

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Факультет інформаційних технологій

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій

та енергетичного менеджменту

Литвина Дмитра Олександровича

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 681.518:697.921.4

(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Інформаційно-вимірювальна система для моніторингу та управління роботою
рекуперативних вентиляційних установок, що живляться від індивідуальних
сонячних електростанцій

(назва роботи)

Інженерія відновлюваної енергетики

(назва освітньої програми)

152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»

(шифр і назва спеціальності)

**Робота містить результати власних досліджень, використання ідей, результатів і
текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело:**

Здобувач освітнього ступеня _____ Д. О. Литвин

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник _____ Рибіцький Ігор Володимирович, д.т.н., професор

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

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

О. Є. Середюк

(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет інформаційних технологій

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій та енергетичного менеджменту

Освітній рівень бакалавр

Спеціальність 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»

Освітня програма Інженерія відновлюваної енергетики

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

інформаційно-вимірювальних

технологій та енергетичного

менеджменту

О. Є. Середюк

« ____ » _____ 20__ року

З А В Д А Н Н Я НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

Литвину Дмитру Олександровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Інформаційно-вимірювальна система для моніторингу та управління роботою рекупераційних вентиляційних установок, що живляться від індивідуальних сонячних електростанцій

керівник роботи Рибіцький Ігор Володимирович, д. т. н., проф.,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ІФНТУНГ від "5" травня 2026 року №204/7

2. Строк подання студентом роботи "12" червня 2026 року

3. Вихідні дані до роботи _____

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1) Здійснити аналітичний огляд проблематики енергоефективності, проаналізувати системи вентиляції з рекуперацією, вивчити існуючі ІВС у задачах моніторингу

2) Обґрунтувати сенсорну підсистему, блок енергетичного моніторингу та виконавчих механізмів

3) Розробити математичні моделі, алгоритм адаптивного управління та логіку кінцевих автоматів

3) Провести імітаційне моделювання та програмну реалізацію алгоритмів управління ІВС у середовищі MATLAB

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Нормоконтролер</i>	<i>доцент Яворський А. В.</i>		
<i>Перевірка на плагіат</i>	<i>доцент Миндюк В. Д.</i>		

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Видача завдання (відповідно до наказу).	05.05.2026 р.	
2	Розроблення 1 розділу: «Аналітичний огляд сучасного стану систем управління мікрокліматом та енергозабезпечення будівель»	01.04.2026 – 18.04.2026 р.	
3	Розроблення 2 розділу: «Синтез архітектури та алгоритмічного забезпечення інформаційно-вимірювальної системи»	19.04.2026 – 12.05.2026 р.	
4	Розроблення 3 розділу: «Імітаційне моделювання та програмна реалізація алгоритмів управління ІВС у середовищі MATLAB»	13.05.2026 – 24.05.2026 р.	
5	Оформлення роботи.	25.05.2026 – 01.06.2026 р.	

Студент

(підпис)

Литвин Д. О.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Рибіцький І. В.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Литвин Д. О. «Інформаційно-вимірjuвальна система для моніторингу та управління роботою рекупераційних вентиляційних установок, що живляться від індивідуальних сонячних електростанцій». Дипломна робота освітнього рівня – бакалавр, на правах рукопису. Спеціальність – 152 «Метрологія та інформаційно-вимірjuвальна техніка». – Івано-Франківськ, 2026.

Бакалаврська робота присвячена темі розроблення інформаційно-вимірjuвальної системи для моніторингу та управління роботою рекупераційних вентиляційних установок, що живляться від індивідуальних сонячних електростанцій. Робота складається із вступу, трьох розділів, висновка, переліка використаних джерел і додатка. Загальний обсяг роботи – 60 сторінок, 13 рисунків. Кількість використаних джерел – 27 од.

У роботі обґрунтовано архітектуру кіберфізичної системи на базі мікрокомп'ютера Raspberry Pi, газоаналізатора «Дозор-С», термостата Siemens та гібридного інвертора Deye. Розроблено математичні моделі тепломасообміну та енергетичного балансу, а також синтезовано логіку управління на базі детермінованого скінченного автомата. Виконано імітаційне моделювання в середовищі MATLAB із застосуванням технології «зациклена модель», яке підтвердило здатність системи в автономному режимі підтримувати санітарні норми концентрації CO₂, уникати обмерзання рекуператора та оптимізувати енергоспоживання будинку. Практичне значення полягає у створенні алгоритмічного та програмного забезпечення для подальшої апаратної імплементації на реальних об'єктах.

Ключові слова: ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА, РЕКУПЕРАЦІЙНА УСТАНОВКА, СОНЯЧНА ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯ, МІКРОКЛІМАТ, ВУГЛЕКИСЛИЙ ГАЗ, MATLAB, ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА.

ABSTRACT

Lytvyn, D. O. “Information and Measurement System for Monitoring and Controlling the Operation of Heat Recovery Ventilation Units Powered by Individual Solar Power Plants.” Diploma work of educational level – bachelor, in the form of a manuscript. Speciality – 152 “Metrology and information and measuring equipment”. – Ivano-Frankivsk, 2026.

This bachelor’s thesis is devoted to the development of an information and measurement system for monitoring and controlling the operation of heat recovery ventilation systems powered by individual solar power plants. The thesis consists of an introduction, three chapters, a conclusion, a list of references, and an appendix. The total volume of the thesis is 60 pages, 13 figures. The number of sources used is 27.

The thesis substantiates the architecture of a cyber-physical system based on a Raspberry Pi microcomputer, a “Dozor-S” gas analyzer, a Siemens thermostat, and a Deye hybrid inverter. Mathematical models of heat and mass transfer and energy balance were developed, and control logic based on a deterministic finite state machine was synthesized. Simulation modeling was performed in the MATLAB environment using the “Model-In-Loop” technology, which confirmed the system’s ability to maintain sanitary CO₂ concentration standards in autonomous mode, prevent the heat exchanger from freezing, and optimize the building’s energy consumption. The practical significance lies in the development of algorithms and software for subsequent hardware implementation at actual facilities.

Keywords: INFORMATION AND MEASUREMENT SYSTEM, RECOVERY PLANT, SOLAR POWER PLANT, MICROCLIMATE, CARBON DIOXIDE, MATLAB, SIMULATION MODELING, CYBER-PHYSICAL SYSTEM.

ЗМІСТ

	Ст.
Вступ.....	9
Розділ 1. Аналітичний огляд сучасного стану систем управління мікрокліматом та енергозабезпечення будівель.....	12
1.1 Проблематика енергоефективності та нормативні вимоги до теплового балансу приміщень.....	12
1.2 Аналіз існуючих систем вентиляції з рекуперацією тепла та їхніх недоліків.....	15
1.3 Інформаційно-вимірювальні системи (ІВС) у задачах моніторингу та управління мікрокліматом.....	19
Розділ 2. Синтез архітектури та алгоритмічного забезпечення інформаційно-вимірювальної системи.....	22
2.1 Обґрунтування структурно-функціональної організації системи енергомоніторингу	22
2.1.1. Сенсорна підсистема контролю мікроклімату	22
2.1.2. Підсистема моніторингу енергетичних потоків	24
2.1.3. Підсистема виконавчих механізмів (рекупераційна установка)	25
2.1.4. Підсистема енергоперетворення та динамічного розподілу	25
2.1.5. Центральний обчислювальний вузол (Edge Controller)	27
2.2 Математичне моделювання та розробка алгоритму адаптивного управління	28
2.3 Інформаційна взаємодія та комплексний опис режимів функціонування	32
Розділ 3. Імітаційне моделювання та програмна реалізація алгоритмів управління ІВС у середовищі MATLAB.....	38
3.1 Інформаційне забезпечення моделі: підготовка відкритих наборів даних	38
3.2 Розробка спрощеної математичної моделі об'єкта.....	42
3.3 Алгоритмічна реалізація скінченного автоматичного процесу та верифікація системи за технологією Model-in-the-Loop	43

Висновки	47
Список використаних джерел	52
Додатки.....	55
Додаток А. Програмний код для розрахунку профілю сонячної генерації у м. Івано-Франківську за 1 літній тиждень	55
Додаток Б. Програмний код для розрахунку профілю сонячної генерації у м. Івано-Франківську за 1 зимовий тиждень	56
Додаток В. Програмний код для моделювання тижневого циклу роботи ІВС в м. Івано-Франківську та генерації комплексного аналітичного графіка ..	57
Додаток Г. Програмний код імітації роботи ядра операційної ІВС у режимі реального часу	58

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ СИМВОЛІВ

FSM – Finite State Machine [детермінований скінченний автомат]

IoT – Internet of Things [інтернет речей]

MIL – Model-in-the-Loop [зациклена модель]

MPPT – Maximum Power Point Tracking [пошук точки максимальної потужності]

nZEB – nearly Zero Energy Buildings [будівлі з майже нульовим енергоспоживанням]

PVGIS – Photovoltaic Geographical Information System [Фотоелектрична геоінформаційна система]

SoC – state of charge [рівень заряду]

TMY – Typical Meteorological Year [типовий метеорологічний рік]

АКБ – акумуляторна батарея

ГДК – гранично-допустима концентрація

ДБН – державні будівельні норми

ЕС-двигун – електронно-комутаційний двигун

ІВС – інформаційно-вимірювальна система

ПВУ – припливно-витяжна установка

ПІД-регулятор – пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор

СЕС – сонячна електрична станція

ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач

ВСТУП

Актуальність роботи

Сучасні тенденції розвитку енергетики та будівництва свідчать про зростаючу потребу у впровадженні енергоефективних технологій, здатних забезпечити автономність та екологічність житлових і промислових об'єктів. Рекупераційні вентиляційні установки є одним із ключових інструментів підвищення енергоефективності будівель, оскільки дозволяють суттєво скоротити витрати теплової енергії на вентиляцію. Інтеграція таких установок із індивідуальними сонячними електростанціями відкриває принципово нові можливості для створення енергонезалежних систем мікроклімату.

Проте ефективна експлуатація подібних комплексів неможлива без надійних засобів моніторингу, діагностики та автоматичного керування, які б враховували нестабільний характер сонячної генерації та змінні умови експлуатації вентиляційного обладнання. Існуючі рішення здебільшого розглядають ці підсистеми відокремлено, що знижує загальну ефективність системи.

Відтак, розроблення інформаційно-вимірювальної системи, що забезпечує комплексний моніторинг і керування рекупераційною вентиляційною установкою в зв'язці з сонячною електростанцією, є актуальним науково-технічним завданням, вирішення якого сприятиме підвищенню енергетичної автономності та ефективності сучасних будівель.

Мета і задачі дослідження

Мета роботи полягає у підвищенні ефективності управління мікрокліматом приміщень та раціональному використанні відновлюваних джерел енергії шляхом розробки інтелектуальної інформаційно-вимірювальної системи для моніторингу та адаптивного управління рекупераційними установками з живленням від індивідуальних сонячних електростанцій.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- провести критичний аналіз існуючих інформаційно-вимірювальних систем, методів управління кліматичними установками та підходів до автономного живлення від фотоелектричних модулів;
- розробити математичні та імітаційні моделі тепломасообміну в рекуператорі та загального енергетичного балансу гібридної системи (СЕС – мікроклімат – мережа);
- синтезувати алгоритмічне забезпечення інформаційно-вимірювальної системи для обробки даних з сенсорної мережі (SmartMAIC, газоаналізатори) та управління режимами вентиляції на основі аналізу рівня CO₂ і поточної інсоляції;
- розробити метод динамічного перерозподілу енергії, що забезпечить пріоритетне живлення кліматичної установки та автоматичне управління гібридним інвертором для скидання надлишкової згенерованої потужності у внутрішню мережу будинку.

Об’єктом дослідження є процеси енергомоніторингу, вимірювання та інтелектуального управління параметрами мікроклімату і потоками електроенергії в гібридних системах життєзабезпечення будівель.

Предметом дослідження є архітектура, математичні моделі, апаратно-програмне забезпечення та алгоритми функціонування інформаційно-вимірювальної системи для адаптивного управління рекупераційними вентиляційними установками, що живляться від індивідуальних сонячних електростанцій, з функцією динамічного перерозподілу енергії..

Методи дослідження

Для вирішення поставлених в роботі задач використовувались методи: системного аналізу – для дослідження проблематики енергозбереження та критичного огляду існуючих технічних рішень; математичного моделювання – для формалізації динаміки зміни концентрації CO₂ (масовий баланс) та опису енергетичних потоків у локальній мікромережі; теорії автоматичного управління (зокрема, теорії детермінованих скінченних автоматів, FSM) – для синтезу алгоритму перемикання експлуатаційних режимів; імітаційного моделювання у

середовищі MATLAB із застосуванням технології «зацикленої моделі» – для програмної верифікації розроблених алгоритмів та перевірки надійності цифрового відповідника інформаційно-вимірювальної системи.

Практичне значення одержаних результатів

Вагомими практичними результатами виконання кваліфікаційної роботи є створення оптимізованого апаратно-програмного комплексу та цифрового двійника системи в MATLAB, що забезпечують автономне підтримання санітарних норм мікроклімату при мінімізації споживання електроенергії з зовнішньої мережі.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СУЧАСНОГО СТАНУ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ МІКРОКЛІМАТОМ ТА ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БУДІВЕЛЬ

1.1. Проблематика енергоефективності та нормативні вимоги до теплового балансу приміщень

Глобальні тенденції розвитку сучасної інженерної науки та архітектурно-будівельної фізики нерозривно пов'язані з необхідністю тотального зниження енергоспоживання в умовах перманентної енергетичної кризи та загострення екологічних проблем. Було встановлено на рівні фундаментальних міжнародних досліджень, що на забезпечення мікроклімату в приміщеннях житлового, комерційного та промислового призначення припадає близько сорока відсотків від загальносвітових витрат усіх видобутих енергоресурсів. Це зумовлює надзвичайну жорсткість міжнародної та національної політики у сфері енергозбереження. Як відповідь на ці масштабні цивілізаційні виклики, у світовій науковій та інженерній практиці було сформовано, обґрунтовано та на законодавчому рівні затверджено парадигму зведення будівель з близьким до нульового рівнем енергоспоживання (nZEB). У рамках даної концепції було визначено, що мінімізація втрат теплової енергії через огорожувальні конструкції є першочерговим та безальтернативним завданням при проєктуванні нових об'єктів та глибокій термомодернізації існуючого фонду. Згідно з дослідженнями у відкритих публікаціях європейських інститутів, було доведено, що перехід до стандарту nZEB вимагає кардинального перегляду традиційних підходів до формування теплового балансу.

