

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

В.о. завідувача кафедри
автоматики та робототехнічних систем
ім. акад. І.І. Мартиненка
(назва кафедри)

К.Т.Н., доц. _____ О.О. Опришко
(підпис) (ПІБ)

" ____ " _____ 2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

**на тему "Розроблення системи керування температурою у камері
полімеризації при виготовленні металевих конструкцій"**

Спеціальність: 174 - "Автоматизація , комп'ютерно-інтегровані технології
та робототехніка"

Гарант освітньої програми

К.Т.Н., доцент
(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Дудник А.О.
(П.І.Б.)

Керівник кваліфікаційної бакалаврської роботи

К.Т.Н., доцент
(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Дудник А.О.
(П.І.Б.)

Виконав

(підпис)

Ковальчук Л.С.
(П.І.Б.)

КИЇВ – 2026

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

автоматики та робототехнічних систем

ім. акад. І.І. Мартиненка

(назва кафедри)

К.Т.Н., доц. _____ О.О. Опришко
(підпис) (ПІБ)

" ____ " _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на виконання кваліфікаційної бакалаврської роботи студенту

Ковальчук Леонід Сергійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність: 174 - "Автоматизація , комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка"

1. Тема кваліфікаційної бакалаврської роботи: "Розроблення системи керування температурою у камері полімеризації при виготовленні металевих конструкцій",

затверджена наказом ректора НУБіП України від "18" 11 2025 р. № 2056"С"

2. Термін подання завершеної роботи на кафедру "30" травня 2026 р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної бакалаврської роботи:

3.1. Завдання кафедри на виконання кваліфікаційної бакалаврської роботи.

3.2. Нормативні документи по проектуванню об'єктів автоматизації.

3.3. Наукова література з тематики кваліфікаційної бакалаврської роботи.

4. Перелік питань, які необхідно розробити:

5. Перелік графічних документів:

Дата видачі завдання "21" листопада 2025 року

Керівник

кваліфікаційної

бакалаврської роботи

(підпис)

Дудник А.О.

(П.І.Б.)

Завдання прийняв до

виконання

(підпис)

Ковальчук Л.С.

(П.І.Б.)

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота присвячена дослідженню та розробці мікропроцесорної системи керування камерою полімеризації порошкової фарби на базі платформи ESP32. Метою роботи є розробка енергоефективної системи автоматизації, що забезпечує високу точність температурних режимів та можливість дистанційного моніторингу технологічного процесу.

У першому розділі проведено детальний аналіз технологічного процесу полімеризації та визначено вимоги до точності підтримки температури. Виконано порівняльний аналіз технічних засобів автоматизації (ПЛК та мікроконтролерів), на основі якого обґрунтовано вибір платформи ESP32. Розроблено функціональну схему автоматизації (ФСА), що визначає структуру вимірювальних та керуючих контурів.

У другому розділі побудовано математичну модель камери полімеризації як об'єкта із запізненням. Розраховано параметри цифрового ПД-регулятора та виконано моделювання перехідних процесів у середовищі MATLAB/Simulink. Проведено аналіз стійкості системи до зовнішніх збурень, що підтвердило адекватність обраної стратегії керування.

У третьому розділі описано технічну реалізацію системи. Розроблено електричну принципову схему із застосуванням термопари К-типу, підсилювача MAX6675 та твердотільних реле (SSR). Виконано розрахунок потужності ТЕНів. Описано алгоритм роботи програмного забезпечення в середовищі Arduino IDE, а також реалізовано систему IoT-моніторингу через протокол Wi-Fi для віддаленого контролю процесу.

У четвертому розділі приділено увагу надійності та безпеці експлуатації. Проведено розрахунок показників надійності мікропроцесорного модуля та оцінено електробезпеку при роботі з силовими нагрівальними елементами. Визначено комплекс заходів з охорони праці при роботі з камерою полімеризації.

У п'ятому розділі наведено економічне обґрунтування технічних рішень. Розраховано собівартість розробки, проаналізовано енергоефективність впровадженого ПІД-регулювання та визначено термін окупності системи, що підтверджує доцільність використання ESP32 у порівнянні з промисловими аналогами.

SUMMARY

This qualification work is dedicated to the research and development of a microprocessor-based control system for a powder coating curing oven based on the ESP32 platform. The objective of the work is to develop an energy-efficient automation system that ensures high precision of thermal regimes and enables remote monitoring of the technological process.

In the first section, a detailed analysis of the polymerization process was conducted, and the requirements for temperature maintenance accuracy were defined. A comparative analysis of automation hardware (PLCs vs. microcontrollers) was performed, justifying the selection of the ESP32 platform. A functional automation diagram (FAD) was developed, defining the structure of measurement and control loops.

In the second section, a mathematical model of the curing oven as an object with time delay was constructed. The parameters of a digital PID controller were calculated, and transient processes were simulated in the MATLAB/Simulink environment. A stability analysis against external disturbances was conducted, confirming the adequacy of the chosen control strategy.

In the third section, the technical implementation of the system is described. A schematic electrical diagram was developed using a K-type thermocouple, a MAX6675 amplifier, and solid-state relays (SSR). The power calculation for the heating elements was performed. The software algorithm developed in the Arduino IDE is described, and an IoT monitoring system via the Wi-Fi protocol was implemented for remote process control.

In the fourth section, attention is paid to reliability and operational safety. Reliability metrics for the microprocessor module were calculated, and electrical safety during operation with high-power heating elements was assessed. A complex of occupational health and safety measures for working with the curing oven was defined.

In the fifth section, an economic justification for the technical solutions is provided. The development cost was calculated, the energy efficiency of the implemented PID control was analyzed, and the payback period was determined, confirming the feasibility of using ESP32 compared to industrial counterparts.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	10
ВСТУП	11
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ ТА ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ	13
1.1 Опис технологічного процесу полімеризації порошкового покриття металевих конструкцій	13
1.2 Вимоги до точності підтримки температури та часових циклів	17
1.3 Порівняльний аналіз технічних засобів автоматизації	20
1.4 Обґрунтування вибору платформи ESP32 для керування камерою	22
1.5 Розробка функціональної схеми автоматизації	25
РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ	30
2.1 Опис технологічного процесу полімеризації порошкового покриття металевих конструкцій	30
2.2 Розробка математичної моделі	31
Висновки до розділу	32
РОЗДІЛ 3. ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ НА ESP32	33
3.1 Обґрунтування вибору закону регулювання та розрахунок параметрів цифрового ПІД-регулятора	33
3.2 Імітаційне моделювання перехідних процесів САР у середовищі MATLAB/Simulink	34
3.3 Аналіз стійкості та якості регулювання при зміні зовнішніх збурень	38
3.4 Розробка електричної принципової схеми мікропроцесорного модуля на базі ESP32	40

