

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Навчально-науковий інститут автоматики і електротехніки

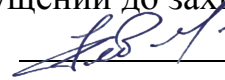
(повне найменування інституту, назва факультету)

Кафедра програмованої електроніки, електротехніки і телекомунікацій

(повна назва кафедри)

«Допущений до захисту»

Завідувач кафедри



В. М. Рябенський

д.т.н., професор

« 19 » червня 2026 р.

Кваліфікаційна робота

на здобуття ступеня вищої освіти «бакалавр»

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему: Розробка мікроконтролерної системи керування твердопаливним
КОТЛОМ

Виконав: студент

4327ст3 групи

Є. О. Бронченко

(підпис)

Керівник роботи:

старший викладач каф. ПЕЕТ

(посада, науковий ступінь, вчене звання)



С.Л. Трибулькевич

(підпис)

м. Миколаїв – 2026 року

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
Навчально-науковий інститут автоматики та електротехніки

Кафедра	<u>програмованої електроніки, електротехніки і телекомунікацій</u>
Спеціальність	<u>171 «Електроніка»</u>
Освітня програма	<u>Електронні системи</u>

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Гарант освітньої програми

 О. С. Дьяконов
(підпис)

« 20 » березня 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ на здобуття ступеня вищої освіти «бакалавр» (освітньо-кваліфікаційний рівень)

Студенту Бронченку Євгенію Олександровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка мікроконтролерної системи керування твердопаливним котлом

керівник роботи Трибулькевич Сергій Леонідович, старший викладач каф. ПЕЕТ
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ректора № 286-уч. від « 22 » квітня 2026 року.

2. Термін подання роботи: «09» червня 2026 року

3. Вихідні дані по роботі: _____

Об'єкт та метрики: Твердопаливний котел з контролем температур подачі та звороту, цифровими датчиками DS18B20 на шині OneWire.

Контури керування: Нелінійне PID-регулювання повітряної заслінки ШІМ-сигналом 50 Гц та подієве ступеневе перемикання 3 швидкостей циркуляційного насоса через взаємовиключні реле.

4. Перелік питань, що належать до розробки (найменування розділів) _____
Аналіз існуючих рішень; Схемотехніка пристрою; Архітектура програмного забезпечення системи; Тестування роботоспроможності; Охорона праці

5. Перелік презентаційних матеріалів _____

1. Титульний слайд. 2. Актуальність теми. 3. Мета та завдання роботи. 4. Аналіз існуючих рішень. 5. Структурна схема системи. 6. Обґрунтування компонентної бази. 7. Схемотехніка пристрою. 8. Архітектура програмного забезпечення. 9. Алгоритми функціонування. 10. Інтерфейс користувача та моніторинг. 11. Тестування та результати. 12. Висновки

6. Консультанти розділів роботи

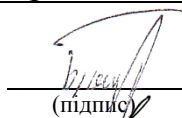
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
5	Тубальцев А. М., доцент каф. екології та природоохоронних технологій		

7. Дата видачі завдання « 23 » квітня 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Вибір теми	Не пізніше 20 березня 2026	виконано
2.	Визначення мети, завдань, об'єкта та предмета дослідження	Березень 2026	виконано
3.	Підбір і опрацювання списку використаних джерел	Березень – квітень 2026	виконано
4.	Виконання кваліфікаційної роботи	Квітень 2026	виконано
	Вступ	Квітень 2026	виконано
	Розділ 1	Квітень 2026	виконано
	Розділ 2	Травень 2026	виконано
	Розділ 3	Травень 2026	виконано
	Розділ 4	Травень 2026	виконано
	Розділ 5	Травень 2026	виконано
5.	Оформлення кваліфікаційної роботи	Не пізніше 8 червня 2026	виконано
6.	Підготовка доповіді і презентації	Не пізніше 16 червня 2026	виконано
7.	Підготовка до захисту	Травень – червень 2026	виконано
	Оформлення авторського договору та заяв	Травень 2026	виконано
	Передача роботи для перевірки на плагіат	Не пізніше 9 червня 2026	виконано
	Отримання відгуку наукового керівника	Не пізніше 16 червня 2026	виконано
	Попередній захист	Не пізніше 16 червня 2026	виконано
	Отримання рецензії	Не пізніше 18 червня 2026	виконано
	Отримання допуску до захисту (підпис завідуючого кафедри)	Не пізніше 22 червня 2026	виконано
8.	Захист кваліфікаційної роботи	23-24 червня 2026	виконано

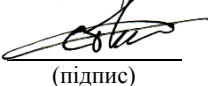
Студент


(підпис)

Є. О. Бронченко

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи


(підпис)

С.Л. Трибулькевич

(прізвище та ініціали)

Анотація

Кваліфікаційна робота присвячена розробці мікроконтролерної системи керування твердопаливним котлом. В роботі проведено аналіз існуючих рішень та обґрунтовано вибір апаратної платформи на базі ESP32-S2. Розроблено архітектуру системи, що включає блоки вимірювання температури, керування повітряною заслінкою за допомогою ПІД-регулятора, та блок комутації циркуляційного насоса. Програмне забезпечення реалізовано на базі фреймворку ESPHome, що дозволило інтегрувати пристрій у систему домашньої автоматизації Home Assistant для віддаленого моніторингу та керування. Працездатність системи підтверджена шляхом симуляції у середовищі Wokwi та натурними випробуваннями на реальному об'єкті.

Ключові слова: Твердопаливний котел, мікроконтролер, ESP32-S2, ПІД-регулювання, автоматизація, ESPHome, Home Assistant, Інтернет речей (IoT), цифрові датчики температури, енергоефективність.

Abstract

The qualification work is devoted to the development of a microcontroller control system for a solid fuel boiler. The work analyzes existing solutions and justifies the choice of a hardware platform based on ESP32-S2. The system architecture is developed, which includes temperature measurement units, air damper control using a PID controller, and a circulation pump switching unit. The software is implemented on the basis of the ESPHome framework, which allowed integrating the device into the Home Assistant home automation system for remote monitoring and control. The system's performance is confirmed by simulation in the Wokwi environment and field tests at a real facility.

Keywords: Solid fuel boiler, microcontroller, ESP32-S2, PID control, automation, ESPHome, Home Assistant, Internet of Things (IoT), digital temperature sensors, energy efficiency.

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень та термінів..	6
Вступ.....	7
Розділ 1. Аналіз існуючих рішень.....	9
1.1. Теоретичні основи роботи котла	9
1.2. Системна архітектура та апаратне забезпечення керуючого ядра	10
1.3. Метрологічне забезпечення вимірювальних каналів та	
інтерфейси сенсорів.....	12
1.4. Вибір датчиків температури за фізичними діапазонами.....	13
1.5. Фазоімпульсна модуляція та схемотехніка силових виконавчих	
пристроїв.....	15
1.6. Схемотехніка детектора переходу через нуль (Zero-Crossing	
Detector)	15
Розділ 2. Схемотехніка пристрою	18
2.1. Загальні положення.....	18
2.2. Опис функціональних блоків та їх взаємозв'язків	18
2.3. Обґрунтування та опис компонентної бази системи	22
Розділ 3. Архітектура програмного забезпечення системи.....	29
3.1. Загальна концепція та операційне середовище.....	29
3.2. Опис архітектурних модулів ПЗ	29
3.3. Підсистема відказостійкості, індикації та зв'язку	31
3.4. Алгоритми функціонування програмних модулів	32
Розділ 4. Тестування роботоспроможності.....	38
4.1. Верифікація в середовищі симуляції Wokwi.....	38
4.2. Натурні випробування та експлуатаційні показники	41
Висновки:.....	44
Розділ 5. Охорона праці	46
Вступ	46
5.1. Аналіз небезпечних і шкідливих факторів, що впливають на	
людину	46

5.2. Природне освітлення.....	51
5.3. Штучне освітлення.....	52
5.4. Заходи щодо запобігання шкідливих факторів	54
5.5. Забезпечення електробезпеки	56
Висновки	57
Список використаних джерел	58
Додаток А.....	64
Програмне забезпечення МК.....	64
Додаток Б	68
Файл diagram.json Wokwi.....	68

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ

ТТ-котел – твердопаливний котел.

МК – мікроконтролер.

ПЗ – програмне забезпечення.

ПІД (PID) – пропорційно-інтегрально-диференціальний (регулятор).

ШИМ (PWM) – широтно-імпульсна модуляція.

IoT – Інтернет речей (Internet of Things).

HAL – шар драйверів апаратного забезпечення (Hardware Abstraction Layer).

CRC – циклічна перевірка контрольної суми (Cyclic Redundancy Check).

GPIO – порти вводу-виводу загального призначення.

LDO – лінійний стабілізатор напруги з низьким рівнем падіння.

SDA, SCL – лінії передачі даних та синхронізації шини I2C

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Скорочення	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

ВСТУП

Актуальність теми. Керування твердопаливними котлами є складним завданням через значну інерцію процесів згоряння та нелінійну теплофізику твердого палива. Відсутність точного дозування повітря та контролю температури зворотної лінії призводить до утворення конденсату, корозії та низького ККД системи. Створення надійної мікроконтролерної системи дозволяє автоматизувати процес горіння та забезпечити безпечну експлуатацію обладнання.

Мета роботи полягає у розробці мікроконтролерної системи, яка забезпечує оптимальне та безпечне керування процесом горіння в котлі, стабілізацію температури теплоносія та можливість дистанційного моніторингу.

Завдання роботи:

1. Проаналізувати сучасні апаратні платформи та методи керування котлами.
2. Розробити схемотехніку пристрою та обґрунтувати вибір компонентної бази.
3. Розробити архітектуру програмного забезпечення на основі подієво-орієнтованої моделі.
4. Провести тестування системи в середовищі симуляції та натурні випробування.
5. Розглянути питання охорони праці при експлуатації системи.

Об'єкт дослідження – процес автоматизованого керування теплотехнічними показниками твердопаливного котла. Предмет дослідження – мікроконтролерна система та алгоритми ПД-регулювання подачі повітря в зону горіння.

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Вступ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Р1			
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата				
Розробник		Бронченко Є. О.			Аналіз існуючих рішень	Літ.	Арк.	Аркуші
Консультант							8	
Н. контр.		Добрінова Л. П.				НУК імені адмірала Макарова		
Керівник		Трибулькевич С.Л.						
Зав. каф.		Рябенський В. М.						

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ

1.1. Теоретичні основи роботи котла

Проектування мікроконтролерних систем керування твердопаливними котлами вимагає глибокого розуміння нелінійної теплофізики та кінетики згоряння твердого палива.[1, 2] На відміну від газових чи рідкопаливних пальників, де паливо подається гомогенізовано і практично миттєво реагує на зміну керуючого впливу, тверде паливо (дрова, пелети, вугілля) характеризується значною інерцією розпалювання, газифікації та згоряння.[1, 2, 3]

Процес згоряння в котлах періодичної дії (наприклад, шахтних або піролізних) складається з кількох фаз: підігрів і сушіння палива, виділення летких вуглеводнів (піроліз), активне горіння коксового залишку та фаза догоряння.[4, 5] Для ефективного проходження цих етапів необхідне точне дозування первинного повітря (яке подається безпосередньо в зону відновлення для газифікації палива) та вторинного повітря (яке впорскується в термоізольовану камеру допалювання для окиснення летких газів).[4] У такій камері, що виконується з вогнетривкої шамотної кераміки, температура горіння деревного газу підтримується в межах 982°C до 1149°C).[4] Це дозволяє мінімізувати утворення сажі та оксидів азоту (NO_x), оскільки робочий діапазон температур лежить поза зоною активного утворення термічних NO_x .[2, 4] Димові гази після проходження трубного теплообмінника виходять з котла за температури від 115°C до 149°C).[4]

Важливим конструктивним параметром є забезпечення достатньої припливної вентиляції приміщення котельні.[6] Площа вентиляційного отвору розраховується за емпіричною залежністю:

$$S = 6.02 \times P$$

де S — площа припливного каналу в cm^2 , а P — номінальна теплова потужність котла в kW .[6] Для стабільного виведення продуктів згоряння

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Р1	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

димохідна система не повинна звужуватися по всій довжині, а кількість колін має бути обмежена максимум двома з кумулятивним кутом не більше 135° (45° і 90° відповідно), оскільки кожне коліно під прямим кутом (90°) знижує силу природної тяги вдвічі.[6]

З погляду термодинаміки, критичним є утримання температури зворотної лінії теплоносія на рівні не нижче 65°C для стабільної роботи без конденсації вологи на сталевих або чавунних поверхнях теплообмінника.[6] Зниження температури нижче цього порогу призводить до утворення агресивного конденсату, змішаного із сажею (креозоту), що викликає прискорену низькотемпературну корозію.[7, 8] Тому мікроконтролерна система повинна керувати підмішуванням гарячого теплоносія, контролюючи нижній ліміт повернення на рівні $45 - 65^{\circ}\text{C}$ і верхній ліміт подачі на рівні $85 - 95^{\circ}\text{C}$.[5, 7]

1.2. Системна архітектура та апаратне забезпечення керуючого ядра

Створення промислово надійної системи керування твердопаливним котлом здійснюється за чітко визначеними інженерними етапами.[5] На початковому етапі розробляється концептуальна схема автоматизації та P&ID-діаграма, після чого здійснюється вибір елементної бази.[5, 9] Далі слідує етап попередньої підготовки вбудованого програмного забезпечення (Firmware) та людино-машинного інтерфейсу (HMI), фізичний монтаж виконавчих пристроїв і прокладання ліній зв'язку.[5] Завершальна фаза передбачає комплексне тестування захисних блокувань, оптимізацію ПІД-контурів на реальному тепловому об'єкті та сертифікацію системи за стандартами CE.[5]

У сучасній практиці проектування систем автоматизації опалення виділяють три основні апаратні платформи мікроконтролерів: STM32, ESP32 та рішення на базі 8-бітних кристалів ATmega (Arduino).[10, 11, 12] Вибір

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Р1	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

обчислювального ядра залежить від вимог до жорсткого реального часу, завадостійкості та мережевої інтеграції.[10, 13]

Таблиця 1.1 – Вибір платформи керування

Платформа	Обчислювальне ядро	Наявність RTOS / Determinism	Електромагнітна сумісність (EMC)	Мережева периферія
STM32(напр. STM32F4/G4)	32-bit ARM Cortex-M, до 170–180 MHz	Жорсткий детермінований реальний час, висока швидкість обробки переривань	Висока стійкість до імпульсних завад від пуску помп та приводів	CAN, CAN-FD, RS-485, Ethernet MAC
ESP32 (напр. ESP32-S3)	32-bit Xtensa Dual-Core, до 240 MHz	М'який реальний час, можливі недетерміновані затримки через стеки зв'язку	Середня стійкість; інтегрований радіотракт чутливий до завад у ланцюгах живлення	Wi-Fi 4, Bluetooth LE, зовнішній Ethernet PHY
ATmega (напр. ATmega328p)	8-bit AVR, 16 MHz	Жорсткий реальний час, обмежений низькою частотою	Низька/середня стійкість; чутливий до просідання напруги живлення	Відсутня (потребує зовнішніх SPI-контролерів)

Для побудови високонадійних рішень найефективнішою є гібридна архітектура.[10, 13] Обчислювальне ядро реалізується на базі контролера

STM32, який виконує завдання нижнього рівня: зчитування показань датчиків температури, обчислення кроку ПІД-алгоритму та фазоімпульсне керування силіційованими вентиляторами наддуву.[10, 13] Комунікаційний модуль на базі ESP32-S3 (наприклад, з об'ємом пам'яті N16R8, що забезпечує достатній об'єм PSRAM для обробки графіки та буферизації даних) виконує роль шлюзу IoT.[10, 15] Він підтримує стек протоколів TCP/IP, реалізує інтеграцію з Home Assistant через MQTT або ESPHome, обслуговує веб-інтерфейс (Web UI) та забезпечує безпечне бездротове оновлення прошивки (OTA-апдейт).[15, 18, 19] Крім того, ESP32 керує графічним інтерфейсом користувача на базі 2.8-дюймового TFT-дисплея з контролером ST7789V або ILI9341 та роторним енкодером EC11, відображаючи швидкість наростання температури в градусах за хвилину ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$) та історичний графік роботи за останні 4 години.[15]