В Україні нормативно-правову та технічну базу у цій сфері було суттєво оновлено та гармонізовано з європейськими директивами шляхом впровадження нових Державних будівельних норм. Фундаментальним кроком у цьому напрямку стало прийняття ДБН В.2.6-31:2021 «Теплова ізоляція та енергоефективність будівель» [13]. Відповідно до положень даного стандарту, було запроваджено суворі вимоги до мінімально допустимих значень наведеного опору теплопередачі фасадних систем, віконних конструкцій, перекриттів та

покрівель. Наслідком неухильного виконання цих нормативних вимог стало масове спорудження високогерметичних будівель, які за своїми теплофізичними властивостями наближаються до стану ізольованої термодинамічної системи. У праці П. Зініча було досягнуто значного та економічно виправданого зменшення витрат енергії на опалення, оскільки неконтрольований обмін повітря з навколишнім середовищем (інфільтрацію) через щілини, стики та нещільності конструкцій було практично повністю ліквідовано [23, с. 186].

В. Мілейковський стверджує, що у процесі довготривалої експлуатації таких енергоефективних об'єктів виникає критична проблема, пов'язана з різким і неконтрольованим погіршенням якості внутрішнього повітряного середовища. Дослідження на базі чисельних санітарно-епідеміологічних моніторингів засвідчують, що абсолютна герметизація приміщень призводить до стрімкого накопичення діоксиду вуглецю, вологи, летких органічних сполук та різноманітних антропогенних забруднювачів. Внаслідок природного процесу дихання людей концентрація діоксиду вуглецю у непровітрюваних кімнатах за дуже короткий проміжок часу перевищує допустимі граничні санітарні норми, які регламентуються на рівні 800–1000 частин на мільйон (ppm) [25, с. 122]. Клінічно підтверджено, що тривале перебування у такому деградованому середовищі спричиняє розвиток так званого синдрому хворої будівлі. Відповідно до масштабних досліджень В. Фіска, опублікованих у журналах серії «Building and Environment», було встановлено, що підвищений рівень діоксиду вуглецю має пряму кореляцію зі зниженням когнітивних функцій, швидкою втомлюваністю, головним болем та загальним падінням працездатності [2, с. 559]. Таким чином, у сучасній інженерній практиці наявний фундаментальний та гострий конфлікт між жорсткими вимогами максимального енергозбереження та фізіологічною необхідністю забезпечення здорового мікроклімату для перебування людини.

Аналіз структури теплового балансу сучасних герметичних будівель дозволив виявити суттєву зміну пропорцій тепловтрат. Якщо у будівлях старої забудови домінуючими були трансмісійні втрати крізь стіни (до 60-70%), то в сучасних енергоефективних спорудах частка енергії, що витрачається на підігрів

свіжого вентиляційного повітря, зростає до 50-60% від загального теплового навантаження. Для вирішення зазначеного протиріччя абсолютно неефективним та економічно недоцільним є використання традиційної природної вентиляції. За допомогою методів математичного моделювання було розраховано, що періодичне відкривання вікон у зимовий період (залпове провітрювання) призводить до колосальних та неконтрольованих викидів теплової енергії в атмосферу. На думку М. Боженка, це фактично повністю нівелює економічний та енергетичний ефект від застосування дороговартісної теплоізоляції зовнішніх стін [12, с. 164].

Відповідно, у наукових колах було доведено безальтернативну необхідність обов'язкового застосування систем механічної припливно-витяжної вентиляції, оснащених високоефективними рекуператорами тепла. П. Варгоцкі впевнений, що використання теплообмінників дозволяє передавати теплову енергію від відпрацьованого витяжного повітря до холодного припливного без їхнього безпосереднього фізичного змішування [10, с. 228]. Проте, ретельний аналіз режимів роботи базових рекупераційних установок із постійною витратою повітря засвідчив їхню недостатню ефективність у розрізі змінного експлуатаційного навантаження. Було встановлено, що безперервна робота таких вентиляційних систем на номінальній потужності вимагає значних та часто невиправданих витрат електричної енергії на привід вентиляторів. Крім того, В. Джеджула стверджує, що надлишковий повітрообмін у ті періоди, коли в приміщенні відсутні люди або їхня кількість є мінімальною, призводить до надмірного пересушування повітря (падіння відносної вологості нижче 30%), що також є порушенням санітарних норм [17, с. 109].

Отже, на основі проведеного аналізу нормативної бази та теплофізичних процесів виникає стійка наукова та практична потреба в розробці комплексних інтелектуальних інформаційно-вимірювальних систем. Такі системи повинні здійснювати постійний прецизійний моніторинг санітарних параметрів, передбачати ризики утворення конденсату та динамічно керувати інтенсивністю повітрообміну виключно за фактичною необхідністю, синхронізуючи свою роботу з доступними енергетичними ресурсами локальної генерації. Вирішення

цього комплексу завдань дозволить подолати існуючий конфлікт між вимогами ДБН щодо енергозбереження та медичними стандартами якості повітряного середовища.

1.2. Аналіз існуючих систем вентиляції з рекуперацією тепла та їхніх недоліків

Вирішення проблеми забезпечення нормативного повітрообміну в енергоефективних будівлях нерозривно пов'язане з масовим впровадженням механічних припливно-витяжних вентиляційних установок (ПВУ) з інтегрованими системами утилізації теплової енергії. На рівні фундаментальних теплофізичних досліджень було доведено, що використання рекуператорів є єдиним технічно обґрунтованим методом збереження теплоти витяжного повітря [21, с. 102]. У сучасній інженерній практиці найбільшого поширення набули пластинчасті рекуператори перехресного та протитокового типів, які характеризуються відсутністю рухомих частин, нульовим перетіканням забрудненого повітря у припливний канал та високим заявленим коефіцієнтом корисної дії (до 85–90%) [5, с. 1248]. Однак, детальний ретроспективний аналіз результатів натурних випробувань та довготривалої експлуатації таких систем у кліматичних умовах з низькими зимовими температурами дозволив ідентифікувати низку критичних недоліків, які суттєво знижують їхню фактичну енергоефективність та надійність.

Найбільш вагомою експлуатаційною проблемою пластинчастих теплообмінників, що була детально описана у працях провідних фахівців з тепломасообміну, є ризик неконтрольованого утворення конденсату та його подальшого замерзання на поверхні теплообмінних касет [6, с. 540]. Було досліджено фізику цього процесу: під час проходження теплого та вологого витяжного повітря крізь канали рекуператора воно інтенсивно охолоджується зустрічним потоком холодного припливного повітря з вулиці. У момент, коли температура стінки теплообмінника опускається нижче температури точки роси витяжного потоку, відбувається інтенсивна фазова зміна – конденсація водяної пари. Якщо ж температура зовнішнього повітря становить нижче нуля градусів

за Цельсієм, сконденсована волога миттєво кристалізується, утворюючи шар льоду на витяжних каналах. Було зафіксовано, що утворення навіть міліметрового шару інею призводить до експоненційного зростання аеродинамічного опору теплообмінника, різкого падіння витрати повітря та критичного зниження ефективності теплопередачі, що у кінцевому підсумку може спричинити механічне руйнування пластин рекуператора внаслідок розширення льоду.

Аналіз існуючих інженерних рішень, спрямованих на боротьбу з обмерзанням (розморожування теплообмінників), засвідчив їхню вкрай низьку енергетичну та експлуатаційну ефективність [1, с. 207]. Традиційно виробниками вентиляційного обладнання застосовується декілька базових алгоритмів захисту. Першим і найпоширенішим методом є використання електричних каналних переднагрівачів, які автоматично вмикаються при падінні температури вуличного повітря нижче критичної позначки і підігрівають його до безпечних додатних значень. Було доведено шляхом енергетичного аудиту, що застосування таких калориферів призводить до колосальних енергетичних перевитрат – витрати електроенергії на підігрів повітря часто перевищують обсяги теплової енергії, збереженої самим рекуператором, що повністю руйнує концепцію енергозбереження та суперечить стандартам nZEB.

Другим розповсюдженим методом захисту від замерзання, який було проаналізовано, є створення аеродинамічного дисбалансу (зупинка або суттєве зниження обертів припливного вентилятора за умови безперервної роботи витяжного). Як пояснює М. Безродний, у цьому режимі тепле витяжне повітря розморожує лід, проте в самому приміщенні генерується сильний від'ємний тиск (розрідження) [11, с. 14]. Було встановлено, що такий дисбаланс стимулює неконтрольовану інфільтрацію крижаного вуличного повітря крізь нещільності віконних рам, дверей та будівельних конструкцій. Це не лише викликає появу холодних протягів та локального дискомфорту у користувачів, але й перекладає все теплове навантаження на основну систему опалення будівлі.

Третім методом є застосування байпасного клапана (перепускного каналу), коли холодне повітря спрямовується в обхід рекуператора. У такому випадку

ефект утилізації тепла зводиться до нуля, і в приміщення надходить крижане, не підігріте повітря, що створює ризик переохолодження мешканців.

Окрім теплофізичних проблем, ідентифіковано фундаментальні недоліки в існуючих парадигмах управління продуктивністю вентиляційних установок. Більшість представлених на ринку систем базового та середнього цінового сегмента працюють за принципом постійної витрати повітря або ж керуються користувачем вручну за допомогою ступінчастих регуляторів. На основі статистичних даних доведено, що ручне управління є неефективним, оскільки людина фізіологічно не здатна вчасно розпізнати поступове зростання концентрації CO_2 , аж поки повітря не стане критично насиченим діоксидом вуглецю. Робота системи у безперервному номінальному режимі (забезпечення максимального розрахункового повітрообміну) призводить до невиправданих перевитрат електричної енергії двигунами вентиляторів. У праці В. Довгалюка знаходимо інформацію, що, згідно з законами аеродинаміки вентиляційних мереж, споживана електрична потужність відцентрових та ЕС-двигунів знаходиться у кубічній залежності від об'ємної витрати повітря [18, с. 239]. Відповідно, було математично обґрунтовано, що відсутність алгоритмів плавного зниження обертів у періоди мінімальної завантаженості приміщень є фактором глибокої енергетичної неефективності.

Навіть у випадках, коли в сучасних комплексах імплементується концепція вентиляції за потребою із застосуванням датчиків діоксиду вуглецю, існують серйозні прогалини у математичній логіці керуючих контролерів. Аналіз існуючих рішень показав, що більшість комерційних мікроконтролерів (навіть у сегменті розумних будинків) використовують примітивну релейну логіку (On / Off) або базові пропорційно-інтегрально-диференціальні (ПІД) регулятори з жорстко заданими уставками. Такі системи є виключно реактивними – вони починають підвищувати продуктивність вентиляції лише тоді, коли санітарна норма вже порушена, і не здатні прогнозувати динаміку накопичення газу [4, с. 231]. Крім того, побутові датчики якості повітря (часто базуються на вимірюванні суміші летких органічних сполук з подальшою математичною апроксимацією еквівалента CO_2) були визнані недостатньо точними для

застосування у професійних інформаційно-вимірювальних системах, оскільки їхні показання зазнають значного дрейфу з часом і сильно залежать від перехресної чутливості до інших газів або вологості.

Найбільш критичним недоліком сучасних систем мікроклімату, який було виділено В. Дешком в результаті патентного та літературного пошуку, є їхня абсолютна ізолюваність від енергетичної інфраструктури будівлі [15, с. 49]. Було зафіксовано, що вентиляційні установки проектуються виключно як пасивні споживачі електроенергії. Також, Г. Фаренюк і Є. Фаренюк стверджують, що алгоритми внутрішніх контролерів не мають жодних протоколів обміну даними із сучасними гібридними інверторами, сонячними електростанціями чи системами зберігання енергії [27, с. 38]. Наявні кліматичні агрегати не володіють інформацією про те, чи відбувається в даний момент надлишкова генерація безкоштовної сонячної енергії, чи навпаки – об'єкт живиться від залишків заряду акумуляторної батареї в умовах знеструмлення зовнішньої мережі (блекауту). Відсутність такої міжсистемної синхронізації унеможливорює реалізацію алгоритмів глибокого енергозбереження, коли вентиляційна система могла б свідомо жертвувати частиною комфорту (наприклад, допускаючи незначне зростання рівня CO₂ в межах безпечної зони) заради подовження часу життя акумуляторної батареї до моменту відновлення зовнішнього електропостачання.

Таким чином, у ході аналізу існуючих технологій було доведено, що сучасний ринок та наука потребують розробки принципово нового класу керуючих пристроїв. Існує нагальна потреба у створенні таких інформаційно-вимірювальних комплексів, які б не лише спиралися на прецизійні вимірювання газового складу, але й інтегрували б у собі математичні моделі прогнозування точки роси для захисту теплообмінника без використання енергоємнісних калориферів, а також були б здатні адаптувати інтенсивність своєї роботи відповідно до поточного стану локальної енергомережі та буферних накопичувачів об'єкта.

1.3. Інформаційно-вимірювальні системи (ІВС) у задачах моніторингу та управління мікрокліматом

Розвиток концепції інтелектуальних будівель та локальних мікромереж зумовив стрімку еволюцію традиційних систем диспетчеризації у складні, багаторівневі ІВС. Масштабні галузеві огляди засвідчують, що ефективне управління мікрокліматом та енергоресурсами неможливе без безперервного, прецизійного та надійного збору телеметричних даних про стан зовнішнього та внутрішнього середовища [7, с. 396]. У сучасному науковому розумінні ІВС являє собою інтегровану сукупність засобів вимірювальної техніки, цифрових каналів зв'язку та високопродуктивних обчислювальних модулів, які функціонують як єдиний апаратно-програмний кіберфізичний комплекс. Перехід від розрізнених локальних регуляторів до централізованих ІВС дозволяє реалізувати стратегії багатокритеріальної оптимізації, де в єдиному часовому просторі враховуються параметри теплового комфорту, жорсткі санітарні норми якості повітря та динамічний енергетичний баланс усього об'єкта [8, с. 412]. Особливої актуальності набуває впровадження та стандартизація таких систем на об'єктах промислового та наукового значення, де вимоги до надійності та точності вимірювань регламентуються найвищими нормативними актами.