3.5 Вибір та розрахунок силового обладнання та елементів комутації	44
3.6 Розробка алгоритму керування та структури програмного забезпечення	45
3.7 Реалізація IoT-моніторингу температури через Wi-Fi протокол	49
Висновки до розділу	52
РОЗДІЛ 4. НАДІЙНІСТЬ ТА БЕЗПЕКА ЕКСПЛУАТАЦІЇ СИСТЕМИ.....	53
4.1 Розрахунок показників надійності розробленого мікропроцесорного модуля.....	53
4.2 Оцінка електробезпеки при роботі з високовольтними ТЕНами.....	54
4.3 Заходи з охорони праці при експлуатації камер полімеризації	56
Висновки до розділу	58
РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ	60
5.1 Розрахунок витрат на комплектуючі та розробку ПЗ	60
5.2 Оцінка енергоефективності при впровадженні точного ПІД-регулювання	61
5.3 Термін окупності системи	63
Висновки до розділу	64
ВИСНОВКИ.....	66
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	67
ДОДАТКИ.....	70
Додаток А.....	70
Додаток Б	79

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

АСК – автоматизована система керування;
ГДК – гранично допустима концентрація;
ДСТУ – Державний стандарт України;
МК – мікроконтролер;
ОП – охорона праці;
ПЗ – програмне забезпечення;
ПД – пропорційно-інтегрально-диференціальний (регулятор);
ПЗВ – пристрій захисного вимкнення;
ПЛК – програмований логічний контролер;
ТЕН – трубчастий електронагрівач;
ФСА – функціональна схема автоматизації;
ШІМ – широтно-імпульсна модуляція;
НМІ – Human-Machine Interface (людино-машинний інтерфейс);
IoT – Internet of Things (інтернет речей);
MQTT – Message Queuing Telemetry Transport (протокол передачі даних);
SSR – Solid State Relay (твердотільне реле);
 Λ – сумарна інтенсивності відмов, год⁻¹;
 $P(t)$ – ймовірність безвідмовної роботи;
 T_{cp} – середній наробіток на відмову, год;
 τ – чисте запізнення об'єкта керування, с.

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасне виробництво металевих конструкцій неможливе без якісного антикорозійного захисту, найпопулярнішим видом якого є порошкове фарбування. Ключовим етапом цієї технології є процес полімеризації, що відбувається у спеціальних камерах за високих температур (160–220 °C). Якість покриття, його адгезія та довговічність безпосередньо залежать від точності підтримки температурного графіка. Навіть незначні відхилення можуть призвести до браку продукції або перевитрат електроенергії.

Більшість існуючих рішень базуються або на дорогих промислових контролерах (ПЛК), або на примітивних релейних схемах, які не забезпечують гнучкості та можливості дистанційного моніторингу. Впровадження системи на базі сучасного мікроконтролера ESP32 з використанням ПІД-алгоритму та IoT-технологій дозволяє створити високоточну, енергоефективну та доступну систему керування, що є актуальним завданням для автоматизації малих та середніх підприємств.

Мета роботи – розроблення цифрової системи автоматичного керування температурним режимом у камері полімеризації на базі мікроконтролера ESP32 для забезпечення заданої якості технологічного процесу та можливості віддаленого моніторингу параметрів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Проаналізувати камеру полімеризації як об'єкт автоматизації та визначити вимоги до системи керування.
2. Побудувати математичну модель теплових процесів у камері та провести імітаційне моделювання в середовищі MATLAB/Simulink.
3. Розрахувати параметри цифрового ПІД-регулятора для забезпечення стійкості системи.
4. Розробити принципову електричну схему та програмне забезпечення для мікроконтролера ESP32.

5. Реалізувати передачу даних про стан системи через Wi-Fi протокол для дистанційного контролю.

6. Обґрунтувати економічну ефективність та безпечність розробленої системи.

Об'єкт дослідження – процес стабілізації температури в камері полімеризації металевих конструкцій.

Предмет дослідження – алгоритми цифрового ПІД-керування та технічні засоби реалізації системи на базі мікроконтролера ESP32.

Методи дослідження. У роботі використано методи теорії автоматичного керування для синтезу регулятора, методи математичного моделювання в середовищі MATLAB, Simulink для перевірки динамічних характеристик, а також методи об'єктно-орієнтованого програмування для розробки ПЗ контролера.

Практичне значення. Отримані результати дозволяють реалізувати недорогу систему керування з високою точністю регулювання та вбудованим IoT-інтерфейсом, що забезпечує інтеграцію обладнання в концепцію «Індустрія 4.0».

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ ТА ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

1.1 Опис технологічного процесу полімеризації порошкового покриття металевих конструкцій

Технологічний процес полімеризації порошкового покриття є завершальним і найвідповідальнішим етапом формування захисно-декоративного шару на металевих конструкціях [1]. Сутність процесу полягає у термічному впливі на попередньо нанесене наелектризоване порошкове розпилення, яке під дією високої температури перетворюється на суцільну, міцну та зносостійку плівку. Конструктивно камера полімеризації являє собою термоізовану шафу, оснащену нагрівальними елементами та системою примусової конвекції повітря для забезпечення рівномірного прогріву деталей складної конфігурації [2-5]. Основним технічним завданням є суворе дотримання температурно-часового графіку, оскільки недогрів призводить до поганої адгезії та крихкості шару, а перегрів – до зміни кольору, втрати блиску та погіршення механічних властивостей покриття.

Фізико-хімічні основи формування покриття базуються на складних процесах перетворення термореактивних або термопластичних порошкових композицій під дією теплової енергії [6]. На початковій фазі, при досягненні температури плавлення частинок (зазвичай 80–120 °C), порошок переходить у в'язкотекучий стан, змочує поверхню металу та утворює суцільний розплав. У цей період відбувається витіснення повітря з шару та розтікання полімеру, що формує мікроструктуру майбутньої плівки. Подальше підвищення температури до робочого діапазону (160–200 °C) запускає хімічну реакцію структурування (затвердіння), під час якої утворюються міцні поперечні молекулярні зв'язки. Кінцевий етап твердіння забезпечує остаточну полімеризацію, після якої матеріал набуває заданих фізико-механічних характеристик, таких як твердість, хімічна стійкість та антикорозійна тривалість.



