

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Таврійський національний університет
імені В.І. Вернадського
Навчально-науковий інститут муніципального управління
та міського господарства
Кафедра інженерних систем та технологій

На правах рукопису

Кваліфікаційна робота на здобуття ступеня вищої освіти «бакалавр»

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ ТА РЕГУЛЮВАННЯ
ВОЛОГОСТІ ПРИМІЩЕНЬ

Здобувачки вищої освіти
Полякової Єлизавети Олександрівни
Освітня програма
«Автоматизація та комп'ютерно-
інтегровані технології»
(Спеціальність
174 «Автоматизація, комп'ютерно-
інтегровані технології та
робототехніка»)

(підпис)

Науковий керівник:
старший викладач Ярослава
ВИШЕМІРСЬКА

(підпис)

Національна шкала _____
Кількість балів _____
Оцінка: ECTS _____

Таврійський національний університет імені В. І. Вернадського
Навчально-науковий інститут муніципального управління
та міського господарства
Кафедра інженерних систем та технологій
Освітньо-кваліфікаційний рівень бакалавр
Спеціальність 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Завідувач кафедри
_____ Наталія ОМЕЦІНСЬКА
«_____» _____ 2025 року

ЗАВДАННЯ НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Полякової Єлизавети Олександрівни

1. Тема роботи: Автоматизована система моніторингу та регулювання вологості приміщень _____

керівник роботи: ст.викл. Вишемірська Я.С.

затверджені Наказом ТНУ імені В.І Вернадського:

від «7» листопада 2025 № 138/1-ОД

2. Строк подання студентом роботи: 25.11.2025

3. Вихідні дані до роботи: Об'єкт автоматизації: мікроклімат (відносна вологість) у побутових приміщеннях; Цільовий діапазон регулювання відносної вологості: 40–60 %; Апаратна база: бездротові Wi-Fi-датчики температури та вологості (ТН01, ТН-08), автономні одноканальні смарт-реле (Moes); Програмне середовище: хмарна IoT-платформа Tuuya Smart.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки: Проаналізувати технологічний процес підтримання вологості у побутових приміщеннях як об'єкта автоматизації та розробити загальну структурну схему керування; Обґрунтувати вибір основних вузлів системи автоматизації, зокрема архітектури керування, комутаційної апаратури, виконавчих механізмів та первинного сенсорного обладнання; Розглянути технологію підключення бездротових технічних засобів автоматизації, налаштування керуючої логіки та пусконаладження смарт-сценаріїв у хмарному середовищі Tuuya Smart; Пропрацювати умови охорони праці, вимоги електробезпеки та визначити заходи безпеки під час розробки й експлуатації автоматизованої системи клімат-контролю.

5. Перелік графічного матеріалу: графічна робота виконана у вигляді мультимедійної презентації

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	ст. викл. Ярослава ВИШЕМІРСЬКА		
Розділ 2	ст. викл. Ярослава ВИШЕМІРСЬКА		
Розділ 3	ст. викл. Ярослава ВИШЕМІРСЬКА		
Розділ 4	ст. викл. Ярослава ВИШЕМІРСЬКА		

7. Дата видачі завдання _____ 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання етапів роботи	Заключний документ етапу
1	Вибір теми бакалаврської роботи, призначення керівника	до 31.10.2025	Затвердження переліку тем бакалаврських робіт
2	Пошук і відбір літератури по темі роботи, складання плану бакалаврської роботи	до 14.12.2025	Список літературних джерел, план роботи
3	Визначення об'єкта, предмета, мети, завдань та методів дослідження, написання вступу до теми бакалаврського дослідження	до 25.01.2026	Текст вступу
4	Написання тексту бакалаврської роботи відповідно до її структури:	26.01.2026-17.05.2026	Текст розділів
	4.1 I розділ	26.01.2026-6.03.2026	Текст розділу
	4.2 II розділ	9.03.2026-27.03.2026	Текст розділу
	4.3 III розділ	30.03.2026-17.04.2026	Текст розділу
	4.4 IV розділ	20.04.2026-8.05.2026	
5	Підготовка графічних матеріалів чи іншого унаочнення	11.05.2026-15.05.2026	Роздатковий матеріал, презентація
6	Оформлення кінцевого списку використаних джерел та додатків	11.05.2026-15.05.2026	Список літературних джерел
7	Оформлення та попередній захист бакалаврської роботи	18.05.2026-22.05.2026	Бакалаврська робота, рішення кафедри про допуск до захисту
8	Внесення коректив та кінцеве редагування бакалаврської роботи	25.05.2026-29.05.2026	Бакалаврська робота
9	Реєстрація бакалаврської роботи на кафедрі	1.06.2026-5.06.2026	Бакалаврська робота внесена до журналу реєстрації випускових робіт
10	Захист бакалаврської роботи	10.06.2026-28.06.2026	Рішення Екзаменаційної комісії про захист

АНОТАЦІЯ

Полякова Є. О. Автоматизована система моніторингу та регулювання вологості приміщень. – Рукопис.

Кваліфікаційна бакалаврська робота за спеціальністю 174 "Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка". – Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського, Київ, 2026 рік.

У бакалаврській кваліфікаційній роботі досліджено технологічний процес підтримання вологості у побутових приміщеннях як об'єкта автоматизації. Розроблено комплексну систему автоматичного контролю мікроклімату на базі хмарної IoT-екосистеми TuYa Smart. Обґрунтовано та вибрано сучасну апаратну базу, зокрема бездротові Wi-Fi датчики температури та вологості (ТН01, ТН-08) і автономні одноканальні смарт-реле для децентралізованого керування виконавчими механізмами (припливно-витяжною вентиляцією та осушувачами повітря). Запропоновано логічні алгоритми смарт-сценаріїв із застосуванням методу псевдо-порівняння фонових та локальних показників вологості. Проведено експериментальні дослідження динаміки мікроклімату, які підтвердили високу ефективність розробленої системи. Практичне значення полягає у можливості масового впровадження розробленої простої, надійної та економічно доступної системи для забезпечення комфортних санітарно-гігієнічних умов, захисту приміщень від надлишкової вологості та раціоналізації енергоспоживання побутового кліматичного обладнання.

Об'єкт дослідження – процес автоматичного моніторингу та стабілізації параметрів мікроклімату (відносної вологості) у побутових приміщеннях. Предмет дослідження – методи, алгоритми смарт-сценаріїв та апаратні засоби автоматизації на базі IoT-платформ для створення децентралізованої системи клімат-контролю. Мета роботи – теоретичне обґрунтування, проєктування та практична реалізація простої, надійної і безпечної мікропроцесорної системи підтримання оптимального рівня вологості за рахунок автоматизованого керування обладнанням. Методи дослідження – системний аналіз, теорія автоматичного керування, проєктування схем автоматизації, натурний експеримент, статистична обробка даних. Ключові слова: автоматизована система, відносна вологість, мікроклімат, IoT-платформа, смарт-сценарій, Wi-Fi датчик, одноканальне реле, розумний будинок, вентиляція.

ABSTRACT

Poliakova Ye. O. Automated system for monitoring and regulating indoor humidity. – Manuscript.

Bachelor's qualification thesis in specialty 174 "Automation, Computer-Integrated Technologies and Robotics". – V.I. Vernadsky Taurida National University, Kyiv, 2026.

The bachelor's qualification thesis investigates the technological process of maintaining humidity in domestic premises as an object of automation. A comprehensive automatic microclimate control system based on the Tuya Smart cloud IoT ecosystem has been developed. Modern hardware has been justified and selected, including wireless Wi-Fi temperature and humidity sensors (TH01, TH-08) and autonomous single-channel smart relays for the decentralized control of executive mechanisms (supply and exhaust ventilation and air dehumidifiers). Logical algorithms for smart scenarios using the method of pseudo-comparison of background and local humidity indicators have been proposed. Experimental studies of microclimate dynamics were conducted, confirming the high efficiency of the developed system.

The practical significance lies in the possibility of mass implementation of the developed simple, reliable, and economically accessible system to ensure comfortable sanitary and hygienic conditions, protect premises from excessive humidity, and rationalize the energy consumption of household climate equipment.

Object of research – the process of automatic monitoring and stabilization of microclimate parameters (relative humidity) in domestic premises.

Subject of research – methods, smart scenario algorithms, and hardware automation tools based on IoT platforms for creating a decentralized climate control system.

Purpose of the work – theoretical justification, design, and practical implementation of a simple, reliable, and safe microprocessor system for maintaining the optimal humidity level through automated equipment control.

Research methods – system analysis, automatic control theory, design of automation schemes, field experiment, statistical data processing.

Keywords: automated system, relative humidity, microclimate, IoT platform, smart scenario, Wi-Fi sensor, single-channel relay, smart home, ventilation.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	08
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ РЕГУЛЮВАННЯ ВОЛОГОСТІ ТА ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ.....	11
1.1 Огляд відомих систем контролю вологості у приміщеннях	11
1.2 Постановка завдання на розробку системи регулювання вологості у приміщенні	24
Висновки до розділу 1	27
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА СТРУКТУРИ ТА ВИБІР КОМПЛЕКСУ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ	29
2.1 Розробка загальної структури побудови системи	29
2.2 Вибір датчика вологості повітря	33
2.3 Вибір виконавчого пристрою САР вологості	38
2.4 Визначення керуючого пристрою системи	42
Висновки до розділу 2	48
РОЗДІЛ 3 ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ СМАРТ-СЦЕНАРІЇВ ТА АНАЛІЗ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМИ КЛІМАТ-КОНТРОЛЮ	50
3.1 Розробка загальної структури САР	50
3.2 Створення сценаріїв на платформі Туя	55
3.3 Дослідження функціонування розробленої системи	59
Висновки до розділу 3	65
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	67
4.1. Аналіз умов праці та ергономічна організація робочого місця розробника систем мікроклімату	67
4.2. Електробезпека та захист від шкідливих виробничих факторів при роботі з апаратною базою	69
4.3. Заходи безпеки та порядок дій в умовах надзвичайних ситуацій	70
Висновки до розділу 4	72
ЗАГАЛЬНИЙ ВИСНОВОК	74
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	76

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

ОП – охорона праці

ПЗ – програмне забезпечення

ПЛК – програмований логічний контролер

САР – система автоматичного регулювання

Bluetooth – технологія бездротового зв'язку

BMS – система управління будівлею

CE – європейська відповідність

FCC – федеральна комісія зі зв'язку США

IFTTT – сервіс сценаріїв з'єднань, що працюють за логікою «Якщо це, то те»

IoT – інтернет речей

LoRaWAN – бездротова технологія далекого зв'язку з низьким енергоспоживанням

MQTT – спрощений мережевий протокол

Thuya – багатофункціональна та доступна система розумного будинку

Wi-Fi – вайфай

ZigBee – бездротовий стандарт передачі даних

Z-Wave – протокол бездротового зв'язку

ВСТУП

Актуальність теми. Проблематика забезпечення та контролю нормативних параметрів мікроклімату в приміщеннях різного цільового призначення глибоко досліджена у сучасній науковій літературі та детально регламентована галузевими стандартами. Попри значний масив існуючих теоретичних та практичних напрацювань, питання створення інноваційних, економічно доступних та ефективних систем регулювання відносної вологості повітря — одного з найважливіших компонентів мікроклімату — залишається гостро актуальним.

У сучасних реаліях підтримання оптимального вологостного режиму в житлових, адміністративних, комерційних та складських приміщеннях набуває критичної ваги. Вологість повітря безпосередньо впливає не лише на фізіологічний комфорт та здоров'я людей, але й на довговічність будівельних конструкцій, збереження меблів, техніки та матеріальних цінностей. Впровадження автоматизованих систем контролю дозволяє гарантувати стабільність цього показника без необхідності постійного ручного втручання людини. Це має принципове значення як для об'єктів із жорстким технологічним регламентом (лабораторії, архіви, серверні), так і для звичайних побутових зон із підвищеним пароутворенням (санвузли, кухні, підвали).

Типова архітектура системи автоматичного регулювання мікроклімату традиційно складається з первинних вимірювальних перетворювачів (сенсорів), обчислювального блоку (контролера) та виконавчих пристроїв. Алгоритм її роботи полягає у безперервному моніторингу поточної вологості та формуванні керуючих впливів на вентиляційні установки, осушувачі або зволожувачі при виявленні відхилень від заданої уставки. Сучасний ринок пропонує широкий спектр таких рішень. Найпростіші з них — це базові побутові прилади (автономні зволожувачі/осушувачі) з примітивними вбудованими гігростатами. Вони відрізняються низькою вартістю та простотою, проте мають вкрай обмежений функціонал і не здатні до системної інтеграції. На противагу їм існують високотехнологічні промислові комплекси та системи класу BMS

(Building Management System), які забезпечують еталонну точність та масштабованість. Однак їхніми критичними недоліками є колосальна вартість впровадження, складність монтажу та необхідність залучення вузькопрофільних фахівців для налаштування.

Отже, на сьогодні існує об'єктивна технологічна прогалина та стійкий запит на розробку «проміжних» рішень: компактних, ефективних і водночас економічно доступних IoT-систем для підтримки комфортного рівня вологості у побутових приміщеннях. Розробка простої у повторенні, децентралізованої системи, здатної автоматично керувати витяжною вентиляцією чи осушувачами на основі інтелектуального аналізу даних із датчиків, є своєчасним та актуальним інженерним завданням.

Мета і завдання дослідження. Метою кваліфікаційної роботи є розробка простої, надійної та безпечної мікропроцесорної системи автоматичного підтримання оптимального рівня вологості в приміщеннях (за рахунок інтелектуального керування вентиляційним або осушувальним обладнанням), яка б відрізнялася низькою собівартістю, високою повторюваністю та інтуїтивною простотою у процесі пусконаладження.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити такі завдання:

- виконати аналітичний огляд існуючих на ринку систем та засобів контролю вологості у приміщеннях;
- визначити та обґрунтувати оптимальний концептуальний підхід до структурної побудови розроблюваної системи;
- здійснити вибір первинного вимірювального обладнання (датчиків вологості повітря);
- проаналізувати та обрати відповідні виконавчі пристрої для системи автоматичного регулювання (САР);
- визначити інтелектуальний керуючий пристрій та обрати стандарт бездротового зв'язку;
- розробити загальну апаратну структуру децентралізованої САР;
- розробити та налаштувати логічні смарт-сценарії керування обладнанням у

хмарному середовищі TuYa Smart;

- дослідити ефективність функціонування розробленої системи в реальних експлуатаційних умовах;
- опрацювати правила охорони праці та визначити заходи безпеки під час монтажу й експлуатації апаратного комплексу.

Об'єкт дослідження – процеси автоматизованого моніторингу та логічного керування параметрами відносної вологості повітря у приміщеннях.

Предмет дослідження – апаратно-програмні засоби, методи та алгоритми побудови децентралізованої системи контролю вологості на базі технологій Інтернету речей (IoT).

Методи досліджень. Під час розв'язання загальних і часткових завдань кваліфікаційної роботи були використані: елементи системного аналізу (для вибору елементної бази), методи теорії інформації та автоматичного керування, інструментарій інтегрованого хмарного середовища TuYa Smart (для реалізації смарт-сценаріїв), а також методи натурного експерименту та статистичної обробки даних (для тестування працездатності прототипу).

Практичне значення одержаних результатів. В результаті виконання роботи розроблено концепцію та практично реалізовано діючу розосереджену систему контролю вологості на базі бездротових датчиків (ТН01, ТН-08) та одноканальних Wi-Fi-реле. Запропонована децентралізована архітектура суттєво підвищує відмовостійкість комплексу, спрощує його масштабування та дозволяє адаптувати обладнання під специфіку будь-якого приміщення без кардинальних апаратних змін. Для подолання алгоритмічних обмежень хмарної платформи TuYa Smart (неможливості прямого математичного порівняння змінних) було успішно розроблено та застосовано метод псевдо-порівняння показників вологості на основі системи статичних порогів. Цей підхід дозволив реалізувати інтелектуальну логіку селективного реагування системи виключно на локальні піки вологості, ігноруючи загальні (фонові) зміни мікроклімату в будівлі.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ РЕГУЛЮВАННЯ ВОЛОГОСТІ ТА ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ

1.1 Огляд відомих систем контролю вологості у приміщеннях

Доцільно виконати детальний аналіз ключових категорій обладнання, призначеного для автоматизованого моніторингу та регулювання параметрів вологості в замкнених просторах, дослідити специфіку їх функціонування, розглянути актуальні комерційні зразки на сучасному ринку та окреслити перспективні вектори модернізації таких засобів. Перш за все, класифікацію зазначених комплексів доцільно здійснювати за фундаментальним принципом організації процесу регулювання. З огляду на це, сучасні рішення поділяють на пасивні технології, кліматичні апарати з ручним механічним або електронним керуванням, а також повністю автоматизовані інтелектуальні електронні системи.

Функціонування пасивних комплексів забезпечення мікроклімату базується на природних фізико-хімічних властивостях спеціалізованих матеріалів, які здатні сорбувати або десорбувати водяну пару з навколишнього середовища без залучення зовнішньої енергії. Як зазначається у науковій літературі [3], до таких сорбентів зазвичай відносять силікагель, безводний хлорид кальцію, певні види технічних солей або високопористий кремнезем, які автономно реагують на коливання вологовмісту в повітрі. До цього ж технологічного класу відносять інженерні рішення, що спираються на механізми природного повітрообміну, зокрема інфільтрацію та аерацію, де циркуляція повітряних мас відбувається за рахунок різниці тисків і температур без застосування примусової вентиляції чи мікропроцесорних блоків контролю.

Подібні пасивні підходи характеризуються мінімальними капіталовкладеннями на етапі розгортання та фактично нульовими експлуатаційними витратами, оскільки вони повністю енергонезалежні та мають гранично спрощену конструкцію. Разом з тим, для них властивий комплекс суттєвих технічних недоліків, які обмежують їх застосування у сучасній інженерії. Зокрема, часова реакція таких матеріалів на різкі зміни параметрів

навколишнього середовища є надто повільною, вони не здатні забезпечити точну стабілізацію заданого рівня відносної вологості, а їхня загальна ефективність стрімко падає у великогабаритних або високогерметичних будівлях із недостатнім рівнем природної циркуляції повітря. Наочним прикладом практичної реалізації такого підходу є побутові сорбційні контейнери, заповнені гранульованим хлоридом кальцію, робота яких спрямована на поступове поглинання надлишків вологи, як це продемонстровано на рисунку 1.1.



