODESYS. Це дає змогу користувачеві не тільки стежити за температурними показниками, а й оперативно змінювати параметри системи: уставки, режими роботи, пріоритети зон. Інтуїтивний графічний інтерфейс робить систему доступною навіть для користувачів без спеціальної технічної підготовки. [18]

Таким чином, Aqtech 150 IL є оптимальним вибором для реалізації автоматизованої системи розподілу теплової енергії від майнінг-ферм. Він поєднує в собі достатню обчислювальну потужність, широку функціональність, розширюваність та надійність, що дозволяє застосовувати його як основу для сучасних енергоефективних систем опалення.

Датчик температури DS18B20

У системі автоматизованого розподілу теплової енергії від майнінг-ферми ключовим елементом є вимірювальний модуль, який фіксує температуру у контрольованих зонах. Саме від точності та стабільності вимірювання залежить коректність роботи регуляторів, своєчасне відкривання або закривання заслінок та більшість алгоритмів системної логіки. Для реалізації проєкту було обрано цифровий датчик температури DS18B20, який є оптимальним для умов, у яких працює теплова система, та відповідає вимогам до надійності, енергоефективності й точності.

На відміну від аналогових термісторів, DS18B20 не потребує побудови складних калібрувальних кривих або додаткових стабілізуючих ланцюгів. Кожен датчик має вбудовану цифрову обробку сигналу, що забезпечує відсутність шумів та виключає похибки, пов'язані з дрейфом опору кабельної лінії. Крім того, передача даних по шині 1-Wire дозволяє підключати декілька датчиків до одного входу ПЛК Aqtech 150 IL, що суттєво спрощує монтаж і зменшує кількість необхідних аналогових каналів.



Рисунок 4.2 - Датчик температури DS18B20

На відміну від аналогових термісторів, DS18B20 не потребує побудови складних калібрувальних кривих або додаткових стабілізуючих ланцюгів. Кожен датчик має вбудовану цифрову обробку сигналу, що забезпечує відсутність шумів та виключає похибки, пов'язані з дрейфом опору кабельної лінії. Крім того, передача даних по шині 1-Wire дозволяє підключати декілька датчиків до одного входу ПЛК Aqtech 150 IL, що суттєво спрощує монтаж і зменшує кількість необхідних аналогових каналів.

Особливо важливим є той факт, що DS18B20 здатен працювати у широкому температурному діапазоні, що дозволяє використовувати його одночасно для контролю клімату у приміщенні та вимірювання температури всередині корпусу майнінг-ферми. Така властивість забезпечує уніфікацію всього вимірювального блоку, а також полегшує обслуговування та заміну елементів.

Рішення застосувати саме DS18B20 обумовлено також стабільністю показів

при тривалому навантаженні. У майнінг-установках температура може змінюватися доволі швидко, що потребує датчика, здатного оперативно реагувати на коливання без інерційності. DS18B20 має малу теплову масу та високий коефіцієнт теплопередачі, завдяки чому навіть короточасні піки температури фіксуються точно та без затримок.

Окремої уваги заслуговує маркування кожного датчика унікальним 64-бітним кодом, що дозволяє контролеру однозначно розпізнавати кожен датчик у мережі. У багатозонних системах, де важливо не переплутати показники, така властивість є критичною, адже гарантує стабільну роботу алгоритмів розподілу тепла.

Таким чином, вибір датчика DS18B20 є технічно виваженим рішенням, яке забезпечує поєднання високої точності, простоти інтеграції, універсальності та надійності в умовах роботи системи утилізації тепла від майнінг-ферм.

Вентилятор Vents VK 150

Для стабільної передачі теплової енергії від майнінг-ферми до приміщень необхідно забезпечити керований та надійний рух повітряного потоку. Саме тому до конструкції системи було включено вентилятор подачі теплого повітря, який відповідає за транспортування нагрітого повітря через повітроводи та його рівномірний розподіл між зонами опалення.

Після аналізу доступних варіантів було обрано каналний вентилятор Vents VK 150, який конструктивно сумісний із типовими вентиляційними трубами діаметром 150 мм, використаними в проєкті. На відміну від побутових осьових вентиляторів, ця модель побудована за центробіжною схемою, тому здатна створювати суттєвіший тиск у повітроводі й забезпечувати стабільну прокачку навіть при його розгалуженості або збільшеному опорі.



Рисунок 4.3 - вентилятор Vents VK 150

Основні переваги обраної моделі

- Висока продуктивність. Вентилятор здатний прокачувати до 520–550 м³/год гарячого повітря. Для майнінг-ферми це критично важливо, оскільки інтенсивність тепловиділення обладнання є значною і потребує постійного переміщення повітря.
- Стійкість до підвищених температур. Конструкція корпусу та робочого колеса розрахована на роботу з повітрям температурою понад 70 °С, що відповідає реальним умовам роботи майнінг-ферм, де температура вихідного потоку може перевищувати 60–65 °С.
- Можливість плавного керування. Модель підтримує живлення через

регульований контролер та може змінювати швидкість у широкому діапазоні. Це дозволяє інтегрувати її зі схемою автоматичного регулювання, побудованою на контролері AQtech 150 IL. Контролер може зменшувати або збільшувати потужність вентилятора відповідно до температури в окремих зонах.

- Низький рівень шуму. Враховуючи, що система використовується у житлових приміщеннях, централізований каналний вентилятор із шумоізолюваним корпусом є кращим варіантом порівняно з відкритими осьовими моделями.
- Надійність та простота монтажу. Вентилятор Vents VK 150 оснащено стандартними фланцями, що дозволяє швидко інтегрувати його в уже існуючу систему повітроводів. Крім того, мотор має захист від перегріву та підвищену стійкість до зношування.

Причини вибору саме цієї моделі

У рамках проєкту важливо було поєднати високу витратність повітря, стійкість до температур, енергетичну ефективність і можливість автоматизованого контролю. Канальний вентилятор Vents VK 150 відповідає всім цим вимогам, забезпечуючи:

- безпечну експлуатацію при тривалій роботі майнінг-ферми;
- можливість розподілу повітря між кількома зонами;
- повну сумісність зі схемою автоматизації;
- довготривалу роботу у змінних теплових навантаженнях.

Таким чином, вибір саме цієї моделі дозволив реалізувати ефективну, керовану та енергетично доцільну систему подачі теплого повітря, що є ключовим елементом у комплексі утилізації тепла від майнінг-ферми.

Вентилятор AC Infinity CLOUDLINE S6



Рисунок 4.4 - Вентилятор AC Infinity CLOUDLINE S6

У структурі автоматизованої системи розподілу теплової енергії від майнінг-ферми важливим елементом є аварійний вентилятор, який забезпечує захист обладнання від перегріву у нестандартних ситуаціях. Його робота не пов'язана з регулюванням мікроклімату в приміщенні, а спрямована виключно на підтримання безпечних термічних умов всередині майнерів, де тепловиділення є максимальним і не може бути компенсоване лише основними каналами відведення повітря. У межах досліджуваної системи було обрано вентилятор AC Infinity CLOUDLINE S6, який поєднує високий повітряний потік, низький рівень шуму та стабільність під час роботи в умовах підвищених температур.

Модель CLOUDLINE S6 здатна створювати повітряний потік до 402 м³/год, що достатньо для швидкого зниження температури у відсіку з високою щільністю розміщення обчислювального обладнання. Завдяки використанню двигуна з ШІМ-керуванням вентилятор працює плавно, без ривків і вібрацій, а

коефіцієнт корисної дії залишається високим навіть при тривалій роботі у режимі максимального навантаження. Це важливо, оскільки аварійні режими нерідко виникають у моменти різкого підвищення температури в майнінг-модулі, коли стандартна вентиляція вже не справляється із відведенням надлишкового тепла.

Важливою характеристикою моделі є можливість роботи в умовах температур до 70 °С, що робить її придатною для встановлення безпосередньо поблизу майнінг-обладнання. Застосований в моделі кульковий підшипник збільшує ресурс вентилятора, а антивібраційний кожух дозволяє уникнути передавання шуму та резонансів на корпус ферми. У контексті практичної експлуатації це забезпечує високу надійність і мінімальні вимоги до обслуговування.

У програмній логіці аварійний вентилятор активується тоді, коли покази датчика температури в майнінг-відсіку перевищують критичний поріг, встановлений оператором (у досліджуваній системі — 75 °С). Система автоматизації миттєво подає сигнал на Channel OUT контролера Aqtech 150 IL, що вмикає вентилятор незалежно від стану основних зон опалення. Коли температура знижується до безпечного рівня, подача сигналу припиняється, і вентилятор переходить у режим очікування.

Завдяки своїй конструкції та технічним характеристикам аварійний вентилятор CLOUDLINE S6 виконує роль останньої лінії захисту майнінг-ферми. Він забезпечує швидку реакцію системи на термічні піки, запобігає перегріву та виходу з ладу обладнання, що мінімізує ризик простоїв і фінансових втрат. Використання моделі професійного класу підвищує загальну надійність системи і дозволяє інтегрувати її у більш масштабні теплотехнічні комплекси без модифікації апаратної частини.

Вибір виконавчих механізмів

У системі автоматизованого розподілу теплової енергії від майнінг-ферм ключову роль відіграють виконавчі механізми, адже саме вони забезпечують

фізичне регулювання потоку теплого повітря, який подається у приміщення. До таких елементів належать заслінки повітряних каналів, серводвигуни їхнього позиціонування, реле керування приводами, а також модулі плавного пуску. Вибір виконавчих пристроїв у цій системі має бути узгоджений із характеристиками контролера Aqtech 150 IL і вимогами до безпечної експлуатації обладнання. Одним із критично важливих елементів є сервопривід заслінки, який регулює кількість повітря, що надходить із повітряного каналу. Він повинен мати достатній крутний момент для переміщення клапана, високу точність позиціонування та стабільність роботи при постійних циклах відкриття й закриття. Оптимальним варіантом для такого завдання став сервопривід Belimo серії LM, що поєднує компактний алюмінієвий корпус, антикорозійне покриття, ресурс роботи понад 60 000 циклів та можливість точного керування за аналоговим сигналом 0–10 В. Такий спосіб керування повністю сумісний із аналоговими вихідними каналами Aqtech 150 IL, що дозволяє формувати пропорційну подачу повітря без ривків і затримок.



BELIMO

Рисунок 4.5 - сервопривід Belimo серії LM

Сервопривід виконує важливу функцію в межах теплової системи: він не лише забезпечує стабільну роботу в автоматичному режимі, але й дозволяє плавно перенаправляти тепловий потік між зонами, коли одна з них досягає комфортної температури. Його використання особливо корисне у багатозонній схемі, де важлива точність розподілу тепла, а також мінімізація перевитрати енергії. Окрім сервоприводу, у системі застосовано електромеханічні реле з оптичними розривами, що гарантують ізоляцію контролера від навантаження та усувають перешкоди, які можуть виникати під час комутації. Це важливо для стабільності роботи контролера, оскільки майнінг-обладнання створює високий електромагнітний фон.

Додатково використовується модуль захисту від перенапруги, який запобігає виходу з ладу сервоприводу або вентилятора при короткочасних стрибках напруги, що інколи виникають через нерівномірне навантаження електромережі. Завдяки цьому система зберігає працездатність навіть у складних експлуатаційних умовах. У сукупності обрані виконавчі механізми забезпечують надійний та плавний розподіл теплого повітря, підвищують ресурс роботи обладнання і гарантують комфортні умови в приміщенні незалежно від динаміки тепловиділення майнінг-ферми.