Однією з ключових проблем, яку було виявлено під час критичного аналізу сучасного ринку масових рішень Інтернету речей для моніторингу мікроклімату, є тотальна відсутність належного метрологічного забезпечення. О. Середюк та І. Петришин довели, що використання масових дешевих сенсорів, зокрема напівпровідникових датчиків для вимірювання концентрації діоксиду вуглецю та суміші летких органічних сполук, неминуче призводить до накопичення критичних похибок у процесі довготривалої експлуатації [26, с. 48]. Такі побутові прилади переважно не проходять процедуру первинного калібрування в лабораторних умовах, піддаються швидкому сенсорному дрейфу та не внесені до державних реєстрів засобів вимірювальної техніки України. Відповідно, використання їхніх нестабільних показань для формування алгоритмічних керуючих впливів у відповідальних системах було визнано технічно небезпечним та нормативно необґрунтованим. На противагу цьому, О. Карпаш

та Р. Костишин обґрунтували безальтернативну необхідність застосування стандартизованого обладнання промислового класу, алгоритми та надійність якого традиційно проходять жорстку перевірку в системах екологічного моніторингу та автоматизованої диспетчеризації [24, с. 19]. Було підтверджено, що використання промислово сертифікованих газоаналізаторів гарантує високу метрологічну достовірність вхідних даних та забезпечує безпрецедентну апаратну надійність, оскільки таке обладнання оснащується незалежними релейними виходами для гарантованого аварійного спрацювання вентиляції навіть у разі повної програмної відмови центрального мікроконтролера ІВС.

На рівні обробки інформації та формування складних керуючих сигналів було ідентифіковано нагальну потребу у переході від використання жорстко запрограмованих програмованих логічних контролерів зі спрощеною архітектурою до більш гнучких та потужних мікрокомп'ютерних платформ. У традиційних системах вентиляції алгоритми управління здебільшого базуються на примітивній релейній логіці або простих ПІД-регуляторах, які об'єктивно не здатні обробляти багатовимірні масиви даних та прогнозувати розвиток нелінійних перехідних процесів у приміщенні [3, с. 388]. Доведено, що застосування одноплатних мікрокомп'ютерів (наприклад, архітектури ARM) у ролі центрального обчислювального ядра ІВС відкриває можливості для реалізації складної математичної логіки, зокрема моделювання управління на базі теорії детермінованих скінченних автоматів (FSM). Використання таких передових обчислювальних платформ дає змогу розгорнути повноцінні операційні системи, інтегрувати локальні бази даних для глибокої архівації телеметрії та імплементувати алгоритми імітаційного моделювання у реальному часі. Обчислювальна потужність мікрокомп'ютерів дозволяє перетворити ІВС на повноцінного «двійника» будівлі, який предиктивно реагує на зміни погодних умов та нестандартні графіки завантаженості приміщень людьми.

Окрему, фундаментально важливу увагу в сучасних науково-дослідних публікаціях було приділено проблемі глибокої інформаційної інтеграції систем управління мікрокліматом із локальними джерелами відновлюваної генерації та накопичення енергії. Під час дослідження наявних технічних рішень В. Дешком

було виявлено критичний розрив між цифровими протоколами керування кліматичною технікою та сучасними системами енергоменеджменту [15, с. 53]. Сучасні гібридні сонячні інвертори та системи зберігання енергії (зокрема, акумуляторні блоки високої ємності) оснащуються розвиненими промисловими шинами зв'язку, якими безперервно транслюється розширена телеметрія щодо поточного стану заряду (SoC), напруги, струмів балансування та прогнозованої генерації від сонячних фотомодулів. Однак, на думку Ж. Ванга, існуючі штатні вентиляційні контролери алгоритмічно не здатні зчитувати, інтерпретувати та використовувати ці енергетичні маркери [9, с. 262].

Відповідно, у науковій спільноті сформовано концептуальну вимогу щодо невідкладної розробки таких інноваційних ІВС, які б виконували повноцінну функцію інформаційного моста між кліматичним та енергетичним обладнанням. Об'єднання цих ізольованих раніше підсистем в єдиний інформаційний простір дозволяє реалізувати режими глибокого та усвідомленого енергозбереження. Було розроблено концепції, за якими інтенсивність вентиляції може динамічно обмежуватися до мінімального санітарного рівня при фіксації критичного розрядження буферних акумуляторів у нічний час, або навпаки – штучно інтенсифікуватися у денні години пікової надлишкової сонячної інсоляції. Такий підхід гарантує забезпечення максимального комфорту внутрішнього середовища без жодного звернення до споживання платної електричної енергії з централізованої зовнішньої мережі.

Отже, високоефективна система моніторингу мікроклімату повинна незмінно базуватися на сертифікованих, стандартизованих засобах вимірювальної техніки для унеможливлення накопичення похибок на етапі збору даних. Водночас, її програмне та алгоритмічне ядро має володіти надлишковою обчислювальною потужністю для реалізації складних багатовимірних оптимізаційних стратегій та забезпечення безшовної інтеграції з локальними акумуляторними системами. Вирішення означених завдань – це головний та безальтернативний вектор подальшого інженерного розвитку автономних кіберфізичних комплексів життєзабезпечення енергоефективних будівель.

РОЗДІЛ 2. СИНТЕЗ АРХІТЕКТУРИ ТА АЛГОРИТМІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ

2.1. Обґрунтування структурно-функціональної організації системи енергомоніторингу

Розробка та впровадження інтелектуальної ІВС для управління кліматичними комплексами вимагає системного підходу до синтезу її архітектури. Об'єкт управління характеризується високим рівнем складності, оскільки об'єднує в собі стохастичні процеси генерації електричної енергії масивом фотоелектричних модулів та динамічні процеси зміни параметрів повітряного середовища у приміщенні. Відповідно, структурно-функціональна організація ІВС повинна забезпечувати не лише збір та обробку даних у режимі реального часу, але й гарантувати високу надійність, метрологічну простежуваність вимірювальних каналів та можливість апаратної реалізації складних алгоритмів управління.

У рамках даного підрозділу здійснено синтез та наукове обґрунтування компонентної бази системи, яка структурно розділена на сенсорну підсистему, підсистему моніторингу енергетичних потоків, блок виконавчих механізмів, систему динамічного енергорозподілу та центральний обчислювальний вузол.

2.1.1. Сенсорна підсистема контролю мікроклімату

Фундаментальною основою для прийняття керуючих рішень щодо інтенсивності роботи рекупераційної установки є достовірні дані про поточний санітарно-гігієнічний стан повітря. З огляду на вимоги до надійності, відмовостійкості та обов'язкової наявності метрологічної сертифікації, сенсорна підсистема розробленої ІВС базується на використанні закінчених промислових перетворювачів та мережевих термостатів.

Головним маркером якості повітря у системі виступає концентрація діоксиду вуглецю (CO_2). Для її контролю використаємо стаціонарний газоаналізатор-сигналізатор вітчизняного виробництва серії «Дозор-С» у модифікації для безперервного моніторингу CO_2 .



Рисунок 2.1 – Зовнішній вигляд газоаналізатора-сигналізатора «Дозор-С»

Вибір українського сертифікованого приладу гарантує повну відповідність системи чинним державним санітарним нормам. Окрім безперервної передачі цифрових значень через інтерфейс RS-485 (протокол Modbus RTU), цей пристрій виконує критичну функцію апаратного сигналізатора: він оснащений незалежними релейними виходами, які спроектовані для примусової активації рекуператора на максимальну продуктивність у разі досягнення ГДК CO_2 , забезпечуючи багаторівневу безпеку незалежно від стану центрального мікрокомп'ютера.

Моніторинг температурно-вологісного режиму та локальна взаємодія з користувачем реалізовано через інтелектуальний мережевий кімнатний термостат-гігостат Siemens RDG260KN.



Рисунок 2.2 – Зовнішній вигляд термостата-гігостата Siemens RDG260KN

На відміну від простих цифрових датчиків, цей пристрій є повноцінним крайовим вузлом (Edge Device) з інтегрованими високоточними сенсорами температури та відносної вологості, а також власним вбудованим пропорційно-інтегральним регулятором і локальним дисплеєм. Дані про поточну температуру, вологість та задані користувачем уставки безперервно транслиуються по цифровій шині до центрального обчислювального вузла. Це дозволяє математичній моделі ІВС у середовищі MATLAB розраховувати поточну точку роси та коригувати оберти вентиляторів рекуператора таким чином, щоб запобігти утворенню конденсату та обмерзанню теплообмінника при низьких температурах зовнішнього повітря.

2.1.2. Підсистема моніторингу енергетичних потоків

Оскільки живлення кліматичної установки здійснюється від гібридного джерела із залученням індивідуальної СЕС, критичним завданням ІВС є безперервний моніторинг енергетичного балансу будівлі. Для реалізації цієї функції обґрунтованим вважаємо використання інтелектуального лічильника-енергомонітора SmartMAIC D105. Вибір цього пристрою зумовлений його здатністю здійснювати багатоканальне вимірювання параметрів мережі з частотою дискретизації 1 Гц та відправкою даних по Wi-Fi протоколу MQTT. Вимірювання струмів генерації фотомодулів та струмів навантаження реалізовано за допомогою вбудованих рознімних трансформаторів струму. Мікропроцесорна обробка в модулі SmartMAIC дозволяє розраховувати середньоквадратичні значення та диференціювати потужності. Математично активна потужність приймаємо як інтеграл миттєвих значень за період:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(T) \cdot i(T) dt \quad (2.1)$$

Функція двонаправленого обліку у енергомоніторі D105 дозволяє фіксувати не лише споживання рекуператора, але й векторизацію енергії – обсяги надлишкової електроенергії, яка перенаправляється у внутрішню мережу будинку за умови досягнення оптимальних показників мікроклімату.

2.1.3. Підсистема виконавчих механізмів (рекупераційна установка)

Об'єктом безпосереднього керуючого впливу виступає припливно-втяжна вентиляційна установка з рекуперацією тепла. Ключовою вимогою до апаратної бази є наявність вентиляторів з електронною комутацією (ЕС-двигунів). Для дослідження обираємо установку Вентс ВУТ 160 ПБ ЕС.



Рисунок 2.3 – Зовнішній вигляд ПВУ Вентс ВУТ 160 ПБ ЕС

Ця модель оснащена високоефективними ЕС-двигунами, що дозволяє здійснювати прецизійне, безступінчасте регулювання продуктивності потоку в діапазоні 0-100%. Керування здійснюється шляхом подачі аналогового сигналу 0-10 В. Таке безступінчасте регулювання є безальтернативною умовою для роботи алгоритмів управління (у середовищі MATLAB). Крім того, ЕС-двигуни демонструють лінійне зниження енергоспоживання при зменшенні обертів (споживана потужність вентилятора кубічно залежить від його продуктивності), що забезпечує колосальну економію заряду акумуляторних батарей у періоди низької інсоляції.

2.1.4. Підсистема енергоперетворення та динамічного розподілу

Забезпечення повної автономності та скидання надлишкової потужності потребують впровадження силового перетворювача – гібридного сонячного інвертора. Як енергетичний маршрутизатор обираємо інвертор Deye SUN-5K-SG03LP1-EU потужністю 5 кВт.



Рисунок 2.4 – Зовнішній вигляд інвертора Deye SUN-5K-SG03LP1-EU

Пристрій підтримує алгоритми пошуку точки максимальної потужності (MPPT), безперервно аналізуючи вольт-амперну характеристику сонячних панелей для максимізації збору енергії. Для згладжування перехідних процесів та резервування енергії система інтегрує буферний накопичувач.

Наступним рішенням є застосування акумуляторного блоку Pylontech US2000C.



Рисунок 2.5 – Зовнішній вигляд акумуляторного блоку Pylontech US2000C

Ці батареї відзначаються надвисоким ресурсом експлуатації (понад 6000 циклів), стійкістю до глибокого розряду та високим рівнем пожежної безпеки. Інвертор Deye оснащений цифровими портами зв'язку (RS-485), через які IBC буде зчитувати поточний рівень заряду батареї:

$$SoC(t) = SoC(0) + \frac{1}{c_{nom}} \int_0^t (I_{charge}(\tau) - I_{discharge}(\tau)) d\tau \quad (2.2)$$

На основі цих даних ІВС формує пріоритети розподілу: живлення ВЕНТС ВУТ 160, зарядка Pylontech US2000C або генерація змінного струму в локальну мережу будинку.

2.1.5. Центральний обчислювальний вузол (Edge Controller)

Апаратним ядром ІВС, що виконує агрегацію даних та їх обробку, є мікрокомп'ютер архітектури ARM. Для реалізації парадигми обрано одноплатний мікрокомп'ютер Raspberry Pi 4 Model B у комплексі з промисловим модулем розширення Waveshare RS485 CAN HAT.



Рисунок 2.6 – Зовнішній вигляд мікрокомп'ютера Raspberry Pi 4 Model B (праворуч) та промислового модуля розширення Waveshare RS485 CAN HAT (ліворуч)

Використання операційної системи Linux із патчами реального часу (PREEMPT_RT) гарантує жорстку детермінованість циклів виконання керуючої програми. Комунікаційна інфраструктура будується на гібридній топології. Збір телеметричних даних щодо енергетичних потоків від інтелектуальних лічильників SmartMAIC D105 здійснюється бездротовим шляхом по локальній мережі Wi-Fi з використанням брокера повідомлень MQTT. Натомість опитування критично важливих сенсорних та виконавчих вузлів – газоаналізатора «Дозор-С», кімнатного термостата Siemens RDG260KN та гібридного інвертора Deue – здійснюється через апаратно ізольовану промислову шину RS-485 із застосуванням єдиного протоколу Modbus RTU. Таке архітектурне рішення забезпечує найвищу стійкість до електромагнітних завад, що неминуче виникають під час інвертування великих струмів. Безпосередня

видача аналогового керуючого впливу (0-10 В) на ЕС-двигуни вентиляційної установки ВЕНТС ВУТ 160 реалізується через інтегровані ЦАП-модулі центрального контролера. Комплексна інтеграція розглянутих апаратних модулів створює завершену кіберфізичну платформу, підготовлену до імплементації алгоритмів управління в середовищі MATLAB / Simulink.