Рисунок 1.1 – Конструктивне виконання пасивного вологопоглинача на основі сорбційних матеріалів

Наступним класом є активні технічні засоби, що передбачають безпосереднє ручне керування з боку користувача. Ця категорія охоплює широкий спектр побутових та напівпрофесійних зволожувачів і осушувачів повітря, які оснащені елементарними механічними регуляторами, потенціометрами або кнопковими інтерфейсами перемикання режимів. Користувач змушений самостійно оцінювати мікроклімат у приміщенні та вручну налаштовувати інтенсивність роботи приладу відповідно до суб'єктивних відчуттів або показів автономних гігрометрів [4, 5]. Такі пристрої набули значного поширення у житловому секторі завдяки масовому виробництву, цінovій доступності та відсутності складних алгоритмів налаштування.

До ключових переваг систем із ручним керуванням відносять передусім їхню низьку ринкову вартість, що робить їх доступними для масового споживача, а також ергономічність і простоту експлуатації, оскільки зміна режимів роботи не вимагає від користувача спеціалізованих інженерних знань.

Проте експлуатація таких апаратів супроводжується вагомими недоліками. Вони вимагають постійної уваги людини для своєчасного ввімкнення, вимкнення або зміни режимів, що суттєво знижує комфорт під час тривалого використання. Крім того, ручні пристрої не здатні забезпечити високу точність і динамічну стабільність параметрів, що робить їх абсолютно непридатними для використання на відповідальних об'єктах із жорсткими технологічними вимогами, таких як серверні кімнати, метрологічні лабораторії, фармацевтичні склади чи промислові цехи електроніки.

Загальний вигляд типового обладнання для осушення та зволоження повітряного середовища з ручним інтерфейсом користувача наведено на рисунках 1.2–1.4.



Рисунок 1.2 – Побутовий повітряний осушувач із механічним органом налаштування режиму роботи



Рисунок 1.3 – Промисловий агрегат для осушення повітря підвищеної потужності



Рисунок 1.4 – Ультразвуковий побутовий зволожувач із ручним потенціометром регулювання

Суттєво вищий рівень функціональних можливостей, надійності та точності підтримання мікроклімату демонструють автоматизовані системи регулювання вологості з електронними блоками управління. Саме ці комплекси складають технологічну основу сучасної концепції інтелектуальних будівель (Smart Home). Конструктивно такі системи є багаторівневими інженерними комплексами, що інтегрують первинні вимірювальні перетворювачі (датчики вологості й

температури), обчислювальні блоки у вигляді програмованих логічних контролерів (ПЛК) або спеціалізованих мікропроцесорних модулів (наприклад, на базі обчислювальних платформ Arduino, ESP32, Raspberry Pi), а також різноманітні виконавчі механізми. До останніх відносять моторизовані вентиляційні заслінки, керовані клапани, примусові витяжні та припливні вентилятори, а також комерційні осушувальні та зволожувальні установки [6, 7].

Беззаперечними перевагами автоматизованих електронних систем є прецизійна точність та довгострокова стабільність стабілізації параметрів газового середовища, що дозволяє формувати бездоганний мікроклімат у приміщенні з мінімальним відхиленням від заданої уставки. Окрім цього, такі комплекси характеризуються гнучкістю інтеграції із суміжними інженерними мережами будівлі – системами опалення, кондиціонування повітря (HVAC) та загального екологічного моніторингу. Наявність мережевих інтерфейсів відкриває можливість реалізації дистанційного моніторингу та управління через глобальну мережу Інтернет, що є критично важливим для територіально розподілених об'єктів або у випадках необхідності безперервного віддаленого контролю. Проте впровадження автоматизованих рішень стримується їхньою високою капіталомісткістю, складністю первинного програмування та пусконаладження, необхідністю періодичного залучення кваліфікованого персоналу для обслуговування, а також критичною залежністю від безперебійного електроживлення та стабільності каналів зв'язку з хмарними сервісами.

Один із поширених прикладів сучасного комерційного комплексу автоматизованого керування вологістю повітря, який активно експлуатується на вітчизняному ринку інженерних систем, представлено на рисунку 1.5.



Рисунок 1.5 – Апаратний комплекс інтелектуального моніторингу та регулювання мікроклімату в концепції Smart Home

За архітектурою побудови каналів зв'язку та способом інформаційної взаємодії між окремими компонентами, системи контролю вологості класифікують на два великі класи: дротові та бездротові. Кожен із цих конструктивних підходів має унікальні експлуатаційні властивості, фізичні обмеження та сфери раціонального застосування. У дротових архітектурах інформаційна та живильна взаємодія між сенсорами, центральним обчислювачем

та виконавчими реле здійснюється виключно за допомогою фізичних кабельних ліній і промислових інтерфейсів [8, 9]. На рисунках 1.6 та 1.7 представлено типові зразки дротових контролерів мікроклімату та промислових первинних перетворювачів.



Рисунок 1.6 – Електронний блок провідного контролера параметрів вологості та температури повітря

Головними перевагами провідних систем вважають заводозахищеність, високу надійність передачі даних без ризику втрати пакетів через радіоперешкоди, а також підвищений рівень кібербезпеки, оскільки фізичне підключення мінімізує ризик несанкціонованого перехоплення сигналу ззовні. Основними ж недоліками дротового підходу є значна трудомісткість і висока вартість монтажних робіт, пов'язаних із прокладанням кабельних трас (особливо в будівлях із завершеним фінішним ремонтом), а також жорстка прив'язка елементів до місць монтажу, що унеможливорює швидке переміщення датчиків у просторі.

Бездротові системи автоматичного регулювання вологості використовують для обміну даними сучасні радіочастотні технології та протоколи передачі, такі як Bluetooth, Wi-Fi, Zigbee, Z-Wave або LoRaWAN. Такі комплекси дозволяють розгорнути мережу моніторингу без прокладання додаткових кабельних ліній зв'язку. Типовим прикладом реалізації бездротової архітектури є розглянута

раніше система інтелектуального будинку, наведена на рисунку 1.5. На рисунку 1.7 детально показано датчики вологості промислової серії HD29, які можуть інтегруватися в подібні вимірювальні мережі.



Рисунок 1.7 – Спеціалізовані вимірювальні перетворювачі відносної вологості повітря серії HD29

Ключовими перевагами радіоканальних систем є абсолютна гнучкість просторового розміщення сенсорів, можливість їх швидкого перенесення в будь-яку точку приміщення, а також висока масштабованість, що дозволяє легко модернізувати систему шляхом додавання нових бездротових вузлів. Проте бездротовим рішенням притаманні й специфічні вразливості, серед яких нижча завадостійкість у порівнянні з кабельними каналами (через вплив будівельних конструкцій, залізобетонних перекриттів та інших сусідніх радіопристроїв), необхідність регулярної заміни автономних елементів живлення (гальванічних елементів або акумуляторів) у датчиках, а також потреба у впровадженні стійких алгоритмів шифрування для захисту від кібератак та несанкціонованого доступу до керування мікрокліматом об'єкта.

Окрім комунікаційних особливостей, комплекси стабілізації вологості класифікують за цільовим призначенням та сферою експлуатації на побутові (домашні) та комерційні (промислові) системи. Побутові рішення розробляються

для інтеграції в житловий простір – міські квартири, приватні будинки, спальні, кабінети чи дитячі кімнати, де головним пріоритетом є створення комфортних і безпечних умов для життєдіяльності людини. Приклади таких пристроїв уже демонструвалися раніше на рисунках 1.2 та 1.5.

Побутові прилади вирізняються високою зручністю повсякденної експлуатації, інтуїтивно зрозумілим інтерфейсом налаштування, естетичним дизайном, що гармонійно вписується в сучасний інтер'єр, а також наявністю додаткових корисних функцій, таких як багатоступеневе очищення, іонізація або ароматизація повітряних мас. Їхнє обслуговування є максимально спрощеним і не потребує від користувача спеціальної інженерної кваліфікації. Проте вони мають обмежений ресурс роботи в умовах безперервного цілодобового навантаження та відносно невелику продуктивність, що обмежує площу ефективного покриття параметрів мікроклімату межами однієї кімнати чи невеликого залу.

Комерційні та промислові комплекси [10] проектуються для забезпечення заданих кліматичних умов на великогабаритних об'єктах, таких як музейні експозиції, державні архіви, серверні центри, фармацевтичні лабораторії, аграрні комплекси, теплиці та великі виробничі цеха. Головними перевагами таких систем є колосальна потужність і продуктивність, висока надійність усіх вузлів в умовах жорсткої безперервної експлуатації, а також здатність підтримувати вологість повітря з мінімальною похибкою, яка інколи становить до 1% і нижче. Водночас, порівняно з побутовими пристроями, промислове обладнання має вищу ринкову вартість, значні габаритні розміри, вимагає значних витрат на проектування та монтаж, а також потребує залучення висококваліфікованого персоналу для проведення регулярного регламентного сервісного обслуговування. На рисунку 1.8 проілюстровано роботу потужної системи осушення повітряного середовища на промисловому підприємстві.



Рисунок 1.8 – Індустріальний комплекс осушення повітряних мас у виробничому цеху підприємства

Важливим критерієм структурування систем автоматичного регулювання є фізичний принцип роботи інтегрованих сенсорів вологості. У сучасній інженерній практиці виділяють три домінуючі класи вимірювальних елементів: ємнісні, резистивні та психрометричні [11]. Розглянемо фізичні особливості та експлуатаційні характеристики кожного типу детальніше.

Функціонування ємнісних вимірювальних перетворювачів базується на зміні діелектричної проникності сорбційного шару під впливом поглинання води, що призводить до прямої зміни електричної ємності сенсора (детальніше див. [12]). Схематичне представлення та зовнішній вигляд ємнісного чутливого елемента наведено на рисунку 1.9 а. До беззаперечних переваг таких датчиків відносять тривалий термін стабільної роботи, високу лінійність характеристики у широкому діапазоні вимірювань та вкрай низьке енергоспоживання, що є критично важливим для бездротових сенсорних вузлів. Головним їхнім недоліком є помітна температурна залежність показів, яка вимагає додаткової програмної або апаратної термокомпенсації, а також ризик тимчасового виходу з ладу або спотворення результатів у разі випадання конденсату на активну поверхню.

Резистивні датчики (або кондуктометричні сенсори вологості) працюють за іншим фізичним принципом: вологість повітря змінює питомий електричний

опір гігроскопічного матеріалу (наприклад, провідного полімеру або пористої кераміки), нанесеного на підкладку датчика [13]. Зовнішній вигляд типового резистивного датчика марки HR31 представлено на рисунку 1.9 б. Ключовими перевагами таких компонентів є гранична спрощеність конструктивної схеми та низька собівартість масового виробництва. Проте вони демонструють дещо нижчу точність вимірювання порівняно з ємнісними структурами і підвладні швидшому фізико-хімічному старінню робочого шару під дією агресивних чинників навколишнього середовища, що обмежує їхній життєвий цикл.

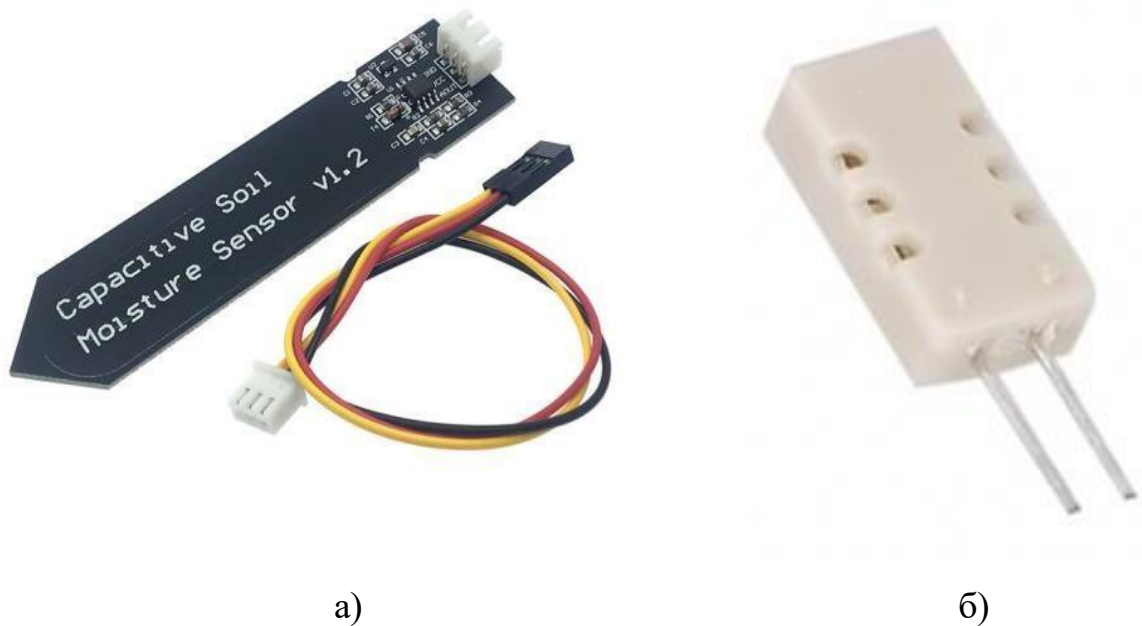


Рисунок 1.9 – Первинні перетворювачі вологості повітря: а) ємнісного типу; б) резистивного типу (серія HR31)

Психрометричні вимірювальні комплекси [14] використовують класичний термодинамічний метод, який полягає в одночасному вимірюванні температур двома незалежними датчиками – "сухим" та "зволоженим" (покритим вологою тканиною-гнітом). Швидкість випаровування води зі зволоженого датчика прямо залежить від ступеня сухості навколишнього повітря, що створює стійку різницю температур, за якою за допомогою спеціальних психрометричних таблиць або програмно реалізованих формул розраховується абсолютна та відносна вологість. Психрометричний метод забезпечує чудову точність, еталонну стабільність результатів та стійкість до хімічних забруднень повітря.

Проте суттєвими недоліками є значні габаритні розміри конструкції, складність автоматизації безперервного зволоження ґніту та необхідність регулярного технічного догляду за станом змочувальної системи.

Проводячи аналіз готового обладнання на сучасному ринку побутової кліматичної техніки, можна виділити як ізольовані автономні пристрої, так і розгалужені комплекси, інтегровані в єдині екосистеми автоматизації. Одним із найбільш масових прикладів є ультразвуковий зволожувач Xiaomi Smart Humidifier, який функціонує в рамках програмної платформи Mi Home. Цей апарат дозволяє користувачу віддалено задавати цільові рівні вологості, переглядати поточну статистику сенсорів у реальному часі та керувати живленням через мобільний додаток. Крім того, він підтримує гнучкі сценарії взаємодії, такі як робота за таймером або активація при досягненні критичних значень зовнішніх сенсорів. Проте головним обмеженням рішень від компанії Xiaomi є пропрієтарна прив'язка до фірмової хмари, що суттєво ускладнює пряму інтеграцію приладу в сторонні відкриті системи автоматизації. Альтернативою є лінійка кліматичних комплексів Philips Series 2000, які використовують високоточні внутрішні датчики для підтримки заданих параметрів повітря. Ці пристрої фокусуються на надійній автономній роботі, мають низький рівень шуму та тривалий ресурс експлуатації, проте практично позбавлені розвинених функцій мережевого віддаленого моніторингу та інтеграції в багатозонні системи керування будівлею.

Аналогічний підхід з упором на локальну автономність та якість апаратної частини простежується в обладнанні брендів Bonesco, Electrolux та Stadler Form, які оснащують свої пристрої вбудованими механічними чи електронними гігростатами. Такі прилади відмінно вирішують локальні завдання в межах однієї кімнати чи квартири, але не підтримують складну сценарну логіку взаємодії кількох кліматичних зон і не здатні враховувати параметри зовнішньої атмосфери. Натомість у напівпрофесійному сегменті домінують рішення від компаній Tado, Netatmo та Honeywell Home, які інтегрують контроль вологості в загальнобудинкову HVAC-систему. Вони повноцінно підтримують хмарну аналітику, роботу через мобільні застосунки, взаємодію з популярними

голосовими асистентами та дозволяють будувати складні багатозонні карти мікроклімату, збираючи глибоку статистику та аналізуючи історію змін, хоча й відрізняються високою ціною та підвищеними вимогами до кваліфікації інсталятора.

У промисловому та великому комерційному сегменті світове лідерство утримують такі системи, як CAREL humiSteam, Condair EL, Siemens Climatix та Schneider Electric EcoStruxure. Ця апаратура гарантує прецизійне регулювання параметрів, розрахована на безперервний життєвий цикл у складних середовищах та повністю сумісна з протоколами автоматизації будівель BMS (Building Management System), такими як Modbus чи BACnet. Вони незамінні на об'єктах із жорстким регламентом мікроклімату, включаючи торгові центри, дата-центри, музеї та галереї, проте висока вартість самого обладнання, складність проектування та суворі вимоги до сервісного сертифікованого обслуговування обмежують їх використання виключно комерційним сектором.

Досліджуючи сучасні тенденції та вектори розвитку систем регулювання вологості, слід відзначити стрімку інтелектуалізацію та підвищення рівня автономності обладнання. Все активніше впроваджуються алгоритми машинного навчання та предиктивного аналізу на базі штучного інтелекту, які дозволяють системі не просто реагувати на поточні похибки регулювання, а й прогнозувати динаміку зміни мікроклімату. Такі алгоритми враховують зовнішні метеорологічні прогнози, час доби, теплову та вологісну інерцію будівлі, а також звичні паттерни поведінки мешканців, заздалегідь коригуючи роботу зволожувачів або осушувачів перед провітрюванням чи зміною кількості людей у приміщенні. Паралельно з цим розвивається концепція Інтернету речей (IoT), яка забезпечує безшовну взаємодію великої кількості сенсорів у єдину мережу, створюючи просторово розподілені вимірювальні системи, де кожна зона функціонує за локальними критеріями, але координується загальносистемною логікою, що максимізує гнучкість, надійність та енергоефективність впроваджуваного рішення.

