

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Факультет робототехніки та приладобудування
Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю**

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Юрій КИРИЧУК

«__» _____ 20__ р.

**Дипломний проєкт
на здобуття ступеня бакалавра
за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи та
технології в приладобудуванні»
спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
на тему: «Автоматизований регулятор опалення приміщення»**

Виконав:

студент IV курсу, групи ПМ-21

Маховик Олександр

Керівник:

доцент, к.н.

Петрик Валентин Федорович

Рецензент:

асистент, к.т.н. кафедри КІТВП

Бондарєв Денис Володимирович

Засвідчую, що у цьому дипломному
проєкті немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студент (-ка) _____

Київ – 2026 року

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

№ з/п	Форм.	Позначення	Найменування	Кільк. листів	Прим.
1	A4	ДП ПМ-21.07.1760.01.000 ТЗ	Завдання на дипломний проєкт	2	
2	A4	ДП ПМ-21.07.1760.01.001 ПЗ	Пояснювальна записка	95	
3	A4	ДП ПМ-21.07.1760.01.002 СхС	Схема структурна	1	
4	A4	ДП ПМ-21.07.1760.01.003 СхС	Схема автоматизації	1	
5	A4	ДП ПМ-21.07.1760.01.004 ЕП	Схема електрична принципова	1	
6	A4	ДП ПМ-21.007.1760.01.007 СхА	Блок-схема алгоритму роботи програмного забезпечення	1	
7	A4	ДП ПМ-21.07.1760.01.005 ПЕ	Перелік елементів	2	
8	A4	ДП ПМ-21.007.1760.01.006 СК	Складальний кресленик друкованих плат	1	

Пояснювальна записка
до дипломного проєкту
на тему: «Автоматизований регулятор опалення
приміщення»

Київ – 2026 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Факультет робототехніки та приладобудування
Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Освітньо-професійна програма «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ **Юрій КИРИЧУК**

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту

_____ **Маховик Олександр Анатолійович**

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дипломного проєкту «Автоматизований регулятор опалення приміщення», керівник проєкту Петрик Валентин Федорович, доцент, кандидат наук, затверджені наказом по університету від «__» _____ 20__ р. № _____
2. Термін подання студентом проєкту _____ « 24 » травня 2026 р.
3. Вихідні дані до проєкту: Пристрій призначений для автоматизованого керування твердопаливним котлом; номінальна напруга мережі 230 В, 50 Гц; головна регульована величина — температура теплоносія; передбачено контроль температури приміщення, рівня палива, керування турбіною наддуву та шнековим живильником, локальний і віддалений моніторинг.
4. Зміст пояснювальної записки: Вступ. 1. Аналіз предметної області та формування вимог. 2. Розробка структурної та функціональної схеми автоматизації. 3. Моделювання об'єкта керування та синтез регулятора. 4. Розробка електричної принципової схеми та друкованої плати. 5. Розробка програмного забезпечення мікропроцесорної системи. Загальні висновки. Список використаних джерел. Додатки.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо): схема структурна; схема автоматизації; схема електрична принципова; перелік елементів; складальний кресленик друкованих плат; блок-схема алгоритму роботи програмного забезпечення.

6. Консультанти розділів проєкту*¹ (читаємо примітку внизу сторінки)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата завдання видав	Підпис, дата завдання прийняв

7. Дата видачі завдання « 20 » квітня 2026 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Формування завдання на дипломне проєктування	20.04.2026	
2	Огляд існуючих систем автоматизації твердопаливних котлів	25.04.2026	
3	Аналіз методів вимірювання, керування та технологій Інтернету речей	02.05.2026	
4	Розробка структурної схеми та вибір елементної бази для її реалізації	7.05.2026	
5	Розробка електричної принципової схеми	14.05.2026	
6	Проектування друкованої плати та конструктивного виконання	18.05.2026	
7	Розробка алгоритму роботи та програмного забезпечення	21.05.2026	
8	Оформлення текстової та графічної частини дипломного проєкту	24.05.2026	

Студент

(підпис)

Олександр МАХОВИК
(ім'я, прізвище)

Керівник роботи

(підпис)

Валентин ПЕТРИК
(ім'я, прізвище)

* Консультантом не може бути зазначено керівника дипломного проєкту.

АНОТАЦІЯ

Дипломний проєкт присвячено розробці автоматизованого регулятора опалення приміщення на базі мікроконтролера ESP-WROOM-32 для керування твердопаливним котлом.

Метою роботи є створення мікропроцесорної системи, що підтримує задану температуру теплоносія, контролює температуру приміщення та рівень палива, керує турбіною наддуву і шнековим живильником, а також забезпечує локальний та віддалений моніторинг.

У роботі проаналізовано існуючі засоби автоматизації твердопаливних котлів, методи вимірювання температури й рівня палива, способи керування виконавчими механізмами та засоби IoT-моніторингу. Розроблено структурну, функціональну й електричну принципову схеми, виконано моделювання теплового об'єкта та синтез дискретного ПІД-регулятора.

Запропоновано архітектуру друкованих плат і програмне забезпечення, що реалізує опитування датчиків, керування турбіною та шнеком, локальний інтерфейс користувача, аварійну логіку й обмін даними з хмарною IoT-платформою.

Ключові слова: автоматизований регулятор опалення, твердопаливний котел, ESP32, ПІД-регулятор, DS18B20, фазове керування, низькочастотна ШІМ, IoT, MQTT, друкована плата.

ABSTRACT

The diploma project is devoted to the development of an automated room heating controller based on the ESP-WROOM-32 microcontroller for solid-fuel boiler control.

The aim of the work is to develop a microprocessor-based system that maintains the specified coolant temperature, monitors room temperature and fuel level, controls the blower turbine and screw feeder, and provides local and remote monitoring.

The project analyzes existing solid-fuel boiler automation systems, temperature and fuel level measurement methods, actuator control approaches, and IoT monitoring technologies. Structural, functional, and electrical schematic diagrams were developed, while the thermal object was modeled and a discrete PID controller was synthesized.

A printed circuit board architecture and software structure are proposed. The software implements sensor polling, turbine and screw feeder control, a local user interface, emergency handling logic, and data exchange with a cloud IoT platform.

Keywords: automated heating controller, solid-fuel boiler, ESP32, PID controller, DS18B20, phase control, low-frequency PWM, IoT, MQTT, printed circuit board.

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ.....	6
ABSTRACT.....	7
ЗМІСТ	8
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ ТА СКОРОЧЕНЬ	12
ВСТУП.....	14
1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА ФОРМУВАННЯ ВИМОГ	15
1.1 Аналіз існуючих систем автоматизації.....	15
1.1.1 Бюджетні контролери базового рівня.....	15
1.1.2 Контролери середнього та преміумкласу.....	16
1.1.3 Обґрунтування доцільності розробки власного контролера.....	16
1.2 Методи вимірювання температури.....	17
1.2.1 Термоелектричні перетворювачі (термопари).....	17
1.2.2 Інтегральні напівпровідникові (цифрові) сенсори.....	18
1.3 Методи контролю рівня палива.....	19
1.3.1 Інфрачервоні (оптичні) сенсори.....	20
1.3.2 Ультразвукові (акустичні) сенсори.....	21
1.3.3 Тензометричні датчики.....	21
1.4 Методи керування виконавчими механізмами.....	22
1.4.1 Методи керування двигунами постійного струму (ДПС)	22
1.4.2 Методи керування двигунами змінного струму (ДЗС).....	24
1.4.3 Низькочастотна ШІМ (релейне керування з розподілом часу).....	26
1.5 Методи та алгоритми регулювання температури.....	27
1.5.1 Двопозиційне (релейне) регулювання.....	27

1.5.2 Пропорційно-інтегрально-диференціальний (ПІД) закон регулювання.....	28
1.6 Технології Інтернету речей (IoT) та віддаленого моніторингу.....	29
1.6.1 Аналіз мережевих протоколів передачі даних.....	30
1.6.2 Аналіз хмарних середовищ та платформ IoT.....	31
1.7 Аналіз апаратних мікропроцесорних платформ.....	32
1.7.1 8-бітні мікроконтролери (на прикладі сімейства Arduino / AVR ATmega).....	32
1.7.2 32-бітні мікроконтролери сімейства STM32 (ARM Cortex-M).....	33
1.7.3 32-бітні IoT-мікроконтролери (на прикладі ESP32).....	33
1.8 Формування технічних вимог.....	34
Висновок до розділу	36
2 РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ ТА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ.....	37
2.1 Аналіз параметрів об'єкта автоматизації.....	37
2.2 Розробка структурної схеми.....	37
2.3 Розробка схеми автоматизації.....	38
2.4 Опис контурів контролю, регулювання та керування.....	39
2.5 Вибір технічних засобів автоматизації.....	40
Висновки до розділу	41
3 МОДЕЛЮВАННЯ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ ТА СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРА.....	43
3.1 Постановка задачі моделювання.....	43
3.2 Структурно-параметрична схема об'єкта керування.....	43
3.3 Спрощена теплова модель твердопаливного котла.....	44
3.4 Математичний опис статичного режиму роботи.....	47

3.5	Математичний опис динамічного режиму роботи.....	48
3.6	Отримання передатної функції об'єкта керування.....	49
3.7	Аналіз перехідної характеристики об'єкта.....	50
3.8	Вибір структури регулятора температури.....	52
3.9	Синтез дискретного ПІД-регулятора.....	52
3.10	Аналіз показників якості системи керування.....	54
	Висновки до розділу.....	56
4	РОЗРОБКА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМИ ТА ДРУКОВАНОЇ ПЛАТИ.....	58
4.1	Схемотехнічний синтез електричної схеми.....	58
4.1.1	Синтез підсистеми живлення та захисту.....	58
4.1.2	Схемотехнічна обв'язка мікропроцесорного ядра ESP-WROOM-32.....	65
4.1.3	Схемотехніка вимірювальних приладів.....	67
4.1.4	Синтез підсистеми силової комутації та гальванічної ізоляції.....	69
4.1.5	Підключення елементів інтерфейсу користувача.....	70
4.2	Електрична принципова схема.....	72
4.3	Принципи проектування друкованої плати.....	72
4.4	Обґрунтування архітектурних рішень.....	72
4.5	Макет друкованої плати.....	74
	Висновки до розділу.....	75
5	РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МІКРОПРОЦЕСОРНОЇ СИСТЕМИ.....	77
5.1	Вибір середовища розробки та інструментарію.....	77
5.2	Загальна структура програмного забезпечення.....	77

5.3 Розробка алгоритму роботи системи.....	79
5.4 Програмна реалізація опитування датчиків.....	80
5.5 Програмна реалізація дискретного ПД-регулятора.....	81
5.6 Програмна реалізація фазового керування турбіною.....	82
5.7 Програмна реалізація керування шнековим живильником.....	83
5.8 Програмна реалізація локального інтерфейсу користувача.....	83
5.9 Налаштування клієнт-серверної взаємодії та інтеграція з хмарною IoT-платформою.....	84
5.10 Обробка аварійних режимів роботи.....	85
Висновки до розділу.....	85
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	86
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	87
ДОДАТКИ.....	92

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ ТА СКОРОЧЕНЬ

AC — змінний струм

DC — постійний струм

AC/DC — перетворення змінної напруги у постійну

DC/DC — перетворення постійної напруги одного рівня у постійну напругу іншого рівня

GPIO — універсальний цифровий вхід/вихід мікроконтролера

UART — універсальний асинхронний приймач-передавач

USB-UART — перетворювач інтерфейсу USB в UART

SPI — послідовний периферійний інтерфейс

I²C — послідовний двопровідний інтерфейс

1-Wire — однопровідний цифровий інтерфейс передавання даних

Wi-Fi — технологія бездротового передавання даних

BLE — Bluetooth Low Energy, енергоощадний режим Bluetooth

TCP/IP — набір мережевих протоколів передавання даних

IoT — Internet of Things, Інтернет речей

MQTT — Message Queuing Telemetry Transport, протокол обміну повідомленнями для IoT-систем

HTTP — HyperText Transfer Protocol, протокол передавання гіпертексту

QoS — Quality of Service, рівень якості обслуговування в MQTT

OTA — Over-the-Air, оновлення програмного забезпечення бездротовим способом

GUI — Graphical User Interface, графічний інтерфейс користувача

HMI — Human-Machine Interface, людино-машинний інтерфейс

TFT — Thin-Film Transistor, технологія рідкокристалічного дисплея на тонкоплівкових транзисторах

LCD — Liquid Crystal Display, рідкокристалічний дисплей

OLED — Organic Light-Emitting Diode, органічний світлодіодний дисплей

SSR — Solid State Relay, твердотільне реле

VFD — Variable Frequency Drive, частотний перетворювач

LDO — Low Dropout Regulator, лінійний стабілізатор із малим падінням напруги

FPU — Floating Point Unit, апаратний блок обчислень із плаваючою комою

SRAM — статична оперативна пам'ять

RAM — оперативна пам'ять

Flash — енергонезалежна пам'ять для зберігання програмного коду

NVS — Non-Volatile Storage, енергонезалежне сховище даних ESP32

ROM — Read-Only Memory, постійна пам'ять

EEPROM — електрично стираюча програмована постійна пам'ять

CRC — Cyclic Redundancy Check, контрольна сума для перевірки цілісності даних

ADC / АЦП — аналого-цифровий перетворювач

DAC / ЦАП — цифро-аналоговий перетворювач

ШИМ / PWM — широтно-імпульсна модуляція

ПІД — пропорційно-інтегрально-диференціальний закон регулювання

САК — система автоматичного керування

ЕМЗ / ЕМІ — електромагнітні завади

PCB, ДП — Printed Circuit Board, друкована плата

ВСТУП

Ефективне використання енергетичних ресурсів є актуальним завданням для автономних систем теплопостачання. У твердопаливних і пелетних котлах якість роботи залежить від стабільності підтримання температури теплоносія, дозування палива та інтенсивності подачі повітря.

У простих котельних контролерах керування часто виконується за двопозиційним законом «увімкнено/вимкнено». Такий підхід простий, але спричиняє температурні коливання, знижує ефективність горіння та обмежує можливості моніторингу. Промислові системи з ПІД-регулюванням і віддаленим доступом функціональніші, однак зазвичай дорожчі та менш ремонтпридатні.

Актуальність роботи полягає у розробці доступного регулятора опалення, який поєднує стабілізацію температури теплоносія, контроль температури приміщення й рівня палива, керування турбіною та шнеком, а також передавання даних до IoT-платформи.

Метою дипломного проєкту є розробка апаратно-програмного регулятора опалення приміщення на базі ESP-WROOM-32. Для досягнення мети проаналізовано предметну область, сформовано вимоги, розроблено схеми автоматизації, виконано моделювання об'єкта керування, синтез регулятора, проєктування електричної схеми, друкованих плат і програмного забезпечення.

Об'єктом розробки є автоматизована система керування опаленням приміщення на базі твердопаливного котла. Предметом розробки є апаратно-програмні засоби вимірювання, регулювання температури теплоносія, керування виконавчими механізмами та передавання телеметричних даних користувачу.

Практичне значення роботи полягає у створенні ремонтпридатного й функціонально розширюваного регулятора, який може бути адаптований до різних конфігурацій твердопаливних котлів і підвищує зручність їх експлуатації.

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА ФОРМУВАННЯ ВИМОГ

1.1 Аналіз існуючих систем автоматизації

Ефективність, безпека та економічність функціонування сучасних теплогенеруючих установок на твердому паливі безпосередньо залежать від рівня їхньої автоматизації. Метою цього підрозділу є аналіз технічних характеристик, алгоритмів керування та системної архітектури мікропроцесорної автоматики, що представлена на ринку опалювальної техніки.

1.1.1 Бюджетні контролери базового рівня

Цей клас пристроїв є найпоширенішим через низьку ринкову вартість, проте їхній функціонал суттєво обмежений спрощеною схемотехнікою та застарілим програмним забезпеченням. Керування процесом спалювання палива в них базується на релейному принципі із жорстко заданим гістерезисом [1]. Вентилятор піддуву у таких системах працює на фіксованій максимальній потужності доти, доки температура теплоносія не досягне встановленої користувачем позначки, після чого живлення турбіни повністю вимикається. Оскільки горіння твердого палива є інерційним фізико-хімічним процесом, раптова зупинка подачі повітря не припиняє виділення тепла миттєво. Це призводить до інерційного перегріву теплоносія вище норми та хімічного недопалу палива через брак кисню у фазі зупинки. Як наслідок, спостерігається інтенсивне утворення сажі, дьогтю та зниження загального коефіцієнта корисної дії (ККД) системи до 55–60%. Крім того, у режимі активного роздуву вентилятор на 100% обертів видуває значну частину корисного тепла разом із димовими (відхідними) газами безпосередньо в димохід, що є прямими тепловими втратами [2]. Такі пристрої не здатні відстежувати температуру відхідних газів, не підтримують інтеграцію датчиків рівня палива в бункері та позбавлені функцій віддаленого моніторингу.

1.1.2 Контролери середнього та преміумкласу

Промислові контролери цього рівня (наприклад, лінійки Plum ecoMAX або Tech Controllers) забезпечують високоточне інтелектуальне керування процесом опалення. Головною їхньою перевагою є плавна модуляція потужності за допомогою математичного апарату ПІД-регулювання (пропорційно-інтегрально-диференціального). Такі контролери динамічно підлаштовують оберти вентилятора та час роботи шнека (дозування порцій пелет), залежно від того, наскільки швидко поточна температура наближається до заданої [3]. Це дозволяє котлу працювати на знижених потужностях без зупинки горіння. Також преміум моделі оснащуються системою часових розкладів, підтримують погодозалежне керування та інтеграцію в системи «розумного будинку».

Проте основними недоліками таких систем є висока вартість готових блоків та закрита (пропрієтарна) апаратна екосистема. Крім того, реалізація віддаленого керування (IoT) у таких системах зазвичай вимагає придбання додаткового зовнішнього інтернет-модуля, що суттєво здорожчує загальний кошторис системи.

1.1.3 Обґрунтування доцільності розробки власного контролера

Проектований автоматизований регулятор покликаний зайняти компромісну нішу, вирішуючи проблему високої вартості інтелектуальної автоматизації. Пристрій перейматиме складні алгоритмічні рішення преміумкласу: дискретний ПІД-регулятор температури теплоносія з урахуванням температури приміщення; гнучкі розклади роботи; автоматизоване дозування подачі пелет; контроль заповненості бункера. При цьому використання загальнодоступної електронної компонентної бази забезпечать високу ремонтпридатність системи. Таким чином, досягається близька до преміальних якостей регулювання та автономність при фінансових витратах, що будуть близькими до бюджетному сегменту автоматизації.

1.2 Методи вимірювання температури

1.2.1 Термоелектричні перетворювачі (термопари)

Принцип дії даного класу сенсорів базується на ефекті Зеебека: виникненні термоелектрорушійної сили (термо-ЕРС) у замкнутому контурі, що складається з двох різнорідних провідників, контакти яких перебувають за різних температур [4]. Схематична будова такого вимірювального контуру, що ілюструє гарячий спай (зона вимірювання T_{sense}) та холодний спай (зона підключення до вимірювального приладу T_{ref}), наведена на рисунку 1.1.

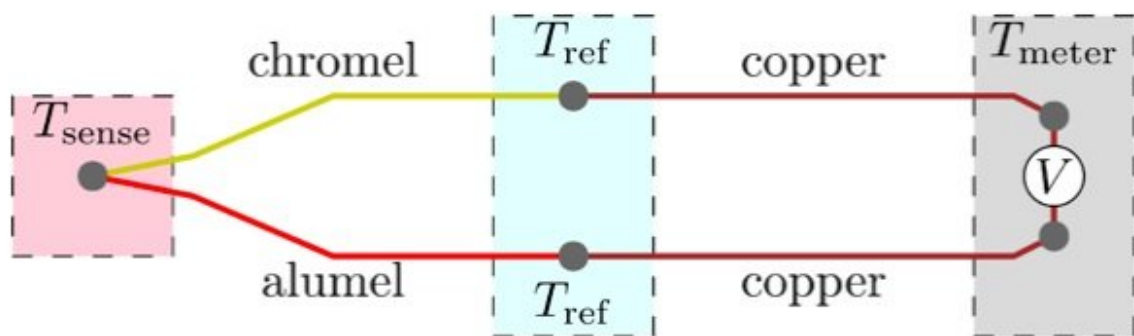


Рисунок 1.1 - Принципова схема вимірювального контуру термопари

Їхньою головною перевагою є надзвичайно висока термостійкість та механічна міцність, що дозволяє застосовувати їх безпосередньо в агресивних середовищах при температурах понад 600–1000 °C, наприклад, для контролю температури відхідних димових газів згідно з чинними стандартами вимірювань [5]. Однак, незважаючи на широкий діапазон, цей метод має суттєві недоліки при проектуванні мікропроцесорної автоматики. Рівень генерованого корисного сигналу становить одиниці мілівольт, тому для його коректного зчитування мікроконтролером необхідне використання прецизійних інструментальних підсилювачів та апаратно-програмної компенсації температури холодного спаю [4]. Крім того, слабкострумові аналогові лінії є вкрай чутливими до електромагнітних

завад (ЕМЗ), які постійно виникають у котельнях при комутації індуктивних навантажень, таких як потужні електродвигуни шнека та турбіни [6].

1.2.2 Інтегральні напівпровідникові (цифрові) сенсори

Сучасним альтернативним підходом у мікропроцесорній техніці є використання інтегральних кремнієвих датчиків температури. Такі компоненти поєднують на одному напівпровідниковому кристалі первинний термочутливий *p-n* перехід, схеми внутрішньої температурної компенсації, блоки аналогового підсилення та вузли цифрового інтерфейсу [4], [7]. Структурна організація такого процесу перетворення сигналу представлена на рисунку 1.2.

