Міністерство освіти і науки України
Державний вищий навчальний заклад
«Ужгородський національний університет»
Інженерно-технічний факультет
Кафедра приладобудування

ДИПЛОМНА РОБОТА

Тема : АВТОМАТИЧНА СИСТЕМА РЕГУЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ КЛІМАТУ ПРИМІЩЕНЬ

Студентки Чемсак Я. І.
(прізвище, ім'я, по батькові)

2025 р.

БР-2025 Чемсак Я. І. ІТФ

інв. №_____

КБР АКІТ 2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УЖГОРОДСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНО-ТЕХНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА ПРИЛАДОБУДУВАННЯ

ДО ЗАХИСТУ ДОПУЩЕНО
Завідувач кафедри
проф. Іваницький В.П.
_____
«___» _____ 2025 р.

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної бакалаврської роботи

на тему:

Автоматична система параметрів регулювання клітмату приміщень

Виконала:

Чемсак Яна Іванівна _____
(прізвище, ім'я, по-батькові) (підпис)

Науковий керівник:

Іваницький В.П. _____
(вчене звання, ПІБ, посада) (підпис)

Ужгород – 2025

КБР АКІТ 2025

Форма № Н-9.01

Ужгородський національний університет

Інженерно-технічний факультет
Кафедра приладобудування
Освітньо-кваліфікаційний рівень "Бакалавр"
Спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

_____
"___"_____ 2025 р.

З А В Д А Н Н Я
НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТКИ
Чемсак Яни Іванівни
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Автоматична система параметрів регулювання клітмату приміщень».
та керівник роботи Іваницький Валентин Петрович викладач
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені Розпорядженням № ___ по кафедрі приладобудування від " __ " _____ року.

2. Строк подання студенткою роботи на кафедру: "17" червня 2025 року.

3. Вихідні дані до роботи: Розробити та описати систему регулювання параметрів регулювання клімату приміщень.
Характеристики пристрою: основні параметри та характеристики встановлюються студенткою у процесі виконання роботи.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): визначається методичними вказівками до виконання курсової роботи.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): визначається методичними вказівками до виконання курсової роботи.

6. Дата видачі завдання: 7 лютого 2025 року.

Гарант ОП підготовки бакалаврів _____/_____/
(підпис) (ініціали та прізвище)

Студентка _____/_____/
(підпис) (ініціали та прізвище)

Викладач дисципліни _____/_____/
(підпис) (ініціали та прізвище)

Керівник роботи _____/_____/
(підпис) (ініціали та прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка курсової роботи: 46 сторінок, 7 таблиць, 19 рисунків та 23 джерел посиланнь.

Ключеві слова: HVAC, клімат контроль, ASHRAE, PID – регулятор, Arduino, DHT11, MQ-135, MOSFET IRLB8721, SSR-40DA.

Об’єкт дослідження – Датчики температури, вологості, якості повітря, системи регулювання мікрокліматом, регулятори.

Мета роботи – спроектувати систему керування параметрами клімату приміщень на базі мікроконтролера Arduino

Методи дослідження – пошук інформації та відповідних джерел, упорядкування зібраних матеріалів.

Зібрано інформацію про загальне поняття регуляторів, початок роботи в цій сфері та прогрес до цього часу.

Описано принцип роботи PID регулятора, системи кондиціонування, опалення, та зволоження.

Встановлено деякі види регуляторів для мікроконтролерів для кращого розуміння принципу роботи систем мікроклімату

Зроблено та описано систему клімат контрою з PID гегулятором.

ABSTRACT

Explanatory note of the course work: 46 pages, 7 tables, 19 figures and 23 references.

Keywords: HVAC, climate control, ASHRAE, PID controller, Arduino, DHT11, MQ-135, MOSFET IRLB8721, SSR-40DA.

Object of study - Sensors of temperature, humidity, air quality, microclimate control systems, regulators.

Purpose - to design a system for controlling indoor climate parameters based on the Arduino microcontroller

Research methods: search for information and relevant sources, organisation of collected materials.

The information on the general concept of regulators, the beginning of work in this area and progress so far has been collected.

The principle of operation of the PID controller, air conditioning, heating, and humidification systems is described.

Some types of regulators for microcontrollers are installed for a better understanding of the principle of operation of microclimate systems

A climate control system with a PID controller is made and described.

ЗМІСТ

ВСТУП……6
1 КЛІМАТ-КОНТРОЛЬ……7
1.1 Система Heating, Ventilation and Air Conditioning……7
1.2 Параметри регулювання……9
2 ТИПИ РЕГУЛЯТОРІВ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ……11
2.1 Коротка класифікація……11
2.2 Огляд розвитку технологій керування клімат-системами……14
2.3 Вибір регулятора……15
3 МОДЕЛЬ СИСТЕМИ КЛІМАТ-КОНТРОЛЮ ……21
3.1 Мікроконтролер Arduino……21
3.2 Датчик якості повітря……23
3.3 Датчик визначення температури та вологості повітря ……26
3.4 Дисплей……27
4 АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ МОДЕЛІ ……29
4.1 Засоби регулювання температури……29
4.2 Засоби регулювання вентеляції……31
4.3 Засоби регулювання вологості……33
5. СХЕМАТИЧНА ВІЗУАЛІЗІЦІЯ……35
5.1 Блок-Схема алгоритму……35
5.2 Структурна та принципова схеми системи регулювання параметрів……37
6 РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ……38
ВИСНОВКИ……41
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ……42
ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ……46
Додаток А……48

Вступ

У сучасному світі проблема створення сприятливого мікроклімату в житлових, офісних, промислових та сільськогосподарських приміщеннях набуває все більшої актуальності. Відповідні параметри температури, вологості та якості повітря безпосередньо впливають на комфорт людини, ефективність виробництва та збереження продукції. Тому зростає потреба в автоматизованих системах клімат-контролю, які дозволяють забезпечувати стабільні умови із мінімальними витратами енергії та людських ресурсів.

Одним із перспективних напрямів розвитку таких систем є використання мікроконтролерів та датчиків для створення доступних і гнучких рішень. Платформа Arduino є однією з найпоширеніших завдяки своїй відкритості, модульності та простоті розробки, що робить її ідеальним інструментом для побудови прототипів та навчальних проєктів.

Метою даної бакалаврської роботи є розробка автоматизованої системи регулювання мікроклімату, що включає контроль температури, вологості та якості повітря на основі датчиків DHT11 і MQ-135, з використанням PID-регулятора та виводом інформації на OLED-дисплей. Основне завдання системи — забезпечення комфортного та безпечного середовища з динамічним реагуванням на зміну параметрів.

Об'єктом дослідження є процес автоматичного регулювання параметрів мікроклімату в замкненому приміщенні. Предметом дослідження виступає апаратно-програмна система клімат-контролю на базі Arduino.

Результати дослідження можуть бути використані для впровадження доступних систем клімат-контролю в побутових, навчальних і невеликих промислових об’єктах, а також як основа для подальших досліджень у галузі енергоефективної автоматизації.

1 СУЧАСНІ СИСТЕМИ КЛІМАТ-КОНТРОЛЮ

1.1 Клімат контроль та його сучасна реалізація

Мікроклімат приміщень на сьогодні контролюється за допомогою систем, які мають загальну назву HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning). Дані системи є комплексом технічних засобів, які забезпечують повністю автоматичну підтримку комфортного мікроклімату у приміщеннях за допомогою опалення, вентиляції та кондиціонування повітря. У нашому випадку, замість класичної системи кондиціонування передбачено використання системи зволоження, що обумовлено особливими умовами експлуатації об'єкта — переважанням сухого повітря в холодний період року та відсутністю критичної потреби в охолодженні.

Основне завдання такої модифікованої HVAC-системи – забезпечення теплового комфорту, регуляції вологості, а також подачі свіжого повітря, необхідного для нормального функціонування людей або обладнання в будівлі.

Типова клімат-система складається з трьох основних компонентів:

- системи опалення (котли, теплові насоси);
- системи вентиляції (вентилятори, фільтри, канали);
- системи кондиціонування (чилери, випарники, компресори).

Для коректної роботи всі елементи повинні бути інтегровані в єдину керуючу систему, яка забезпечує адаптивне регулювання залежно від температури навколишнього середовища.

Застосування систем HVAC починається з розуміння будівлі та використання приміщень, які підлягають кондиціонуванню та контролю. Всі системи керування працюють відповідно до кількох основних принципів, але перш ніж ми їх обговоримо, спочатку розглянемо декілька фундаментальних принципів роботи системи.

Потужність системи опалення, вентиляції та кондиціонування зазвичай розрахована на екстремальні умови. Більшість систем працює в режимі

часткового навантаження/вимикання, оскільки такі змінні, як сонячне навантаження, зайнятість, температура навколишнього середовища, навантаження на обладнання та освітлення тощо, продовжують змінюватися протягом дня. Відхилення від проектних значень може призвести до різких коливань або дисбалансу, оскільки в більшості сценаріїв експлуатації проектна потужність перевищує фактичне навантаження.

Без системи контролю установка стане нестабільною, а приміщення перегріватимуться або переохолоджуватимуться.

Системи клімат контролю класифікуються як автономні блоки або як централізовані системи.

Автономний блок — це один блок, що перетворює первинне джерело енергії (електрику або газ) і забезпечує остаточне нагрівання та охолодження приміщення, що підлягає кондиціонуванню. Прикладами автономних блоків є дахові комплекси HVAC, кімнатні кондиціонери та теплові насоси типу «повітря-повітря».