Таким чином, сучасний ринок пропонує розгалужену номенклатуру засобів контролю вологості повітряного середовища – від найпростіших локальних

приладів сорбційного типу до інтелектуальних автоматизованих комплексів промислового масштабу. Вибір оптимальної архітектури визначається конкретними експлуатаційними умовами, виділеним бюджетом, вимогами до точності та загальним потенціалом системної інтеграції. Ці чинники підтверджують високу актуальність розробки гнучких, економічно доступних та масштабованих систем автоматичного моніторингу та регулювання вологості, адаптованих для побутових та напівпрофесійних об'єктів. Автоматизовані комплекси стають базовим компонентом сучасної інфраструктури життєзабезпечення, гарантуючи здоровий мікроклімат, захист матеріальних цінностей від біопшкоджень та стабільність проходження чутливих технологічних процесів.

1.2 Постановка завдання на розробку системи регулювання вологості у приміщенні

Показник відносної вологості повітряного середовища виступає одним із ключових критеріїв оцінки якості мікроклімату, від якого безпосередньо залежать рівень фізіологічного комфорту та загальний стан здоров'я людини в умовах тривалого перебування у закритих просторах. Згідно із чинними санітарно-гігієнічними нормами, підтримання вологовмісту в діапазоні від 40 % до 60 % формує найбільш сприятливе середовище для нормального функціонування дихальної та імунної систем організму. Окрім біологічного аспекту, стабільний рівень вологості відіграє критичну роль у збереженні матеріальних цінностей: він запобігає розсиханню дерев'яних меблів, мінімізує ризик виникнення статичних розрядів, що є небезпечними для чутливої електронної апаратури, а також перешкоджає деградації внутрішнього оздоблення кімнат. Більше того, недотримання цих нормативів створює сприятливий фон для активного розмноження патогенної мікрофлори, пилових кліщів та утворення колоній цвілевих грибів. Усе це переконливо доводить актуальність розробки та впровадження ефективної, але водночас технічно доступної системи автоматичного моніторингу і контролю параметрів мікроклімату, яка була б оптимізована для масового побутового застосування.

Варто зазначити, що в період опалювального сезону, особливо у квартирах із централізованими системами теплопостачання, спостерігається критичне падіння рівня вологості внаслідок нагрівання повітря. Такий пересушений мікроклімат вкрай негативно позначається на самопочутті мешканців, провокуючи дегідратацію слизових оболонок, загострення респіраторних захворювань та загальне зниження резистентності організму до інфекцій. На противагу цьому, у специфічних зонах будівель з підвищеним виділенням вологи, таких як ванні кімнати, кухні, пральні та підвальні рівні, фіксується стійка проблема її надлишку. Це неминуче призводить до конденсації водяної пари на холодних поверхнях стін і стель, що стає першопричиною розвитку стійких грибкових уражень будівельних конструкцій та становить серйозну загрозу санітарно-епідеміологічному благополуччю людини.

Впровадження навіть базової автоматизованої системи моніторингу дозволяє здійснювати безперервний апаратний контроль мікрокліматичних показників, миттєво фіксувати відхилення від нормативних значень та ініціювати відповідні коригуючі дії. На відміну від дорогавартісних промислових кліматичних комплексів із надлишковим функціоналом, розроблювана побутова система може базуватися на раціональному мінімумі апаратних засобів. Її архітектура передбачає використання сучасного, але доступного первинного перетворювача (датчика) вологості, недорогого мікропроцесорного контролера для обробки сенсорних даних та формування керуючих сигналів, а також базових елементів візуальної індикації чи звукового сповіщення. Такий інженерний підхід гарантує високу фінансову доступність кінцевого пристрою для пересічного споживача, роблячи його універсальним інструментом як для житлових зон, так і для приміщень господарсько-побутового призначення. Висока практична значущість цього технічного рішення полягає у здатності системи функціонувати повністю в автономному режимі, здійснюючи керування зовнішніми виконавчими пристроями — осушувачами, зволожувачами або витяжними вентиляторами — без потреби у регулярному ручному втручанні користувача. Подібна автоматизація не лише суттєво підвищує загальний комфорт експлуатації житлового простору та

покращує якість повітря, але й оптимізує графік роботи кліматичного обладнання, що, своєю чергою, сприяє відчутному зниженню витрат на спожиту електроенергію.

Спираючись на результати попереднього аналітичного огляду існуючих рішень, можна стверджувати, що комплекси регулювання вологості допускають значну варіативність у виборі апаратної сенсорної бази та комунікаційних інтерфейсів. Однак у межах виконання даного кваліфікаційного дослідження фокус уваги зміщено у бік проектування максимально надійної, експлуатаційно безпечної та конструктивно прозорої системи стабілізації мікроклімату, робота якої ґрунтується на алгоритмах інтелектуального керування вентиляційним обладнанням. Цільовий апаратний комплекс повинен відзначатися мінімальною собівартістю комплектуючих, високим рівнем повторюваності принципової електричної схеми, а також інтуїтивною простотою процесу пусконаладження. Дотримання цих критеріїв дозволить успішно інтегрувати та використовувати розробку навіть тим особам, які не володіють глибокими фаховими знаннями в галузі схемотехніки чи програмування мікроконтролерів.

Для чіткого формування технічного завдання та визначення робочих характеристик проектного пристрою було звужено сферу його потенційного впровадження. Як пріоритетні локації для встановлення обрано специфічні зони приватного домоволодіння, а саме — ванну кімнату або закрите підвальне приміщення. Таке цілепокладання дає змогу суттєво конкретизувати фізичний характер процесу регулювання: у зазначених просторах ключовою проблемою виступає саме систематичне перевищення допустимих меж вологості, а не її дефіцит. З огляду на це, логіка роботи контролера має бути алгоритмічно налаштована на виконання функції осушення повітряного середовища, мінімізуючи або повністю виключаючи потребу в інтеграції модулів зволоження. Додатковим вагомим аргументом на користь такого вибору є те, що в підвалах та санітарних вузлах технічно найпростіше реалізувати ефективну припливно-витяжну вентиляцію. Відповідно, дискретне або плавне керування потужністю витяжних каналних вентиляторів виступатиме головним інструментом нормалізації мікроклімату, що суттєво спрощує загальну архітектуру як

апаратної, так і програмної складової проекту.

Підсумовуючи наведені аргументи, можна стверджувати, що створення оптимізованої, вузькоспеціалізованої системи контролю відносної вологості є логічним та обґрунтованим інженерним завданням. Її практичне впровадження стане дієвим механізмом для формування санітарно безпечного мікроклімату, раціоналізації споживання енергоресурсів та превентивного захисту будівельних конструкцій і майна від руйнівного біологічного впливу. Проектована апаратура повинна гармонійно поєднувати економічну доцільність, відмовостійкість, зручність взаємодії та повну адаптивність до специфічних умов обраного об'єкта. Виходячи з означених передумов, головну мету даної кваліфікаційної роботи можна сформулювати наступним чином: розробка та апаратна реалізація простої, надійної та безпечної мікропроцесорної системи підтримання оптимального рівня вологості в закритому приміщенні шляхом автоматизованого керування роботою витяжної вентиляції. Запропонована система повинна характеризуватися низькою загальною вартістю, відмінною повторюваністю елементної бази та граничною простотою у базовому налаштуванні.

Висновки до розділу 1

У першому розділі кваліфікаційної роботи проведено розгорнутий аналіз ключових категорій обладнання, призначеного для автоматизованого моніторингу та регулювання параметрів вологості у приміщеннях. Досліджено основні класифікаційні ознаки таких систем. Зокрема, за принципом організації процесу регулювання вони поділяються на пасивні технології, апарати з ручним керуванням та повністю автоматизовані інтелектуальні системи. За архітектурою побудови каналів зв'язку комплекси класифікують на дротові та бездротові, а за сферою експлуатації виділяють побутові та промислові системи. Визначено, що найбільш перспективним та ефективним напрямком є використання автоматизованих мікропроцесорних систем, які складають технологічну основу сучасної концепції інтелектуальних будівель та активно інтегруються в інфраструктуру Інтернету речей.

Окрему увагу в розділі приділено аналізу первинних вимірювальних перетворювачів вологості, які в сучасній інженерній практиці поділяються на ємнісні, резистивні та психрометричні. З'ясовано, що для реалізації масових побутових рішень найраціональнішим є застосування ємнісних та резистивних сенсорів завдяки їхньому низькому енергоспоживанню, спрощеній конструктивній схемі та низькій собівартості масового виробництва.

На основі здійсненого аналітичного огляду сформульовано постановку завдання на розробку. Обґрунтовано, що показник відносної вологості є ключовим критерієм оцінки якості мікроклімату, а у специфічних зонах будівель, таких як ванні кімнати або підвальні приміщення, фіксується стійка проблема надлишку вологи, що потребує ефективного усунення. Відтак, головною метою роботи визначено розробку простої, надійної та безпечної мікропроцесорної системи підтримання оптимального рівня вологості шляхом автоматизованого керування витяжною вентиляцією. На відміну від дорогавартісних промислових аналогів, розроблювана побутова система базуватиметься на раціональному мінімумі апаратних засобів, що забезпечить її високу економічну доступність, відмінну повторюваність та простоту у процесі налаштування.

РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА СТРУКТУРИ ТА ВИБІР КОМПЛЕКСУ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ

2.1 Розробка загальної структури побудови системи

Як було детально проаналізовано у попередньому підрозділі, архітектура автоматизованих комплексів регулювання вологості повітряного середовища може базуватися на фундаментально різних інженерних концепціях. Однак, формуючи технічне завдання, де домінуючими критеріями виступають мінімізація загальної вартості впровадження проєкту та гарантування інтуїтивної простоти експлуатації кінцевим користувачем без необхідності залучення сертифікованих інженерів, фокус уваги зужується до двох базових структурних парадигм. Перша парадигма спирається на синтез системи "з нуля" шляхом програмування універсальних мікроконтролерів загального призначення (наприклад, апаратних екосистем Arduino, ESP або промислових платформ серії STM32) із подальшим самостійним обв'язуванням їх дискретними електронними компонентами. Друга парадигма передбачає інтеграцію вже існуючих на ринку, сертифікованих комерційних (промислових) модулів та датчиків у єдину бездротову інформаційну мережу за допомогою актуальних IoT-протоколів (Wi-Fi, Bluetooth Low Energy, ZigBee або Thread) з подальшим централізованим керуванням через потужні хмарні платформи автоматизації, яскравим прикладом яких є екосистема TuYa Smart.

Об'єктивний техніко-економічний аналіз доводить недоцільність вибору першої парадигми (базування на платформах типу Arduino або STM32) для створення надійних систем мікроклімату, орієнтованих на тривалу побутову або напівпрофесійну експлуатацію. Незважаючи на колосальну популярність цих інструментів у глобальній освітній практиці та на стадії макетування, їхнє впровадження у форматі кінцевого продукту стикається із критичною масою обмежень.

Перш за все, базові плати Arduino чи мікроконтролери архітектури STM32 конструктивно не адаптовані до концепції Інтернету речей (IoT), оскільки найчастіше позбавлені інтегрованих мережевих інтерфейсів. Для реалізації

життєво необхідного бездротового зв'язку розробник змушений апаратно додавати зовнішні радіомодулі (типу ESP8266, ESP32, nRF52 або CC2530). Таке нарощування компонентної бази неминуче ускладнює загальну топологію принципової схеми, багаторазово збільшує кількість фізичних паяних з'єднань, що знижує вібростійкість і загальну надійність плати, а також вимагає глибинного ручного конфігурування мережевих стеків (TCP/IP), протоколів передачі та сертифікатів безпеки.

Другим критичним бар'єром виступає висока складність програмної розробки. Створення функціональної прошивки для системи на базі Arduino або STM32 вимагає написання з "нуля" низькорівневих алгоритмів опитування сенсорів (через інтерфейси I2C, SPI, UART), розробки математичної моделі ПД-регулятора для керування реле чи симісторами, реалізації стабільного мережевого обміну даними (наприклад, через брокер MQTT), організації взаємодії із зовнішніми базами даних та обов'язкового створення захищених алгоритмів оновлення коду "повітрям" (OTA - Over-The-Air). Це передбачає написання тисяч рядків коду, що вимагає від розробника високої кваліфікації в галузі архітектури мікропроцесорів та кібербезпеки. Альтернативні ж комерційні платформи, такі як Tuuya Smart, нівелюють цю проблему, надаючи готову, оптимізовану серверну інфраструктуру, де алгоритми обробки, збереження та захисту даних уже реалізовані на високому промисловому рівні.

Третім фактором, що ставить під сумнів використання саморобних мікроконтролерних систем, є питання відмовостійкості. Будь-який непередбачений виняток у програмному коді, переповнення стеку, тимчасове зависання процесора або короткочасні провали напруги живлення (brownout) здатні призвести до "зависання" керуючої плати, що в умовах керування зволожувачами або осушувачами може спричинити аварійні наслідки для приміщення. Для забезпечення належного рівня автономної безпеки розробник змушений інтегрувати складні апаратні сторожові таймери (Watchdog), дублювати лінії зв'язку та впроваджувати логіку корекції помилок, що ще більше обтяжує етап розробки. У серійних комерційних пристроях ці проблеми превентивно вирішені інженерами компаній-виробників і підтверджені тривалим

тестуванням.

Крім того, системи власної збірки є вкрай негнучкими у питаннях масштабування. Будь-яка спроба модернізації системи (інтеграція додаткового датчика якості повітря чи нового вентилятора) неминуче потребує втручання в апаратну частину плати та глибокого рефакторингу програмного коду. Відповідно, сервісне обслуговування такої унікальної системи стає неможливим для пересічного користувача, оскільки вона "намертво" прив'язана до свого творця, який єдиний володіє логікою її роботи.

Економічний аспект також відіграє не на користь саморобних пристроїв. Незважаючи на вкрай низьку роздрібну вартість "голих" мікроконтролерів (Arduino Nano або STM32F103), фінальний кошторис проєкту, що включає закупівлю надійних імпульсних блоків живлення, сенсорів, релейних модулів, виготовлення друкованих плат, 3D-друк або купівлю ергономічних корпусів, а головне — сотні годин інтелектуальної праці розробника, багаторазово перевершує ринкову вартість готових IoT-комплексів. При цьому саморобка повністю позбавлена заводської гарантії, сертифікатів пожежної безпеки та офіційної технічної підтримки.

Підсумовуючи зазначене, можна констатувати, що застосування голих універсальних мікроконтролерів є технічно та економічно обґрунтованим виключно у площині прототипування, написання курсових робіт або проведення лабораторних експериментів. Для розв'язання реальних інженерних задач із автоматизації житлових чи комерційних приміщень логічним та безальтернативним вектором є використання інтегрованих IoT-платформ.

Ураховуючи вищевикладене, архітектурною базою для виконання даної кваліфікаційної роботи обрано другий концептуальний підхід — розробку системи на основі готових сертифікованих апаратних вузлів, які комунікують у межах стандартизованої бездротової мережі. Цей вибір спирається на низку об'єктивних переваг. Перш за все, це безпрецедентна простота пусконаладжувальних робіт. Серійне обладнання (наприклад, датчики вологості, розумні розетки або реле) від компаній Sonoff, Xiaomi, Aqara чи Moes містить в єдиному фабричному корпусі прецизійний сенсор, обчислювальне

ядро, радіотрансивер та ізолюваний блок живлення. Процес розгортання такої системи виключає етап паяння та програмування і зводиться до прив'язки (сполучення) бездротового датчика стандарту ZigBee чи Wi-Fi до центрального координатора (шлюзу) за допомогою зрозумілого мобільного інтерфейсу платформи TuYa Smart.

Важливою стратегічною перевагою комерційних комплексів є їхня глибока безшовна інтеграція з глобальними хмарними екосистемами, такими як Google Assistant, Amazon Alexa чи Apple HomeKit. Це дозволяє користувачеві будувати надзвичайно складні предиктивні сценарії поведінки системи. Наприклад, алгоритм може не просто вмикати витяжний вентилятор при досягненні 65% вологості, а робити це з урахуванням показників зовнішньої температури (одержаних через інтернет-сервіси погоди) або орієнтуючись на присутність людей у кімнаті. Реалізувати подібний масив інтелектуальної логіки на базі одиночного Arduino-контролера без створення складного проміжного програмного забезпечення (на кшталт локального сервера Home Assistant) технічно неможливо, що знову ж таки суперечить філософії "plug-and-play" для пересічного користувача.

Пріоритетним фактором при проєктуванні будь-яких приладів, підключених до мережі 220 В, є електро- та пожежна безпека. Промислові IoT-реле та модулі розробляються з дотриманням суворих вимог до гальванічної розв'язки, містять варистори для захисту від імпульсних перенапруг та проходять жорстку процедуру сертифікації на відповідність директивам СЕ (європейська відповідність) та FCC (Федеральна комісія зв'язку США). Саморобні ж схеми, змонтовані на макетних платах або за допомогою навісного монтажу, несуть пряму загрозу ураження струмом та виникнення пожежі, особливо в умовах високої вологості підвальних приміщень чи ванних кімнат.

У контексті кібернетичної стійкості, фабричні рішення, такі як TuYa Smart, функціонують на базі криптографічних алгоритмів (TLS-шифрування), що унеможливорює несанкціоноване перехоплення керуючих пакетів або підміну даних із сенсорів. Розробка аналогічних засобів криптографії на аматорському рівні є вкрай складним та ресурсомістким завданням.

Щодо масштабованості та ергономіки керування, промислові бездротові архітектури є неперевершеними. Додавання нового датчика температури або вологості у мережу ZigBee займає лічені секунди, після чого пристрій автоматично з'являється у графічному інтерфейсі єдиного додатку (Smart Life або TuYa Smart). Цей інтерфейс надає користувачеві багатий інструментарій: від побудови наочних графіків зміни мікроклімату в реальному часі до налаштування push-повідомлень на смартфон про критичні відхилення параметрів або аварійні ситуації.