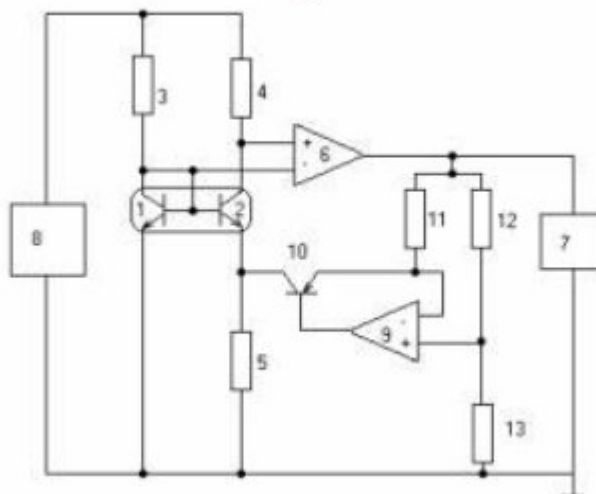


Рисунок 1.2 - Узагальнена внутрішня архітектура цифрового температурного сенсора

Первинне перетворення температури виконують термочутливі *p-n* переходи 1 і 2, параметри яких змінюються залежно від температури. Резистори 3–5 формують робочі струми та режим зміщення вимірювального вузла. Різницьевий сигнал підсилюється диференційним підсилювачем 6, після чого порівнюється з опорною напругою компаратором 9. Опорні рівні задаються резистивним подільником 11–13, а електронний ключ 10 забезпечує перемикання режимів вимірювання. Блок 8 виконує функцію внутрішнього джерела опорної напруги або стабілізованого живлення, а блок 7 відповідає за цифрову обробку та передавання результату вимірювання до мікроконтролера.

Значною перевагою інтегральних цифрових сенсорів є те, що квантування та перетворення вимірюваного аналогового значення у цифровий код відбувається безпосередньо всередині корпусу самого датчика, а передача інформації до головного процесора здійснюється за допомогою завадостійких послідовних протоколів (наприклад, 1-Wire або I2C). Таке архітектурне рішення повністю усуває проблему впливу електромагнітних наведень на лінію зв'язку та звільняє обчислювальне ядро центрального контролера від задач програмної фільтрації шумів чи калібрування вимірювального тракту [8].

Головним обмеженням напівпровідникових перетворювачів є їхній відносно вузький робочий діапазон, верхня межа якого через фізичні властивості кремнію обмежена відміткою в $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$ [7]. Цей фактор робить їх абсолютно непридатними для моніторингу процесів безпосередньо в зоні відкритого полум'я чи киплячих середовищ, проте їхніх можливостей цілком достатньо для високоточного контролю об'єктів із помірним тепловим режимом, таких як водяний теплоносій або повітря всередині будівель.

1.3 Методи контролю рівня палива

Для забезпечення тривалої автономної роботи теплогенеруючої установки необхідне безперервне відстеження рівня гранульованого палива (пелет) у витратному бункері. Деревні пелети належать до класу сипучих матеріалів, поверхня яких під час забирання шнеком утворює нерівномірні вирви (конуси), а процес завантаження супроводжується інтенсивним пилоутворенням. У промисловій практиці для безконтактного вимірювання рівня таких середовищ можуть застосовуватися інфрачервоні, ультразвукові та тензометричні методи контролю, що відрізняються принципом вимірювання, точністю та складністю конструктивної реалізації.

1.3.1 Інфрачервоні (оптичні) сенсори

Принцип дії інфрачервоних датчиків базується на випромінюванні імпульсного пучка ІЧ-світла (зазвичай у діапазоні довжин хвиль 850–940 нм) та реєстрації відбитого від об'єкта променя оптичним приймачем.

Схематичне представлення цього процесу, що ілюструє поширення та відбиття ІЧ-променів від поверхні палива (пелет), наведено на рисунку 1.3

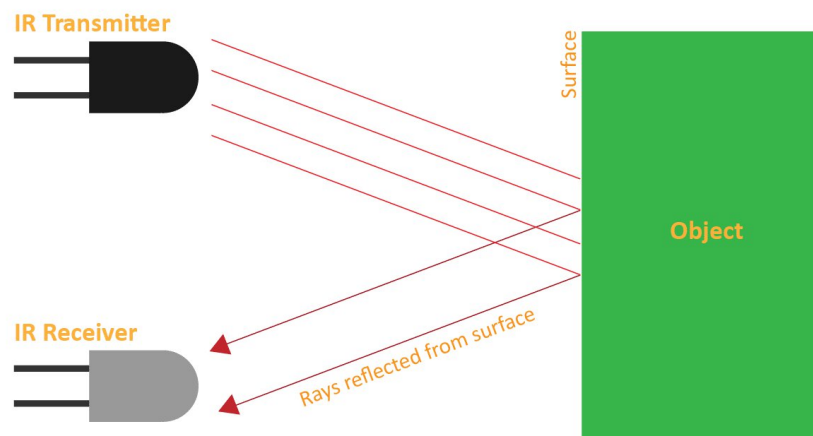


Рисунок 1.3 - Схематичне зображення роботи IR-датчика

Відстань до поверхні розраховується на основі фазового зсуву або часу затримки відбитого сигналу [9]. Перевагами оптичного методу є надзвичайно вузька діаграма спрямованості променя та висока швидкість відгуку.

Однак використання ІЧ-сенсорів у бункерах твердопаливних котлів супроводжується критичними експлуатаційними проблемами. Деревний пил, що постійно циркулює в замкненому просторі бункера під час роботи шнека, осідає на оптичних лінзах випромінювача та приймача. Це призводить до швидкої деградації (загасання) корисного сигналу. Крім того, щільна пилова суспензія у повітрі здатна розсіювати інфрачервоний промінь ще до того, як він досягне поверхні пелет, що викликає хибні спрацьовування та математичні артефакти у вимірювальному тракті [10].

1.3.2 Ультразвукові (акустичні) сенсори

Ультразвуковий метод вимірювання ґрунтується на явищі п'єзоелектричного ефекту. Сенсор генерує серію високочастотних акустичних імпульсів (зазвичай понад 40 кГц), які поширюються у повітряному середовищі, відбиваються від акустично щільної поверхні пелет і повертаються до приймача у вигляді ехо-сигналу. Дистанція L визначається за класичною формулою локації:

$$L = \frac{v \cdot t}{2} \quad (1.1)$$

де v — швидкість поширення звуку в повітрі (з урахуванням температурної компенсації),

а t — час проходження імпульсу до об'єкта і назад [9].

Головною перевагою ультразвукових датчиків є їхня висока стійкість до оптичних перешкод. Наявність дрібнодисперсного деревного пилу у повітрі практично не впливає на поширення акустичної хвилі на коротких дистанціях (до 2–3 метрів). Більше того, ультразвукові хвилі здатні самоочищати мембрану випромінювача від легкого нальоту пилу за рахунок високочастотних механічних вібрацій поверхні п'єзoeлемента [10]. Серед недоліків методу варто відзначити ширшу діаграму спрямованості (кут розходження променя становить 15–30°), що вимагає ретельного вибору місця монтажу датчика для уникнення хибних відбитків від стінок бункера, а також наявність "мертвої зони" (сліпої плями) безпосередньо біля випромінювача, яка зазвичай становить 20–25 см.

1.3.3 Тензометричні датчики

Ще одним способом контролю запасу палива у бункері є ваговий метод із використанням тензометричних датчиків. Принцип його роботи полягає у вимірюванні деформації пружного елемента під дією маси палива. При зміні навантаження змінюється електричний опір тензорезисторів, з'єднаних у мостову схему, а отриманий слабкий диференціальний сигнал підсилюється спеціалізованим аналого-цифровим перетворювачем, наприклад НХ711, і передається до мікроконтролера [11].

Перевагою такого методу є те, що він не залежить від форми поверхні палива, наявності пилу, кольору пелет або утворення нерівномірних конусів у бункері. На відміну від оптичних та ультразвукових датчиків, тензOMETричний метод оцінює не відстань до поверхні, а фактичну масу залишку палива, що дає змогу точніше визначати доступний запас. Крім того, датчики можуть бути розміщені під опорами бункера, тобто не контактувати безпосередньо з паливом.

Недоліками цього підходу є необхідність механічної інтеграції датчиків у конструкцію бункера, попереднього калібрування системи та врахування маси самого бункера. Також на точність вимірювання можуть впливати вібрації, нерівномірний розподіл навантаження між опорами та температурний дрейф вимірювальної схеми. Тому для побутового або малогабаритного регулятора опалення тензOMETричний метод доцільно розглядати як точнішу, але конструктивно складнішу альтернативу ультразвуковому контролю рівня.

1.4 Методи керування виконавчими механізмами

Виконавчими механізмами в автоматизованих теплогенеруючих установках виступають електродвигуни, які забезпечують привід шнекового живильника (дозування палива) та турбіни наддуву (регулювання об'єму повітря). Залежно від конструктивних особливостей котельного обладнання можуть застосовуватися двигуни постійного струму, крокові двигуни, однофазні двигуни змінного струму або асинхронні мотор-редуктори. Кожен тип електроприводу потребує застосування відповідного методу апаратного керування.

1.4.1 Методи керування двигунами постійного струму (ДПС)

Для двигунів постійного струму основним методом регулювання швидкості є широтно-імпульсна модуляція. Зміна коефіцієнта заповнення імпульсів змінює середню напругу на двигуні та його швидкість (Рисунок 1.4) [11].

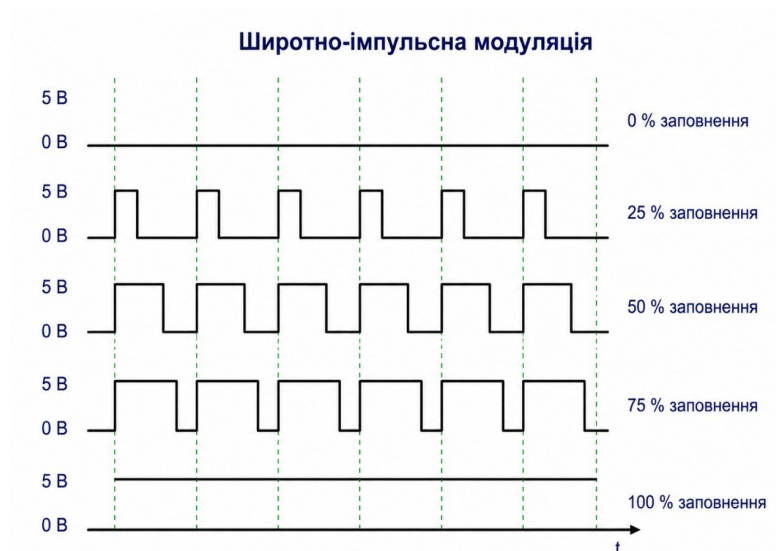


Рисунок 1.4 - Принцип ШІМ - широтно-імпульсної модуляції

Перевагами ШІМ-регулювання є високий коефіцієнт корисної дії силового каскаду, оскільки силовий транзистор працює переважно у ключовому режимі: або повністю відкритий, або повністю закритий. Це мінімізує теплові втрати на елементі комутації. Крім того, більшість сучасних мікроконтролерів мають вбудовані апаратні ШІМ-генератори, що спрощує програмну реалізацію та розвантажує обчислювальне ядро [12].

Практична реалізація виконується N-канальним MOSFET-ключем із підтягувальним резистором затвора та захисним діодом для шунтування імпульсів самоіндукції (Рисунок 1.5) [12].

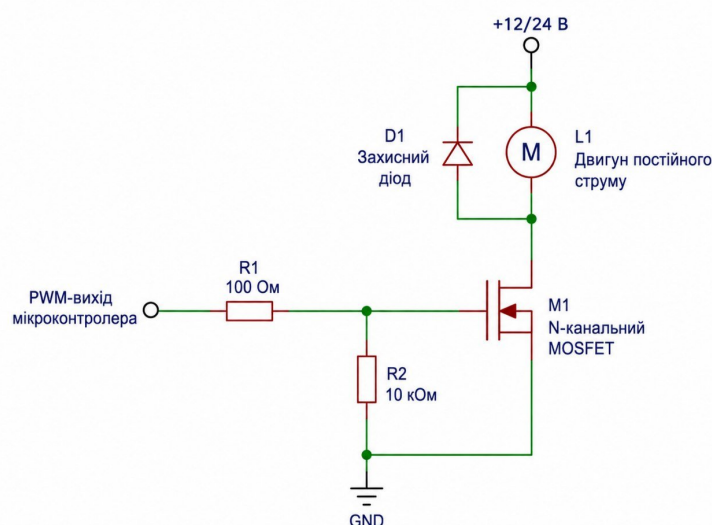


Рисунок 1.5 - Схема керування двигуном постійного струму за допомогою N-канального MOSFET-транзистора

Окремим різновидом низьковольтних електроприводів є крокові двигуни. Такий двигун переміщує вал дискретними кутовими кроками відповідно до послідовності імпульсів, які подаються на його обмотки. Такий тип приводу доцільний у випадках, коли необхідне точне позиціонування виконавчого механізму.

Керування кроковими двигунами безпосередньо з мікроконтролера є недоцільним, натомість застосовуються спеціалізовані драйвери крокових двигунів, які містять силові Н-мости, схеми обмеження струму та логіку формування послідовності фаз. Наприклад, драйвер A4988 підтримує повнокроковий, напівкроковий та мікрокрокові режими до 1/16 кроку, а DRV8825 — мікрокрокування до 1/32 кроку з вбудованим регулюванням струму обмоток [13]. Це забезпечує високу точність та керованість кутом повороту.

1.4.2 Методи керування двигунами змінного струму (ДЗС)

Однофазні двигуни змінного струму з живленням від мережі 230 В, 50 Гц можуть застосовуватися для турбіни наддуву або для мотор-редуктора шнекового живильника. Їхнє керування реалізується двома основними методами: частотним регулюванням або фазовим регулюванням напруги.

Частотне керування, або VFD, полягає у зміні частоти та амплітуди напруги живлення статора за допомогою силового інвертора. Це найбільш технічно досконалий метод, який дає змогу зберігати високий ККД та крутий момент двигуна на низьких обертах [11]. Проте для побутової або бюджетної автоматики твердопаливного котла такий підхід часто є економічно недоцільним через високу вартість частотного перетворювача та складність його схемотехнічної реалізації.

Альтернативним методом є фазове, або симісторне, регулювання напруги. Воно базується на відсіканні частини синусоїди мережевої напруги (Рисунок 1.6). Зі зміною кута відкривання симістора змінюється середньоквадратичне значення напруги на навантаженні, а отже — потужність, що подається на двигун вентилятора [12].

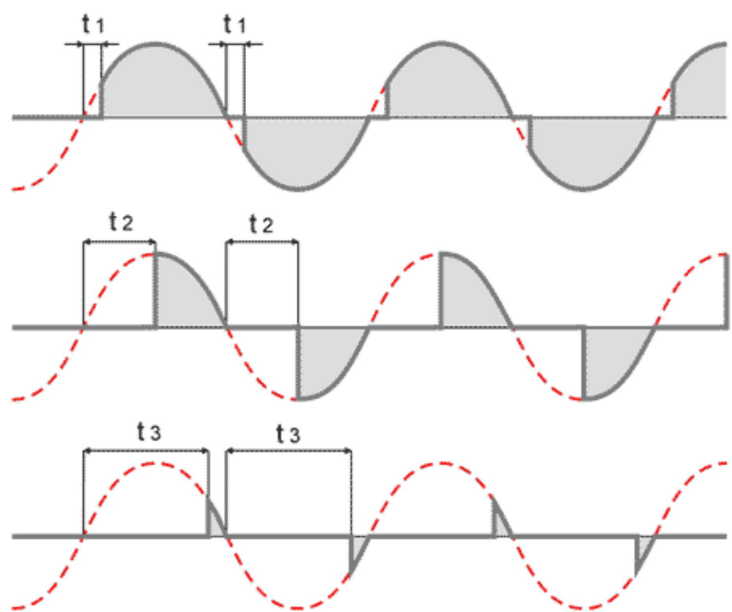


Рисунок 1.6 - Принцип фазово-кутового регулювання напруги змінного струму

Такий метод потребує гальванічної розв'язки між силовою мережею 230 В та низьковольтною логікою мікроконтролера. Для цього застосовуються оптоси-містори, наприклад МОС3021, які керують силовим симістором, та оптопари типу РС814 або РС817 для формування сигналу переходу через нуль. Це підвищує електробезпеку та захищає мікроконтролер від імпульсних завад, що виникають під час комутації індуктивного навантаження. Електричну схему такого керування зображено на рисунку 1.7.

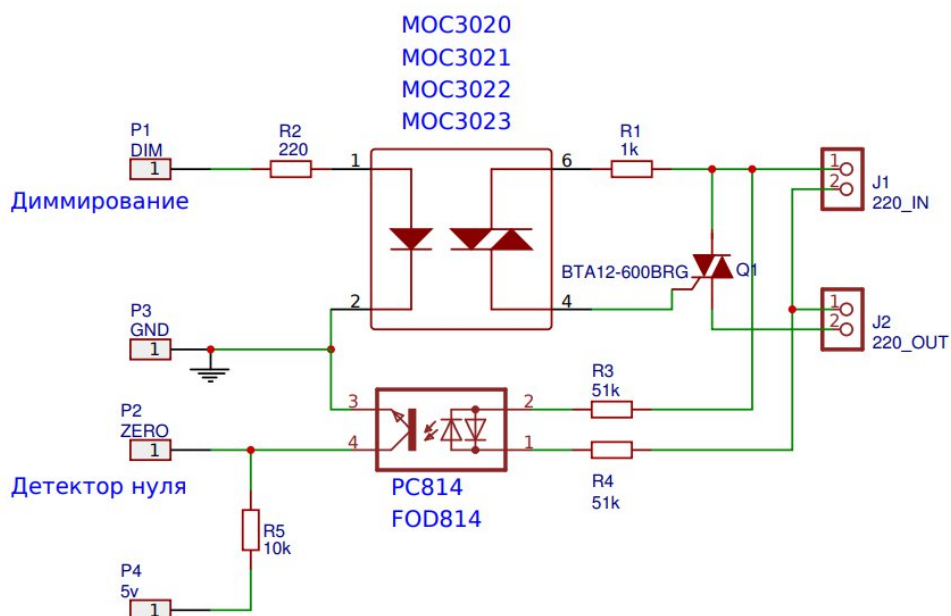


Рисунок 1.7 - Схема фазового керування однофазним двигуном змінного струму

Фазове керування доцільно застосовувати для плавного регулювання швидкості турбіни наддуву, оскільки саме від інтенсивності подачі повітря залежить швидкість горіння палива та теплова потужність котла. Водночас для мотор-редуктора шнекового живильника цей метод є менш придатним, оскільки зменшення напруги живлення може призвести до зниження пускового моменту та нестабільної роботи механізму подачі пелет.

1.4.3 Низькочастотна ШІМ (релейне керування з розподілом часу)

Окремо варто виділити метод керування мотор-редуктором шнекового живильника. Оскільки шнековий механізм має значну механічну інерцію та потребує високого пускового моменту для подолання опору сипучих пелет, плавне фазове або частотне регулювання для нього не є оптимальним. Натомість доцільно застосовувати низькочастотну ШІМ, або часопропорційне керування.

У цьому режимі контролер не змінює миттєву напругу живлення двигуна, а керує співвідношенням часу його роботи та паузи в межах одного тривалого циклу. Наприклад, при циклі 10 с режим 20 % відповідає 2 с роботи та 8 с паузи, режим 50 % — 5 с роботи та 5 с паузи, а режим 80 % — 8 с роботи та 2 с паузи. Таким чином регулюється не швидкість обертання шнека, а середня продуктивність подачі палива.

Комутація такого навантаження може здійснюватися за допомогою електромеханічного реле або твердотілого реле SSR. Використання SSR є більш доцільним для автоматизованої системи, оскільки воно забезпечує безшумну роботу, відсутність механічного зносу контактів і підвищену надійність при великій кількості циклів увімкнення та вимкнення [14]. У результаті низькочастотна ШІМ є найпростішим і найнадійнішим методом керування подачею палива у твердопаливному котлі, тоді як фазове керування доцільніше використовувати для турбіни наддуву.

1.5 Методи та алгоритми регулювання температури

Якість функціонування будь-якої системи автоматичного керування (САК) тепловим об'єктом визначається обраним математичним законом, за яким контролер обчислює керуючий вплив на виконавчі механізми. Для твердопаливних котлів, які характеризуються значною транспортною затримкою та нелінійністю горіння, вибір оптимального закону регулювання є критичним етапом проектування. У межах проєктованого пристрою головною регульованою величиною є температура теплоносія, а температура приміщення використовується як вторинна контрольована величина для оцінювання теплового стану об'єкта та коригування режимів роботи.

1.5.1 Двопозиційне (релейне) регулювання

Релейне керування (On/Off) є найпростішим алгоритмом, який масово застосовується у бюджетному сегменті опалювальної автоматики. Математична модель такого регулятора описується розривною функцією, де керуючий вплив $u(t)$ набуває лише двох граничних значень (мінімального U_{min} або максимального U_{max}):

$$u(t) = \begin{cases} U_{max}, & \text{якщо } e(t) > \Delta \\ U_{min}, & \text{якщо } e(t) < -\Delta \end{cases} \quad (1.2)$$

де $e(t) = T_{set} - T_{fact}$ — поточна похибка регулювання (різниця між заданою та фактичною температурою),

а Δ — зона нечутливості (гістерезис) [1].