У центральних системах первинне перетворення палива, такого як газ або електроенергія, відбувається в центральному місці, а теплова енергія в тій чи іншій формі розподіляється по всій будівлі або об'єкту.

Централізовані системи — це поєднання центральної підсистеми постачання та декількох підсистем кінцевого використання. Існує багато варіацій комбінованих систем центрального постачання та зон кінцевого споживання. Найчастіше використовується комбінація з центральним гарячим та охолодженим водопостачанням, яке розподіляється між декількома вентиляторними рішеннями. Вентиляторні системи використовують теплообмінники типу «вода-повітря», які називаються змійовиками, для забезпечення гарячим та/або холодним повітрям контрольованих приміщень. Кінцевими підсистемами можуть бути вентиляторні системи або термінальні блоки. Якщо підсистеми кінцевого використання є вентиляторними системами, вони можуть бути одно- або багатозонними. Системи з декількома зонами кінцевого споживання являють собою змішувальні блоки, які зазвичай називають VAV-боксами.

1.2 Параметри регулювання

Належне середовище описується трьома змінними: температура, вологість і вентиляція.

ASHRAE 62-1999 пропонує температурні діапазони для загального теплового комфорту зображені на рис.1.1.

“ASHRAE 62-1999 — це стандарт, виданий Американським товариством інженерів з опалення, охолодження та кондиціонування повітря (ASHRAE), повна назва якого — ANSI/ASHRAE Standard 62-1999: Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality.

	Temperature (°C)	
Room type	**Summer**	**Winter**
Indoor thermal comfort*	23 to 26	20 to 24
Offices	23 to 27	17 to 24
Computer rooms	21 to 40	
Biotech Laboratories	17 to 21	
Calibration Laboratories	18 to 27	

Рисунок 1.1 – Стандарті значення температури за ASHRAE 55-1992

Це нормативний стандарт, який встановлює мінімальні вимоги до вентиляції в приміщеннях для забезпечення прийнятної якості повітря у приміщеннях.

Хоча жодне середовище не може бути визнане задовільним для всіх, воно варіюється між людьми, регіонами та країнами. Для комфорту важлива рівномірність температури. Температура не повинна відрізнятися в межах однієї зони або змінюватися раптово чи різко.

Вологість - це наявність водяної пари в повітрі, яка впливає на комфорт людини. Стандарт ASHRAE 55-1992 рекомендує підтримувати відносну вологість повітря в межах 25-60%. Зазвичай взимку повітря зволожується до 25-45%, а влітку осушується до рівня нижче 60%. Будь-який показник за межами цього діапазону спричиняє дискомфорт і проблеми з якістю повітря в приміщенні (IAQ).

Стандарт ASHRAE 62-1999: «Вентиляція для забезпечення прийнятної якості повітря в приміщенні» рекомендує мінімальні норми вентиляції на людину в житлових приміщеннях. У багатьох випадках місцеві будівельні норми визначають кількість вентиляції, необхідну для комерційних будівель і робочих «ASHRAE 62-1999: *Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality*». Рекомендована кількість зовнішнього повітря, як правило, становить 20 CFM на кожного мешканця або не більше 400-700 ppm.

Норми вентиляції, визначені ASHRAE, ефективно розбавляють вуглекислий газ та інші забруднювачі, що утворюються в результаті дихання та інших видів діяльності; забезпечують достатню кількість кисню для мешканців; та видаляють забруднювачі з приміщення. Швидкість вентиляції, вища за рекомендовану критеріями ASHARE, іноді необхідна для боротьби із запахами, а також там, де не передбачено охолодження для компенсації надлишкового тепла.

2 ТИПИ РЕГУЛЯТОРІВ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ

2.1 Коротка класифікація

Спочатку розглянемо основні типи регуляторів які зазвичай використовуюють для подібних систем:

1. ON/OFF-регулятор (дискретний/бінарний)

Принцип роботи: Увімкнення або вимкнення системи при досягненні певного температурного порогу.

Такий підхід відзначається простотою, низькою вартістю та легкістю впровадження, проте має серйозні недоліки: нестабільність температурного режиму, підвищене енергоспоживання та швидке зношення обладнання внаслідок частих перемикань.

2. PID-регулятор

Принцип роботи: Обчислює керуючий сигнал на основі трьох складових:

- P (proportional) — реагує на поточну помилку,
- I (integral) — враховує накопичену помилку з часом,
- D (derivative) — передбачає майбутню тенденцію зміни.

Серед переваг вища точність, згладжене управління, підходить для стабільних умов, але потребує налаштування та система чутлива до зміни параметрів об’єкта.

3. Fuzzy Logic-регулятор (Нечітка логіка)

Принцип роботи: Використовує логіку "наближених істин", оперує поняттями типу «трохи холодно» або «дуже жарко». Рішення приймаються на основі правил, подібних до людської логіки.

Цей метод забезпечує гнучкість і здатність адаптуватися до складних систем без потреби у точній математичній моделі, однак його реалізація ускладнюється через необхідність формування чітких правил і загальну складність налаштування.

4. Adaptive Control (Адаптивне керування)

Принцип роботи: Технологія "навчається" і підлаштовує свої параметри під зміну умов навколишнього середовища або характеристик об'єкта.

Цей підхід демонструє високу ефективність в умовах змінної динаміки системи, проте потребує складнішої реалізації та більшої кількості обчислювальних ресурсів.

5. Model Predictive Control (MPC – Моделююче предиктивне керування)

Цей метод базується на створенні математичної моделі об'єкта та прогнозуванні його поведінки на кілька кроків уперед, що дозволяє обирати оптимальну стратегію керування. Він забезпечує дуже високу точність, ефективний для складних багатозмінних систем з обмеженнями та дозволяє мінімізувати витрати, однак потребує детальної моделі об'єкта і значних обчислювальних ресурсів, що ускладнює його реалізацію.

6. Нейромережевий регулятор

Такий регулятор використовує штучні нейронні мережі для вивчення залежностей між параметрами й автоматичного прийняття рішень.

Методи, що базуються на машинному навчанні, дозволяють системі самостійно вдосконалювати свою поведінку завдяки досвіду, адаптуючись до складних і нелінійних взаємозв’язків між параметрами. Вони особливо ефективні там, де традиційні алгоритми не справляються. Водночас, така система може бути важко інтерпретованою, вимагає значного обсягу даних для навчання та суттєвих обчислювальних ресурсів..

7. Гібридні регулятори

Гібридні методи управління поєднують у собі різні підходи, наприклад MPC з нечіткою логікою або PID з елементами штучного інтелекту, щоб використати сильні сторони кожного з них. Такий підхід забезпечує високу гнучкість і ефективність у складних умовах, але вимагає глибоких знань для проєктування та складного налаштування системи.

Таблиця 2.1 – Порівння різних типів регуляторів

Тип регулятора	Складність виконання	Логіка керування	Вартість реалізації	Потребує математичної моделі
ON/OFF	Низька	Дискретна, порогова	Дуже низька	Ні
PID	Середня	Аналітична (P, I, D частини)	Низька	Ні, (але бажано для точності)
Fuzzy Logic	Середня–висока	Нечітка, на основі правил	Середня	Ні
Adaptive Control	Висока	Самопідлаштування	Висока	Так
MPC	Висока	Оптимізаційна, предиктивна	Дуже висока	Так
Нейромережевий	Висока	Обробка даних, самонавчання	Дуже висока	Так (через навчання моделі)
Гібридний	Дуже висока	Комбінована	Дуже висока	Так

Позначення:

- Складність виконання — наскільки складно реалізувати на практиці.
- Логіка керування — принцип прийняття рішень контролером.
- Вартість реалізації - яку кількість коштів необхідно вкласти для створення такої ситеми
- Потребує математичної моделі — чи обов’язково мати опис динаміки об'єкта управління.

2.2 Огляд розвитку технологій керування клімат-системами

Початкові системи керування HVAC базувалися на простому принципі: ввімкнення/вимкнення пристрою в разі дискомфорту. Це були базові ON/OFF-регулятори, які працювали лише при досягненні певних порогових значень температури. Згодом з'явилися PID-регулятори (пропорційно-ітегрально-диференційні), які вперше були описані ще в 1939 році. Вони дозволили точніше підтримувати задану температуру без участі користувача, аналізуючи поточну температуру, її зміну в часі та інтегральну помилку.

PID-регулятори стали стандартом у HVAC і дозволяють адаптувати подачу гарячого чи холодного повітря із змінною швидкістю потоку, з урахуванням вологості та інших параметрів. Вони ефективні, але мають обмеження в умовах складної динаміки або за наявності багатьох змінних.

З метою покращення точності й адаптивності, PID-методи стали комбінувати з нечіткою логікою (Fuzzy Logic), що дозволило краще реагувати на нечіткі або непередбачувані вхідні сигнали.

Сучасні HVAC-рішення активно використовують бездротові технології та IoT (Internet of Things). Поява "розумних" термостатів дозволила не лише знижувати споживання енергії, але й забезпечити зручність керування через смартфон або інші пристрої. IoT дозволяє системам HVAC отримувати дані про погоду, присутність людей, енерготариф і адаптувати свою роботу в реальному часі.

Також активно розвиваються моделі з дистанційним та предиктивним керуванням, які збирають великі обсяги даних (Big Data) та аналізують їх для побудови персоналізованих режимів клімат-контролю. Це підвищує ефективність і комфорт користувачів, особливо в розумних будівлях і транспорті.