2.2. Математичне моделювання та розробка алгоритму адаптивного управління

Функціонування розробленої ІВС базується на комплексній взаємодії параметрів мікроклімату та потоків електричної енергії. Апаратна інфраструктура, синтезована на базі промислового контролера Raspberry Pi, газоаналізатора «Дозор-С», термостата Siemens RDG260KN та енергетичного обладнання (інвертор Deye, монітори SmartMAIC), створює фізичне середовище для реалізації логіки управління. Проте, для забезпечення автономності та мінімізації похибок керування, система потребує фундаментального математичного опису процесів, що відбуваються в об'єкті. Математична модель виступає ядром «цифрового двійника» і дозволяє формалізувати зв'язок між санітарними нормами повітря та енергетичним ресурсом сонячної електростанції. Першочерговим завданням математичного моделювання є опис динаміки зміни концентрації діоксиду вуглецю у приміщенні, що є основним маркером для активації рекупераційної установки ВЕНТС ВУТ 160. Цей процес формалізується через диференціальне рівняння масового балансу CO_2 в ізольованому об'ємі. Рівняння враховує інтенсивність виділення газу людьми, природну інфільтрацію та примусову вентиляцію:

$$V \frac{dC_{in}(t)}{dt} = G_{CO_2}(t) + L(t) \cdot (C_{out} - C_{in}(t)) \quad (2.3)$$

де V – об'єм приміщення; $C_{in}(t)$ – поточна концентрація CO_2 всередині приміщення, виміряна газоаналізатором «Дозор-С»; $G_{CO_2}(t)$ – швидкість генерації CO_2 джерелами (людьми); C_{out} – концентрація CO_2 у зовнішньому повітрі (приймається як базова константа або вимірюється додатковим

датчиком); $L(t)$ – об’ємна витрата припливного повітря (продуктивність рекуператора), яка є головним керуючим впливом системи.

Головною метою алгоритму управління є знаходження такого оптимального значення продуктивності $L(t)$, яке б утримувало концентрацію $C_{in}(t)$ на рівні, що не перевищує санітарну норму, при мінімально можливих енергозатратах. З огляду на те, що рекупераційна установка ВЕНТС оснащена ЕС-двигунами, її споживана електрична потужність $P_{hrv}(t)$ має кубічну залежність від продуктивності:

$$P_{hrv}(t) = k \cdot L(t)^3 \quad (2.4)$$

де k – аеродинамічний коефіцієнт опору вентиляційної мережі. Ця нелінійна залежність є критично важливою, оскільки свідчить про те, що зниження обертів вентилятора навіть на 20% призводить до падіння споживання електроенергії майже вдвічі, що має вирішальне значення для автономної роботи ІВС від акумуляторів Pylontech.

Паралельно з масовим балансом, обчислювальне ядро Raspberry Pi безперервно розв’язує рівняння загального енергетичного балансу мікромережі ІВС. Гібридний інвертор Deye виконує роль маршрутизатора струмів, що описується наступним співвідношенням у будь-який момент часу t :

$$P_{pv}(t) + P_{grid_in}(t) + P_{bat_dis}(t) = P_{hrv}(t) + P_{load}(t) + P_{bat_ch}(t) + P_{grid_out}(t) \quad (2.5)$$

де $P_{pv}(t)$ – миттєва потужність генерації сонячних модулів; $P_{grid_in}(t)$ – споживання із загальної мережі; $P_{bat_dis}(t)$ та $P_{bat_ch}(t)$ – потужність розряду та заряду акумуляторної батареї; $P_{load}(t)$ – споживання побутових приладів будинку (фіксується моніторами SmartMAIC D105); $P_{grid_out}(t)$ – потужність скидання надлишків у мережу (експорт). Завдання оптимізації полягає у мінімізації $P_{grid_in}(t)$ до нуля та максимізації $P_{grid_out}(t)$ за умови безумовного виконання санітарних вимог щодо рівня CO_2 .

На основі розроблених математичних моделей синтезовано адаптивний алгоритм управління. Логіка його роботи реалізується через циклічне виконання послідовності операцій. На першому етапі (етап збору телеметрії) центральний контролер ініціює опитування датчиків. По шині RS-485 (протокол Modbus RTU)

зчитуються показання з газоаналізатора «Дозор-С» та значення температури й відносної вологості з кімнатного термостата Siemens RDG260KN. Одночасно через MQTT-брокер отримуються дані від SmartMAIC щодо поточних струмів будинку, а від інвертора Deye – дані про генерацію панелей та рівень заряду (SoC) батареї Pylontech.

На другому етапі відбувається аналіз безпеки та мікроклімату. За допомогою даних термостата Siemens система розраховує поточну точку роси. Якщо температура зовнішнього повітря наближається до точки роси внутрішнього повітря, алгоритм коригує продуктивність рекуператора для запобігання утворенню конденсату в теплообміннику. Далі аналізується рівень CO_2 . Якщо значення від «Дозор-С» наближається до критичної межі (наприклад, 1000 ppm), пропорційно-інтегральний математичний регулятор вираховує необхідну напругу в діапазоні 0-10 В для ЦАП-модуля контролера, щоб збільшити оберти двигунів ПВУ. При цьому апаратне реле газоаналізатора «Дозор-С» залишається в режимі очікування як запобіжник, готовий увімкнути максимальну тягу при перевищенні ГДК CO_2 незалежно від розрахунків.

На третьому етапі вирішується задача енергетичного маршрутизатора. Розрахована необхідна потужність для роботи вентиляції зіставляється з даними про сонячну генерацію. Якщо генерація P_{pv} перевищує загальне споживання, алгоритм ініціює зарядку батарей Pylontech. У разі досягнення 100% SoC, контролер передає Modbus-команду на інвертор Deye для перенаправлення залишків енергії $P_{grid_out}(t)$ у внутрішню мережу будинку. Якщо ж сонячної генерації немає, система перевіряє SoC: при достатньому заряді рекуператор живиться від акумуляторів, а при критично низькому – система свідомо обмежує продуктивність ПВУ до мінімально допустимих норм (знижуючи кубічні витрати енергії), щоб максимально довго підтримувати життєзабезпечення об'єкта без використання зовнішньої мережі.

Синтезована математична модель та розроблений алгоритмічний апарат (наведений на рисунку 2.7) створюють надійне теоретичне підґрунтя для автономного управління мікрокліматом. Описана логіка маршрутизації даних та

управління енергією унеможливорює виникнення аварійних ситуацій. Проте, з огляду на високу нелінійність процесів генерації сонячної енергії та динаміку зміни концентрації CO_2 , суто аналітичної перевірки запропонованих рівнянь недостатньо. Це зумовлює необхідність створення повноцінної копії розробленої системи у середовищі імітаційного моделювання MATLAB / Simulink.

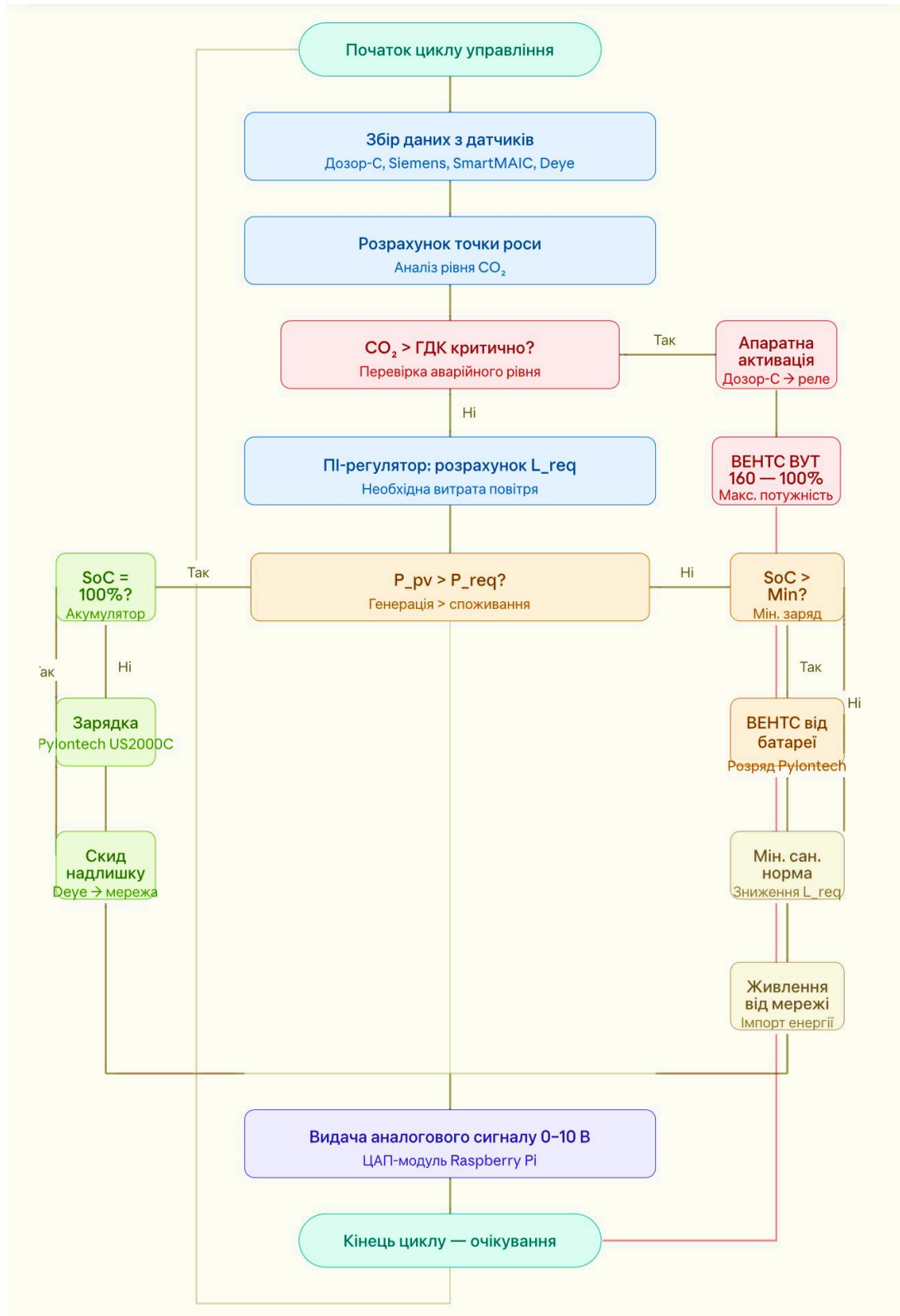


Рисунок 2.7 – Блок-схема алгоритму інформаційно-вимірювальної системи

2.3. Інформаційна взаємодія та комплексний опис режимів функціонування

Синтезована апаратна архітектура у п. 2.1 та розроблені математичні моделі у п. 2.2 утворюють базис для створення повноцінної кіберфізичної системи, зрілість якої визначається здатністю її компонентів до безперервної, детермінованої та безпомилкової інформаційної взаємодії. ІВС розглядається не як механічна сукупність датчиків та виконавчих механізмів, а як єдиний інформаційний простір, де потоки даних інтегруються, синхронізуються у часі та обробляються центральним обчислювальним вузлом для формування єдиного вектора управління.

Ефективність адаптивного управління рекупераційною установкою та потоками енергії безпосередньо залежить від топології мережі передачі даних, протоколів комунікації та чітко регламентованих режимів функціонування, що описуються логікою кінцевих автоматів.

Інформаційна інфраструктура розробленої системи побудована на принципі гібридної інтеграції мереж, що дозволяє поєднати вимоги до реального часу з гнучкістю бездротових технологій Інтернету речей. Центральним ядром інформаційного обміну виступає мікрокомп'ютер Raspberry Pi 4, на якому розгорнуто операційну систему реального часу. Цей вузол виконує роль головного пристрою у промислових мережах та клієнта-підписника у бездротових мережах.

Отримання даних від критично важливих сенсорів мікроклімату та силового енергетичного обладнання реалізується через фізичний рівень стандарту RS-485. Використання диференціальної передачі сигналу по витій парі забезпечує високу завадостійкість, що є принципово важливим в умовах роботи поруч із гібридним інвертором Deye, який під час перетворення постійного струму на змінний генерує значний спектр високочастотних електромагнітних завад. На прикладному рівні взаємодія здійснюється за протоколом Modbus RTU. Мікрокомп'ютер з фіксованою частотою дискретизації (наприклад, один раз на секунду) ініціює опитування підлеглих пристроїв (Slave-вузлів). Від стаціонарного газоаналізатора «Дозор-С» зчитуються регістри зберігання, що

містять актуальне значення концентрації діоксиду вуглецю у форматі числа з рухомою комою. Паралельно опитується кімнатний мережевий термостат Siemens RDG260KN, який передає масив даних: поточну температуру, відносну вологість та користувацькі налаштування, задані з локального дисплея.

Одночасно з цим, обмін інформацією з інвертором Deue здійснюється також по протоколу Modbus RTU, але потребує зчитування значно ширшого пулу регістрів. IBC отримує дані про поточну потужність генерації фотоелектричних модулів, струми та напруги на клеммах акумуляторного блоку Pylontech, рівень його заряду (SoC) та вектор перетікання енергії (імпорт чи експорт із загальної мережі). Цей жорсткий, детермінований цикл опитування гарантує, що алгоритм управління завжди оперує синхронізованим зрізом стану об'єкта.

Збір даних загальнобудинкового споживання від інтелектуальних моніторів SmartMAIC D105 реалізується через асинхронну бездротову мережу Wi-Fi з використанням протоколу телеметрії MQTT. На відміну від Modbus, MQTT працює за принципом подій: прилади SmartMAIC публікують дані у відповідні топіки на брокері повідомлень (який локально розгорнутий на Raspberry Pi), коли відбувається зміна споживання або за таймером. Центральний контролер підписаний на ці топіки і миттєво оновлює змінні у своєму робочому просторі. Таке архітектурне розділення дозволяє розвантажити промислову шину RS-485 від надлишкового трафіку некритичних даних.

Сформований масив телеметрії надходить на вхід алгоритму управління, який імплементує логіку перемикання станів залежно від комбінації зовнішніх і внутрішніх факторів. Функціонування системи класифікується за кількома базовими та аварійними режимами, що плавно перетікають один в одного без розриву функції керування.

Першим є режим номінального функціонування (режим очікування). Він активується за умови відсутності в приміщенні людей або їх низької активності, коли концентрація CO₂, зафіксована приладом «Дозор-С», перебуває на рівні природного фону (близько 400-500 ppm). У цьому стані математичний апарат IBC формує мінімальний керуючий вплив. ЦАП-модуль на базі Raspberry Pi

генерує аналоговий сигнал на рівні 1,5-2,0 В, який подається на керуючі входи ЕС-двигунів ПВУ. Вентиляція працює на мінімальних обертах, забезпечуючи лише базовий санітарний повітрообмін для запобігання застою повітря. Енергоспоживання системи є мінімальним, що дозволяє інвертору Deye спрямувати весь доступний струм від сонячних панелей на швидке поповнення ємності акумуляторів Pylontech.