Основна проблема релейного закону при керуванні пелетним котлом полягає у виникненні стійких автоколивань. Оскільки процес горіння біомаси має високу інерційність, після вимкнення турбіни (при досягненні заданої температури) виділення тепла продовжується, що призводить до динамічного перерегулювання (перегріву). У фазі очікування нестача кисню спричиняє хімічний недопал пелет, генерацію чадного газу (CO) та інтенсивне осідання сажі на стінках теплообмінника, що різко знижує ККД установки [15].

1.5.2 Пропорційно-інтегрально-диференціальний (ПІД) закон регулювання

Для усунення недоліків двопозиційного керування в сучасній автоматичній системі застосовується ПІД-регулятор. Це безперервний алгоритм, який дозволяє плавно модулювати потужність виконавчих механізмів (швидкість вентилятора, час роботи шнека), забезпечуючи високу точність стабілізації температури без повної зупинки процесу горіння. У класичній (безперервній) формі ідеальний ПІД-регулятор описується рівнянням:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1.3)$$

де пропорційна складова K_p реагує на поточне відхилення, інтегральна K_i усуває накопичену статичну помилку, а диференціальна K_d виконує функцію математичного прогнозування, демпфуючи динамічне перерегулювання [16]. Оскільки розроблюваний пристрій базується на мікроконтролері, математична модель ПІД-регулятора реалізується у цифровій (дискретній) формі [17].

Проте, як показує інженерна практика, базова програмна реалізація класичного рівняння має ряд суттєвих недоліків під час роботи з реальним обладнанням. Зокрема, різка зміна заданої температури (уставки) користувачем викликає миттєвий стрибок математичної похибки, що призводить до екстремального сплеску диференціальної складової — так званого «диференціального удару» (Derivative Kick). Для усунення цього явища в сучасних програмних алгоритмах диференціальна ланка обчислюється не на основі зміни похибки, а на основі швидкості зміни самої вимірюваної величини (температури теплоносія). Крім того, обов'язковим є застосування алгоритмів захисту від інтегрального насичення (Reset Windup / Anti-windup), які припиняють накопичення інтегральної суми при досягненні виконавчими механізмами своїх фізичних меж (наприклад, 100% потужності ШІМ) [18]. Відповідно, оптимізоване для мікроконтролера дискретне рівняння набуває вигляду:

$$u[k] = u[k-1] + K_p(e[k] - e[k-1]) + K_i T_s e[k] - \frac{K_d}{T_s} (PV[k] - PV[k-1]) \quad (1.4)$$

де $u[k]$ — керуючий вплив на поточному кроці,
 $e[k]$ — похибка, $PV[k]$ (Process Value) — поточне значення вимірюваної температури,

а T_s — строго фіксований період дискретизації [17], [18].

Така форма алгоритму гарантує стабільну роботу котла без різких перепадів потужності.

1.6 Технології Інтернету речей (IoT) та віддаленого моніторингу

Концепція Інтернету речей (Internet of Things, IoT) передбачає інтеграцію фізичних об'єктів, оснащених датчиками, виконавчими механізмами та мікропроцесорними обчислювальними ядрами, у єдину глобальну інформаційну мережу [19]. У контексті керування теплогенеруючими установками на біомасі, впровадження IoT-технологій дозволяє трансформувати локальний котельний контролер у повноцінний вузол інфраструктури «розумного будинку» (Smart Home) із підтримкою сучасної міжмашинної взаємодії (M2M) [20]. Це забезпечує користувачеві можливість дистанційного моніторингу телеметричних даних (температурних графіків, стану горіння, залишку пелет у бункері) та оперативного коригування уставок у режимі реального часу з використанням мобільних пристроїв.

Окрім забезпечення дистанційного доступу, використання спеціалізованих IoT-платформ вирішує фундаментальну проблему апаратних обмежень вбудованих систем. Сучасні хмарні сервіси повністю перебирають на себе важкі обчислювальні завдання: ведення баз даних для довгострокового зберігання телеметрії (логування), математичну побудову аналітичних графіків та рендеринг графічного інтерфейсу користувача (GUI) [19].

Завдяки такій розподіленій архітектурі, центральний мікроконтролер звільняється від необхідності функціонувати як повноцінний веб-сервер. Про-

цесорний час монополюно виділяється на критичні задачі жорсткого реального часу: опитування цифрових датчиків, обчислення інтегральних та диференціальних складових ПІД-закону, а також точну генерацію керуючих ШІМ-сигналів для силовій периферії [20].

1.6.1 Аналіз мережевих протоколів передачі даних

Для реалізації надійної взаємодії між мікропроцесорним пристроєм та віддаленим сервером критично важливим є вибір оптимального мережевого протоколу прикладного рівня. У сучасній інженерній практиці розглядаються два основні підходи:

Протокол HTTP (Hypertext Transfer Protocol): Класичний протокол веб-взаємодії, що працює за моделлю «запит-відповідь». Незважаючи на свою універсальність, він генерує значний мережевий трафік через об'ємні текстові заголовки (headers) та вимагає встановлення нових TCP-з'єднань для кожної транзакції. Для мікроконтролерних систем із лімітованим обсягом оперативної пам'яті (RAM) регулярна обробка HTTP-запитів є надто ресурсомісткою задачею, що призводить до затримок у роботі всієї системи [19].

Протокол MQTT (Message Queuing Telemetry Transport): Спеціалізований легкокодовий протокол, стандартизований консорціумом OASIS, розроблений спеціально для мереж з обмеженою пропускнуою здатністю та пристроїв із низьким енергоспоживанням [21]. Він базується на асинхронній архітектурі «публікація-підписка» (publish/subscribe) і використовує центральний вузол — MQTT-брокер, який приймає та маршрутизує повідомлення між клієнтами за визначеними темами (topics) [20].

Для більш наочного порівняння характеристик розглянутих протоколів наведено таблицю 1.1.

Таблиця 1.1 - Порівняльна характеристика протоколів

	HTTP	MQTT
Модель взаємодії	Запит–відповідь	Публікація–підписка
Тип з'єднання	Короточасні (часто нові ТСП-з'єднання)	Постійне ТСП-з'єднання
Розмір заголовків	Великий (текстовий)	Мінімальний (від 2 байт)
Навантаження на мережу	Високе	Низьке
Вимоги до ресурсів	Високі	Низькі
Затримки	Вищі	Мінімальні
Підтримка QoS	Відсутня (на рівні протоколу)	Є (QoS 0, 1, 2)
Придатність для IoT	Обмежена	Висока

Оптимальним вибором для телеметрії котельного обладнання є протокол MQTT. Його ключові переваги: мінімальний розмір службового заголовка пакета (від 2 байт), постійно відкрите ТСП-з'єднання (що мінімізує мережеві затримки) та підтримка трьох рівнів якості обслуговування (QoS 0, 1, 2). Механізм QoS гарантує доставку критичних керуючих команд (наприклад, аварійної зупинки котла або зміни уставки ПІД-регулятора) навіть за умов нестабільного Wi-Fi або GSM зв'язку [22], [21].

1.6.2 Аналіз хмарних середовищ та платформ IoT

На ринку існує широкий спектр платформ, придатних для інтеграції з різними мікроконтролерами. Для обґрунтування архітектури доцільно порівняти два найбільш поширені підходи:

Професійні платформи промислового рівня (на прикладі ThingsBoard): ThingsBoard — це відкрита (open-source) IoT-платформа для збору, обробки та візуалізації даних. Вона має потужний механізм правил (Rule Engine), який дозволяє виконувати складну аналітику даних на стороні сервера, налаштовувати багаторівневі тригери тривоги (Alarms) та інтегруватися із зовнішніми базами даних (PostgreSQL, Cassandra) [23]. Недоліком такого рішення є високий поріг

входження, необхідність оренди та адміністрування власного VPS-сервера (в разі використання Community Edition) та складність розробки нативних мобільних додатків.

Хмарні сервіси типу PaaS (Platform as a Service) (на прикладі Blynk IoT): Blynk — це комплексна платформа, яка надає готову інфраструктуру: керований хмарний сервер (Blynk.Cloud), бібліотеку для мікроконтролера (Blynk.Edgent) та конструктор мобільних і веб-додатків [24]. Платформа автоматично керує процесом ініціалізації пристрою (Wi-Fi Provisioning), оновленням прошивки "по повітря" (OTA - Over The Air) та забезпечує двосторонній зв'язок із мінімальними затримками завдяки власному оптимізованому протоколу поверх TCP/IP.

1.7 Аналіз апаратних мікропроцесорних платформ

Вибір базової мікропроцесорної платформи є ключовим етапом проектування апаратної частини системи керування. Для забезпечення виконання вимог, описаних у попередніх розділах, апаратна платформа повинна задовольняти наступні критерії: здатність до жорсткого реального часу (RTOS) для безперебійного опитування датчиків та керування симісторами, наявність апаратного обчислювача з плаваючою комою (FPU) для точного розрахунку ПІД-регулятора, достатній обсяг оперативної пам'яті для виводу графічної інформації на HMI-дисплей, а також інтегровані мережеві інтерфейси для реалізації IoT-архітектури (MQTT).

Для обґрунтування вибору проведено системний аналіз найбільш поширених на ринку мікроконтролерів (MCU).

1.7.1 8-бітні мікроконтролери (на прикладі сімейства Arduino / AVR ATmega)

Класичні платформи, такі як Arduino Mega (ATmega2560), широко використовуються у базовій автоматичці завдяки простоті програмування. Проте архітектура AVR має суттєві обмеження: відсутність апаратного співпроцесора (FPU) призводить до того, що операції з плаваючою комою (необхідні для ПІД-регулятора) емулюються програмно, що витрачає значну кількість процесорного часу

[25]. Крім того, обмежений обсяг оперативної пам'яті (8 КБ у ATmega2560) унеможлиблює використання сучасних графічних бібліотек (наприклад, LVGL) для дисплеїв, а відсутність вбудованого Wi-Fi вимагає підключення зовнішніх шилдів (на зразок ESP8266), що ускладнює схемотехніку і знижує надійність системи.

1.7.2 32-бітні мікроконтролери сімейства STM32 (ARM Cortex-M)

Мікроконтролери STM32 (наприклад, серій F4 або G4) відзначаються високою продуктивністю та розширеною апаратною периферією, спеціально розробленою для керування двигунами (Advanced-control timers). Наявність апаратного FPU та контролера прямого доступу до пам'яті (DMA2D) робить їх ідеальними для складних математичних розрахунків та рендерингу графіки на TFT-дисплеях [26]. Однак головним недоліком більшості масових лінійок STM32 у контексті даного проекту є відсутність інтегрованого бездротового модуля Wi-Fi. Для реалізації IoT-функцій необхідна розробка складної плати із зовнішнім мережевим трансивером або використання AT-модемів, що економічно не завжди виправдано для бюджетних теплогенераторів.

1.7.3 32-бітні IoT-мікроконтролери (на прикладі ESP32)

Платформа ESP32 від Espressif Systems побудована на базі двоядерної архітектури Tensilica Xtensa LX6 із тактовою частотою до 240 МГц. Ця архітектура вирішує проблему розподілу ресурсів: одне ядро можна жорстко виділити під задачі реального часу (опитування DS18B20, ПІД-регулятор, генерація ШІМ), а друге ядро — виключно для підтримки мережевого стеку TCP/IP, MQTT та оновлень по повітрю (OTA) [27]. Наявність вбудованого Wi-Fi/BLE трансивера, апаратного FPU та великого обсягу пам'яті (520 КБ SRAM) робить цю платформу самодостатньою як для точних розрахунків, так і для підключення SPI-дисплеїв та реалізації повноцінного IoT-вузла без зовнішніх модулів.

Таблиця 1.2 - Порівняльна характеристика мікроконтролерних платформ

Характеристика / Критерій	Arduino Mega 2560	STM32 (Cortex-M4)	ESP32 (Xtensa)
Архітектура ядра	8-bit AVR	32-bit ARM	32-bit (Dual-Core)
Тактова частота	16 МГц	84 – 168 МГц	160 – 240 МГц
Апаратний FPU (математика)	Ні (емуляція)	Так (Single Precision)	Так (Single Precision)
Інтегрований Wi-Fi / IoT	Ні	Ні (потребує PHY/MAC)	Так (Wi-Fi 802.11 b/g/n)
Обсяг RAM (для НМІ/графіки)	8 КБ (Критично мало)	96 – 256 КБ	520 КБ
Жорсткий реальний час (RTOS)	Так (Bare-metal)	Так (FreeRTOS)	Так (FreeRTOS)
Енергоспоживання / Вартість	Низьке / Низька	Низьке / Середня	Низьке / Низька

1.8 Формування технічних вимог

На основі проведеного в попередніх підрозділах системного аналізу специфіки об'єкта керування (твердопаливного котла), методів вимірювання, математичних алгоритмів дискретного ПД-регулювання температури теплоносія та технологій Інтернету речей, сформовано зведений перелік жорстких технічних вимог до компонентної бази. Ці вимоги є визначальними критеріями для остаточного вибору конкретних електронних модулів та розробки електричної принципової схеми системи керування.

Увесь комплекс апаратного забезпечення повинен задовольняти експлуатаційним та архітектурним критеріям, наведеним у таблиці 1.3

Таблиця 1.3 - Список технічних вимог

Підсистема	Критерій оцінки	Технічна вимога
Мікропро- цесорний при- стрій (MCU)	Обчислювальна потужність	32-бітна архітектура з наявністю апаратного співпро- цесора (FPU) для точного розрахунку дискретного ПІД-закону з плаваючою комою.
	Багатозадачність (RTOS)	Наявність мінімум двох фізичних ядер для апаратного розділення критичних алгоритмів керування (ТАУ) та обслуговування мережевих протоколів.
	Оперативна пам'ять	SRAM не менше 300 КБ для буферизації пакетів MQTT, роботи IoT-бібліотек та рендерингу графічно- го інтерфейсу (GUI).
Первинні пере- творювачі (Датчики)	Тип та інтерфейс	Інтегральні напівпровідникові сенсори із вбудованим АЦП та передачею даних за цифровим завадостійким протоколом (наприклад, 1-Wire).
	Метрологічні ха- рактеристики	Робочий температурний діапазон 0...125 °C; абсолют- на похибка вимірювання не більше ± 0.5 °C.
Керування ви- конавчими ме- ханізмами	Шнековий живи- льник (Низькоча- стотна ШІМ)	Напівпровідникові контактори (SSR) з детектором переходу фази через нуль (Zero-Cross) для безіскрової комутації індуктивного навантаження.
	Турбіна наддуву (Фазове регулюва- ння)	Симісторний модуль (Triac) із розпізнаванням перети- ну нуля та обов'язковою оптичною гальванічною розв'язкою ланцюгів керування.
Людино-машин- ний інтерфейс	Візуалізація даних	Компактна TFT або OLED матриця для локального виведення температурних показників та статусу мере- жі.
	Інтерфейс підклю- чення	Високошвидкісна послідовна шина (SPI або I2C) для мінімізації кількості задіяних портів вводу-виводу.
Система живле- ння та безпеки	Перетворення напруги	Надійний імпульсний перетворювач AC/DC для пони- ження мережевих 230 В у стабілізовані 5 В та 3.3 В постійного струму.
	Електрична без- пека	Повна гальванічна ізоляція низьковольтної мікропро- цесорної логіки від силових кіл 230 В для захисту від пробою.

Висновок до розділу

У першому розділі проведено детальний системний аналіз процесу керування твердопаливним котлом. Обґрунтовано необхідність переходу від класичних релейних алгоритмів до дискретного ПД-регулювання температури теплоносія, що дозволяє значно підвищити енергоефективність установки. Виконано порівняльний аналіз методів вимірювання температури, мережевих протоколів (перевагу надано MQTT), IoT-платформ та мікропроцесорних платформ. На основі цих досліджень було сформовано вичерпний перелік технічних вимог до апаратної частини (див. таблиці 1.3). Отримані результати є повноцінною теоретичною та нормативною базою для практичної реалізації системи, що буде детально розкрито у наступному розділі.

2 РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ ТА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

2.1 Аналіз параметрів об'єкта автоматизації

Об'єктом автоматизації є твердопаливний котел із шнековою подачею палива та турбіною наддуву. Основні технологічні параметри системи визначають вимоги до датчиків, виконавчих механізмів і алгоритму керування.

Основною регульованою величиною є температура теплоносія. Температура приміщення використовується як додатковий контрольний параметр, а рівень палива — як інформаційний параметр для попередження користувача.

Таблиця 2.1 - Основні параметри об'єкта автоматизації

Параметр	Призначення в системі
Температура теплоносія	Основна регульована величина для ПІД-регулятора; використовується для керування інтенсивністю горіння та контролю перегріву [7].
Температура приміщення	Додатковий контрольний параметр для оцінювання фактичного теплового стану приміщення [7].
Рівень палива в бункері	Контроль залишку палива та формування попередження про необхідність дозавантаження [28].
Потужність турбіни наддуву	Зміна кількості повітря, що подається в зону горіння; виконавчий вплив для регулювання інтенсивності горіння [29], [30].
Стан шнекового живильника	Періодичне ввімкнення двигуна подачі палива відповідно до алгоритму дозування [31].
Режим роботи системи	Вибір автоматичного або ручного режиму, передавання телеметрії та приймання команд користувача [27].
Аварійний стан	Виявлення перегріву, помилки датчиків або некоректної роботи виконавчих механізмів; вимкнення навантажень у критичних режимах.

2.2 Розробка структурної схеми

Структурна схема відображає склад основних вузлів пристрою та зв'язки між вимірювальною, керуючою, виконавчою й живильною підсистемами. На цьому рівні не деталізуються номінали компонентів, а фіксуються функціональні

блоки, напрями передавання сигналів і межі між низьковольтною та силовою частинами. Структурна схема для розроблюваного пристрою зображена на рисунку 2.1.

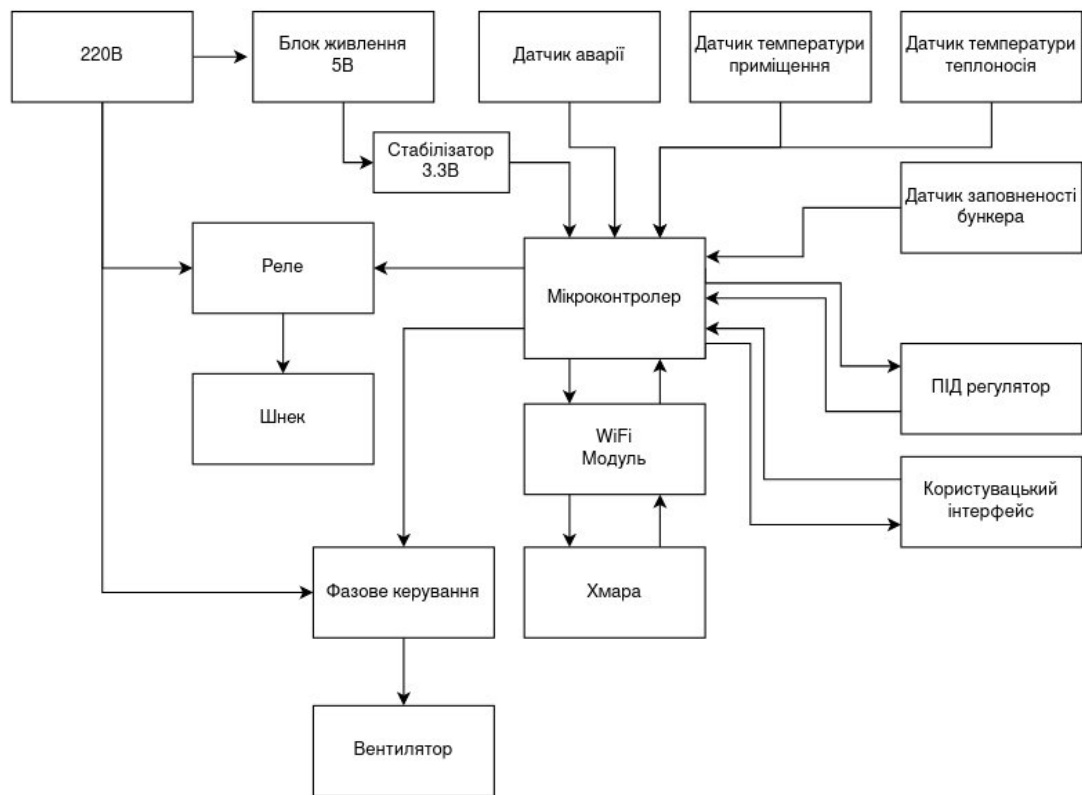


Рисунок 2.1 - Структурна схема автоматизованого регулятора опалення

Архітектура базується на централізованому керуванні: обраний контролер приймає сигнали датчиків, обчислює керуючі впливи та формує команди для турбіни, шнека, локального інтерфейсу й модуля зв'язку.

Пристрій поділяється на п'ять підсистем: живлення, мікроконтролерне ядро, збір даних, силова комутація та НМІ. Таке розділення спрощує проєктування, налагодження і подальшу модернізацію.

2.3 Розробка схеми автоматизації

Схема автоматизації розроблюваного регулятора призначена для узагальненого відображення основного контуру автоматичного керування температурою теплоносія. Вона акцентує увагу на логіці проходження сигналів у замкненій системі керування.