У простіших системах, наприклад, електричних нагрівачах, можуть використовуватися чіпи серії ESP32-C3 для ступеневого керування кількома ТЕНами (наприклад, потужністю 650 Вт та 850 Вт) з використанням протоколів UDP-мовлення для передачі системних логів та команд.[18] Для інтеграції з промисловими та напівпромисловими опалювальними приладами (Bosch, Buderus, Junkers) застосовують відкритий протокол EMS-ESP, що потребує спеціалізованої схемотехніки для спряження з шинами EMS або Heatronic.[19] Також широкого поширення набули інтерфейси OpenTherm для інтеграції з модульованими газовими або електричними котлами у складі комбінованих систем теплопостачання.[20]

1.3. Метрологічне забезпечення вимірювальних каналів та інтерфейси сенсорів

Точність та швидкість реакції системи керування твердопаливним котлом напряму залежать від правильно обраного метрологічного обладнання для кожної температурної зони.[21, 22]

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Р1	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

1.4. Вибір датчиків температури за фізичними діапазонами

Для вимірювання температури теплоносія (води або гліколю) в трубопроводах подачі, зворотної лінії та в контурах теплої підлоги застосовують два типи датчиків: цифрові кремнієві перетворювачі DS18B20 та аналогові платинові термоопори Pt1000.[23, 24, 25]

Цифровий датчик DS18B20 працює за інтерфейсом 1-Wire, що дозволяє підключати десятки пристроїв паралельно до одного GPIO-виводу мікроконтролера.[23, 26] Він забезпечує точність вимірювання $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ в діапазоні від -10°C до $+85^{\circ}\text{C}$ з налаштовуваною розрядністю оцифрування від 9 до 12 біт.[23, 26] Датчик має унікальний 64-бітний серійний номер, записаний у ROM, що спрощує побудову розгалужених систем.[23, 26] При побудові довгих ліній зв'язку в умовах високого рівня електромагнітних завад стандартне програмне опитування 1-Wire за допомогою GPIO стає нестабільним.[27] У таких випадках застосовують апаратні мости I2C-to-1-Wire, такі як DS2482-100 (одноканальний) або DS2482-800 (восьмиканальний), які забезпечують активне підтягування лінії DQ до живлення та демпфування відбитих сигналів.[27] Датчик DS18B20 підтримує паразитне живлення (Parasite Power), де енергія накопичується внутрішнім конденсатором безпосередньо з лінії даних DQ під час пасивного стану шини, що дозволяє реалізувати двопровідну схему підключення (DQ і GND).[26, 28]

Для промислових систем або контурів з підвищеними вимогами до довговічності застосовують платинові терморезистори Pt1000.[25, 29] Вони потребують аналогового інтерфейсу підключення через прецизійний вимірювальний міст або спеціалізований аналого-цифровий перетворювач (наприклад, MAX31865).[29]

Для зон з температурами понад $+125^{\circ}\text{C}$ (камера згоряння, димохідний боров) кремнієві датчики є непридатними.[21, 22] Тут безальтернативно

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Р1	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

використовуються термоелектричні перетворювачі — термопари К-типу.[21, 24, 30] Оскільки на виході термопари формується надзвичайно мала термо-ЕРС (близько $41 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$), для оцифрування сигналу застосовують спеціалізовані мікросхеми типу MAX6675.[21, 30]

Таблиця 1.2 – Порівняння сенсорів

Сенсор / Модуль	Фізичний діапазон	Точність вимірювання	Спосіб підключення	Сфера застосування
DS18B20	від -55°C до $+125^\circ\text{C}$	$\pm 0.5^\circ\text{C}$ (в інтервалі від -10°C до $+85^\circ\text{C}$)	1-Wire, підтримка паразитного живлення	Гідравлічні контури подачі та зворотної лінії, бойлер ГВП
Pt1000	від -200°C до $+850^\circ\text{C}$	Відповідно до класів допусків (клас А: $\pm 0.15^\circ\text{C}$)	2, 3 або 4-провідне аналогове підключення	Професійні системи автоматизації опалення [25]
Термопара К-типу + MAX6675	від 0°C до $+1024^\circ\text{C}$ (давач до $+450^\circ\text{C}$)	$\pm 2^\circ\text{C}$ (роздільна здатність оцифрування 12 біт)	SPI (SCK, CS, MISO), живлення 3.3/5V	Вимірювання температури полум'я в топці та димових газів

Для стабілізації показань мікросхеми MAX6675 та виключення високочастотних завад, що наводяться на довгий провід термопари, обов'язковим є встановлення керамічного блокувального конденсатора ємністю 100 нФ (маркування «104») безпосередньо між виводами живлення VCC та заземлення GND мікросхеми.[22]

1.5. Фазоімпульсна модуляція та схемотехніка силових виконавчих пристроїв

Керування швидкістю нагнітальних або витяжних вентиляторів змінного струму (230 В, 50 Гц) є однією з найскладніших апаратних задач.[32, 33] Стандартна широтно-імпульсна модуляція (PWM), яка успішно застосовується для двигунів постійного струму, тут не працює через фізичні особливості роботи симісторів (TRIAC).[32, 33]

Симістор є напівпровідниковим ключем лавинного типу.[32, 33] Після подачі імпульсу на керуючий електрод він відкривається і залишається у провідному стані доти, доки синусоїдальний струм навантаження природним чином не впаде нижче струму утримання в кінці напівперіоду мережевої напруги.[32, 33] Для регулювання напруги на обмотках двигуна застосовують фазоімпульсне керування (Phase Angle Control), де симістор відкривається із затримкою відносно початку кожного напівперіоду синусоїди.[33, 34]

1.6. Схемотехніка детектора переходу через нуль (Zero-Crossing Detector)

Для реалізації цього алгоритму мікроконтролер повинен чітко визначати момент переходу напруги через нуль.[16, 32] Існує три основні схемотехнічні підходи до реалізації детектора:

Транзисторний детектор з діодним мостом: Мережева напруга випрямляється мостом MB6S і через подільник напруги (резистори загальним опором 100 кΩ) керує затвором малопотужного N-канального польового транзистора 2N7000.[33] Коли напруга наближається до нуля (нижче порогу відкриття транзистора близько 1.5–2.0 В), транзистор

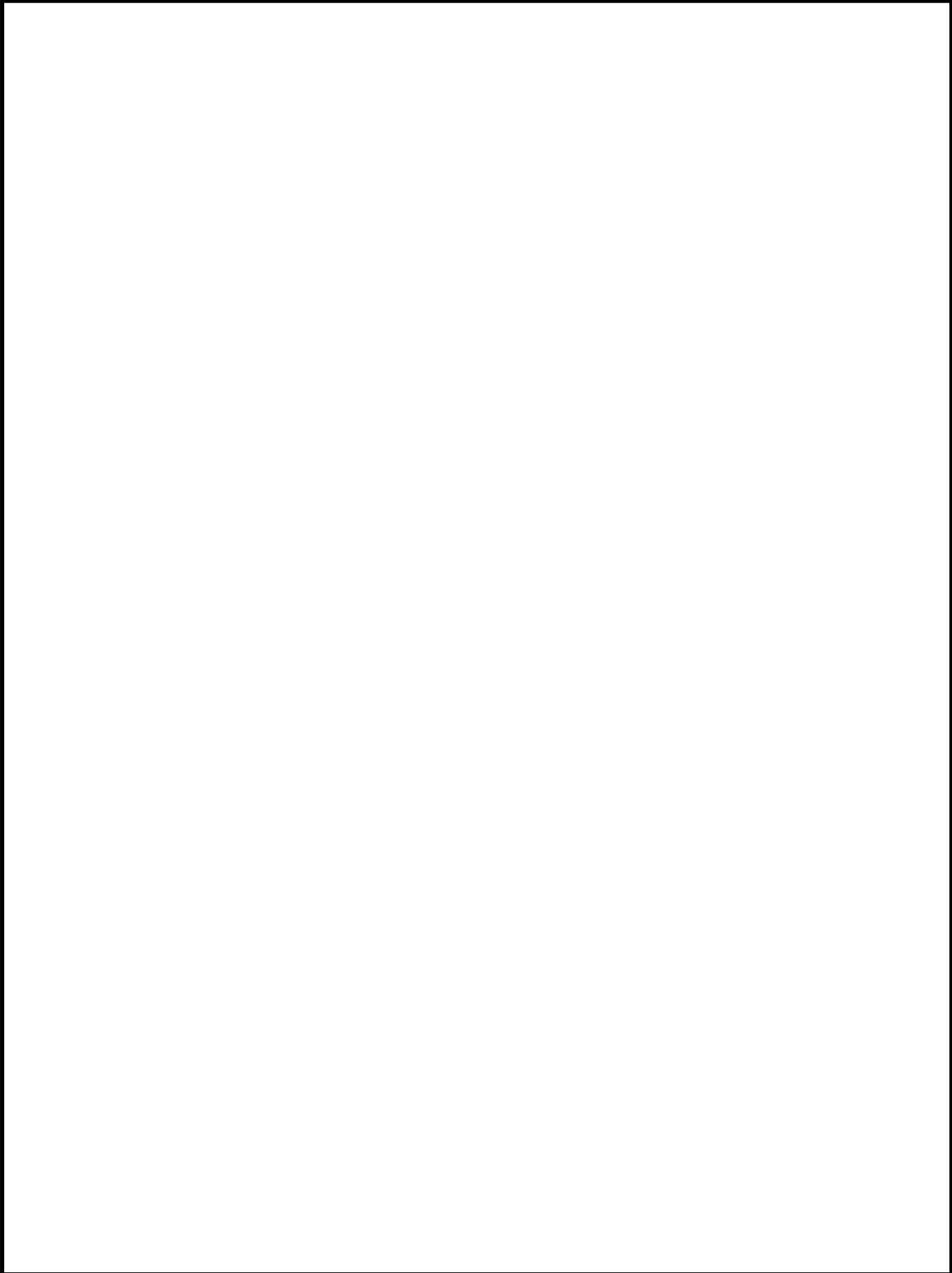
					171.4327ст3.КР.ПЗ.Р1	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

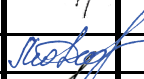
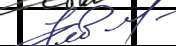
закривається, і на його стоку формується наростаючий фронт імпульсу, підтягнутого до лінії живлення мікроконтролера.[33]

Двонаправлений оптрон: Використовується оптопара типу TLP620GA, світлодіоди якої підключені безпосередньо до лінії змінного струму через обмежувальні резистори високої потужності.[33] Це забезпечує надійну гальванічну розв'язку та формує низький логічний рівень на виході протягом більшої частини напівперіоду, піднімаючись до логічної одиниці в безпосередній близькості до нуля.[33]

Інтегрований периферійний модуль ZCD: Сучасні мікроконтролери (наприклад, деякі сімейства PIC) мають вбудований апаратний модуль Zero-Cross Detect (ZCD).[34] Для його роботи потрібен лише один обмежувальний резистор високого номіналу, підключений безпосередньо до виводу мікроконтролера.[34] Внутрішня схема підтримує постійний потенціал на піні шляхом мікотокового джерела/приймача, генеруючи апаратне переривання в момент переходу струму через нуль.[34]

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Р1	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		



					171.4327ст3.КР.ПЗ.Р2			
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата				
Розробник		Бронченко Є. О.			Схемотехніка пристрою	Літ.	Арк.	Аркуші
Консультант							17	
Н. контр.		Добрінова Л. П.				НУК імені адмірала Макарова		
Керівник		Трибулькевич С.Л.						
Зав. каф.		Рябенський В. М.						

РОЗДІЛ 2. СХЕМОТЕХНІКА ПРИСТРОЮ

2.1. Загальні положення

Розроблена система автоматизації (рис. 4.1) призначена для забезпечення оптимального та безпечного керування процесом горіння в твердопаливних котлах (ТТ), стабілізації температури теплоносія на виході («подача») та мінімізації утворення конденсату і смол шляхом контролю температури зворотного потоку («обратка»).

Система побудована на базі сучасної мікропроцесорної платформи із застосуванням модульного принципу організації апаратного забезпечення та інтегрована в автоматизації через бездротові інтерфейси.

2.2. Опис функціональних блоків та їх взаємозв'язків

Згідно з розробленою структурною схемою, систему автоматики функціонально розділено на чотири ключові підсистеми, взаємодія між якими забезпечує повний цикл збору даних, обчислення керуючого впливу та безпосереднього регулювання об'єкта.

2.2.1. Центральний процесорний модуль.

Основою обчислювального ядра системи є однокристальна система (SoC) ESP32-S2 (DevKit). Вибір даного мікроконтролера зумовлений високою тактовою частотою процесора Xtensa® (до 240 МГц), наявністю вбудованого Wi-Fi модуля для віддаленого моніторингу та інтеграції з Home Assistant за допомогою API (ESPHome), а також розвиненою периферією:

– Апаратні таймери, які використовуються для генерації високочастотних сигналів ШІМ (LEDC) для сервоприводів та вентиляторів без завантаження основного обчислювального процесу.

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Р2	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

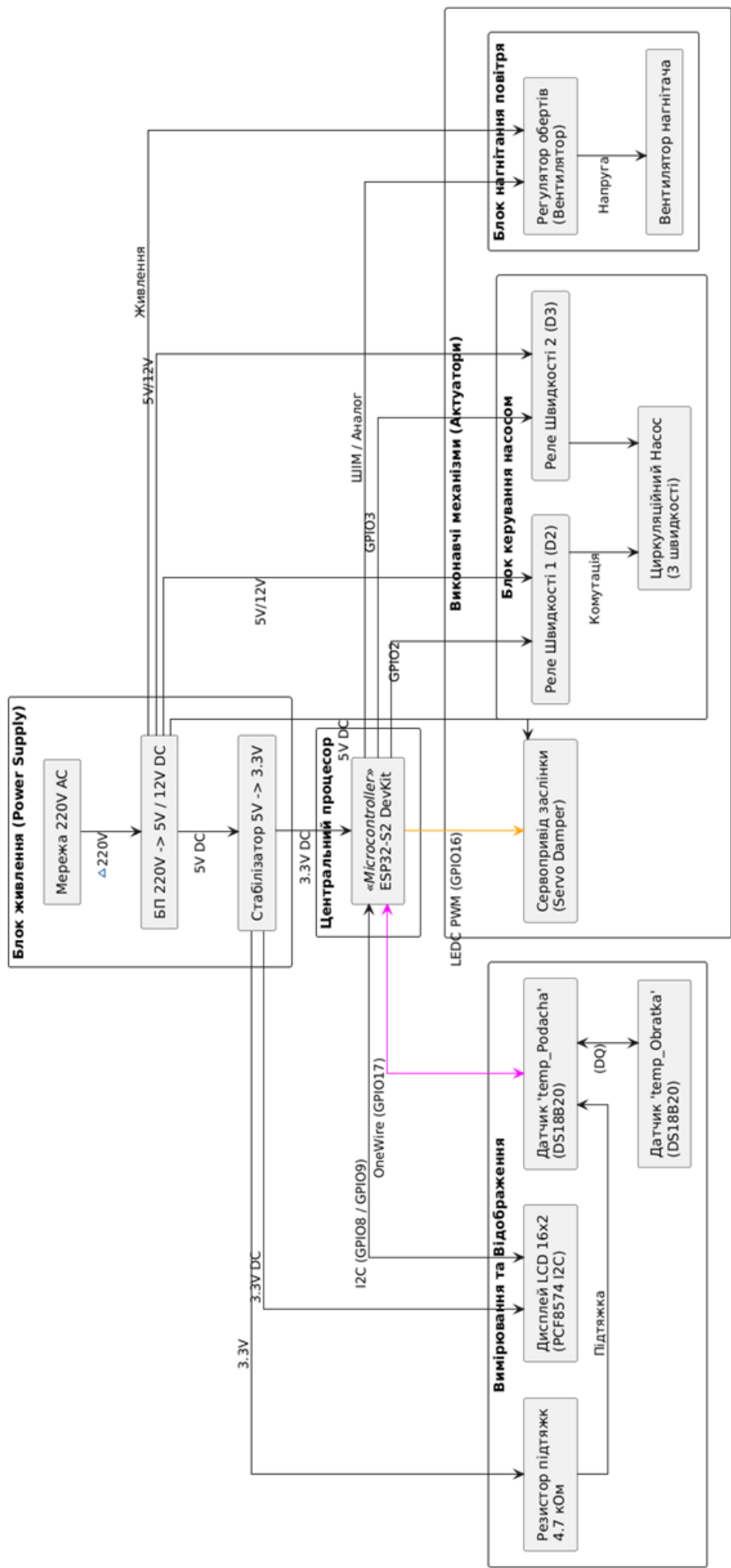


Рисунок 2.1 – Структурна схема

– Енергонезалежна пам'ять, що забезпечує збереження налаштувань PID-регулятора, заданої температури (Set Point) та режимів роботи навіть у разі повного знеструмлення об'єкта.