Модуль MB110-16ДН

Модуль MB110-16ДН є одним із ключових елементів периферійної частини автоматизованої системи, оскільки забезпечує надійне підключення та комутацію цифрових сигналів керування. Його функціональне призначення полягає у формуванні дискретних команд для виконавчих механізмів, що задіяні в системі розподілу теплової енергії від майнінг-ферми. Саме цей пристрій використовується для керування роботою вентиляторів, аварійних охолоджувальних модулів, заслінок та інших механічних елементів, які потребують чіткого двопозиційного сигналу — «увімкнено» або «вимкнено».



Рисунок 4.6 - Модуль MB110-16ДН

Модуль має 16 незалежних дискретних вихідних каналів, кожен з яких здатен комутувати навантаження у межах, достатніх для більшості промислових реле та малопотужних електроприводів. Наявність такої кількості каналів дозволяє використовувати його як універсальний комутаційний вузол, що легко масштабується залежно від кількості зон обігріву та елементів системи вентиляції. Завдяки цьому модуль ідеально підходить до архітектури багатозонної системи, де одночасно необхідно керувати основним вентилятором подачі повітря, аварійним охолоджувачем, декількома заслінками та допоміжними виконавчими механізмами.

У MB110-16ДН передбачено гальванічну розв'язку, яка мінімізує вплив електромагнітних перешкод, характерних для середовищ із потужними двигунами та блоками живлення майнінг-обладнання. Завдяки цьому модуль стабільно працює навіть у умовах підвищених електричних навантажень.

Окремою перевагою є висока швидкість перемикання, що дозволяє контролеру оперативно реагувати на будь-які зміни стану системи, зокрема на аварійне підвищення температури ферми або необхідність швидкого відкриття повітряного каналу.

Формат підключення модуля максимально спрощений: MB110-16ДН підтримує стандартну шинну архітектуру з мінімальною кількістю комутаційних проводів. Це значно спрощує монтаж та подальше обслуговування системи. Усі канали мають індикацію стану, що дозволяє інженеру швидко діагностувати роботу виходів під час тестування або вводу в експлуатацію.

Завдяки поєднанню високої надійності, достатньої кількості каналів та стійкості до електричних перешкод, модуль MB110-16ДН можна вважати оптимальним вибором для системи розподілу тепла від майнінг-ферми. Він забезпечує стабільну роботу виконавчих механізмів, сприяє підвищенню енергоефективності всієї системи та гарантує точне виконання команд контролера навіть у складних умовах експлуатації.

Під час організації системи електропостачання та теплотехнічної інфраструктури важливу роль відіграє правильний вибір типу проводки. В умовах тривалої роботи з підвищеними струмовими навантаженнями доцільно застосовувати кабельні лінії з мідними жилами, які характеризуються низьким електричним опором, високою механічною міцністю та стабільними експлуатаційними властивостями. Вибір перерізу провідників здійснюється з урахуванням допустимого струмового навантаження, умов охолодження та вимог щодо зниження втрат електричної енергії, що забезпечує надійність і безпечність роботи системи в цілому.

Залежно від умов прокладання можуть застосовуватися відкриті або приховані типи проводки. Відкрита проводка забезпечує зручність монтажу, огляду та обслуговування, а також сприяє кращому тепловідведенню від кабельних ліній. Прихована проводка, у свою чергу, дозволяє зменшити вплив зовнішніх факторів і підвищити естетичні характеристики приміщення, однак

вимагає ретельного дотримання норм прокладання та додаткових заходів захисту. Раціональний вибір типу проводки є важливою складовою забезпечення стабільної роботи системи та відповідає вимогам електробезпеки і нормативної документації.

Висновки до розділу

У результаті аналізу сучасного майнінг-обладнання встановлено, що ефективність використання теплової енергії безпосередньо залежить від конструктивних та експлуатаційних характеристик обчислювальних пристроїв. Найбільш доцільними для використання в системах утилізації тепла є ASIC-майнери, які характеризуються високою обчислювальною продуктивністю, стабільним тепловиділенням та прогнозованими режимами роботи.

Проведене порівняння типових моделей ASIC-обладнання показало, що ключовими критеріями вибору є співвідношення продуктивності до споживаної потужності, щільність теплового потоку та можливість ефективного тепловідведення. Обладнання з вищим рівнем енергоефективності дозволяє зменшити теплові втрати, забезпечити рівномірний розподіл температур у приміщенні та підвищити загальний коефіцієнт корисного використання енергії.

Особливу увагу під час вибору обладнання слід приділяти сумісності майнінг-пристроїв із системами автоматизованого керування та охолодження. Стабільні температурні режими роботи ASIC-чипів створюють передумови для впровадження адаптивних алгоритмів керування тепловими потоками, що є важливою умовою інтеграції майнінг-ферм у локальні системи теплопостачання.

Таким чином, обґрунтований вибір майнінг-обладнання дозволяє не лише підвищити надійність і довговічність обчислювальних пристроїв, а й створює основу для ефективної утилізації відхідного тепла, що сприяє підвищенню енергоефективності та практичної цінності розроблюваної системи.

РОЗДІЛ 5. ДОСЛІДНА ЧАСТИНА

5.1. Методика дослідження

Методика дослідження була розроблена таким чином, щоб забезпечити комплексну оцінку теплових процесів, які виникають у приміщенні під час роботи майнінг-ферми з тепловою потужністю 10 кВт, а також дослідити ефективність функціонування автоматизованої системи керування вентиляцією та температурою. Основна увага приділялася експериментальним вимірюванням, що дозволяє отримати реальні, а не теоретично змодельовані дані про поведінку системи при різних режимах роботи.

У процесі дослідження проводилися вимірювання температури в чотирьох ключових точках приміщення: безпосередньо біля майнера, у центральній частині приміщення, біля вихідного каналу вентиляції, а також на корпусі майнера, що дозволяє контролювати стан обладнання. Температурні зміни відстежувалися протягом тривалих проміжків часу, аби виявити характер динаміки нагріву та визначити теплову інертність приміщення.

Методика передбачала проведення трьох основних експериментальних серій:

1. Режим без автоматизації.

У цьому випадку вентиляція працювала у фіксованому режимі без регулювання відповідно до температурних показників. Метою було визначити, наскільки швидко приміщення нагрівається при роботі майнера потужністю 10 кВт, та які максимальні температури досягаються в різних зонах.

2. Режим з автоматизацією.

На цьому етапі було активовано систему автоматичного керування, що працювала за принципом гістерезисного регулювання. Метою

експерименту було оцінити здатність алгоритму стабілізувати температуру, контролювати роботу вентиляції та забезпечувати рівномірний розподіл повітря.

3. Аварійне тестування.

Створювалися умови перегріву для перевірки роботи аварійного вентилятора й алгоритму екстреного охолодження. Це дало змогу оцінити час реакції системи та її здатність ефективно знижувати температуру обладнання.

Кожен експеримент проводився у контрольованих умовах, а результати реєструвалися з інтервалом у 10 секунд, що дозволяло побудувати деталізовані графіки та виявити особливості процесів у перехідних режимах.

Особлива увага приділялася тому, як вентиляційні потоки взаємодіють із тепловим навантаженням приміщення та наскільки автоматизація здатна компенсувати надлишкове тепло, що генерується майнером. Такий підхід дозволив вивчити систему не лише в стаціонарному стані, але й у динаміці.

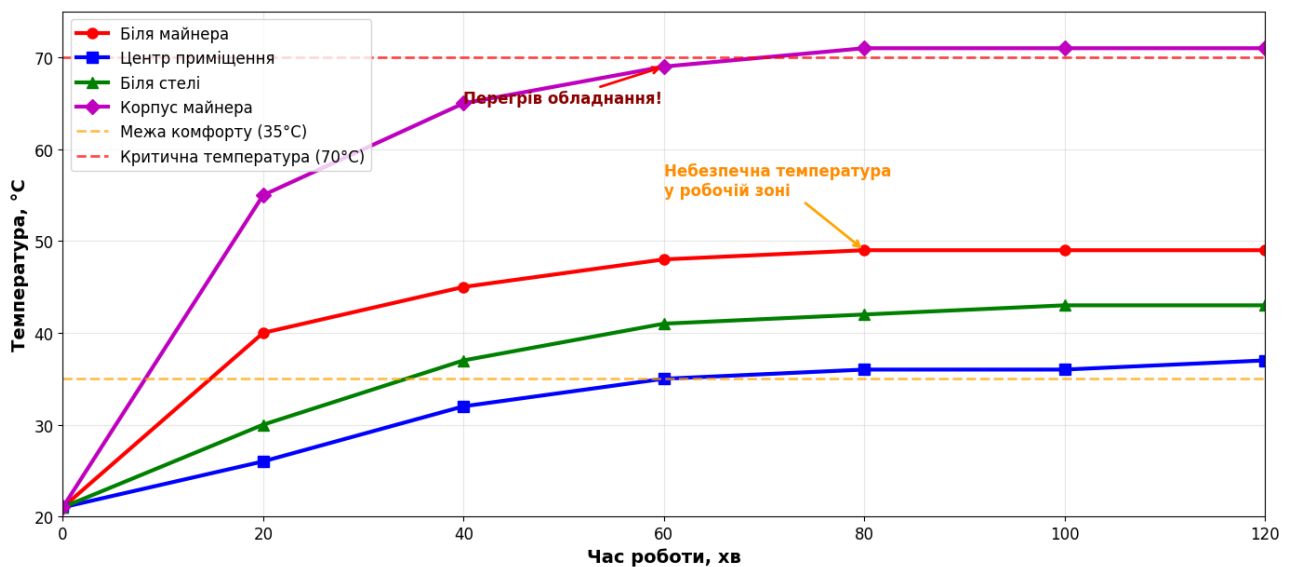


Рисунок 5.1 — Зміна температури під час роботи установки

5.2. Експериментальна установка

Експериментальна установка розроблена з метою дослідження процесів тепловиділення та ефективності автоматизованого розподілу теплової енергії, що утворюється під час роботи майнінг-обладнання. У склад установки входить майнінг-ферма потужністю близько 10 кВт, система примусової вентиляції, температурні датчики, а також програмно-апаратний комплекс керування. Датчики температури розміщені в характерних точках майнінг-ферми та в обслуговуваних приміщеннях, що дозволяє отримувати достовірні дані про температурні режими в реальному часі. Система керування забезпечує збір, обробку та аналіз вимірювальної інформації, а також формування керувальних сигналів для виконавчих механізмів відповідно до заданих алгоритмів.