Рис. 1.1. Технологічний процес полімеризації порошкового покриття

Теплоізоляція камери відіграє вирішальну роль у забезпеченні енергоефективності та точності регулювання. Між внутрішньою та зовнішньою

стінками корпусу розміщується шар високоякісного теплоізоляційного матеріалу, найчастіше базальтової мінеральної вати, товщиною від 100 до 150 мм. Такий матеріал має низький коефіцієнт теплопровідності та здатний витримувати температури до 600 °С без втрати своїх властивостей. Якісна ізоляція дозволяє підтримувати зовнішню температуру стінок камери на рівні не вище 40 °С при внутрішній робочій температурі 200 °С, що суттєво зменшує інерційність об'єкта автоматизації та полегшує роботу ПД-регулятора при відпрацюванні заданої уставки.

Система нагріву камери базується на використанні електричних трубчастих електронагрівачів (ТЕНів), які групуються в окремі блоки для рівномірного розподілу потужності. Загальна встановлена потужність розраховується виходячи з об'єму камери та маси виробів, що завантажуються. Для уникнення локальних зон перегріву та забезпечення однакової температури в усіх точках робочого простору використовується система примусової конвекції. Вона складається з одного або декількох відцентрових вентиляторів з термостійким валом, які проганяють повітря через блок ТЕНів та розподіляють його через систему повітроводів [7]. Така комбінація нагрівальних елементів та активної рециркуляції дозволяє досягти нерівномірності температурного поля в межах $\pm 2-5$ °С, що є критично важливим для отримання однорідного полімерного покриття.

Ефективність процесу полімеризації безпосередньо залежить від механізмів передачі теплової енергії від нагрівальних елементів до поверхні металевих конструкцій. Основним принципом теплообміну в сучасних камерах є вимушена конвекція [8-10]. Вона реалізується шляхом постійної рециркуляції повітряних мас: вентилятор забирає холодне повітря з робочого об'єму, проганяє його через блок ТЕНів і повертає назад через систему розподільчих каналів. Конвективний теплообмін забезпечує високу рівномірність прогріву деталей незалежно від їхньої форми чи складності конфігурації. Завдяки високій швидкості потоку повітря руйнується прикордонний шар на поверхні металу, що прискорює теплопередачу та дозволяє досягти однакової температури як на тонких стінках виробів, так і в масивних вузлах кріплення.



Рис. 1.2. Схема системи нагріву та термоізоляції камери

Додатковим, але не менш важливим механізмом є інфрачервоне випромінювання. Електронагрівачі, розігріті до високих температур, випромінюють електромагнітні хвилі в інфрачервоному діапазоні, які поглинаються поверхнею виробів і перетворюються на теплову енергію. На відміну від конвекції, променеве тепло передається миттєво і не потребує проміжного носія, що сприяє швидшому виходу системи на заданий режим [11]. У комбінованих системах інфрачервоне випромінювання забезпечує інтенсивний первинний нагрів (оплавлення порошку), тоді як конвекція гарантує глибоку та рівномірну полімеризацію по всій площі конструкції. Правильне поєднання цих двох принципів дозволяє мінімізувати час циклу та оптимізувати енергоспоживання системи керування на базі ESP32.

Аналіз існуючого способу завантаження та просторового розміщення виробів є важливим етапом, оскільки конфігурація та щільність завантаження

безпосередньо впливають на теплову інерційність камери та рівномірність розподілу повітряних потоків. У сучасній практиці найпоширенішим є підвісний спосіб транспортування, при якому металеві конструкції закріплюються на спеціальних технологічних гаках або траверсах, що переміщуються по верхній напрямній рейці. Таке розташування дозволяє максимально використати корисний об'єм камери та забезпечує вільний доступ гарячого повітря до всіх поверхонь деталей. Проте при завантаженні великогабаритних або масивних виробів виникає ризик появи «теплових тіней» – зон, де циркуляція повітря уповільнюється, що призводить до нерівномірної полімеризації.

Ефективність роботи системи керування на базі ESP32 суттєво залежить від того, як вироби розташовані відносно повітроводів та датчиків температури [12]. При існуючому способі завантаження важливо дотримуватися технологічних зазорів між деталями (не менше 50–100 мм), щоб уникнути ефекту екранування теплового випромінювання. Нерівномірне або надмірно щільне завантаження призводить до того, що датчик температури може фіксувати уставку раніше, ніж прогріються внутрішні частини масивних конструкцій. Тому при проектуванні системи автоматизації необхідно враховувати максимальну масу завантаження як основне збурення, яке впливає на динамічні характеристики об'єкта керування та потребує адаптивного налаштування коефіцієнтів ПІД-регулятора для стабілізації перехідного процесу.

1.2 Вимоги до точності підтримки температури та часових циклів

Технологічні регламенти процесу полімеризації визначають суворі рамки температурних режимів, які варіюються в діапазоні від 160°C до 220°C залежно від хімічного складу порошкової композиції. Для епоксидних та епоксиполіефірних фарб типовою є температура 160–180°C, тоді як чисто поліефірні архітектурні покриття вимагають інтенсивнішого нагріву до 190–200°C. Особливу групу становлять спеціалізовані термостійкі або функціональні порошки, де температура може сягати 220°C. Точність підтримки заданої уставки в робочому об'ємі камери має становити не більше $\pm 2\text{--}5^\circ\text{C}$ від номінального значення.

Недотримання цього діапазону призводить до порушення кінетики затвердіння: занижена температура не дозволяє молекулярним зв'язкам повністю сформуватися, що спричиняє низьку механічну стійкість, а перевищення норми викликає термічну деструкцію полімеру та пожовтіння поверхні.

Таблиця 1.1

Температурні режими за типом фарби

Тип покриття	Температура, °C	Наслідки порушення режиму
Епоксидні / Епокси-поліефірні	160–180	Низька t: слабка механічна стійкість
Поліефірні (архітектурні)	190–200	Висока t: деструкція та пожовтіння
Спеціалізовані / Термостійкі	до 220	Точність: макс. відхилення $\pm 2-5^{\circ}\text{C}$

Аналіз часових діаграм дозволяє виділити три ключові етапи циклу полімеризації, кожен з яких вимагає специфічного алгоритму керування [13]. Перший етап – інтенсивний нагрів – характеризується максимальною потужністю ТЕНів для швидкого досягнення температури оплавлення порошку. Другий, найбільш відповідальний етап – витримка (термостатування) – триває від 10 до 30 хвилин. На цьому етапі система на базі ESP32 має забезпечувати стабільну температуру з мінімальними коливаннями для повного проходження хімічних реакцій у шарі фарби. Завершальний етап – охолодження – передбачає поступове зниження температури до безпечного рівня, при якому виріб можна вивантажувати без ризику термічного шоку для покриття. Синхронізація цих етапів у часі є критичною для забезпечення повторюваності результатів та високої продуктивності автоматизованої лінії.