Об'єктом керування (ОК) в системі виступає твердопаливний котел та контур теплоносія. Керування виконується системою керування (СК) яка складається з: регулятора (мікроконтролера), який розраховує керуючі сигнали на основі отриманих даних з датчиків зворотного зв'язку. Для розрахунку керв'їних сигналів на турбіну наддуву використовується дискретний ПІД-регулятор, а шнек керується низькочастотним ШІМ; Та виконавчих механізмів (ВМ) – шнек та турбіна наддуву.

Зворотній зв'язок у системі формується за допомогою датчиків температури теплоносія та приміщення. Збуренням в такій системі вважається зміна температури в приміщенні, коливання якості палива та зміна темнового навантаження. Схема автоматизації приладу зображена на рисунку 2.2.

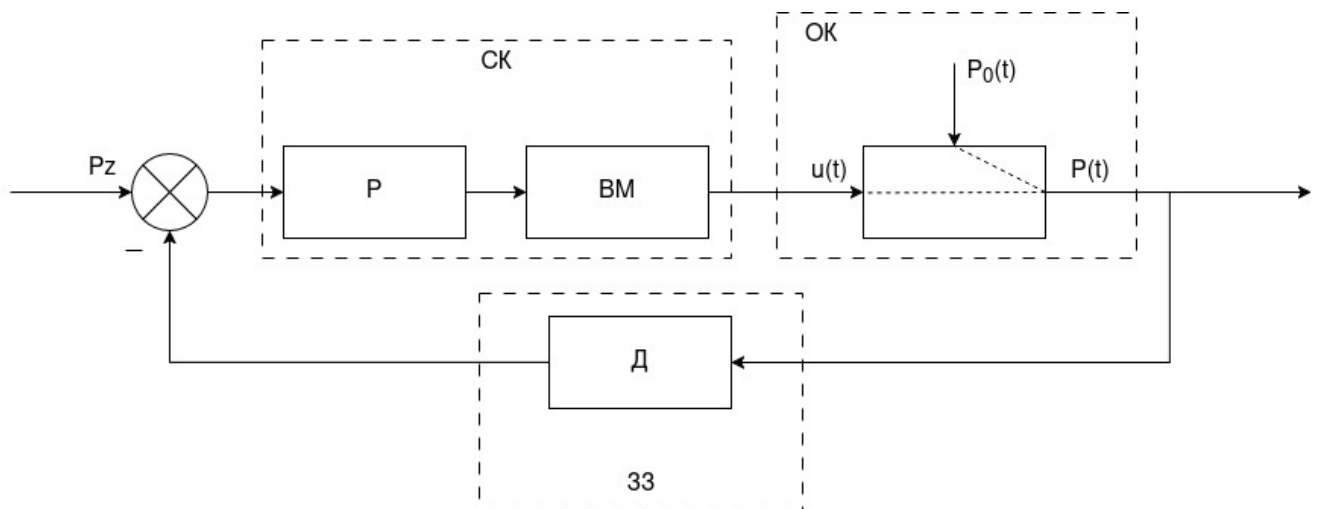


Рисунок 2.2 - Схема автоматизації регулятора температури теплоносія твердопаливного котла

2.4 Опис контурів контролю, регулювання та керування

Контур регулювання температури теплоносія є основним контуром системи. Він включає датчик температури, мікроконтролер із дискретним ПІД-регулятором, симісторний канал керування турбіною наддуву та канал періодичного керування шнековим живильником.

Контур контролю температури приміщення використовує окремий датчик і призначений для оцінювання фактичного теплового стану приміщення. Його покази можуть використовуватися для індикації, віддаленого моніторингу та коригування режиму роботи системи.

Контур контролю рівня палива реалізується ультразвуковим датчиком. Він визначає відстань до поверхні пелет у бункері та формує інформацію про залишок палива для локального інтерфейсу й хмарної платформи.

Контур керування турбіною наддуву побудований на симісторному фазовому регуляторі. Він змінює інтенсивність подачі повітря в зону горіння відповідно до керуючого сигналу регулятора.

Контур керування шнековим живильником реалізований через твердотільне реле та працює за принципом низькочастотної ШІМ-комутації. Його призначенням є дозована подача палива до зони горіння.

Контур аварійного захисту забезпечує перехід системи у безпечний стан у разі перегріву, помилки датчиків або спрацювання аварійного входу. У такому режимі виконавчі механізми вимикаються, а користувач отримує відповідне повідомлення.

2.5 Вибір технічних засобів автоматизації

Вибір технічних засобів автоматизації виконано на основі сформованих вимог до системи керування, умов експлуатації в котельному приміщенні, необхідності гальванічного розділення силових і сигнальних кіл та потреби в локальному й віддаленому моніторингу. Узагальнений перелік основних технічних засобів наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 - Основні технічні засоби автоматизації

Група засобів	Тип / елемент	Місце використання	Функція
Мікроконтролерний модуль	ESP-WROOM-32	Центральне обчислювальне ядро	Опитування датчиків, ПД-регулювання, HMI, Wi-Fi/MQTT-зв'язок [27].
Датчик температури	DS18B20	Теплоносій, приміщення	Цифрове вимірювання температури за інтерфейсом 1-Wire [7].
Датчик рівня палива	JSN-SR04T	Бункер палива	Безконтактний контроль залишку пелет у бункері [28].
Локальний інтерфейс	TFT ILI9488, енкодер, кнопки	Передня панель пристрою	Відображення параметрів, зміна уставок і вибір режимів роботи [32], [33].
Комутація шнека	Fotek SSR-40 DA	Силовий канал подачі палива	Безконтактна комутація двигуна шнекового живильника [31].
Керування турбіною	ВТА16-600В, МОС3021, детектор нуля	Силовий канал наддуву	Фазове регулювання потужності турбіни з оптронною розв'язкою [29], [30], [34].
Живлення	Mean Well IRM-10-5, AMS1117-3.3	Підсистема енергозабезпечення	Перетворення 230 В АС у стабілізовані 5 В і 3,3 В [35], [36].

Обрана елементна база забезпечує виконання основних функцій регулятора: вимірювання температури й рівня палива, формування керуючих впливів на турбіну та шнек, локальну взаємодію з користувачем, віддалений моніторинг і апаратне розділення низьковольтної логіки від силових кіл 230 В.

Висновки до розділу

У другому розділі визначено основні параметри об'єкта автоматизації та сформовано структуру автоматизованого регулятора опалення. Головною регульованою величиною прийнято температуру теплоносія, а додатковими контрольованими параметрами — температуру приміщення та рівень палива в бункері. Розроблено структурну схему пристрою, яка відображає взаємодію мікроконтро-

лера з датчиками, інтерфейсом користувача, виконавчими механізмами та хмарною IoT-платформою.

Також розроблено функціональну схему та схему автоматизації, що описують інформаційні зв'язки й логіку замкненого регулювання температури теплоносія. Стисло охарактеризовано контури контролю, регулювання та керування, включно з контурами температури теплоносія, температури приміщення, рівня палива, керування турбіною, керування шнеком та аварійного захисту. За результатами аналізу обрано технічні засоби автоматизації, які забезпечують реалізацію вимірювальних, обчислювальних, виконавчих і комунікаційних функцій

3 МОДЕЛЮВАННЯ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ ТА СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРА

3.1 Постановка задачі моделювання

У цьому розділі виконується моделювання теплового об'єкта керування — твердопаливного котла зі шнековою подачею палива та турбіною наддуву.

Мета моделювання — отримати спрощену модель, придатну для попереднього вибору структури регулятора, розрахунку початкових параметрів ПІД-регулятора та аналізу перехідних процесів.

3.2 Структурно-параметрична схема об'єкта керування

Структурно-параметрична схема об'єкта керування повинна відображати основні входні, вихідні та збурювальні параметри твердопаливного котла. До керуючих впливів належать потужність турбіни наддуву, що змінює кількість повітря в зоні горіння, та режим роботи шнекового живильника, який визначає середню продуктивність подачі палива. Вихідною величиною є температура теплоносія, а основними збуреннями — теплове навантаження системи опалення, якість і вологість палива, зміна тяги та початковий тепловий стан котла.

Замкнений контур керування можна подати так: задавач температури формує уставку, мікроконтролер ESP-WROOM-32 порівнює її з виміряною температурою теплоносія, обчислює керуючий вплив за дискретним ПІД-алгоритмом і подає сигнали на симісторний регулятор турбіни та твердотільне реле шнекового живильника. Об'єкт керування перетворює зміну подачі повітря та палива у зміну тепловиділення, що впливає на температуру теплоносія. Зворотний зв'язок формується датчиком температури DS18B20.

Таблиця 3.1 - Основні параметри структурно-параметричної схеми

Група параметрів	Позначення	Фізичний зміст	Роль у моделі
Задана величина	$T_{\text{зад}}$	Задана температура теплоносія	Вхід системи керування
Регульована величина	$T_{\text{т}}$	Фактична температура теплоносія	Вихід об'єкта керування
Керуюча дія	$u_{\text{в}}$	Потужність турбіни наддуву	Вплив на інтенсивність горіння
Керуюча дія	$u_{\text{ш}}$	Час роботи шнекового живильника	Вплив на подачу палива
Узагальнений керуючий вплив	u	Вихід ПІД-регулятора, 0...100 %	Вхід моделі об'єкта
Збурення	$q_{\text{н}}$	Теплове навантаження системи опалення	Зовнішній вплив на температуру
Збурення	$q_{\text{п}}$	Якість, вологість і фракція палива	Вплив на тепловиділення
Зворотний зв'язок	$T_{\text{вим}}$	Виміряна температура теплоносія	Сигнал з датчика DS18B20

3.3 Спрощена теплова модель твердопаливного котла

Для інженерного аналізу твердопаливний котел розглядається як тепловий об'єкт із зосередженими параметрами. У такому наближенні температура теплоносія в контрольній точці описується балансом між тепловою потужністю, що надходить від процесу горіння, та тепловою потужністю, яка відводиться системою опалення і втрачається у навколишнє середовище.

Загальний вигляд теплового балансу для такого об'єкта можна подати у формі:

$$C \cdot \frac{dT_{\text{т}(t)}}{dt} = Q_{\text{гор}}(t) - Q_{\text{від}}(t) - Q_{\text{вт}}(t) \quad (3.1)$$

де C — еквівалентна теплоємність котла і теплоносія;

$T_{\text{т}(t)}$ — температура теплоносія;

$Q_{\text{гор}}(t)$ — теплова потужність, що формується процесом горіння;

$Q_{\text{від}}(t)$ — потужність, яка відводиться в систему опалення;

$Q_{\text{вт}}(t)$ — теплові втрати.

Для отримання моделі, придатної для синтезу регулятора, рівняння (3.1) лінеаризується в околі робочої точки. Робочою точкою приймається температура теплоносія $T_0 = 70$ °C та узагальнений керуючий вплив $u_0 = 50$ %. Узагальнений керуючий вплив u відповідає виходу регулятора у відсотках і надалі перетворюється у фазове керування турбіною та час роботи шнекового живильника.

У відхиленнях від робочої точки теплова модель має вигляд:

$$C \cdot \frac{d\Delta T_{\text{т}}(t)}{dt} = K_Q \cdot \Delta u(t - \tau) - k_{\Sigma} \cdot \Delta T_{\text{е}} - \Delta Q_{\text{н}}(t) \quad (3.2)$$

де $\Delta T_{\text{т}}(t)$ — відхилення температури теплоносія від робочої точки;

$\Delta u(t)$ — відхилення керуючого впливу від робочого значення;

K_Q — коефіцієнт перетворення керуючого впливу у теплову потужність;

k_{Σ} — еквівалентний коефіцієнт тепловідведення;

τ — технологічне запізнення;

$\Delta Q_{\text{н}}(t)$ — приріст теплового навантаження системи опалення.

Для попереднього розрахунку приймаються параметри, наведені в таблиці 3.2. Вони не є паспортними характеристиками конкретного котла, а використовуються як розрахункова модель для першого наближення налаштувань регулятора.

Таблиця 3.2 - Прийняті параметри спрощеної теплової моделі

Параметр	Позначення	Прийняте значення	Пояснення
Робоча температура теплоносія	T_0	70 °C	Типове значення для системи водяного опалення
Робочий керуючий вплив	u_0	50 %	Середній режим роботи турбіни та подачі палива
Еквівалентна теплоємність	C	$3,6 \cdot 10^5$ Дж/К	Враховує теплоємність води, металу котла та прилеглої частини контуру
Еквівалентне тепловідведення	k_Σ	600 Вт/К	Враховує корисне відведення тепла в систему опалення і втрати
Коефіцієнт теплової дії керування	K_Q	240 Вт/%	Зміна теплової потужності при зміні керуючого впливу на 1 %
Транспортне запізнення	τ	80 с	Затримка реакції теплоносія після зміни подачі повітря/палива

З наведених значень впливають два основні параметри моделі: стала часу теплового об'єкта та коефіцієнт передачі за каналом керування. Стала часу визначається як:

$$T_{\text{тоб}} = \frac{C}{k_\Sigma} = \frac{3,6 \cdot 10^5}{600} = 600 \text{ с} \quad (3.3)$$

Коефіцієнт передачі за каналом «керуючий вплив — температура теплоносія» дорівнює:

$$K_{\text{об}} = \frac{K_Q}{k_\Sigma} = \frac{240}{600} = 0,4 \text{ } ^\circ\text{C}/\% \quad (3.4)$$

Отже, збільшення узагальненого керуючого впливу на 10 % у сталому режимі орієнтовно підвищує температуру теплоносія на 4 °C. Така оцінка є достатньою для попереднього синтезу регулятора та подальшого моделювання замкненого контуру.

3.4 Математичний опис статичного режиму роботи

Статичний режим відповідає такому стану, у якому температура теплоносія та інші параметри не змінюються в часі. У цьому випадку похідна температури дорівнює нулю, а рівняння теплового балансу переходить у рівняння рівноваги між тепловиділенням і тепловідведенням:

$$Q_{\text{гор}0} = Q_{\text{від}0} + Q_{\text{вт}0} \quad (3.5)$$

У лінеаризованій формі статична залежність температури теплоносія від керуючого впливу описується рівнянням:

$$\Delta T_{\text{т}} = K_{\text{об}} \cdot \Delta u \quad (3.6)$$

З урахуванням прийнятої робочої точки $T_0 = 70 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $u_0 = 50 \text{ \%}$ та коефіцієнта передачі $K_{\text{об}} = 0,4 \text{ }^{\circ}\text{C}/\%$ статична характеристика має вигляд:

$$T_{\text{т}}(u) = 70 + 0,4 \cdot (u - 50) \quad (3.7)$$

Розрахункові значення статичної характеристики для кількох значень керуючого впливу наведено в таблиці 3.3. Ці значення можуть бути використані для подальшої побудови графіка статичної характеристики без додаткових розрахунків. Графічне зображення статичної характеристики об'єкта наведено на рисунку 3.1.

Таблиця 3.3 - Розрахункова статична характеристика об'єкта керування

Керуючий вплив $u, \%$	Відхилення $\Delta u, \%$	Температура теплоносія $T_{\text{т}}, ^{\circ}\text{C}$	Пояснення режиму
30	-20	62	Знижена теплова потужність
40	-10	66	Режим часткового навантаження
50	0	70	Робоча точка
60	+10	74	Підвищена теплова потужність
70	+20	78	Інтенсивний режим горіння

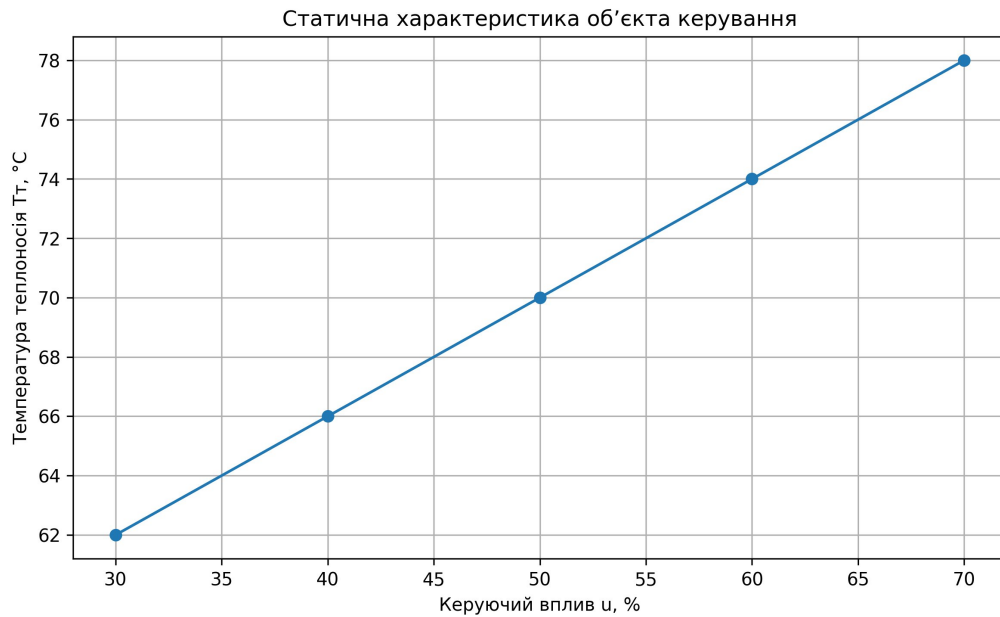


Рисунок 3.1 - Статична характеристика об'єкта керування

Отримана статична характеристика є монотонно зростаючою: збільшення керуючого впливу приводить до збільшення усталеної температури теплоносія. Це підтверджує фізичну коректність обраного каналу керування. У реальному котлі залежність може бути нелінійною через насичення процесу горіння, зміну тяги, неоднорідність палива та обмеження виконавчих механізмів. Проте в околі робочої точки лінійна апроксимація є прийнятною для початкового синтезу ПД-регулятора.

3.5 Математичний опис динамічного режиму роботи

Динамічний режим характеризує зміну температури теплоносія в часі після зміни керуючого впливу або появи збурення. Для твердопаливного котла динамічна реакція є повільною, оскільки процес горіння та теплообмін мають значну інерційність. Саме ця властивість обґрунтовує необхідність використання ПД-регулятора замість простого двопозиційного керування.

Якщо збурювальну дію тимчасово не враховувати, рівняння (3.8) набуває вигляду:

$$C \cdot \frac{d\Delta T_T}{dt} + k_\Sigma \cdot \Delta T_T(t) = K_Q \cdot \Delta u(t - \tau) \quad (3.8)$$

Після перетворення Лапласа при нульових початкових умовах отримуємо:

$$(C \cdot p + k_{\Sigma}) \cdot \Delta T_{\tau}(p) = K_Q \cdot e^{-\tau p} \cdot \Delta u(p) \quad (3.9)$$

Звідси передатна функція об'єкта за каналом керування має вигляд:

$$W_{об}(p) = \frac{\Delta T_{\tau}(p)}{\Delta u(p)} = \frac{K_Q}{k_{\Sigma}} \cdot e^{-\tau p} / \left(\frac{C}{k_{\Sigma}} \cdot p + 1 \right) \quad (3.10)$$

З урахуванням позначень $K_{об} = \frac{K_Q}{k_{\Sigma}}$ та $T_{об} = \frac{C}{k_{\Sigma}}$ отримаємо стандартну форму аперіодичної ланки першого порядку із запізненням:

$$W_{об}(p) = \frac{K_{об} \cdot e^{-\tau p}}{T_{об} \cdot p + 1} \quad (3.11)$$

За прийнятими параметрами моделі:

$$K_{об} = 0,4 \text{ } ^\circ\text{C}/\% \quad T_{об} = 600 \text{ с}, \quad \tau = 80 \text{ с}. \quad (3.12)$$

Така модель відображає дві ключові властивості твердопаливного котла: повільну аперіодичну зміну температури та наявність затримки реакції після зміни керуючого впливу. Для чисельного моделювання запізнення може бути реалізоване як транспортна затримка в дискретній моделі або наближено замінене апроксимацією Паде першого порядку:

$$e^{-80p} \approx \frac{1 - 40p}{(1 + 40p)} \quad (3.13)$$

Це дає можливість використовувати модель у середовищах MATLAB, Mathcad, Python або інших програмних засобах для аналізу перехідних процесів і налаштування регулятора.

3.6 Отримання передатної функції об'єкта керування

Передатна функція потрібна для подальшого синтезу регулятора та аналізу якості замкненої системи. Враховуючи інерційність твердопаливного котла, доцільно використовувати спрощену передатну функцію першого порядку із запізненням, отриману у підрозділі 3.5. Така модель не описує всі фізико-хімічні особли-

вості горіння твердого палива, однак є придатною для попереднього інженерного розрахунку системи керування.

Коефіцієнт передачі об'єкта може бути визначений як відношення зміни усталеної температури до зміни керуючого впливу:

$$K_{об} = \frac{\Delta T_t}{\Delta u} \quad (3.14)$$

З таблиці 3.3 видно, що при зміні керуючого впливу з 50 % до 60 % температура теплоносія змінюється з 70 °С до 74 °С. Тому:

$$K_{об} = (74 - 70) / (60 - 50) = 4 / 10 = 0,4 \text{ } ^\circ\text{C}/\%. \quad (3.15)$$

Тоді передатна функція об'єкта керування у прийнятій робочій області має вигляд:

$$W_{об}(p) = 0,4 \cdot \frac{e^{-80p}}{600p + 1} \quad (3.16)$$

Для моделювання без явного блоку транспортного запізнення передатну функцію можна подати з використанням апроксимації Паде:

$$W_{об}(p) \approx 0,4 \cdot (1 - 40p) / ((600p + 1)(40p + 1)) \quad (3.17)$$

Отримана модель є базовою для подальшого синтезу регулятора. У реальній системі її параметри слід уточнити за експериментальною кривою розгону: подати ступінчасту зміну керуючого впливу, зареєструвати зміну температури теплоносія, визначити усталений приріст температури, сталу часу та запізнення.