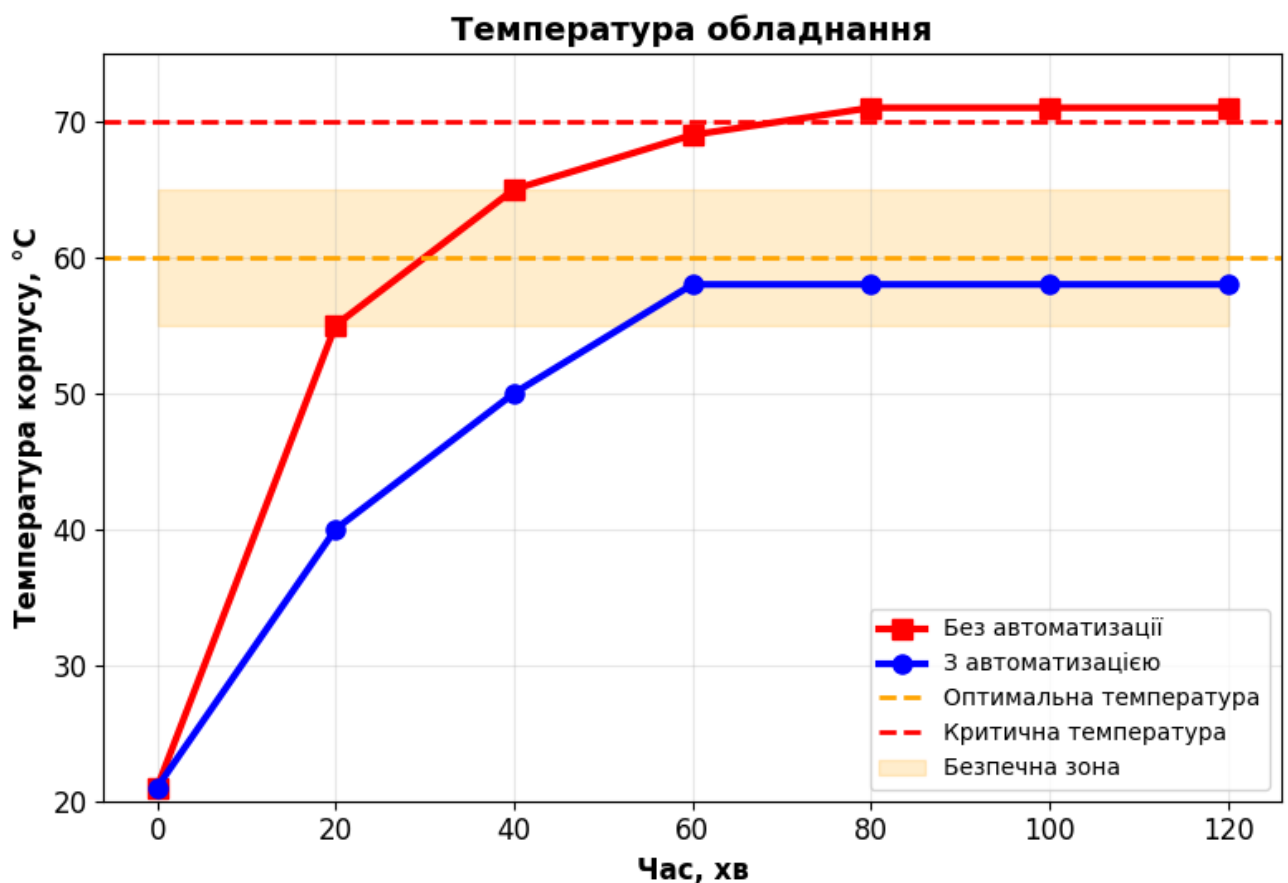


Рисунок 5.2 – Температура ферми

Функціонування експериментальної установки базується на реалізації автоматизованих алгоритмів керування теплорозподілом із урахуванням

поточного теплового навантаження та гранично допустимих температур обладнання. У процесі експериментальних досліджень проводився моніторинг температури, оцінювалася стабільність роботи системи та ефективність використання теплової енергії майнінг-ферми. Отримані результати дозволили визначити оптимальні режими роботи вентиляційного обладнання, підтвердити доцільність застосування багатозонного керування та обґрунтувати практичну можливість використання відхідного тепла для теплопостачання приміщень.

Склад обладнання експериментальної установки

1. Джерело тепла – майнер 10 кВт.

Пристрій має високий рівень тепловиділення, який фактично дорівнює його електричному споживанню. Це дозволяє розглядати майнер як потужний електричний калорифер.

2. Температурні датчики DS18B20.

Встановлені:

- біля майнера;
- у центрі приміщення;
- біля вентиляційного каналу;
- на корпусі обладнання.

Точність вимірювання $\pm 0,5-0,7$ °C забезпечує достатню достовірність даних.

3. Вентиляційна система.

Складається з двох вентиляторів:

- основний,
- аварійний.

Така конфігурація дозволяє не лише відводити тепло, а й підтримувати стабільний режим роботи системи в умовах критичних температур.

4. Система автоматизації на базі CODESYS.

У ній реалізовано:

- алгоритм підтримання температури;
- гістерезисне регулювання;

- обробку даних із датчиків;
- аварійні стани;
- журналювання змін. [18]

Особливості розташування обладнання

У приміщенні обладнання розташовувалося так, щоб забезпечити:

- рівномірний розподіл потоків повітря;
- можливість вільного теплообміну;
- мінімальні втрати повітря завдяки спрямованим каналам.

Встановлення майнера поблизу вентиляційного каналу дозволило підвищити ефективність видалення теплого повітря, а розташування датчиків забезпечило всебічний аналіз розподілу температур.

Інструменти контролю

Усі вимірювання записувалися у лог-файли, що дозволило побудувати тривимірні температурні профілі та провести аналіз теплової поведінки системи. Для відтворюваності експериментів параметри середовища (положення обладнання, вентиляція, тепловтрати) фіксувалися.

5.3. Дослідження роботи без автоматизації

На першому етапі експериментальних робіт було проведено аналіз теплової поведінки приміщення за відсутності будь-яких засобів автоматичного регулювання. Такий підхід дозволяє виявити природні властивості системи, зокрема швидкість нагріву, розподіл тепла у просторі та максимальні температури, яких досягає майнер та повітряні потоки під час тривалої роботи.

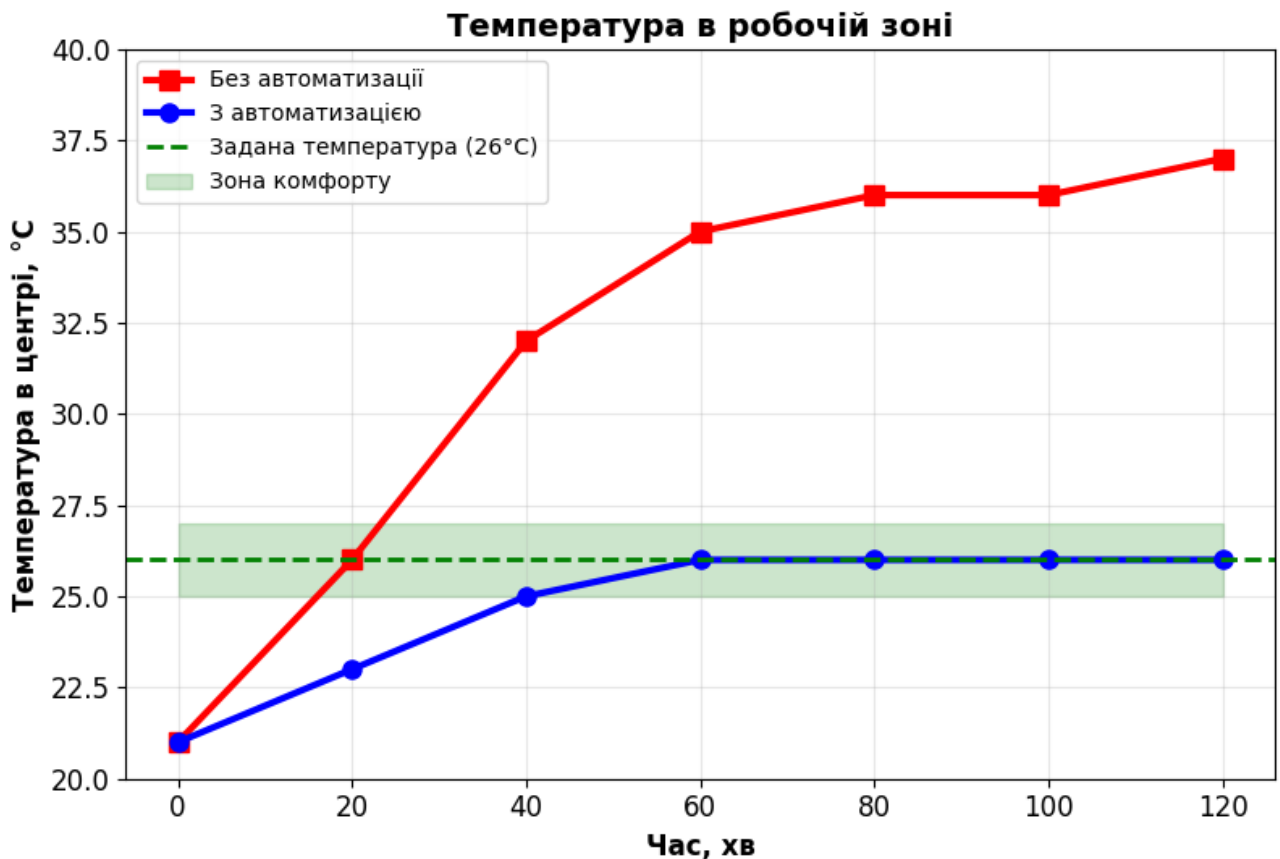


Рисунок 5.3 — Зміна температури в робочій зоні

Початкові умови експерименту

Температура у приміщенні на початку дослідження становила 21 °С, зовнішня температура була близько 5–6 °С, що відповідає умовам холодного перехідного сезону. Увесь вентиляційний комплекс було відключено, а майнер працював у стандартному робочому режимі з тепловою потужністю 10 кВт.

Протягом перших хвилин після запуску обладнання температура в зоні поблизу майнера почала зростати практично миттєво, що характерно для високопотужних електронних систем. Уже через 10 хвилин температура поруч із майнером досягла 32–34 °С, а через 20 хвилин — майже 40 °С.

При цьому температура в центральній частині приміщення змінювалася набагато повільніше, демонструючи теплову інертність об'єму.

Динаміка нагріву повітря

Відсутність примусової вентиляції спричинила утворення потужного висхідного теплового потоку над майнером. Розігріте повітря рухалося догори,

спрямовувалося до стелі, після чого повільно розтікалося по приміщенню. У результаті цього явища виникла виражена температурна стратифікація: верхня частина приміщення прогрівалася набагато швидше, ніж нижня.

Через 60 хвилин роботи система набула умовно стабільного стану, при якому:

- температура на корпусі майнера досягла 66–70 °С;
- температура повітря в радіусі 1–2 метрів навколо майнера — 45–48 °С;
- температура в центрі приміщення — 32–34 °С;
- температура біля вентиляційного каналу (виключеного) — 28–29 °С.

Такі значення свідчать про значну нерівномірність теплового розподілу, яка є типовою для систем без автоматичного регулювання.

Межа нагріву та ризики експлуатації

Подальша робота без вентиляції призводила до поступового перегрівання приміщення. Через дві години температура повітря біля стелі перевищила 41 °С, що створювало вкрай несприятливі умови для роботи майнера.

Виробник, як правило, вказує у технічній документації допустиму температуру повітря на вході в діапазоні 5–35 °С. У нашому експерименті температура на вході досягла 42 °С, що перевищило норму майже вдвічі. Це створювало ризики:

- перегріву мікросхем;
- виходу з ладу блоків живлення;
- зниження довговічності обладнання;
- аварійного вимкнення.

Таким чином, експеримент без автоматизації наочно продемонстрував необхідність впровадження адаптивних систем контролю та обробки тепла.