У майбутньому передбачаються ще складніші системи, що базуються на алгоритмах машинного навчання, штучному інтелекті та предиктивному керуванні. Найперспективнішим методом у цій сфері вважається MPC-

регулювання. Цей метод прогнозує майбутню поведінку системи, оптимізує керування на основі моделі об’єкта, і дозволяє враховувати множинні параметри, обмеження й цілі.

На відміну від PID, який реагує на відхилення, MPC "дивиться наперед", обчислюючи найкращу стратегію керування на кілька кроків вперед, що є особливо ефективним для систем із затримками та великою інерцією — як у HVAC.

2.3 Вибір регулятора

Для класичних HVAC систем в розумних будинках за співвідношенням якості та вартості найкращим варінтом вважається система з PID регулятором тому оберемо його для системи.

Алгоритм PID-регулювання широко використовується у виробничих процесах. У контурі керування присутні пропорційна, інтегральна та похідна складові. Вихід пропорційної складової обернено пропорційний різниці в точності між бажаним і фактичним значеннями. Щоб позбутися стаціонарних похибок, інтегральна складова інтегрує похибку в часі. Похідна складова прогнозує майбутні помилки на основі швидкості зміни помилки. Поєднуючи ці компоненти, PID-регулювання досягає балансу між чутливістю, стабільністю і точністю, забезпечуючи ефективне керування різними системами.

Пропорційне регулювання (P): Компонент пропорційного регулювання в PID-регулюванні відіграє вирішальну роль у регулюванні вихідної потужності системи на основі похибки між бажаним заданим значенням і фактичною змінною процесу. Вихід прямо пропорційний цій похибці, а коефіцієнт підсилення визначає величину реакції.

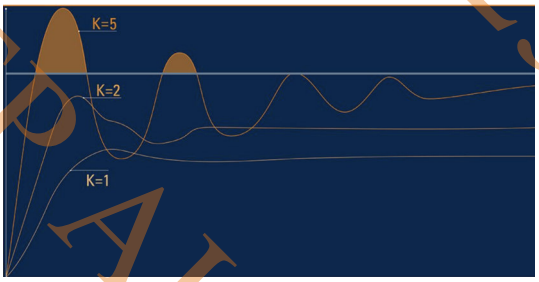

Рисунок 2.2 – Вплив пропорційного підсилення

Коефіцієнт підсилення, або пропорційне підсилення, впливає на чутливість системи до помилки. Вищий коефіцієнт підсилення призводить до більш агресивної реакції, швидше зменшуючи помилку, але збільшуючи ризик перерегулювання і нестабільності. І навпаки, менший коефіцієнт підсилення призводить до більш консервативної реакції, забезпечуючи стабільність, але потенційно повільніше виправлення помилок, що забражено на рис. 2.2. Балансування коефіцієнта підсилення має важливе значення для досягнення оптимальної продуктивності системи керування.

Інтегральне керування (I): Інтегральний компонент керування в PID-системі має важливе значення для усунення помилок у стаціонарному режимі. Він усуває накопичену з часом помилку шляхом безперервного інтегрування помилки і генерує вихід, пропорційний цій накопиченій помилці. Таким чином, він ефективно усуває будь-яке стійке відхилення між бажаною уставкою і фактичною змінною процесу. Однак дуже важливо ретельно налаштувати інтегральний коефіцієнт підсилення, щоб підтримувати стабільність системи.

Збільшення інтегрального коефіцієнта підсилення призведе до збільшення величини корекції до такої міри, що реакція може бути небажаною. Тому для повільного досягнення нульової похибки в стаціонарному режимі зазвичай використовують невеликий коефіцієнт підсилення.

Вищий інтегральний коефіцієнт підсилення може призвести до швидшої корекції помилок, але також може спричинити перерегулювання та нестабільність. І навпаки, менший інтегральний коефіцієнт підсилення забезпечує стабільність, але може призвести до повільнішого виправлення

помилок. Подібний вплив представлено на рис. 2.3. Досягнення правильного балансу є ключем до досягнення оптимальної реакції системи.

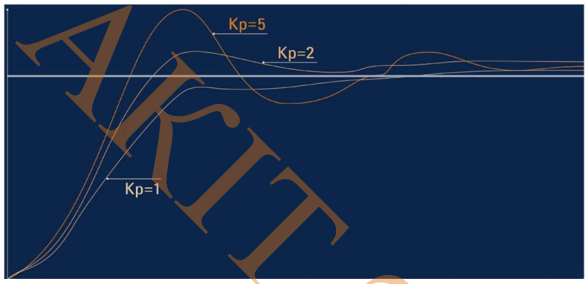

Рисунок 2.3 – Вплив інтегрального підсилення

Похідне керування (D): Елемент похідного керування PID-системи, який реагує на швидкість зміни сигналу помилки, має вирішальне значення. Він обчислює швидкість зміни помилки і генерує вихідний сигнал, який протидіє непередбаченим змінам змінної процесу. Це підвищує чутливість і стабільність системи. Однак похідне керування може також збільшити шум системи, що може призвести до нестабільності та ірраціональної поведінки яка зображена на рис. 2.4.

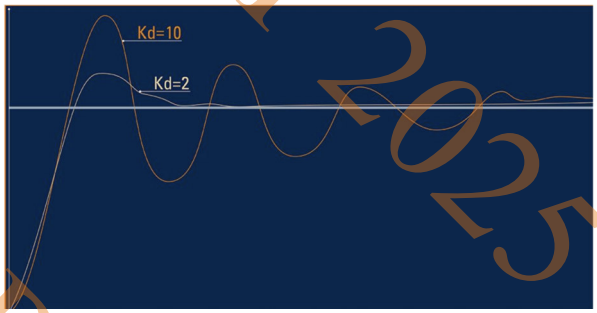

Рисунок 2.4 – Вплив похідного підсилення

Зменшуючи шум і гарантуючи плавну реакцію, методи фільтрації можуть бути використані для вирішення цієї проблеми. Коефіцієнт підсилення похідної потрібно ретельно встановлювати, щоб досягти компромісу між зменшенням шуму та продуктивністю системи.

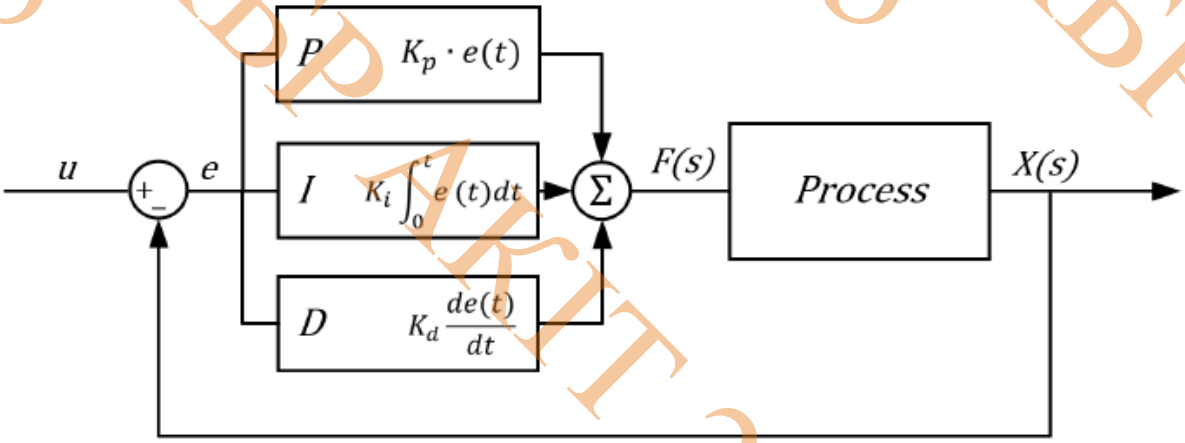

Рисунок 2.5 – Теорія пропорційного, інтегрального, похідного керування

Налаштування контролера пропорційно-інтегральної похідної може здатися складним, але воно необхідне для забезпечення безперебійної роботи вашого процесу. Кожен з параметрів налаштування, P, I і D, впливає на те, як контролер реагує на зміни значення процесу, що наведено на рис. 2.5. Правильні налаштування можуть значно підвищити стабільність і продуктивність вашої системи.

З іншого боку, неправильні налаштування можуть призвести до коливань, перезбудження і недостатньої реакції, погіршуючи якість керування процесом.

PID-регулятор формує керуючий сигнал u(t), який розраховується за формулою 2.1:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau)d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.1)$$

Де:

- u (t) — результат;
- e(t)=r(t)−y(t) — похибка регулювання;
- r(t)— задане значення (setpoint);
- y(t)— фактичне значення (process variable);
- K_p – - коефіцієнти пропорційної складової.
- K_i – коефіцієнт інтегральної складової
- K_d – коефіцієнт диференціальної складової.

Але даній бакалаврській роботі немає необхідності в детальному аналітичному розрахунку параметрів PID-регулятора, оскільки буде використано готову бібліотеку PID з середовища Arduino, вигляд якої представлено на рис. 2.6. Ця бібліотека має вбудовані засоби для автоматичного або емпіричного налаштування коефіцієнтів, що дозволяє швидко реалізувати регулятор без поглибленого математичного моделювання. Це забезпечує достатню точність і стабільність для задачі клімат-контролю в реальних умовах.