Нарешті, користувач комерційних рішень стає частиною глобальної системи підтримки. Він гарантовано отримує безкоштовні оновлення програмного забезпечення пристроїв ("повітрям"), які оптимізують їхню роботу та закривають вразливості, має доступ до детальної документації та великого ком'юніті користувачів.

Таким чином, для реалізації функціональної, відмовостійкої та безпечної системи стабілізації мікроклімату в реальних побутових чи комерційних умовах, використання стандартизованих бездротових протоколів передачі даних (ZigBee, Wi-Fi) у симбіозі з хмарними платформами автоматизації (TuYa Smart) є найбільш раціональним, сучасним та економічно виправданим інженерним рішенням.

2.2 Вибір датчика вологості повітря

Розробка ефективної системи автоматичного регулювання мікроклімату безпосередньо залежить від правильного вибору первинного вимірювального перетворювача. Для апаратної реалізації поставленого завдання можна застосовувати різноманітні сенсори, що відрізняються за конструктивним виконанням та фізичним принципом дії. Проте, керуючись обраною раніше концепцією використання готових інфраструктурних рішень, найбільш доцільним є орієнтація на серійні промислові або комерційні IoT-пристрої. До таких інтелектуальних модулів висувається низка жорстких експлуатаційних вимог. Зокрема, вони повинні оснащуватися автономним джерелом живлення для забезпечення енергонезалежності, мати вбудовані радіотрансивери для

підтримки сучасних бездротових протоколів передачі інформації (таких як Wi-Fi, ZigBee або стандарту Bluetooth Low Energy), а також характеризуватися повною програмною сумісністю з провідними хмарними платформами автоматизації розумного будинку, серед яких TuYa Smart, Smart Life та локальний сервер Home Assistant.

Окрім суто технічних параметрів, фундаментальне значення мають економічні критерії, а саме загальна вартість пристрою та його доступність на споживчому ринку. Вимірювальний компонент повинен належати до бюджетного сегмента і бути широко представленим у роздрібній мережі. Виконання цієї умови гарантує, що у випадку непередбаченої апаратної поломки, вичерпання ресурсу або фізичного пошкодження датчика, користувач зможе оперативно придбати аналогічний прилад та здійснити його заміну. Це дозволить уникнути тривалих простоїв у роботі кліматичної системи та мінімізувати фінансові витрати на технічне обслуговування, що в підсумку суттєво підвищує загальну ремонтпридатність та практичну цінність усього розробленого комплексу.

Враховуючи сформульовані техніко-економічні критерії, було проведено маркетингове дослідження наявних у продажу бездротових датчиків вологості. Одним із найбільш збалансованих та економічно вигідних рішень є інтелектуальний сенсор температури та відносної вологості моделі TH01, конструктивне виконання якого продемонстровано на рисунку 2.1. Цей вимірювальний модуль користується значним попитом на вітчизняних та міжнародних торгових майданчиках, а його роздрібна вартість варіюється у вельми доступних межах — орієнтовно від 100 до 300 гривень. Важливою інженерною перевагою лінійки TH01 є випуск пристрою у кількох апаратних модифікаціях, що підтримують як пряме підключення через Wi-Fi, так і роботу в комірчастих мережах стандарту ZigBee. Це відкриває можливості для максимально гнучкої інтеграції датчика в будь-яку архітектуру мережі автоматизації.



Вибір одиниць вимірювання температури у додатку

Ви можете вибрати °C або °F як одиниця вимірювання температури через програму.

Голосове управління

Працює з Amazon Alexa, Google Assistant.

Сигналізація про низький заряд батареї

Ви можете контролювати рівень заряду батареї.

Зміни температури та вологості.

Крива зміни температури та вологості, історія зберігається.

Настінний, простий у встановленні

Характеристики датчик температури та вологості

Матеріал корпусу: АБС

Розмір датчика: 70*24*19 мм

Вага: 30 г

Живлення: AAA 2 штуки

Частота Wi-Fi: 2,4 ГГц IEEE 802.11 b/g/n

Діапазон вимірювання температури: -10°C ~ 60°C

Діапазон вимірювання вологості: 0% ~ 100% відносної вологості

Точність вимірювання температури: ±1°C

Точність виміру вологості: ± 5% відносної вологості

Рисунок 2.1 – Бездротовий вимірювальний модуль температури та вологості серії TH01

Альтернативним варіантом для побудови вимірювальної ланки є інтелектуальний датчик моделі TH-08, який додатково оснащений рідкокристалічним екраном (його зовнішній вигляд представлено на рисунку 2.2). Як і попередня модель, цей пристрій пропонується на ринку у двох комунікаційних версіях — з радіомодулем Wi-Fi або трансивером ZigBee, що безпосередньо позначається на його кінцевій вартості та визначає специфіку його включення в топологію розумного будинку. Ціновий діапазон для даного сенсора становить близько 300–500 гривень. Головною відмінною рисою та експлуатаційною перевагою приладу TH-08 є здатність не лише транслювати зібрані телеметричні дані на центральний контролер чи у хмарний сервіс, але й локально виводити поточні показники мікроклімату на інтегрований дисплей. Така функціональність значно підвищує ергономічність системи та зручність візуального моніторингу параметрів середовища для користувачів у повсякденних побутових умовах.

Тип пристрою	Датчик температури і вологості
Розумний дім	Tuya
Протокол зв'язку	Wi-Fi 2.4 ГГц
Тип підключення	Бездротовий
Робота через хаб	Ні
Екосистема (додаток)	Google Home, Home Assistant, Tuya Smart, Smart Life
Голосове керування	Amazon Alexa, Google Assistant
Живлення	Батарея LR03-1,5 В/AAA*3 (не входить в комплект)
Матеріал	ABS
Розміщення	Всередині приміщення
Додатково	Підсвічування; Діапазон вимірювання температури: -9.9 °C-60 °C; Точність температури: ±1; Діапазон вимірювання вологості: 0% RH-99% RH; Точність вологості: ±5% RH
Сертифікація	CE
Розмір	56.2*56.2*23.3 мм
Комплектація	Датчик*1, інструкція*1



Рисунок 2.2 – Сенсор мікроклімату моделі TH-08 з інтегрованим інформаційним дисплеєм

До переліку раціональних виборів також належить розумний датчик вологості та температури НІМОЮ, що працює за протоколом ZigBee. Цей прилад також комплектується вбудованим цифровим екраном, що уможливорює пряме візуальне зчитування кліматичних параметрів без необхідності обов'язкового використання смартфона чи запуску мобільного додатка. Дизайн корпусу та загальні технічні особливості даного модуля проілюстровано на рисунку 2.3.

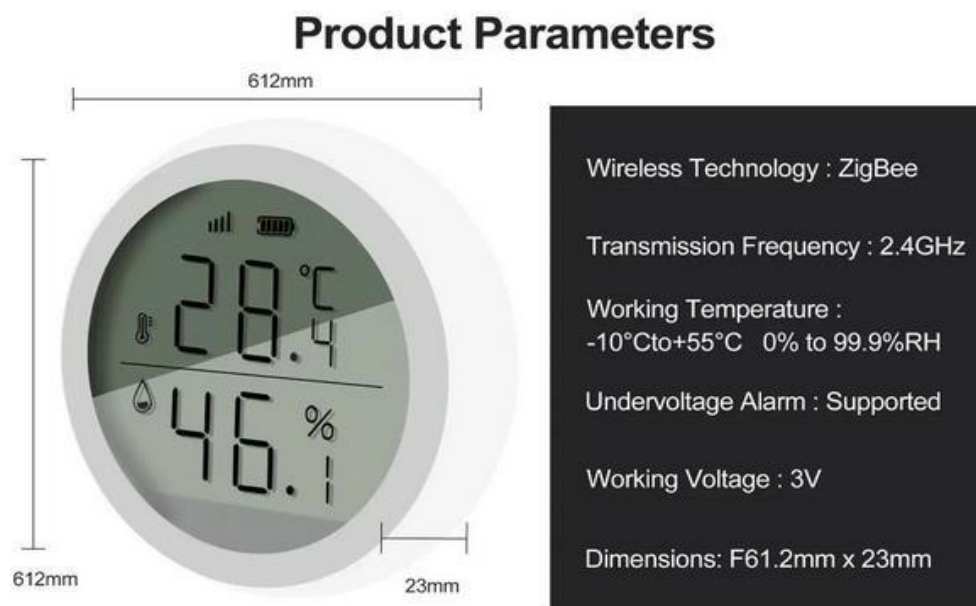


Рисунок 2.3 – Бездротовий вимірювач параметрів середовища НІМОЮ стандарту ZigBee

Окремої уваги заслуговує телеметричний пристрій ZigBee TH Sensor (модель AirVision-Z-TH) від компанії Maxus, який зображено на рисунку 2.4. На противагу описаним вище моделям з екранами, цей сенсор відзначається мінімалістичним дизайном без вбудованого дисплея. Однак його ключовою та беззаперечною перевагою є висока надійність, підтверджена офіційними гарантійними зобов'язаннями виробника терміном на 12 або навіть 36 місяців. Цей фактор відіграє вирішальну роль при проєктуванні відповідальних систем, де пріоритетом є безвідмовність та довгострокова безперебійна експлуатація обладнання.



Тип	датчик
Установка	в приміщенні
Виявлення	температури
Особливості	бездротове підключення
Дальність виявлення	70 м
Робоча температура	від -10 ° C до +50 ° C
Вхідна напруга	3 В
Захист	IP20
Габарити	37x11,6 мм

Рисунок 2.4 – Комерційний датчик мікроклімату Maxus AirVision-Z-TH

Проведений аналіз свідчить, що сучасна номенклатура датчиків температури та відносної вологості, які потенційно сумісні з розроблюваним апаратним комплексом, налічує десятки різноманітних моделей від різних виробників. Якщо винести за дужки суто комерційні фактори (такі як роздрібна ціна, логістична доступність чи наявність гарантії), то фундаментальні технічні відмінності між цими пристроями класифікуються за кількома базовими критеріями. По-перше, це наявність або відсутність засобів локальної візуалізації (цифрового дисплея). По-друге, це форм-фактор джерела автономного живлення: найчастіше використовуються компактні літієві елементи напругою 3 В або класичні батареї стандарту AA. По-третє, визначальним є підтримуваний стандарт бездротового зв'язку (енергоефективний ZigBee, Wi-Fi або Bluetooth). І, зрештою, важливим є рівень програмної відкритості пристрою — здатність

працювати виключно в закритій екосистемі TuYa або можливість вільної інтеграції зі сторонніми платформами через протокол MQTT чи локальний сервер Home Assistant.

Зробивши комплексну оцінку всіх вищезазначених технічних, експлуатаційних та економічних факторів, для практичної реалізації розроблюваної системи автоматичного керування мікрокліматом було ухвалено рішення обрати бездротовий Wi-Fi-датчик моделі TH01. Такий вибір обґрунтовується тим, що цей сенсор є одним із найбільш масових, перевірених та легкодоступних рішень на сучасному ринку IoT-обладнання. Пристрій демонструє достатній рівень експлуатаційної надійності, що підтверджується його активним використанням у системах автоматизації багатьох країн. Більше того, його універсальність гарантує, що у випадку непередбаченої відмови вимірювального вузла процес його заміни на новий екземпляр та повторне сполучення із вже функціонуючою керуючою мережею відбуватимуться максимально швидко і без будь-яких технічних ускладнень для кінцевого користувача.

2.3 Вибір виконавчого пристрою САР вологості

Спираючись на результати аналітичного огляду, який було детально викладено у попередньому розділі даного дослідження, виникає об'єктивна необхідність більш чітко формалізувати технологічні вимоги до параметрів мікроклімату та визначити оптимальні інженерні шляхи їх забезпечення. Саме правильна ідентифікація цих експлуатаційних умов відіграє фундаментальну роль у процесі коректного підбору виконавчих механізмів для проєктованої системи автоматичного регулювання (САР). Відповідно до затвердженого технічного завдання, розроблюваний апаратний комплекс має вузькоспеціалізоване призначення і орієнтований виключно на процес зниження (десикації) рівня відносної вологості повітряного середовища. Оскільки компенсація дефіциту вологи у періоди пересушеного повітря не входить до переліку функціональних завдань системи, інтеграція будь-яких типів зволожувачів повністю виключається з архітектури проєкту. З огляду на це, у

ролі активних виконавчих пристроїв можуть розглядатися лише дві категорії обладнання: спеціалізовані автономні осушувачі повітря або ж моторизовані елементи систем припливно-витяжної вентиляції.

Розглядаючи варіант застосування припливно-витяжної вентиляції як головного інструменту стабілізації мікроклімату, варто зауважити, що її базові аеродинамічні та конструктивні параметри зазвичай жорстко детерміновані архітектурно-проектними рішеннями конкретного об'єкта чи домогосподарства. Отже, ці характеристики не чинять суттєвого впливу на алгоритмічну логіку розроблюваної мікропроцесорної системи. Як правило, основним виконавчим механізмом у таких вентиляційних комплексах виступає однофазний асинхронний або колекторний електродвигун помірної потужності. Живлення такого тягового двигуна здійснюється від стандартної побутової електромережі змінного струму з напругою 220 В, а його номінальне енергоспоживання переважно не перевищує позначки у 200 Вт. Такі скромні енергетичні апетити означають, що завдання прямої комутації (безпосереднього автоматичного вмикання та вимикання вентиляції) може бути легко та безпечно реалізоване за допомогою широкого спектра стандартних бездротових релейних модулів та інтелектуальних розеток з екосистеми TuYa Smart, які штатно розраховані на роботу з подібними індуктивними навантаженнями.

Якщо ж для нормалізації мікроклімату приймається рішення про застосування автономних осушувачів повітря, виникає потреба у детальному аналізі доступних на ринку агрегатів з обов'язковою оцінкою їхніх електротехнічних та експлуатаційних специфікацій. Огляд доцільно розпочати з базового сегмента, яскравим представником якого є компактна та економічно доступна модель Noveen DH450 [19]. Аналіз технічного паспорта цього приладу, зовнішній вигляд якого продемонстровано на рисунку 2.5, свідчить, що він призначений для обслуговування закритих просторів площею до 30 квадратних метрів. При цьому пристрій відзначається високою енергоефективністю, споживаючи лише 70 Вт електроенергії. Водночас показник його робочої продуктивності є досить скромним і становить орієнтовно 0,52 літра конденсованої вологи протягом доби. Це прямо вказує на те, що сфера

раціонального застосування такого апарата обмежується виключно стандартними житловими кімнатами з невеликим надлишком вологості. Для тривалої експлуатації у санітарних вузлах, душових або підвальних приміщеннях, де генерується значний об'єм водяної пари і потрібна інтенсивна десикація, продуктивності цієї моделі буде абсолютно недостатньо.



Тип пристрою	осушувач
Тип зволожувача	немає
Потужність	70 Вт
Площа що обслуговується	30 м²
Дисплей	є
Управління	сенсорне
Пульт ДУ	немає
Об'єм бака	1 л
Витрати води	0,52 л/добу (влаговидалення)
Рівень шуму	40 дБ
Габарити (ШхВхГ)	210x325x195 мм
Вага	2,9 кг

Рисунок 2.5 – Компактний побутовий прилад для видалення вологи Noveen DH450

Для складніших умов експлуатації необхідно розглядати більш продуктивні, хоча й фінансово витратніші інженерні рішення, до яких належить кліматична установка TCL DEL10EB [20]. На противагу попередньому малопотужному аналогу, цей компресорний агрегат демонструє здатність екстрагувати з повітряного середовища до 6,1 літра вологи за двадцять чотири години безперервної роботи, ефективно обслуговуючи площу близько 20 квадратних метрів (візуалізація приладу наведена на рисунку 2.6). Завдяки таким форсованим технічним характеристикам, зазначений осушувач можна впевнено позиціонувати як дієвий і надійний виконавчий механізм для оперативного купірування надлишкової вологості навіть у просторих підвальних приміщеннях зі складним термодинамічним профілем.



Тип пристрою	осушувач
Тип зволожувача	немає
Потужність	270 Вт
Площа що обслуговується	20 м²
Дисплей	є
Управління	електронне
Пульт ДУ	немає
Особливості	автовідключення, таймер
Тип таймера	на включення, на відключення
Час таймера	24 ч
Фільтрація	легко очищається фільтр
Об'єм бака	1,5 л
Витрати води	6,1 л/добу
Час роботи (макс.)	24 ч
Рівень шуму	37 дБ
Габарити (ШхВхГ)	280x386x195 мм
Вага	9,7 кг

Рисунок 2.6 – Високопродуктивний кліматичний агрегат серії TCL DEL10EB

У випадках, коли виникає необхідність інтенсивного осушення великогабаритних промислових чи складських приміщень, або ж постає завдання швидкої ліквідації колосальних об'ємів залишкової вологи після проведення масштабних будівельних, штукатурних чи ремонтних робіт, пов'язаних із "мокрими процесами", використання звичайної побутової техніки втрачає будь-який технічний сенс. Для таких екстремальних умов доцільно залучати потужне напівпромислове обладнання, типовим зразком якого є мобільна установка NEO Tools 90-160 [21], яка зображена на рисунку 2.7. Даний компресорний агрегат здатний конденсувати і виводити до 50 літрів води на добу (за умови тестування при температурі навколишнього середовища 30 °C та початковій відносній вологості на рівні 80 %), що повністю задовольняє найсуворіші вимоги до професійного кліматичного обладнання індустріального класу.