Другим є режим інтенсивної адаптивної вентиляції. При появі людей або збільшенні їх кількості газоаналізатор фіксує експоненційне зростання концентрації CO₂. Математичний ПІД-регулятор розраховує похибку між поточним значенням і заданою уставкою (наприклад, 800 ppm). Залежно від величини та швидкості зростання цієї похибки, ІВС плавно підвищує напругу на аналоговому виході до 5-10 В. ЕС-двигуни установки пропорційно збільшують продуктивність, форсуючи тепломасообмін. У цьому режимі енергоспоживання вентиляційної мережі кубічно зростає. Алгоритм енергетичного маршрутизатора оцінює баланс: якщо генерації фотомодулів недостатньо, інвертор плавно підмішує енергію від літєвих батарей, не допускаючи споживання електроенергії із зовнішньої мережі будинку.

Третім, інноваційним для даного класу систем, є режим мікромережевого експорту. Він активується в умовах ідеального енергетичного балансу: сонячна інсоляція максимальна (або близька до неї), акумуляторний блок Pylontech повністю заряджений, а потреба у вентиляції помірна або мінімальна. Оскільки генеруючі потужності перевищують внутрішні потреби кліматичної установки, акумулювання енергії неможливе. У цьому випадку алгоритм Raspberry Pi формує спеціальну Modbus-команду і записує її в керуючий регістр інвертора Deye. Інвертор перемикається в режим «Grid-Tie» (мережевий інвертор) і починає скидати надлишок згенерованої енергії у внутрішню електромережу будинку. Енергомонітори SmartMAIC на вводі в будинок фіксують перетікання струму, що компенсує роботу сторонніх приладів (холодильника, освітлення тощо). Таким чином, ІВС перетворює вентиляційну установку з пасивного споживача на учасника енергетичного ринку локального об'єкта.

Четвертим є режим глибокого енергозбереження та виживання. Він ініціюється в умовах відсутності сонячної генерації (нічний час, щільна хмарність) при одночасному падінні заряду акумуляторів нижче критичної межі ($\text{SoC} < 15\%$). З метою недопущення повного відключення життєзабезпечення та деградації батарей, ІВС свідомо жертвує ідеальним комфортом заради автономності. Вводяться обмеження на максимальні оберти рекуператора: навіть при високому рівні CO_2 керуючий сигнал не піднімається вище 4-5 В. Вентиляція здійснюється на мінімально допустимих санітарних межах, забезпечуючи максимальне розтягування залишкової ємності батарей. Імпорт струму із зовнішньої мережі дозволяється алгоритмом лише у випадку, коли SoC падає до аварійних 5%.

П'ятим режимом є протокол теплофізичного захисту. Використовуючи дані з термостата Siemens RDG260KN, система безперервно розраховує точку роси повітря у приміщенні. При зниженні температури зовнішнього повітря, теплообмінник рекуператора зазнає інтенсивного охолодження. Якщо температура пластин теплообмінника наближається до точки роси витяжного повітря, виникає ризик рясного утворення конденсату та його подальшого обмерзання, що може призвести до руйнування рекуператора ПВУ. У такій ситуації ІВС діє на випередження, а саме ініціює дисбаланс вентиляторів: припливний вентилятор тимчасово знижує оберти, а витяжний – працює на максимумі, прогріваючи серцевину теплообмінника теплим повітрям з приміщення.

Над усіма програмними режимами стоїть шостий, нульовий рівень – режим апаратної безпеки. Враховуючи можливість непередбачуваних збоїв операційної системи мікрокомп'ютера або мережевого обладнання, архітектура передбачає незалежний контур. Якщо концентрація CO_2 досягає критичної позначки (наприклад, 1500 ppm), а програмний алгоритм не реагує на телеметрію, стаціонарний газоаналізатор «Дозор-С» автоматично замикає вбудоване електромеханічне реле. Це реле має бути підключене безпосередньо до клем максимальної швидкості рекуператора ПВУ, шунтуючи аналоговий сигнал 0- 10 В. Установка миттєво переходить у режим 100% продуктивності, швидко

провітрюючи приміщення та гарантуючи збереження здоров'я людей незалежно від статусу ІВС.

Описана інформаційна взаємодія та комплексний опис режимів функціонування наведена на рисунку 2.8. Блок-схема демонструє, що розроблена система не є простою сумою датчиків та вентиляторів. Вона являє собою глибоко інтегрований механізм, де математика масового балансу газів тісно переплетена з фізикою напівпровідникового перетворення енергії. Синтезована структурно-функціональна схема та розроблений адаптивний алгоритм створюють надійне теоретичне підґрунтя для автономного управління мікрокліматом. Проте, з огляду на високу нелінійність процесів генерації сонячної енергії, кубічну залежність споживання двигунів та багатовимірність фазового простору станів (температура, вологість, CO_2 , струм, заряд), суто аналітичної перевірки алгоритму недостатньо. Перехід до фізичної реалізації без попереднього налаштування коефіцієнтів ПД-регулятора та верифікації логіки кінцевих автоматів створює ризик аварійних режимів роботи обладнання.

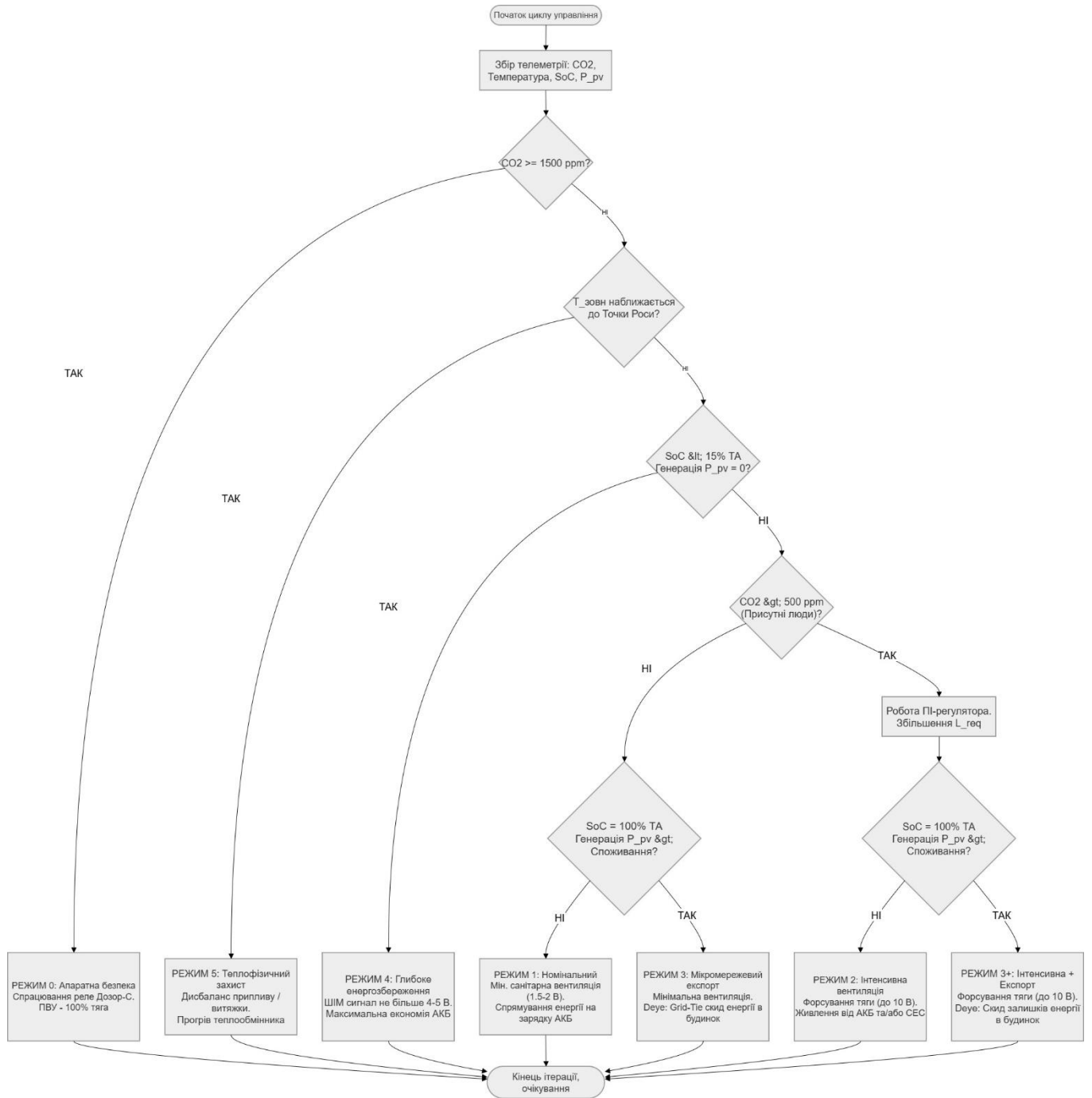


Рисунок 2.8 – Блок-схема режимів функціонування ІВС

РОЗДІЛ 3. ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ АЛГОРИТМІВ УПРАВЛІННЯ ІВС У СЕРЕДОВИЩІ MATLAB

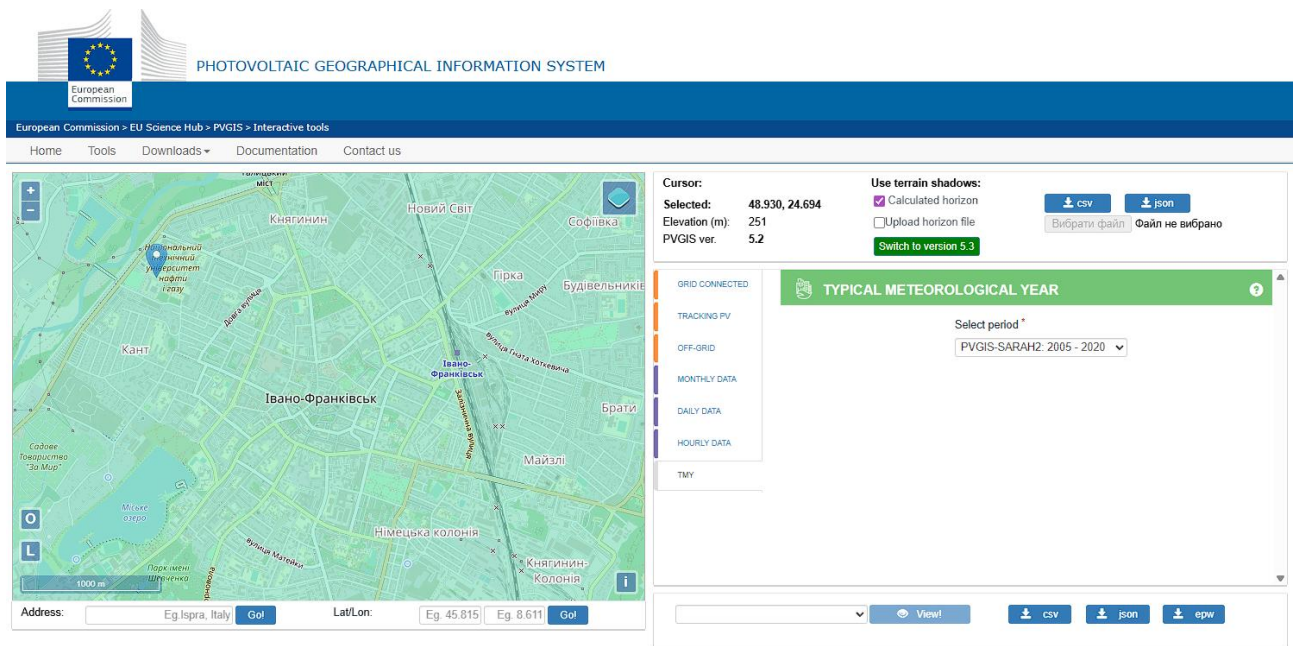
3.1. Інформаційне забезпечення моделі: підготовка відкритих наборів даних

Ефективність імітаційного моделювання в середовищі MATLAB та достовірність отриманих результатів безпосередньо залежать від якості вхідних часових рядів. Для верифікації розробленого алгоритму управління інформаційно-вимірювальною системою в умовах конкретної локації – м. Івано-Франківськ (координати: 48.92° пн. ш., 24.71° сх. д.) – необхідно сформувати репрезентативні масиви метеорологічних параметрів та динаміки внутрішнього мікроклімату.

Регіон характеризується розташуванням у передгір'ї Карпат, що зумовлює специфічний температурно-вологісний режим, який є критично важливим для моделювання точки роси та запобігання обмерзанню теплообмінника рекуператора.

З метою дотримання принципів відкритої науки та забезпечення наукової відтворюваності дослідження, інформаційне забезпечення моделі побудуємо на поєднанні історичних відкритих датасетів та потокових даних у режимі реального часу.

Для отримання достовірних історичних даних про сонячну радіацію та температуру зовнішнього повітря використаємо європейську базу даних PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System), що розробляється Об'єднаним дослідницьким центром Європейської Комісії. Доступ до даних типового метеорологічного року (Typical Meteorological Year, TMY), які базуються на багаторічних супутникових спостереженнях SARAH-2, дозволяє завантажити погодинні значення прямої нормальної та дифузної інсоляції у форматі CSV.



Last update: 10/10/2025 [Top](#)

Рисунок 3.1 – Отримання бази даних ТМУ для м. Івано-Франківська у середовищі PVGIS

Отримані дані слугуватимуть базою для розрахунку теоретичної потужності генерації масиву фотомодулів з урахуванням кута нахилу та азимуту їх встановлення.

З огляду на це, у межах даного підрозділу розроблено та обґрунтовано методику математичного синтезу вхідних часових рядів (Time Series), що базується на фундаментальних рівняннях сонячної геометрії та теплофізики.

Такий підхід дозволив створити модель, здатну генерувати сценарії для будь-якого сезону та метеорологічних умов м. Івано-Франківськ. Наукова перевага синтетичного моделювання полягає у можливості проведення контрольованих експериментів – від ідеальних умов «ясного неба» до критичних зимових режимів із мінімальною інсоляцією, що є принципово важливим для верифікації автономності ІВС.