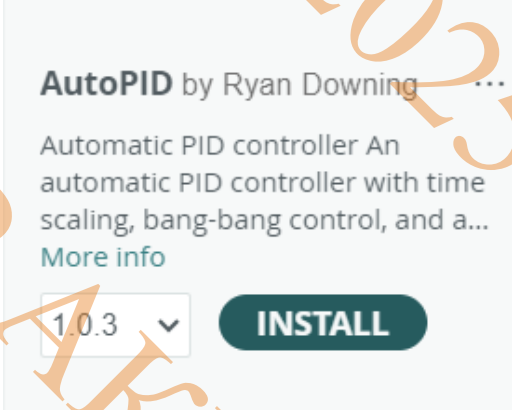

Рисунок 2.6 – Arduino бібліотека для PID налаштування

3 МОДЕЛЬ СИСТЕМИ КЛІМАТ-КОНТРОЛЮ

3.1. Мікроконтролер Arduino

У цій роботі буде використовуватись Arduino UNO, його основну будову ми і ми будемо розглядати на рисунку 3.1.

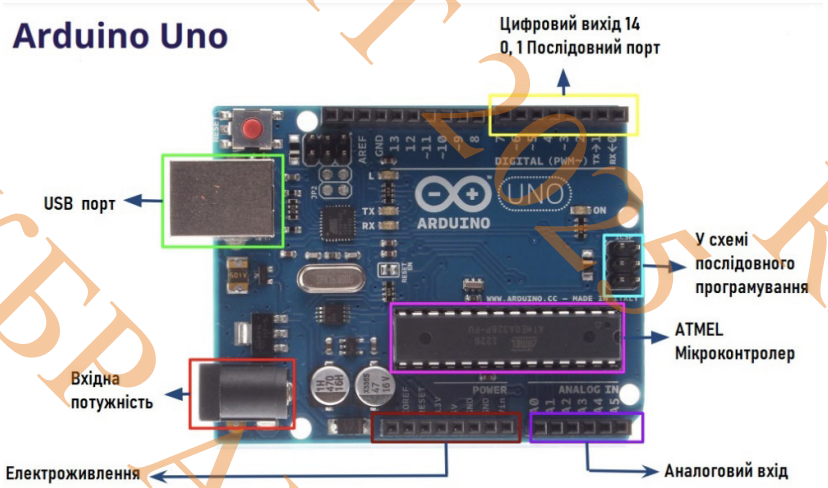

Рисунок 3.1 – Конструкція Arduino UNO

Arduino Uno - це плата мікроконтролера на базі ATmega328. Вона має 14 цифрових входів/виходів (з яких 6 можна використовувати як ШІМ-виходи), 6 аналогових входів, керамічний резонатор на 16 МГц, USB-роз'єм, роз'єм живлення, заголовок ICSP і кнопку скидання. Він містить все необхідне для підтримки мікроконтролера; його достатньо просто підключити до комп'ютера за допомогою USB-кабелю або за допомогою адаптера змінного- постійного струму або батареї, щоб почати роботу.

Uno відрізняється від усіх попередніх плат тим, що в ній не використовується мікросхема драйвера FTDI USB-to-serial.

Замість нього використовується Atmega16U2 (Atmega8U2 до версії R2), запрограмований як перетворювач USB в послідовний інтерфейс.

«Uno» означає “один” в перекладі з італійської і названий так, щоб відзначити майбутній випуск Arduino 1.0. Uno і версія 1.0 будуть еталонними версіями Arduino, що рухаються вперед. Uno є останньою в серії USB-плат

Arduino і еталонною моделлю для платформи Arduino; для порівняння з попередніми версіями див. індекс плат Arduino.

Arduino Uno можна живити через USB-роз'єм або за допомогою зовнішнього джерела живлення. Джерело живлення вибирається автоматично.

Зовнішнє (не USB) живлення може надходити або від адаптера змінного/постійного струму (розетки), або від батареї.

Адаптер можна підключити, вставивши 2,1-мм штекер з центральним контактом у гніздо живлення плати. Виводи від акумулятора можна вставити у виводи Gnd і Vin роз'єму POWER.

Плата може працювати від зовнішнього джерела живлення з напругою від 6 до 20 вольт. Однак, якщо напруга живлення менша за 7 В, на вивід 5В може подаватися менше п'яти вольт, і плата може працювати нестабільно. Якщо використовувати напругу понад 12 В, стабілізатор напруги може перегрітися і пошкодити плату. Рекомендований діапазон - від 7 до 12 вольт.

Висновки живлення наведені нижче:

- VIN. Вхідна напруга на плату Arduino, коли вона використовує зовнішнє джерело живлення (на відміну від 5 вольт від USB-з'єднання або іншого регульованого джерела живлення). Ви можете подавати напругу через цей вивід, або, якщо ви подаєте напругу через роз'єм живлення, отримати доступ до неї через цей вивід.

- 5V. Цей вивід виводить регульовану напругу 5 В від стабілізатора на платі. Плату можна живити від роз'єму живлення постійного струму (7 - 12 В), USB-роз'єму (5 В) або від VIN-коду плати (7-12 В). Подача напруги через виводи 5В або 3,3В відбувається в обхід стабілізатора і може пошкодити вашу плату. Ми не рекомендуємо цього робити.

- 3V3. Напруга 3,3 В, що генерується вбудованим регулятором. Максимальний споживаний струм - 50 мА.

GND. Виводи заземлення.

Основні характеристики деяких видів Ардуїно плат показано в таблиці 3.1.

Рисунок 3.1 – Характеристики Ардуїно різних моделей

Arduino Board	Проесор	Пам'ять	Цифрових входів/виходів	Аналогових входів/виходів
Arduino Uno	16Mhz ATmega328	2KB SRAM, 32KB flash	14	6 входів, 0 виходів
Arduino Due	84MHz AT91SAM3X8E	96KB SRAM, 512KB flash	54	12 входів, 2 виходів
Arduino Mega	16MHz ATmega2560	8KB SRAM, 256KB flash	54	16 входів, 0 виходів
Arduino Leonardo	16MHz ATmega32u4	2.5KB SRAM, 32KB flash	20	12 входів, 0 виходів

3.2 Датчик якості повітря

MQ135 - це дешевий датчик газу CO2, представлений на рисунку 3.2, який часто використовується для моніторингу забруднення повітря. Концентрація газу CO2, що вимірюється датчиком MQ135, є функцією його опору навантаження.

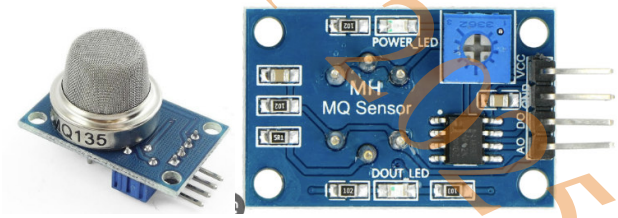

Рисунок 3.2 – Датчик MQ135

Для вимірювання забруднення повітря використовуються різні типи датчиків. Ці датчики базуються на різних технологіях, таких як газова хроматографія, оптичне волокно, напівпровідниковий оксид металу та калориметрія. Датчик MQ-135 забезпечує виявлення NH3, C6H6, NOx, диму та CO2. Цей датчик є більш популярним через його низьку вартість, просту схему драйвера та тривалий термін служби. Він використовується в різних сферах досліджень, таких як моніторинг забруднення, моніторинг якості харчових

продуктів, виявлення запахів, електронний ніс та моніторинг якості пива. MQ135 використовується для вимірювання об'єму CO2 в рамках бездротової сенсорної мережі (WSN) MQ 135 використовується наприклад для розробки електронного носа. Електронний ніс разом з моделями машинного навчання використовується для оцінки якості пива на основі його аромату. Тут MQ135 використовується для виявлення аміаку, бензолу та алкоголю. Також він використовується для вимірювання підвищеної концентрації ацетону в учасників, інфікованих COVID-19. Зі збільшенням швидкості потоку час виявлення датчика зменшується.

MQ135, підключений до Arduino Uno застосовується для виявлення аміаку, парів алкоголю, бензолу, вуглекислого газу, диму та неприємного запаху. датчик MQ135 має найвищу варіабельність значень зчитування. Сенсор потребує більше часу для стабілізації порівняно з іншими сенсорами газу MQ. Так, вважається, що для стабілізації показань йому потрібно 2 хвилини. Такий прристрій має значну кількість застосувань і активно використовується для різномітніх додатків, ось додаток IoT-Mobair використовує MQ135 для вимірювання якості повітря, що допомагає користувачеві прогнозувати рівень забруднення на всьому маршруті. Дослідження вихідних характеристик є дуже важливим, оскільки він використовується в різних сферах застосування. Тому важливо вивчити вплив зміни опору навантаження на вихідну характеристику.

У технічному паспорті рекомендується калібрувати датчик газу MQ-135 за концентрацією 100 ppm NH3 у повітрі і використовувати навантажувальний резистор (RL) близько 10 кОм. Але в придбаному китайському модулі MQ-135 встановлено навантажувальний резистор 1 кОм. Щоб отримати відповідні показники, навантажувальний резистор 1 кОм слід замінити на 10 кОм.

В Arduino IDE для MQ135 розроблений G. Krocker. У цьому файлі бібліотеки концентрація газу в частинах на мільйон (ppm) розраховується за формулою 2.

$$Ppm = a \times \left(\frac{R_s}{R_0}\right) - b \qquad (2)$$

де a і b - параметри для розрахунку ppm CO2 з опору датчика,

R_0 - це опір датчика при 100 ppm NH3 у чистому повітрі.

Rs - опір датчика при різних концентраціях газів.