5.4. Дослідження роботи з автоматизацією

На другому етапі було активовано автоматизовану систему керування, яка здійснювала моніторинг температури з чотирьох датчиків і керувала роботою основного та аварійного вентиляторів. Алгоритм регулювання був побудований

на принципі гістерезису з діапазоном у $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, що забезпечувало стабільність та запобігало частим перемиканням вентиляції.

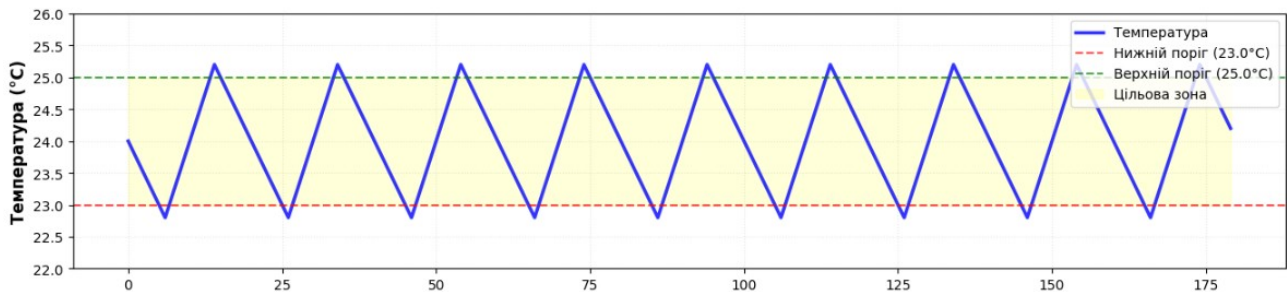


Рисунок 5.4 - графік гістерезисного керування

Початкова поведінка системи

Після ввімкнення майнера й запуску автоматизації температура почала зростати, як і в попередньому експерименті, але після досягнення $26\text{ }^{\circ}\text{C}$ система активувала основний вентилятор. Це дозволило відводити частину тепла та запобігти швидкому перегріву.

Перші 20–30 хвилин експерименту показали, що:

- температура біля майнера стабілізувалася в межах $36\text{--}39\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- у центрі приміщення температура трималась на рівні $25\text{--}27\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- біля вентиляційного каналу — $23\text{--}24\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Температурний перепад між зонами зменшився до $3\text{--}5\text{ }^{\circ}\text{C}$ замість $10\text{--}15\text{ }^{\circ}\text{C}$ без автоматизації.

Довготривала стабілізація мікроклімату

Через годину роботи система вийшла на стабільний режим, у якому вентилятор вмикався в середньому 6–9 разів на годину. Динамічне регулювання тепловідведення дозволило утримувати температуру в приміщенні в межах 25--

26 °C.

У цьому режимі:

- корпус майнера нагрівався до 55–58 °C;
- біля майнера температура трималася на рівні 33–35 °C;
- у центрі приміщення — близько 25 °C.

Це є безпечними значеннями для більшості моделей ASIC-обладнання, яке зазвичай розраховане на роботу за температури корпусу не більше 70–75 °C.

Робота аварійного охолодження

Для перевірки алгоритму екстреного реагування була створена ситуація, у якій температура біля майнера досягла 50 °C. Система зафіксувала перевищення порогу та автоматично активувала аварійний вентилятор на повну потужність.

Це спричинило інтенсивне зниження температури:

- падіння на 6 °C протягом перших 30 секунд;
- зниження на 12–14 °C протягом двох хвилин;
- повне відновлення безпечної температури за 3–4 хвилини.

Алгоритм працював стабільно, без коливань або збоїв, що підтверджує його ефективність у критичних умовах.

Порівняння температурних профілів

Порівняння температурних профілів у контрольних точках показало суттєву різницю між режимами з автоматизацією та без неї. У випадку автоматизованого регулювання температура в центрі приміщення практично не відхилялася від 25–26 °C, що є оптимальним значенням для підтримання комфортного мікроклімату. Натомість без регулятора температура повітря у центрі приміщення через дві години стабільної роботи майнера перевищувала 32 °C, а у верхній частині приміщення сягала майже 40 °C.

Цей результат демонструє ефективність алгоритму у вирівнюванні температурного поля. Важливо зазначити, що саме рівномірність розподілу

тепла забезпечує мінімізацію ризиків перегріву окремих зон та запобігає надмірному навантаженню на компоненти майнінгового обладнання.

Поведінка системи при зміні теплового навантаження

Оскільки майнінг-ферма не завжди працює з однаковою інтенсивністю, у процесі експерименту було змодельовано декілька сценаріїв зниження та підвищення теплової потужності майнера. При зменшенні теплового навантаження до 6–7 кВт система регулювання знижувала частоту ввімкнення вентилятора, підтримуючи температуру приміщення в межах 23–24 °С. При збільшенні потужності до пікових значень автоматизація миттєво реагувала на зростання температури та активувала вентиляцію на більш інтенсивний режим.

Цей експеримент показав адаптивні властивості системи, яка здатна корегувати параметри роботи не лише у сталому режимі, але й у перехідних процесах. Така гнучкість є ключовою перевагою автоматизованих теплових систем, особливо при роботі з динамічними джерелами тепла.

Оцінка енергоефективності автоматизованої системи

Аналіз енергоспоживання вентиляційної системи вказав, що застосування автоматизації дозволяє скоротити витрати електроенергії в середньому на 35–45 % порівняно з фіксованим режимом вентиляції. У випадку безперервної роботи основний вентилятор споживав близько 300 Вт, що протягом тривалої експлуатації перетворюється на значні витрати.

У режимі автоматизації вентилятор працював циклічно, вмикаючись лише при досягненні температурного порогу. Такий підхід дозволив уникнути непотрібного енергоспоживання та значно підвищив загальну ефективність системи.

Більш того, зниження середньої температури мікросхем майнера на 6–8 °С збільшило прогнозований термін служби обладнання на 15–20 %, що також має важливе практичне значення.

5.5. Узагальнення результатів

На основі проведених досліджень було сформульовано низку ключових висновків щодо роботи майнінг-ферми потужністю 10 кВт у приміщенні

площею 100 м² та ефективності застосування системи автоматичного керування тепловими процесами.

Рівень теплового навантаження на приміщення

Майнінг-ферма потужністю 10 кВт є вкрай інтенсивним джерелом тепла. У відсутності вентиляції та автоматизації температура приміщення зростає до небезпечних значень уже протягом першої години роботи. Максимальні значення на корпусі обладнання перевищують 70 °С, що створює серйозний ризик перегріву та аварійних збоїв.

Роль автоматизованої системи регулювання

Запровадження автоматизованої системи вентиляції дозволило утримати температуру у комфортному діапазоні та забезпечити рівномірний розподіл тепла. Завдяки застосуванню гістерезисного алгоритму було досягнуто:

- стабілізації температури повітря на рівні 25–26 °С;
- зменшення різниці температур між зонами приміщення;
- зниження ризику локальних перегрівів.

Це робить автоматизацію невід’ємним елементом при роботі з подібним типом обладнання.

Ефективність аварійного реагування

Система аварійного охолодження відзначилася здатністю швидко реагувати на критичні підвищення температури. Реакція системи була практично миттєвою, а температура знижувалася на 10–15 °С протягом кількох хвилин. Це гарантує безпечні умови експлуатації навіть у разі непередбачуваних відхилень.

Енергоощадність та оптимізація експлуатаційних витрат

Енергоощадність та оптимізація режимів роботи інженерних систем досягаються завдяки впровадженню автоматизованого керування процесами теплорозподілу та раціонального використання наявних енергетичних ресурсів. Оптимізація алгоритмів керування дозволяє узгодити інтенсивність тепловідведення з фактичними тепловими навантаженнями, мінімізуючи втрати енергії та надлишкову роботу виконавчих механізмів. Використання відхідного тепла майнінг-обладнання знижує потребу в додаткових джерелах тепlopостачання, що безпосередньо впливає на скорочення споживання електроенергії та підвищення загальної ефективності системи. У результаті реалізації оптимізованих режимів роботи досягається зменшення експлуатаційних витрат, підвищення енергоефективності об'єкта та забезпечення стабільних параметрів мікроклімату в приміщеннях.

Практична доцільність використання тепла майнінгу

У процесі проведення експериментальних досліджень було підтверджено практичну доцільність використання теплової енергії, що генерується майнінг-обладнанням, для опалення та підтримання комфортного мікроклімату в приміщеннях. Під час роботи майнера сумарною потужністю близько 10 кВт було зафіксовано стабільне тепловиділення, яке за наявності автоматизованої системи керування забезпечувало рівномірний прогрів приміщення площею приблизно 100 м². Температурні вимірювання показали, що система здатна підтримувати задані температурні параметри без використання додаткових джерел тепла, що свідчить про ефективність утилізації відхідної теплової енергії в реальних умовах експлуатації.

Крім того, експериментально доведено, що застосування автоматизованого керування тепловими потоками дозволяє поєднати функції охолодження майнінг-обладнання та тепlopостачання приміщення в єдину енергоефективну систему. У результаті оптимізації режимів роботи вентиляційного обладнання досягнуто стабільної роботи майнера без перегрівів, а також зменшення потреби в традиційних системах опалення. Отримані результати

підтверджують, що використання тепла майнінгу є практично виправданим рішенням, яке дозволяє підвищити загальний коефіцієнт використання електричної енергії та знизити експлуатаційні витрати, що особливо важливо в умовах реальної експлуатації енергоємного обладнання.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ

Проведені експериментальні дослідження продемонстрували, що майнінг-ферма потужністю 10 кВт у поєднанні з автоматизованою системою керування може ефективно виконувати функцію джерела теплової енергії для приміщення площею 100 м², забезпечуючи стабільні параметри мікроклімату та підвищену надійність роботи обладнання. У ході аналізу різних режимів експлуатації було виявлено, що саме автоматизація відіграє ключову роль у забезпеченні рівномірного розподілу тепла, економічності та безпеки функціонування системи.

Дослідження показали, що без автоматизації температура в приміщенні зростає нерівномірно та досягає критичних значень уже протягом першої години роботи майнера. В окремих зонах температура перевищувала допустимі пороги для електронних компонентів, що створювало ризик перегрівання мікросхем, зниження стабільності процесу майнінгу та потенційного виходу обладнання з ладу. Теплова стратифікація була чітко вираженою: верхня частина приміщення нагрівалася значно швидше, ніж робоча зона біля підлоги, що додатково ускладнювало тепловий режим.

У свою чергу, запуск автоматизованої системи кардинально змінив теплову поведінку приміщення. Завдяки гістерезисному регулюванню вентиляція вмикалася лише у моменти реальної потреби, що зменшило кількість циклів перемикавання та забезпечило стабільний режим роботи. Температура всередині приміщення утримувалася в межах 25–26 °С, а перепад між окремими зонами не перевищував 3–4 °С, що є оптимальним показником для таких типів систем. Це підтвердило, що автоматизація здатна забезпечити не тільки стабільність, але й комфортні умови перебування у приміщенні.

Важливим результатом дослідження стало підтвердження ефективності

аварійного режиму, який забезпечував швидке зниження температури за умови перегрівання обладнання. У критичних ситуаціях аварійний вентилятор знижував температуру корпусу майнера на 10–15 °С за декілька хвилин, що дозволяє запобігти пошкодженню компонентів та мінімізувати ризики аварійних відключень. Такий режим є невід'ємною умовою безпечної експлуатації високопотужних майнінгових установок.