2.2.2. Підсистема вимірювання та відображення інформації

До складу підсистеми входять цифрові сенсори та символічний засіб відображення:

– Датчики температури 'temp_Podacha' та 'temp_Obratka' (DS18B20). Це Цифрові термометри, що використовують послідовний протокол OneWire та підключені паралельно до одного спільного виводу мікроконтролера GPIO17. Для забезпечення стабільної крутизни фронтів імпульсів на довгих лініях зв'язку шину DQ підтягнуто до лінії живлення 3.3V через резистор номіналом 4.7 кОм. Зчитування температури відбувається з дискретністю 15 секунд, що є оптимальним для теплової інерційності водяного контуру котла.

– Дисплей LCD 16x2. Служить для оперативного локального відображення поточного стану системи (значення температур на вході та виході). Для економії дефіцитних GPIO мікроконтролера дисплей підключено через I2C-розширювач портів на базі мікросхеми PCF8574. Передача даних здійснюється по двох лініях: SDA (GPIO8) та SCL (GPIO9).

2.2.3. Виконавчі механізми (Актuatorи).

На основі математичного обчислення розсогласування (помилки регулювання) мікроконтролер керує трьома типами виконавчих пристроїв:

1. Сервопривід повітряної заслінки (Servo Damper). Керується за допомогою апаратного ШІМ-сигналу з лінії GPIO16 (периферія ledc). Частота імпульсів становить 50 Гц, а тривалість заповнення варіюється від 3% до 12%, що відповідає куту повороту заслінки первинного повітря. Позиціювання заслінки визначається безпосередньо вихідним сигналом вбудованого PID-регулятора.

2. Блок керування циркуляційним насосом. Призначений для ступеневої зміни швидкості потоку теплоносія залежно від теплового

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Р2	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

навантаження. Керування реалізовано за допомогою дискретних виходів GPIO2 та GPIO3. Вони підключені до драйверів двох електромагнітних реле. Комутація контактів реле змінює конфігурацію підключення робочих обмоток асинхронного двигуна насоса, реалізуючи 3 фіксовані швидкості та виключаючи аварійне зустрічне увімкнення фаз.

Блок нагнітання повітря: Включає регулятор обертів (симісторний або DC-модуль), який отримує від мікроконтролера сигнал керування (аналоговий 0-10V або низьковольтний ШІМ) та пропорційно змінює напругу живлення вентилятора нагнітача. Це забезпечує динамічне форсування горіння при падінні температури нижче критичної межі.

Організація схеми електроживлення та завадостійкості.

Враховуючи роботу системи в умовах високого рівня індуктивних завад від двигунів насоса та вентилятора, схему живлення чітко розділено на три рівні:

- Силова мережа (~220V AC). Живить первинний імпульсний блок живлення (PSU) та комутується контактами реле на обмотки насоса і вентилятора.

- Шина низької напруги (5V DC). Використовується для живлення силових елементів периферії: котушок реле та сервоприводу заслінки. Це унеможливорює просідання напруги на процесорі під час різких стрибків струму споживання сервомотора.

- Цифрова шина живлення (3.3V DC). Формується локальним лінійним стабілізатором (LDO) з низьким рівнем пульсацій. Від неї живиться виключно мікроконтролер ESP32-S2, логічна частина дисплея та підтяжка датчиків температури, що гарантує високу стабільність роботи цифрових інтерфейсів I2C та OneWire.

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Р2	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

2.3. Обґрунтування та опис компонентної бази системи

Для забезпечення високої надійності, завадостійкості та точності регулювання в умовах експлуатації в приміщеннях котелень, вибір компонентів здійснювався на основі їхніх електричних характеристик, температурних діапазонів роботи та експлуатаційної стабільності.

2.3.1. Центральний обчислювальний модуль: ESP32-S2 (DevKitM-1).

Ядром системи автоматизації обрано 32-бітний однокристальний мікроконтролер архітектури RISC ESP32-S2 (модифікація процесора Xtensa® LX7).

ESP32-S2-DevKitM-1

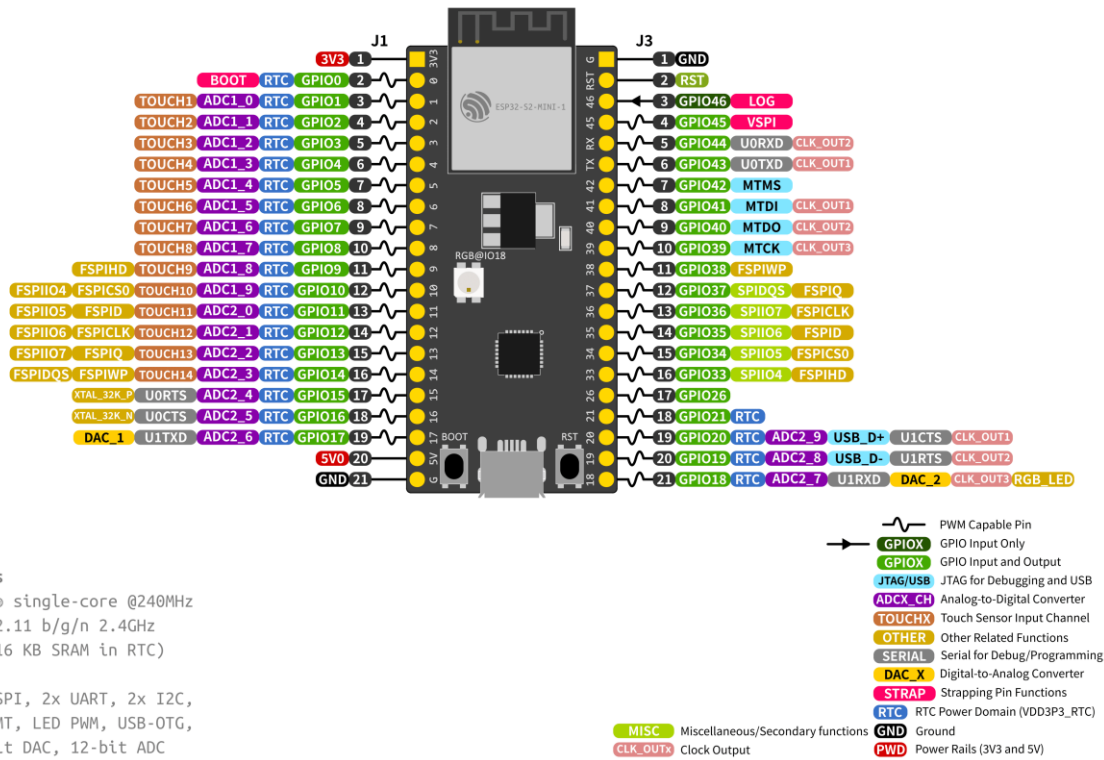


Рисунок 2.2 – ESP32-S2 (DevKitM-1)

Обґрунтування вибору та технічні характеристики:

- Тактова частота: До 240 МГц, що забезпечує миттєвий розрахунок диференціальних рівнянь контуру PID-регулювання.

- Комунікаційні можливості. Інтегрований Wi-Fi модуль (2.4 ГГц, 802.11 b/g/n) дозволяє реалізувати нативний обмін телеметрією з сервером домашньої автоматизації Home Assistant через зашифрований протокол Native API екосистеми ESPHome.

- Апаратна безпека: Модуль має вбудований криптографічний прискорювач (AES, SHA, RSA), що гарантує захист локальної мережі при підключенні автоматики.

2.3.2. Первинні вимірювальні перетворювачі: DS18B20 (Dallas Semiconductor)

Для зчитування температури теплоносія на лініях подачі та зворотного потоку («обратки») застосовано інтелектуальні цифрові термометри DS18B20 у герметичному виконанні (капсула з нержавіючої сталі, клас захисту IP67).



Рисунок 2.3 – DS18B20 (Dallas Semiconductor)

Технічні переваги:

- Інтерфейс OneWire. Датчики підключаються паралельно до однієї 3-провідної шини даних (GPIO17), мінімізуючи використання портів вводу-виводу мікроконтролера. Ідентифікація датчиків програмою відбувається за унікальними жорстко зашитими 64-бітними адресами (наприклад, 0xa101145ea161c428).

- Точність та роздільна здатність. Програмно налаштована точність становить від 10 до 12 біт (дискретність вимірювання від 0,25°C до

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Р2	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		23

0,0625°C. Діапазон вимірюваних температур від -55°C до $+125^{\circ}\text{C}$ повністю покриває робочі та аварійні режими водяного контуру ТТ-котла.

– Цифровий вихід: Відсутність потреби в калібруванні (на відміну від аналогових терморезисторів NTC/PT100) та стійкість цифрового сигналу до електромагнітних наведень від силових кабелів.

2.3.3. Засіб локального відображення LCD 16x2 з I2C-розширювачем PCF8574

Для забезпечення автономності системи та можливості контролю параметрів без доступу до мережі Інтернет використано символьний рідкокристалічний дисплей LCD 1602 (2 рядки по 16 символів).



Рисунок 2.4 – Символьний рідкокристалічний дисплей LCD 1602

Особливості реалізації:

– Модуль сполучення PCF8574. Паралельний 8-бітний інтерфейс дисплея конвертується в послідовну шину I2C. Це дозволяє підключити екран до ESP32-S2 за допомогою всього двох сигнальних ліній: SDA (GPIO8) та SCL (GPIO9).

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Р2	Арк.
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		24

– Ергономіка. Дисплей оснащений LED-підсвіткою з можливістю програмного керування яскравістю та потенціометром регулювання контрастності, що забезпечує чітке зчитування даних при будь-якому рівні освітлення в приміщенні котельні.

2.3.4. Виконавчі механізми та елементи комутації.

Сервопривід повітряної заслінки (Damper Actuator)

Для механічного регулювання подачі первинного повітря в зону горіння (через піддувало) застосовано сервопривід стандартного типу з металевим редуктором (наприклад, MG996R або аналогічний).



Рисунок 2.5 – Сервопривід повітряної заслінки MG996R

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Р2	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		25

- Керування: Позиціонування здійснюється стандартним імпульсно-шим сигналом частотою 50 Гц.
- Конструктивні вимоги: Високий крутний момент (до 10 кг/см) гарантує надійне утримання та подолання сили протидії зворотної пружини або ваги повітряної заслінки, унеможливаючи її заклинювання через нагар чи попіл.

2.3.5. Релейний блок керування насосом

Комутація швидкостей циркуляційного насоса здійснюється двоканалним модулем електромагнітних реле із сухими перекидними контактами.

– Електрична ізоляція: Котушки реле мають оптичну розв'язку (оптопари) від низьковольтної частини, що запобігає проникненню високовольтних комутаційних сплесків (~220V AC) на цифрові виходи мікроконтролера.

– Надійність: Контакти розраховані на струм до 10 А при напрузі ~250V AC, що забезпечує багаторазовий запас міцності при комутації індуктивного навантаження (обмоток статора асинхронного двигуна насоса).

2.3.6. Регулятор обертів вентилятора нагнітача

Для реалізації функції наддуву повітря застосовано модуль симісторного регулятора напруги (фазовий димер) з інтегрованою схемою детекції переходу мережевої напруги через нуль (Zero-Cross Detection).

Силова частина побудована на базі симістора (Triac) типу BT136/BT138, який керується через оптосимістор MOC3021. Це забезпечує плавне, безіскрове регулювання обертів вентилятора від 0 до 100% шляхом зрізання фази синусоїди, оптимізуючи надходження кисню в камеру згоряння на етапах розпалу та підтримання фази тління.

2.3.7. Пасивні та допоміжні компоненти

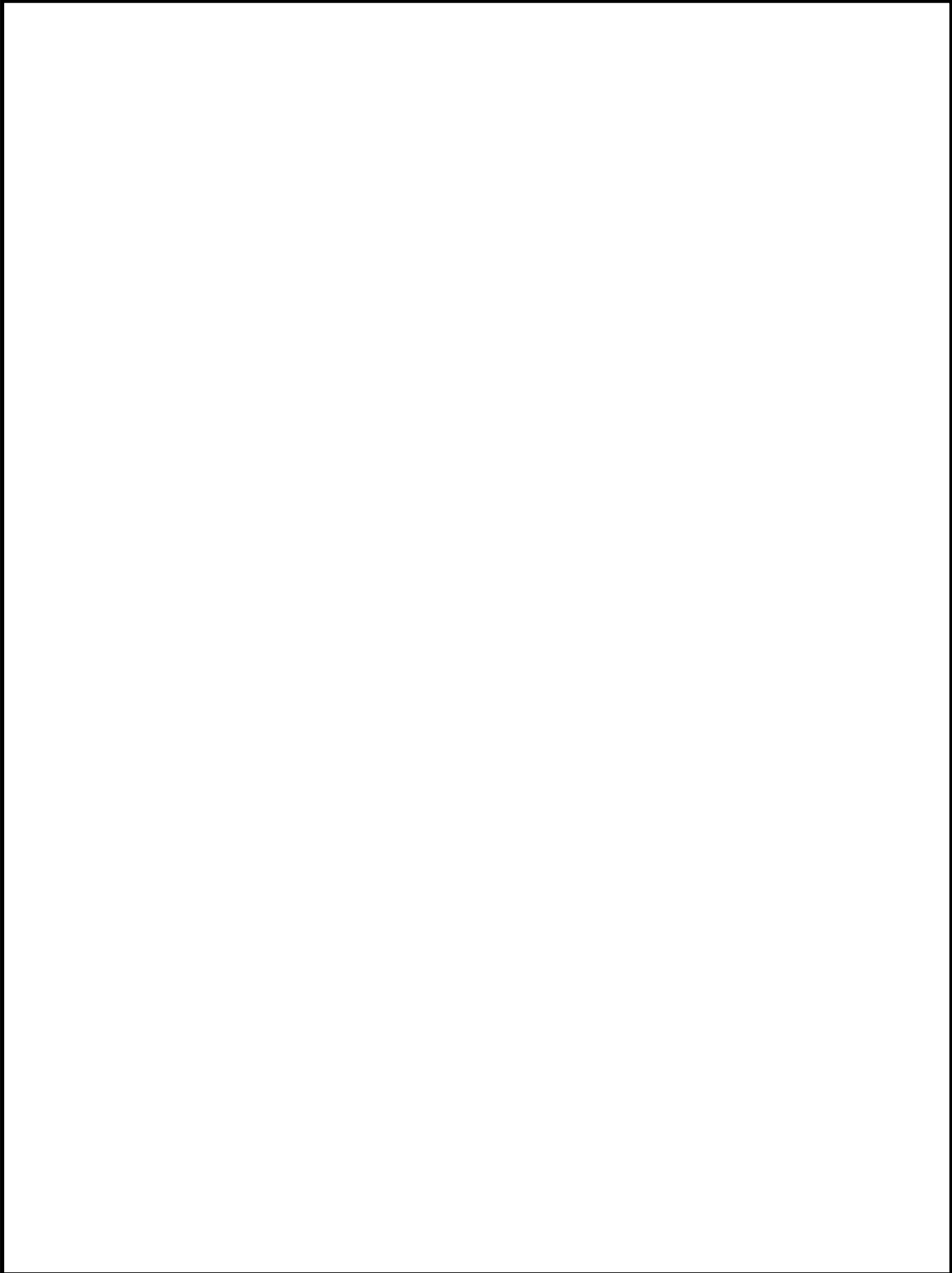
Резистор підтяжки шини OneWire. Металоплівковий резистор номіналом 4.7 кОм. Виконує роль pull-up резистора для формування крутих фронтів цифрових сигналів на лінії DQ.

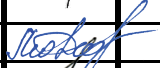
					171.4327ст3.КР.ПЗ.Р2	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Діоди типу 1N4007 підключені паралельно котушкам реле у зворотному напрямку для захисту керуючих транзисторів від струмів самоіндукції.

Драйвери керування котушками. Біполярні NPN-транзистори загального призначення BC547 (або аналогічні n-канальні MOSFET-ключі) з обмежувальними резисторами 1 кОм у колі бази.