3.7 Аналіз перехідної характеристики об'єкта

Перехідна характеристика об'єкта показує зміну температури теплоносія після ступінчастої зміни керуючого впливу. Для теплового об'єкта очікується плавне аперіодичне зростання або спадання температури з помітним запізненням.

За формою цієї характеристики можна оцінити інерційність котла, час виходу на усталений режим і придатність об'єкта до автоматичного регулювання.

Для передатної функції (3.16) реакція об'єкта на ступінчасту зміну керуючого впливу Δu визначається виразом:

$$\Delta T_{\tau}(t) = 0, \quad \text{при } t < \tau, \quad (3.18)$$

$$\Delta T_{\tau}(t) = K_{об} \cdot \Delta u \cdot (1 - e^{-\frac{t-\tau}{T_{об}}}), \quad \text{при } t \geq \tau \quad (3.19)$$

Якщо прийняти ступінчасту зміну керуючого впливу $\Delta u = 10 \%$, усталений приріст температури становитиме:

$$\Delta T_{уст} = K_{об} \cdot \Delta u = 0,4 \cdot 10 = 4 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (3.20)$$

Після одного значення сталої часу від моменту завершення запізнення температура досягає приблизно 63,2 % від усталеного приросту:

$$\Delta T(\tau + T_{об}) = 0,632 \cdot 4 \approx 2,53 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (3.21)$$

Після трьох сталих часу температура досягає приблизно 95 % усталеного значення:

$$\Delta T(\tau + 3T_{об}) = 0,95 \cdot 4 \approx 3,8 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (3.22)$$

Отже, для прийнятої моделі реакція об'єкта на зміну потужності є повільною: запізнення становить близько 80 с, а час досягнення приблизно 95 % нового усталеного значення — близько 1880 с, тобто приблизно 31 хв. Це підтверджує значну теплову інерційність об'єкта та необхідність плавного регулювання без різких частих перемикань виконавчих механізмів. Графічне зображення перехідної характеристики ОК наведено на рисунку 3.2.

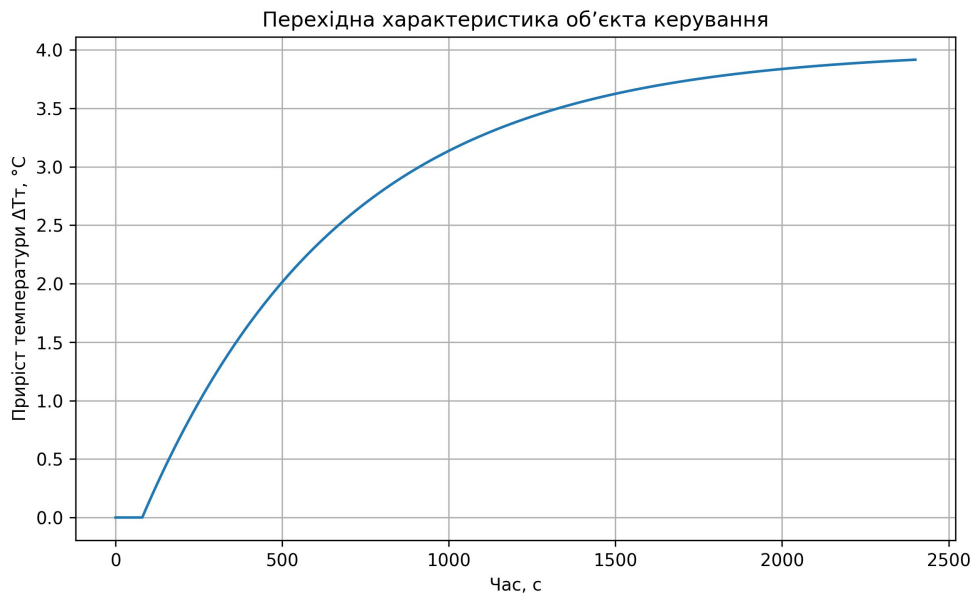


Рисунок 3.2 - Перехідна характеристика об'єкта керування за каналом «керування – температура теплоносія»

3.8 Вибір структури регулятора температури

На основі проведеного аналізу методів регулювання було зроблено, для розроблюваного пристрою доцільніше буде використовувати ПІД-регулятор.

З огляду на те, що розроблюваний пристрій реалізується на мікроконтролері, регулятор повинен бути дискретним. Його вихідний сигнал доцільно подавати у відсотках від 0 до 100 %, після чого перетворювати у параметри фазового керування турбіною наддуву та час роботи шнекового живильника в межах низькочастотного циклу. Такий підхід дозволяє використовувати один узагальнений регулюючий сигнал для двох фізично різних виконавчих механізмів.

Для підвищення стійкості в реальній системі регулятор повинен мати обмеження виходу, захист від інтегрального насичення, зону нечутливості, пов'язану з похибкою датчика температури, та обмеження мінімальної потужності турбіни, нижче якої вентилятор може працювати нестабільно.

3.9 Синтез дискретного ПІД-регулятора

Синтез регулятора виконується на основі передатної функції об'єкта (3.16). Оскільки модель є аперіодичною ланкою першого порядку із запізненням, для попереднього налаштування можна використати метод реакції об'єкта, який є рі-

зновидом інженерного налаштування за кривою розгону. Для такого об'єкта початкові параметри ПІД-регулятора можна визначити за формулами Зіглера–Нікольса для об'єкта з передатною функцією першого порядку із запізненням:

$$K_p = 1,2 \cdot T_{об} / (K_{об} \cdot \tau), \quad (3.23)$$

$$T_i = 2 \cdot \tau \quad (3.24)$$

$$T_d = 0,5 \cdot \tau \quad (3.25)$$

Підставивши параметри моделі $K_{об} = 0,4 \text{ } ^\circ\text{C}/\%$, $T_{об} = 600 \text{ с}$, $\tau = 80 \text{ с}$, отримаємо:

$$K_p = 1,2 \cdot 600 / (0,4 \cdot 80) = 22,5 \text{ } \%/^\circ\text{C} \quad (3.26)$$

$$T_i = 2 \cdot 80 = 160 \text{ с} \quad (3.27)$$

$$T_d = 0,5 \cdot 80 = 40 \text{ с} \quad (3.28)$$

Метод Зіглера–Нікольса часто дає досить агресивні налаштування з помітним перерегулюванням. Для твердопаливного котла це небажано, оскільки надмірна подача повітря або палива може спричинити перегрів теплоносія. Тому для початкового практичного налаштування приймається консервативніший набір параметрів (таблиця 3.4): пропорційний коефіцієнт зменшено, інтегральний час збільшено, а диференціальний час зменшено.

Таблиця 3.4 - Початкові параметри дискретного ПІД-регулятора

Параметр	Розрахунок за методом Зіглера–Нікольса	Прийняте початкове значення	Одиниця
K_p	22,5	16	$\%/^\circ\text{C}$
T_i	160	200	с
T_d	40	30	с
$K_i = K_p/T_i$	0,1406	0,08	$\%/(^\circ\text{C} \cdot \text{с})$
$K_d = K_p \cdot T_d$	900	480	$\% \cdot \text{с}/^\circ\text{C}$
T_s	—	5	с

У дискретному вигляді похибка регулювання на k -му кроці визначається як різниця між заданою та виміряною температурою теплоносія:

$$e[k] = T_{\text{зад}} - T_{\text{вим}}[k] \quad (3.29)$$

Керуючий вплив дискретного ПДД-регулятора подається у вигляді:

$$u[k] = K_p \cdot e[k] + K_i \cdot T_s \cdot \Sigma_e[i] - K_d \cdot (PV[k] - PV[k-1])/T_s \quad (3.30)$$

де $u[k]$ — керуючий вплив регулятора;

K_p, K_i, K_d — пропорційний, інтегральний і диференціальний коефіцієнти;

T_s — період дискретизації;

$PV[k]$ — виміряне значення температури теплоносія.

З урахуванням похибки датчика DS18B20 доцільно ввести зону нечутливості приблизно $\pm 0,5$ °C. Якщо абсолютне значення похибки регулювання не перевищує цю межу, керуючий сигнал не повинен різко змінюватися, щоб не викликати зайвих коливань турбіни та шнека через незначні флуктуації показів датчика.

$$|e[k]| \leq 0,5 \text{ °C} \rightarrow \text{змiна } u[k] \text{ обмежується або не виконується} \quad (3.31)$$

Вихідний сигнал регулятора обмежується діапазоном:

$$u[k] \in [0; 100 \text{ \%}] \quad (3.32)$$

Отримане значення $u[k]$ використовується як узагальнений керуючий вплив. Для турбіни наддуву воно перетворюється у затримку відкриття клапана після переходу мережевої напруги через нуль, а для шнекового живильника — у тривалість увімкненого стану в межах низькочастотного циклу керування.

3.10 Аналіз показників якості системи керування

Після отримання моделі об'єкта та початкового налаштування регулятора необхідно оцінити якість замкненої системи керування. Для цього використовується тестова дія у вигляді зміни заданої температури теплоносія на 5 °C. Аналіз

проводиться для моделі (3.16) з параметрами регулятора, прийнятими у таблиці 3.4. Графічні результати перехідного процесу зображені на рисунку 3.3, а основні числові показники подані у вигляді таблиці (таблиця 3.5).

Таблиця 3.5 - Розрахункова оцінка показників якості замкненої системи

Показник якості	Позначення	Оцінене значення	Коментар
Тестова зміна уставки	$\Delta T_{\text{зад}}$	5 °C	Зміна заданої температури теплоносія
Час першого досягнення 95 % уставки	t_{95}	250 с	Орієнтовний час швидкого наближення до нового режиму
Максимальне перерегулювання	σ	12,6 %	Відповідає приблизно 0,63 °C для кроку 5 °C
Час регулювання в межах ± 5 %	t_p	535 с	Близько 8,9 хв для прийнятої моделі
Статична похибка	$e_{\text{ст}}$	≈ 0 °C	Усувається інтегральною складовою
Характер процесу	—	затухаючий	Коливання не підтримуються після завершення перехідного процесу

Отримані показники свідчать, що дискретний ПІД-регулятор забезпечує усунення статичної похибки та плавний вихід на нову задану температуру. Наявність помірного перерегулювання пояснюється запізненням теплового об'єкта і вибраним методом початкового налаштування. Для реального котла після експериментальних випробувань доцільно зменшити K_p або K_d , якщо перерегулювання виявиться надмірним, або зменшити T_i , якщо система надто повільно усуває статичну похибку.

Порівняно з двопозиційним керуванням ПІД-регулювання має суттєву перевагу: виконавчі механізми не працюють лише у крайніх станах «увімкнено/вимкнено», а змінюють інтенсивність горіння відповідно до поточного теплового стану системи. Це зменшує амплітуду температурних коливань, знижує

кількість різких перемикань шнека та турбіни і створює умови для економнішого використання палива.

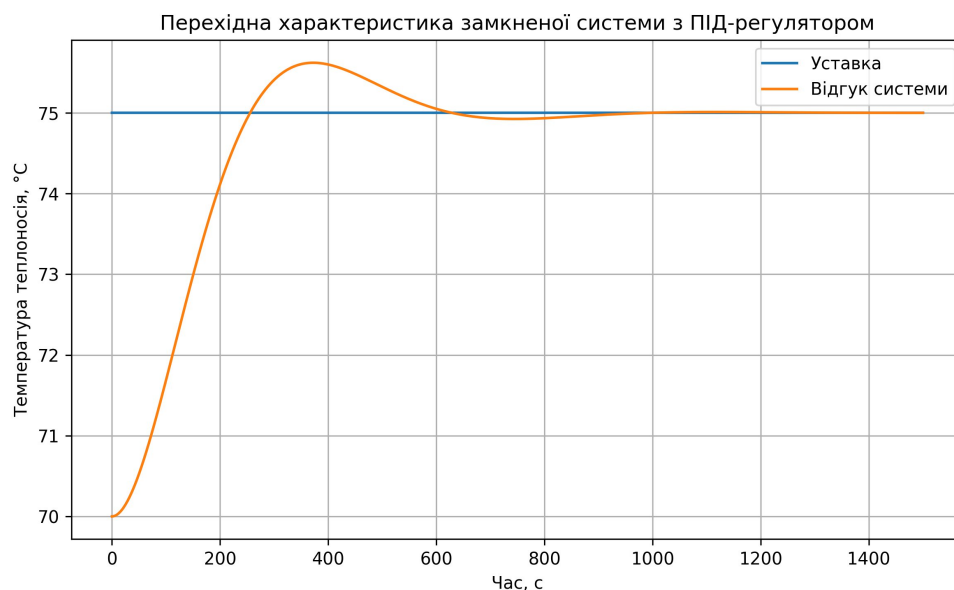


Рисунок 3.3 - Перехідна характеристика замкненої системи з дискретним ПІД-регулятором

Висновки до розділу

У третьому розділі сформовано постановку задачі моделювання автоматизованого регулятора опалення та визначено основні входні, вихідні й збурювальні параметри об'єкта керування. На основі наявного матеріалу обґрунтовано вибір температури теплоносія як головної регульованої величини, а також доцільність використання замкненого контуру керування з дискретним ПІД-регулятором.

Для попереднього інженерного аналізу твердопаливний котел подано як тепловий об'єкт із зосередженими параметрами. Сформовано рівняння теплового балансу, виконано лінеаризацію в околі робочої точки та отримано передатну функцію об'єкта керування.

На основі отриманої моделі проведено попередній синтез дискретного ПІД-регулятора. У регуляторі передбачено обмеження виходу, захист від інтегрального насичення та зону нечутливості, пов'язану з похибкою датчика температури.

Розрахункова оцінка показників якості показала, що замкнена система здатна забезпечити вихід на задану температуру без статичної похибки, з помірним

перерегулюванням та згасаючим характером перехідного процесу. Параметри регулятора мають бути уточнені для окремого котла.

4 РОЗРОБКА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМИ ТА ДРУКОВАНОЇ ПЛАТИ

4.1 Схемотехнічний синтез електричної схеми

4.1.1 Синтез підсистеми живлення та захисту

Підсистема енергозабезпечення проєктується з урахуванням складних умов експлуатації контролера в приміщеннях котельні, де комутація потужних індуктивних навантажень (мотор-редукторів, насосів, вентиляторів) створює інтенсивні кондуктивні завади та сплески напруги в живильній мережі. Схемотехнічна реалізація системи живлення (Рисунок 4.1) поділяється на три логічні каскади: вхідний захист, первинне перетворення (AC/DC) та вторинну стабілізацію з фільтрацією (DC/DC).



Рисунок 4.1 - Загальна електрична схема підсистеми енергозабезпечення

Вхідні кола та захист від перенапруг

Безпосередньо на вході мережі змінного струму (230 В, 50 Гц) інтегровано каскад пасивного захисту (Рисунок 4.2). Його ключовими елементами є плавкий запобіжник (Fuse) швидкої дії та металооксидний варистор (VDR, типу 10D431K), увімкнений паралельно лінії навантаження.

Необхідність варистора обґрунтована його нелінійною вольт-амперною характеристикою [37]. У нормальному режимі експлуатації він має високий імпеданс і не впливає на роботу пристрою. Проте у випадку виникнення високовольт-

них комутаційних чи грозових сплесків, опір варистора миттєво падає практично до нуля, шунтуючи надлишкову енергію завади. Математична модель поглинання енергії імпульсу варистором описується інтегральним виразом (4.1).

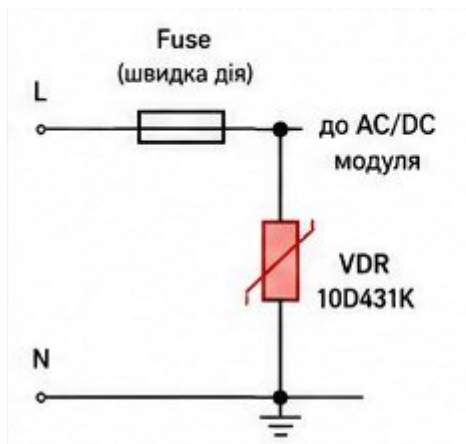


Рисунок 4.2 - Електрична схема захисту від перенапруги використовуючи плавкий запобіжник та варистор

$$E = \int_0^{\tau} v(t) \cdot i(t) dt \quad (4.1)$$

Де $v(t)$ – миттєва напруга на варисторі,

$i(t)$ – струм через варистор,

τ – тривалість імпульсу

У випадку тривалої аварійної перенапруги струм короткого замикання призводить до перегорання вхідного плавкого запобіжника, що апаратно захищає первинний імпульсний модуль живлення Mean Well IRM-10-5 від руйнування [6], [35], [37].

Вторинна стабілізація (LDO)

Оскільки головним обчислювальним ядром є мікроконтролер ESP-WROOM-32, який вимагає живлення значенням 3.3 В постійного струму, на виході 5-вольтового модуля Mean Well IRM-10-5 встановлюється лінійний стабілізатор із низьким рівнем падіння напруги (LDO) типу AMS1117-3.3 (рисунок 4.3) [35], [36].

Теплове розсіювання на регуляторі є критичним параметром і розраховується за формулою (4.2).

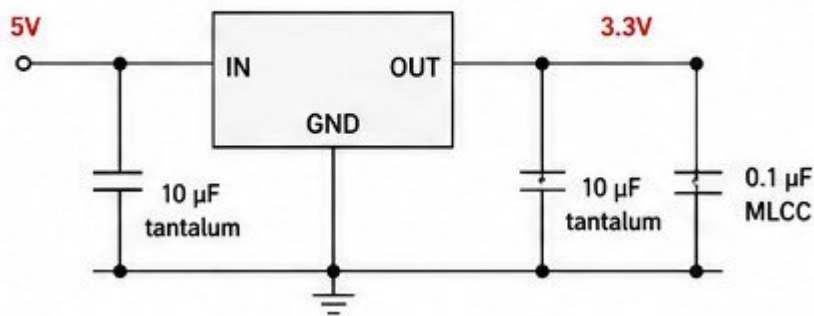


Рисунок 4.3 - Електрична схема реалізації вторинної стабілізації живлення

$$P_D = (V_{IN} - V_{OUT}) \cdot I_{OUT} + V_{IN} \cdot I_{GND} \quad (4.2)$$

Де V_{IN} – вхідна напруга (5В),

V_{OUT} – вихідна напруга (3.3В),

I_{OUT} – струм навантаження,

I_{GND} – власний струм споживання.

Ключовою інженерною проблемою при проектуванні живлення мікроконтролерів сімейства ESP32 є їхнє імпульсне енергоспоживання. Відповідно до офіційної специфікації «ESP32 Hardware Design Guidelines» від компанії Espressif [38], під час активної передачі даних по Wi-Fi (режим TX) піковий струм споживання мікроконтролера може короткочасно зростати до 500–600 мА. Якщо фільтруючі ємності не здатні миттєво компенсувати цей імпульс, відбувається динамічне просідання вихідної напруги стабілізатора (Voltage Droop). При падінні потенціалу нижче критичної позначки у 2.7 В спрацьовує вбудований апаратний детектор (Brownout Detector), що призводить до циклічного скидання і перезавантаження обчислювального ядра.

Для усунення цього явища та забезпечення абсолютної стабільності контуру зворотного зв'язку стабілізатора реалізовано комбіновану схему фільтрації на базі танталових та багатошарових керамічних конденсаторів (MLCC) (Рисунок 4.4):



Рисунок 4.4 - Комбінована фільтрація на вході LDO

– Танталові конденсатори (10 мкФ – 22 мкФ): Встановлюються безпосередньо на виході AMS1117-3.3. Вибір танталу обґрунтований вимогами до значення еквівалентного послідовного опору (ESR). Звичайні електролітичні конденсатори мають надто високий ESR, а сучасні керамічні — занадто низький, що може викликати автогенерацію (самозбудження) внутрішнього операційного підсилювача [39].

– Керамічні шунтуючі конденсатори (0.1 мкФ): Танталові ємності ефективні проти низькочастотних пульсацій, але через власну паразитну індуктивність виводів втрачають ефективність на високих частотах. Для придушення високочастотного електромагнітного шуму паралельно танталовому конденсатору встановлюється керамічний конденсатор. Розрахунок спаду його реактивного опору (імпедансу) від частоти завади f визначається виразом:

$$Z_c = \frac{1}{2\pi fC} \quad (4.3)$$

Боротьба із зовнішніми електромагнітними чинниками (Decoupling)

Для захисту мікропроцесора від кондуктивних завад, що поширюються по мідних доріжках друкованої плати від силових симісторних ключів, застосовано принцип локального розв'язуючого шунтування (Decoupling) (Рисунок 4.5). Згідно з рекомендаціями виробника, додаткові керамічні конденсатори ємністю 100 нФ обов'язково розміщуються на платі у безпосередній близькості (не більше

5 мм) до виводів живлення 3V3 та GND модуля ESP-WROOM-32 [40]. Вони створюють низькоімпедансний шлях на землю для високочастотних завад, виключаючи їхнє проникнення всередину обчислювального кристала.