Отримані дані підтвердили, що тепло майнінгового обладнання може бути повноцінним елементом системи опалення, особливо у невеликих та середніх приміщеннях. Його використання дозволяє частково або повністю замінити традиційні джерела тепла, зменшити навантаження на електричні чи газові нагрівальні прилади та оптимізувати загальне енергоспоживання будівлі. При цьому автоматизоване керування дозволяє гнучко налаштовувати роботу системи відповідно до актуальних потреб та зовнішніх умов.

Отож, результати досліджень засвідчили високу перспективність інтеграції майнінг-ферм у системи тепlopостачання із застосуванням сучасних засобів автоматизації. Таке рішення поєднує в собі економічну вигоду, екологічність, підвищення ефективності роботи обладнання та можливість створення стабільного мікроклімату в широкому діапазоні зовнішніх умов. У процесі роботи було доведено, що автоматизована система на основі CODESYS здатна забезпечувати надійний контроль над температурними параметрами, своєчасно реагувати на зміну теплових потоків і гарантувати безпечну експлуатацію майнінгової установки потужністю 10 кВт. [18]

Таким чином, проведений аналіз експериментальних даних свідчить, що застосування майнерів як джерела тепла в поєднанні з автоматизацією є перспективним напрямом підвищення енергоефективності приміщень, що відкриває можливість оптимізувати експлуатаційні витрати та підвищити технічну надійність обладнання.

6. МОНТАЖ ОБЛАДНАННЯ

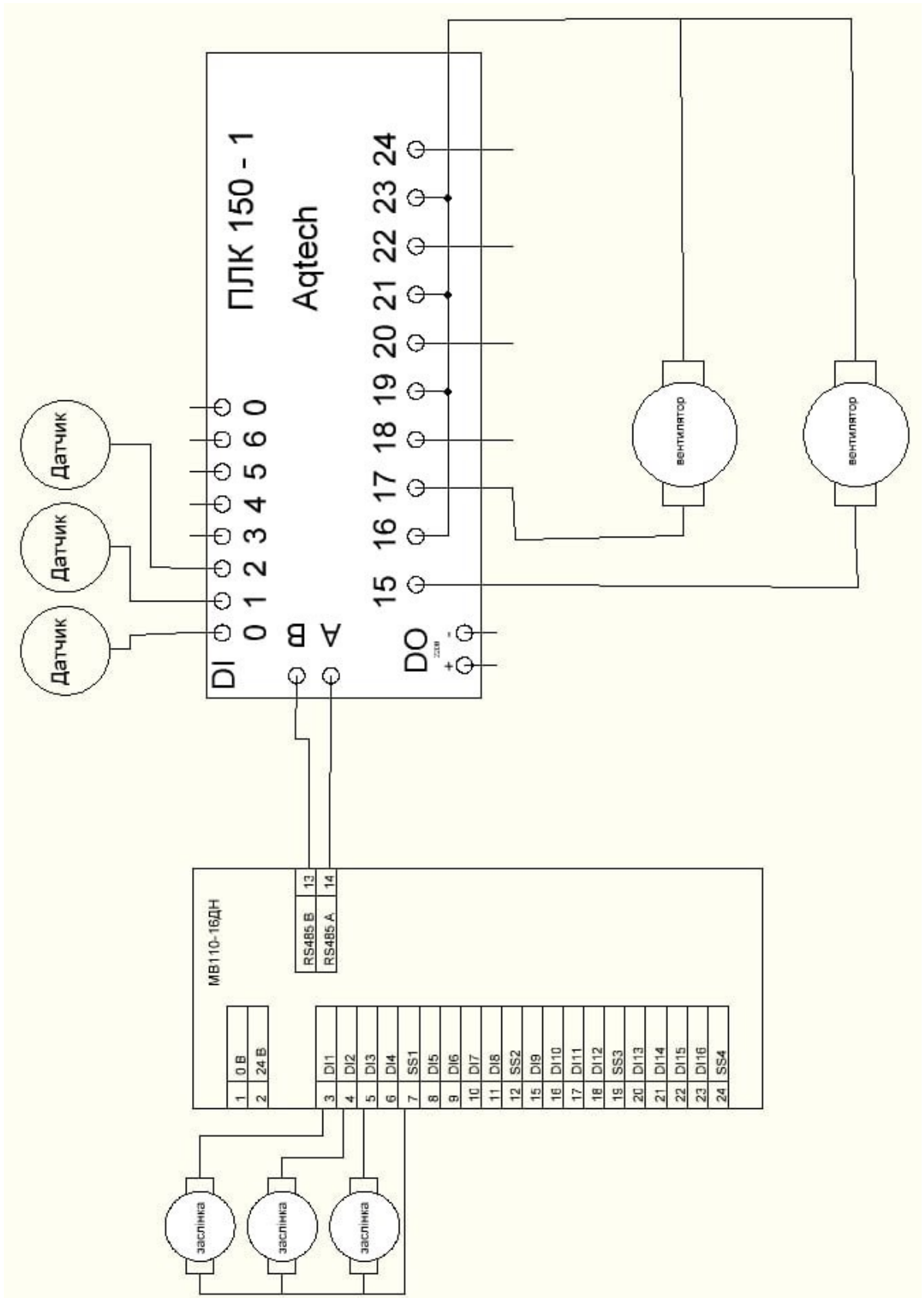


Рисунок 6.1 — Схема монтажу системи

Монтаж апаратної частини тризонної системи автоматизованого розподілу

теплової енергії базується на централізованому використанні ПЛК Aqtech 150 П, який виступає основним вузлом збору даних і керування виконавчими механізмами. Усі елементи під'єднані відповідно до логіки зональної теплової системи: до контролера під'єднуються датчики температури, силові виходи, аварійний вентилятор та вентилятори зон подачі теплого повітря.

Підключення датчиків температури

Два незалежні датчики температури встановлюються у зоні відбору теплого повітря та в контрольному приміщенні. Сигнальні лінії датчиків підводяться безпосередньо до входів DI0–DI2 контролера. Використання окремих входів дозволяє реалізувати незалежні канали вимірювання, що потрібні для роботи алгоритмів регулювання.

Живлення датчиків забезпечується від внутрішньої шини живлення контролера, що спрощує кабельне господарство та зменшує кількість допоміжних модулів. Для зменшення впливу перешкод кабелі датчиків укладаються в окремий кабельний канал та не прокладаються паралельно силовим лініям вентиляторів.

Підключення виконавчих механізмів

Основні вентилятори подачі теплого повітря керуються через групу цифрових виходів DO15–DO24. Кожен вентилятор має окремий вихід, що дозволяє контролеру реалізовувати незалежні режими роботи зон. Монтаж силової частини виконується із застосуванням проміжних реле або транзисторних ключів (залежно від типу конкретного вентилятора), що гарантує захист контролера від зворотних струмів.

У схемі передбачено аварійний вентилятор, який підключено до одного з виходів групи DO з урахуванням того, що він повинен мати можливість працювати незалежно від режимів зональної вентиляції. Його лінія під'єднана

безпосередньо через окреме реле, що дозволяє реалізувати пріоритет аварійних команд.

Модуль розширення MB110-16ДН

У системі використано модуль дискретних входів MB110-16ДН, який виконує функцію зчитування станів кінцевих положень заслінок повітряних каналів. Його підключено до контролера за інтерфейсом RS-485, що видно на схемі.

Лінія RS-485 прокладається витою парою з екрануванням та підключена у відповідності до вимог виробника:

- клема А на контролері з'єднана з клемою А модуля;
- клема В — з клемою В модуля.

Монтаж передбачає встановлення термінувального резистора на кінці лінії, що мінімізує відбиття сигналів та забезпечує стійку роботу інтерфейсу при довжині до десятків метрів.

Сигнальні входи модуля отримують інформацію про стан трьох повітряних заслінок. Кожна з них підводиться до відповідного DI-каналу модуля. Організація такого з'єднання дозволяє контролеру аналізувати ступінь відкриття каналів і коригувати режим роботи вентиляторів.

Монтаж повітряних заслінок

Повітряні заслінки під'єднані до модуля MB110-16ДН через сигнальні кабелі, що забезпечують фіксацію їхнього положення.

Фізичне встановлення заслінок виконується безпосередньо в повітропроводах відбору гарячого повітря від майнінг-ферми. Їх монтаж передбачає:

- жорстку фіксацію на повітропроводі;
- забезпечення можливості сервісного доступу;
- окрему схему живлення приводу.

Загальна структура кабельної мережі

Кабельна інфраструктура системи організована таким чином, щоб силові та

сигнальні лінії не перетиналися.

Силові кабелі вентиляторів прокладено в окремих коридорах, а сигнальні — у слаботочних каналах. Точки комутації виконані в окремій монтажній шафі, яка містить:

- ПЛК;
- модуль MB110-16ДН;
- аварійні реле;
- автоматичні вимикачі.

Такий підхід забезпечує безпечну експлуатацію та спрощує подальше технічне обслуговування.

Висновки до розділу

Монтаж апаратної частини системи є логічно структурованим та повністю відповідним вимогам до промислових автоматизованих систем. Правильне підключення елементів забезпечує:

- стабільне зчитування температури;
- незалежне керування зонами подачі теплого повітря;
- можливість аварійного охолодження майнінг-ферми;
- надійність комунікацій на базі RS-485;
- безпечне живлення контролера та периферії.

ВИСНОВОК

У магістерській роботі розглянуто актуальну науково-прикладну проблему, пов'язану з неефективним використанням теплової енергії, що утворюється в процесі роботи майнінг-ферм. За відсутності спеціалізованих систем керування значна кількість тепла відводиться у навколишнє середовище без можливості подальшого корисного застосування, що призводить до перевитрат електроенергії, підвищених експлуатаційних витрат і зниження загальної енергоефективності об'єктів. Крім того, некерований тепловий режим негативно впливає на стабільність роботи обчислювального обладнання, скорочує термін його служби та підвищує ризик аварійних зупинок.

У ході дослідження проаналізовано основні проблеми, характерні для існуючих систем відведення тепла від майнінг-обладнання, серед яких: відсутність адаптивного регулювання повітряних потоків, неможливість розподілу тепла між декількома приміщеннями з різними тепловими потребами, обмежені засоби контролю температурних режимів і недостатній рівень автоматизації. Особливу увагу приділено питанню безпеки експлуатації, оскільки перегрів майнінг-ферм може призводити не лише до зниження продуктивності, але й до виходу з ладу дорогих компонентів.

На основі проведеного аналізу розроблено та досліджено автоматизовану систему розподілу теплової енергії з використанням програмованого логічного контролера та середовища програмування CODESYS. Запропоноване рішення передбачає реалізацію двох програм керування: однозонної та багатозонної, що дозволяє адаптувати систему до різних умов експлуатації. Однозонна програма забезпечує стабільне підтримання заданої температури в окремому приміщенні та може використовуватися як базове рішення або тестовий модуль. Багатозонна програма, у свою чергу, реалізує більш складний алгоритм розподілу тепла між кількома зонами з урахуванням їх індивідуальних температурних потреб та пріоритетів. [18]

Важливою складовою роботи стало обґрунтування вибору апаратних засобів

системи. Застосування сучасних датчиків температури, керованих вентиляторів подачі та аварійного охолодження, а також стабільного джерела живлення дозволило створити надійну та масштабовану систему. Особливу роль відіграє реалізація аварійних режимів, які забезпечують автоматичне реагування на критичні температурні значення та мінімізують ризик пошкодження обладнання. Це підвищує загальний рівень надійності системи та дозволяє використовувати її в умовах тривалої безперервної експлуатації.