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Р2	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		



					171.4327ст3.КР.ПЗ.РЗ			
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата				
Розробник		Бронченко Є. О.			Архітектура програмного забезпечення системи	Літ.	Арк.	Аркуші
Консультант							28	
Н. контр.		Добрінова Л. П.				НУК імені адмірала Макарова		
Керівник		Трибулькевич С.Л.						
Зав. каф.		Рябенський В. М.						

РОЗДІЛ 3. АРХІТЕКТУРА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ

3.1. Загальна концепція та операційне середовище

Програмне забезпечення (ПЗ) контролера твердопаливного котла розроблене на базі фреймворку ESPHome з використанням ядра Arduino Core для ESP32-S2. В основі архітектури лежить концепція подієво-орієнтованої кооперативної багатозадачності (cooperative multitasking).

На відміну від класичних систем з витісняючою ОСРЧ (пріоритетною багатопотоковістю), архітектура ПЗ побудована на базі єдиного неблокуючого асинхронного циклу обробки подій (Event Loop). Кожен програмний модуль (компонент) отримує квант процесорного часу, виконує свою дискретну задачу та миттєво повертає керування планувальнику ядра. Це гарантує:

- Високу швидкість реакції на критичні зміни параметрів об'єкта регулювання.
- Низькі накладні витрати обчислювальних ресурсів процесора.
- Апаратну стабільність внутрішніх мережових стеків (Wi-Fi, TCP/IP, Native API).

3.2. Опис архітектурних модулів ПЗ

Програмний комплекс декомпоновано на чотири функціонально незалежні шари (модулі), які взаємодіють між собою через внутрішню шину даних та глобальний реєстр ідентифікаторів об'єктів (id).

3.2.1. Шар драйверів апаратного забезпечення (Hardware Abstraction Layer - HAL)

Цей модуль виконує роль проміжного шару між фізичними регістрами процесора Xtensa® LX7 та бізнес-логікою програми. До його складу входять:

- Компонент i2c. Ініціалізує апаратний контролер шини на виводах GPIO8 (SDA) та GPIO9 (SCL) з робочою частотою 300 кГц. Забезпечує

					171.4327ст3.КР.ПЗ.РЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

низькорівневий обмін байтами з периферійним розширювачем портів дисплея.

- Компонент `one_wire`. Реалізує програмно-апаратний часовий таймінг протоколу Dallas OneWire на базі GPIO17. Відповідає за адресацію, надсилання команд ініціалізації вимірювання та зчитування вмісту пам'яті (Scratchpad) датчиків.

- Компонент `ledc` (Output). Конфігурує апаратний ШІМ-таймер мікроконтролера на GPIO16 з базовою частотою 50 Гц для формування імпульсів керування сервоприводом.

3.2.2. Модуль первинної обробки та фільтрації даних

Відповідає за збір метрик та розрахунок похідних фізичних величин:

- Сенсори `dallas_temp`. Створюють два програмні об'єкти `temp_Podacha` та `temp_Obratka`. Опитування датчиків відбувається з інтервалом квантування в 15 секунд (`update_interval: 15s`). Модуль містить вбудований алгоритм циклічної перевірки контрольної суми (CRC). У разі виявлення помилки контрольної суми (`Scratch pad checksum invalid!`), компонент відкидає сміттєві дані, активує прапор попередження (`Warning flag`) та зберігає останнє валідне значення для уникнення збоїв у контурі PID.

- Компонент `combination` (Linear). Математичний модуль, що в реальному часі вираховує температурний градієнт (дельти) за формулою:

$$\Delta T = T_{pod} - T_{zv}$$

3.2.3. Обчислювальний модуль кліматичного PID-регулятора

Центральний вузол автоматизації, реалізований через апаратний компонент `climate.pid`.

Вхідними даними є поточний стан об'єкта `temp_Podacha` та задана користувачем цільова температура (за замовчуванням 50°C).

На кожному такті обробки диференціальне рівняння PID розраховує пропорційну, інтегральну та диференціальну складові з жорстко заданими коефіцієнтами ($K_p = 0.07592$, $K_i = 0.00007$, $K_d = 20.23265$). Для

					171.4327ст3.КР.ПЗ.РЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

нівелювання високочастотних шумів вимірювання застосовано ковзне середнє значення з вікном фільтрації на 5 вибірок для вихідного сигналу та похідної (`output_averaging_samples`, `derivative_averaging_samples`).

Для запобігання надмірному зносу механічних частин сервоприводу при мінімальних коливаннях температури, впроваджено гістерезис в межах $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ (`threshold high / threshold low`).

Вихід контуру (`TP_damper_PID_float`): Нормалізований результат обчислення (0.0...1.0) транслюється через шаблонний вихід у віртуальний числовий повзунок `TP_damper`.

3.2.4. Модуль трансляції та виконання керуючого впливу

Цей модуль переводить абстрактні математичні відсотки PID у реальні фізичні дії актуаторів.

Лямбда-перетворення сервоприводу.

Всередині `set_action` числового компонента `TP_damper` виконується тригонометричний перерахунок лінійного значення $x\%$ ($x \cdot 100\%$) у нелінійний коефіцієнт тривалості імпульсу для сервоприводу за формулою:

$$\text{level} = 1.0 - 2 \cdot \left(\frac{110.0}{180.0} \right) \cdot \left(\frac{x}{100.0} \right) - 2 \cdot \left(\frac{10.0}{180.0} \right).$$

Дана формула враховує фізичні кути обмеження ходу конкретної механічної заслінки котла (робочий діапазон дугтя від 10° до 120°).

Автомат станів швидкості насоса.

Модуль `TP_pump_speed` працює за подієвою схемою `switch-case`. При зміні стану (Швидкість 1, 2 або 3) ПЗ напряму звертається до регістру конфігурації напрямку портів `pinMode()` та стану виходів `digitalWrite()`, миттєво змінюючи комбінацію високих (HIGH) та низьких (LOW) рівнів на релейних пінах GPIO2 та GPIO3.

3.3. Підсистема відказостійкості, індикації та зв'язку

Модуль індикації працює через інтерпретатор C++ лямбда-виразів. Кожні кілька секунд він виконує форматований вивід рядків на локальний

					171.4327ст3.КР.ПЗ.РЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

дисплей за допомогою функції `it.printf()`, виводячи стани об'єктів `id(temp_Obratka).state` та `id(temp_Podacha).state` з точністю до одного знака після коми (`%.1f`).

ПЗ містить механізм автоматичного перемикання режимів зв'язку. При старті контролер намагається підключитися до бездротової інфраструктури домашньої автоматизації (`ssid: "Wokwi-GUEST"`). Якщо зв'язок з роутером відсутній або втрачений, планувальник ядра через тайм-аут блокує спроби підключення та активує резервний модуль `captive_portal` і власну точку доступу "Tp-Kotel Fallback Hotspot" з шифруванням WPA2. Це дозволяє користувачеві підключитися до котла напряму зі смартфона через локальний веб-інтерфейс для аварійного ручного керування в умовах відсутності мережі.

Модуль відладки налаштований на рівень `DEBUG` з перенаправленням апаратного потоку даних на `UART0 (hardware_uart)` зі швидкістю 115200 бод, що дозволяє проводити повний моніторинг внутрішнього стану PID-елементів та Wi-Fi стеку в реальному часі.

3.4. Алгоритми функціонування програмних модулів

Організація обчислювальних процесів у ПЗ контролера реалізована за допомогою чітко розмежованих алгоритмічних модулів, кожен з яких відповідає за окрему функціональну задачу та виконується у власному часовому або подієвому контексті.

3.4.1. Алгоритм збору та первинної обробки телеметрії

Основне завдання модуля — циклічний моніторинг температурних показників водяного контуру котла. Функціонування цього вузла детально відображено на блок-схемі модуля вимірювання температури (рис. 3.1).

					171.4327ст3.КР.ПЗ.РЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Модуль вимірювання температури (Цикл 15 секунд)

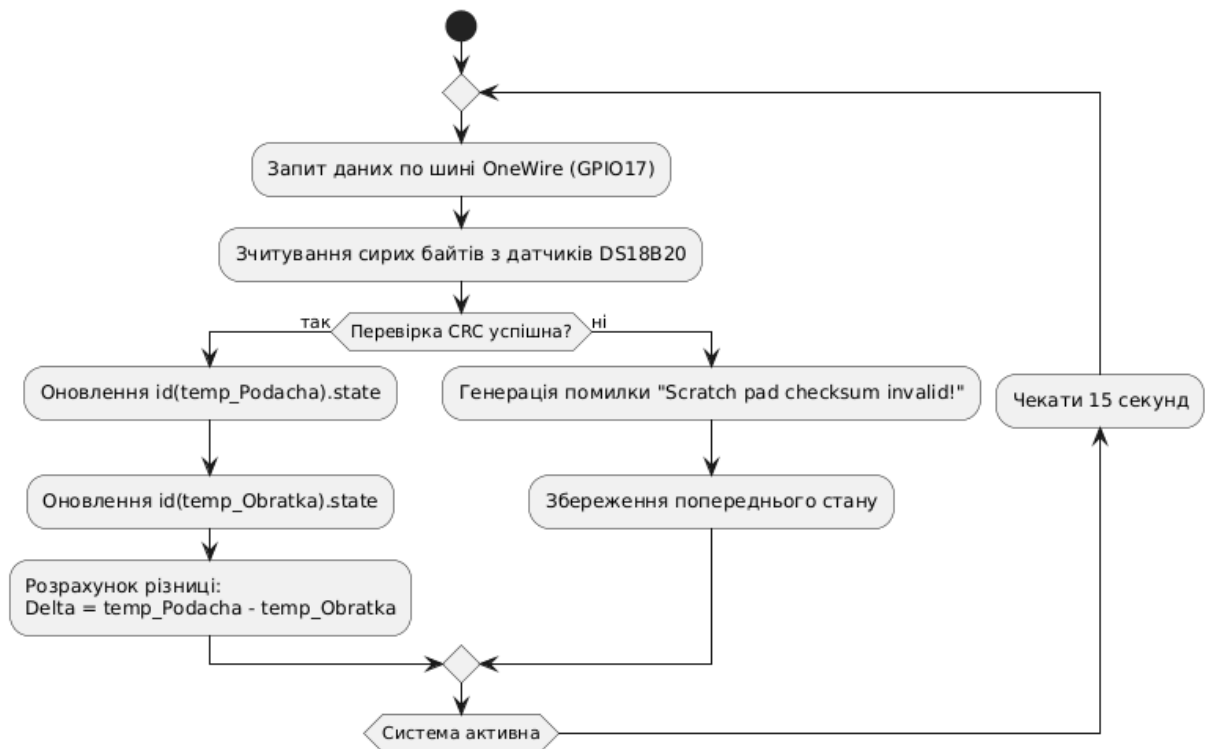


Рисунок 3.1 – Блок-схема модуля вимірювання температури

Алгоритм працює з фіксованим кроком квантування у 15 секунд. Особливістю алгоритму є обов'язкова верифікація даних: якщо зчитані з шини OneWire байти не проходять апаратну перевірку контрольної суми CRC, система відсікає потенційне сміття, не руйнуючи при цьому поточний стан регулятора. При успішному зчитуванні алгоритм не лише оновлює базові змінні, а й одразу вираховує температурний градієнт (Delta) за лінійною функцією, що зменшує кількість звернень до пам'яті в інших потоках.

3.4.2. Алгоритм автоматичного PID-регулювання заслінки первинного повітря

Керування інтенсивністю горіння палива покладено на замкнутий контур зворотного зв'язку, логіку якого описує блок-схема модуля PID-контролера повітряної заслінки (рис. 3.2).

Модуль PID-контролера повітряної заслінки

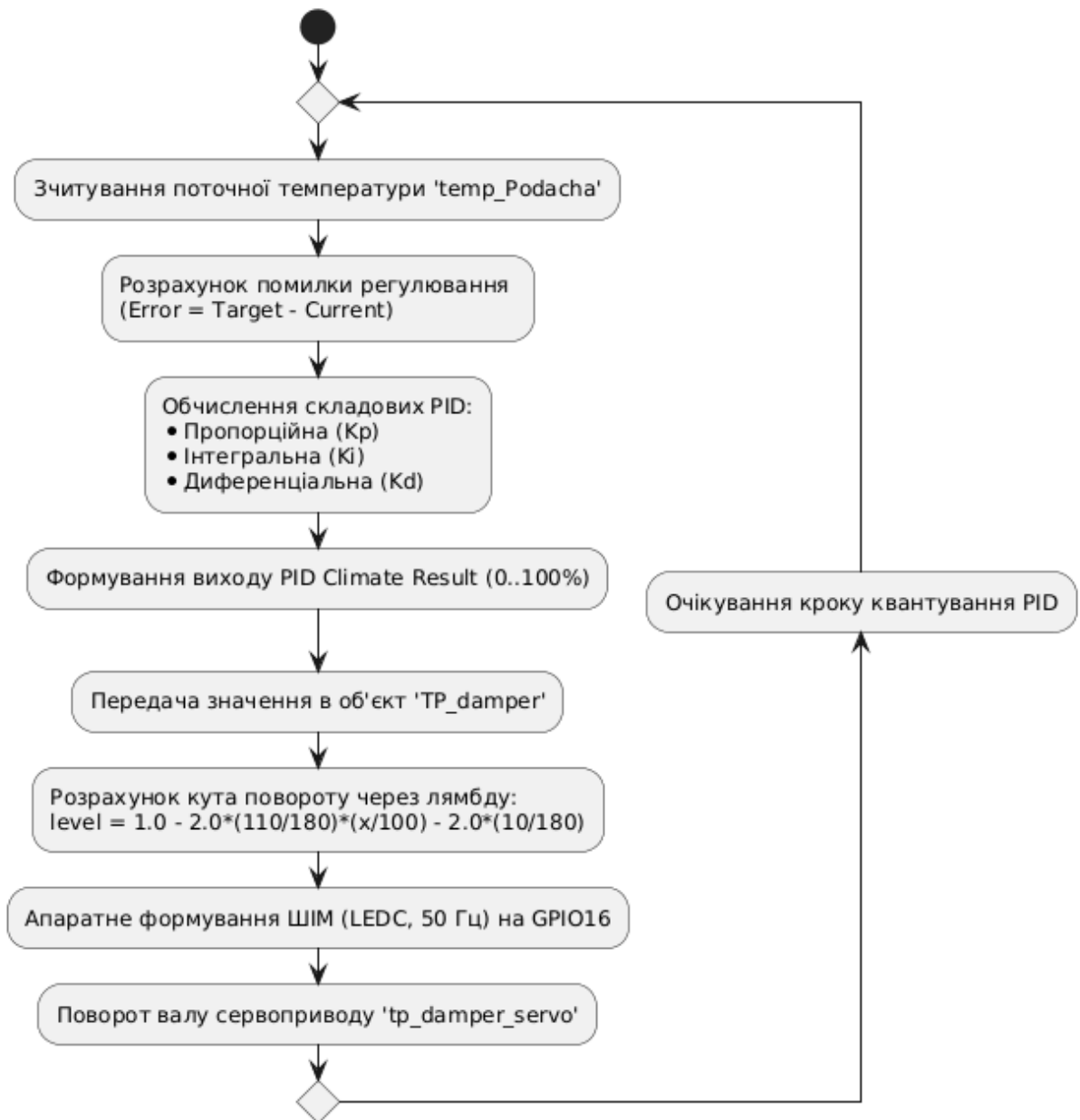


Рисунок 3.2 – Блок-схема модуля PID-контролера повітряної заслінки

Алгоритм безперервно аналізує динаміку зміни температури на виході котла (temp_Podacha). На основі пропорційної, інтегральної та диференціальної складових формується узагальнений керуючий вплив. Ключове місце в алгоритмі займає математична трансляція абстрактного виходу PID (0 – 100%) у реальну тривалість імпульсу ШІМ для сервоприводу. Обчислення за нелінійною тригонометричною формулою

дозволяє точно адаптувати кут повороту сервомотора під фізичні обмеження ходу повітряної заслінки, запобігаючи її заклинюванню та забезпечуючи плавність подачі кисню.

3.4.3. Подієвий алгоритм керування циркуляційним насосом

На відміну від попередніх циклічних процесів, робота з силовим гідравлічним контуром побудована за подієвим принципом. Алгоритм активації реле представлено на блок-схемі модуля керування швидкістю насоса (рис. 3.3).