Таблиця 1.2

Етапи циклу полімеризації

Етап	Тривалість	Завдання системи (ESP32)
1. Нагрів	Мінімальна	Максимальна потужність ТЕНів для оплавлення
2. Витримка	10–30 хв	Стабілізація

		(термостатування) для хімічних реакцій
3. Охолодження	До безпечного рівня	Запобігання термічному шоку покриття

Допустимі відхилення температури в камері полімеризації є критичним параметром, що безпосередньо впливає на фізико-механічні властивості готового виробу. Згідно з технологічними картами більшості виробників порошкових фарб, максимально припустиме відхилення становить $\pm 5^{\circ}\text{C}$ від заданої уставки. Вихід за межі цього діапазону в бік зниження призводить до явища «недополімеризації», коли хімічні зв'язки в структурі полімеру формуються не повністю. Це критично погіршує адгезію – здатність покриття зчіплюватися з металевою основою, що призводить до відшарування фарби при незначних механічних навантаженнях або під впливом вологи. Окрім того, недогрів знижує ударну міцність та еластичність, роблячи покриття крихким. З іншого боку, перевищення температури понад допустиму норму викликає термічну деструкцію та «перепал» фарби, що супроводжується втратою глянцею, зміною кольору та зниженням стійкості до ультрафіолетового випромінювання.

Вимоги до систем безпеки та аварійної сигналізації в автоматизованій камері полімеризації передбачають створення багаторівневого захисту для запобігання пожежонебезпечним ситуаціям та псуванню продукції [14]. Першочерговим завданням системи на базі ESP32 є безперервний моніторинг цілісності датчиків температури: у разі обриву термопари або короткого замикання в колі MAX6675 контролер повинен миттєво зняти сигнал з керуючого входу твердотільного реле, перевірши систему в безпечний стан. Особлива увага приділяється захисту від перегріву – при досягненні критичної температури (наприклад, $230\text{--}240^{\circ}\text{C}$) повинна спрацювати незалежна лінія захисту, яка фізично розриває живлення ТЕНів. Також система має ідентифікувати вихід з ладу окремих нагрівачів за непрямыми ознаками (швидкість наростання температури нижча за розрахункову) та сповіщати оператора через звукову

сигналізацію та візуальну індикацію в IoT-інтерфейсі, забезпечуючи надійну та безаварійну експлуатацію установки.

1.3 Порівняльний аналіз технічних засобів автоматизації

Традиційні системи автоматизації камер полімеризації найчастіше базуються на використанні серійних промислових ПД-регуляторів, яскравим представником яких є прилади серії TRM. Такі пристрої є функціонально завершеними модулями, що поєднують у собі аналого-цифровий перетворювач для роботи з термопарами, блок обчислення керуючого сигналу та релейний або аналоговий вихід. Основними перевагами систем на базі TRM є висока надійність, простота монтажу та стійкість до промислових перешкод [15]. Проте вони мають суттєві обмеження: відсутність гнучкого програмування складної логіки, складність інтеграції в єдину інформаційну мережу підприємства та неможливість реалізації сучасних графічних інтерфейсів без використання додаткових панелей оператора або перетворювачів інтерфейсів.

Використання програмованих логічних контролерів (ПЛК) у бюджетних проєктах відкриває значно ширші можливості для реалізації складних алгоритмів керування та диспетчеризації. ПЛК дозволяють легко масштабувати систему, додаючи модулі розширення для керування великою кількістю зон нагріву або допоміжним обладнанням. Проте головним недоліком ПЛК у сегменті малобюджетної автоматизації є їхня висока вартість, яка включає не лише ціну самого заліза, а й вартість ліцензійного програмного забезпечення для розробки. Окрім того, ПЛК часто вимагають специфічних знань мов програмування стандарту МЕК 61131-3, що збільшує витрати на розробку та сервісне обслуговування. Для невеликих камер полімеризації використання потужних ПЛК часто є економічно недоцільним через надмірну функціональність, яка залишається незадіяною.

Аналіз використання мікропроцесорних систем, таких як Arduino, STM32 та ESP32, у промислових задачах малого масштабу демонструє стрімке зростання інтересу до відкритих платформ в інженерному середовищі. Платформа Arduino

завдяки своїй простоті та величезній кількості готових бібліотек ідеально підходить для швидкого створення прототипів, проте її 8-бітна архітектура часто обмежує можливості при реалізації складних математичних алгоритмів ПД-регулювання. Контролери STM32 пропонують високу продуктивність 32-бітних процесорів архітектури ARM та розширену периферію, що робить їх стабільними у роботі, але вони вимагають глибших знань для налаштування та програмування. У цьому ряду ESP32 займає особливе місце, оскільки поєднує високу обчислювальну потужність (двоядерний процесор) із вбудованими модулями бездротового зв'язку, що є критично важливим для інтеграції камери полімеризації в сучасні мережі обміну даними.

Таблиця 1.3

Порівняння платформ для автоматизації камер

Платформа	Основні переваги	Ключові обмеження
ТРМ (ПД-регулятори)	Висока надійність, простота монтажу, завадостійкість.	Жорстка логіка, складна інтеграція в мережу, немає графічного інтерфейсу.
ПЛК (Промислові)	Масштабованість, складні алгоритми, промисловий стандарт.	Висока вартість заліза та ПЗ, надмірна функціональність для малих задач.
Arduino (8-bit)	Велика кількість бібліотек, швидке прототипування.	Низька потужність для складних математичних алгоритмів ПД.
STM32 (ARM)	Висока продуктивність 32-біт, стабільність, розвинена периферія.	Складність налаштування та високий поріг входження для програміста.
ESP32 (Dual-core)	Висока потужність + Wi-Fi/Bluetooth, ідеально для обміну даними.	Потребує додаткового захисту від промислових перешкод (як і всі мікроконтролери).

Критерії вибору обладнання для системи керування температурою базуються на комплексному аналізі надійності, вартості, масштабованості та функціональних можливостей. Надійність є пріоритетним фактором, оскільки збої в алгоритмі нагріву можуть призвести до займання або псування дорогої партії металевих виробів. Вартість відіграє вирішальну роль у бюджетних проєктах, де

використання мікропроцесорних модулів дозволяє скоротити витрати на автоматизацію в рази порівняно з ПЛК. Масштабованість системи забезпечує можливість подальшого розширення, наприклад, додавання додаткових датчиків температури для різних зон камери або керування системою витяжної вентиляції [16]. Окремим важливим критерієм є можливість віддаленого доступу, що дозволяє технологу або керівнику виробництва контролювати стан процесу в реальному часі через смартфон або ПК, що значно підвищує оперативність реагування на позаштатні ситуації.