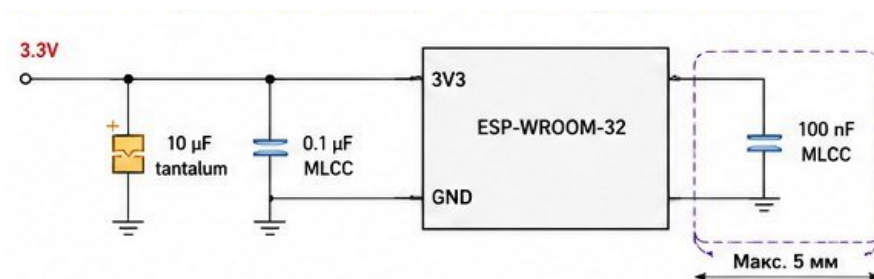


Рисунок 4.5 - Локальне розв'язуюче шунтування

Розрахунок споживання низьковольтної частини пристрою

У проєкті як основне джерело живлення використовується імпульсний AC/DC-модуль Mean Well IRM-10-5, який формує стабілізовану напругу 5 В та забезпечує вихідний струм до 2 А при максимальній вихідній потужності 10 Вт [35].

Найбільш критичним споживачем є модуль ESP-WROOM-32, оскільки під час активної передачі даних через Wi-Fi його струм може короткочасно зростати до 500–600 мА. Орієнтовний баланс споживання шини 3,3 В наведено в таблиці 4.1; для оцінки використано довідкові дані модулів ESP32, ILI9488, DS18B20, оптосимістора МОС3021 та твердотільного реле [40], [32], [7], [29], [31].

Таблиця 4.1 - Розрахунок струму споживання шини 3,3 В

Споживач	Кількість	Орієнтовний струм одного елемента, А	Сумарний струм, А
ESP-WROOM-32 у режимі Wi-Fi TX	1	0,600	0,600
Логічна частина TFT-дисплея ILI9488	1	0,030	0,030
Датчики температури DS18B20	3	0,0015	0,0045
Керуючі входи оптронів і SSR	2	0,010–0,015	0,025
Енкодер, підтягувальні резистори та допоміжна логіка	1	0,005	0,005
Разом			0,665

З урахуванням коефіцієнта запасу $k_3 = 1,2$:

$$I_{3V\text{розр}} = k_3 \cdot I_{3V} = 1,2 \cdot 0,665 = 0,797 \text{ А} \quad (4.4)$$

Отже, стабілізатор напруги 3,3 В повинен забезпечувати струм не менше 0,8 А. Для підвищення енергоефективності та зменшення нагрівання доцільно формувати напругу 3,3 В за допомогою імпульсного DC/DC-перетворювача 5В у 3,3В зі струмом навантаження не менше 1 А.

Потужність, що споживається навантаженням шини 3,3 В, становить:

$$P_{3V} = U_{3V} \cdot I_{3V\text{розр}} = 3,3 \cdot 0,796 = 2,63 \text{ Вт} \quad (4.5)$$

Якщо прийняти ККД DC/DC-перетворювача $\eta_{DC} = 0,85$, то потужність, яку він споживатиме від шини 5 В, становитиме:

$$P_{5DC} = \frac{P_{3V}}{\eta_{DC}} = \frac{2,63}{0,85} = 3,09 \text{ Вт} \quad (4.6)$$

Відповідний струм від шини 5 В:

$$I_{5DC} = \frac{P_{5DC}}{U_5} = \frac{3,09}{5} = 0,618 \text{ А} \quad (4.7)$$

Окрім перетворювача 3,3 В, від шини 5 В живляться ультразвуковий датчик рівня палива, підсвічування дисплея та елементи сигналізації. Орієнтовний баланс споживання шини 5 В наведено в таблиці 4.2; для оцінки враховано довідкові дані ультразвукового датчика JSN-SR04T, TFT-дисплея ILI9488 та модуля живлення [28], [32], [35].

Таблиця 4.2 - Розрахунок струму споживання шини 5 В

Споживач	Кількість	Орієнтовний струм одного елемента, А	Сумарний струм, А
DC/DC-перетворювач 5 В → 3,3 В	1	0,618	0,618
Ультразвуковий датчик JSN-SR04T	1	0,030	0,030
Підсвічування TFT-дисплея	1	0,120	0,120
Світлова або звукова аварійна сигналізація	1	0,030	0,030
Разом			0,798

Відповідна вихідна потужність джерела живлення:

$$P_{5\text{розр}} = U_5 \cdot I_{5\text{розр}} = 5 \cdot 0,798 = 3,99 \text{ Вт} \quad (4.8)$$

Таким чином, розрахункове споживання низьковольтної частини пристрою становить приблизно 4 Вт. Згідно зі специфікацією, модуль Mean Well IRM-10-5 має максимальну вихідну потужність 10 Вт, тому коефіцієнт запасу за потужністю становить [35]:

$$k_p = \frac{P_{IRM}}{P_{5\text{розр}}} = \frac{10}{3,99} = 2,51 \quad (4.9)$$

Отриманий запас є достатнім для стабільної роботи пристрою в пікових режимах, зокрема під час активної передачі даних через Wi-Fi, оновлення дисплея та одночасного спрацювання виконавчих виходів.

Оцінімо потужність, що споживається модулем живлення від мережі 230 В. Для Mean Well IRM-10-5 приймаємо ККД $\eta_{IRM} = 0,77$ [35]:

$$P_{in} = \frac{P_{5\text{розр}}}{\eta_{IRM}} = \frac{3,99}{0,77} = 5,18 \text{ Вт} \quad (4.10)$$

Відповідний струм, що споживається з мережі 230 В, становить:

$$I_{in} = \frac{P_{in}}{U_{AC}} = \frac{5,18}{240} = 0,0216 \text{ А} \quad (4.11)$$

Отже, власне споживання електронної частини автоматизованого регулятора є незначним порівняно зі споживанням виконавчих механізмів твердопаливного котла. Застосування Mean Well IRM-10-5 забезпечує достатній запас за струмом і потужністю для живлення мікроконтролера, дисплея, датчиків, сигнальних елементів та допоміжних електронних вузлів.

4.1.2 Схемотехнічна обв'язка мікропроцесорного ядра ESP-WROOM-32

Мікропроцесорне ядро пристрою реалізовано на базі модуля ESP-WROOM-32, який поєднує мікроконтролер ESP32, зовнішню SPI Flash-пам'ять, кварцовий генератор, радіочастотний тракт та друковану антену [27].

Живлення модуля подається на вивід 3V3 від стабілізованої шини +3,3 В, а всі виводи GND підключаються до загальної землі цифрової частини схеми. Безпосередньо біля модуля передбачаються фільтрувальні конденсатори, що забезпечують локальне шунтування імпульсних струмів споживання ESP-WROOM-32 та підвищують стабільність роботи радіочастотного тракту (Рисунок 4.6) [40], [38].

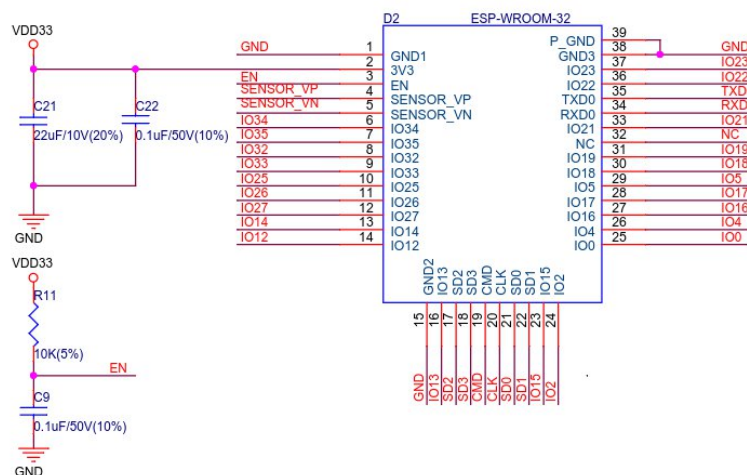


Рисунок 4.6 - Локальна фільтрація живлення модуля ESP-WROOM-32

Для коректного запуску ESP32 використовується вивід EN, який підтягується до шини +3,3 В через резистор 10 кОм (Рисунок 4.7). Додатково між EN та GND встановлюється конденсатор, який формує коротку затримку ввімкнення після подачі живлення. На цій же лінії передбачено кнопку RESET, що при натисканні з'єднує EN із землею та виконує апаратне перезавантаження модуля (Рисунок 4.7). Таке рішення відповідає типовій схемі запуску, наведеної у документації Espressif [27].

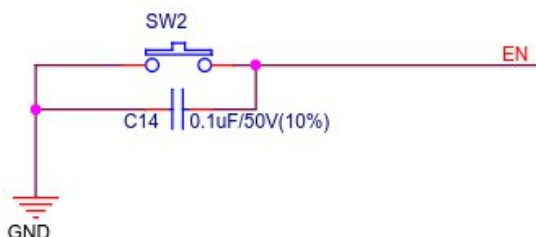


Рисунок 4.7 - Схема підключення лінії EN та кнопки RESET

Для переведення модуля в режим програмування використовується вивід GPIO0. У штатному режимі він повинен мати високий логічний рівень, а для завантаження прошивки через UART — бути підтягнутим до GND під час скидання. Тому в схемі передбачено кнопку BOOT (Рисунок 4.8), яка з'єднує GPIO0 із землею. Такий підхід також використано в референсній схемі ESP32-DevKitC V4 [38].

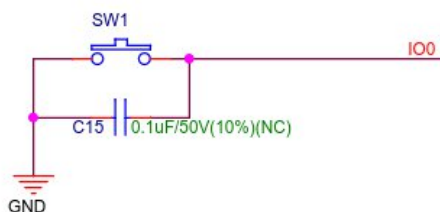


Рисунок 4.8 - Схема підключення GPIO0 та кнопки BOOT

Прошивка та налагодження мікроконтролера здійснюються через інтерфейс UART0, утворений лініями TXD0 та RXD0. У разі використання зовнішнього USB-UART перетворювача доцільно передбачити технологічний роз'єм із сигналами 3V3, GND, TXD0 та RXD0 (Рисунок 4.9). Це дозволить виконувати програмування без інтеграції USB-UART мікросхеми безпосередньо на друковану плату.

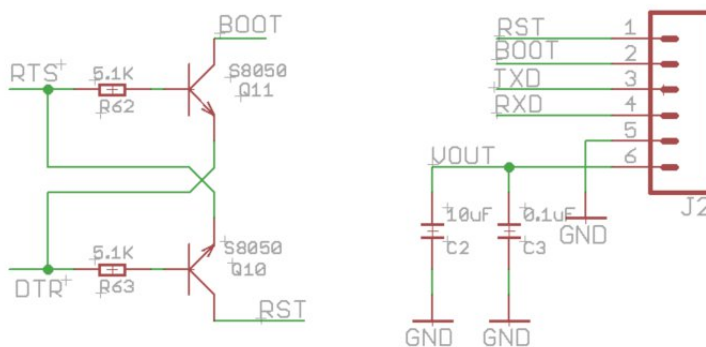


Рисунок 4.9 - Роз'єм зовнішнього UART-програматора

Під час розведення плати необхідно врахувати обмеження GPIO. Виводи GPIO6–GPIO11 задіяні для внутрішньої SPI Flash-пам'яті модуля, тому їх не слід використовувати для зовнішніх підключень. Виводи GPIO34–GPIO39 працюють лише як входи, тому вони можуть застосовуватися для сигналів від датчиків або

детекторів, але не для керування виконавчими механізмами. Керуючі сигнали для дисплея, сенсорів, SSR, оптопар і силових ключів потрібно виводити на повноцінні двонапрямлені GPIO [27].

Антенну частину ESP-WROOM-32 необхідно розмістити біля краю друкованої плати та залишити під нею вільну зону без мідних полігонів, доріжок і металевих елементів. Це зменшує вплив плати та силових вузлів на радіочастотний тракт і забезпечує стабільнішу роботу Wi-Fi-з'єднання.

Отже, обв'язка мікропроцесорного ядра повинна включати стабілізоване живлення 3,3 В, локальну фільтрацію, ланцюг EN/RESET, кнопку BOOT на GPIO0, UART-роз'єм для прошивки та коректне розміщення модуля з урахуванням антенної зони.

4.1.3 Схемотехніка вимірювальних приладів

Вимірювальним приладом в автоматизованому регуляторі опалення виступає цифровий датчик температури DS18B20, який передає дані до мікроконтролера за інтерфейсом 1-Wire [7]. Внутрішня структура датчика наведена на рисунку 4.10.

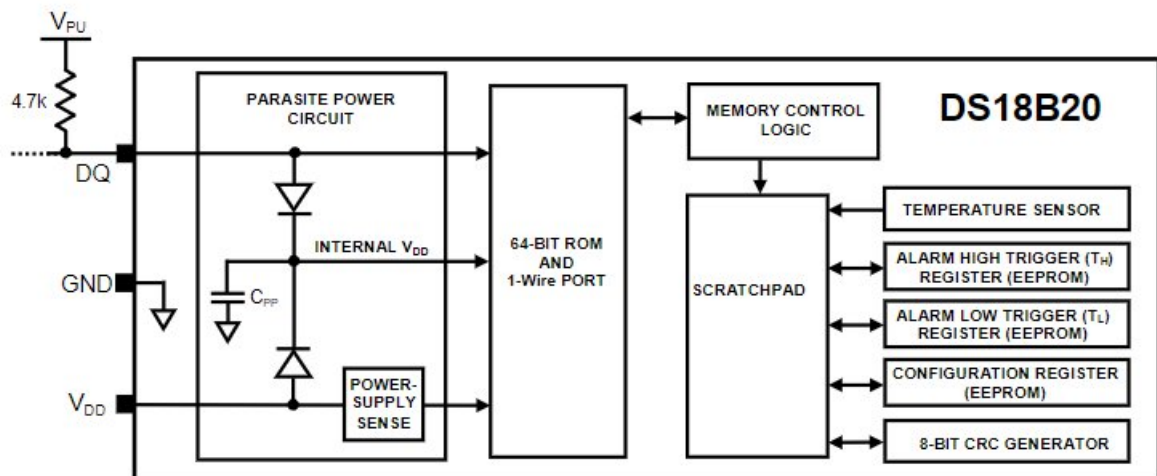


Рисунок 4.10 - Внутрішня структурна схема цифрового датчика температури DS18B20

Підключення DS18B20 виконується за типовою схемою із зовнішнім живленням, наведеною на рисунку 4.11. Вивід V_{DD} підключається до стабілізованої

шини живлення, GND — до загальної землі цифрової частини, а сигнальний вивід DQ з'єднується з GPIO-виводом мікроконтролера ESP32. Для коректної роботи шини 1-Wire лінія DQ підтягується до шини живлення через резистор 4,7 кОм, оскільки обмін даними відбувається за принципом відкритого стоку. Використання зовнішнього живлення є доцільнішим за паразитний режим, оскільки забезпечує стабільнішу роботу датчика під час перетворення температури та спрощує схемотехнічну реалізацію.

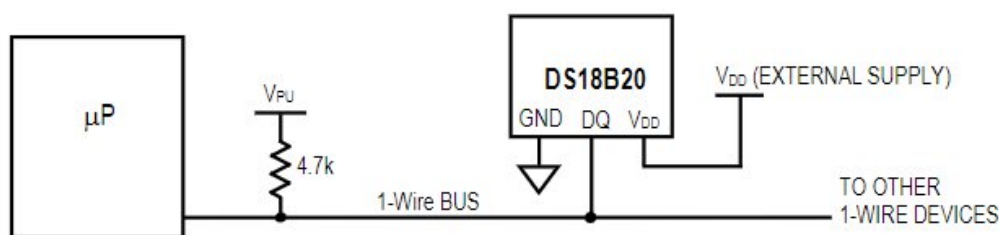


Рисунок 4.11 - Схема підключення DS18B20 за інтерфейсом 1-Wire

Додатковим вимірювальним елементом є ультразвуковий датчик рівня палива JSN-SR04T, який підключається до ESP32 через лінії TRIG та ECHO [28]. Вивід TRIG з'єднується з цифровим виходом мікроконтролера і використовується для запуску вимірювання, а ECHO — з цифровим входом для приймання імпульсу, тривалість якого пропорційна відстані до поверхні пелет. Живлення модуля та його GND підключаються до низьковольтної частини схеми. Якщо модуль живиться від 5 В, сигнал ECHO необхідно узгодити з логічним рівнем ESP32 3,3 В за допомогою резистивного подільника або перетворювача рівнів.

Таким чином, вимірювальний вузол потребує мінімальної кількості зовнішніх компонентів і забезпечує цифрову передачу даних безпосередньо до мікроконтролера. Це зменшує вплив електромагнітних завад на результат вимірювання та дозволяє за потреби підключати декілька датчиків до однієї шини 1-Wire.

4.1.4 Синтез підсистеми силової комутації та гальванічної ізоляції

Підсистема керування однофазним двигуном змінного струму реалізується за схемою фазового симісторного регулювання, наведеною на рисунку 1.7. Ке-

руючий сигнал із GPIO-виводу ESP32 через струмообмежувальний резистор подається на світлодіод оптосимістора МОС3021, який забезпечує гальванічну розв'язку між низьковольтною логікою та силовою частиною. Вихідна частина МОС3021 підключається до керуючого електрода силового симістора ВТА16/ВТВ16, увімкненого послідовно з двигуном турбіни наддуву в коло мережі 230 В. МОС3021 належить до random-phase optotriac driver, тобто дозволяє відкривати симістор у довільний момент напівперіоду, що є необхідною умовою для фазового регулювання [29]. Симістори серії ВТА16/ВТВ16 призначені для комутації змінного струму та можуть застосовуватися у схемах фазового керування, зокрема в регуляторах швидкості двигунів побутових пристроїв [30].

Для синхронізації фазового керування з мережею в схемі використовується вузол детекції переходу напруги через нуль. Він реалізується на оптопарі РС817/РС814, вхід якої підключається до мережевої частини через струмообмежувальні резистори, а вихід формує низьковольтний логічний сигнал для ESP32. Така побудова дозволяє передати інформацію про момент переходу синусоїди через нуль без електричного з'єднання мікроконтролера з мережею 230 В. Згідно з документацією РС817, оптопара забезпечує ізоляцію між входом і виходом до 5 кВ RMS, що робить її придатною для розділення силових і сигнальних кіл [34].

Для приводу шнекового живильника фазове регулювання не застосовується. Його комутація виконується за принципом низькочастотної ШІМ, наведеної на рисунку 1.8, а електрична реалізація здійснюється за допомогою реле або твердотільного реле SSR, керованого низьковольтним сигналом від ESP32.

4.1.5 Підключення елементів інтерфейсу користувача

Для відображення параметрів роботи регулятора використовується TFT-дисплей на базі контролера ILI9488. Контролер підтримує паралельні інтерфейси DBI та послідовний 3-/4-провідний SPI-інтерфейс, тому в електричній схемі дисплей підключається до апаратної SPI-шини ESP32 [32]. Лінії SCK та MOSI використовуються для передавання тактового сигналу й даних, а сигнали CS, DC та RESET підключаються до окремих GPIO-выводів мікроконтролера. Живлення ло-

гічної частини дисплея виконується від шини 3,3 В, а лінія підсвічування підключається через транзисторний ключ або струмообмежувальний елемент залежно від параметрів конкретного модуля. Схема підключення дисплея зображена на рисунку 4.12.

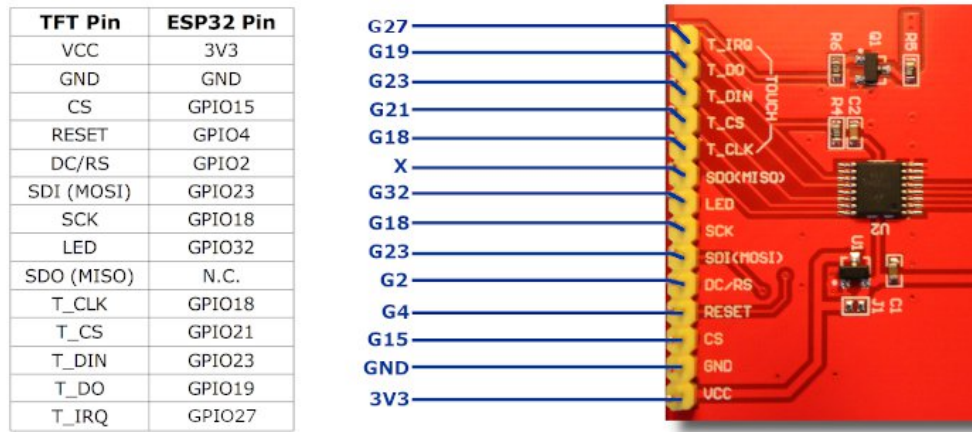


Рисунок 4.12 - Схема підключення TFT-дисплея з SPI-інтерфейсом до ESP32

Основним органом навігації по меню є інкрементальний енкадер EC11. Згідно з документацією, енкадер формує два фазозсунуті вихідні сигнали А та В, що дозволяє визначати напрямок обертання [33]. У схемі виводи А та В підключаються до GPIO-входів ESP32 із підтягуванням до 3,3 В через резистори. Спільний вивід енкадера з'єднується із землею. Для зменшення впливу брязкоту контактів та випадкових імпульсів на сигнальних лініях можуть бути встановлені керамічні конденсатори невеликої ємності між входами А, В та GND. Схема підключення зображена на рисунку 4.13.

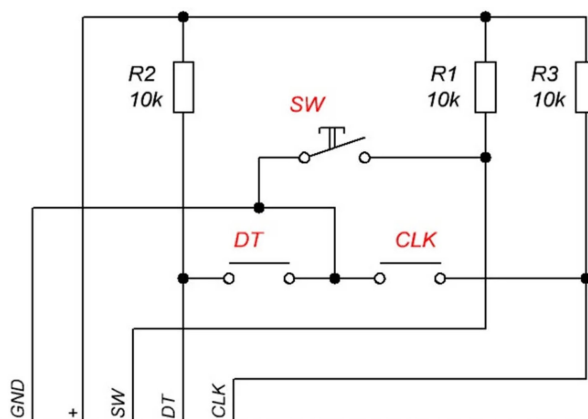


Рисунок 4.13 - Схема підключення інкрементного енкадера

Додаткові тактові кнопки інтерфейсу користувача, зокрема Enter, Esc та кнопка ручної подачі палива, підключаються як дискретні входи мікроконтролера. Один контакт кожної кнопки з'єднується із загальною землею, а другий — із відповідним GPIO-виводом ESP32. Для формування стабільного логічного рівня у відпущеному стані використовується підтягування входу до 3,3 В [27].