У процесі виконання дослідної частини підтверджено, що впровадження автоматизованого керування тепловими потоками дозволяє значно підвищити ефективність використання вторинної теплової енергії. Отримані результати свідчать про можливість зниження витрат на традиційні системи опалення та покращення теплового комфорту в приміщеннях без додаткових енергетичних затрат. Крім того, автоматизація процесів відведення тепла позитивно впливає на стабільність роботи майнінг-ферм і зменшує кількість позаштатних ситуацій.

Практична цінність роботи полягає в тому, що розроблені програмні та апаратні рішення можуть бути використані не лише для майнінг-ферм, а й для інших об'єктів з інтенсивним тепловиділенням, таких як серверні приміщення або промислові обчислювальні комплекси. Запропонований підхід є універсальним, легко адаптується до різної кількості зон та типів обладнання і може бути інтегрований у вже існуючі системи вентиляції та опалення.

У підсумку можна стверджувати, що поставлені в магістерській роботі завдання виконано повністю, а отримані результати мають як наукове, так і практичне значення. Реалізована система автоматизації демонструє ефективний підхід до раціонального використання теплової енергії та створює передумови для подальшого розвитку енергоощадних технологій у локальних системах теплопостачання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. International Energy Agency. World Energy Outlook 2023. Paris : IEA, 2023. URL: <https://www.iea.org> (7)
2. International Energy Agency. Electricity Market Report 2023. Paris : IEA, 2023. (7)
3. Cambridge Centre for Alternative Finance. Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index (CBECI). University of Cambridge, 2023. URL: <https://ccaf.io/cbeci> (7)
4. Mora C. et al. Bitcoin emissions alone could push global warming above 2 °C. Nature Climate Change. 2018. (17)
5. Bitmain Technologies Ltd. Antminer S19 XP – Technical Specifications. 2023. URL: <https://www.bitmain.com> (15)
6. MicroBT Mining Technologies. Whatsminer M50 / M50S Datasheet. 2023. URL: <https://www.whatsminer.com> (15)
7. Canaan Creative. Avalon Miner 1366 – Product Specification. 2022. (14)
8. Incropera F.P., DeWitt D.P., Bergman T.L., Lavine A.S. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 7th ed. Wiley, 2011. (4)
9. Çengel Y.A., Ghajar A.J. Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications. McGraw-Hill, 2015. (9)
10. IEEE. Thermal management in high-power integrated circuits. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing. 2019. (15)
11. ASHRAE. Thermal Guidelines for Data Processing Environments. ASHRAE TC 9.9, 2020. (15)

12. Koomey J. Growth in data center electricity use. *Energy Efficiency*. 2011. (31)
13. European Environment Agency. Greenhouse gas emission intensity of energy systems. 2022. (10)
14. United Nations. Sustainable Development Goals. 2015. URL: <https://sdgs.un.org> (9)
15. Bejan A. *Convection Heat Transfer*. Wiley, 2013. (9)
16. *Springer Handbook of Thermal Engineering*. Springer, 2018. (14)
17. European Commission. *Energy efficiency and waste heat recovery*. Brussels, 2021. (45)
18. CODESYS GmbH. *CODESYS Development System – Documentation*. 2023. URL: <https://www.codesys.com> (32)

ДОДАТКИ

УДК 62.5

В.М. Галай, к.т.н., доцент

О.Ю. Павлій, магістрант

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ РОЗПОДІЛУ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ ВІД МАЙНІНГ-ФЕРМ У ЛОКАЛЬНИХ СИСТЕМАХ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

Сучасні обчислювальні комплекси, створені для криптовалютного майнінгу, характеризуються високим енергоспоживанням та, відповідно, значним тепловиділенням. З огляду на постійне зростання вартості електроенергії та підвищення вимог до енергоефективності інженерних систем, питання утилізації цього тепла набуває актуальності у сфері локальних систем теплопостачання. Значна частка теплової енергії, що раніше розсіювалася у довкілля, може бути перетворена на корисний ресурс для обігріву приміщень, технічних кімнат або невеликих виробничих комплексів.

У ході дослідження встановлено, що використання теплової енергії майнінг-ферм у локальних системах теплопостачання супроводжується низкою технічних проблем, які ускладнюють стабільну та передбачувану роботу обладнання. Однією з основних труднощів є нерівномірність тепловиділення, оскільки навантаження на майнери постійно змінюється, що призводить до коливань температури повітряного потоку та ускладнює підтримання заданих параметрів у приміщеннях. Додатковою проблемою є обмежена можливість ручного контролю, через що оператор не завжди може оперативно відреагувати на різкі зміни температури або нестандартні режими роботи.

Вирішення зазначених проблем потребує впровадження інтелектуального керування, здатного автоматично перерозподіляти тепловий потік між зонами, забезпечувати швидку реакцію на зміни та підтримувати роботу майнінг-ферми в безпечному температурному режимі.

В роботі створено і описано дві програми: однозонного та тризонного контролю подачі теплого повітря. Перша програма призначена для роботи з одним приміщенням і реалізує базовий алгоритм автоматичного регулювання з урахуванням температурної гістерезисної характеристики. Друга програма — багатозонна система — дозволяє незалежно керувати теплопотоками для трьох окремих зон, що актуально у реальних умовах експлуатації, коли температурний режим у різних кімнатах суттєво відрізняється.

Для кожної зони використано окремий датчик температури, що забезпечує точне значення температури у форматі струмового сигналу 4–20 мА. Система

включає виконавчі механізми у вигляді вентилятора подачі нагрітого повітря та сервоприводів на заслонках в системі вентиляції.

У ході роботи виконано моделювання алгоритмів, розроблено структурні схеми та налагоджено візуальний інтерфейс для сенсорної панелі оператора. Запропоновано методи оптимізації розподілу тепла між зонами, що базуються на порівнянні температурного відхилення від уставки і визначенні пріоритетів подачі.

Результати дослідження показали, що автоматизований розподіл тепла дозволяє знизити нерівномірність температур по зонах на 18–24 %, а ефективність використання тепла від майнінг-ферми — підвищити до 65–75 %. Стабільність роботи алгоритмів у реальних умовах експлуатації продемонструвала можливість їх подальшої інтеграції у локальні системи опалення приватних та малих комерційних об'єктів.

Розроблене програмне та технічне рішення може бути використане як основа для побудови масштабованих систем утилізації тепла, придатних до впровадження в малих підприємствах, житлових будівлях чи приватних господарствах. Це підтверджує актуальність і практичну цінність проведеної роботи, а також демонструє перспективи подальшого розвитку технологій рекуперації теплової енергії від обчислювальних комплексів.

ЛІТЕРАТУРА

- CODESYS – The IEC 61131-3 Automation Software. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.codesys.com>
- Aqtech. Програмовані логічні контролери серії 150. Технічна документація виробника. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://aqtech.ua>
- Теплотехнічні властивості електронного обладнання та методи відведення тепла: монографія / За ред. П. І. Кравченка. – Харків: ХНУРЕ, 2020. – 214 с.
- Modern Approaches to Heat Recovery in Distributed Systems / J. Lawson // Energy Engineering Journal. – 2021. – №4. – С. 55–63.

Міністерство освіти та науки України
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Кафедра автоматики, електроніки та телекомунікацій

**Дослідження та автоматизація розподілу теплової
енергії від майнінг-ферм у локальних системах
теплопостачання**

Кваліфікаційна робота магістра

Виконав:

Студент групи 601МЕ

Павлій О.Ю.

Керівник:

доцент, канд. техн. наук

Галай В.М.

Полтава 2025

Тема та актуальність роботи

Тема магістерської роботи присвячена автоматизації процесів розподілу теплової енергії, що утворюється під час роботи майнінг-ферм, у локальних системах тепlopостачання. Стрімкий розвиток цифрових технологій і криповалютного майнінгу призвів до значного зростання споживання електроенергії та, відповідно, виділення великої кількості тепла. У більшості випадків це тепло не використовується та розсіюється в навколишньому середовищі. Магістерська робота спрямована на розгляд майнінг-ферми не лише як споживача електроенергії, а й як потенційного джерела низькопотенційної теплової енергії. У роботі запропоновано підхід до автоматизованого керування теплорозподілом із використанням сучасних засобів промислової автоматизації, що дозволяє підвищити енергоефективність системи та забезпечити стабільний мікроклімат у приміщеннях.

Актуальність теми зумовлена зростанням вартості енергоресурсів та необхідністю підвищення енергоефективності інженерних систем. Майнінг-ферми споживають значні обсяги електричної енергії, при цьому до 95–98 % цієї енергії перетворюється на тепло. Без ефективних систем керування це тепло створює проблеми перегріву обладнання та додаткових витрат на охолодження. В умовах енергетичної кризи та обмежених ресурсів в Україні актуальним є пошук альтернативних джерел тепла для опалення приміщень. Використання теплової енергії майнінгу дозволяє зменшити навантаження на традиційні системи тепlopостачання, скоротити витрати на енергоносії та підвищити екологічну стійкість об'єктів. Саме тому автоматизація процесів теплорозподілу є важливим інженерним і науковим завданням.

Мета, об'єкт і предмет дослідження

Метою магістерської роботи є дослідження можливостей використання теплової енергії майнінг-ферм для забезпечення комфортного мікроклімату в приміщеннях та розробка автоматизованої системи керування теплорозподілом. Для досягнення поставленої мети було визначено низку завдань. Зокрема, виконано аналіз енергетичних і теплових характеристик сучасного майнінг-обладнання, досліджено фізичні процеси тепловиділення в ASIC-чіпах, проаналізовано існуючі системи охолодження та утилізації тепла. Окрему увагу приділено розробці програмного забезпечення в середовищі CODESYS, яке реалізує алгоритми автоматичного керування вентиляторами та тепловими потоками. Також виконано оцінку економічної та екологічної ефективності запропонованого рішення.

Об'єктом дослідження у даній магістерській роботі є майнінг-ферма як технічна система, що поєднує обчислювальне обладнання, системи електроживлення та охолодження.

Предметом дослідження є процеси тепловиділення та автоматизованого розподілу теплової енергії, яка утворюється під час роботи майнінг-обладнання.

У роботі розглянуто приклад майнінгової установки потужністю близько 10 кВт, яка працює у приміщенні площею приблизно 100 м². Досліджуються температурні режими, повітряні потоки та можливості інтеграції майнінг-ферми у локальну систему теплопостачання. Такий підхід дозволяє оцінити практичну доцільність використання відхідного тепла та визначити вимоги до системи автоматичного керування.

Асобливості ASIC

3

Майнер — це спеціалізований обчислювальний пристрій (ASIC), призначений для виконання криптографічних алгоритмів, під час роботи якого електрична енергія переважно перетворюється на теплову.