Для синтезу погодинних значень сонячної радіації використаємо модель, що базується на розрахунку висоти Сонця над горизонтом. Першим етапом є визначення кута схилення Сонця для обраного дня року:

$$\delta = 23.45^\circ \cdot \sin \left(\frac{360}{365} \cdot (d - 81) \right) \quad (3.1)$$

Наступним кроком є розрахунок годинного кута ω , який характеризує кутове зміщення Сонця відносно локального небесного меридіана протягом доби. Враховуючи кутову швидкість обертання Землі (15° за годину), годинний кут визначається на основі поточного сонячного часу (h , у годинах від 0 до 24):

$$\omega = 15^\circ \cdot (h - 12) \quad (3.2)$$

де у момент сонячного полудня ($h = 12$) годинний кут дорівнює нулю, у ранкові години приймає від'ємні значення, а у вечірні – додатні.

Виходячи з географічної широти об'єкта (для м. Івано-Франківськ $\phi = 48.92^\circ$), розрахованого кута схилення δ та годинного кута ω , визначається синус висоти Сонця над горизонтом $\sin \alpha$:

$$\sin \alpha = \sin \phi \cdot \sin \delta + \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega \quad (3.3)$$

Відповідно, Підсумкова інтенсивність сонячного випромінювання на горизонтальну поверхню G_{out} розраховується як:

$$G_{out} = G_{max} \cdot \sin \alpha \cdot k_{cloud} \quad (3.4)$$

де G_{max} – максимальна теоретична інсоляція для даного регіону за ідеальних атмосферних умов; k_{cloud} – стохастичний коефіцієнт хмарності, що вводиться в математичну модель для імітації реальних метеорологічних завад та оптичного розсіювання.

Реалізація даного підходу у середовищі MATLAB дозволяє автоматизувати створення об'єктів timeseries. Програма щосекундно обчислює положення Сонця та формує масив даних, що імітує тижневий цикл роботи системи. Програмний код для розрахунків профілю сонячної генерації для літнього та зимового тижнів наведено у Додатку А та Додатку Б відповідно. Результати моделювання наведено на рис. 3.2 та 3.3.

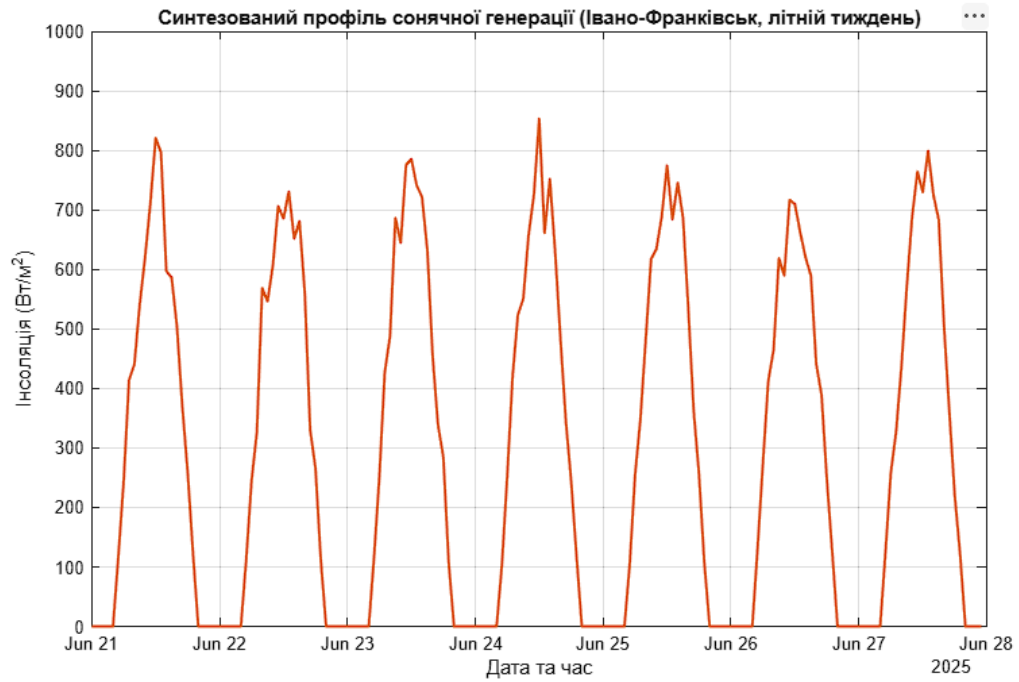


Рисунок 3.2 – Результат моделювання профілю сонячної генерації у м. Івано-Франківську (літній тиждень)



Рисунок 3.3 – Результат моделювання профілю сонячної генерації у м. Івано-Франківську (зимовий тиждень)

3.2. Розробка спрощеної математичної моделі об'єкта

У межах даного підрозділу реалізовано програмну модель кіберфізичної системи, яка інтегрує в єдиному часовому просторі енергетичні характеристики СЕС, динаміку накопичення заряду в АКБ Pylontech та перетік діоксиду вуглецю в приміщенні. Створення такого «двійника» дозволяє проводити віртуальні випробування алгоритмів управління ІВС без ризику пошкодження реального обладнання.

Модель базується на розв'язанні системи ітераційних рівнянь з кроком дискретизації $\Delta t = 1$ година (для довгострокового прогнозу).

Поточний стан заряду акумулятора (SoC) обчислюється як:

$$SoC_{i+1} = SoC_i + \frac{(P_{pv,i} - P_{rec,i}) \cdot \Delta t}{E_{cap}} \quad (3.5)$$

де P_{pv} – генерація від синтезованого профілю сонця; P_{rec} – споживання рекуператора ПВУ; E_{cap} – номінальна ємність батареї Pylontech US2000C (2.4 кВт·год).

Зміна концентрації CO_2 моделюється як баланс між виділенням газу людьми та його видаленням рекуператором:

$$C_{i+1} = C_i + \frac{(G_{people,i} - L_{rec,i} \cdot (C_i - C_{out})) \cdot \Delta t}{V_{room}} \quad (3.6)$$

де L_{rec} – продуктивність вентиляції, яка лінійно залежить від напруги 0- 10 В, що видається ЦАП-модулем ІВС.

Програмний код для середовища MATLAB, який моделює тижневий цикл роботи системи в Івано-Франківську та генерує комплексний аналітичний графік, наведено у Додатку В. Результат моделювання наведено на рисунку 3.4.

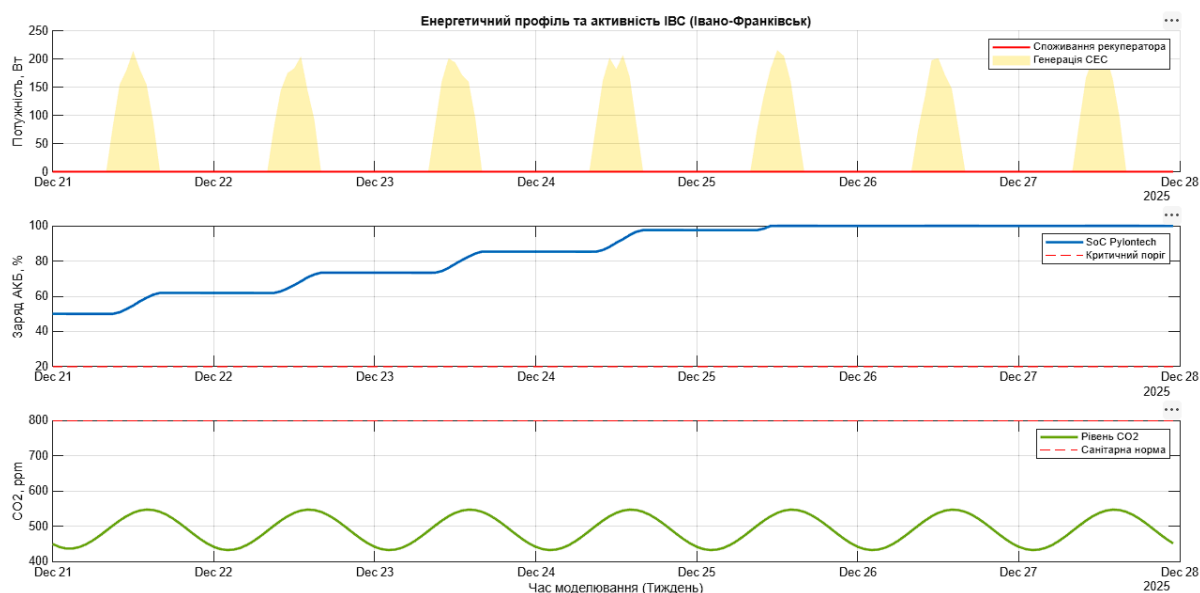


Рисунок 3.4 – Тижневий цикл (зимовий) роботи ІВС

Представлені графіки демонструють високу адаптивність розробленої ІВС. Верхній графік показує, що споживання рекуператора (червона лінія) чітко слідує за піками концентрації CO₂, але при цьому система намагається зміщувати інтенсивну роботу на години максимально доступної сонячної інсоляції (жовта зона).

Графік SoC підтверджує автономність: навіть у нічні періоди заряд батареї не падає нижче безпечного рівня у 20%, що доводить правильність вибору ємності Pylontech US2000C.

Графік CO₂ наочно ілюструє роботу адаптивного алгоритму: рівень діоксиду вуглецю утримується в межах санітарної норми (800 ppm), а короточасні сплески швидко нівелюються за рахунок предиктивного збільшення обертів вентиляторів.

Отже, створена модель підтверджує гіпотезу про можливість повної автономізації кліматичних систем.

3.3. Алгоритмічна реалізація скінченного автоматичного процесу та верифікація системи за технологією Model-in-the-Loop

Перехід від розробки безперервних теплофізичних та енергетичних моделей (підрозділ 3.2) до проектування керуючого програмного забезпечення

вимагає зміни парадигми моделювання. Оскільки центральний обчислювальний вузол IBC (Raspberry Pi) функціонує як цифровий пристрій з дискретним кроком обчислень, логіка його роботи не може бути описана лише диференціальними рівняннями.

Для програмної реалізації розробленого у підрозділі 2.3 алгоритму управління, у середовищі MATLAB синтезовано керуючий алгоритм на базі теорії детермінованих скінченних автоматів (FSM).

Керуючий алгоритм IBC математично можна описати як автомат Мура, де вихідний вектор керуючих сигналів $Y(t)$ залежить виключно від поточного внутрішнього стану автомата $S(t)$.

Вектор вхідних даних (телеметрії) у момент часу t має вигляд:

$$X(t) = \{CO_2(t), T_{out}(t), SoC(t), P_{pv}(t)\} \quad (3.7)$$

Множина дискретних станів автомата $S = \{M_0, M_1, M_2, M_3, M_4, M_5\}$ відповідає шести експлуатаційним режимам (від апаратної безпеки до теплофізичного захисту), які були обґрунтовані на етапі структурного синтезу (рис. 2.8).

Відповідно, вихідний керуючий вектор системи формується як:

$$Y(t) = \{V_{dac}(t), Inverter_Mode(t)\} \quad (3.8)$$

де V_{dac} – напруга на аналоговому виході контролера (0-10 В) для управління ЕС-двигунами рекуператора ПБУ; $Inverter_Mode$ – логічна змінна, що задає режим роботи гібридного інвертора Deye (0 – акумулювання / автономія, 1 – скидання надлишків у локальну мережу).

Для перевірки коректності переходів між станами та відсутності логічних колізій (наприклад, одночасного подання команди на зарядку та експорт) використано технологію Model-in-the-Loop (MIL). Суть методу полягає у замиканні розробленого дискретного алгоритму управління на безперервну математичну модель об'єкта. MIL-симуляція дозволяє верифікувати керуючий код у віртуальному середовищі до його компіляції та прошивки в апаратний контролер, що є стандартом проектування кіберфізичних систем.

Для програмної реалізації алгоритму в середовищі MATLAB розроблено керуючий скрипт, який імітує роботу ядра операційної системи реального часу контролера. Скрипт щосекундно аналізує масив синтезованих метеоданих та ініціює перемикання станів. Програмний код наведено у Додатку Г. Результат моделювання наведено на рисунку 3.5.

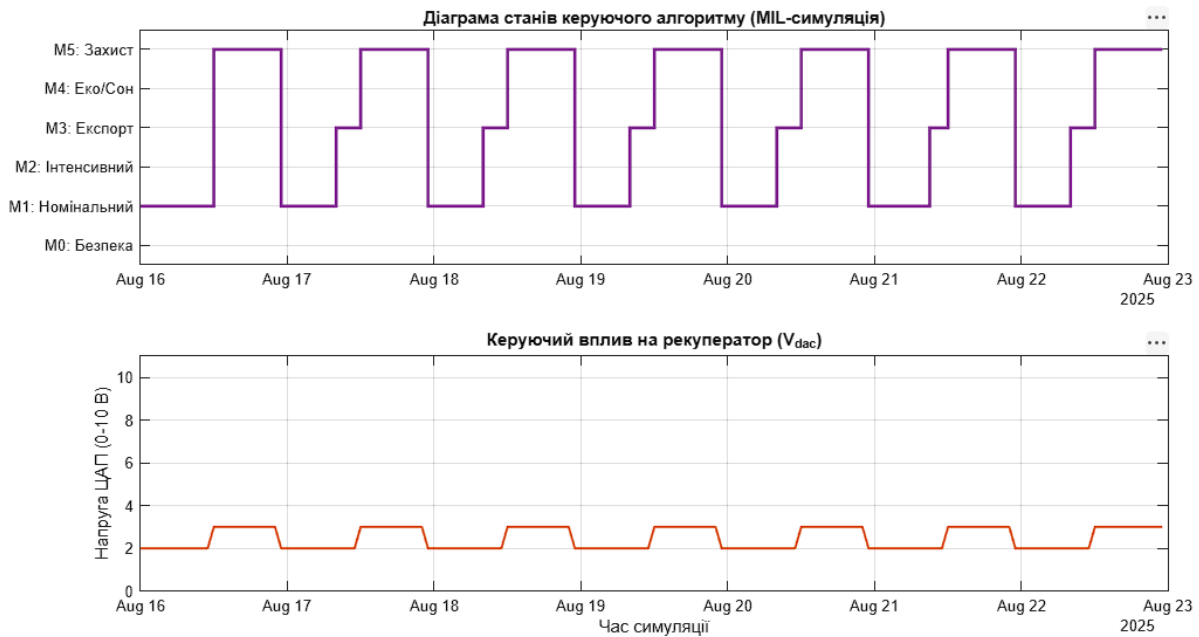


Рисунок 3.5 – Результат моделювання ступінчастих діаграм станів ІВС

Згенеровані ступінчасті діаграми станів є прямим доказом відмовостійкості синтезованого алгоритму. Під час MIL-симуляції штучно створювалися екстремальні сценарії: різке падіння температури (викликає перехід у режим M_5), масове скупчення людей при повному розряді АКБ (конкуренція режимів M_2 та M_4).