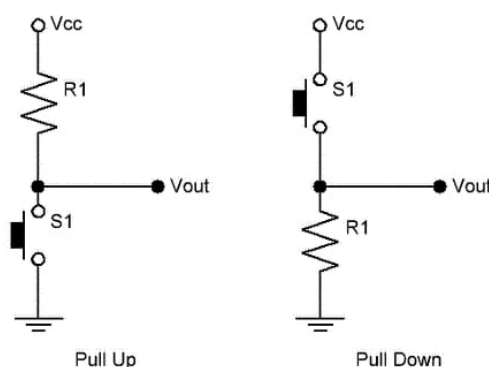


Рисунок 4.14 - Схема підключення тактових кнопок інтерфейсу користувача

Таким чином, елементи інтерфейсу користувача підключаються до низьковольтної частини схеми безпосередньо через GPIO-виводи ESP32: дисплей використовує SPI-шину та службові керуючі сигнали, енкодер — два цифрові входи з підтягуванням, а кнопки — окремі дискретні входи з pull-up резисторами. Така схемотехнічна реалізація забезпечує просте підключення, мінімальну кількість зовнішніх компонентів і сумісність із логічними рівнями 3,3 В.

4.2 Електрична принципова схема

Сформована електрична принципова схема наведена в додатку В.

4.3 Принципи проектування друкованої плати.

Під час проектування друкованої плати електрична схема перетворюється на фізичну топологію з урахуванням розміщення компонентів, ширини провідни-

ків, полігонів живлення та землі. Загальні правила визначаються стандартом IPC-2221C [41].

Для змішаних систем важливими є групування функціональних вузлів, короткі з'єднання живлення, локальні фільтрувальні конденсатори та суцільний полігон землі [42], [43]. У високовольтних колах необхідно витримувати clearance і creepage, а для ESP-WROOM-32 — залишати вільну антенну зону [40], [44].

4.4 Обґрунтування архітектурних рішень

З урахуванням наявності в пристрої як низьковольтних цифрових кіл, так і силових кіл змінної напруги 230 В, конструкцію друкованих плат доцільно реалізувати у вигляді двох окремих функціональних модулів: плати керування та силової плати. Такий підхід дозволяє фізично розділити мікропроцесорну частину з логічними рівнями 3,3 В та кола комутації мережевих навантажень, що підвищує електробезпеку, зменшує вплив електромагнітних завад на цифрові сигнали та спрощує трасування друкованих провідників. Поділ плати на функціональні зони відповідає загальним рекомендаціям щодо проектування друкованих плат і розміщення змішаних цифрових, сигнальних та силових кіл [41], [42].

На платі керування розміщуються модуль ESP-WROOM-32, роз'єми підключення дисплея, енкодера, кнопок, датчиків, роз'єм програмування та елементи низьковольтної обв'язки. Високовольтні елементи, зокрема вхід 230 В, запобіжник, варистор, AC/DC-перетворювач, симісторний регулятор, оптронна розв'язка та клемники навантажень, винесені на окрему силову плату. З'єднання між платами передбачає передавання лише низьковольтних сигналів керування та зворотного зв'язку, що виключає проходження мережевої напруги через плату інтерфейсу користувача.

Плата керування виконана двошаровою. Верхній та нижній шари використовуються для трасування сигнальних ліній, а вільні ділянки заповнюються полігоном землі. Це дозволяє зменшити опір зворотних струмів, покращити стабільність логічних рівнів та знизити рівень електромагнітних наведень. Для ESP-WROOM-32 передбачено вільну зону в області антени, оскільки наявність

мідних полігонів, доріжок або металевих елементів поблизу антенної частини може погіршити роботу Wi-Fi-з'єднання [40].

Силовa плата також спроектована з урахуванням функціонального розділення. Вхідні кола живлення 230 В, елементи захисту та силової комутації розміщуються окремо від низьковольтних керуючих сигналів. Для ділянок, пов'язаних із мережевою напругою, необхідно дотримуватися збільшених ізоляційних відстаней між провідниками та контактними майданчиками, оскільки параметри clearance і creepage є критичними для безпечної роботи високовольтних друкованих плат [44]. Отже, обрана двоплатна архітектура забезпечує логічне розділення функцій пристрою, підвищує ремонтпридатність і дозволяє безпечніше реалізувати керування виконавчими механізмами.

Окремо враховано зручність монтажу: роз'єми датчиків, дисплея, енкодера, кнопок і міжплатного з'єднання доцільно виносити до країв плат, а органи локального керування групувати в зоні передньої панелі. Це рішення належить до архітектурного рівня проєктування, оскільки впливає не лише на трасування, а й на ремонтпридатність та подальше встановлення плати в корпусі.

4.5 Макет друкованої плати

Розроблений макет друкованої плати керування наведено на рисунку 4.15. У макеті відображено фактичне розміщення модуля ESP-WROOM-32, роз'ємів дисплея, датчиків, кнопок, енкодера та міжплатного з'єднання. Антенна зона модуля залишена без мідного заповнення, а елементи запуску й програмування згруповано поруч із мікроконтролером.

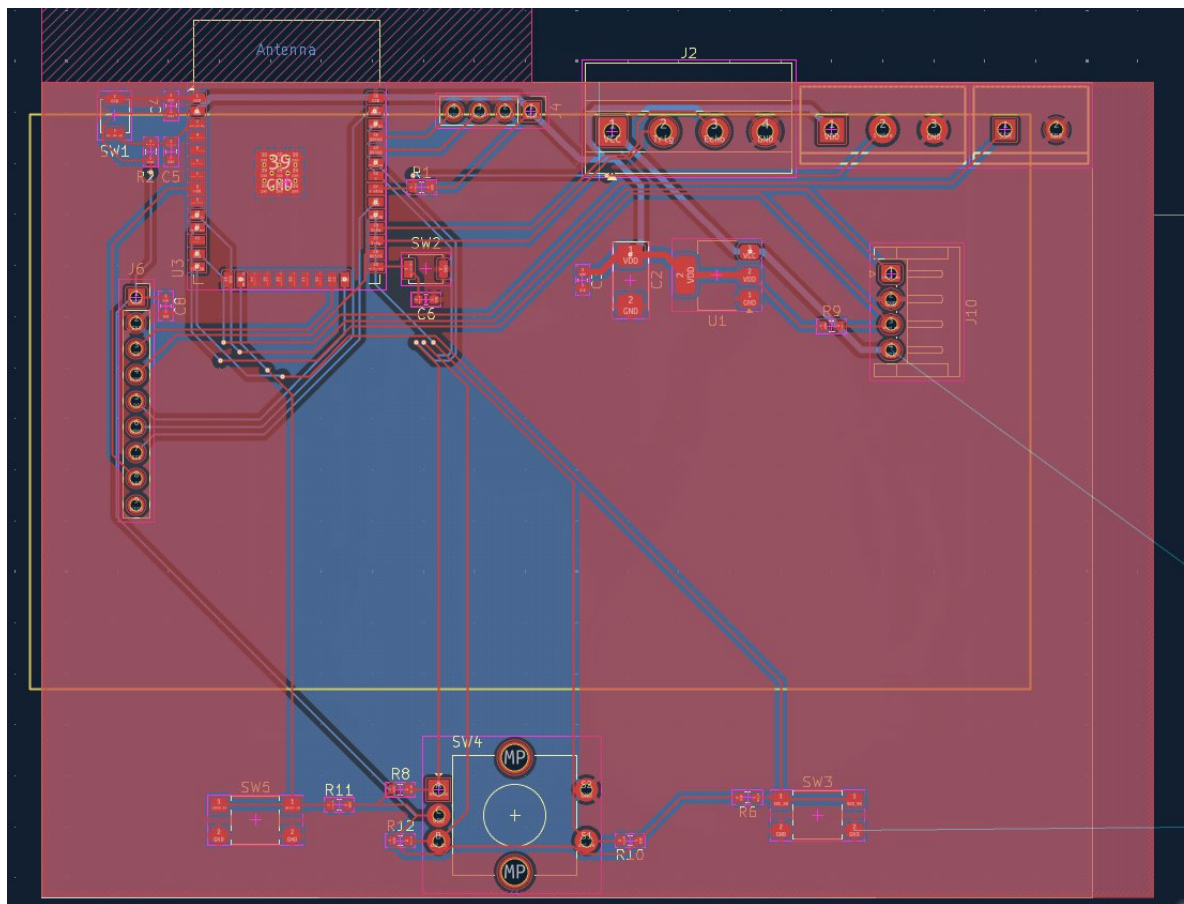


Рисунок 4.15 - Макет плати керування автоматизованого регулятора опалення

Компонування плати керування відповідає архітектурним рішенням, наведеним у підрозділі 4.4: роз'єми зовнішніх пристроїв винесені до країв плати, а органи керування згруповані в нижній частині для подальшого виведення на передню панель корпусу.

Трасування виконано на двох шарах із використанням перехідних отворів. Основні сигнальні та живильні з'єднання прокладено з мінімізацією довжини провідників до споживачів, а полігони землі на обох шарах використано для зменшення імпедансу загального провідника та покращення електромагнітної сумісності плати [43].

Макет силової плати наведено на рисунку 4.16. На платі розміщено вхідний клемник мережі 230 В, запобіжник, варистор, модуль живлення, стабілізатор, вузли фазового керування турбіною та клемники підключення навантажень. Силові доріжки виконано збільшеної ширини, а низьковольтні сигнали підводяться через окремий міжплатний роз'єм.

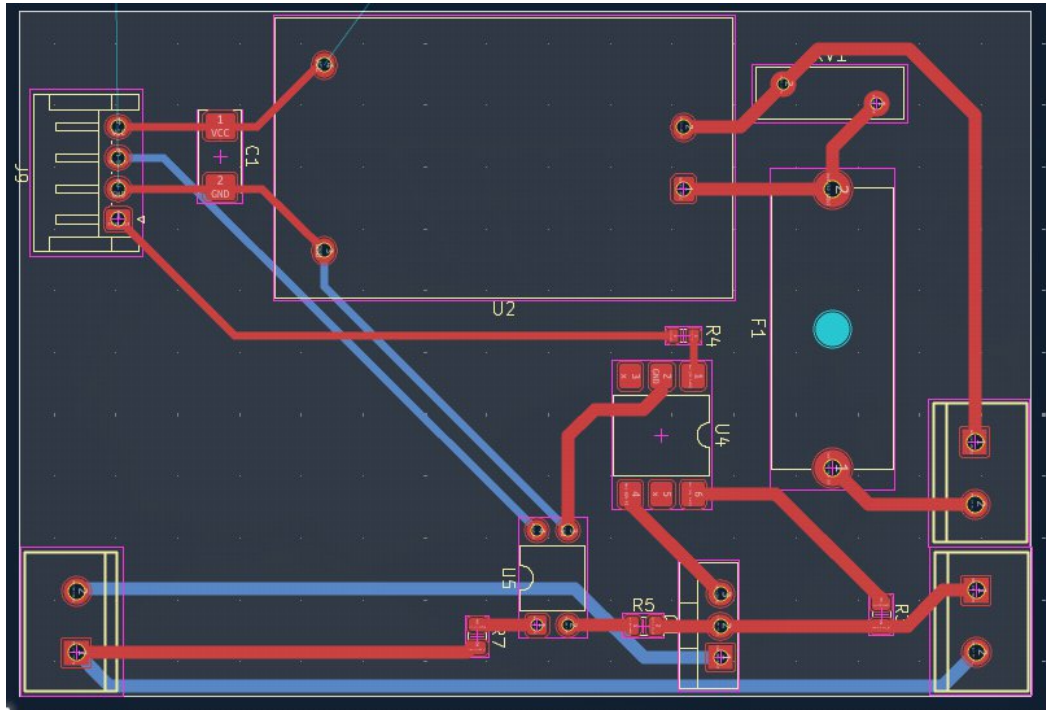


Рисунок 4.16 - Макет силової плати керування навантаженнями 230 В

Отриманий макет підтверджує реалізованість прийнятого двоплатного рішення та може бути використаний як основа для виготовлення і тестування дослідного зразка.

Висновки до розділу

У четвертому розділі розроблено електричну принципову схему та розглянуто проектування друкованої плати автоматизованого регулятора опалення. Сформовано схемотехнічні рішення для підсистеми живлення та захисту, мікропроцесорного ядра на базі ESP-WROOM-32, вимірювальних приладів, силової комутації та локального інтерфейсу користувача. Для живлення пристрою передбачено перетворення мережевої напруги у стабілізовані низьковольтні рівні, необхідні для роботи цифрової логіки та периферії. Для керування турбіною наддуву реалізовано фазове симісторне керування з гальванічною ізоляцією, а для шнекового живильника - комутацію за принципом низькочастотної ШІМ. Окремо обґрунтовано доцільність розділення пристрою на низьковольтну плату керування та силову плату, що підвищує електробезпеку, зменшує вплив електромагніт-

них завад на мікроконтролерну частину та спрощує подальше налагодження. Розроблений макет плат враховує функціональне групування елементів, особливості розміщення модуля ESP-WROOM-32, підключення елементів інтерфейсу користувача, датчиків і силових вузлів.

5 РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МІКРОПРОЦЕСОРНОЇ СИСТЕМИ

5.1 Вибір середовища розробки та інструментарію

Програмне забезпечення автоматизованого регулятора опалення розроблено для мікроконтролерного модуля ESP-WROOM-32 використовуючи інструментарій PlatformIO та фреймворку Arduino-ESP32. Такий підхід дозволяє зберігати конфігурацію проєкту, перелік бібліотек і параметри компіляції у файлі platformio.ini, що спрощує повторне збирання прошивки та подальше супроводження проєкту [45]–[54].

Використані в проєкті засоби та бібліотеки наведено в таблиці 5.1

Таблиця 5.1 - Основні програмні засоби та бібліотеки

Засіб / бібліотека	Призначення у проєкті
PlatformIO Core	Збирання, завантаження та конфігурування прошивки
Arduino-ESP32	Базовий фреймворк для роботи з ESP32
TFT_eSPI	Виведення даних на TFT-дисплей
OneWire, DallasTemperature	Робота з цифровими датчиками температури DS18B20
PubSubClient	MQTT-з'єднання з IoT-платформою
ArduinoJson	Формування та розбір JSON-повідомлень
Preferences / NVS	Збереження уставок і параметрів користувача

5.2 Загальна структура програмного забезпечення

Програма побудована навколо двох задач FreeRTOS, закріплених за різними ядрами ESP32 які працюють паралельно (таблиця 5.2).

Таблиця 5.2 - Розподіл задач між ядрами ESP32

Задача	Ядро ESP32	Основні функції	Пріоритет
controlTaskCore1	1	Датчики, ПІД-регулятор, турбіна, шнек, аварійна логіка	Вищий
interfaceTaskCore0	0	Дисплей, кнопки, енкодер, Wi-Fi, MQTT, телеметрія	Нижчий

Такий розподіл потрібний для того, щоб мережеві операції або перемальовування дисплея не затримували регулювання температури. Обмін між задачами виконується через чергу команд та захищений mutex-знімок стану RuntimeSnapshot. Імплементація створення двох окремих задач на окремих ядрах зображена на рисунку 5.1. Цикл керування виконується з меншим періодом, ніж розрахунок ПІД-регулятора: датчики, команди та аварійні умови перевіряються частіше, тоді як дискретний ПІД-алгоритм обчислюється з фіксованим періодом дискретизації 5 с. Це дозволяє швидко реагувати на аварії та команди користувача без надмірно частого перерахунку повільного теплового контуру.

```

177     const BaseType_t controlCreated = xTaskCreatePinnedToCore(
178         controlTaskCore1,
179         "control_core_1",
180         Tasks::CONTROL_STACK_BYTES,
181         nullptr,
182         Tasks::CONTROL_PRIORITY,
183         nullptr,
184         Tasks::CONTROL_CORE_ID
185     );
186
187     const BaseType_t interfaceCreated = xTaskCreatePinnedToCore(
188         interfaceTaskCore0,
189         "interface_core_0",
190         Tasks::INTERFACE_STACK_BYTES,
191         nullptr,
192         Tasks::INTERFACE_PRIORITY,
193         nullptr,
194         Tasks::INTERFACE_CORE_ID
195     );
196
197     if (controlCreated != pdPASS || interfaceCreated != pdPASS) {
198         Serial.println("ERROR: FreeRTOS task creation failed");
199     }

```

Рисунок 5.1 - Фрагмент коду створення задач для ядер

У прошивці використано модульну структуру (таблиця 5.3): окремі класи відповідають за опитування датчиків, ПІД-регулювання, фазове керування турбіною, керування шнеком, локальний інтерфейс, дисплей, MQTT-зв'язок та збереження налаштувань. Такий поділ зменшує зв'язаність програмних частин і дає змогу змінювати окремий модуль без повної переробки всієї програми.

Таблиця 5.3 - Основні класи прошивки

Клас	Файл	Призначення
HeatingController	HeatingController.h / .cpp	Центральний модуль керування: датчики, ПІД, турбіна, шнек, аварійні стани
PidController	PidController.h / .cpp	Дискретний ПІД-регулятор температури
PhaseController	PhaseController.h / .cpp	Фазове керування симістором турбіни за сигналом нульового переходу
SensorManager	SensorManager.h / .cpp	Опитування DS18B20, ультразвукового датчика рівня та аварійного входу
UiManager	UiManager.h / .cpp	Обробка кнопок та енкодера
DisplayRenderer	DisplayRenderer.h / .cpp	Виведення стану системи на TFT-дисплей
CloudMqttClient	CloudMqttClient.h / .cpp	MQTT-телеметрія та приймання віддалених команд
SettingsStorage	SettingsStorage.h / .cpp	Збереження параметрів у NVS-пам'яті ESP32
AugerController	AugerController.h / .cpp	Низькочастотне PWM-керування шнековим живильником через SSR
SafetyManager	SafetyManager.h / .cpp	Перевірка аварійних умов, формування критичних помилок і попереджень

5.3 Розробка алгоритму роботи системи

Після подачі живлення програма ініціалізує послідовний порт, чергу команд, mutex для спільного стану, налаштування з NVS-пам'яті, датчики, дисплей, Wi-Fi та MQTT-клієнт. Після цього створюються дві задачі FreeRTOS.

У робочому режимі задача керування періодично виконує такий цикл: обробляє команди, опитує датчики, перевіряє аварійні умови, розраховує керуючий вплив і оновлює виконавчі механізми. Задача інтерфейсу паралельно читає стан системи, обробляє енкодер і кнопки, оновлює дисплей та передає телеметрію до IoT-платформи.

У межах алгоритму передбачено три основні режими роботи. У режимі Manual користувач вручну задає потужність турбіни та тривалість роботи шнека. У режимі AutoCoolant система підтримує задану температуру теплоносія за допомогою внутрішнього ПД-регулятора. У режимі AutoRoom кімнатний контур формує активну уставку температури теплоносія, після чого внутрішній ПД-регулятор керує турбіною наддуву та шнековим живильником.

Таблиця 5.4 - Основні етапи програмного алгоритму

Етап	Виконувані дії
Ініціалізація	Створення черги, mutex, зчитування налаштувань, запуск модулів
Нормальний режим	Опитування датчиків, ПД-регулювання, керування турбіною і шнеком
Локальне керування	Обробка енкодера, кнопок, зміна уставки та ручна подача палива
Віддалений моніторинг	Передача телеметрії та приймання MQTT-команд
Аварійний режим	Вимкнення турбіни і шнека, відображення причини аварії

5.4 Програмна реалізація опитування датчиків

Опитування датчиків реалізовано у класі SensorManager. Він формує структуру SensorData, у якій зберігаються останні перевірені значення температури, рівня палива та стан аварійного входу.

Температура вимірюється цифровими датчиками DS18B20, підключеними до спільної шини 1-Wire. У прошивці обробляються два температурні канали: температура теплоносія, яка є основною регульованою величиною, та температура приміщення, що використовується для індикації, моніторингу і режиму AutoRoom. Для зменшення затримок використовується неблокуючий режим: спочатку запускається перетворення, а зчитування результату виконується після завершення часу конверсії. Це дозволяє не зупиняти цикл керування на час вимірювання.

Для дослідного зразка датчики можуть визначатися за порядком виявлення на шині 1-Wire. Для завершеної реалізації доцільно зберігати ROM-адреси датчиків у NVS-пам'яті, щоб унеможливити випадкову перестановку каналів після заміни або перепідключення сенсорів.

Рівень палива визначається ультразвуковим датчиком. Програма формує імпульс TRIG, вимірює тривалість сигналу ЕЧНО та перетворює її у відстань до поверхні палива. Після цього відстань масштабується у відсоток заповнення бункера.

Аварійний вхід контролюється як дискретний сигнал. Якщо зовнішній захисний контакт активний, у структурі SensorData встановлюється ознака emergencyActive, після чого контур керування переводить виконавчі механізми у безпечний стан.