Чутливим матеріалом газового датчика MQ135 є SnO2, який має нижчу провідність у чистому повітрі.Побудова цього датчика наведена на рисунку 3.3 з поясненням в таблиці 3.2. При наявності забруднюючих газів провідність датчика зростає зі збільшенням концентрації газу. Нагрівач датчика потребує 5В і має опір 3 Ом±5%. Нагрівальний струм проходить через чутливий елемент. Гази, що наближаються до чутливого елемента, іонізуються і поглинаються чутливим елементом. Це змінює опір чутливого елемента, що змінює величину струму, який виходить з нього

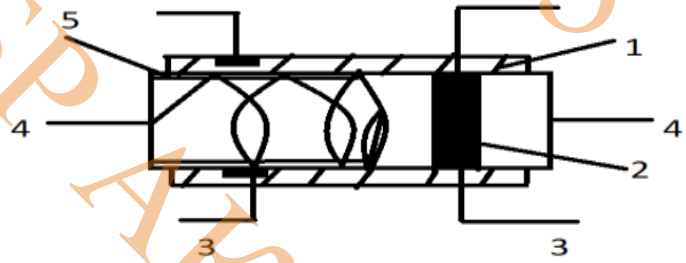

Рисунок 3.3 – Побудова MQ135

Таблиця 3.2 – Деталі, використані на рисунку 3.3

Номер	Частина	Матеріал
1	Газочутливий шар	SnO2
2	Електрод	Au
3	Лінія електродів	Pt
4	Котушка нагрівача	Ni-Cr alloy
5	Трубчаста кераміка	Al2o3

3.3. Датчик визначення температури та вологості повітря

DHT11 Датчик температури та вологості, зображений на рис. 3.5, має комплекс датчиків температури та вологості з каліброваним цифровим виходом. Завдяки використанню ексклюзивної цифрової техніки збору сигналу і технології вимірювання температури і вологості, він забезпечує високу

надійність і відмінну довгострокову стабільність. Цей датчик включає компонент вимірювання вологості резистивного типу і компонент вимірювання температури NTC і підключається до високопродуктивного 8-розрядного мікроконтролера, забезпечуючи відмінну якість, швидку реакцію, стійкість до перешкод і економічну ефективність. Його параметри розглянути в таблиці 3.3.

	Діапазон вимірювання	Точність вологості	Точність температури	Резолюція	Пакет
DHT 11	20-90%RH 0-50 ℃	±5%RH	±2℃	1	4-контактний однорядний

Таблиця 3.3 – Параметри датчика DHT 11

Рисунок 3.5 – Датчик температури та вологості DHT 11

Кожен елемент DHT11 строго відкалібрований в лабораторії, що забезпечує надзвичайно точне калібрування вологості. Калібрувальні коефіцієнти зберігаються у вигляді програм в пам'яті OTP, які використовуються внутрішнім процесом виявлення сигналу датчика. Однопровідний послідовний інтерфейс робить інтеграцію системи швидкою і простою. Невеликий розмір, низьке енергоспоживання і передача сигналу на відстань до 20 метрів роблять його найкращим вибором для різних застосувань, включаючи найвимогливіші. Компонент являє собою 4-контактний однорядний штифтовий пакет. Його зручно підключати, а спеціальні пакети можуть бути надані відповідно до запиту користувачів.

3.4 Дисплей

Обраний OLED-дисплей на базі контролера SSD1306 приедствлений на рис. 3.6, ідеально підходить для використання з мікроконтролерами (Arduino, ESP8266, ESP32 тощо).

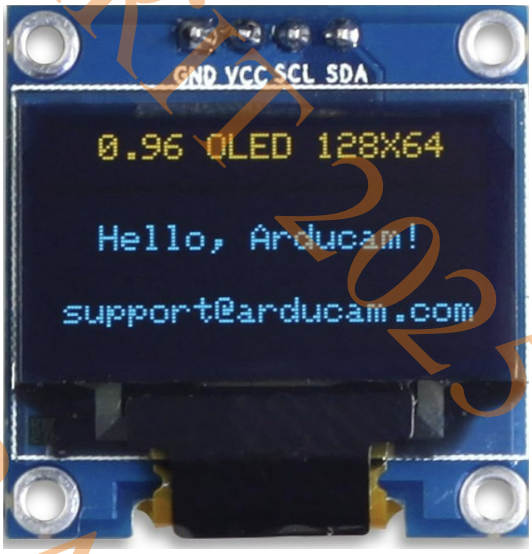

Рисунок 3.6 – OLED-дисплей 0.96" 128x64 SSD1306 I2C

Завдяки інтерфейсу I2C, модуль потребує лише двох цифрових ліній для підключення (SDA та SCL), що залишає більше вільних пінів для інших пристроїв. Схема з'єднання забражена в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Схема з'єднання OLED-дисплей з Arduino

OLED Пін	**Arduino Пін**
VCC	5V
GND	GND
SDA	A4
SCL	A5

Попри свої невеликі розміри — всього 0.96 дюйма, дисплей забезпечує чітке та яскраве зображення з роздільною здатністю 128x64 пікселів. Часто використовується в розумних пристроях, системах моніторингу, сенсорних

проєктах, а також як вивідна панель для параметрів температури, вологості чи якості повітря. Більш детальні характеристики наведені в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Характеристики OLED-дисплею

Характеристика	**Значення**
Розмір дисплея	0.96 дюйма
Роздільна здатність	128 × 64 пікселів
Інтерфейс	I2C (SDA, SCL)
Контролер дисплея	SSD1306
Напруга живлення	3.3–5.0 В
Споживаний струм	~20 мА
Колір зображення	Білий, синій або жовто-синій
Розміри модуля	приблизно 27 × 27 мм
Частота оновлення	До 100 Гц
Сумісність	Arduino, ESP32, STM32, Raspberry Pi та ін.
Бібліотеки	Adafruit_SSD1306, U8g2, SSD1306Ascii

4 АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ МОДЕЛІ

4.1 Засоби регулювання температури

Для реалізації керування температурою в розробленій системі клімат-контролю було обрано твердотільне реле (SSR), що зображено на рис.4.1, у поєднанні з нагрівальним елементом (наприклад, ТЕН на 220 В потужністю до 1000 Вт). Це рішення забезпечує надійне, безшумне та ефективне регулювання тепловиділення із застосуванням тайм-пропорційного PID-контролю.

Рисунок 4.1 – Однофазне твердотіле реле SSR-40DA 40A DC-AC

На відміну від механічного реле, твердотільне реле не має рухомих частин. Воно працює за допомогою напівпровідникових ключів (триаків або тиристорів), які відкриваються або закриваються в залежності від поданої логічної напруги (зазвичай 3–32 В DC на вході). Завдяки цьому SSR здатне перемикати великі навантаження на змінному струмі (AC), при цьому без характерного клацання чи зносу контактів, характерного для механічних реле.

Для PID-регулювання застосовується тайм-пропорційний метод: замість постійного вмикання/вимикання з високою частотою (як при звичайному ШІМ), вихід PID-регулятора інтерпретується як відсоток часу, протягом якого реле перебуває у ввімкненому стані в межах одного інтервалу (наприклад, 2

секунди). Це дозволяє уникнути надмірного перемикання силових елементів, яке шкодить довговічності навіть SSR, і забезпечує плавне керування тепловим навантаженням. Повний перелік переваг наведено в таблиці 4.1.

У даній системі використано твердотільне реле типу SSR-40DA, яке має наступні характеристики:

- Номінальний струм навантаження: до 40 А
- Вхідна напруга керування: 3–32 В DC
- Вихідна напруга навантаження: 24–380 В AC
- Тип керування: DC–AC
- Оптична ізоляція: є
- Час спрацювання: <10 мс
- Цю модель обрано з таких причин:
- Вона сумісна з Arduino (керування 5 В сигналом).
- Має достатній струмовий запас для підключення типового ТЕНу.
- Надійно працює в умовах високих температур і вібрацій;

Таблиця 4.1 – Переваги застосування SSR у порівнянні з механічними реле

Параметр	**SSR**	**Механічне реле**
Тривалість служби	>1 млн циклів	100–500 тис. циклів
Швидкість перемикання	<10 мс	5–20 мс
Шум під час роботи	Безшумне	Характерне клацання
Робота при високій частоті	Можлива	Небажана
Ізоляція керування	Оптопара (високий захист)	Часто відсутня

Таким чином, вибір SSR як засобу керування нагрівом у системі клімат-контролю обумовлений не лише технічними характеристиками, а й вимогами надійності, довговічності та сумісності з PID-алгоритмом. Це забезпечує стабільну роботу системи, мінімізуючи теплові коливання і перевантаження обладнання.

4.2 Засоби регулювання вентиляції

У системі автоматичного регулювання мікроклімату вентиляція відіграє ключову роль у забезпеченні належного рівня повітрообміну, запобіганні надмірному накопиченню вуглекислого газу (CO_2), зниженні вологості та вирівнюванні температури в приміщенні. Особливо це актуально для приміщень із високою щільністю зберігання продуктів або постійним перебуванням людей. Саме тому ефективне, надійне та плавне керування вентилятором стало одним із пріоритетів у розробці даної системи.

Для реалізації функції вентиляції в проєкті обрано малопотужний осьовий вентилятор постійного струму на 12 В, керування яким здійснюється за допомогою MOSFET-транзистора IRLB8721, вид якого наведений на рисунку 4.2. Такий підхід дозволяє реалізувати ШІМ-регулювання (PWM) швидкості обертання вентилятора на основі PID-алгоритму, що забезпечує високу точність і адаптивність регулювання повітряного потоку.