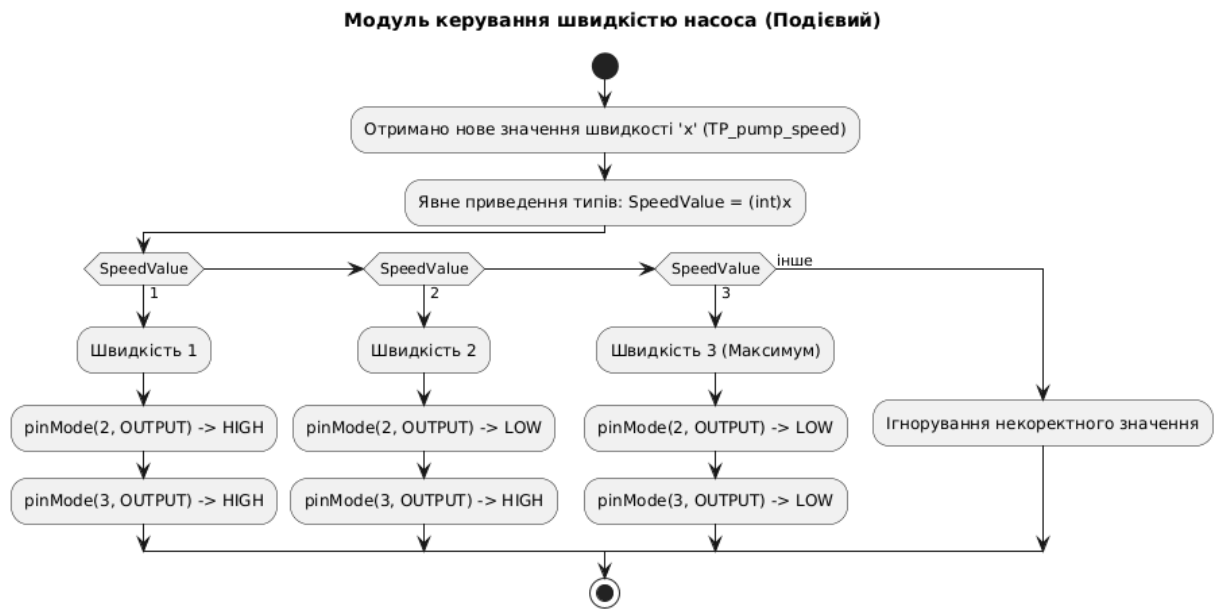


Рисунок 3.2 – Блок-схема модуля керування швидкістю насоса

Контролер перебуває в стані очікування команди від сервера автоматизації або внутрішніх тригерів безпеки. При зміні параметра TP_pump_speed алгоритм миттєво переходить до селектора станів (switch-case). Залежно від обраної швидкості (1, 2 або 3) відбувається пряме побітове керування регістрами GPIO мікроконтролера. Алгоритм апаратно та програмно виключає можливість проміжних або невизначених станів, що гарантує захист від одночасного увімкнення кількох обмоток статора асинхронного двигуна насоса.

3.4.4. Алгоритм забезпечення відказостійкості та локального моніторингу

Для забезпечення автономності системи в умовах можливих збоїв домашньої інфраструктури розроблено алгоритм, наведений на блок-схемі модуля індикації та зв'язку.

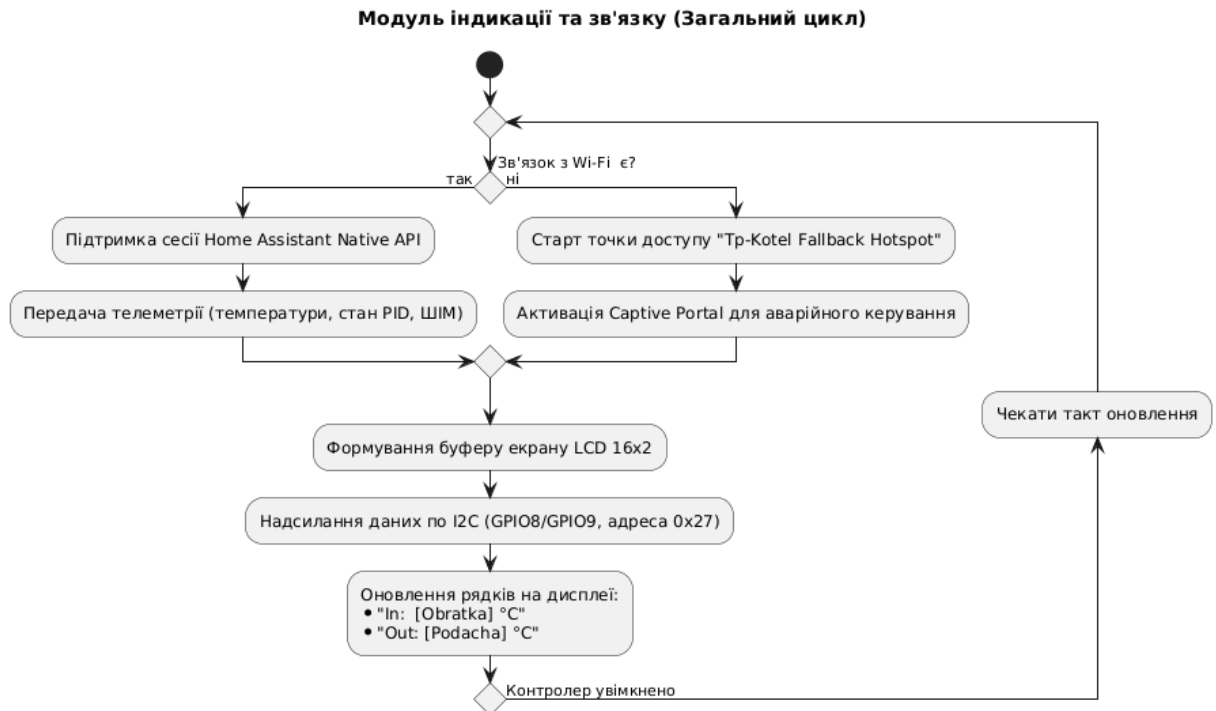


Рисунок 3.4 – Блок-схема модуля індикації та зв'язку

У загальному циклі програми алгоритм виконує постійну діагностику Wi-Fi сесії та зв'язку з сервером через Native API. У разі деградації або повної втрати зв'язку, алгоритм автоматично переводить бездротовий модуль ESP32-S2 в режим аварійної точки доступу (Fallback Hotspot) та розгортає Captive Portal. Паралельно з цим, незалежно від наявності мережі, алгоритм з високим пріоритетом виконує циклічне форматування та виведення поточних температур In та Out на локальний LCD-дисплей по шині I2C, що дозволяє користувачеві візуально контролювати котел навіть за умов повної відсутності зовнішнього зв'язку.

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Р4			
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата				
Розробник		Бронченко Є. О.			Тестування роботоспроможності	Літ.	Арк.	Аркушіїв
Консультант							37	
Н. контр.		Добрінова Л. П.				НУК імені адмірала Макарова		
Керівник		Трибулькевич С.Л.						
Зав. каф.		Рябенський В. М.						

РОЗДІЛ 4. ТЕСТУВАННЯ РОБОТОСПРОМОЖНОСТІ

Тестування розробленого програмно-апаратного комплексу автоматизації ТТ-котла проводилося у два етапи:

- Верифікація та стрес-тестування алгоритмів у середовищі симуляції цифрових двійників (Wokwi).
- Натурні випробування безпосередньо на об'єкті регулювання протягом опалювального сезону.

4.1. Верифікація в середовищі симуляції Wokwi

Для попередньої перевірки логіки C++ лямбда-виразів, коректності адресації шини OneWire та реакції PID-контурів було розроблено повну схему цифрового двійника контролера.

4.1.1. Перевірка ініціалізації датчиків та шини даних

На початкових етапах тестування було виявлено та усунено проблеми сполучення віртуальних моделей датчиків DS18B20 з ядром ESPHome. При використанні довільних ідентифікаторів у полі deviceId планувальник логування фіксував збої контрольної суми.

Plaintext

[00:12:04][W][dallas.temp.sensor:139]: 'temp_Obratka' - Scratch pad checksum invalid!

[00:12:04][W][component:157]: Component dallas_temp.sensor set Warning flag: scratch pad checksum invalid

Проблема була вирішена шляхом сканування шини в дефолтному режимі, зчитування системних адрес, що згенерував симулятор (0x1061a15e1401a128 та 0x9c59945e14019b28), та їх жорсткого закріплення у конфігураційному YAML-файлі ПЗ.

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Р4	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

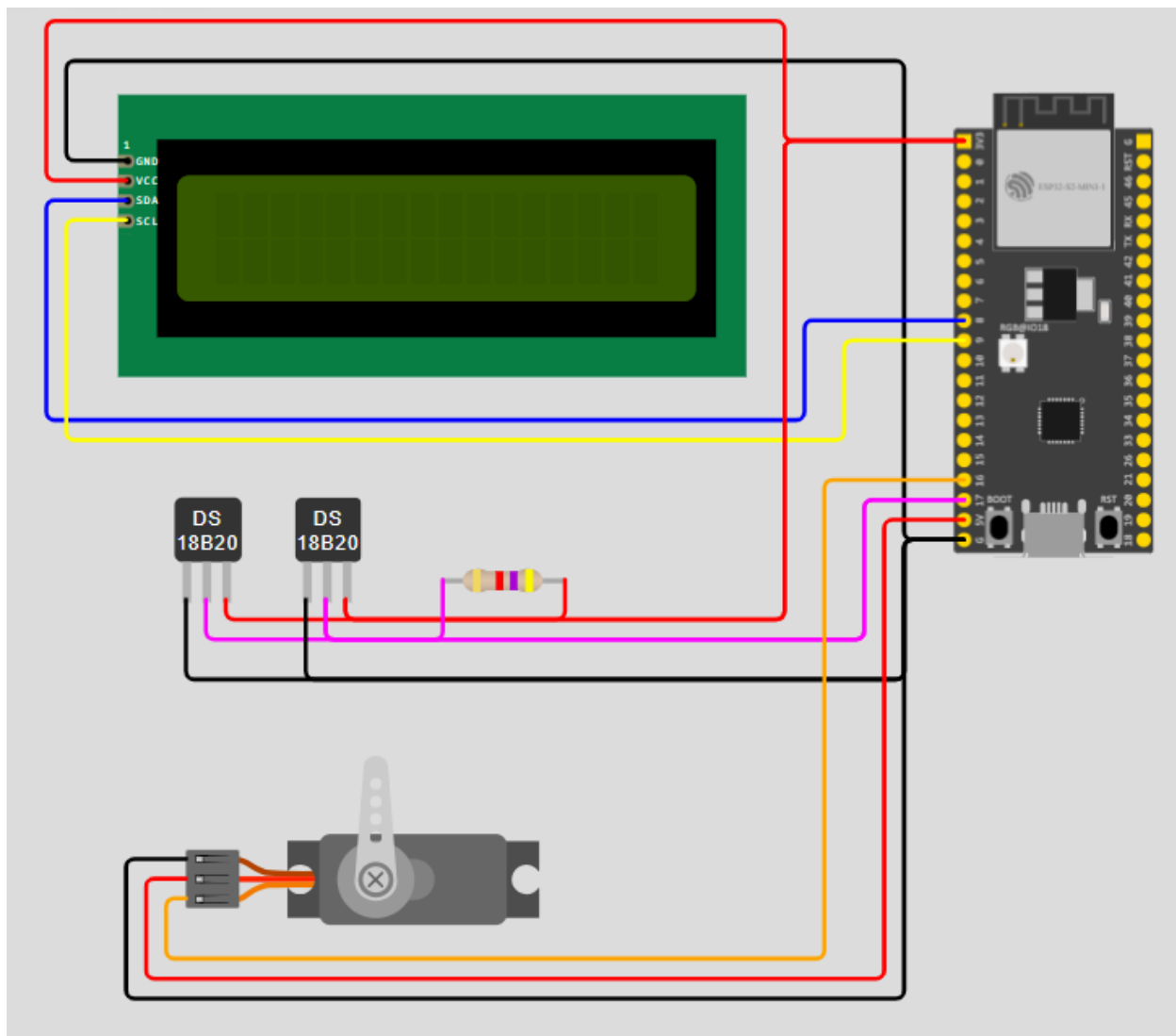


Рисунок 4.1 – Схема пристрою у середовищі моделювання Wokwi

4.1.2. Тестування інтегрального контуру та інтерфейсу користувача

Після фіксації адрес та додавання апаратного резистора підтяжки ліній даних номіналом 4.7 кОм віртуальна схема перейшла в стабільний режим роботи. Результати успішного комплексного тестування ПЗ наведено на скріншоті.

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Р4	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		39

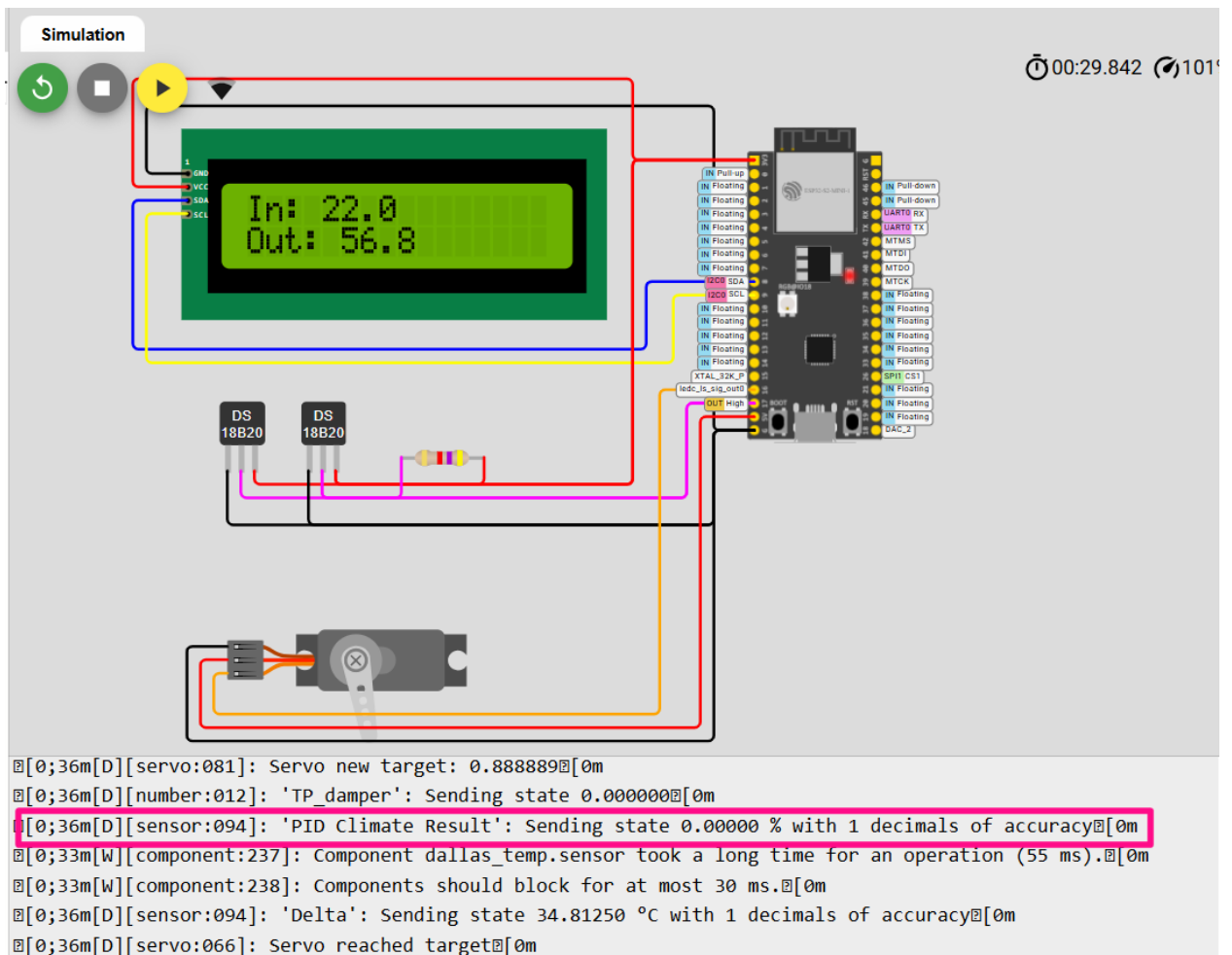


Рисунок 4.2 – Скріншот робочого вікна симулятора Wokwi

Аналіз результатів симуляції (рис. 4.2) підтверджує:

- Коректність HAL-шару. Символьний дисплей успішно вивів поточні температурні показники.
- Робота PID-алгоритму: При цільовій температурі (Set Point) 50.0 та поточному значенні 56.8 контур PID розрахував необхідну потужність нагріву у 0%. Лямбда-функція перевела цей відсоток у тривалість імпульсу і видала команду на апаратний таймер ШІМ, що змусило вал сервоприводу заслінки (servo1) повернутися на відповідний кут позиціонування (target: 0).