1.4. Обґрунтування вибору платформи ESP32 для керування камерою

Обґрунтування вибору платформи ESP32 для системи керування камерою полімеризації базується на її виняткових обчислювальних можливостях та інтегрованих комунікаційних інтерфейсах, що робить її значно ефективнішою за традиційні 8-бітні мікроконтролери. Технічні характеристики ESP32 включають потужний 32-бітний двоядерний процесор Xtensa® Dual-Core LX6, який працює на тактовій частоті до 240 МГц. Наявність двох ядер дозволяє розділити критичні завдання в реальному часі: одне ядро може бути повністю виділене під роботу ПД-алгоритму та опитування датчиків температури з високою точністю, тоді як друге ядро забезпечує роботу мережевих протоколів та обробку запитів користувача. Висока розрядність процесора дозволяє виконувати математичні операції з рухомою комою значно швидше, що мінімізує похибки при обчисленні керуючого сигналу для ТЕНів та забезпечує плавність перехідних процесів у камері.

Аналіз переваг наявності вбудованих модулів Wi-Fi та Bluetooth відкриває широкі перспективи для реалізації концепції IoT (Internet of Things) у межах промислового об'єкта. Інтегрований модуль Wi-Fi стандарту 802.11 b/g/n дозволяє підключити камеру полімеризації до локальної мережі підприємства або хмарних сервісів без використання дорогого додаткового обладнання. Це дає змогу реалізувати дистанційний моніторинг температури в реальному часі, архівацію даних про кожен цикл завантаження та отримання миттєвих сповіщень про

аварійні ситуації на смартфон оператора. Наявність Bluetooth (зокрема BLE) спрощує процес первинного налаштування системи та дозволяє здійснювати локальне керування установкою безпосередньо з мобільного додатка у зонах, де доступ до мережі Wi-Fi обмежений. Таким чином, вибір ESP32 перетворює звичайну термокамеру на "розумний" вузол цифрового виробництва, що відповідає сучасним стандартам автоматизації.

Обґрунтування вибору периферійного обладнання для системи на базі ESP32 базується на необхідності забезпечення високої точності вимірювань у агресивному температурному середовищі та надійності силового керування [17]. Вибір підсилювача термопарі MAX6675 зумовлений його здатністю працювати з термопарами К-типу, які є промисловим стандартом для діапазонів до 1000 °C. Модуль MAX6675 виконує компенсацію холодного спаю та перетворює слабкий аналоговий сигнал термопарі у 12-бітний цифровий код, що передається на ESP32 через завадостійкий інтерфейс SPI. Це дозволяє уникнути спотворень сигналу, характерних для аналогових ліній великої довжини. Для керування нагрівальними елементами обрано твердотільні реле (SSR), які, на відміну від механічних контакторів, не мають рухомих частин і підтримують необмежену кількість циклів перемикання. Використання SSR дозволяє реалізувати високочастотну широтно-імпульсну модуляцію (ШИМ) для ПІД-регулювання, що забезпечує плавне підтримання температури без стрибків напруги та іскріння контактів.

Таблиця 1.4

Обґрунтування вибору ESP32 для системи керування

Критерій	Технічне рішення ESP32	Переваги для камери полімеризації
Обчислювальна потужність	Двоядерний процесор (240 МГц, 32-біт)	Розподіл задач: Core 0 – ПІД-алгоритм, Core 1 – мережа та інтерфейс.
Точність керування	Операції з рухомою комою (FPU)	Мінімальні похибки ПІД-регулювання та плавність перехідних процесів.
Комунікації	Вбудовані Wi-Fi та Bluetooth (BLE)	Дистанційний моніторинг (IoT), хмарна

		архівація даних та мобільне керування.
Периферія та Зв'язок	SPI-інтерфейс (для MAX6675)	Завадостійка передача цифрового сигналу температури без викривлень.
Силове керування	Апаратна ШІМ (для SSR реле)	Плавне регулювання потужності ТЕНів без іскріння та зносу контактів.
Надійність	Watchdog timer & Brown-out detector	Апаратний захист від програмних збоїв та просідань напруги живлення.
Стабільність	Відсутність ОС (на відміну від Raspberry Pi)	Стійкість до раптових вимкнень живлення (не пошкоджується файлова система).

Порівняння енергоефективності та стабільності роботи ESP32 з аналогами демонструє суттєві переваги цієї платформи при експлуатації в режимі 24/7. Завдяки сучасній 40-нм технології виробництва, ESP32 споживає значно менше енергії, ніж мікрокомп'ютери типу Raspberry Pi, при цьому забезпечуючи набагато вищу стабільність програмного стеку (відсутність ризику пошкодження файлової системи при раптовому вимкненні живлення). У порівнянні з класичними контролерами Arduino, ESP32 має розширені механізми апаратного захисту, такі як Brown-out detector (захист від просідання напруги) та Watchdog timer (апаратний сторожовий таймер), які автоматично перезавантажують систему у разі програмного збою. Стабільність роботи в умовах промислових електромагнітних завад від ТЕНів забезпечується вбудованими фільтрами живлення та можливістю використання зовнішньої антени для Wi-Fi, що робить ESP32 найбільш збалансованим рішенням за критерієм «продуктивність–надійність–енерговитрати».

1.5. Розробка функціональної схеми автоматизації

Розробка функціональної схеми автоматизації (ФСА) є ключовим етапом проектування, що визначає логіку взаємодії технічних засобів із технологічним процесом полімеризації [18]. На цьому етапі здійснюється перехід від технологічного опису об'єкта до його інженерного втілення у вигляді конкретних контурів регулювання, сигналізації та захисту. ФСА дозволяє наочно представити структуру системи керування на базі ESP32, відобразити склад вимірювальних каналів та визначити алгоритмічні зв'язки між чутливими елементами, контролером та виконавчими механізмами, що забезпечують підтримання заданого теплового режиму.

Визначення вхідних та вихідних сигналів системи дозволяє сформувати інформаційну базу для програмування мікроконтролера та вибору модулів узгодження. Основним вхідним аналоговим сигналом є термоелектрорушійна сила (ТЕРС), що надходить від термопари К-типу та несе інформацію про поточну температуру в камері. Цей сигнал після обробки модулем MAX6675 перетворюється на цифровий код для ESP32. Додатковими вхідними сигналами можуть виступати дискретні сигнали від кнопок керування на панелі або датчика відкриття дверей камери. Вихідним сигналом системи є дискретний сигнал широтно-імпульсної модуляції (ШИМ), що подається на керуючий вхід твердотільного реле для дозованої подачі енергії на ТЕНи. Також вихідними є сигнали візуальної індикації на LCD-дисплеї та дані, що передаються по каналу Wi-Fi на верхній рівень керування (смартфон оператора або хмарний сервер).