Тип пристрою	осушувач
Тип зволожувача	немає
Потужність	900 Вт
Площа що обслуговується	180 м²
Дисплей	є
Управління	електронне
Пульт ДУ	немає
Особливості	таймер
Тип таймера	на відключення
Час таймера	до 24 год
Фільтрація	сітчастий фільтр, що миється
Об'єм бака	7 л
Рівень шуму	56 дБ
Габарити (ШхВхГ)	450х655х480 мм
Вага	30 кг

Рисунок 2.7 – Професійна установка для десикації повітря NEO Tools 90-160

Резюмуючи вищевикладений аналітичний матеріал, можна сформулювати чіткі інженерні рекомендації щодо вибору виконавчих елементів системи автоматичного регулювання. У ситуаціях, коли в приміщенні фіксується лише незначне і короткочасне перевищення нормативних меж відносної вологості, найбільш раціональним та енергоефективним кроком є використання наявної моторизованої припливно-витяжної вентиляції будівлі. Якщо ж спостерігаються стійкі та помітні відхилення мікрокліматичних показників у бік перезволоження, оптимальним технологічним рішенням стане інтеграція в систему автоматизації автономного компресорного осушувача середнього класу потужності, подібного до моделі TCL DEL10EB. І лише в критичних обставинах, коли надлишковий рівень вологості становить реальну загрозу для цілісності будівельних конструкцій або стабільного перебігу технологічних процесів, технічно та економічно виправданим є перехід до застосування важких напівпромислових десикаторів зразка NEO Tools 90-160.

2.4 Визначення керуючого пристрою системи

Зважаючи на аргументацію, наведену в попередніх підрозділах щодо

об'єктивної недоцільності використання універсальних саморобних мікроконтролерів (зокрема платформ Arduino або лінійки STM32) для створення надійних побутових систем мікроклімату, на поточному етапі проєктування виникає необхідність обґрунтованого вибору комерційного інтелектуального керуючого пристрою. Оскільки базовою вимогою є сумісність із потужною хмарною екосистемою Tuuya Smart, архітектурна побудова системи керування може бути реалізована у двох принципово різних концептуальних парадигмах:

- перша передбачає застосування єдиного централізованого багатоканального контролера, який монополярно здійснює комутацію всіх виконавчих механізмів на об'єкті;
- друга ґрунтується на формуванні децентралізованої (розподіленої) архітектури, де кожна одиниця кліматичного обладнання управляється власним автономним одноканальним релейним модулем.

У контексті проєктування сучасних інженерних систем життєзабезпечення будівель (вентиляції, кондиціонування, регулювання вологості) критично важливим завданням є забезпечення не лише базової функціональності, але й високої живучості та експлуатаційної адаптивності. Фундаментальний вибір між централізованою багатоканальною топологією та розподіленою мережею незалежних одноканальних модулів безпосередньо формує вектор майбутньої ефективності та надійності всього комплексу. Кожна з цих архітектур характеризується специфічним набором інженерних переваг та експлуатаційних обмежень, що потребує їх ретельного порівняльного аналізу.

З точки зору первинного проєктування, інтеграція єдиного багатоканального модуля керування може видаватися більш привабливим рішенням: вона фізично зменшує загальну кількість активних пристроїв у мережі, дозволяє сконцентрувати всю апаратну частину в одній електрощитовій панелі та, теоретично, дещо спрощує процес первинного підключення до хмарного сервісу. Проте детальний аналіз реального експлуатаційного досвіду свідчить, що така централізована модель часто виявляється вразливішою до критичних збоїв, гірше піддається просторовому масштабуванню та вимагає значно вищих витрат під час сервісного обслуговування, особливо на об'єктах зі

складною топологією приміщень.

Головним і найбільш критичним недоліком централізованої моделі є наявність так званої "єдиної точки відмови" (Single Point of Failure). Оскільки вся керуюча логіка та комутаційна апаратура фізично зосереджені в межах одного багатоканального контролера, будь-яка його нештатна зупинка — чи то внаслідок стрибка напруги, перегорання внутрішнього блоку живлення, чи критичної помилки в мікропрограмі (прошивці) — неминуче призводить до миттєвого паралічу всієї кліматичної системи будівлі. Виконавчі механізми залишаються повністю некерованими, що в умовах необхідності постійного відкачування вологи може мати серйозні наслідки.

На противагу цьому, розподілена архітектура, яка базується на застосуванні локальних одноканальних комутаторів (розумних Wi-Fi або ZigBee реле для індивідуального керування кожним вентилятором, клапаном чи осушувачем), гарантує високий ступінь автономності кожного вузла. У такій системі фізична або програмна відмова одного модуля управління блокує роботу лише одного конкретного виконавчого пристрою, тоді як решта мережі продовжує функціонувати у штатному режимі, відпрацьовуючи задані сценарії. Це кардинально підвищує загальний індекс відмовостійкості та живучості кліматичного комплексу.

Ще одним визначальним критерієм є потенціал до масштабування та простота гнучкого розширення системи. Багатоканальні контролери випускаються із жорстко лімітованою кількістю релейних виходів (зазвичай 4, 8 або 16). Якщо під час модернізації об'єкта (наприклад, при додаванні нової витяжної зони у підвалі) виникає потреба підключити додаткове навантаження, а вільних каналів на контролері більше немає, розробник постає перед необхідністю повної заміни керуючого блоку на більш місткий або ж дороговартісного встановлення ще одного багатоканального модуля. Натомість децентралізована топологія дозволяє масштабувати систему плавно та з мінімальними фінансовими витратами: достатньо просто придбати ще одне компактне одноканальне реле, підключити його безпосередньо до нового агрегату та за кілька секунд додати в єдину екосистему через додаток TuYa

Smart. Такий еволюційний підхід позбавляє від необхідності кардинально перепроєктовувати існуючу мережу.

Суттєві відмінності спостерігаються і в питаннях сервісного обслуговування. Заміна несправного одноканального модуля займає кілька хвилин і не вимагає знеструмлення суміжних систем. Тоді як діагностика та демонтаж багатоканального контролера передбачають повну зупинку кліматичного обладнання на об'єкті, відключення десятків кабельних ліній та подальше трудомістке їх перепідключення з ризиком помилок монтажу. До того ж, розподілена мережа забезпечує кращу самодіагностику, оскільки кожен вузол самостійно звітує про свій стан у додаток, що дозволяє миттєво локалізувати проблему.

Важливим логістичним аспектом є просторове розміщення обладнання. Використання багатоканального контролера неминуче вимагає його встановлення у центральному розподільчому щиті (DIN-рейка), звідки до кожного вентилятора чи осушувача по всій будівлі необхідно тягнути окремі силові кабельні траси. Це означає значні витрати на мідний кабель, штроблення стін та ускладнює інсталяцію в приміщеннях із завершеним ремонтом. Одноканальні ж Wi-Fi або ZigBee реле мають надзвичайно компактні розміри, що дозволяє монтувати їх безпосередньо в монтажні коробки розеток, під декоративними кришками вентиляторів або прямо в корпусах осушувачів. Такий підхід радикально скорочує довжину кабельних ліній, економить кошти та ідеально підходить для модернізації історичних чи відремонтованих будівель.

З погляду алгоритмічної гнучкості, розподілена мережа також демонструє переваги. Кожен смарт-модуль у додатку Tuua сприймається як незалежна сутність, якій можна призначити власні, унікальні смарт-сценарії (наприклад, активація витяжки лише за умови присутності людини, досягнення порогової вологості та з урахуванням прогнозу погоди). Усі ці правила обробляються децентралізовано на рівні хмари, що знімає обчислювальне навантаження з апаратних контролерів і дозволяє легко комбінувати пристрої від різних виробників (за умови їх підтримки протоколу Tuua) у єдині логічні ланцюжки.

Підсумовуючи результати теоретичного порівняння, можна зробити

висновок, що попри певну зручність централізованих багатоканальних пристроїв для об'єктів із суворо фіксованою інженерною структурою, для реалізації побутових автоматизованих систем мікроклімату значно доцільнішою є розосереджена архітектура. Вона гарантує чудову гнучкість налаштувань, елементарне масштабування, високий захист від відмов та мінімізацію монтажних витрат. Для остаточного підтвердження цього вибору доцільно розглянути обидва підходи на прикладі реальних апаратних рішень.

Реалізація централізованого підходу передбачає інтеграцію 4-канального релейного модуля, сумісного з платформою Туа (наприклад, пристрою серії TYWB-4 [22], зовнішній вигляд якого представлено на рисунку 2.8), який зазвичай монтується у щиток автоматики. До його клемних колодок підводяться лінії живлення всіх витяжних двигунів та клапанів.



Рисунок 2.8 – Централізований 4-канальний смарт-контролер серії TYWB-4

Переваги такого вибору зводяться до високої фізичної компактності в межах розподільчого щита та наявності єдиної точки мережевого доступу. Однак фатальні недоліки у вигляді єдиної точки відмови всього обладнання, жорсткого обмеження на 4 виконавчі пристрої та складності розгалуженого кабельного монтажу по всьому приміщенню роблять це рішення неоптимальним.

Альтернативний варіант — розосереджена топологія — ґрунтується на використанні індивідуальних 1-канальних релейних модулів для кожного

окремого кліматичного агрегату. Як базові компоненти можуть розглядатися компактні реле типу YOSO Smart W-Relay-01 [23] або аналогічні одноканальні Wi-Fi комутатори від бренду Moes [24] (візуалізація доступна на рисунку 2.9).



Рисунок 2.9 – Компактні одноканальні релейні модулі екосистеми Tuuya Smart

Цей підхід об'єктивно домінує завдяки безпрецедентній структурній гнучкості (додавання нових вузлів не вимагає перепроєктування мережі), відмінній живучості (ізолювана полумка не впливає на інші зони), мінімізації довжини силових кабелів завдяки прихованому монтажу реле безпосередньо в місцях встановлення вентиляторів та можливості індивідуального тонкого налаштування алгоритмів кожного каналу в додатку. Єдиним умовним недоліком є необхідність адміністрування більшої кількості IP-адрес у локальній Wi-Fi мережі, що, втім, легко вирішується шляхом переходу на модулі стандарту ZigBee із застосуванням центрального шлюзу-координатора.

З огляду на проведений комплексний аналіз переваг та недоліків, для подальшого проєктування та практичної реалізації розроблюваної системи автоматизації мікроклімату було остаточно обрано другий варіант — розосереджену (децентралізовану) архітектуру керування, побудовану на базі автономних одноканальних смарт-контролерів.

Висновки до розділу 2

У другому розділі кваліфікаційної роботи здійснено комплексне проектування апаратної структури розроблюваної системи автоматичного регулювання вологості та проведено обґрунтований вибір її ключових компонентів.

На основі техніко-економічного аналізу доведено недоцільність використання універсальних саморобних мікроконтролерів (типу Arduino чи STM32) для створення побутових систем тривалої експлуатації. Натомість обрано архітектурну концепцію, що базується на інтеграції готових сертифікованих комерційних IoT-пристроїв у єдину бездротову мережу з використанням хмарної платформи Tuuya Smart. Цей підхід гарантує високу електробезпеку, надійність та інтуїтивну простоту пусконаладження для кінцевого користувача.

Визначено оптимальний вимірювальний елемент системи — бездротовий Wi-Fi-датчик температури та вологості моделі TH01. Його вибір зумовлений високою ціною доступності, достатньою точністю вимірювань та легкістю інтеграції в екосистему розумного будинку, що забезпечує відмінну ремонтпридатність вимірювальної ланки.

Сформовано підходи до вибору виконавчих механізмів. Оскільки система орієнтована на десикацію (осушення) повітря, встановлено, що для усунення незначного перезволоження найраціональнішим рішенням є керування наявною моторизованою припливно-витяжною вентиляцією. У разі ж стійких відхилень мікроклімату доцільно комутувати автономні компресорні осушувачі середньої потужності (наприклад, класу TCL DEL10EB).

Особливу увагу приділено вибору топології керуючого пристрою. Шляхом порівняння централізованої та децентралізованої моделей доведено, що для забезпечення високої живучості, гнучкості та масштабування системи безальтернативним є використання розосередженої архітектури. Керування кожним виконавчим механізмом здійснюватиметься локальними автономними одноканальними смарт-реле, що повністю усуває загрозу «єдиної точки відмови» та суттєво мінімізує витрати на кабельний монтаж.

Отже, за результатами другого розділу повністю сформовано апаратну конфігурацію проєкту. Обрані технічні рішення створюють надійний фундамент для переходу до етапу алгоритмічного налаштування смарт-сценаріїв та практичного тестування системи в реальних умовах експлуатації.

РОЗДІЛ 3 ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ СМАРТ-СЦЕНАРІЇВ ТА АНАЛІЗ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМИ КЛІМАТ-КОНТРОЛЮ

3.1 Розробка загальної структури САР

Відповідно до сформульованої мети кваліфікаційної роботи та затвердженого технічного завдання, архітектурна побудова системи автоматичного регулювання (САР) мікроклімату базуватиметься на інтеграції кількох функціональних апаратних вузлів. До базової конфігурації розроблюваного комплексу входять такі ключові елементи. По-перше, це інтелектуальні вимірювальні перетворювачі температури та відносної вологості серії ТН01. Їх цільове призначення полягає у безперервному моніторингу параметрів газового середовища у специфічних зонах із підвищеним ризиком перезволоження, таких як підвальні приміщення та санітарні вузли (ванні кімнати). Крім того, один із сенсорів ТН01 передбачається встановити назовні будівлі для фіксації фонові атмосферної вологості. При цьому зовнішній вимірювальний модуль має бути змонтований у місці, що гарантовано захищене від впливу атмосферних опадів та прямого ультрафіолетового сонячного випромінювання, аби забезпечити максимальну достовірність метеорологічних даних. По-друге, до складу системи інтегрується мультифункціональний датчик моделі ТН-08, який оснащений вбудованим рідкокристалічним дисплеєм. Цей прилад раціонально розташовувати у житлових або транзитних зонах (наприклад, у вітальні, спальні, кухні чи коридорі), де він виконуватиме роль локальної побутової метеостанції для зручного візуального контролю мікроклімату мешканцями. По-третє, виконавчий сегмент САР реалізується за допомогою необхідної кількості автономних одноканальних комутаційних пристроїв — розумних Wi-Fi реле від виробника Moes. Саме вони відповідатимуть за безпосереднє вмикання та вимикання силового навантаження, зокрема витяжних вентиляторів або побутових компресорних осушувачів, на основі керуючих алгоритмів, згенерованих центральною платформою.

Узагальнена топологія розроблюваної системи керування у її максимально

розгорнутій конфігурації графічно представлена на рисунку 3.1. На наведеній принциповій структурній схемі відображено всі потенційно можливі апаратні компоненти та інформаційні зв'язки між ними. Проте варто зауважити, що в умовах реальної експлуатації в межах одного локального приміщення, як правило, застосовується лише один тип виконавчого механізму — це або витяжний електродвигун вентиляційної системи, або ж автономний осушувач повітря. З огляду на цю експлуатаційну особливість, лінія комутації осушувального апарата на кресленні виділена штриховим пунктиром як опціональна гілка керування. Аналізуючи алгоритмічну частину, необхідно підкреслити, що побудова багатокритеріальних і глибоко розгалужених логічних сценаріїв суто засобами штатного хмарного середовища TuYa Smart (навіть із залученням популярного стороннього сервісу автоматизації IFTTT) є надзвичайно складним, а подекуди й неможливим завданням для таких багатокомпонентних інфраструктур. Безумовно, існують альтернативні шляхи вирішення цієї проблеми, зокрема використання хмарних таблиць Google Sheets у симбіозі з програмним середовищем Google Apps Script, або ж розгортання локального сервера Home Assistant із надбудовою Node-RED для візуального програмування логіки. Однак імплементація таких високотехнологічних інструментів призвела б до невиправданого та критичного ускладнення програмної архітектури системи, що є абсолютно неприпустимим у рамках висунутих вимог щодо інтуїтивної простоти налаштування обладнання для звичайного користувача.

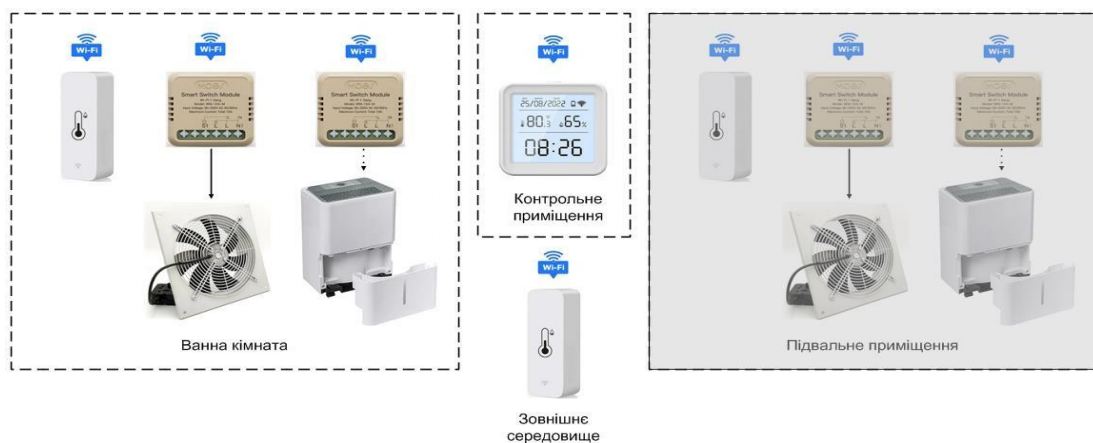


Рисунок 3.1 – Узагальнена структурна схема апаратного комплексу стабілізації вологості

На етапі системного проєктування автоматизованого комплексу моніторингу та регулювання мікроклімату одним із найбільш відповідальних інженерних рішень є вибір оптимального стандарту бездротової комунікації. Від цього протоколу безпосередньо залежить надійність обміну телеметричними даними між первинними сенсорами, виконавчими релейними модулями та центральним хмарним ядром керування. На сучасному ринку обладнання для концепції «розумного будинку» абсолютно домінують три радіочастотні технології: Wi-Fi, Bluetooth (включаючи енергоефективний BLE) та ZigBee. Проте детальний техніко-експлуатаційний аналіз показує, що для вирішення переважної більшості прикладних побутових завдань саме розповсюджена технологія Wi-Fi демонструє найкраще співвідношення таких критеріїв, як широта функціональних можливостей, стабільність з'єднання та загальна економічна доступність. Саме сукупність цих факторів робить її пріоритетним вибором для побудови мережевої інфраструктури в рамках поточної кваліфікаційної роботи.