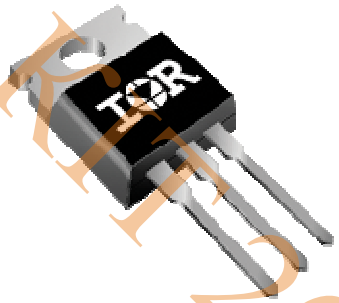

Рисунок 4.2 – MOSFET IRLB8721 для регулювання вентиляції

У системі використовується звичайний осьовий вентилятор 12 В, що підключається до джерела живлення через ключовий елемент — N-канальний MOSFET. ШІМ-сигнал, що генерується мікроконтролером Arduino на основі даних з датчиків температури (DHT11) та газового складу повітря (MQ-135), подається на затвор транзистора. Залежно від ширини імпульсів змінюється середнє значення напруги, що подається на вентилятор — і відповідно регулюється його швидкість обертання.

Тип: осьовий вентилятор DC

- Напруга живлення: 12 В

- Споживання струму: до 0.25–0.35 А
- Рівень шуму: <30 дБ
- Продуктивність: ≈30–50 CFM (залежно від моделі)
- MOSFET-транзистор IRLB8721:
- Тип: N-канальний логік-рівень транзистор
- Максимальна напруга стік–витік (V_{DS}): 30 В
- Максимальний струм (I_D): до 62 А (при охолодженні)
- Опір відкритого каналу (R_{DS(on)}): ≈8 мОм
- Напруга затвору (V_{GS}): від 2.35 В (робоча сумісність із Arduino 5 В)
- Форм-фактор: TO-220
- Підтримка ШІМ: до 20 кГц і вище;

PID-регулятор розраховує вихідне керуюче значення (у межах 0–255), яке в ідеалі повинно плавно передаватися виконавчому пристрою. У разі вентиляції це значення прямо пов'язане зі швидкістю обертання вентилятора.

MOSFET-керування з PWM дозволяє реалізувати саме таке аналогоподібне керування — перетворюючи цифровий сигнал у пропорційний середній струм, що ідеально відповідає поведінці PID.

Тому така система вентиляції:

- реагує на похибку точно, плавно і швидко;
- унеможливлює "перерегулювання", коливання та вібрації;
- не має інерції, як у реле, і не створює механічного зносу;
- ідеально сумісна з цифровою реалізацією PID у мікроконтролері.

Таким чином, обрана система регулювання вентиляції повністю відповідає вимогам PID-регулювання в задачах контролю мікроклімату. Вона забезпечує точне, стабільне й енергоефективне керування повітрообміном, що є ключовим для комфортного та безпечного мікроклімату приміщення.

4.3 Засоби регулювання вологості

У системі автоматичного клімат-контролю регулювання вологості реалізується за допомогою ультразвукового зволожувача, який працює на частоті 113 кГц. Обрана модель зволожувача є сучасним та енергоефективним засобом підвищення вологості, що формує холодний водяний туман за рахунок коливань п'єзоелемента. Такий тип зволоження не потребує нагрівання води, що забезпечує економне енергоспоживання та безпечну експлуатацію.

Особливістю даного зволожувача є наявність вбудованого інтерфейсу керування з трьома виводами:

- Vin (вхід живлення);
- GND (заземлення);
- Control (керувальний сигнал).

Це дозволяє керувати пристроєм безпосередньо з мікроконтролера Arduino, використовуючи лише цифровий вихід. Таким чином, застосування додаткових силових елементів, зокрема електромеханічного або твердотільного реле, є недоцільним.

Відмова від використання реле зумовлена кількома чинниками. По-перше, керування зволожувачем здійснюється за низьковольтним логічним сигналом, тому потреби в комутації мережевої напруги немає. По-друге, реле, особливо електромеханічні, мають обмежений ресурс комутацій та можуть створювати додатковий акустичний шум. У свою чергу, безпосереднє керування з мікроконтролера забезпечує швидку реакцію на зміну вхідних даних, що є особливо важливим при використанні PID-регулятора для точного підтримання рівня вологості.

Таким чином, обране рішення є технічно обґрунтованим і повністю відповідає вимогам до ефективної та надійної роботи системи. Використання зволожувача з цифровим інтерфейсом управління дозволяє зменшити кількість апаратних компонентів, підвищити надійність пристрою та спростити як розробку, так і обслуговування системи.

5 СХЕМАТИЧНА ВІЗУАЛІЗІЦІЯ

5.1 Блок схема алгоритму

Для реалізації логіки роботи автоматизованої системи клімат-контролю було розроблено блок-схему алгоритму управління, зображену на рисунку 5.1, яка відображає послідовність дій контролера Arduino при зчитуванні даних, обробці сигналів та керуванні виконавчими пристроями.

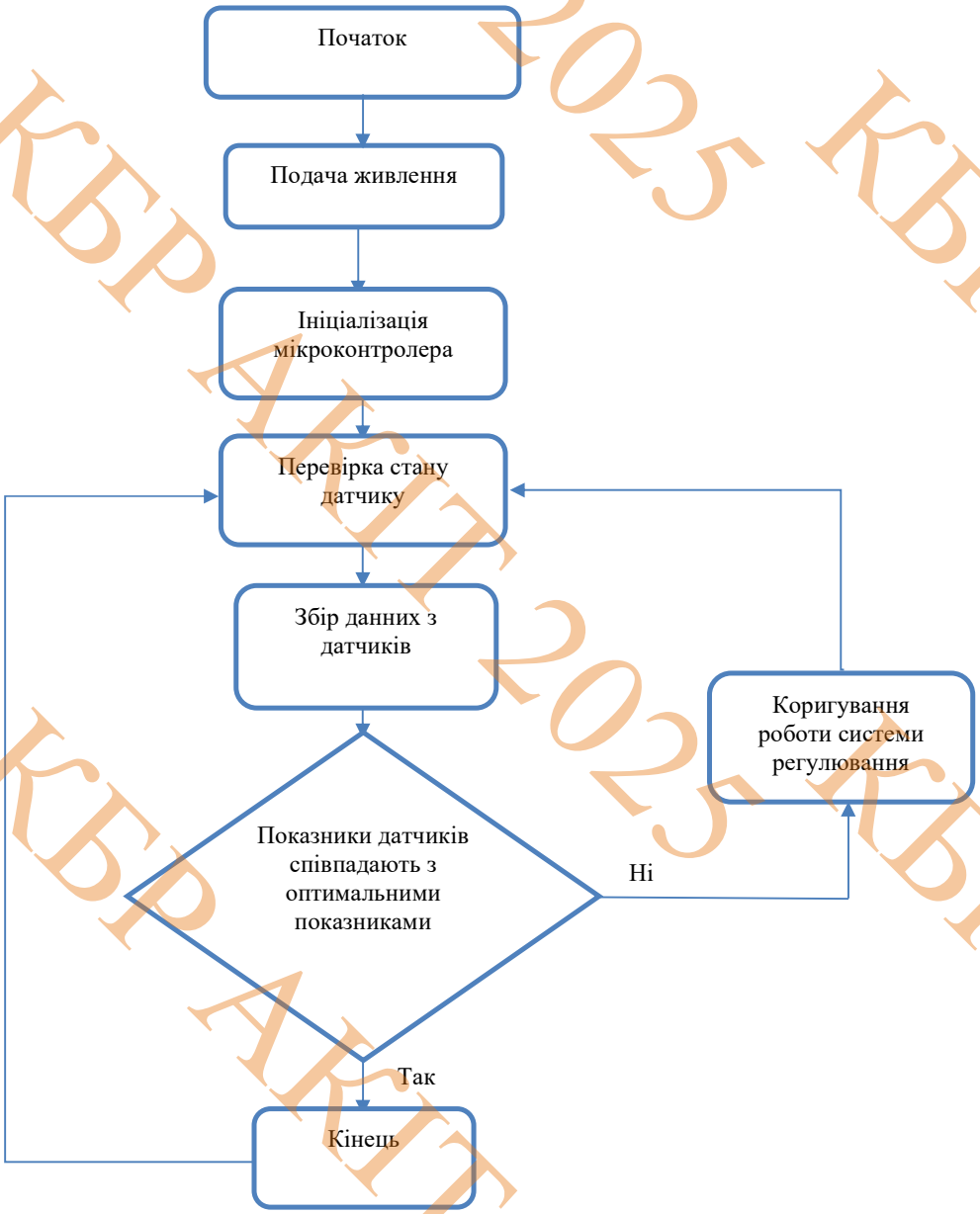

Рисунок 5.1 – Алгоритм роботи ситеми регулювання параметрів клімату

5.2 Структурна та принципова схема системи регулювання параметрів клімату

Для ефективного керування параметрами мікроклімату в приміщенні, зокрема температурою, вологістю та якістю повітря, розроблена структурна та принципова схема автоматизованої системи регулювання. Система побудована на базі мікроконтролера Arduino Uno, що виконує функції центрального блоку обробки даних та керування виконавчими пристроями.

На структурній схемі, представленій на рис.5.2, відображені основні функціональні блоки системи та логічні зв'язки між ними:

1. Датчики:

- DHT22 – вимірювання температури та відносної вологості повітря;
- MQ-135 – оцінка якості повітря (наявність шкідливих газів).

2. Мікроконтролер Arduino Uno – аналізує дані з сенсорів, обчислює відхилення від заданих значень і формує сигнали керування.