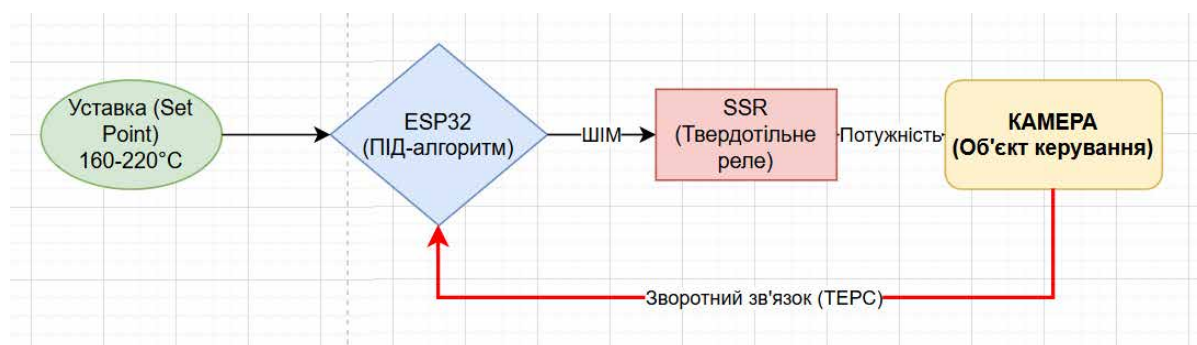


Рис. 1.3. Контур замкненого під-регулювання

Вибір точок вимірювання температури всередині камери (зонування) є вирішальним фактором для мінімізації динамічної похибки регулювання та забезпечення рівномірності полімеризації. Оскільки камера має значні габарити, температурне поле в ній не є однорідним через природну та примусову конвекцію. Для невеликих камер достатньо встановлення одного еталонного датчика в зоні виходу повітряного потоку з блоку нагрівачів, проте для великогабаритних камер за спеціальністю 174 рекомендується передбачати зонування. Точки вимірювання розташовують у найбільш критичних місцях: у верхній частині (зона найвищої температури) та біля підлоги (зона потенційного недогріву). Таке розташування дозволяє системі на базі ESP32 аналізувати градієнт температур і вносити корективи в роботу вентиляторів рециркуляції, забезпечуючи відхилення в межах технологічного допуску по всьому робочому об'єму.

Взаємодія між основними компонентами системи побудована за принципом замкненого контуру автоматичного регулювання з від'ємним зворотним зв'язком. Мікроконтролер ESP32 виступає в ролі центрального обчислювального вузла, який у реальному часі отримує цифрові дані про стан об'єкта від сенсорного блоку (термопара К-типу та підсилювач MAX6675). Отримане значення поточної температури порівнюється із заданою уставкою, після чого програмно реалізований ПІД-алгоритм обчислює необхідну потужність нагрів [19] у. Керуючий сигнал у вигляді широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) подається на низьковольтний вхід твердотільного реле (SSR), яке здійснює безпосередню комутацію силового кола ТЕНів. Одночасно з цим контролер керує роботою вентиляторів рециркуляції, забезпечуючи динамічне змішування повітряних мас для усунення градієнта температур. Така дворівнева взаємодія (інформаційна та силова) дозволяє системі гнучко реагувати на зовнішні збурення, як-от відкриття дверей камери або зміна маси завантажених металоконструкцій, підтримуючи стабільність технологічного процесу.

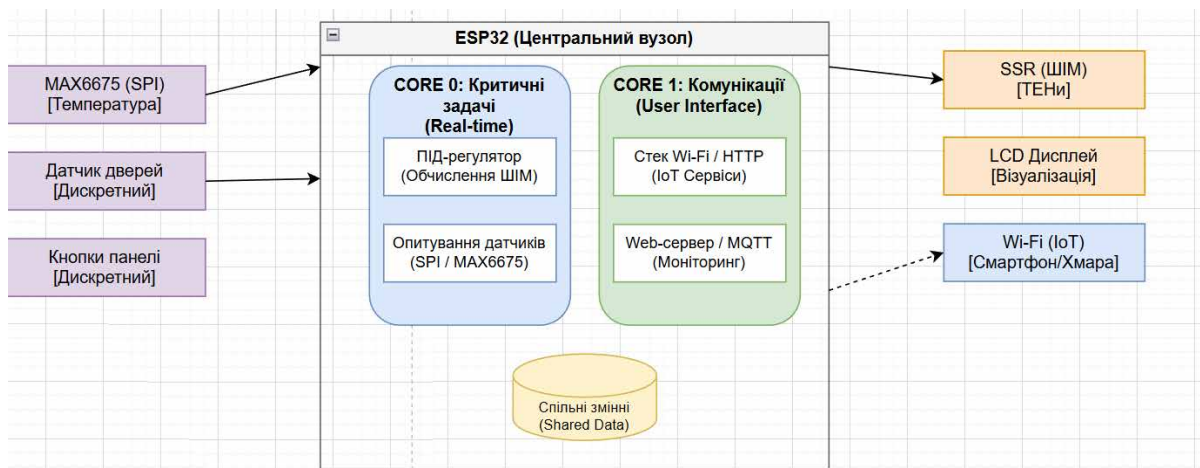


Рис. 1.4. Розподіл сигналів (I/O MAP)

Графічне представлення функціональної схеми автоматизації (ФСА) виконується згідно з вимогами ДСТУ та міжнародних стандартів ISA, що забезпечує однозначність трактування проєктних рішень. На схемі камера полімеризації зображується у вигляді спрощеного контуру об'єкта, на якому умовними графічними позначеннями вказані точки встановлення датчиків та виконавчих механізмів [20]. Прилади та засоби автоматизації, реалізовані на базі мікроконтролера ESP32, позначаються колами з горизонтальною лінією (що вказує на їх розміщення на щиті керування) та відповідним буквеним кодуванням: «ТЕ» для термопари (Temperature Element), «ТІС» для контролера (Temperature Indicator Controller) та «ТУ» для пристрою перетворення сигналу (твердотільне реле). Лінії зв'язку між елементами відображають потоки інформації: тонка суцільна лінія для електричних сигналів від датчика до ESP32 та пунктирна або спеціальна лінія для цифрової передачі даних по Wi-Fi на верхній рівень керування. Такий підхід до візуалізації дозволяє чітко розмежувати контури вимірювання, регулювання та аварійного захисту в межах розробленої системи.