Таблиця - Потужність типових ASIC-майнерів

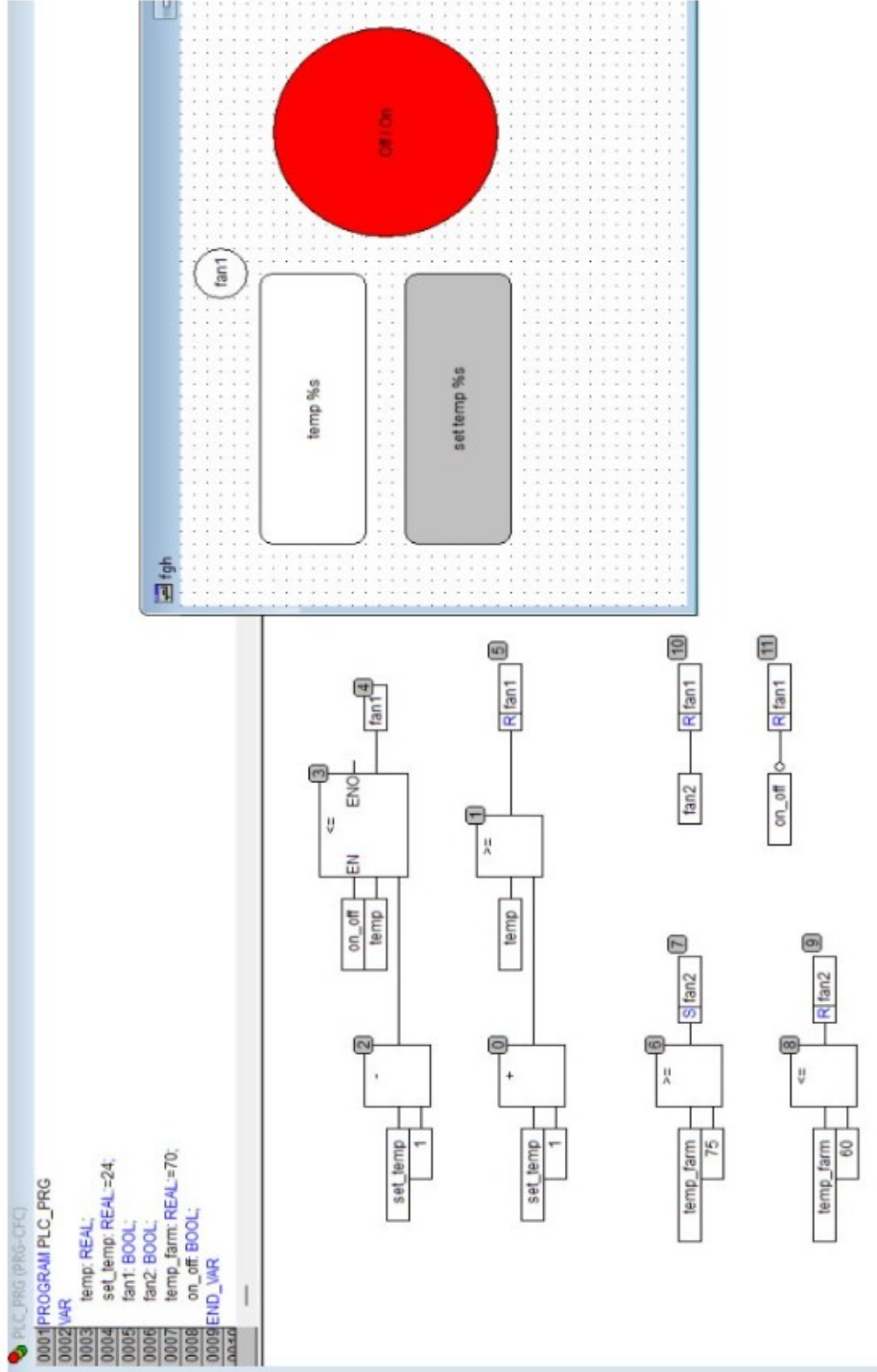
Модель обладнання	Споживана потужність, Вт	Обчислювальна потужність, TH/s
Bitmain Antminer S19j Pro	2950–3050	100–104
Bitmain Antminer S19 XP	3100–4100	140–150
MicroBT Whatsminer M50	3200–5200	120–130



ASIC-майнер
Bitmain Antminer S19j Pro

Однозонна програма

4

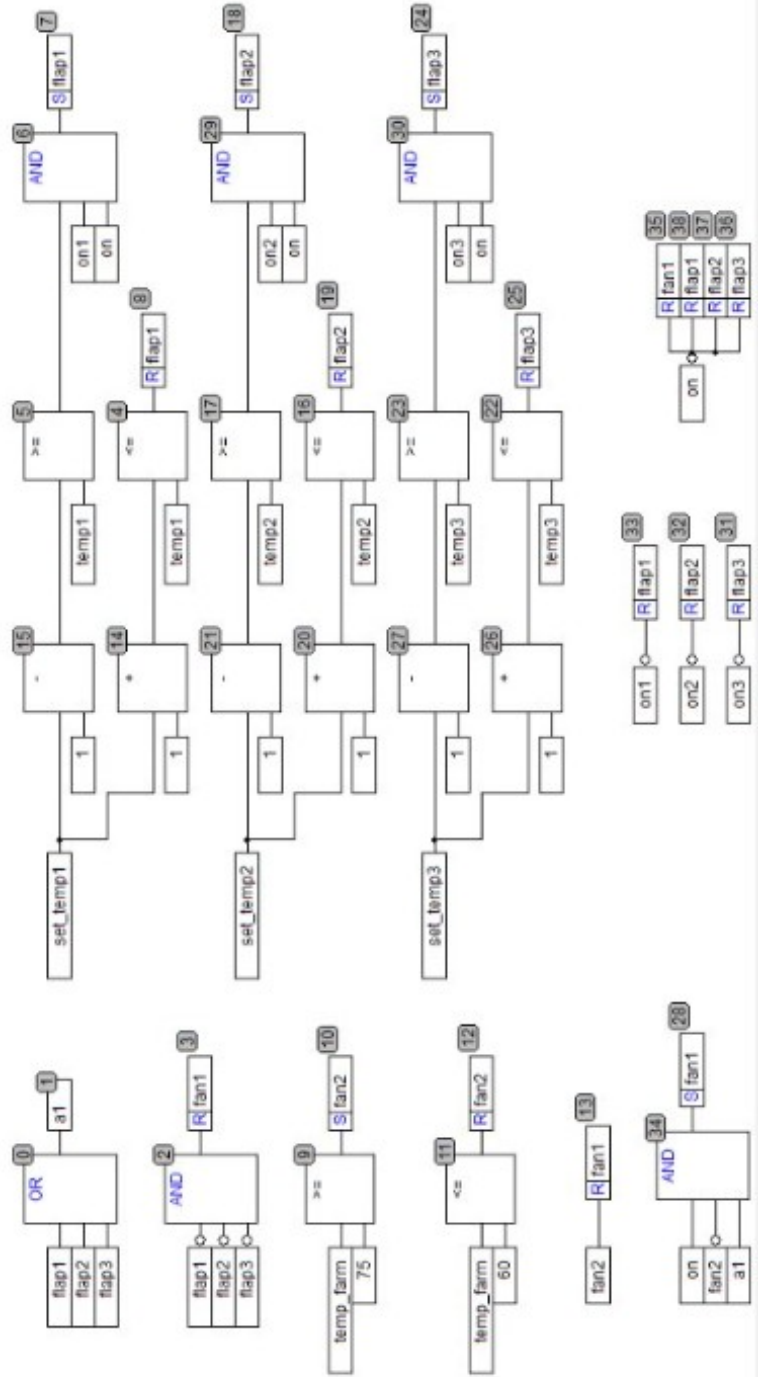


Тризонна програма

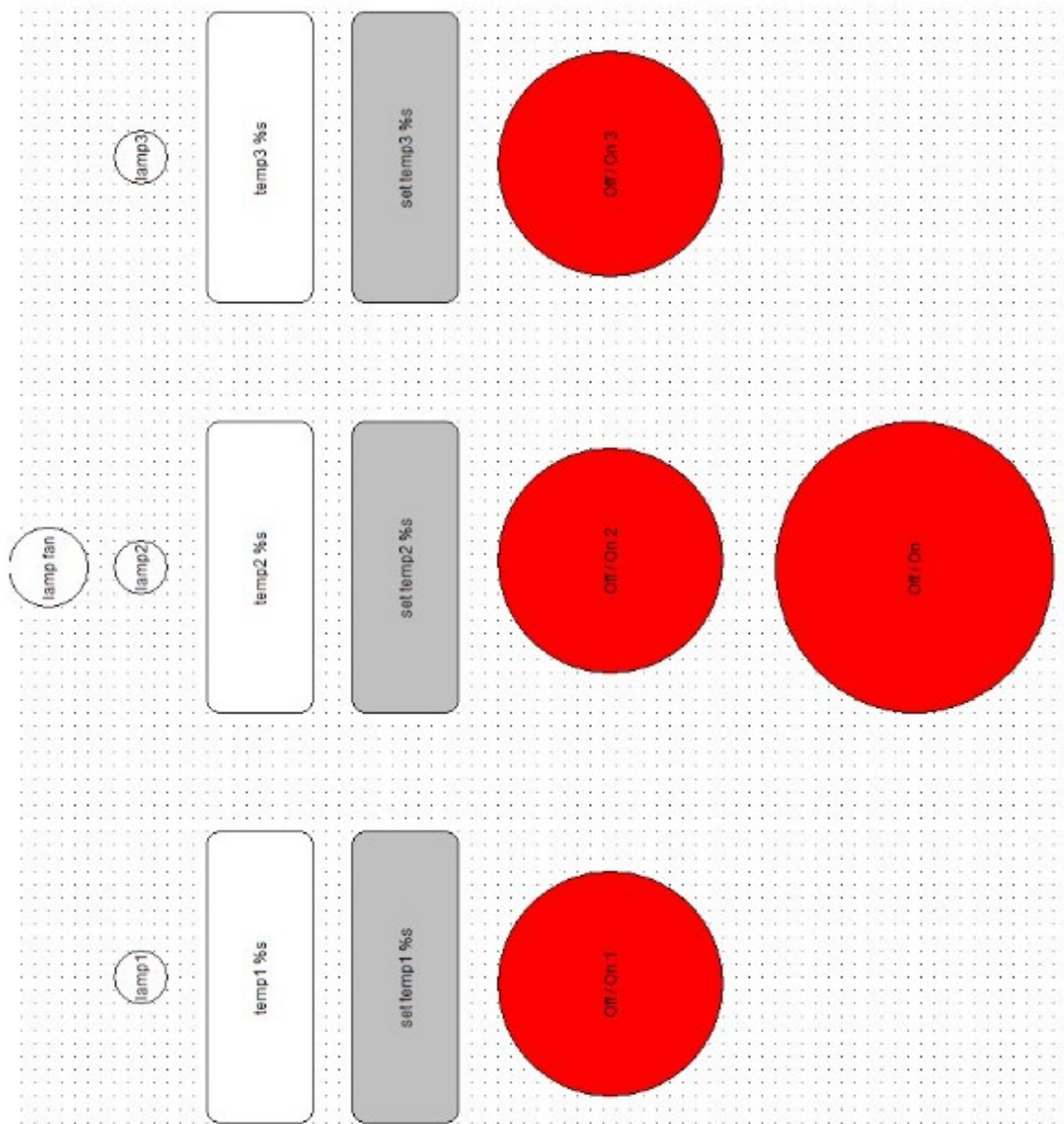
```

0001 PROGRAM PLC_PRG
0002 VAR
0003   fan1: BOOL;
0004   fan2: BOOL;
0005   temp_farm: REAL := 70;
0006   set_temp1: INT := 22;
0007   set_temp2: INT := 24;
0008   set_temp3: INT := 26;
0009   temp1: REAL := 20;
0010   fan1: BOOL;
0011   fan2: BOOL;
0012   fan3: BOOL;
0013   temp2: INT := 20;
0014   temp3: INT := 20;
0015   on1: BOOL;
0016   on2: BOOL;
0017   on3: BOOL;
0018   on: BOOL;
0019   a1: BOOL;
0020 END VAR

```



Візуалізація двозонної програми



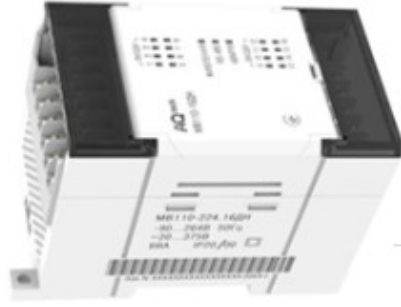
Обладнання

Вибір програмованого логічного контролера **ПЛК 150 ПЛ** з підтримкою середовища **CODESYS** обґрунтований необхідністю реалізації автоматизованого керування розподілом теплової енергії від майнінг-ферми. ПЛК 150 ПЛ забезпечує надійне виконання алгоритмів регулювання температури та повітряних потоків у режимі реального часу, що дозволяє підтримувати стабільний мікроклімат у приміщенні та підвищити ефективність утилізації відхідного тепла.