3. Виконавчі пристрої (реле):

- MOSFET IRLB8721 (модуль) – регулювання швидкості вентилятора залежно від вихідного сигналу PID-регулятора;
- SSR-40DA (твердотіле реле) – увімкнення/вимкнення нагрівача за умов зниженого рівня температури.

1. Інтерфейс користувача:

- OLED-дисплей 0.96" SSD1306 I2C – виведення поточних значень температури, вологості та рівня забрудненості повітря.

Живлення системи здійснюється від зовнішнього джерела постійного струму 12 В, а також через USB-інтерфейс для програмування та тестування.

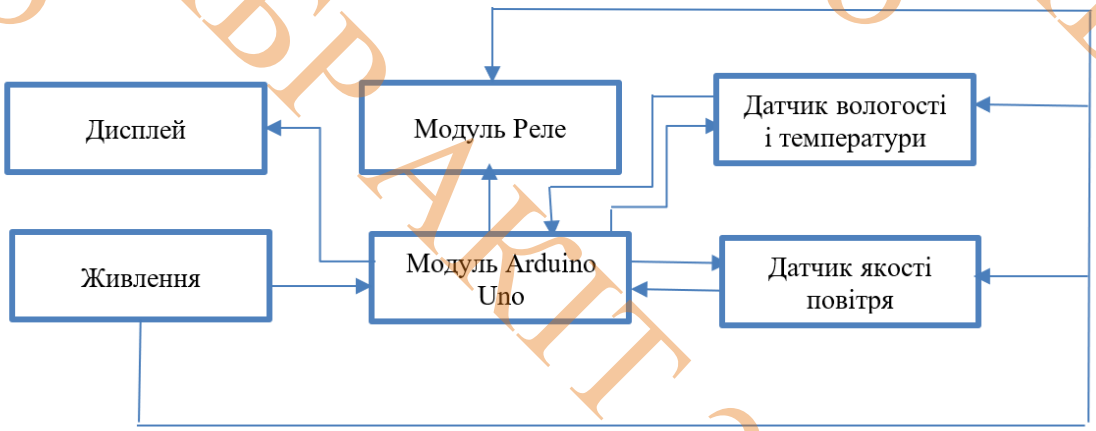

Рисунок 5.2 – Структурна схема системи регулювання параметрів клімату приміщень

На основі всіх даних було сконструйовано принципову електричну схему в AutoCAD ,яку наведено на рисунку 5.3.

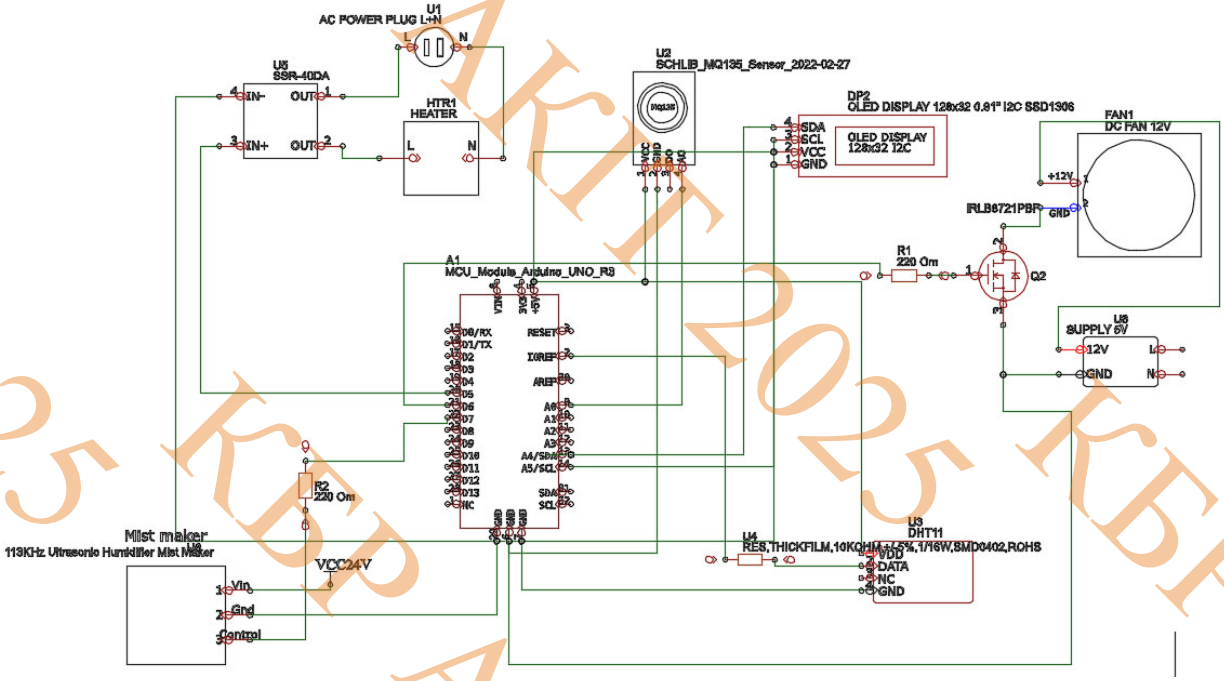

Рисунок 5.3 – Принципова електрична схема системи регулювання параметрів клімату приміщень

6 РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

В рамках даного проєкту було реалізовано програмне забезпечення для мікроконтролера Arduino, яке здійснює автоматичне регулювання трьох основних параметрів мікроклімату: температури повітря, відносної вологості та умовної якості повітря. Алгоритм керування базується на класичному PID-регулюванні з логікою умовного вимкнення навантажень.

До складу системи входять такі апаратні компоненти:

- цифровий температурно-вологісний сенсор DHT22,
- газовий сенсор MQ-135 (для оцінки якості повітря),
- твердотільні виконавчі пристрої: нагрівач, зволожувач, вентилятор,
- дисплей OLED 128×64 для візуалізації поточних параметрів.

Для забезпечення регулювання використовуються три об’єкти PID-регуляторів з бібліотеки PID_v1.h, кожен з яких відповідає за окремий параметр: температуру (pidT), вологість (pidH) та якість повітря (pidA), що наведено нижче на рисунку 6.1.

```
38  /* ——— Об’єкти PID ——— */
39  PID pidT(&tIn, &tOut, &tSet, KpT, KiT, KdT, DIRECT);
40  PID pidH(&hIn, &hOut, &hSet, KpH, KiH, KdH, DIRECT);
41  PID pidA(&aIn, &aOut, &aSet, KpA, KiA, KdA, REVERSE);
```

Рисунок 6.1 – Обєкти PID регуляторв (фрагмент коду)

Принцип роботи складається з 5 етапів які описано нижче.

1. Ініціалізація

У функції setup() виконується ініціалізація датчиків, OLED-дисплея, PWM-виводів, а також встановлюються вихідні межі й періоди дискретизації, які зображені на рис.6.2 для кожного PID-регулятора.

```
58    pidT.SetOutputLimits(0, 255);
59    pidH.SetOutputLimits(0, 255);
60    pidA.SetOutputLimits(0, 255);
61
62    pidT.SetSampleTime(2000);
63    pidH.SetSampleTime(2000);
64    pidA.SetSampleTime(2000);
65
66    pidT.SetMode(AUTOMATIC);
67    pidH.SetMode(AUTOMATIC);
68    pidA.SetMode(AUTOMATIC);
```

Рисунок 6.2 – Вихідні межі й періоди дискретизації (фрагмент коду)

2. Зчитування вхідних параметрів

Температура й вологість зчитуються з DHT11, а рівень забруднення повітря — з аналогового виходу MQ-135.

3. Умовне вимкнення (гістерезис)

Задля уникнення частого вмикання/вимикання нагрівача та зволожувача реалізовано логіку гістерезису. Якщо температура або вологість перевищує задану межу на встановлений допуск (T_BAND, H_BAND), відповідний PID-регулятор переводиться в ручний режим (MANUAL), а навантаження вимикається повністю. Коли параметр повертається в допустиму зону, регулятор автоматично активується знову (AUTOMATIC), фрагмент коду наведений на рис. 6.3.

4. Постійне PID-регулювання вентилятора

Вентилятор працює постійно, змінюючи швидкість обертання відповідно до показників MQ-135. Звернімо увагу, що у даному випадку регулятор має напрямок REVERSE — що гірша якість повітря (вищий сигнал з датчика), то більша швидкість вентилятора (вищий PWM).

5. Серійний моніторинг та вивід на дисплей

Всі актуальні значення параметрів, а також статус керування пристроями (PWM-рівні) виводяться у Serial Monitor для діагностики та на OLED-дисплей для користувача.

```
81    if (tIn >= T_SET + T_BAND) {          // занадто тепло
82      analogWrite(HEATER_PIN, 0);         // повне вимкнення
83      pidT.SetMode(MANUAL);               // «заморозити» інтегратор
84    } else {
85      if (pidT.GetMode() == MANUAL) pidT.SetMode(AUTOMATIC); // повернути
86      pidT.Compute();
87      analogWrite(HEATER_PIN, (int)tOut);
88    }
```

Рисунок 6.3 – Алгоритм керування температурою (фрагмент коду)

Основними перевагами реалізації є стабільність регулювання, так як застосування PID-регуляторів дозволяє системі адаптивно реагувати на відхилення параметрів від заданих значень, забезпечуючи плавне і безперервне керування. Завдяки наявності пропорційної, інтегральної та диференціальної складових, система автоматично компенсує як миттєві зміни, так і довготривалі зсуви температури чи вологості.