Аналізуючи технічні переваги обраного стандарту, слід найперше виділити пропускну здатність бездротового каналу. Безперечно, циклічна трансляція числових значень температури та вологості з датчиків генерує мізерний обсяг мережевого трафіку, для якого швидкісні можливості Wi-Fi є надлишковими. Однак цей експлуатаційний запас відіграє позитивну роль: висока швидкість передачі інформаційних пакетів радикально мінімізує мережеві затримки під час відправки керуючих імпульсів на виконавчі реле. До того ж, наявність широкого каналу гарантує абсолютну безперебійність роботи додаткових ресурсомістких функцій хмарної платформи, серед яких синхронізація масивів історичних даних, побудова динамічних графіків мікроклімату у реальному часі та забезпечення миттєвого віддаленого доступу до системи з будь-якої точки світу через глобальну мережу Інтернет.

Другим, і чи не найвагомішим аргументом на користь використання Wi-Fi, є архітектурна незалежність інтелектуальних пристроїв від додаткових апаратних шлюзів (координаторів). IoT-модулі цього стандарту здатні самостійно і безпосередньо підключатися до штатного домашнього маршрутизатора

(роутера), отримуючи прямий вихід до глобальних серверів екосистеми Tuuya Smart. На противагу цьому, архітектури, що засновані на протоколах ZigBee або Bluetooth, жорстко вимагають придбання та налаштування окремого трансивера (хабу). Це не лише штучно ускладнює загальну топологію мережі та збільшує кількість потенційно вразливих апаратних вузлів, але й відчутно підвищує загальний фінансовий кошторис проєкту. Мінімізація кількості структурних елементів без жодних компромісів щодо функціональності є фундаментальним правилом успішного проєктування масових систем домашньої автоматизації.

Не менш важливим аспектом є насиченість ринку та взаємозамінність елементної бази. На сьогоднішній день сегмент Wi-Fi-сумісних смарт-пристроїв, здатних працювати з платформою Tuuya, є колосальним. Він охоплює тисячі сертифікованих моделей різноманітних сенсорів, розумних розеток, релейних модулів та багатоканальних контролерів. Таке різноманіття відкриває перед розробником і кінцевим користувачем безмежні перспективи для подальшого масштабування комплексу або швидкої заміни пошкодженого компонента без ризику натрапити на апаратну несумісність. Водночас вибір обладнання стандарту ZigBee чи Bluetooth є більш вузьким і спеціалізованим, а їхня інтеграція часто обмежується підтримкою конкретної моделі шлюзу. З погляду радіопокриття, Wi-Fi також має суттєві переваги в умовах звичайної квартири чи приватного будинку, оскільки якісний та стабільний сигнал забезпечується вже наявними потужними роутерами та Mesh-системами повторювачів. Bluetooth-зв'язок натомість характеризується критично малим радіусом ефективної дії (зазвичай до 10 метрів у зоні прямої видимості), що робить його вкрай ненадійним при розміщенні датчиків і реле в сусідніх кімнатах, розділених капітальними залізобетонними стінами. Щодо ZigBee, то хоча цей стандарт і здатний формувати стійкі комірчасті (mesh) мережі для розширення зони покриття, це вимагає встановлення достатньої кількості проміжних вузлів із постійним живленням, що дещо ускладнює первинне пусконаладження.

Окремої уваги при проєктуванні заслуговує питання енергоефективності апаратури. Загальновідомо, що протоколи Bluetooth та ZigBee розроблялися інженерами спеціально з акцентом на мінімальне споживання електроенергії. Ця

характеристика робить їх ідеальними кандидатами для використання в портативній електроніці та повністю автономних сенсорах, які здатні безперебійно функціонувати від однієї мініатюрної батареї впродовж багатьох місяців або навіть років. Однак, якщо розглядати специфіку проєктуваної САР вологості, то абсолютна більшість її виконавчих механізмів (комутаційні реле, розумні розетки, витяжні вентилятори) у будь-якому разі підключаються до стаціонарної побутової електромережі змінного струму з напругою 220 В. За таких умов жорсткої прив'язки до розетки експлуатаційна перевага ультранизького енергоспоживання повністю нівелюється, адже проблема економії заряду просто зникає. Натомість Wi-Fi-пристрої, маючи необмежений доступ до стаціонарного джерела живлення, здатні перебувати в активному мережевому режимі абсолютно безперервно. Це дозволяє їм здійснювати циклічний обмін даними в режимі реального часу, миттєво реагувати на критичні стрибки вологості та надійно взаємодіяти з хмарними сервісами для відпрацювання складних логічних макросів без ризику раптової втрати зв'язку через розряджений акумулятор.

Підбиваючи підсумки вищевикладеного порівняльного аналізу, можна з упевненістю стверджувати, що вибір стандарту Wi-Fi як фундаментального протоколу передавання даних для побудови системи контролю вологості є найбільш раціональним, сучасним і технічно виправданим кроком. Відсутність потреби в закупівлі додаткових проміжних координаторів, безпрецедентна простота інтеграції в існуючу IT-інфраструктуру домогосподарства, найширша доступність компонентів на глобальному ринку та висока стабільність безперервного зв'язку дозволяють створити по-справжньому ефективну, гнучку та економічно доцільну систему автоматизації. Застосування Wi-Fi архітектури повністю задовольняє всі вимоги технічного завдання, гарантуючи високий рівень комфорту під час повсякденної експлуатації без необхідності глибокого технічного адміністрування чи невиправданих капіталовкладень з боку користувача.

3.2 Створення сценаріїв на платформі TuYa

Як відомо, популярні хмарні екосистеми для розумного будинку, зокрема TuYa Smart та її функціональний аналог Smart Life, мають певні програмні обмеження щодо побудови гнучкої керуючої логіки. Одним із таких суттєвих недоліків є неможливість безпосереднього математичного порівняння поточних показників, отриманих від двох або більше незалежних вимірювальних пристроїв у режимі реального часу. Базовий інструментарій системи дозволяє формувати тригери автоматизації виключно спираючись на жорстко зафіксовані (статичні) числові параметри окремо взятого датчика. Щоб успішно обійти цю архітектурну перепону та забезпечити коректну інтелектуальну роботу кліматичного обладнання, в інженерній практиці застосовується метод впровадження штучних (псевдо-розрахункових) порогових значень. Цей прийом дає змогу програмно імітувати наявність градієнта вологості (різниці показників) між відокремленими просторовими зонами будівлі.

Детальний аналіз ефективності функціонування системи стабілізації мікроклімату, побудованої на базі інфраструктури TuYa Smart із залученням методології псевдо-порівняння телеметричних даних, виявляє цілу низку як позитивних, так і негативних аспектів. Головний принцип дії такого комплексу базується на використанні системи статичних уставок (порогів спрацьовування). Завдяки грамотному експериментальному підбору цих значень розробникам вдається досить достовірно емулювати алгоритми роботи повноцінного адаптивного контролера. У результаті об'єкт автоматизації набуває здатності цілком адекватно реагувати на специфічні локальні коливання параметрів середовища в окремих кімнатах, незважаючи на відсутність прямих математичних операторів у хмарному середовищі.

Беззаперечною перевагою описаного технологічного підходу виступає максимальна простота його практичної імплементації. Процес розгортання та первинного пусконаладження системи абсолютно не вимагає від кінцевого споживача володіння навичками написання програмного коду чи експертних знань у галузі мікропроцесорної техніки. Відпадає також потреба у придбанні специфічних апаратних модулів. Абсолютно всі етапи конфігурування смарт-

сценаріїв виконуються в інтуїтивно зрозумілому графічному інтерфейсі мобільного застосунку TuYa Smart або Smart Life, що кардинальним чином знижує бар'єр входження у технології автоматизації для пересічних користувачів. Окрім цього, вагомим плюсом є суто хмарна модель побудови архітектури. Вона гарантує високу стабільність виконання заданих макросів без необхідності інсталяції та підтримки локального домашнього сервера чи шлюзу (на кшталт систем Home Assistant або платформи Node-RED) — весь масив обчислювальних операцій та логічне прийняття рішень повністю делегуються надійним віддаленим дата-центрам компанії TuYa.

Ще одним надзвичайно позитивним експлуатаційним моментом такого методу є формування ефекту адаптивного керування мікрокліматом, що досягається шляхом зіставлення робочих параметрів із так званим "фоновим" (базовим) рівнем вологості будівлі. Застосування щонайменше двох незалежних сенсорів, просторово рознесених по різних зонах (наприклад, один розміщується безпосередньо у ванній кімнаті, а другий — у сухому транзитному приміщенні на кшталт коридору), наділяє систему властивістю селективного реагування. Тобто автоматика активує виконавчі механізми виключно у разі виникнення локального надлишкового пароутворення. Водночас вона інтелектуально ігноруватиме глобальне підвищення вологовмісту в повітрі всього будинку, яке об'єктивно зумовлене зовнішніми кліматичними факторами (затяжними дощами, туманом або зміною пори року).

Звісно, незважаючи на очевидні економічні та ергономічні переваги, дане інженерне рішення містить низку об'єктивних обмежень. Насамперед, логічний апарат платформи Туа вирізняється певною жорсткістю. Оскільки екосистема не здатна виконувати пряме порівняння змінних величин у форматі « $A > B$ » в межах єдиного правила, користувач змушений прописувати абсолютні константи. Ці статичні пороги не можуть автоматично самокоригуватися, що відчутно знижує потенціал системи щодо плавної адаптації до динамічних сезонних змін середовища без ручного втручання. По-друге, повна відсутність вбудованих математичних функцій або можливості оперувати дельтами (наприклад, алгоритм: "діяти, якщо різниця показань перевищила 5%")

унеможливлює створення високопрецизійних алгоритмів. Як наслідок, за певних перехідних умов система може генерувати хибні спрацьовування виконавчих пристроїв при звичайних дрібних флуктуаціях вологості. Додатковим вагомим мінусом є відсутність функціоналу глибокої аналітики історичних даних у самій логіці автоматизацій та неможливість використання розгалужених програмістських структур типу «інакше» (оператор ELSE). Це ускладнює експлуатацію кліматичного комплексу в ситуаціях із непередбачуваним графіком присутності мешканців, наявністю великої кількості людей у домогосподарстві або за потреби створення багатоступеневих режимів роботи.

Розглядаючи проєкт на глибшому архітектурному рівні, стає очевидним, що функціонал жорстко лімітований концепцією базового візуального конструктора тригерів типу «умова-дія» (IF-THEN). Така парадигма не передбачає створення багат шарових логічних дерев. Відтак, одночасне оперування складними булевими виразами, використання вкладених логічних блоків «АБО» чи багат факторне порівняння сигналів від трьох і більше датчиків вимагатиме обов'язкового залучення сторонніх хмарних інтеграторів. Ще одним критично вразливим місцем є цілковита залежність від безперервного інтернет-з'єднання, оскільки система позбавлена механізмів локального (offline) резервного виконання смарт-сценаріїв. Якщо з будь-яких причин відбувається втрата зв'язку із віддаленими серверами Tuuya, обробка логіки повністю припиняється. У результаті автоматика не зможе вчасно відреагувати на зміну мікроклімату, що є критичним фактором для об'єктів підвищеної вологості.

Для кращого розуміння практичної площини реалізації, доцільно детально розібрати механізм дії методу псевдо-порівняння на конкретному прикладі розробленої системи. Основна логічна мета формулюється наступним чином: активація витяжного вентилятора повинна відбуватися виключно тоді, коли показник відносної вологості у ванній перетинає верхню межу встановленої норми, і паралельно з цим датчик у коридорі фіксує значення, яке не перевищує звичного "фонового" рівня. Деактивація (вимкнення) вентиляційної установки настає за умови нормалізації мікроклімату у ванній, або ж якщо датчик у коридорі фіксує стрімке зростання загальнобудинкової вологості (під час дощу),

коли подальша робота витяжки втрачає теплотехнічний сенс. Таким чином, лише наявність чіткого локального градієнта (у ванній волого, а в коридорі — сухо) виступає сигналом для старту процесу примусового повітрообміну.

Програмна структура розроблених автоматизацій відображена у лістингах 3.1 та 3.2.

Лістинг 3.1 – Логічний алгоритм старту примусової вентиляції Блок умов (IF): Показник Humidity Sensor A (ванна кімната) $> 75\%$ ТА Показник Humidity Sensor B (коридорна зона) $< 70\%$ Блок виконання (THEN): Змінити стан розумної розетки TuYa на "УВІМКНЕНО" (запуск двигуна вентилятора)

Лістинг 3.2 – Логічний алгоритм зупинки примусової вентиляції Блок умов (IF): Показник Humidity Sensor A (ванна кімната) $< 70\%$ Блок виконання (THEN): Змінити стан розумної розетки TuYa на "ВИМКНЕНО" (зупинка двигуна вентилятора) Додаткова альтернативна умова вимкнення: Показник Sensor B (коридорна зона) $> 72\%$ (сигналізує про загальне підвищення фонові вологості в будівлі).

Підбиваючи підсумок інженерних рішень, можна стверджувати, що впровадження концепції псевдо-порівняння вологості із використанням фіксованих порогів у хмарному середовищі TuYa виступає найбільш збалансованим компромісом між простотою налаштування та програмними обмеженнями автоматизації. Дана архітектура ідеально покриває потреби стандартних побутових сценаріїв (зокрема, формування мікроклімату у ванній кімнаті та коридорі). Однак, якщо виникає необхідність автоматизації комерційних об'єктів зі складною термодинамікою, доведеться переходити на використання повністю відкритих програмованих IoT-платформ. На рисунку 3.2 представлено візуальну демонстрацію практичного налаштування описаної логіки, де зображено інтерфейс мобільного застосунку TuYa Smart із готовими правилами керування системою вентиляції для приватного будинку.

Як загальний висновок, варто наголосити, що спроектована автоматизована система на апаратно-програмній базі TuYa Smart є надзвичайно ефективним, доступним і надійним інженерним рішенням для підтримки еталонного мікроклімату в приміщеннях. Застосування бездротових Wi-Fi-компонентів у

комбінації зі смарт-сценаріями, що спираються на метод умовних порогових значень, наділяє систему достатнім рівнем гнучкості для селективного реагування на просторові коливання вологості. Комплекс активує пристрої повітрообміну виключно за об'єктивної необхідності, повністю виключаючи потребу написання складного програмного коду або монтажу додаткового комунікаційного обладнання. Реалізований підхід не лише гарантує високий санітарний комфорт для користувача, але й забезпечує суттєве зниження витрат на енергоресурси при мінімальній залежності від сторонніх апаратних вузлів.

3.3 Дослідження функціонування розробленої системи

Для ґрунтового розуміння експлуатаційних принципів, закладених в основу розробленої мікропроцесорної системи контролю мікроклімату, виникає об'єктивна необхідність проаналізувати типові термодинамічні процеси, а саме — характер добових коливань відносної вологості повітря у ванній кімнаті за умови змінного впливу зовнішніх та внутрішніх факторів. Розглядаючи санітарний вузол як об'єкт автоматизації, варто відзначити, що показник вологості в такому приміщенні є вкрай динамічною і нестабільною величиною. Її значення формується під впливом складної суперпозиції локальних збурень (безпосереднє користування душовою кабіною чи ванною, інтенсивність дихання присутніх людей, ефективність роботи штатної пасивної вентиляції), а також глобальних чинників, до яких належить загальний фоновий рівень вологості в усій будівлі та поточні метеорологічні умови за межами споруди.

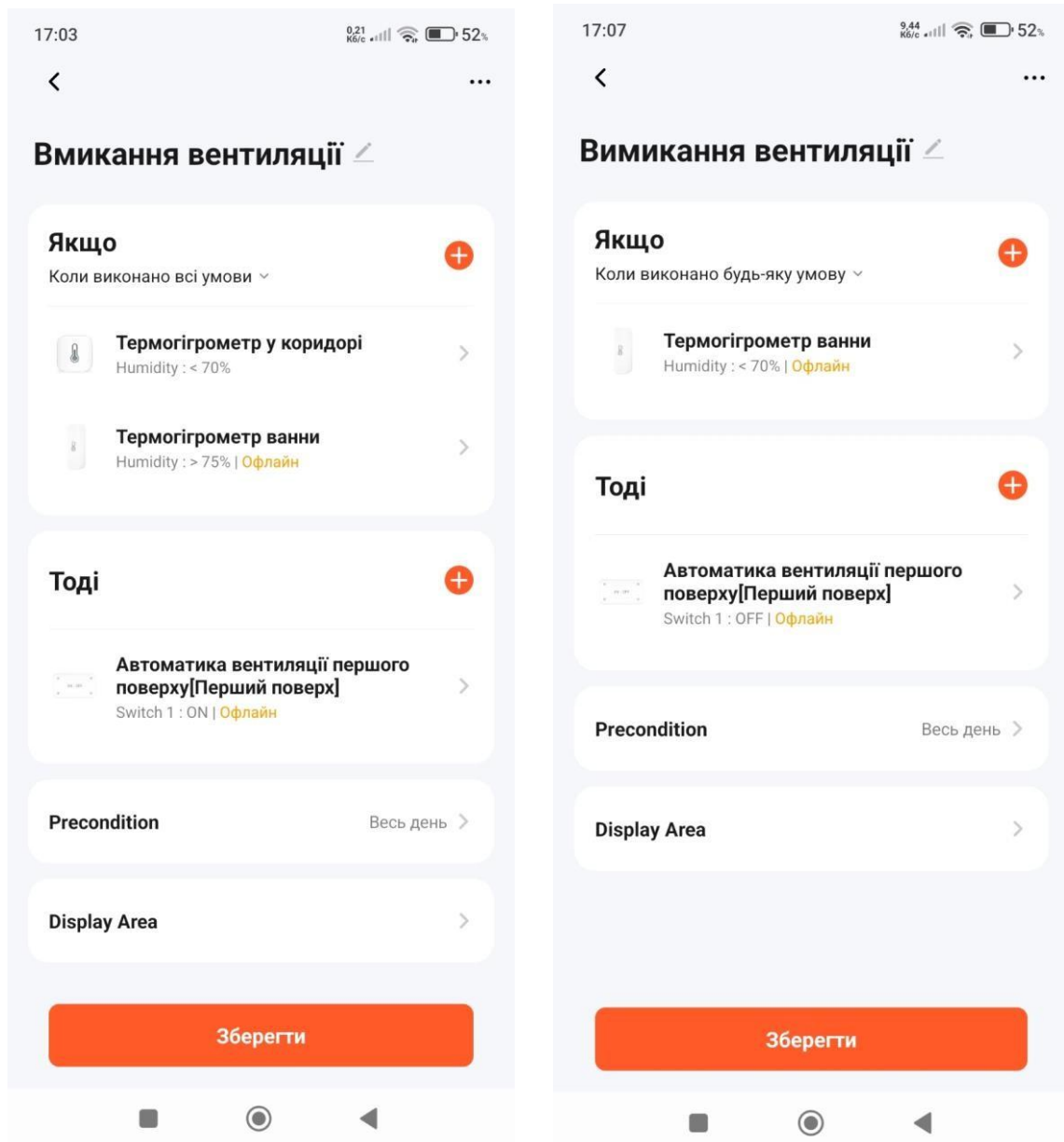


Рисунок 3.2 – Алгоритмічні сценарії керування витяжним вентилятором: а) ініціалізація роботи; б) припинення роботи

З метою детальної ілюстрації цих процесів та обґрунтування логіки роботи контролера доцільно розглянути два діаметрально протилежні типові графіки, що описують добову динаміку зміни відносної вологості у специфічному приміщенні. Перший графічний профіль відображає сценарій стрімкої, стрибкоподібної зміни параметрів, що є наслідком локальних побутових дій мешканців. Другий графік демонструє сценарій надзвичайно повільної, інерційної зміни вологовмісту, яка зумовлена тривалим і масштабним впливом зовнішніх атмосферних факторів. Таке чітке теоретичне розділення дозволяє наочно ідентифікувати різницю між короточасними піковими навантаженнями, з якими має боротися система, та довготривалими базовими змінами

мікроклімату, втручання в які є технічно недоцільним.