При зниженні температури на виході PID регулятор обчислює нове цільове значення положення заслінки (рис. 4.3).



Рисунок 4.3 – Скріншот робочого вікна симулятора Wokwi

4.2. Натурні випробування та експлуатаційні показники

Другий етап тестування проходив в умовах реальної експлуатації в приміщенні котельні. Контролер успішно відпрацював половину опалювального сезону, продемонструвавши високі показники надійності та завадостійкості.

Для забезпечення централізованого контролю, збору історичних даних та оперативного диспетчерського керування розроблений мікропроцесорний контролер було інтегровано до загальнобудинкової системи автоматизації на базі платформи Home Assistant. Обмін даними здійснюється за допомогою

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Р4	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		41

шифрованого протоколу ESPHome Native API, що мінімізує затримки передачі телеметрії порівняно зі стандартним протоколом MQTT.

Результати успішної інтеграції, а також поточний стан теплотехнічного об'єкта під час активної фази роботи, зафіксовано на розробленій графічній панелі моніторингу (Dashboard) «Котельня» (Рис. 7.3).

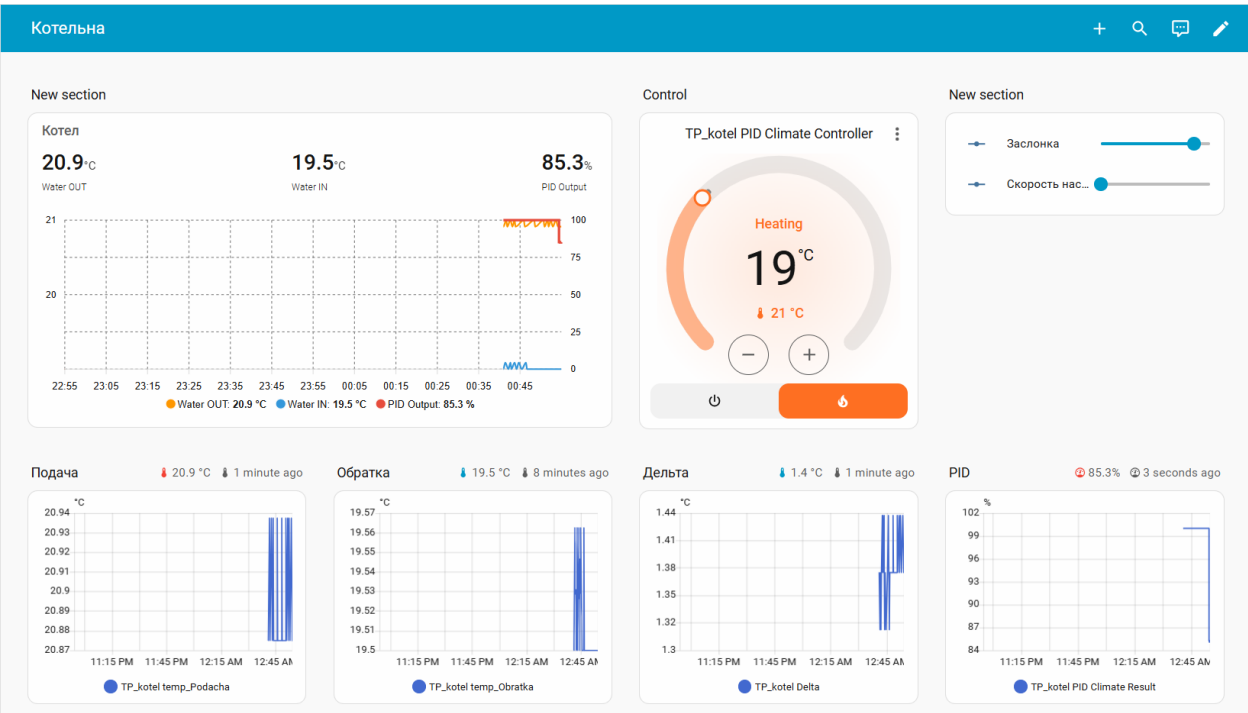


Рисунок 4.4 – Інтерфейс користувача в HomeAssistant

Графічний інтерфейс користувача функціонально розділено на дві робочі зони:

Верхній блок експлуатаційного контролю:

- Картка стану «Котел» реалізує миттєве відображення поточних значень основних фізичних величин: температури теплоносія на виході з водяної сорочки котла (Water OUT = 20.9 °C), температури зворотного потоку з системи опалення (Water IN = 19.5 °C) та розрахованого значення поточної потужності регулятора (PID Output = 85.3%).
- Історичний графік суміщених метрик відображає часовий тренд поведінки системи за останні дві години. Тривала фіксація червоної лінії

(PID Output) у верхньому діапазоні (85–100%) свідчить про коректне відпрацювання алгоритму в режимі інтенсивного нагріву (розгону) котла для швидкого досягнення заданих теплових режимів.

– Центральний інтерактивний віджет термостата візуалізує роботу компонента climate.pid. Поточна температура в зоні контролю становить 19 °С, а цільове значення (Set Point) зафіксовано на позначці 21 °С, що автоматично утримує систему в активному стані нагріву («Heating»).

– Панель повзунків (Sliders) надає оператору можливість візуального контролю положення заслінки піддувала («Заслонка») та поточного ступеня швидкості циркуляційного насоса («Скорость насоса»), а також дозволяє за потреби миттєво перейти в режим ручного пріоритетного керування актуаторами.

Нижній блок глибокої аналітики (Метрики реального часу).

Шар аналітики представлений чотирма незалежними графіками з високою дискретністю запису, що дозволяє оцінювати стабільність перехідних процесів:

Графіки «Подача» (temp_Podacha) та «Обратка» (temp_Obratka) демонструють високоточні коливання температур у межах сотих долей градуса, що підтверджує відсутність «шумів» та наведень на цифровій шині OneWire.

Графік «Дельта» (TP_kotel Delta) візуалізує динаміку різниці температур. Моніторинг цієї величини є критично важливим для оцінки ефективності теплообміну та запобігання надмірному охолодженню нижньої частини котла.

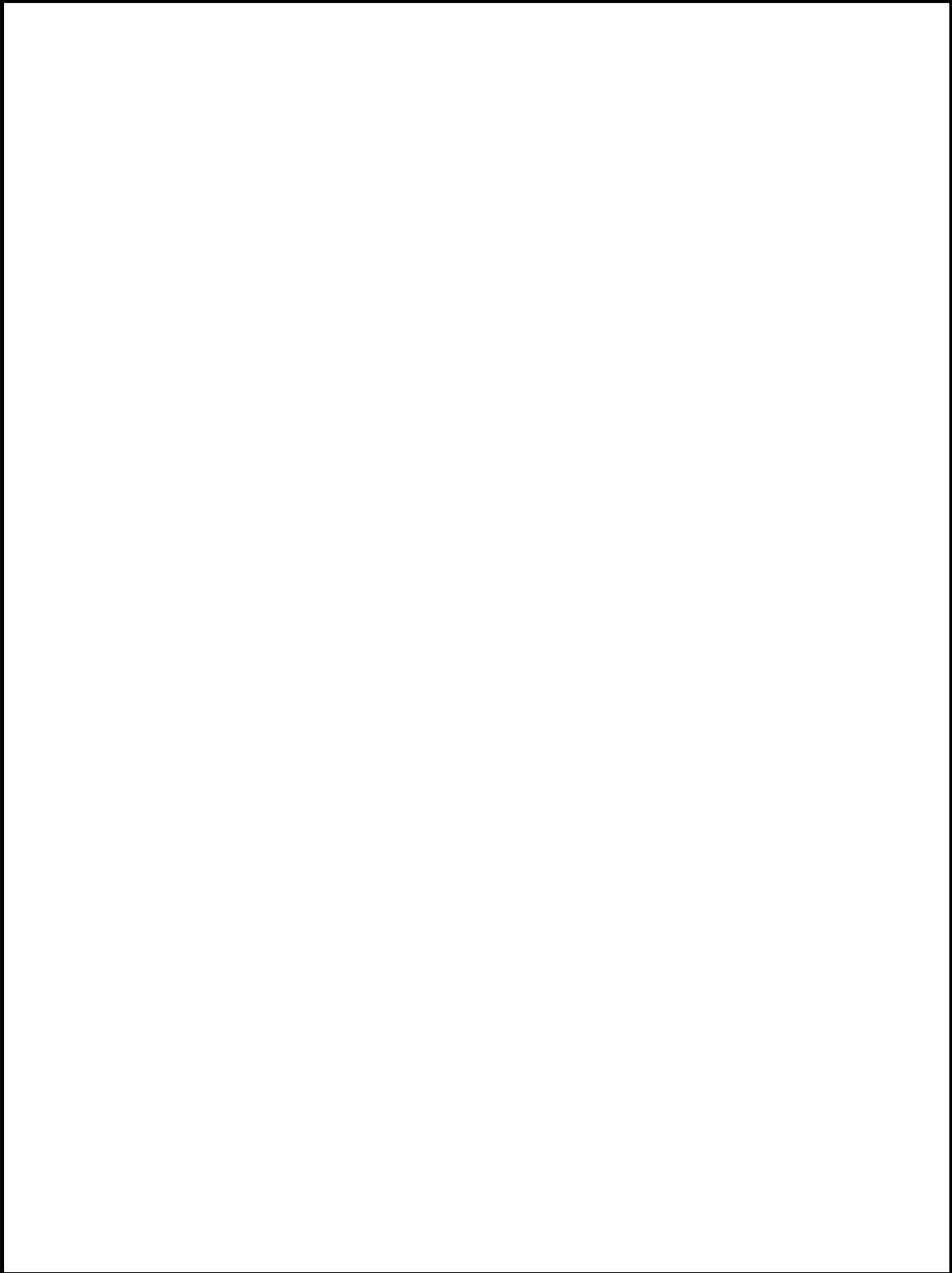
Графік «PID» фіксує точне поточне значення виходу математичного контуру на рівні 85.3% з мінімальним часом оновлення метрики (3 секунди), що вказує на високу чутливість системи.

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Р4	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

Висновки:

Результати камерального моделювання у Wokwi та тривалий досвід експлуатації «вживу» довели, що розроблена система автоматики повністю відповідає вимогам технічного завдання. Кліматичний PID-регулятор забезпечує утримання температури подачі в межах заданого гістерезису, плавно керує заслінкою, а релейна схема надійно керує гідравлічними режимами системи опалення. Комплекс готовий до подальшого масштабування та впровадження контуру плавного керування нагнітальною турбіною.

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Р4	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		



					171.4327ст3.КР.ПЗ.Р5			
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата				
Розробник		Бронченко Є. О.			Охорона праці	Літ.	Арк.	Аркуші
Консультант		Губальцев А. М.					45	
Н. контр.		Добрінова Л. П.				НУК імені адмірала Макарова		
Керівник		Трибулькевич С.Л.						
Зав. каф.		Рябенський В. М.						

РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ

Вступ

Метою управління охороною праці є забезпечення безпеки, збереження здоров'я та працездатності людини в процесі праці. Ця мета досягається виконанням відповідних функцій управління, тобто комплексом взаємопов'язаних видів, що здійснюються суб'єктом управління цілеспрямовано на об'єкт управління.

Об'єктом управління в системі управління охороною праці є діяльність функціональних служб і структурних підрозділів конкретних керівників та інженерно-технічних робітників підприємств із метою забезпечення безпечних, нешкідливих та сприятливих умов праці на робочих місцях, виробничих ланках, У цехах і на підприємстві в цілому.

Мета впровадження системи управління охороною праці (УОП) — це всебічне сприяння виконанню вимог, які повністю ліквідують, нейтралізують або знижують до допустимих норм вплив на працюючих небезпечних та шкідливих факторів виробничого середовища, забезпечують усунення джерел небезпеки, ізолювання від них персоналу, використання засобів, що усувають небезпечні ситуації та підвищують технічну безпеку, створюють надійні санітарно-гігієнічні та ергономічні умови. УОП передбачає встановлення конкретних кількісних показників діяльності виробничих підрозділів, підтримування котрих в заданих межах забезпечує досягнення основної мети щодо організації безпечних та нешкідливих умов праці.

5.1. Аналіз небезпечних і шкідливих факторів, що впливають на людину

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Р5	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

В проектуваному приміщенні, в якому передбачається робота персоналу за ЕОМ, можливе виникнення наступних небезпечних і шкідливих факторів:

- підвищена небезпека поразки електричним струмом;
- підвищена пожежна небезпека;
- шкідливе електромагнітне випромінювання;
- недостатнє освітлення.

Одним з найбільш розповсюджених небезпечних виробничих факторів є електричний струм. Дія електричного струму на живу тканину має різнобічний і своєрідний характер. Проходячи через організм людини, електрострум здійснює термічний, електролітичний, механічний і біологічний вплив.

Термічна дія струму проявляється опіками окремих ділянок тіла, нагріванням до високої температури органів, розташованих на шляху струму, викликаючи в них значні функціональні розлади. Електролітична дія виражається в розкладанні органічної рідини, у тому числі крові, у порушенні її фізико-хімічного складу. Механічна дія струму приводить до розшарування, розриву тканин організму в результаті електродинамічного ефекту, а також миттєвого вибухоподібного утворення пари з рідини. Біологічна дія струму виявляється подразненням і порушенням живих тканин організму, а також порушенням внутрішніх біологічних процесів.

Припустимим вважається струм, при якому людина може самостійно звільнитися від електричного ланцюга. Його величина залежить від швидкості проходження струму через тіло людини: при тривалості дії більш 10 с - 2 мА, при 1 с менш - 6 мА. Струм, при якому потерпілий не може самостійно відірватися від струмоведучих частин називається струмом, що не відпускає, і складає 10...20 мА. Змінний струм небезпечніше постійного, при високій напрузі не безпечнішим є постійний струм.

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Р5	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Пожежі на обжитих людиною територіях, на підприємствах виникають у більшості випадків у зв'язку з порушенням технологічного режиму. Це, на жаль, часте явище і державою передбачені спеціальні документи, що описують основи протипожежного захисту. Це стандарти: ДСТ 12.1.004-76 "Пожежна безпека" і ДСТ 12.1.010-76 "Вибухобезпека".

Заходи щодо пожежної профілактики розділяються на організаційні, технічні, режимні й експлуатаційні.

Організаційні заходи передбачають правильну експлуатацію машин і внутрішньозаводського транспорту, правильний зміст будинків, території, протипожежний інструктаж робітників та службовців, організацію добровільних пожежних дружин, пожежно-технічних комісій, видання наказів по питаннях посилення пожежної безпеки та ін.

До технічних заходів відносяться дотримання протипожежних правил, норм при проектуванні будинків, встановленні електропроводів і устаткування, опалення, вентиляції, освітлення, правил розміщення устаткування.

Заходи режимного характеру – це заборона паління в невстановлених місцях, проведення зварювальних і інших вогневих робіт у пожежно небезпечних приміщеннях та ін.

Експлуатаційними заходами є своєчасні профілактичні огляди, ремонти й випробування технологічного устаткування.

Шкідливий вплив електромагнітного випромінювання, здійснюваного обладнанням комп'ютерних мереж і систем, обумовлений взаємодією людини як біологічного об'єкта з оточуючим середовищем. Для нейтралізації цього впливу застосовують спеціальні екрани чи покриття моніторів, розташовують робочі місця таким чином, щоб працівник не знаходився ззаду дисплея тощо. Крім того, при розробці інтер'єру приміщення повинні враховуватися ергономічні вимоги, зокрема, забезпечуватись правильне

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Р5	Арк.
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		48

розташування клавіатури відносно рук оператора і монітора відносно очей людини (не менше 80 см).