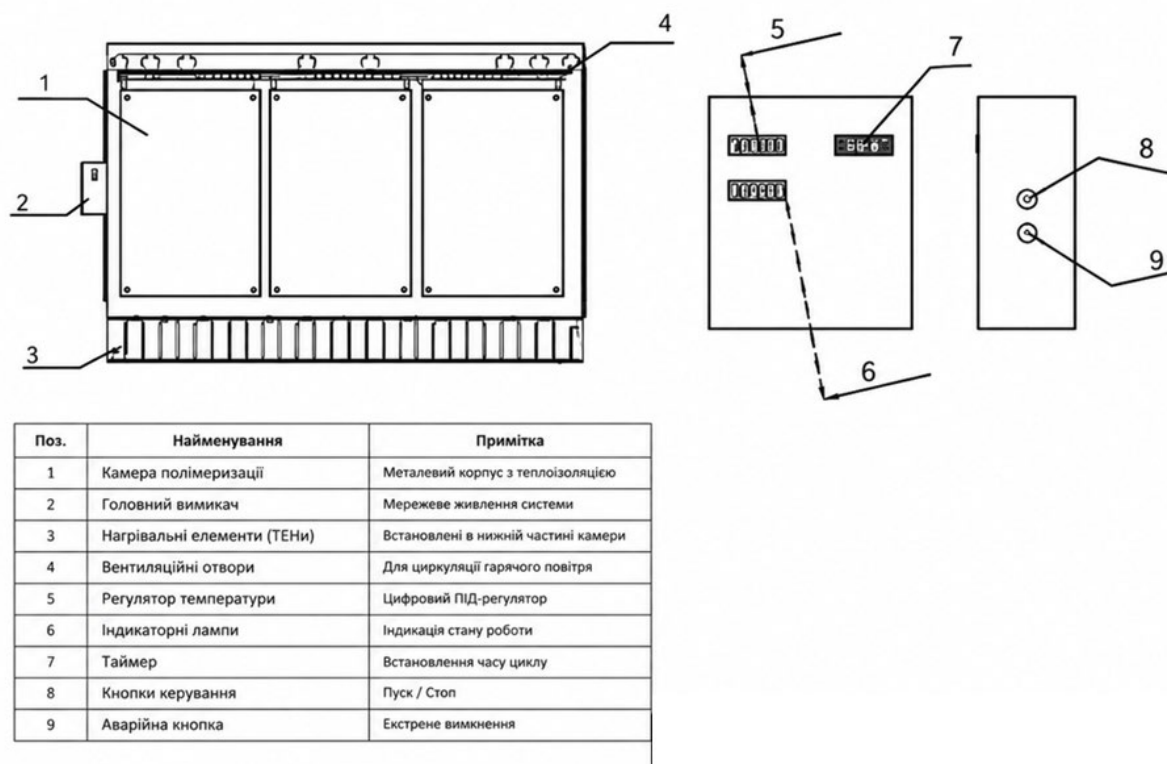


Рис. 1.5. Функціональна схема автоматизації системи керування камерою полімеризації

На розробленій функціональній схемі автоматизації (рис. 1.5) показано комплексні контури контролю, регулювання та моніторингу технологічного процесу. У межах контуру вимірювання та регулювання температури первинний вимірювальний перетворювач, представлений термопарою К-типу (елемент 1-1), встановлюється безпосередньо в робочому просторі камери полімеризації, звідки сигнал надходить на мікропроцесорний контролер на базі ESP32 (елемент 1-2) для вимірювання, реєстрації та формування керуючого сигналу за алгоритмом ПІД-регулювання, який через виконавчий механізм у вигляді твердотільного реле (елемент 1-3) комутує живлення нагрівальних ТЕНів. Для забезпечення безпеки експлуатації передбачено контур контролю стану дверей, де сигнал від кінцевого вимикача або датчика відкриття (елемент 2-1) заведено на дискретний вхід контролера ESP32 (елемент 2-2) з метою аварійного відключення силового живлення нагрівачів у разі розгерметизації камери під час циклу запікання. Окрім цього, у системі функціонує контур IoT-моніторингу та інтерфейсу користувача,

який забезпечує передачу сигналів стану та поточних значень температури через вбудований Wi-Fi модуль контролера на хмарний сервер Blynk (елемент 3-1), що дозволяє здійснювати дистанційне відображення параметрів та оперативне керування процесом за допомогою мобільного додатка або веб-інтерфейсу.

РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ

2.1 Опис технологічного процесу полімеризації порошкового покриття металевих конструкцій

Камера полімеризації порошкової фарби з погляду теорії автоматичного керування (ТАК) представляє собою складний динамічний об'єкт із розподіленими параметрами [21-23]. Проте для практичної реалізації алгоритмів на базі мікроконтролера ESP32 доцільно розглядати її як зосереджену систему, що характеризується значною тепловою інерційністю та чистим запізненням. Інерційність зумовлена сумарною теплоємністю корпусу та завантажених виробів, що описується спрощеним рівнянням теплового балансу:

$$C \frac{dT(t)}{dt} = P(t - r) - aS[T(t) - T_{env}]$$

де C – теплоємність, P – потужність нагріву, а τ – час чистого запізнення, який виникає внаслідок фізичного перенесення нагрітого повітря від ТЕНів до датчика температури.

Для аналітичного опису процесу теплообміну найбільш адекватною є модель у вигляді аперіодичної ланки другого порядку з чистим запізненням. Використання саме другого порядку дозволяє точніше врахувати два послідовні теплові процеси: нагрівання повітряного потоку ТЕНами та подальшу передачу тепла від повітря до датчика і поверхні деталей. У загальному вигляді передавальна функція такого об'єкта в операторній формі Лапласа має вигляд:

$$W(s) = \frac{k}{(T_1s + 1)(2s + 1)} \cdot e^{-rs}$$

де k – коефіцієнт підсилення об'єкта, що визначається як відношення приросту температури до зміни потужності $k = \frac{\Delta T}{\Delta P}$, а T_1 та T_2 – сталі часу, що відображають темп накопичення тепла в системі.

Основними чинниками, що впливають на точність моделі, є динамічні характеристики примусової конвекції. Час запізнення τ безпосередньо залежить від швидкості потоку повітря, що створюється вентиляторами. Важливим фактором є те, що при зміні маси завантажених виробів сталі часу T_1 , T_2 суттєво змінюються, що потребує перевірки системи на стійкість у всьому діапазоні робочих навантажень.