Перший експлуатаційний сценарій, що характеризується швидкою зміною вологості (зображений на рисунку 3.3), описує ситуації, коли домінуючий вплив на мікроклімат чинять виключно локальні події, типові для повсякденного використання ванної кімнати. У моменти прийняття гарячого душу або наповнення ванни відбувається інтенсивне пароутворення, що призводить до миттєвого, пікового зростання відносної вологості. Проте, за умови наявності ефективної примусової вентиляції або активації компресорного осушувача, після завершення водних процедур відбувається таке ж стрімке повернення мікрокліматичних параметрів до нормативного (комфортного) рівня. Саме такий пульсуючий режим експлуатації є найхарактернішим для житлового сектору. Відповідно, розроблена система автоматичного керування витяжною орієнтована насамперед на відпрацювання саме таких ситуацій: вона повинна миттєво фіксувати різкий градієнт вологості, оперативно реагувати на перетин встановлених порогових значень та ініціювати інтенсивний повітрообмін.

На противагу цьому, сценарій повільної зміни мікроклімату (наведений на рисунку 3.4) вирізняється повною відсутністю різких локальних піків пароутворення. Натомість спостерігається плавне, багаточасове зростання або спадання показників відносної вологості протягом усієї доби. Подібна термодинамічна картина є типовою для періодів затяжних атмосферних опадів, осінньо-весняних туманів або інших масштабних кліматичних змін, коли зовнішнє повітря перенасичене вологою. У таких специфічних умовах рівень вологості у ванній кімнаті підвищується не ізолювано, а абсолютно синхронно із загальним зростанням фонові вологості в усіх інших приміщеннях будинку. За таких обставин будь-яке примусове втручання системи витяжної вентиляції (спроба викинути вологе повітря на вулицю, звідки натомість надійде таке ж вологе повітря) виявляється абсолютно неефективним, марним з точки зору фізики процесу і призводить лише до невиправданих витрат електричної енергії та зносу ресурсу обладнання.

Представлений порівняльний аналіз графічних залежностей слугує переконливим доказом критичної необхідності алгоритмічного розпізнавання

системою природи зміни мікроклімату. Контролер повинен чітко відрізнити локальні побутові флуктуації від глобальних погодних змін. Саме ця інженерна ідея лягла в основу застосованого у проєкті методу псевдо-порівняння телеметричних значень між різними просторовими зонами будівлі. Цей алгоритм гарантує, що автоматика здатна безпомилково ідентифікувати саме локальне перезволоження і подавати живлення на вентиляційні агрегати виключно за умови реальної технологічної потреби, уникаючи хибних спрацьовувань під час дощу.

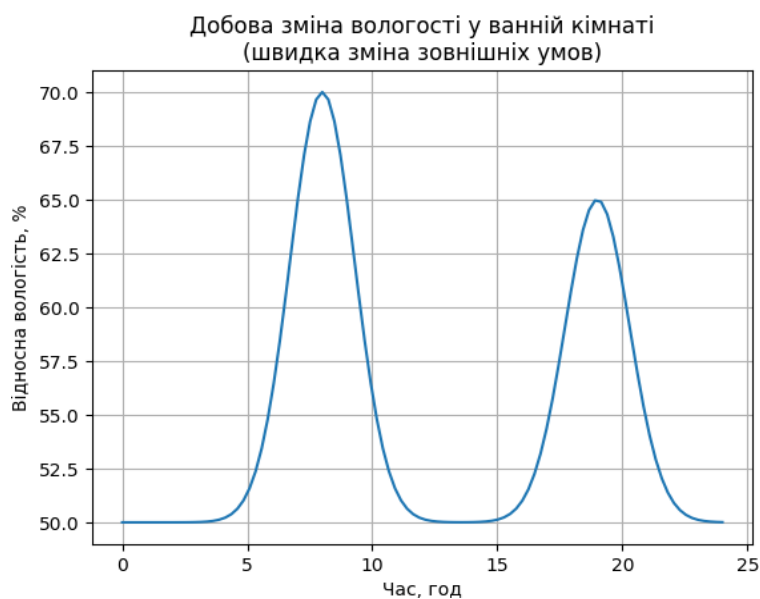


Рисунок 3.3 – Динаміка короточасних локальних флуктуацій відносної вологості у санітарному вузлі

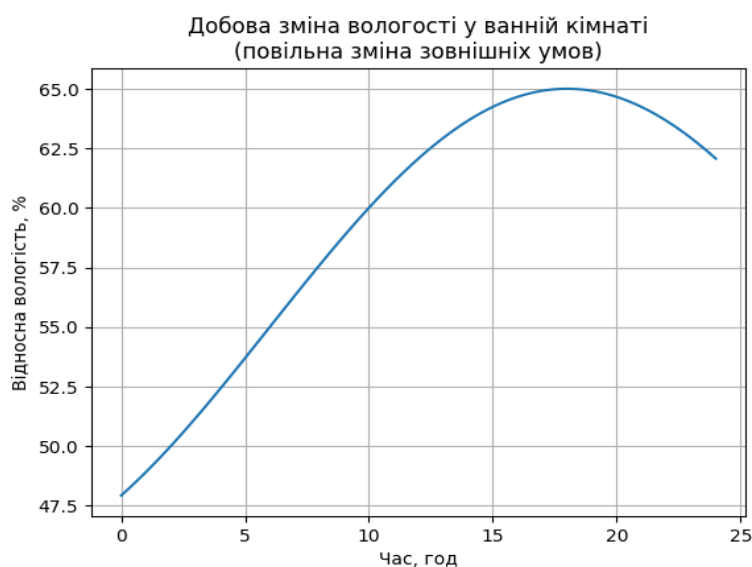


Рисунок 3.4 – Вплив довготривалих атмосферних метеопараметрів на рівень фонові вологості приміщення

Отримані емпіричні залежності, що візуалізовані на наведених графіках, виступають фундаментальною базою для математичної оптимізації порогових уставок спрацьовування, а також для об'єктивної оцінки енергоефективності САР та предиктивного моделювання її поведінки у суворих умовах реальної експлуатації. Розглянемо ці аспекти детальніше.

Аналізуючи графік швидкої зміни вологості, можна констатувати, що він ідеально імітує щоденну рутину домогосподарства із ранковими та вечірніми піковими навантаженнями на санітарний вузол. У ці короткі проміжки часу гігрометр фіксує екстремальне зростання відносної вологості до позначок 65–70 %. Завдяки своєчасній реакції релейних модулів та інтенсивній роботі витяжних вентиляторів, цей надлишок швидко екстрагується у вентиляційну шахту, і мікроклімат повертається до своєї базової, еталонної норми на рівні 50 %. Такий профіль роботи беззаперечно свідчить про високу адаптивність та коректність налаштувань спроектованої САР. З іншого боку, графік повільної зміни вологості відображає ситуацію, коли через погодні умови вологість повітря всередині приміщення може доборами триматися на завищеному рівні (близько 60–65 %) без будь-яких різких стрибків. У цій ситуації логіка платформи Tuuya Smart, спираючись на дані з транзитного приміщення (коридору), класифікує цю зміну як "фонову" і свідомо блокує запуск вентиляторів, заощаджуючи ресурс системи. Відтак, робиться однозначний висновок про те, що ініціалізація виконавчих механізмів є технічно виправданою виключно під час стрімких локальних змін, відображених на рисунку 3.3.

Наступним етапом кваліфікаційного дослідження стала безпосередня практична апробація зібраного апаратного комплексу. Результати безперервного збору та комп'ютерної обробки статистичних даних про функціонування системи у реальному часі наведено на рисунках 3.5 та 3.6.

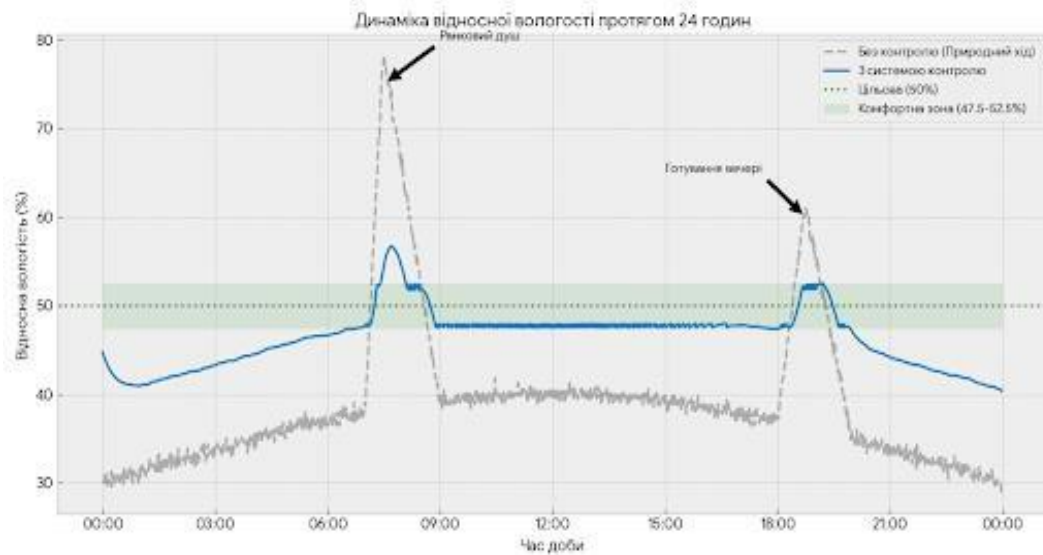


Рисунок 3.5 – Порівняльний графік динаміки вологості в реальних умовах експлуатації до та після впровадження системи

Рисунок 3.6 – Хронограма спрацьовувань виконавчих механізмів системи стабілізації мікроклімату

Аналізуючи масив емпіричних даних, візуалізований на рисунку 3.5, можна констатувати разючу різницю в якості мікроклімату. Відносна вологість повітря у ванній кімнаті за відсутності автоматичного керування (цей стан відображено кривою сірого кольору) характеризувалася хаотичними та глибокими коливаннями в екстремально широкому діапазоні від 30 % до критичних 80 % протягом однієї доби. Натомість, після введення в експлуатацію розробленої мікропроцесорної системи (результат відображено синьою кривою), амплітуда цих коливань була радикально зрізана і локалізована у вузькому, безпечному коридорі від 40 % до 55 %. Зважаючи на те, що медично обґрунтована цільова

норма (еталонний показник для респіраторного здоров'я людини) становить рівно 50 %, можна стверджувати, що система успішно мінімізувала мікрокліматичний дисбаланс. Відхилення від ідеальної зони комфорту (47,5–52,5 %) стали маргінальними і нетривалими.

Детальна хронограма активності апаратного комплексу, наведена на рисунку 3.6, наочно розкриває механіку роботи системи. Нижній графік (виділений червоним кольором) відображає дискретні моменти подачі напруги на припливно-витяжний вентилятор. Як видно з таймінгу, ці піки активності філігранно збігаються у часі з етапами різкого генерування водяної пари під час прийняття мешканцями душу. Верхня ж крива (зеленого кольору) теоретично ілюструє потребу в активації системи штучного зволоження у моменти пересихання повітря. Оскільки у поточній апаратній конфігурації зволожувач фізично відсутній, графік демонструє періодичні провали відносної вологості нижче цільового комфортного діапазону. Проте, беручи до уваги специфіку санітарного вузла як приміщення короточасного перебування, критичної загрози це не становить. Головним пріоритетом і першочерговим завданням автоматики у цій зоні є саме жорстке відсікання верхніх екстремумів вологості (запобігання утворенню конденсату та плісняви), з чим розроблений алгоритм впорався ідеально.

Підсумовуючи результати проведеного натурного експерименту, можна з повною впевненістю констатувати абсолютну адекватність отриманих телеметричних даних початковим теоретичним розрахункам. Експлуатаційні тести повністю верифікували високу ефективність, стабільність та правильність усіх інженерних і системотехнічних рішень, ухвалених на етапі проєктування даної автоматизованої системи.

Висновки до розділу 3

У третьому розділі кваліфікаційної роботи здійснено практичну реалізацію, алгоритмічне налаштування та експериментальне дослідження функціонування розробленої автоматизованої системи контролю вологості повітря.

Сформовано кінцеву структурну схему апаратного комплексу, яка об'єднала вимірювальні сенсори (ТН01 та ТН-08) і виконавчі одноканальні реле (Moes) у єдину мережу. Техніко-експлуатаційний аналіз підтвердив, що для даного проєкту використання стандарту Wi-Fi є найбільш раціональним рішенням, оскільки він забезпечує пряме підключення пристроїв до роутера без необхідності придбання додаткових координаторів (хабів), гарантує високу пропускну здатність та стабільність зв'язку в умовах стаціонарного електроживлення.

Розроблено та імплементовано керуючі смарт-сценарії у хмарному середовищі TuYa Smart. Для подолання архітектурних обмежень платформи, пов'язаних із неможливістю прямого математичного порівняння даних із різних датчиків, було успішно застосовано метод псевдо-порівняння на основі статичних порогів. Такий інженерний підхід дозволив системі відрізнити локальні піки пароутворення (наприклад, під час користування душем) від загального підвищення фонові вологості у будівлі (під час дощу), забезпечивши активацію витяжної вентиляції виключно за наявності реальної технологічної потреби.

Проведено натурні експериментальні дослідження динаміки мікроклімату до та після впровадження розробленої системи. Аналіз отриманих телеметричних даних довів, що застосування автоматизованого керування дозволило радикально зрізати амплітуду коливань відносної вологості у ванній кімнаті з критичного діапазону 30–80 % до безпечного та комфортного коридору 40–55 %.

Отже, результати тестування повністю підтверджують ефективність, надійність та адекватність усіх прийнятих на етапах проєктування апаратно-програмних рішень. Система успішно виконує поставлені завдання із нормалізації мікроклімату, мінімізуючи енерговитрати та не потребуючи складного технічного адміністрування з боку користувача.

РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Розробка, проектування та практична реалізація автоматизованої системи моніторингу та регулювання вологості приміщень є комплексним інженерним процесом. Він поєднує в собі як тривалу інтелектуальну працю за персональним комп'ютером (налаштування смарт-сценаріїв, програмування логіки платформи TuYa Smart), так і безпосередню фізичну роботу з електронними компонентами, комутаційними пристроями, вимірювальними приладами та електромонтажним обладнанням. Відповідно, система охорони праці для фахівця з автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій повинна враховувати цей подвійний характер діяльності. Головною метою даного розділу є аналіз потенційних виробничих небезпек, розробка заходів щодо оптимізації умов праці та формування алгоритму дій для збереження життя і здоров'я в умовах виникнення надзвичайних ситуацій.

4.1. Аналіз умов праці та ергономічна організація робочого місця розробника систем мікроклімату

Робоче місце інженера-розробника систем клімат-контролю є складним технологічним середовищем, яке функціонально інтегрує дві зони: зону інтелектуальної праці (робота з хмарними платформами) та зону електротехнічного монтажу (складання апаратних прототипів, підключення реле та датчиків). Ефективність та безпека праці в таких умовах залежать від рівня ергономічної організації простору, дотримання санітарно-гігієнічних норм та правильного технічного оснащення. Недотримання цих аспектів може призвести до швидкої втоми, розвитку професійних захворювань (остеохондроз, зорова втома) та зниження якості виконуваної роботи.

Одним із фундаментальних чинників, що впливає на працездатність, є параметри мікроклімату безпосередньо у приміщенні лабораторії. Приміщення для розробки апаратного забезпечення повинні підтримувати оптимальні показники температури та вологості відповідно до вимог категорії робіт Ia (легка фізична праця). У холодний період року температура має перебувати в межах

22–24 °C, а в теплий — 23–25 °C. Вологість повітря повинна підтримуватися на рівні 40–60 %, оскільки надмірна сухість повітря спричиняє швидке пересихання слизових оболонок очей та дихальних шляхів, а висока вологість створює небезпеку корозії контактних груп розумних реле та ризик пробою струму.

Оскільки під час тривалої роботи персональних комп'ютерів, осцилографів, тестових осушувачів та іншого обладнання виділяється значна кількість тепла, приміщення обов'язково повинно мати припливно-витяжну вентиляцію. Особливої уваги потребує зона електромонтажу та пайки (якщо виготовляються нестандартні кабельні збірки): паяльна станція має бути оснащена локальним витяжним пристроєм («димовловлювачем»), який відводить небезпечні пари флюсу, каніфолі та важких металів від дихальних шляхів розробника, запобігаючи інтоксикації організму.