Важливим фактором, що впливає на продуктивність праці, є освітленість робочого місця. Організація раціонального освітлення робочого місця - одне з основних питань охорони праці. При незадовільному освітленні різко знижується продуктивність праці, можливі нещасні випадки, поява короткозорості, швидка стомленість.

Основною задачею виробничого освітлення є підтримка на робочому місці освітленості, що відповідає характеру зорової роботи. Збільшення освітленості робочої поверхні поліпшує видимість об'єктів за рахунок підвищення їхньої яскравості, збільшує швидкість розрізнення деталей, що позначається на зростанні продуктивності праці.

При організації виробничого освітлення необхідно забезпечити рівномірний розподіл яскравості на робочій поверхні і навколишніх предметах. Переведення погляду з яскраво освітленої на слабо освітлену поверхню змушує око переадаптуватися, що веде до стомлення зору і, відповідно, до зниження продуктивності праці. Для підвищення рівномірності природного освітлення великих приміщень здійснюється комбіноване освітлення.

Виробниче освітлення повинне забезпечувати відсутність у полі зору працюючого різких тіней. Наявність різких тіней спотворює розміри і форми об'єктів розрізнення і тим самим підвищує стомлюваність, знижує продуктивність праці.

Для поліпшення умов видимості об'єктів у полі зору працюючого повинна бути відсутня пряма і відбита близькість. Близькість - це підвищена яскравість світлих поверхонь, що викликає порушення зорових функцій (засліпленість), тобто погіршення видимості об'єктів. Близькість обмежують зменшенням яскравості джерела світла, правильним вибором типу світильника.

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Р5	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

Коливання освітленості на робочому місці, викликані, наприклад, різкою зміною напруги в мережі, обумовлюють переадаптацію ока, приводячи до значного стомлення. Освітлювальні установки повинні бути зручні і прості в експлуатації, довговічні, відповідати вимогам естетики, електробезпеки, а також не повинні бути причиною вибуху чи пожежі. Штучне освітлення застосовується як у темний час доби, так і у світлий час, коли для нормальних умов по освітленості природне освітлення неприпустиме чи недостатньо можливе.

Освітлення виробничих приміщень – один з основних факторів зовнішнього виробничого середовища, що впливають на людину в її процесі праці. Безпечною і високопродуктивною праця може бути лише за умови гарного освітлення робочих місць.

Недостатнє і нерівномірне освітлення робочих місць призводить до перенапруги зору, перевтоми організму, до виникнення надмірної нервової дратівливості, ослаблення уваги. Доведено, що в половини працюючих у таких умовах спостерігаються дефекти зору – короткозорість, зниження гостроти зору й інше, а в 3,8% чоловіків виникає частковий дальтонізм.

Негативно впливає на зір не тільки недостатня освітленість, а й занадто яскраве освітлення. Перевищення норм яскравості веде до зниження функцій зору, викликає роздратування і різь в очах, головні болі.

Низькі рівні освітленості, нерівномірність освітлення, світлові промені, що б'ють в очі, відблиски від блискучих поверхонь можуть бути причиною нещасних випадків, браку продукції і низької продуктивності праці.

Використовується як природне, так і штучне освітлення виробничих приміщень. Природне освітлення характерне для світлого часу доби і при роботі в приміщеннях, де є прорізи в стінах і даху будинку. При штучному освітленні застосовуються відповідні освітлювальні установки штучного світла.

Система освітлення повинна забезпечити:

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Р5	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

- достатню освітленість і рівномірний розподіл світлового потоку на робочій поверхні;
- сталість величини освітлення;
- виключення глибоких тіней;
- відсутність різкої різниці в яскравості робочих поверхонь і навколишнього фону (стін, стелі);
- відсутність сліпучої дії джерела світла великої яскравості.

Основним документом, який визначає необхідні норми освітленості робочих поверхонь, є діючі будівельні норми і правила ДБН В 2.5-28-2006.

5.2. Природне освітлення

Природне освітлення - це освітлення приміщень світлом неба (прямим чи відбитим), що проникає крізь світлові прорізи в зовнішніх огорожувальних конструкціях.

Усі виробничі приміщення повинні мати світлові прорізи, що дають достатнє природне освітлення. Без природного освітлення допускається проектувати конференц-зали, виставочні зали, кіно сховища й архіви, підприємства побутового обслуговування населення, комори, коридори тощо.

Залежно від напрямку проникання світла в приміщення природне освітлення буває бокове – крізь світлові прорізи, верхнє — крізь спеціальні ліхтарі і світлові прорізи в стелі і комбіноване — крізь світлові прорізи і ліхтарі на стелі.

Бокове освітлення буває одностороннім (світлові прорізи в одній із зовнішніх стін приміщень) і двостороннім (світлові прорізи в двох протилежних зовнішніх стінах приміщення).

Природне освітлення характеризується тим, що утворювальна освітленість постійно змінюється і залежить від часу дня, року. Як нормовану

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Р5	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

величину для природного освітлення прийнято відносну величину – коефіцієнт природної освітленості (КПО).

5.3. Штучне освітлення

Штучне освітлення – освітлення приміщень штучним світлом за допомогою електричних ламп - газорозрядних чи розжарювання.

За конструктивним виконанням штучне освітлення може бути трьох систем - загальне, місцеве і комбіноване.

Загальне – освітлення, при якому світильники розміщуються у передній зоні приміщення рівномірно (загальне рівномірне освітлення), або стосовно до розташування устаткування (загальне локалізоване освітлення).

Місьцеве – освітлення, додаткове до загального, створюване світильниками, що концентрують світловий потік безпосередньо на робочих місцях. Місьцеве освітлення приймається лише разом із загальним освітленням.

Комбіноване – освітлення, при якому до загального освітлення додається місцеве.

За функціональним призначенням штучне освітлення ділиться на робоче, аварійне, охоронне і чергове.

Робоче освітлення призначене для забезпечення нормальних зорових умов при виконанні робіт, проході людей і руху транспорту. Воно забезпечує нормовані характеристики (освітленість, яскравість освітлення) у приміщеннях і місцях провадження робіт поза будинками. Для приміщень, що мають зони з різними умовами природного освітлення і зони різних режимів роботи влаштовується роздільне керування освітленням таких зон.

Аварійне освітлення поділяється на освітлення безпеки, застосовуване для продовження роботи, і евакуаційне — для евакуації з приміщення при аварійному відключенні робочого освітлення. Світильники систем аварійного

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Р5	Арк.
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		52

освітлення підключаються до мережі, незалежно від робочого освітлення, починаючи від щита підстанції.

Чергове освітлення призначене для приміщень, а охоронне — для освітлення площадок підприємства, що охороняються в неробочий час, який збігається з темним часом доби. Для чергового освітлення виділяють частину світильників робочого чи аварійного освітлення, які забезпечують мінімальну освітленість для несення чергувань і охорони.

Джерела штучного світла:

- лампа розжарювання ЛР – лампа загального призначення;
- газорозрядні лампи високого і низького тиску;
- люмінесцентні (ЛЛ) – ГЛ низького тиску використовують для освітлення приміщень з опаленням;
- дугова ртутна люмінесцентна лампа (ДРЛ) – газорозрядна лампа високого тиску, застосовують для освітлення територій підприємств, населених пунктів виробничі приміщення великої висоти $H > 12\text{м}$;
- металево-галогенові лампи (МГЛ). Використовують для освітлення територій, а також внутрішніх приміщень з роботами, пов'язаними з великим освітленням(зборка радіоапаратури);
- натрієві лампи високого тиску(НЛВТ)застосовують для освітлення приміщень, де виконуються роботи грубіш 5-го розряду зорової напруги;
- світлодіодні лампи.

Методи розрахунку штучного освітлення:

- метод коефіцієнта використання світлового потоку. Призначений для розрахунку загального рівномірного освітлення горизонтальних поверхонь при відсутності затіняючі предметів з урахуванням світла, відбитим стінами та стелею;
- точений метод;
- метод питомої потужності (при приблизних розрахунках).

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Р5	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

Робоче освітлення призначене для забезпечення нормальних зорових умов при виконанні робіт, проході людей і руху транспорту. Воно забезпечує нормовані характеристики (освітленість, яскравість освітлення) у приміщеннях і місцях провадження робіт поза будинками.

5.4. Заходи щодо запобігання шкідливих факторів

Загальні рекомендації при роботі на ПК:

- дотримання обмежень за медичними вказівками;
- уважне ставлення до характеристик дисплея;
- правильна організація робочого місця;
- раціональна організація робочого часу.

Часткові рекомендації при роботі на ПК:

- необхідно дотримуватися часових обмежень щодо роботи з ПК для людей, які страждають захворюваннями опорно-рухового апарату, очей, шкіри, а також вагітних жінок;
- надавати перевагу використанню дисплеїв з високою роздільною здатністю та раціональним розміром екрана (15 дюймів і більше);
- краще вибирати відеоадаптери з високим дозволом і частотою оновлення екранного зображення (регенерація) не менше 72 Гц, а краще – 85 Гц і вище;
- обов’язково ставити на незахищений дисплей екранні поляризаційні фільтри, які зменшують шкідливе електромагнітне та ультрафіолетове випромінювання, роблять мерехтіння менш помітним;
- сидіти не ближче 70 см від дисплея;
- при розміщенні робочого місця поряд із вікном кут між екраном дисплея і площиною вікна повинен становити не менше 90 градусів (для виключення блимів), ближню частину вікна бажано зашторити;

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Р5	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

- не слід розміщувати дисплей безпосередньо під джерелом освітлення чи поряд із ним;
- освітленість робочого місця не повинна перевищувати 2/3 нормальної освітленості приміщення;
- при розміщенні в кімнаті декількох ПК відстань між ними повинна складати не менше 1.2;
- робоче місце повинно бути обладнано так, щоб виключити незручні пози і довгочасні статичні напруження тіла;
- загальний час роботи з ПК не повинен перевищувати 50% усього робочого часу, тобто не більше 4 годин на день для дорослих і 2 години для дітей;
- при роботі з ПК необхідно робити 15-хвилинні перерви через кожних 2 години, а при інтенсивній роботі – через 1 годину і навидь півгодини;
- під час роботи на ПК необхідно слідкувати, щоб лінія руки в області зап'ястя залишалась прямою, зап'ястя були розслаблені, а пальці трохи зігнуті; не напружуйте руки, зігніть їх у ліктях приблизно під прямим кутом; слідкуйте, щоб удари по клавішах були не занадто сильними;
- підлокітники робочого місця повинні бути опорою для рук як при роботі з клавіатурою, так і користуванні;
- при виникненні напруження або спазмів у м'язах слід припинити роботу і зробити декілька вправ для розслаблення;
- відрегулюйте висоту стільця так, щоб стегна розміщувалися паралельно підлозі, а ноги – твердо стояли на ній;
- під час роботи сидіть прямо чи нахиліть корпус вперед, намагаючись зберегти природній згин тіла в поясниці; не сутультесь і не зводьте плечі; щоб не втомлювалась шия, не нахилийте голову; верхній край монітора при цьому повинен знаходитися на рівні очей;
- регулярно робіть вправи для очей;

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Р5	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

- поверхня стола, клавіатури і корпуси ПК повинні бути одного кольору;
- якщо можливо, з дисплеєм необхідно працювати в режимі „темні символи на світлому фоні”;
- у приміщенні, де встановлено ПК, необхідно підтримувати відносну вологість повітря не нижче 40% з метою зменшення шкідливого впливу електростатичного поля;
- рекомендується відсунути все обладнання ПК на 60-90 см від робочого місця;

5.5. Забезпечення електробезпеки

Електробезпека забезпечується відповідною конструкцією електроустаткування, застосуванням технічних засобів захисту, організаційними і технічними заходами.

Конструкція електроустаткування повинна відповідати умовам його експлуатації, забезпечувати захист персоналу від зіткнення зі струмоведучими частинами й устаткуванням – від влучення усередину сторонніх предметів і води.

Організаційні і технічні заходи щодо забезпечення електробезпечності полягають в основному у відповідному навчанні, інструктажі і допуску до роботи людей, що пройшли медичний огляд, виконанні ряду технічних заходів при проведенні робіт з електроустаткуванням, дотриманні особливих вимог при роботі з частинами, що знаходяться під напругою.

Висновок

В результаті виконання цієї частини дипломного проекту та надані рекомендації щодо захисту від шкідливих наслідків перебування за комп'ютером, забезпечення електробезпеки та безпеки від електромагнітного випромінювання.

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Р5	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

В результаті виконання роботи було розроблено та протестовано систему автоматизації твердопаливного котла, яка повністю відповідає вимогам технічного завдання.

Використання мікроконтролера ESP32-S2 дозволило реалізувати складні алгоритми керування та забезпечити бездротову інтеграцію з системами IoT.

Впровадження ПД-регулятора забезпечило плавне позиціонування повітряної заслінки, що дозволяє утримувати температуру в межах заданого гістерезису.

Система продемонструвала стабільну роботу, що підтверджено під час експлуатації протягом частини опалювального сезону.

Реалізована схема живлення з розподілом на цифрову та силову частини гарантує надійність роботи обчислювального ядра при комутації потужних індуктивних навантажень.

Розроблений комплекс є готовим до впровадження та подальшого масштабування, наприклад, для керування нагнітальною турбіною

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Висновки	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Fractional-Order PID Controller (FOPID)-Based Iterative Learning Control for a Nonlinear Boiler System / H. Kumar et al. *Energies*. 2023. Vol. 16, no. 3. P. 1045. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/3/1045> (дата звернення: 1.06.2026).
2. Sunli C. Enhanced decentralized PI control for fluidized bed combustor via advanced disturbance observer. *Control Engineering Practice*. 2015. URL: https://web.ecs.baylor.edu/faculty/lee/papers/journal/2015/2015CEP_Sunli.pdf (дата звернення: 1.06.2026).
3. Three Ways to Optimize Solid Fuel Combustion / Hurst Boiler. *Hurst Boiler & Welding Co*. URL: https://www.hurstboiler.com/biomass_boiler_systems/three-ways-to-optimize-solid-fuel-combustion (дата звернення: 1.06.2026).
4. PID strategy for primary/secondary control of wood boiler. *Control.com : forum*. URL: <https://control.com/forums/threads/pid-strategy-for-primary-secondary-control-of-wood-boiler.35061/> (дата звернення: 1.06.2026).
5. Development of control system for central heating boiler / Bialystok University of Technology. *Methods and Tools in CAD*. Chapter 13. URL: https://pb.edu.pl/oficyna-wydawnicza/wp-content/uploads/sites/4/2021/11/Methods_and_Tools_in_CAD_chapter_13.pdf (дата звернення: 1.06.2026).
6. BW Type Solid Fuel Boilers Installation and Maintenance Instructions. *Romstal : cdn*. URL: https://cdn.contentspeed.ro/pimromstal.websales.ro/cs-content/cs-docs/products/34clv095manualtehnicalorig_41721_10_1676700858.pdf (дата звернення: 1.06.2026).
7. Solid fuel central heating control system : Central Heating Control Pack Pack / Charnwood. URL: <https://www.charnwood.com/files/documents/instructions/Central%20Heating%20Control%20Pack.pdf> (дата звернення: 1.06.2026).

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Джерела	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

8. SAM Wood Stove & Boiler Optimization Controller. *SAM Controllers*. URL: <https://samcontrollers.com/products/sam-wood-stove-boiler-optimization-controller> (дата звернення: 1.06.2026).

9. Boiler Fuel Feed System Design for Bunker C: Heat Tracing, Level, and Temperature Control. *Industrial Monitor Direct : knowledgebase*. URL: <https://industrialmonitordirect.com/blogs/knowledgebase/boiler-fuel-feed-system-design-for-bunker-c-heat-tracing-level-and-temperature-control> (дата звернення: 1.06.2026).

10. ESP32 vs STM32: Complete Engineering Comparison for IoT & Industrial Systems. *Moz Electronics*. URL: <https://mozelectronics.com/tutorials/esp32-vs-stm32/> (дата звернення: 1.06.2026).

11. How to Choose the Right Microcontroller for Your IoT Project: ESP32 vs. Arduino vs. STM32. *Jak Electronics : blog*. URL: <https://www.jakelectronics.com/blog/esp32-vs-arduino-vs-stm32> (дата звернення: 1.06.2026).