Застосування модуля розширення **MB110-16DN**

є доцільним у зв'язку з необхідністю підключення декількох температурних датчиків і виконавчих механізмів у системі теплорозподілу. Модульне розширення дозволяє масштабувати автоматизовану систему відповідно до потужності майнінг-ферми та умов експлуатації без зміни базової структури керування, що підвищує гнучкість і практичну цінність розробленого рішення.



Графіки зміни температури

ПОРІВНЯННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ: З АВТОМАТИЗАЦІЄЮ ТА БЕЗ

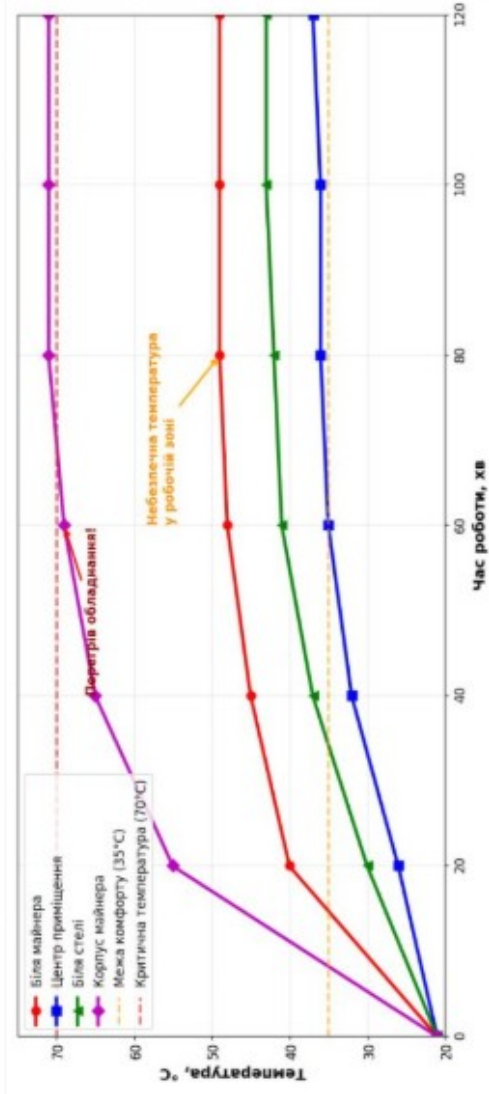
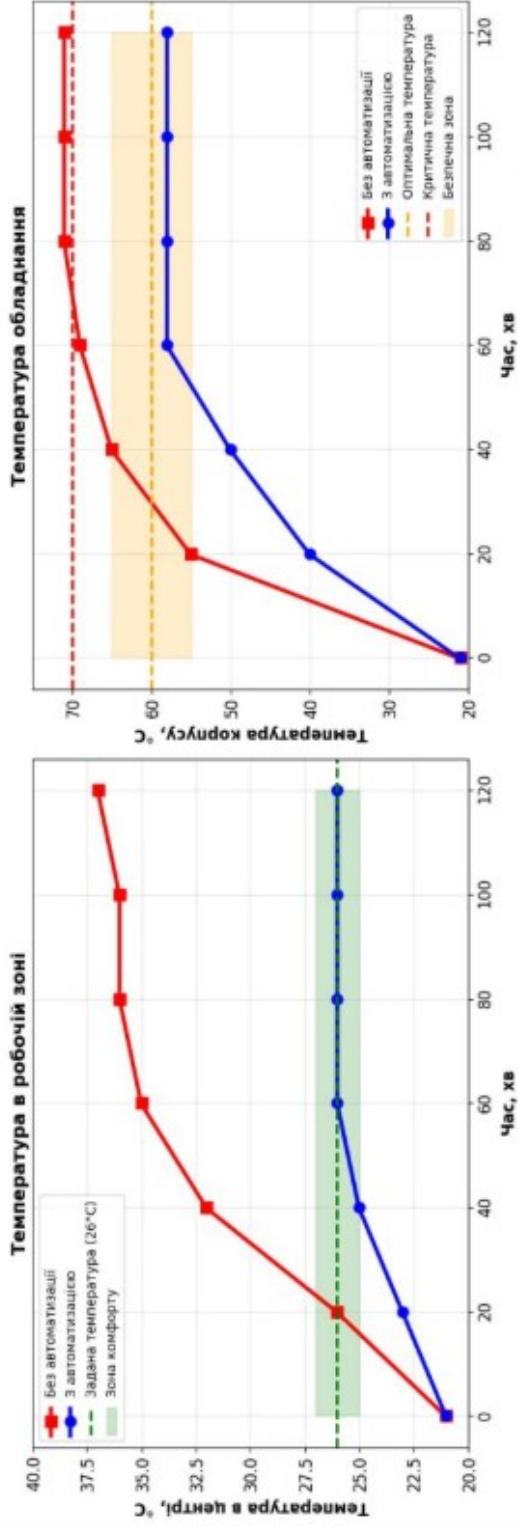
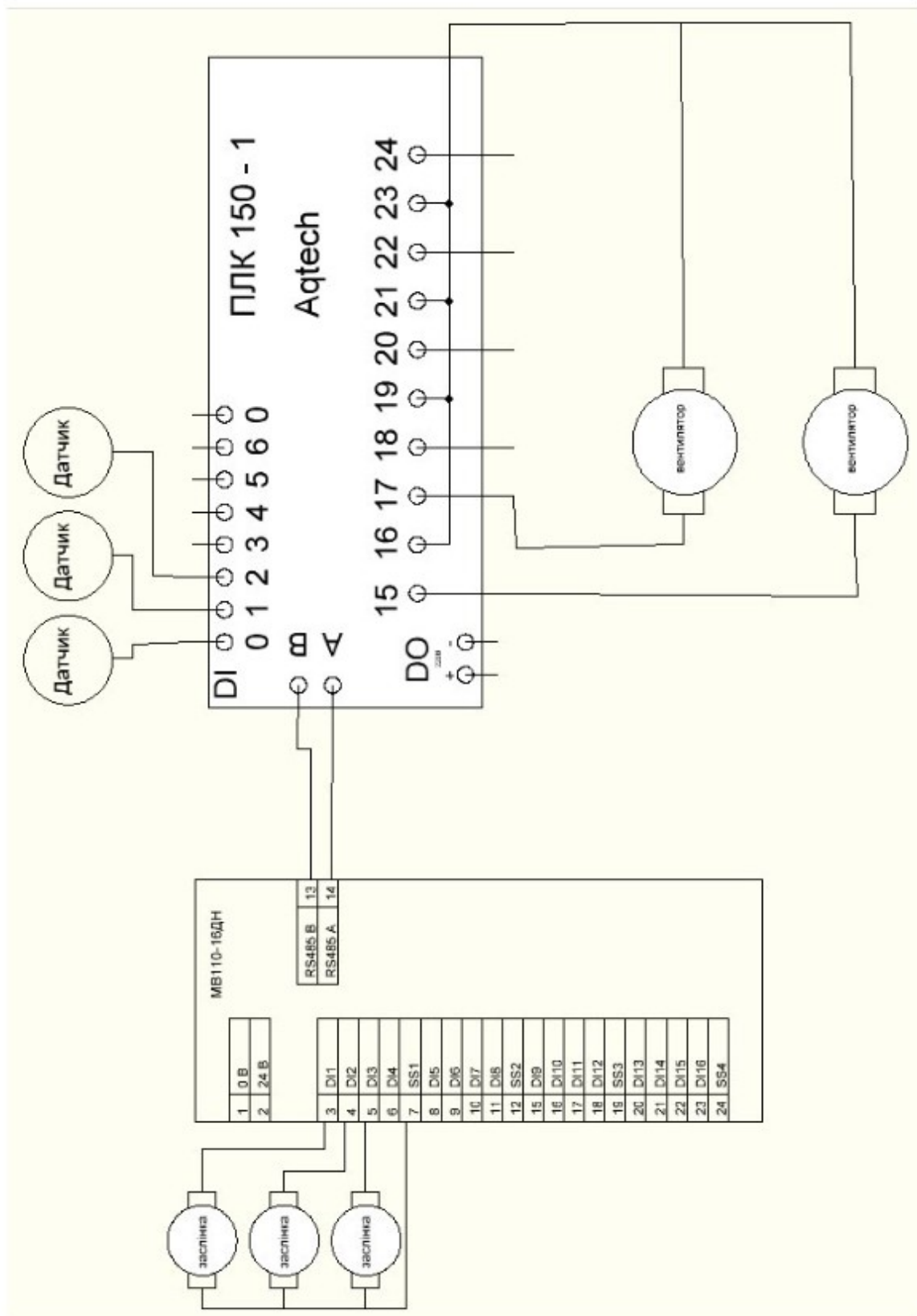


Схема монтажу



Висновки

У результаті виконання магістерської роботи проведено комплексне дослідження процесів тепловиділення, що виникають під час роботи майнінг-ферм, та обґрунтовано доцільність використання цієї теплової енергії у локальних системах тепlopостачання. Показано, що до 95–98 % споживаної електричної енергії перетворюється на тепло, яке за відсутності ефективного керування призводить до перегріву обладнання та додаткових витрат на охолодження.

У роботі розроблено автоматизовану систему керування розподілом теплової енергії з використанням середовища CODESYS, яка забезпечує підтримання стабільного температурного режиму, підвищує енергоефективність та надійність роботи майнінг-обладнання. Запропоновані алгоритми керування дозволяють адаптивно регулювати теплові потоки залежно від поточних умов експлуатації.

Практичні результати роботи підтверджують можливість інтеграції майнінг-ферм у локальні системи тепlopостачання житлових і промислових об'єктів. Використання відхідного тепла сприяє зменшенню споживання традиційних енергоресурсів, скороченню викидів CO₂ та підвищенню екологічної стійкості об'єктів. Отримані результати можуть бути використані при проєктуванні енергоефективних інженерних систем і є перспективними для подальших досліджень у напрямку розумних систем тепlopостачання.