Також у системі передбачено можливість налаштування гістерезису для кожного параметра, що дозволяє уникати частого ввімкнення/вимкнення виконавчих пристроїв. Крім того, користувач має змогу змінювати PID-коефіцієнти в залежності від типу середовища або обладнання, забезпечуючи адаптацію системи до конкретних умов експлуатації.

Завдяки логіці умовного вимкнення навантажень при досягненні цільових значень, система мінімізує споживання енергії. Наприклад, при перевищенні температури або вологості понад допустиму межу, відповідний регулятор автоматично деактивується, а навантаження вимикається повністю до стабілізації параметра.

Для зручності користувача передбачено виведення поточних параметрів середовища та рівнів керування на OLED-дисплей, що дає змогу в реальному часі контролювати стан системи. Крім того, передбачено вивід у серійний порт для діагностики або логування.

Таким чином, запропонована реалізація демонструє приклад ефективного поєднання програмної гнучкості PID-регуляторів із апаратними можливостями платформи Arduino, забезпечуючи точне, стабільне та енергоощадне керування параметрами мікроклімату.

Повний код наведений в додатку А.

ВИСНОВКИ

У результаті виконання бакалаврської роботи було розроблено автоматизовану систему регулювання параметрів мікроклімату в приміщенні на базі мікроконтролера Arduino Uno. Основною метою проєкту було створення доступної та ефективної системи, здатної забезпечувати стабільні умови для перебування людей або зберігання продукції завдяки точному контролю температури, вологості та якості повітря.

У процесі роботи було проведено аналіз сучасних вимог до систем HVAC відповідно до стандартів ASHRAE, а також вибрано типові датчики та виконавчі пристрої, зокрема DHT11, MQ-135, OLED-дисплей, керований нагрівач;

Створено структурну, функціональну, принципову та схематичну візуалізацію системи, які забезпечують повне уявлення про взаємозв'язок між апаратними та програмними компонентами;

Реалізовано трьохконтурну систему регулювання на базі PID-алгоритмів, яка керує роботою нагрівача, зволожувача та вентилятора. Програмне забезпечення було оптимізовано для забезпечення стабільної та надійної роботи в умовах змінного середовища.

Проведено тестування програмного забезпечення і підтверджено ефективність алгоритму регулювання: система успішно реагує на відхилення температури від заданого значення та забезпечує його корекцію без різких коливань.

Таким чином, створена система може використовуватись як основа для побудови більш складних рішень у сфері клімат-контролю, з можливістю масштабування, додавання IoT-компонентів та дистанційного моніторингу. Розроблений підхід дозволяє реалізувати недорогі та енергоефективні рішення для побутових, промислових або аграрних застосувань.

Подальшим напрямом розвитку проєкту може стати інтеграція бездротових технологій (Wi-Fi, Bluetooth), підключення до хмарного сервісу

для віддаленого керування, а також використання більш точних сенсорів і потужніших регуляторів для промислових систем.

КБР АКІТ 2025

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. HVAC system components and how they work [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://erieit.edu/components-of-an-hvac-system-and-how-they-work/.

2. What is HVAC and how do HVAC systems work? / Trane Technologies [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.trane.com/residential/en/resources/blog/how-do-hvac-systems-work/.

3. ANSI/ASHRAE Standard 62-2001: Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality. – Atlanta: ASHRAE, 2001. – 302 с. – Режим доступу: https://www.ce.utexas.edu/prof/Novoselac/classes/ARE389H/Handouts/Std62-2001.pdf.

4. ANSI/ASHRAE Standard 55-1992: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. – Atlanta: ASHRAE, 1992. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://ashrae.iwrapper.com/ASHRAE_PREVIEW_ONLY_STANDARDS/STD_55_1992.

5. HVAC Systems Explained: Components, Functionality & Benefits [Електронний ресурс] / The Engineering Mindset. – YouTube, 2020. – Режим доступу: https://www.youtube.com/watch?v=tRB9gyXitGk.

6. Eaton. On/Off Control for HVAC Control [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.eaton.com/us/en-us/products/controls-drives-automation-sensors/industrial-control-center/automation-control/hvac-control/on-off-control.html

7. Eaton. PID Control for HVAC Control [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.eaton.com/us/en-us/products/controls-drives-automation-sensors/industrial-control-center/automation-control/hvac-control/pid-control.html

8. Engineered Air Balance. PID Control for HVAC Systems [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.eabcoinc.com/training-center-news/pid-control-for-hvac-systems/

9. Threws. A Beginner's Guide to Fuzzy Logic Controllers for AC Temperature Control [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://threws.com/a-beginners-guide-to-fuzzy-logic-controllers-for-ac-temperature-control/

10. Alireza Askarzadeh. An Integrated Approach to Adaptive Control and Supervisory Control for HVAC // Energies. – 2021. – Т. 14, № 8. – С. 2078. – DOI: 10.3390/en14082078. – Режим доступу: https://www.mdpi.com/1996-1073/14/8/2078

11. De Angelis F. та ін. Model Predictive Control of Heating, Ventilation, and Air Conditioning Systems: A Review // Energy and Buildings. – 2022. – Т. 267. – С. 112126. – DOI: 10.1016/j.enbuild.2022.112126. – Режим доступу: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352710222010750

12. Urosevic D. та ін. HVAC Control in Buildings Using Neural Network // Energy Reports. – 2022. – Т. 8. – С. 12827–12835. – DOI: 10.1016/j.egyr.2022.09.160. – Режим доступу: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710222015649

13. Trane®. Hybrid Heat Systems: How Do They Work? [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.trane.com/residential/en/resources/blog/hybrid-heat-systems-how-they-work/

14. Arduino. Arduino Uno Rev3 [Електронний ресурс] // Офіційний сайт Arduino. – Режим доступу: https://store.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3

15. Мікроконтролери та мікропроцесорна техніка. Лабораторний практикум. [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / О.М. Павловський; КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. — 104 с.

16. Krocker G. MQ135 Arduino Library for CO2 and other gases [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://github.com/GeorgK/MQ135

17. MQ135 Air Quality Sensor Introduction [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.theengineeringprojects.com/2024/03/mq135-air-quality-

sensor.html#:~:text=MQ135%20Air%20Quality%20Sensor%20Introduction&text=It%20operates%20on%205V%20and,used%20to%20set%20the%20alarm.

18. Adafruit Industries. DHT11 Temperature & Humidity Sensor [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://learn.adafruit.com/dht

19. DHT11 Humidity and Temperature Sensor Datasheet [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.mouser.com/datasheet/2/758/DHT11-Technical-Data-Sheet-Translated-Version-1143054.pdf?srsltid=AfmBOopea4oqvgPAx02oRk4nqN5yKCcMm95KnkwiAA-hQduOi5NGAmVX

20. SSD1306 OLED Display Datasheet [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/SSD1306.pdf

21. Ashrae Handbook 2020 – HVAC Systems and Equipment. – American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2020. – Розділ: Split-System Air Conditioners.

22. Solid State Relay SSR-40DA – Fotek. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.fotekexpress.com/product/fotek-ssr-40da/

23. Infineon Technologies. IRLB8721PBF: N-Channel Power MOSFET, V_{nn} = 30 V, I_n = 62 A, R_n(on) = 8,7 mΩ [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.digikey.com/en/products/detail/infineon-technologies/IRLB8721PBF/2127670

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

HVAC – Heating, Ventilation and Air Conditioning

OLED – Organic Light Emitting Diode (Органічний світлодіод)

VAV – Variable Air Volume (Система змінного об’єму подачі повітря)

ASHARE – American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (Американське товариство інженерів з опалення, охолодження та кондиціювання повітря)

IAQ – Indoor Air Quality (Якість повітря в приміщенні)

CFM – Cubic Feet per Minute (Кубічні фути за хвилину – одиниця виміру повітряного потоку)

MPC – Model Predictive Control (Модельно-прогнозне керування)

AI – Artificial Intelligence (Штучний інтелект)

IoT – Internet of Things (Інтернет речей)

USB – Universal Serial Bus (Універсальна послідовна шина)

ICSP – In-Circuit Serial Programming (Послідовне програмування в колі)

FTDI – Future Technology Devices International (Компанія, відома мікросхемами для USB-UART, або адаптер FTDI)

I2C – Inter-Integrated Circuit (Інтерфейс між мікросхемами – двопровідний протокол зв’язку).

SDA – Serial Data Line (Лінія послідовних даних в I2C)

SCL – Serial Clock Line (Лінія послідовного такту в I2C)

Ppm – Parts Per Million (Частин на мільйон – одиниця виміру концентрації)

WSN – Wireless Sensor Network (Бездротова сенсорна мережа)

GWP – Global Warming Potential – Потенціал глобального потепління.

IDE – Integrated Development Environment (Інтегроване середовище розробки)

OTD – Outside Temperature Display a

SCOP – Seasonal Coefficient of Performance (Сезонний коефіцієнт ефективності теплового насоса або системи)

PV – Photovoltaic (Фотовольтаїчний елемент – сонячна панель)

VIN – Voltage Input (Вхідна напруга)

GND – Ground (Заземлення)

DHT – Digital Humidity and Temperature sensor

PID – Proportional Integral Derivative

SSR – Solid State Relay

PWM – Pulse Width Modulation

MOSFET – (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor)

ШІМ – Широтно-Імпульсна Модуляція

КБР АКІТ 2025