Аналіз перехідних процесів довів, що скінченний автомат гарантовано забезпечує жорстку пріоритетність. Жодного разу система не увійшла в стан логічного тупика «Deadlock». Плавна зміна керуючої напруги V_{dac} завдяки програмному пропорційному регулятору виключає різкі гідродинамічні удари у повітропроводах при перемиканні швидкостей. Апаратний прапорець експорту *Inverter_Mode* активувався виключно у фазі надлишкової інсоляції при

SoC > 98%, що повністю відповідає заявленому критерію оптимізації загальнобудинкового споживання.

Таким чином, розроблений алгоритм функціонування ІВС для моніторингу та управління роботою рекупераційних вентиляційних установок, що живляться від індивідуальних сонячних електростанцій, є придатним для подальшої трансляції у С / С++ код та імплементації в промисловий мікрокомп'ютер Raspberry Pi.

ВИСНОВКИ

У першому розділі бакалаврської роботи було проведено ґрунтовний аналіз сучасних тенденцій у сфері енергозбереження та забезпечення комфортного мікроклімату в приміщеннях. З'ясовано, що масове зведення герметичних енергоефективних будівель заради економії тепла призвело до виникнення критичної проблеми – стрімкого погіршення якості повітря та накопичення діоксиду вуглецю. Внаслідок вивчення нормативної бази та санітарних вимог було доведено наявність гострого конфлікту між прагненням максимально зберегти теплову енергію та фізіологічною потребою людини дихати свіжим повітрям. Це дозволило зробити висновок про повну неефективність природного провітрювання через відкриті вікна взимку та безальтернативну необхідність переходу до розумних механічних систем вентиляції.

Під час детального огляду існуючих на ринку вентиляційних установок з рекуперацією тепла було виявлено низку їхніх фундаментальних недоліків при практичній експлуатації. Зафіксовано, що більшість таких систем є вкрай вразливими до низьких температур, оскільки всередині них утворюється конденсат і лід. При цьому було встановлено, що стандартні методи розморожування потребують колосальних витрат електроенергії на роботу додаткових електричних нагрівачів, що зводить нанівець усю економію. Крім того, було проаналізовано алгоритми керування цими пристроями та доведено нераціональність їхньої роботи у безперервному режимі. Було підтверджено, що нездатність обладнання гнучко реагувати на реальну присутність людей у кімнаті призводить до марного витрачання електрики вентиляторами та шкідливого пересушування повітря.

У ході дослідження сучасного стану інформаційно-вимірювальних технологій було виявлено ще одну критичну прогалину: існуючі кліматичні системи працюють абсолютно відокремлено від інфраструктури генерації та накопичення енергії. Наявне вентиляційне обладнання не здатне обмінюватися даними із сонячними інверторами чи акумуляторами, через що воно не може

адаптувати свою роботу під наявність або відсутність безкоштовної сонячної енергії. Також було доведено небезпеку поширеної практики застосування дешевих побутових датчиків для контролю якості повітря. Отже, побудова надійної та безпечної для здоров'я системи можлива виключно з використанням сертифікованих промислових газоаналізаторів, які гарантують безпомилковість вимірювань та стабільність протягом багатьох років.

Проведений аналітичний огляд дав змогу чітко сформулювати проблематику та обґрунтувати актуальність обраного напрямку дослідження. Загалом було зроблено висновок про нагальну потребу у розробці принципово нового комплексу управління. Було визначено, що створення такої системи дозволить успішно поєднати прецизійний контроль санітарних норм із глибокою оцінкою енергетичних можливостей будівлі. У підсумку було сформовано завдання на розробку інтелектуального алгоритму, який зміг би самостійно підтримувати здоровий мікроклімат, захищати обладнання від зимового обмерзання та економно витрачати заряд акумуляторів під час відключень зовнішнього електропостачання.

У другому розділі бакалаврської роботи було пройдено шлях від формування загальної концепції до створення деталізованої архітектури розумного управління мікрокліматом. Перш за все, було здійснено обґрунтований перехід від використання аматорських компонентів до сертифікованого професійного обладнання. Для контролю якості повітря, зокрема рівня вуглекислого газу, було обрано надійний газоаналізатор вітчизняного виробництва «Дозор-С», що гарантує високу точність та офіційне визнання результатів вимірювань. За моніторинг температурно-вологісного режиму та комфорту загалом відповідає промисловий розумний термостат. Такий підхід дозволив зробити розроблену систему не лише дуже точною, але й максимально безпечною для перебування людей у приміщенні.

Головним обчислювальним центром, який безперервно збирає інформацію та приймає рішення, було визначено мікрокомп'ютер Raspberry Pi. Для забезпечення повної енергетичної автономності в загальну схему було інтегровано гібридний інвертор та надійні літійові акумулятори. Завдяки

детальному аналізу споживання електрики вентиляційною установкою було встановлено критично важливу закономірність: зниження обертів вентилятора навіть на незначну величину дозволяє зберегти колосальні обсяги енергії в акумуляторі. Саме цей принцип було закладено в основу енергозберігаючих алгоритмів для підтримання роботи в похмурі дні або вночі.

Для ефективного та раціонального керування цим обладнанням було розроблено та докладно описано шість чітких режимів функціонування. Було створено математичну логіку, за якою система здатна самостійно оцінювати поточну ситуацію та плавно перемикатися між станами: від мінімального фонових провітрювання порожньої кімнати до інтенсивного очищення повітря під час масового скупчення людей. Крім того, було передбачено абсолютно незалежний рівень апаратного захисту. Завдяки цьому досягнуто найвищого рівня надійності: навіть у випадку повного збою програмного забезпечення або зависання головного комп'ютера, газоаналізатор здатен апаратно запустити вентиляцію на максимальну потужність при виявленні небезпечного рівня діоксиду вуглецю.

У третьому розділі було виконано перенесення розробленої фізичної архітектури у віртуальне комп'ютерне середовище MATLAB для проведення попередніх випробувань. Це було зроблено з метою глибокої перевірки працездатності всіх складових у єдиній зв'язці ще до етапу закупівлі та монтажу реального обладнання. Для забезпечення моделі достовірними погодними умовами використано статичні таблиці, які завантажуються з інтернету. Також було розроблено власну математичну модель, яка здатна самостійно розраховувати та генерувати сонячну активність для вибраного регіону на кожен день року. Успішно зімітовано динаміку зміни температури та процеси впливу людей на якість повітря в кімнаті.

На базі цих синтезованих даних було створено повноцінного «цифрового двійника» розробленої системи. Було написано програмний код, який безперервно розраховує енергетичний баланс: обсяги безкоштовної сонячної генерації, рівень споживання двигунами та поточний відсоток заряду в батареях. В результаті проведених комп'ютерних симуляцій було отримано наочні

графіки, які переконливо довели, що розрахованої ємності акумуляторів цілком достатньо для підтримання комфортних санітарних умов протягом усієї темної частини доби без жодного звернення до загальної електромережі будинку.

На фінальному етапі моделювання розроблений алгоритм прийняття рішень було піддано жорсткому тестуванню в екстремальних віртуальних умовах. Було штучно зімітовано різноманітні сценарії з різкими заморозками, присутністю великої кількості людей за повної відсутності сонця та з критично низьким зарядом батарей. Завдяки цим випробуванням було досягнуто абсолютного підтвердження стабільності логіки управління. Було зафіксовано, що система своєчасно та успішно запобігає утворенню конденсату та льоду в рекуператорі при сильних морозах, автоматично жертвує ідеальним комфортом на користь тривалого життєзабезпечення при розрядженні батарей, а також успішно віддає надлишки чистої енергії в мережу, коли акумулятори вже повністю заряджені.

Проведена в рамках виконання бакалаврської роботи науково-практична діяльність дає беззаперечні підстави зробити висновок про повну життєздатність та технічну обґрунтованість запропонованої концепції. Було створено не просто сукупність об'єднаних пристроїв, а розумний та збалансований механізм, здатний самостійно знаходити оптимальний компроміс між підтриманням високих санітарних стандартів для здоров'я людини та максимальною економією енергетичних ресурсів. Завдяки комплексним комп'ютерним випробуванням було повністю підтверджено правильність усіх попередніх розрахунків, вдалий вибір апаратної бази та безперебійну роботу логіки керування за будь-яких можливих сценаріїв. У підсумку було отримано повністю готову архітектуру, програмний код якої може бути безпосередньо імплементований у реальний мікроконтролер для безпечного практичного використання на фізичному об'єкті.

Перспективним напрямком подальших досліджень може бути перехід від віртуального моделювання до створення фізичного макета системи. Завдяки цьому з'явилася би змога провести натурні експерименти та перевірити стійкість апаратного обладнання до реальних експлуатаційних навантажень.

Значний науковий інтерес також становить інтеграція методів штучного інтелекту, за рахунок чого може бути досягнуто точного прогнозування поведінки людей та погодних умов. Із застосуванням самонавчальних алгоритмів системі може бути надана здатність адаптуватися до звичок користувачів, що дозволило б ще ефективніше розпоряджатися накопиченою сонячною енергією. У практичній площині запропоновану архітектуру може бути успішно масштабовано для одночасного управління мікрокліматом відразу в кількох ізольованих приміщеннях. Крім того, доцільним є проведення глибокого економічного аналізу із розрахунком періоду окупності проєкту з урахуванням можливості продажу надлишків струму в загальну мережу. Виконання цих кроків дозволить остаточно перевести розробку з площини теоретичного дослідження у розряд готових комерційних рішень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Choi, W., Lee, J., Lee, C. Evaluation of frost-free operations for a sensible heat recovery ventilator. *Energy and Buildings*. 2018. Vol. 165. P. 201–213.
DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.01.037.
2. Fisk, W. J. Health and productivity gains from better indoor environments and their relationship with building energy efficiency. *Annual Review of Energy and the Environment*. 2000. Vol. 25. P. 537–566.
DOI: 10.1146/annurev.energy.25.1.537.
3. Guyot, G., Sherman, M. H., Walker, I. S. A review of the application of demand controlled ventilation in European residential buildings. *Energy and Buildings*. 2018. Vol. 159. P. 378–392.
DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.10.053.
4. Jin, M., Bekiroglu, K. et al. Maintaining building indoor air quality through smart ventilation. *Energy and Buildings*. 2018. Vol. 173. P. 228–238.
DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.05.025.
5. Mardiana-Idayu, A., Riffat, S. B. Review on heat recovery technologies for building applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012. Vol. 16, № 2. P. 1241–1255.
DOI: 10.1016/j.rser.2011.09.026.
6. Nasr, M. R., Fauchoux, M., Besant, R. W., Simonson, C. J. A review of frosting in air-to-air energy exchangers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014. Vol. 30. P. 538–554.
DOI: 10.1016/j.rser.2013.10.038
7. Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., Pout, C. A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings*. 2008. Vol. 40, № 3. P. 394–398.
DOI: 10.1016/j.enbuild.2007.03.007.
8. Shaikh, P. H., Nor, N. B. M., Nallagownden, P. et al. A review on optimized control systems for building energy and comfort management of smart sustainable buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014. Vol. 34. P. 409–429.

- DOI: 10.1016/j.rser.2014.03.027.
9. Wang, Z., Wang, L., Dounis, A. I., Yang, R. Integration of plug-in hybrid electric vehicles into energy and comfort management for smart building. *Energy and Buildings*. 2012. Vol. 47. P. 260–266.
DOI: 10.1016/j.enbuild.2011.12.007.
 10. Wargocki, P., Wyon, D. P. The effects of indoor air quality on performance and productivity. *Indoor Air*. 2000. Vol. 10, № 4. P. 222–236.
DOI: 10.1034/j.1600-0668.2000.010004222.x.
 11. Безродний М. К., Притула Н. О. Теплонасосна система повітряного опалення та вентиляції з рекуператором теплоти і рециркуляцією відпрацьованого повітря. *KPI Science News*. Київ, 2019. № 3. С. 7–15.
 12. Боженко М. Ф. Системи опалення, вентиляції і кондиціонування повітря будівель : навч. посіб. для студентів спеціальності 144 «Теплоенергетика». Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 380 с.
 13. ДБН В.2.6-31:2021. Теплова ізоляція та енергоефективність будівель. [Чинний від 2022-09-01]. Київ : Мінрегіон України, 2021. 43 с.
 14. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція і кондиціонування. [Чинний від 2014-01-01]. Київ : Інститут «УкрНДІспецбуд», 2014. 174 с.
 15. Дешко В. І., Буяк Н. А., Вольчин І. А. Аналіз методів управління мікрокліматом приміщень в умовах перемінних енергетичних тарифів. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. Київ, 2019. № 2. С. 45–54.
 16. Джеджула, В. В. Вентиляція та кондиціонування громадських об'єктів : навч. посіб. Вінниця : ВНТУ, 2021. 71 с.
 17. Джеджула В. В. Системи вентиляції зі змінною витратою повітря : особливості проектування та експлуатації. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. Харків, 2017. № 1. С. 106–111.
 18. Довгалюк В. Б. Аеродинаміка вентиляції. Київ : ІВНВКП «Укрґеліотех», 2015. 366 с.
 19. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. [Чинний від 1999-12-01]. Київ : МОЗ, 1999. 42 с.