5.5 Програмна реалізація дискретного ПІД-регулятора

ПІД-регулятор винесено в окремий клас PidController. На його вхід передаються задана температура, виміряна температура та поточний час. На виході формується значення потужності у відсотках від 0 до 100 (рисунок 5.2). У прошивці використано дві програмні реалізації цього класу. Перша працює як основний контур регулювання температури теплоносія та формує узагальнений керуючий вплив. Друга використовується у режимі автоматичного регулювання за температурою приміщення: її вихід не керує виконавчими механізмами напряму, а формує активну уставку температури теплоносія для внутрішнього контуру.

У регуляторі реалізовано три важливі програмні обмеження. По-перше, обчислення виконується лише після завершення заданого періоду дискретизації. По-друге, інтегральна складова обмежується у межах вихідного сигналу, що зменшує ефект накопичення інтегральної помилки. По-третє, диференціальна складова обчислюється за зміною вимірюваної температури, а не за похибкою, щоб уникнути різкого стрибка виходу при зміні уставки.

Така каскадна структура дозволяє враховувати температуру приміщення без втрати прямого контролю над температурою теплоносія. Завдяки цьому зовнішній контур визначає бажаний тепловий режим приміщення, а внутрішній контур обмежує і стабілізує фактичну температуру теплоносія в безпечних межах.

```
36 float PidController::compute(float setpoint, float measurement, uint32_t nowMs) {
37     if (std::isnan(measurement)) {
38         return _lastOutput;
39     }
40
41     if (_firstRun) {
42         _lastMeasurement = measurement;
43         _lastTimeMs = nowMs;
44         _lastError = setpoint - measurement;
45         _firstRun = false;
46         return _lastOutput;
47     }
48
49     const uint32_t elapsedMs = nowMs - _lastTimeMs;
50     if (elapsedMs < _sampleTimeMs) {
51         return _lastOutput;
52     }
53
54     const float dt = elapsedMs / 1000.0f;
55     const float error = setpoint - measurement;
56
57     const float pTerm = _kp * error;
58
59     _integral += _ki * error * dt;
60     _integral = clampValue(_integral, _minOutput, _maxOutput);
61
62     const float dInput = (measurement - _lastMeasurement) / dt;
63     const float dTerm = -_kd * dInput;
64
65     float output = pTerm + _integral + dTerm;
66     output = clampValue(output, _minOutput, _maxOutput);
67
68     _lastOutput = output;
69     _lastError = error;
70     _lastMeasurement = measurement;
71     _lastTimeMs = nowMs;
72     return _lastOutput;
73 }
```

Рисунок 5.2 - Розрахунок виходу ПД-регулятора

У автоматичному режимі вихід ПД-регулятора використовується як базовий керуючий сигнал для двох виконавчих каналів: турбіни наддуву та шнекового живильника. Для турбіни він задає відсоток фазового керування, а для шнека — тривалість увімкнення в межах циклу низькочастотної ШІМ.

5.6 Програмна реалізація фазового керування турбіною

Фазове керування турбіною реалізовано класом PhaseController. Модуль використовує сигнал переходу мережевої напруги через нуль і апаратний таймер ESP32. Після фіксації нульового переходу (рисунок 5.3) програма розраховує затримку відкривання симістора: чим більша задана потужність, тим менша затримка.

```
60 void IRAM_ATTR PhaseController::onZeroCross() {
61     portENTER_CRITICAL_ISR(&_mux);
62     digitalWrite(_gatePin, LOW);
63
64     if (!_enabled || _powerPercent <= 0.1f) {
65         _stage = GateStage::Idle;
66         portEXIT_CRITICAL_ISR(&_mux);
67         return;
68     }
69
70     _stage = GateStage::GateOn;
71     timerWrite(_timer, 0);
72     timerAlarm(_timer, delayForPower(_powerPercent), false, 0);
73     portEXIT_CRITICAL_ISR(&_mux);
74 }
```

Рисунок 5.3 - Обробка нульового переходу

Короткий імпульс на керуючому виводі оптосимістора формується після завершення цієї затримки. Оскільки схема керує мережею 230 В, програмний модуль працює тільки з низьковольтним керуючим сигналом, а гальванічна розв'язка реалізована апаратною частиною, описаною у розділі 4.

У разі аварії або вимкненого режиму роботи значення потужності турбіни примусово встановлюється в нуль. Це запобігає подачі повітря в зону горіння при недостовірних вимірюваннях або аварійному стані системи.

5.7 Програмна реалізація керування шнековим живильником

Шнековий живильник керується через твердотіле реле SSR. На відміну від турбіни, для шнека не використовується фазове регулювання, оскільки мотор-редуктор потребує достатнього пускового моменту. Тому подача палива реалізована за принципом низькочастотної ШІМ.

У ручному режимі тривалість роботи шнека задається користувачем. В автоматичному режимі вона обчислюється пропорційно виходу ПІД-регулятора. Додатково передбачена команда короткої ручної подачі палива, яка не зберігається у пам'яті та виконується лише як разова дія оператора.

Якщо зафіксовано критичну аварію або режим роботи Off, вихід SSR примусово вимикається. Це реалізовано у центральному класі HeatingController, тому інтерфейсна або мережева частина не може напряму увімкнути шнек в обхід аварійної логіки.

5.8 Програмна реалізація локального інтерфейсу користувача

Локальний інтерфейс поділено на два класи: UiManager і DisplayRenderer. UiManager відповідає тільки за читання кнопок та енкодера, а DisplayRenderer — тільки за виведення інформації на дисплей. Такий поділ зроблено для того, щоб логіка введення не залежала від способу відображення даних.

На дисплей виводяться поточна температура, задана температура, режим роботи, потужність турбіни, стан шнека, рівень палива та повідомлення про аварію. Оновлення дисплея реалізовано за принципом часткового рендерингу: статичні елементи інтерфейсу, зокрема заголовки, підписи параметрів і розділювальні лінії, виводяться один раз під час ініціалізації. Динамічні поля зберігаються у внутрішньому кеші класу DisplayRenderer, тому під час чергового циклу оновлення перемальовується лише та прямокутна область екрана, у якій змінилося значення, колір або статус параметра. Такий підхід зменшує мерехтіння дисплея, скорочує обсяг передавання даних через SPI та повторює ефективну ідею часткового оновлення інтерфейсу, використану в прошивці курсової роботи.

Енкодер використовується для зміни уставки температури. Кнопки виконують підтвердження, перемикання режиму та ручну подачу палива. Для кнопок реалізовано програмне пригнічення брязкоту контактів, а для енкодера — таблицю декодування квадратурного сигналу.

Зміни, виконані користувачем, не застосовуються напряму до виконавчих механізмів. `UiManager` формує подію, яка перетворюється у команду `CloudCommand` і передається до задачі керування через чергу. Це зберігає єдину точку прийняття рішень у класі `HeatingController`.

5.9 Налаштування клієнт-серверної взаємодії та інтеграція з хмарною IoT-платформою

Віддалений моніторинг реалізовано класом `CloudMqttClient`. Він відповідає за підключення до Wi-Fi, встановлення MQTT-з'єднання, публікацію телеметрії та приймання команд від хмарної платформи [23], [52], [53].

Для інтеграції з ThingsBoard використовується стандартна MQTT-структура обміну: телеметрія публікується в `topic v1/devices/me/telemetry`, атрибути пристрою — у `v1/devices/me/attributes`, а віддалені команди приймаються через `v1/devices/me/rpc/request/+`. Завдяки цьому серверна частина може приймати поточні параметри регулятора, відображати їх на панелі моніторингу та надсилати команди зміни режиму або уставок.

До телеметричного пакета включаються температура, рівень палива, потужність турбіни, стан шнека, уставка температури, режим роботи та аварійний статус. Повідомлення формуються у форматі JSON за допомогою бібліотеки `ArduinoJson` (рисунок 5.4) [54].

```

63 bool CloudMqttClient::publishTelemetry(
64     const SensorData& sensors,
65     const ControlOutput& output,
66     const ControllerSettings& settings)
67 {
68     if (!connected()) return false;
69
70     StaticJsonDocument<384> doc;
71     if (sensors.temperatureValid) doc["temperature"] = sensors.temperatureC;
72     if (sensors.fuelLevelValid) {
73         doc["fuelLevel"] = sensors.fuelLevelPercent;
74         doc["fuelDistanceCm"] = sensors.fuelDistanceCm;
75     }
76     doc["fanPower"] = output.fanPowerPercent;
77     doc["auger"] = output.augerEnabled;
78     doc["setpoint"] = settings.setpointDayC;
79     doc["mode"] = static_cast<int>(settings.mode);
80     doc["fault"] = output.criticalFault;
81     if (output.criticalFault) doc["faultText"] = output.faultText;
82
83     char payload[384];
84     const size_t n = serializeJson(doc, payload, sizeof(payload));
85     return _mqtt.publish("v1/devices/me/telemetry", payload, n);
86 }

```

Рисунок 5.4 - Формування телеметрії MQTT

Приймання команд реалізовано через callback MQTT-клієнта. Після розбору повідомлення CloudMqttClient формує структуру CloudCommand і передає її у чергу задачі керування. Завдяки цьому віддалена команда проходить ті самі перевірки, що й команда від локального інтерфейсу.

Налаштування користувача зберігаються у NVS-пам'яті через клас SettingsStorage. До них належать уставка температури, параметри ПІД-регулятора, режим роботи, тривалість роботи шнека, ручна потужність турбіни та калібрувальні значення датчика рівня палива.

5.10 Обробка аварійних режимів роботи

Аварійна логіка реалізована у класі HeatingController. Він перевіряє достовірність температурного датчика, стан зовнішнього аварійного входу та внутрішній прапорець criticalFault. При виникненні критичної аварії турбіна та шнек негайно вимикаються.

У разі аварії на дисплеї відображається текст причини, а до хмарної платформи передається відповідний статус. Аварійний стан є зафіксованим: після

появи критичної помилки система не відновлює роботу автоматично одразу після зникнення причини. Скидання аварії можливе лише через команду EmergencyReset, після чого ПД-регулятор повторно ініціалізується, щоб уникнути стрибка керуючого сигналу після відновлення роботи.

Висновки до розділу

У розділі розроблено програмне забезпечення мікропроцесорної системи автоматизованого регулятора опалення. Прошивка побудована за модульним принципом і розділена на дві задачі FreeRTOS: контур керування та інтерфейсно-комунікаційну частину. Описано призначення основних класів, алгоритм опитування датчиків, реалізацію дискретного ПД-регулятора, фазове керування турбіною, низькочастотне керування шнеком, локальний інтерфейс користувача, MQTT-обмін з IoT-платформою та аварійну логіку. Запропонована структура забезпечує відокремлення критичних функцій керування від повільних операцій інтерфейсу й мережевого обміну, що підвищує стабільність та безпечність роботи системи.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дипломному проєкті розроблено апаратно-програмний проєкт автоматизованого регулятора опалення приміщення для твердопаливного котла. Система забезпечує підтримання температури теплоносія, контроль температури приміщення та рівня палива, керування турбіною наддуву і шнековим живильником, а також локальний і віддалений моніторинг.

У першому розділі проаналізовано існуючі системи автоматизації, методи вимірювання, способи керування виконавчими механізмами та технології IoT. На основі аналізу сформовано вимоги до регулятора й обґрунтовано вибір мікроконтролерної платформи ESP-WROOM-32.

У другому та третьому розділах розроблено структурну, функціональну й автоматизаційну схеми, визначено основні контури керування, виконано спрощене моделювання теплового об'єкта та синтез дискретного ПІД-регулятора. Це дозволило узгодити логіку роботи виконавчих механізмів із динамікою твердопаливного котла.

У четвертому розділі розроблено електричну принципову схему та архітектуру друкованих плат. Передбачено розділення низьковольтної і силової частин, гальванічну розв'язку сигналів керування, захист кіл живлення та окремі канали керування турбіною і шнековим живильником.

У п'ятому розділі сформовано програмну структуру системи: модулі опитування датчиків, ПІД-регулятора, фазового керування турбіною, низькочастотного керування шнеком, локального інтерфейсу, аварійної логіки та MQTT-взаємодії з IoT-платформою. Запропоноване рішення є ремонтпридатним, функціонально розширюваним і може бути адаптоване до різних конфігурацій твердопаливних опалювальних установок.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] Попович М. Г., Ковальчук О. В. Теорія автоматичного керування : підручник. Київ : Либідь, 2007. 656 с.
- [2] Гелетуха Г. Г., Желєзна Т. А. Стан та перспективи розвитку біоенергетики в Україні. Промислова теплотехніка. 2017. Т. 39, № 2. С. 60–64. DOI: 10.31472/ptte.v39i2.178.
- [3] Контролер есоМАХ 860Р для пелетних котлів. Посібник користувача та інсталятора. PLUM Sp. z o.o., 2021. URL: <https://www.cerbos.ee/img/cms/poletid/kipi/boiler-regulator-ecoMAX-860P-manual.pdf>
- [4] Датчики: Справочник / З. Ю. Готра та ін. ; за ред. З. Ю. Готри. Львів : Каменяр, 1995. 312 с.
- [5] ДСТУ EN 60584-1:2016. Термoeлектричні перетворювачі. Частина 1. Технічні характеристики та допуски. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 24 с.
- [6] Бойко В. І., Жуйков В. Я. Схемотехніка електронних систем : підручник. Київ : Вища школа, 2004. 366 с.
- [7] DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer : Datasheet. Analog Devices, 2019. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ds18b20.pdf>
- [8] TMP275 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ Temperature Sensor With I²C and SMBus Interface : Datasheet. Texas Instruments, 2018. 35 p. URL: <https://www.ti.com/lit/pdf/sbos363>
- [9] Fraden J. Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications. 5th ed. Cham : Springer International Publishing, 2016. 758 p.
- [10] Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook: Spatial, Mechanical, Thermal, and Radiation Measurement / ed. by J. G. Webster, H. Eren. 2nd ed. Boca Raton : CRC Press, 2014. 1095 p.
- [11] Попович М. Г., Борисюк М. О., Гаврилюк В. А. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи : навч. посіб. Київ : Либідь, 2005. 680 с.

- [12] Промислова електроніка : конспект лекцій / уклад. викладачі каф. електроніки ВНТУ. Вінниця : ВНТУ, 2015. URL: <https://iq.vntu.edu.ua/fm/fdb/671/PE/PE.pdf>
- [13] Texas Instruments. DRV8825 Stepper Motor Controller IC : Datasheet. URL: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/drv8825.pdf>
- [14] ДСТУ EN 60947-4-3:2014. Апаратура розподільча та керування низьковольтна. Частина 4-3. Контактори та пускачі. Напівпровідникові контролери. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2014.
- [15] Chen B., Xie Q., Zhou J. Fuzzy Adaptive PID Control of Biomass Circulating Fluidized Bed Boiler. 2018 Chinese Automation Congress (CAC). IEEE, 2018. P. 3795–3800. DOI: 10.1109/CAC.2018.8623812.
- [16] Ogata K. Modern Control Engineering. 5th ed. Prentice Hall, 2010. 904 p.
- [17] Phillips C. L., Nagle H. T. Digital Control System Analysis and Design. 4th ed. Pearson Prentice Hall, 2014. 592 p.
- [18] Beauregard B. Improving the Beginner's PID – Introduction. Project Blog. 2011. URL: <http://brettbeauregard.com/blog/2011/04/improving-the-beginners-pid-introduction/>
- [19] Al-Fuqaha A., Guizani M., Mohammadi M. Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications. IEEE Communications Surveys. 2015. Vol. 17, No. 4. P. 2347–2376. DOI: 10.1109/COMST.2015.2444095.
- [20] Жураковський Б. Ю., Зенів І. О. Технології інтернету речей : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 271 с. URL: https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u34/tehnologiyi_interntu_rechey.pdf
- [21] Ray P. P. A survey on Internet of Things architectures. Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences. 2018. Vol. 30, Iss. 3. P. 291–319. DOI: 10.1016/j.jksuci.2016.10.003.
- [22] Banks A., Gupta R. MQTT Version 3.1.1 : OASIS Standard. 2014. 89 p. URL: <https://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v3.1.1/os/mqtt-v3.1.1-os.pdf>

- [23] ThingsBoard Documentation: IoT platform for data collection, processing, telemetry. URL: <https://thingsboard.io/docs/>
- [24] Blynk IoT Platform Documentation. Architecture and concepts. URL: <https://docs.blynk.io/en/>
- [25] ATmega640/V-1280/V-2560. 8-bit Atmel Microcontroller : Datasheet. Microchip Technology Inc., 2014. 435 p. URL: https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-2549-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega640-1280-1281-2560-2561_datasheet.pdf
- [26] STM32F405xx / STM32F407xx ARM Cortex-M4 32b MCU+FPU : Reference Manual. STMicroelectronics, 2020. URL: https://www.st.com/resource/en/reference_manual/rm0090-stm32f405415-stm32f407417-stm32f427437-and-stm32f429439-advanced-armbased-32bit-mcus-stmicroelectronics.pdf
- [27] ESP32 Series Datasheet V4.1. Espressif Systems, 2023. 82 p. URL: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf
- [28] JSN-SR04T-3.0 Ultrasonic Sensor Module : Datasheet. Manorshi.
- [29] MOC3021M, MOC3022M, MOC3023M 6-Pin DIP Random-Phase Triac Driver Optocoupler : Datasheet. onsemi, 2021. 14 p. URL: <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/moc3023m-d.pdf>
- [30] BTA16, BTB16, T1610, T1635 16 A Snubberless Triacs : Datasheet. STMicroelectronics, 2023. 12 p. URL: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/bta16.pdf>
- [31] Solid State Relay SSR series : User Manual. Taiwan : Fotek Controls Co., Ltd., 2018.
- [32] ILI9488 single chip 16.7M color a-Si TFT-LCD Controller : Datasheet V1.00. Ilitek, 2014. 315 p. URL: <https://www.displayfuture.com/Display/datasheet/controller/ILI9488.pdf>
- [33] EC11E Series Rotary Encoder Product Information. ALPS Alpine. URL: <https://tech.alpsalpine.com/e/products/detail/EC11E15204A3/>

- [34] PC817XxNSZ1B Series Photocoupler : Datasheet. Sharp. URL: https://global.sharp/products/device/lineup/data/pdf/datasheet/PC817XxNSZ1B_e.pdf
- [35] IRM-10 Series 10W AC-DC PCB-Mount Green Power Module : Specification. MEAN WELL Enterprises Co., Ltd., 2025. URL: <https://www.meanwell.com/Upload/PDF/IRM-10/IRM-10-SPEC.PDF>
- [36] AMS1117 800mA Low Dropout Voltage Regulator : Datasheet. Advanced Monolithic Systems, 2012. 6 p. URL: <http://www.advanced-monolithic.com/pdf/ds1117.pdf>
- [37] SIOV Metal Oxide Varistors: General Technical Information. TDK Electronics, 2018. URL: <https://www.tdk-electronics.tdk.com/download/531268/8954d4a78154a9da5c70a7119fa03e86/sio-v-general.pdf>
- [38] ESP32-DevKitC V4 Schematics. Espressif Systems. 2017. URL: https://dl.espressif.com/dl/schematics/esp32_devkitc_v4_sch.pdf
- [39] Falin J. ESR, Stability, and the LDO Regulator. Texas Instruments, Application Report SLVA115A. URL: <https://www.ti.com/lit/pdf/slva115>
- [40] ESP32 Hardware Design Guidelines. Espressif Systems, 2026. URL: <https://docs.espressif.com/projects/esp-hardware-design-guidelines/en/latest/esp32/esp-hardware-design-guidelines-en-master-esp32.pdf>
- [41] IPC-2221C: Generic Standard on Printed Board Design. IPC.
- [42] What Are the Basic Guidelines for Layout Design of Mixed-Signal PCBs? Analog Devices. URL: <https://www.analog.com/en/resources/analog-dialogue/articles/what-are-the-basic-guidelines-for-layout-design-of-mixed-signal-pcbs.html>
- [43] PCB Design Guidelines for Reduced EMI. Texas Instruments. URL: <https://www.ti.com/lit/pdf/szza009>
- [44] Demystifying Clearance and Creepage Distance for High-Voltage End Equipment. Texas Instruments. URL: <https://www.ti.com/lit/pdf/slup419>

- [45] PlatformIO Core (CLI) Documentation. PlatformIO. URL: <https://docs.platformio.org/en/latest/core/index.html>
- [46] Library Dependency Finder (LDF) Documentation. PlatformIO. URL: <https://docs.platformio.org/en/latest/librarymanager/ldf.html>
- [47] Arduino Software / Arduino IDE Documentation. Arduino. URL: <https://docs.arduino.cc/software/ide-v2/tutorials/getting-started-ide-v2>
- [48] ESP-IDF Get Started Guide for ESP32. Espressif Systems. URL: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/stable/esp32/get-started/index.html>
- [49] Espressif 32 Platform Documentation. PlatformIO. URL: <https://docs.platformio.org/en/latest/platforms/espressif32.html>
- [50] TFT_eSPI: Arduino and PlatformIO IDE compatible TFT graphics library. Bodmer. URL: https://github.com/Bodmer/TFT_eSPI
- [51] Preferences — Arduino ESP32 Documentation. Espressif Systems. URL: <https://docs.espressif.com/projects/arduino-esp32/en/latest/tutorials/preferences.html>
- [52] PubSubClient: A client library for MQTT messaging. O’Leary N. URL: <https://docs.arduino.cc/libraries/pubsubclient/>
- [53] MQTT Device API Reference. ThingsBoard. URL: <https://thingsboard.io/docs/pe/reference/mqtt-api/>
- [54] ArduinoJson Documentation. Blanchon B. URL: <https://arduinojson.org/>

ДОДАТКИ

надаються за зверненням до авторів