12. Vsezdoi I., Shchur I. The principle of construction of the boiler control system based on microcontrollers. *Measuring Power Engineering and Control Systems*. Lviv Polytechnic National University, 2023. No. 1. P. 18–25. URL: <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2023/nov/32232/vsezdoinev-18-25.pdf> (дата звернення: 1.06.2026).

13. STM32 vs ESP32: Choosing the Right Microcontroller in 2026. *JLCPCB : blog*. URL: <https://jlcpcb.com/blog/stm32-vs-esp32-beginner-guide> (дата звернення: 1.06.2026).

14. STM32 vs ESP32: Which Microcontroller Is Right for Your Project? *Fly-Wing Tech : blog*. URL: <https://www.flywing-tech.com/blog/stm32-vs-esp32-which-microcontroller-is-right-for-your-project/> (дата звернення: 1.06.2026).

15. Smart hot water and boiler controller built on ESP32-S3 + ESPHome / GitHub repository *tadoHotWaterKnob*. URL: <https://github.com/ay129-35MR/tadoHotWaterKnob> (дата звернення: 1.06.2026).

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Джерела	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

16. Can Micro based Triac speed control damage Ceiling fan? *All About Circuits* : forum. URL: <https://forum.allaboutcircuits.com/threads/can-micro-based-triac-speed-control-damage-ceiling-fan.147128/> (дата звернення: 1.06.2026).

17. Is the STM32 a good choice for industrial application? *Reddit* : r/embedded. URL: https://www.reddit.com/r/embedded/comments/1s57dv7/is_the_stm32_a_good_choice_for_industrial/ (дата звернення: 1.06.2026).

18. ESP32 controller for common 2-element radiator heater / GitHub repository *HeaterController*. URL: <https://github.com/denised/HeaterController> (дата звернення: 1.06.2026).

19. ESP32 firmware to read and control EMS and Heatronic compatible equipment / GitHub repository *EMS-ESP32*. URL: <https://github.com/emsesp/EMS-ESP32> (дата звернення: 1.06.2026).

20. Central-heating-controller: public repositories. *GitHub Topics*. URL: <https://github.com/topics/central-heating-controller> (дата звернення: 1.06.2026).

21. Max6675 Sensor: A Comprehensive Review and Practical Guide for Temperature Monitoring. *AliExpress Wiki*. URL: [suspicious link removed] (дата звернення: 1.06.2026).

22. DS18B20 alternative. *PICAXE Forum*. URL: <https://picaxeforum.co.uk/threads/ds18b20-alternative.25649/> (дата звернення: 1.06.2026).

23. DS18B20 - One-Wire Digital Temperature Sensor. *ElectroDragon*. URL: <https://www.electrodragon.com/product/ds18b20/> (дата звернення: 1.06.2026).

24. Wood Boiler Controller. *Reddit* : r/arduino. URL: https://www.reddit.com/r/arduino/comments/1qm10oc/wood_boiler_controller/ (дата звернення: 1.06.2026).

25. Biomass, DeltaTherm FK Solid fuel boiler controller. *RESOL GmbH*. URL: <https://www.resol.de/en/produktdetail/101> (дата звернення: 1.06.2026).

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Джерела	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

26. DS18B20: Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer : technical documentation / Analog Devices. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ds18b20.pdf> (дата звернення: 1.06.2026).

27. Multi-zone central heating controller based on the ESP32 / GitHub repository *ESP-Heat*. URL: <https://github.com/andypugh/ESP-Heat> (дата звернення: 1.06.2026).

28. DS18B20 Datasheet and Product Info. *Analog Devices*. URL: <https://www.analog.com/en/products/ds18b20.html> (дата звернення: 1.06.2026).

29. Heating water container and tracking temperature without submerging. *Arduino Forum*. URL: <https://forum.arduino.cc/t/heating-water-container-and-tracking-temperature-without-submerging/702968> (дата звернення: 1.06.2026).

30. MAX6675 Module Thermocouple Type K 1024°C with cable. *Power Lab*. URL: <https://powerlab.dz/product/module-themocouple-type-k-1024c/> (дата звернення: 1.06.2026).

31. Connection diagram of the solid fuel boiler. *Thermal Engineering*. URL: <https://www.ter-en.com/en/skhema/ktt> (дата звернення: 1.06.2026).

32. AC Fan Speed Control using Arduino and TRIAC. *Circuit Digest*. URL: <https://circuitdigest.com/microcontroller-projects/ac-fan-speed-control-using-arduino-and-triac> (дата звернення: 1.06.2026).

33. AC Fan Speed Control with PIC: Phase Angle Method. *Industrial Monitor Direct* : *knowledgebase*. URL: <https://industrialmonitordirect.com/blogs/knowledgebase/pic-ac-fan-speed-control-triac-phase-angle-vs-pwm> (дата звернення: 1.06.2026).

34. Using Zero Cross Detect (ZCD) Peripheral for Triac Firing. *Microchip Developer Help*. URL: <https://developerhelp.microchip.com/xwiki/bin/view/products/mcu-mpu/8bit-pic/peripherals/zcd/triac-firing/> (дата звернення: 1.06.2026).

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Джерела	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

35. PID Controller using modern Microcontrollers. *TronicsZone : blog*. URL: <https://www.tronicszone.com/blog/pid-controller-using-microcontrollers/> (дата звернення: 1.06.2026).

36. PID Loops in Boiler Control Systems. Part 1: The Anatomy of a PID. *The Pyroscope : blog*. URL: <https://www.thepyroscope.com/blog/pid-loops-in-boiler-control-systems-part-1-the-anatomy-of-a-pid/> (дата звернення: 1.06.2026).

37. PID Controller Explained: Types, Uses & Operations. *Wattco*. 2024. URL: <https://www.wattco.com/2024/05/pid-controller-explained/> (дата звернення: 1.06.2026).

38. Design and Implementation of Water Level Control: Gain Scheduling PID. *Scribd*. URL: <https://www.scribd.com/document/869193090/14-Design-and-Implementation-of-Water-Level-Control> (дата звернення: 1.06.2026).

39. Understanding and Fine Tuning PID Loops in Boiler Control Systems. *The ACHR News*. URL: <https://www.achrnews.com/articles/163421-understanding-and-fine-tuning-pid-loops-in-boiler-control-systems> (дата звернення: 1.06.2026).

40. Forced Convection Oven. *Yamato Scientific America*. URL: <https://www.yamato-usa.com/web/content/61318?unique=fff591df8382572c9e2cf24419b8c40ec8a8d0bf> (дата звернення: 1.06.2026).

41. Temperature indicator controller DB Series / Chino Corporation. *DirectIndustry*. URL: <https://www.directindustry.com/prod/chino-corporation/product-14570-2120389.html> (дата звернення: 1.06.2026).

42. Fine Oven technical specifications. *Yamato Scientific America*. URL: <https://www.yamato-usa.com/web/content/13268?unique=17879e262b0fcf393484b44c1e465f4b64b11070> (дата звернення: 1.06.2026).

43. Bilevel Internal Model Control-Desired Dynamic Equation-PID Control Strategy for Superheated Steam Regulation in Combined Heat and Power unit / X. Wu et al. *PLoS One*. 2025. URL:

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Джерела	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC13084379/>

(дата звернення:

1.06.2026).

44. Introduction to PID Controllers. *DigiKey Maker Technical Library*. URL: <https://www.digikey.com/en/maker/projects/introduction-to-pid-controllers/763a6dca352b4f2ba00adde46445ddeb> (дата звернення: 1.06.2026).

45. PID control: Furnace and Boiler excess air control. *Incatools blog*. URL: <https://blog.incatools.com/pid-control-furnace-and-boiler-excess-air-control> (дата звернення: 1.06.2026).

46. Connection diagram for solid fuel boilers and an oil or gas boiler. *Mad About Heat*. URL: <https://madaboutheat.com/pages/connection-diagram-for-solid-fuel-boiler-and-oil-or-gas-boiler> (дата звернення: 1.06.2026).

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Джерела	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

ДОДАТОК А

Програмне забезпечення МК

```
esphome:
  name: esp32-kotel
  friendly_name: ESP32_kotel

esp32:
  board: esp32-s2-saola-1
  framework:
    type: arduino

# Enable Home Assistant API
api:
  encryption:
    key: "rO5/nk4RppAamqVqLG5j8dIE0yQ1xCC/4b1EyOJHa70="

ota:
  - platform: esphome
    password: "6cccd85f7a37e2770c2fdc5f53edd791"

wifi:
  ssid: "Wokwi-GUEST"
  password: ""

# Enable fallback hotspot (captive portal) in case wifi connection fails
ap:
  ssid: "Tp-Kotel Fallback Hotspot"
  password: "yf3UsGcTN5cH"

logger:
  level: DEBUG
  hardware_uart: UART0
  baud_rate: 115200

captive_portal:

i2c:
  sda: GPIO8
  scl: GPIO9
  scan: True
  frequency: 300kHz

display:
  - platform: lcd_pcf8574
    dimensions: 16x2
    address: 0x27
    lambda: |-
      //it.print("Hello World!");
      // Print 0 at the top left
      it.printf(0, 0, "In: %.1f", id(temp_Obratka).state);
      it.printf(0, 1, "Out: %.1f", id(temp_Podacha).state);
```

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Додатки	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ документи	Підпис	Дата		

```

one_wire:
  - platform: gpio
    pin: GPIO017

# Example configuration entry
sensor:
  - platform: dallas_temp
    address: 0x1061a15e1401a128
    name: temp_Podacha
    id: temp_Podacha
    update_interval: 15s
  - platform: dallas_temp
    address: 0x9c59945e14019b28
    name: temp_Obratka
    id: temp_Obratka
    update_interval: 15s
  - platform: combination
    type: linear
    name: "Delta"
    sources:
      - source: temp_Podacha
        coeffecient: 1.0
      - source: temp_Obratka
        coeffecient: -1.0
  - platform: pid
    id: TP_damper_PID_value
    name: "PID Climate Result"
    type: HEAT

```

```

number:
  - platform: template
    name: TP_damper
    id: TP_damper
    min_value: 0
    initial_value: 0
    max_value: 100
    step: 1
    optimistic: true
    set_action:
      then:
        - servo.write:
            id: tp_damper_servo
            level: !lambda 'return 1.0 - 2.0*(110.0 / 180.0)*(x / 100.0) -
2.0*(10.0 / 180.0);'

  - platform: template
    name: TP_pump_speed
    id: TP_pump_speed
    min_value: 1
    initial_value: 1
    max_value: 3
    step: 1
    optimistic: true

```

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Додатки	Арк.
						65
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

```

set_action:
  then:
    lambda: |-
      int SpeedValue = (int)x;
      switch (SpeedValue) {
        case 1:
          pinMode(2, OUTPUT);
          digitalWrite(2, HIGH);
          pinMode(3, OUTPUT);
          digitalWrite(3, HIGH);
          break;
        case 2:
          pinMode(2, OUTPUT);
          digitalWrite(2, LOW);
          pinMode(3, OUTPUT);
          digitalWrite(3, HIGH);
          break;
        case 3:
          pinMode(2, OUTPUT);
          digitalWrite(2, LOW);
          pinMode(3, OUTPUT);
          digitalWrite(3, LOW);
          break;
      }

output:
- platform: ledc
  id: pwm_output
  inverted: False
  pin: GPIO16
  frequency: 50 Hz

- platform: template
  id: TP_damper_PID_float
  type: float
  write_action:
    - number.set:
        id: TP_damper
        value: !lambda |-
          return id(TP_damper_PID_value).state;

servo:
- id: tp_damper_servo
  output: pwm_output
  min_level: 3%
  max_level: 12%
  transition_length: 0.5s

climate:
- platform: pid
  name: "PID Climate Controller"
  id: pid_Damper
  sensor: temp_Podacha
  visual:
    min_temperature: -20
    max_temperature: 100
    temperature_step: 1
  default_target_temperature: 50°C

```

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Додатки	Арк.
						66
Змн.	Арк.	№ документи	Підпис	Дата		

```

heat_output: TP_damper_PID_float
control_parameters:
  kp: 0.07592
  ki: 0.00007
  kd: 20.23265
  output_averaging_samples: 5      # smooth the output over 5 samples
  derivative_averaging_samples: 5  # smooth the derivative value over 10
samples
  deadband_parameters:
    threshold_high: 0.5°C          # deadband within +/-0.5°C of
target_temperature
  threshold_low: -0.5°C

# button:
#   - platform: template
#     name: "PID Climate Autotune"
#     on_press:
#       - climate.pid.autotune: pid_Damper

```

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Додатки	Арк.
						67
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

ДОДАТОК Б

Файл diagram.json Wokwi

```
{
  "version": 1,
  "author": "Бронченко_Є_О",
  "editor": "wokwi",
  "parts": [
    {
      "type": "board-esp32-s2-devkitm-1",
      "id": "esp",
      "top": -90.71,
      "left": 177.37,
      "attrs": { "builder": "esp-idf" }
    },
    {
      "type": "wokwi-serial-port",
      "id": "ext-serial",
      "top": 0,
      "left": 0,
      "attrs": { "baud": "19200" }
    },
    {
      "type": "wokwi-lcd1602",
      "id": "lcd1",
      "top": -89.6,
      "left": -224.8,
      "attrs": { "pins": "i2c" }
    },
    {
      "type": "wokwi-ds18b20",
      "id": "temp1",
      "top": 104.47,
      "left": -197.52,
      "attrs": { "deviceID": "a101145ea161" }
    },
    {
      "type": "wokwi-ds18b20",
      "id": "temp2",
      "top": 104.47,
      "left": -139.92,
      "attrs": { "deviceID": "9b01145e9459" }
    },
    { "type": "wokwi-servo", "id": "servo1", "top": 228.4, "left": -192,
    "attrs": {} },
    {
      "type": "wokwi-resistor",
      "id": "r1",
      "top": 138.65,
      "left": -68.6,
      "rotate": 180,
      "attrs": { "value": "4700" }
    }
  ],
  "connections": [
    [ "esp:GND.1", "lcd1:GND", "black", [ "h-28.8", "v-230.4", "h-403.2",
    "v48" ] ],
    [ "esp:3V3", "lcd1:VCC", "red", [ "h-86.4", "v-57.6", "h-355.2", "v76.7"
    ] ],
  ]
}
```

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Додатки	Арк.
						68
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

```

    [ "esp:8", "lcd1:SDA", "blue", [ "h-76.8", "v48", "h-364.8", "v-105.8" ]
  ],
  [ "esp:9", "lcd1:SCL", "yellow", [ "h-57.6", "v48", "h-374.4", "v-105.9"
  ] ],
  [ "esp:GND.1", "temp1:GND", "black", [ "h-28.8", "v67.2", "h-345.6" ] ],
  [ "esp:3V3", "temp1:VCC", "red", [ "h-86.4", "v230.4", "h-268.8" ] ],
  [ "esp:17", "temp1:DQ", "magenta", [ "h-48", "v67.2", "h-316.8" ] ],
  [ "esp:GND.1", "temp2:GND", "black", [ "h-28.8", "v67.2", "h-288" ] ],
  [ "esp:3V3", "temp2:VCC", "red", [ "h-86.4", "v230.4", "h-211.2" ] ],
  [ "esp:17", "temp2:DQ", "magenta", [ "h-48", "v67.2", "h-259.2" ] ],
  [ "temp2:VCC", "r1:1", "red", [ "v9.6", "h105.6" ] ],
  [ "temp2:DQ", "r1:2", "magenta", [ "v19.2", "h56.4" ] ],
  [ "esp:GND.1", "servo1:GND", "black", [ "h-28.8", "v220.8", "h-374.4",
"v-67.2" ] ],
  [ "esp:5V", "servo1:V+", "red", [ "h-38.4", "v220.8", "h-355.2", "v-48.1"
  ] ],
  [ "esp:16", "servo1:PWM", "orange", [ "h-67.2", "v230.4", "h-316.8", "v-
29" ] ],
  [ "esp:18", "ext-serial:TX", "green", [ ] ],
  [ "esp:17", "ext-serial:RX", "violet", [ ] ],
  [ "esp:RX", "$serialMonitor:TX", "", [ ] ],
  [ "esp:TX", "$serialMonitor:RX", "", [ ] ]
],
"dependencies": {}
}

```

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Додатки	Арк.
						69
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		