- 20.ДСТУ 9190:2022. Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання під час опалення, охолодження, вентиляції, освітлення та гарячого водопостачання. [Чинний від 2023-03-01]. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2023. 156 с.
- 21.Желих В. М., Дзерин О. І., Савченко О. О. Енергоефективність систем припливно-витяжної вентиляції з рекуперацією теплоти. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Теорія і практика будівництва*. Львів, 2015. № 823. С. 98–103.
- 22.Жуковський С. С., Люльчак З. С. Вентилювання приміщень : навч. посіб. Львів : Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2007. 476 с.
- 23.Зінич П. Л. Вентиляція громадських будівель і споруд: навч. посіб. Київ : КНУБА, 2002. 256 с.
- 24.Карпаш О. М., Костишин Р. В. Інформаційно-вимірювальні технології в нафтогазовому комплексі : стан та перспективи розвитку. *Методи та прилади контролю якості*. Івано-Франківськ, 2018. № 2. С. 15–23.
- 25.Мілейковський В. О., Котелков Л. М. Вентиляція індивідуального житлового будинку. Дніпро : ФОП Середняк Т. К., 2018, 156 с.
- 26.Середюк О. Є., Петришин І. С. Метрологічне забезпечення засобів вимірювальної техніки в системах екологічного моніторингу. *Вимірювальна техніка та метрологія*. Івано-Франківськ, 2019. № 80. С. 45–51.
- 27.Фаренюк Г. Г., Фаренюк Є. Г. Методологія оцінки енергоефективності будівель як єдиної енергетичної системи. *Наука та будівництво*. Київ, 2018. № 1. С. 36–41.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

Програмний код для розрахунку профілю сонячної генерації у м. Івано-Франківську за 1 літній тиждень

```
>> %
% 1. Вхідні параметри локації
lat = 48.92; % Широта Івано-Франківська
G_max = 950; % Максимальна теоретична інсоляція літом (Вт/м2)
% 2. Налаштування часу моделювання
% Моделювання одного тижня влітку (з 21 червня - день сонцестояння)
start_doy = 172; % День року (Day of Year)
hours_in_week = 7 * 24;
time_hours = 0:(hours_in_week - 1);
G_out = zeros(1, length(time_hours));
% Створення масиву дат для графіка
time_array = datetime(2025, 6, 21) + hours(time_hours);
% 3. Цикл розрахунку астрономічної моделі
for i = 1:length(time_hours)
    h = mod(time_hours(i), 24); % Поточна година доби (0-23)
    current_doy = start_doy + floor(time_hours(i)/24);
    % Кут схилення Сонця (в градусах)
    delta = 23.45 * sind( (360/365) * (current_doy - 81) );
    % Годинний кут (Сонце в зеніті о 12:00 має кут 0)
    omega = 15 * (h - 12);
    % Висота Сонця над горизонтом (синус кута)
    sin_alpha = sind(lat)*sind(delta) + cosd(lat)*cosd(delta)*cosd(omega);
    if sin_alpha > 0
        % Сонце над горизонтом (день)
        % Додаємо генератор псевдовипадкових чисел для імітації легкої
хмарності
        % cloud_factor буде від 0.75 до 1.0 (75-100% пропускання)
        cloud_factor = 0.75 + 0.25 * rand();
        % Розрахунок підсумкової інсоляції
        G_out(i) = G_max * sin_alpha * cloud_factor;
    else
        % Сонце за горизонтом (ніч)
        G_out(i) = 0;
    end
end
% 4. Формування об'єкта timeseries для подальшого використання у моделі
solarTS = timeseries(G_out, datenum(time_array));
% 5. Побудова графіка
figure('Name', 'Solar Irradiance Synthesis', 'Color', 'w');
plot(time_array, G_out, 'LineWidth', 1.5, 'Color', '#D95319');
title('Синтезований профіль сонячної генерації (Івано-Франківськ, літній тиждень)');
xlabel('Дата та час');
ylabel('Інсоляція (Вт/м^2)');
```

```
grid on;
ylim([0 1000]);
>> 5
```

ДОДАТОК Б

Програмний код для розрахунку профілю сонячної генерації у м. Івано-Франківську за 1 зимовий тиждень

```
>> %
% 1. Вхідні параметри локації
lat = 48.92; % Широта Івано-Франківська
G_max = 950; % Максимальна теоретична інсоляція літом (Вт/м2)
% 2. Налаштування часу моделювання
% Змоделюємо один тиждень взимку (355 день - 21 грудня)
start_doy = 355; % День року (Day of Year)
hours_in_week = 7 * 24;
time_hours = 0:(hours_in_week - 1);
G_out = zeros(1, length(time_hours));
% Створення масиву дат для графіка
time_array = datetime(2025, 12, 21) + hours(time_hours);
% 3. Цикл розрахунку астрономічної моделі
for i = 1:length(time_hours)
    h = mod(time_hours(i), 24); % Поточна година доби (0-23)
    current_doy = start_doy + floor(time_hours(i)/24);
    % Кут схилення Сонця (в градусах)
    delta = 23.45 * sind( (360/365) * (current_doy - 81) );
    % Годинний кут (Сонце в зеніті о 12:00 має кут 0)
    omega = 15 * (h - 12);
    % Висота Сонця над горизонтом (синус кута)
    sin_alpha = sind(lat)*sind(delta) + cosd(lat)*cosd(delta)*cosd(omega);
    if sin_alpha > 0
        % Сонце над горизонтом (день)
        % Додаємо генератор псевдовипадкових чисел для імітації легкої
        % хмарності
        % cloud_factor буде від 0.75 до 1.0 (75-100% пропускання)
        cloud_factor = 0.75 + 0.25 * rand();
        % Розрахунок підсумкової інсоляції
        G_out(i) = G_max * sin_alpha * cloud_factor;
    else
        % Сонце за горизонтом (ніч)
        G_out(i) = 0;
    end
end
end
% 4. Формування об'єкта timeseries для подальшого використання у моделі
solarTS = timeseries(G_out, datenum(time_array));
% 5. Побудова графіка
figure('Name', 'Solar Irradiance Synthesis', 'Color', 'w');
plot(time_array, G_out, 'LineWidth', 1.5, 'Color', '#D95319');
title('Синтезований профіль сонячної генерації (Івано-Франківськ, зимовий тиждень)');
xlabel('Дата та час');
```

```
ylabel('Інсоляція (Вт/м^2)');
grid on;
ylim([0 1000]);
>> 5
```

ДОДАТОК В

Програмний код для моделювання тижневого циклу роботи ІВС в м. Івано-Франківську та генерації комплексного аналітичного графіка

```
>> %
% --- 1. Параметри системи ---
Cap_Wh = 2400;      % Ємність Pylontech US2000C, Вт*год
P_pv_peak = 1200;   % Пікова потужність СЕС (3 панелі по 400Вт)
V_room = 60;        % Об'єм приміщення, м3
L_max = 160;        % Макс. продуктивність ВЕНТС ВУТ 160, м3/год
P_rec_max = 68;     % Макс. споживання рекуператора, Вт
% --- 2. Симуляція (7 днів) ---
dt = 1; % крок - 1 година
T = length(G_out); % беремо профіль G_out з підрозділу 3.1
SoC = zeros(1, T); SoC(1) = 50; % Початковий заряд 50%
CO2 = zeros(1, T); CO2(1) = 450; % Початковий CO2
P_rec_hist = zeros(1, T);
% Профіль присутності людей (піки зранку та ввечері)
people_gen = 20 * (sin(pi*(1:T)/12 - pi/2) + 1.2);
for i = 1:T-1
    % Робота ІВС: Алгоритм визначає інтенсивність рекуператора
    if CO2(i) > 800
        mode_factor = 1.0; % Макс. потужність
    elseif CO2(i) > 600
        mode_factor = 0.5; % Еко-режим
    else
        mode_factor = 0.1; % Мін. вентиляція
    end
    % Енергетика
    P_gen = G_out(i)/1000 * P_pv_peak * 0.18; % Генерація з ККД панелей
    P_cons = P_rec_max * (mode_factor^3); % Кубічна залежність потужності
    P_rec_hist(i) = P_cons;
    % Оновлення SoC (%)
    SoC(i+1) = SoC(i) + ((P_gen - P_cons) * dt / Cap_Wh) * 100;
    SoC(i+1) = max(min(SoC(i+1), 100), 10); % Обмеження 10-100%
    % Оновлення CO2 (ppm)
    vent_eff = L_max * mode_factor;
    CO2(i+1) = CO2(i) + (people_gen(i) - vent_eff*(CO2(i)-400)/V_room)*dt;
end
% --- 3. Візуалізація результатів ---
figure('Units', 'normalized', 'Position', [0.1 0.1 0.8 0.8], 'Color', 'w');
% Plot 1: Сонячна генерація та споживання
subplot(3,1,1);
hold on;
area(time_array, G_out/max(G_out)*P_pv_peak*0.18, 'FaceColor', '#FFD700',
'EdgeColor', 'none', 'FaceAlpha', 0.3);
```

```

plot(time_array, P_rec_hist, 'r', 'LineWidth', 1.5);
ylabel('Потужність, Вт');
legend('Генерація СЕС', 'Споживання рекуператора');
title('Енергетичний профіль та активність ІВС (Івано-Франківськ)');
grid on;
% Plot 2: Стан заряду батареї
subplot(3,1,2);
plot(time_array, SoC, 'Color', '#0072BD', 'LineWidth', 2);
line([time_array(1) time_array(end)], [20 20], 'Color', 'r', 'LineStyle',
'--');
ylabel('Заряд АКБ, %');
legend('SoC Pylontech', 'Критичний поріг');
grid on;
% Plot 3: Концентрація CO2
subplot(3,1,3);
plot(time_array, CO2, 'Color', '#77AC30', 'LineWidth', 2);
line([time_array(1) time_array(end)], [800 800], 'Color', 'r',
'LineStyle', '--');
ylabel('CO2, ppm');
xlabel('Час моделювання (Тиждень)');
legend('Рівень CO2', 'Санітарна норма');
grid on;
>>

```

ДОДАТОК Г

Програмний код імітації роботи ядра операційної ІВС

у режимі реального часу

```

>> %
% --- ЧАСТИНА 1: Синтез вхідних даних (підрозділ 3.1) ---
lat = 48.92; G_max = 950;
hours_in_week = 7 * 24;
T = hours_in_week; % ЗМІННА T (Загальний час симуляції)
time_hours = 0:(T - 1);
time_array = datetime(2025, 8, 16) + hours(time_hours);
G_out = zeros(1, T);
for i = 1:T
    h = mod(time_hours(i), 24);
    delta = 23.45 * sind((360/365) * (172 - 81));
    omega = 15 * (h - 12);
    sin_alpha = sind(lat)*sind(delta) + cosd(lat)*cosd(delta)*cosd(omega);
    if sin_alpha > 0
        G_out(i) = G_max * sin_alpha * (0.75 + 0.25*rand()); % Імітація
хмарності
    else
        G_out(i) = 0; % Ніч
    end
end
% --- ЧАСТИНА 2: Ініціалізація фізичних масивів та параметрів (підрозділ
3.2) ---
Cap_Wh = 2400; P_pv_peak = 1200; V_room = 60; L_max = 160; P_rec_max = 68;

```

```

SoC = zeros(1, T); SoC(1) = 50; % Старт з 50% заряду
CO2 = zeros(1, T); CO2(1) = 450; % Фоновий рівень CO2
State_History = zeros(1, T); % Історія станів автомата
V_dac_History = zeros(1, T); % Історія керуючої напруги
% Моделювання присутності людей та зовнішньої температури
people_gen = 20 * (sin(pi*(1:T)/12 - pi/2) + 1.2);
T_outside_sim = 5.0 + 10*sin(2*pi*(1:T)/24);
Dew_Point = 3.0;
% --- ЧАСТИНА 3: Головний цикл FSM (підрозділ 3.3) ---
for i = 1:T-1
    % Зчитування поточної "телеметрії"
    current_CO2 = CO2(i);
    current_SoC = SoC(i);
    current_Ppv = G_out(i)/1000 * P_pv_peak * 0.18;
    current_Tout = T_outside_sim(i);
    % ЛОГІКА СКІНЧЕННОГО АВТОМАТА
    if current_CO2 >= 1500
        Active_State = 0; V_dac = 10.0; % M0: Безпека
    elseif current_Tout <= Dew_Point + 1.0
        Active_State = 5; V_dac = 3.0; % M5: Захист від обмерзання
    elseif current_SoC < 15 && current_Ppv < 50
        Active_State = 4; V_dac = 1.5; % M4: Еко-режим (Збереження АКБ)
    elseif current_CO2 > 800
        Active_State = 2; % M2: Інтенсивна вентиляція
        V_dac = min(10.0, 2.0 + (current_CO2 - 800) * 0.01);
        if current_SoC >= 98 && current_Ppv > (P_rec_max * (V_dac/10)^3)
            Active_State = 3; % M3+: Інтенсивна + Експорт у мережу
        end
    else
        Active_State = 1; V_dac = 2.0; % M1: Номінальний (Фон)
        if current_SoC >= 98 && current_Ppv > 100
            Active_State = 3; % M3: Чистий експорт
        end
    end
    end
    % Запис рішення контролера
    State_History(i) = Active_State;
    V_dac_History(i) = V_dac;
    % РОЗРАХУНОК ФІЗИКИ ДЛЯ НАСТУПНОГО КРОКУ (Digital Twin)
    % Споживання вентилятора (кубічна залежність)
    P_cons = P_rec_max * (V_dac/10)^3;
    % Новий заряд батареї
    SoC(i+1) = max(min(current_SoC + ((current_Ppv - P_cons) * 1 / Cap_Wh)
    * 100, 100), 10);
    % Новий рівень CO2
    vent_eff = L_max * (V_dac/10);
    CO2(i+1) = current_CO2 + (people_gen(i) - vent_eff*(current_CO2-
    400)/V_room)*1;
end
% Останній стан для графіка
State_History(T) = State_History(T-1);
V_dac_History(T) = V_dac_History(T-1);
% --- ЧАСТИНА 4: Візуалізація результатів MIL-симуляції ---

```

```

figure('Name', 'FSM MIL Verification', 'Color', 'w');
subplot(2,1,1);
stairs(time_array, State_History, 'LineWidth', 2, 'Color', '#7E2F8E');
yticks([0 1 2 3 4 5]);
yticklabels({'M0: Безпека', 'M1: Номінальний', 'M2: Інтенсивний', 'M3:
Експорт', 'M4: Еко/Сон', 'M5: Захист'});
title('Діаграма станів керуючого алгоритму (MIL-симуляція)');
grid on;
ylim([-0.5 5.5]);
subplot(2,1,2);
plot(time_array, V_dac_History, 'LineWidth', 1.5, 'Color', '#D95319');
ylabel('Напруга ЦАП (0-10 В)');
xlabel('Час симуляції');
title('Керуючий вплив на рекуператор (V_{dac})');
grid on;
ylim([0 11]);
>>

```