Специфічні вимоги висуваються до системи освітлення робочого місця. Робота з дрібними клемами одноканальних Wi-Fi реле у поєднанні з тривалою фіксацією погляду на екрані монітора створює колосальне навантаження на зорову систему. Для запобігання розвитку астенопії (зорової втоми) застосовується комбіноване освітлення. Загальне штучне освітлення лабораторії повинно створювати рівномірне розсіяне світло інтенсивністю 300-400 люкс. Проте безпосередньо над зоною монтажу електронних компонентів необхідно встановлювати локальні світильники з регульованим кронштейном, які підвищують освітленість робочої поверхні до 700-1000 люкс. Важливо, щоб джерела світла мали нейтральний спектр (4000-5000 K), а конструкція світильника виключала появу прямих відблисків від металевих корпусів обладнання чи екранів (наприклад, дисплея датчика ТН-08), оскільки відблиски провокують швидке втомлення м'язів ока.

Ергономіка робочого простору вимагає правильного планування технічних засобів. Робочий стіл має бути достатньо просторим для зручного розміщення монітора на рівні очей, що забезпечує підтримку шийного відділу хребта в анатомічно правильному положенні. Використання спеціалізованого ергономічного крісла з підтримкою поперекового відділу, регулюванням висоти підлокітників та механізмом нахилу спинки є обов'язковим для тривалої сидячої

роботи. Рекомендується дотримуватися графіку праці та відпочинку: через кожні 60 хвилин безперервної роботи необхідно робити 10-хвилинну перерву, під час якої виконувати гімнастику для очей та розминку м'язів плечового поясу.

4.2. Електробезпека та захист від шкідливих виробничих факторів при роботі з апаратною базою

Впровадження автоматизованої системи контролю вологості передбачає інтенсивну роботу з електричним струмом, що автоматично робить електробезпеку пріоритетним напрямком охорони праці. Незважаючи на те, що первинні вимірювальні перетворювачі (бездротові датчики ТН01) функціонують від безпечних рівнів зниженої напруги (елементи живлення 3 В), інженерна розробка повноцінного комплексу неминуче включає взаємодію з джерелами вищого класу небезпеки. До них належить побутова електромережа (АС 220 В), від якої безпосередньо живляться виконавчі механізми системи — витяжні вентилятори, компресорні осушувачі повітря, а також силові комутаційні вузли (одноканальні Wi-Fi реле Moes або аналогічні).

Головною загрозою під час макетування та тестування апаратного прототипу є ризик ураження електричним струмом внаслідок випадкового дотику до оголених струмопровідних частин схеми, виникнення пробоя ізоляції кабелів живлення або аварійного короткого замикання (КЗ). З метою гарантування безпеки, все стаціонарне обладнання (ПК, вимірювальні прилади, кліматичні установки) повинно бути підключено до контуру захисного заземлення будівлі.

Підключення тестових стендів з релейними модулями до електромережі необхідно здійснювати виключно через сучасні пристрої захисного відключення (ПЗВ) та автоматичні вимикачі відповідного номіналу. Ці засоби захисту забезпечують миттєве знеструмлення лінії (протягом мілісекунд) у разі виникнення витоку струму на корпус або виявлення аномальних струмів перевантаження.

Під час процесу електромонтажу (підключення фазних та нульових провідників до клемників Wi-Fi реле) суворо забороняється проводити будь-які

маніпуляції з дротами або замінювати компоненти, якщо система перебуває під напругою. Спочатку формується фізична топологія схеми, після чого обов'язково проводиться її візуальна перевірка на предмет надійності кріплення та відсутності замикань фази на нейтраль, і лише після отримання підтвердження коректності монтажу дозволяється подача робочого живлення 220 В.

Окрім прямої дії електричного струму, інженер має враховувати вторинні фактори. Виконавчі механізми, зокрема електродвигуни витяжних вентиляторів та компресори потужних осушувачів (наприклад, класу NEO Tools), під час тривалої роботи на тестовому стенді можуть суттєво нагріватися. Необхідно забезпечити їхнє належне природне охолодження, уникати випадкового дотику до гарячих частин та не допускати їх контакту з легкозаймистими матеріалами.

Що стосується електромагнітного випромінювання від Wi-Fi трансиверів, вбудованих у датчики та реле, їхня середня потужність повністю відповідає санітарним нормам. Тим не менш, під час тривалого налагодження рекомендується розміщувати активні маршрутизатори та модулі зв'язку на розумній відстані (не менше 50 см) від голови розробника.

Весь ручний інструмент (пінцети, кусачки, викрутки-індикатори), що застосовується для монтажу компонентів "розумного будинку", повинен мати якісне діелектричне покриття руків'я, що є обов'язковою умовою безпечного виробничого процесу.

4.3. Заходи безпеки та порядок дій в умовах надзвичайних ситуацій

Робота з електронно-обчислювальною технікою, кліматичними установками та високовольтними модулями автоматизації (реле 220 В) завжди супроводжується ризиком виникнення надзвичайних ситуацій (НС) техногенного характеру. Найбільш небезпечними явищами в електротехнічних лабораторіях є пожежі, зумовлені коротким замиканням у комутаційних вузлах, локальний перегрів двигунів вентиляторів внаслідок заклинювання ротора, або займання ізоляції провідників під значним струмовим навантаженням. Крім того, сучасні реалії вимагають від кожного фахівця чіткого знання алгоритмів

поведінки під час надзвичайних ситуацій воєнного характеру, зокрема при оголошенні сигналу «Повітряна тривога».

У разі виявлення перших ознак пожежі (поява сизого диму, специфічного запаху плавленого пластику чи іскріння з боку тестового комутаційного щита) розробник зобов'язаний негайно припинити роботу і повністю знеструмити робоче місце. Для цього необхідно вимкнути загальний автоматичний рубильник у приміщенні. Спроби витягнути розплавлені або обгорілі кабелі з розеток голими руками є неприпустимими, оскільки це створює безпосередню загрозу життю через ураження струмом.

Оскільки електронне обладнання навіть після вимкнення може перебувати під напругою (через ємність пускових конденсаторів у блоках живлення), гасіння локального загоряння водою або звичайними пінними вогнегасниками категорично забороняється. Для ліквідації полум'я на електроустановках дозволяється використовувати виключно вуглекислотні (ОУ) або порошкові вогнегасники, які не проводять електричний струм і не завдають незворотної шкоди вцілілим електронним компонентам. Якщо пожежа швидко набуває загрозливих масштабів, необхідно активувати ручний пожежний сповіщувач, негайно викликати Державну службу з надзвичайних ситуацій (за номером 101), чітко вказавши адресу та характер НС, і розпочати евакуацію.

Окремий і не менш важливий алгоритм дій передбачено на випадок оголошення сигналу «Повітряна тривога». Зважаючи на високу загрозу ракетних чи дронівих ударів, ігнорування цього сигналу є неприпустимим. Щойно лунає сирена або надходить сповіщення через мобільний додаток, інженер повинен негайно зберегти поточні налаштування в хмарному інтерфейсі (TuYa Smart) та штатно вимкнути персональний комп'ютер. Апаратний прототип системи регулювання вологості (вентилятори, осушувачі, реле) має бути повністю відключений від електромережі, щоб уникнути пожежі у разі раптових перепадів напруги в міській мережі під час атаки. Після знеструмлення робочого місця працівник повинен взяти особисті документи, засоби зв'язку, індивідуальну аптечку та без паніки прослідувати до найближчого укриття.

У випадках, коли під час роботи з інструментами виникають механічні травми або термічні опіки (при випадковому дотику до нагрітих елементів кліматичного обладнання), інженер повинен володіти навичками надання першої домедичної допомоги. При термічних опіках необхідно негайно промити уражену ділянку проточною холодною водою протягом 10-15 хвилин та накласти стерильну пов'язку. У приміщенні лабораторії обов'язково має бути укомплектована аптечка з набором антисептиків (хлоргексидин, перекис водню), перев'язувальними матеріалами та протиопіковими засобами.

Повернення до робочого місця та відновлення процесу тестування системи мікроклімату дозволяється виключно після офіційного сповіщення про відбій повітряної тривоги та повної візуальної перевірки справності всього обладнання. Такий системний підхід до безпеки дозволяє мінімізувати ризики та забезпечити стабільний процес інженерної діяльності навіть у складних умовах сьогодення.

Висновки до розділу 4

Виконаний аналіз умов праці та заходів безпеки під час проєктування автоматизованої системи моніторингу та регулювання вологості дозволяє зробити наступні висновки. Дотримання санітарно-гігієнічних норм та ергономічних вимог при організації робочого місця інженера-розробника є не лише запорукою високої продуктивності праці, але й необхідною умовою для запобігання професійним захворюванням (зоровій втомі, хворобам опорно-рухового апарату). Застосування безтіньового освітлення, правильно відрегульованого крісла та підтримання належного мікроклімату в лабораторії мінімізує негативний вплив виробничих факторів на організм.

Питання електробезпеки при роботі з комутаційною апаратурою "розумного будинку" (Wi-Fi реле, розетками) та кліматичним обладнанням (вентиляторами, осушувачами) потребують найсуворішої уваги, оскільки виконавча частина системи працює з небезпечною напругою 220 В. Використання заземленого обладнання, пристроїв захисного відключення (ПЗВ) та неухильне дотримання правил монтажу електричних схем без напруги є безальтернативними заходами безпеки, що дозволяють уникнути коротких замикань та ураження електричним

струмом. Окрім того, враховано ризики термічного нагрівання силових виконавчих механізмів, що вимагає забезпечення їхнього природного охолодження під час тестів.

Нарешті, розроблений алгоритм дій в умовах надзвичайних ситуацій, зокрема при загрозі пожежі чи оголошенні повітряної тривоги, гарантує системний підхід до збереження здоров'я персоналу та захисту майна. Знання правил знеструмлення стендів, користування вуглекислотними вогнегасниками та чітке дотримання інструкцій з евакуації до укриттів є обов'язковими компетенціями для інженера. Загалом, інтеграція заходів охорони праці та безпеки життєдіяльності в процес розробки IoT-систем мікроклімату дозволяє створити безпечне середовище для інженерної діяльності, зводячи виробничі ризики до мінімально можливого рівня.

ЗАГАЛЬНИЙ ВИСНОВОК

У результаті виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи було успішно вирішено актуальне інженерне завдання — розроблено просту, надійну та економічно доступну автоматизовану систему моніторингу та регулювання вологості у побутових приміщеннях. На основі детального аналітичного огляду існуючих засобів контролю мікроклімату доведено, що найбільш перспективним та ефективним підходом є використання інтелектуальних IoT-систем. При цьому встановлено, що для специфічних зон, таких як ванні кімнати та підвальні приміщення, домінуючою проблемою є систематичне перевищення меж вологості, що зумовлює необхідність використання систем примусової припливно-витяжної вентиляції або компресорних осушувачів.

Під час проєктування було обґрунтовано недоцільність використання універсальних саморобних мікроконтролерів (зокрема платформ Arduino або лінійки STM32) для створення надійних побутових систем тривалої експлуатації через їхню низьку відмовостійкість та складність масштабування. Натомість спроектовано розосереджену (децентралізовану) архітектуру на основі сертифікованих Wi-Fi-компонентів: бездротових сенсорів температури й вологості (TH01, TH-08) та автономних одноканальних смарт-реле (Moes). Цей підхід ліквідує загрозу «єдиної точки відмови», мінімізує витрати на кабельний монтаж та забезпечує високу електробезпеку.

Робочу логіку системи було успішно імплементовано у хмарному середовищі Tuuya Smart. Для подолання програмних обмежень цієї платформи застосовано метод псевдо-порівняння вологості на основі системи статичних порогів, що дозволило інтелектуально розрізняти локальні побутові піки пароутворення від загального фонового зростання вологості під час зміни погодних умов і активувати вентиляцію лише за реальної потреби. Проведені натурні дослідження довели високу працездатність розробленої системи, оскільки її впровадження дозволило радикально знизити амплітуду коливань відносної вологості у приміщенні з критичного діапазону 30–80 % до безпечного і комфортного санітарного коридору в 40–55 %.

Окрему увагу в роботі приділено питанням безпеки, для чого було розроблено комплекс заходів щодо ергономічної організації робочого місця інженера-розробника, регламентовано жорсткі вимоги електробезпеки при роботі з комутаційною апаратурою (220 В) та сформовано чіткі алгоритми дій персоналу в умовах надзвичайних ситуацій техногенного та воєнного характеру. Отже, розроблена мікропроцесорна система повністю задовольняє вимоги технічного завдання, гарантує підтримання здорового мікроклімату, раціоналізує споживання енергоресурсів і є оптимальним рішенням для масового впровадження завдяки високій повторюваності та простоті базового налаштування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. — Київ: Мінрегіон України, 2013. — 141 с.
2. ДБН В.2.2-15:2019. Будинки і споруди. Житлові будинки. Основні положення. — Київ : Мінрегіонбуд України, 2019. — 43 с.
3. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ). — Київ : Міненерговугілля України, 2017. — 615 с.
4. ДСТУ EN 60204-1:2015. Безпечність машин. Електрообладнання машин. Частина 1. Загальні вимоги. — Київ : ДП "УкрНДНЦ", 2015. — 115 с.
5. ДСТУ ІЕС 61131-2:2018. Електрообладнання промислових машин. Безпека. Частина 2. — Київ : ДП "УкрНДНЦ", 2018. — 85 с.
6. ДСТУ 8302:2015. Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання— Київ : ДП "УкрНДНЦ", 2016.— 16 с.
7. Попович М. Г., Ковальчук О. В. Теорія автоматичного керування : підручник. — Київ : Либідь, 2007. — 656 с.
8. Іванов А. О. Теорія автоматичного керування : підручник. — Дніпропетровськ : Національний гірничий університет, 2003. — 250 с.
9. Трегуб В. Г. Проектування систем автоматизації : навч. посібник. — Київ : НУХТ, 2002. — 342 с.
10. Nise N. S. Control Systems Engineering. — 7th ed. — Hoboken : John Wiley & Sons, 2015. — 944 p.
11. Ogata K. Modern Control Engineering. — 5th ed. — Upper Saddle River : Prentice Hall, 2010. — 904 p.
12. Dorf R. C., Bishop R. H. Modern Control Systems. — 13th ed. — London : Pearson, 2016. — 1024 p.
13. Margolis M. Arduino Cookbook. — 3rd ed. — Sebastopol : O'Reilly Media, 2020. — 800 p.
14. Monk S. Programming Arduino: Getting Started with Sketches. — 2nd ed. — New York : McGraw-Hill Education, 2016. — 192 p.
15. Schwartz M. Internet of Things with ESP8266. — Birmingham : Packt Publishing, 2016. — 236 p.

16. Bell C. Beginning Sensor Networks with XBee, Raspberry Pi, and Arduino. — Berkeley : Apress, 2020. — 416 p.
17. Bolton W. Programmable Logic Controllers. — 6th ed. — Oxford : Newnes, 2015. — 430 p.
18. Закон України «Про охорону праці». — Відомості Верховної Ради України. — 1992. — № 49. — Ст. 668.
19. Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища». — Відомості Верховної Ради України. — 1991. — № 41. — Ст. 546.
20. Закон України «Про енергозбереження». — Відомості Верховної Ради України. — 1994. — № 30. — Ст. 283.
21. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. — К. : Мінрегіон України, 2013. — 96 с.
22. ДСанПіН 2.2.4-171-10. Гігієнічні вимоги до мікроклімату виробничих приміщень. — К. : МОЗ України, 2010. — 32 с.
23. Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort. — International Organization for Standardization, 2005.
24. Environmental management systems – Requirements with guidance for use. — ISO, 2015.
25. Occupational health and safety management systems – Requirements with guidance for use. — ISO, 2018.
26. ESP32 Technical Reference Manual. — Espressif Systems, 2021. — [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.espressif.com>
27. InfluxDB Documentation. — InfluxData, 2023. — [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://docs.influxdata.com>
28. Python Programming Language Documentation. — Python Software Foundation. — [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://docs.python.org>
29. Flask Web Framework Documentation. — Pallets Projects. — [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://flask.palletsprojects.com>
30. MQTT Version 3.1.1 Protocol Specification. — OASIS Standard, 2014. — [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://mqtt.org>

31. Arduino Language Reference. – Arduino.cc. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.arduino.cc/reference/en>
32. Барна, А. І. Основи теорії автоматичного керування : навч. посіб. – Львів : Новий Світ – 2000, 2021. – 284 с.
33. Єпіфанов, В. М. Мікропроцесорна техніка та програмування : навч. посіб. – Суми : СумДУ, 2020. – 312 с.
34. Кравченко, В. І. Інформаційні системи : навч. посіб. – К. : Центр учбової літератури, 2021. – 248 с.
35. Сухоруков, А. І. Енергозбереження в автоматизованих системах управління : навч. посіб. – К. : Ліра-К, 2019. – 204 с.
36. Гончаренко, С. І. Основи мікроконтролерів та вбудованих систем. – Вінниця : ВНТУ, 2020. – 197 с.
37. Жежеленко, І. В. Програмування вбудованих систем на Python. – Львів : Видавництво ЛНУ, 2021. – 180 с.
38. Сахневич, І. В. Інформаційні технології в автоматизованих системах управління. – К. : КНЕУ, 2020. – 234 с.
39. Дудар, Т. В. Основи охорони праці : навч. посіб. – К. : КНЕУ, 2021. – 292 с.
40. Трощинський, В. П. Безпека життєдіяльності : навч. посіб. – К. : Каравела, 2022. – 320 с.
41. Петренко, С. М. Основи технічної екології : навч. посіб. – К. : Ліра-К, 2020. – 264 с.
42. Власенко, П. В. Інтернет речей (IoT): основи, технології, застосування. – Харків : ХНУРЕ, 2021. – 156 с.
43. Колодій, С. О. Мікроконтролери Arduino в автоматизації. – Чернівці : Рута, 2020. – 168 с.
44. Open Source Home Automation Tools. – Home Assistant Documentation. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.home-assistant.io>
45. Tasmota Project Documentation. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://tasmota.github.io/docs>
46. Desigo – Siemens Building Technologies. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://new.siemens.com>