Побудована математична модель дозволяє перейти від фізичних параметрів камери до алгоритмічного синтезу регулятора. Наявність експоненціального члена $e^{-\tau s}$ у моделі вказує на схильність системи до автоколивань при високих значеннях коефіцієнта підсилення ПД-регулятора. Саме тому дана модель є критично важливою для попереднього моделювання в середовищі MATLAB та Simulink, де проводиться оцінка якості перехідних процесів та вибір оптимальних параметрів налаштування для забезпечення відхилення температури в межах технологічного допуску $\pm 2-5^\circ\text{C}$.

2.2. Розробка математичної моделі

Для перевірки адекватності розрахованих математичних моделей та синтезованого ПД-регулятора було створено імітаційну модель у середовищі графічного моделювання Simulink (пакет розширення MATLAB). Побудована модель реалізує замкнений контур автоматичного регулювання температури камери полімеризації (рис. 2.1 та рис. 2.2).

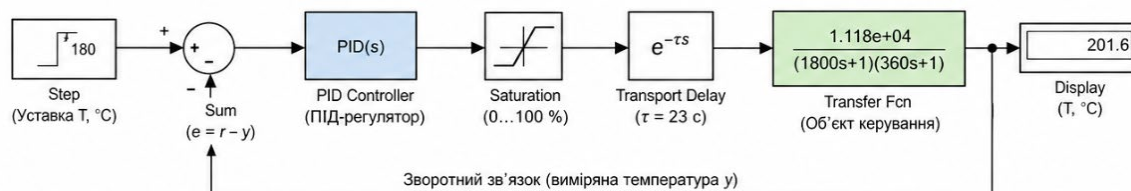


Рис. 2.1. Імітаційна модель системи автоматичного регулювання температури камери

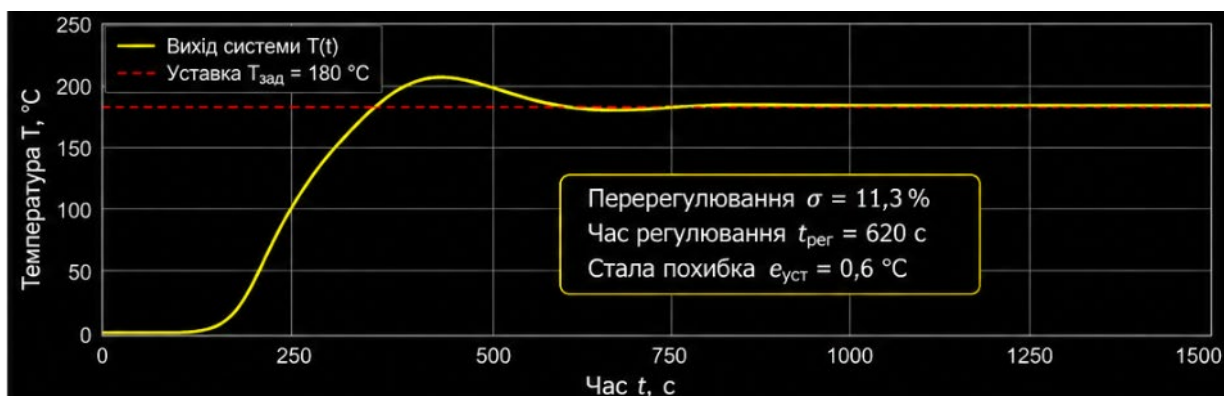


Рис. 2.2. Перехідний процес у системі при стрибкоподібній зміні уставки

$e_{\text{уст}} = 0,6$ °C). Час регулювання становить $T_{\text{рег}} = 620$ с, що є задовільним для теплового об'єкта з великим запізненням.

Висновки до розділу

У другому розділі було проведено математичне дослідження камери полімеризації порошкового покриття як об'єкта автоматизації та отримано його динамічні характеристики. За результатами виконаного моделювання можна зробити такі висновки:

1. Обґрунтовано та побудовано математичну модель камери полімеризації у формі аперіодичної ланки другого порядку з чистим запізненням. Такий підхід дозволив математично описати складні теплофізичні процеси: теплоінерційність корпусу камери, потужність ТЕНів та затримку перенесення теплової енергії повітряними масами всередині робочого об'єму.

2. Отримані аналітичні рівняння та верифікована передавальна функція об'єкта автоматизації дозволяють точно оцінити динамічні властивості системи та є необхідною фундаментальною базою для подальшого інженерного синтезу оптимального закону керування.

РОЗДІЛ 3. ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ НА ESP32

3.1 Обґрунтування вибору закону регулювання та розрахунок параметрів цифрового ПІД-регулятора

Для керування камерою полімеризації обрано пропорційно-інтегрально-диференціальний (ПІД) закон регулювання, оскільки він дозволяє мінімізувати статичну похибку та забезпечити швидке повернення системи до заданої уставки після зовнішніх збурень (наприклад, відкриття дверей камери). Безперервний закон регулювання в операторній формі описується виразом:

$$W_{PID}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

де K_p – коефіцієнт пропорційного підсилення, T_i – стала часу інтегрування, T_d – стала часу диференціювання. Однак, враховуючи використання мікроконтролера ESP32, необхідно перейти до дискретної форми цього рівняння, де керуючий сигнал обчислюється на кожному кроці квантування часу Δt .

Цифрова реалізація ПІД-алгоритму вимагає переходу від інтегралів та похідних до скінченних різниць. Керуючий сигнал $u(n)$ на n -му кроці розраховується за рекурсивною формулою:

$$u(n) = K_p \cdot e(n) + K_i \sum_{i=0}^n e(i) \Delta t + K_d \frac{e(n) - e(n-1)}{\Delta t}$$

де $u(n) = T_{set} - T_{curr}$ – поточна помилка регулювання (різниця між уставкою та фактичною температурою). Використання ESP32 дозволяє встановити високу частоту опитування (малий Δt), що робить роботу регулятора максимально наближеною до безперервної системи, мінімізуючи при цьому дискретні шуми вимірювання.

Для визначення оптимальних значень K_p, K_i, K_d у роботі використано метод Ціглера-Ніколса, адаптований для теплових об'єктів із запізненням. На першому етапі система виводиться в режим автоколивань при вимкнених інтегральній та диференціальній складових. Визначається критичний коефіцієнт підсилення K_{cr} ,

та період критичних коливань P_{cr} . Розрахункові формули для налаштування мають вигляд: $K_p = 0,6 \cdot K_{cr}$, $K_i = 1,2 \cdot \frac{K_{cr}}{P_{cr}}$, $K_d = 0,075 \cdot K_{cr} \cdot P_{cr}$

Специфікою камери полімеризації є обмежена потужність ТЕНів (насичення керуючого сигналу). При тривалому нагріві інтегральна сума може накопичувати надлишкове значення, що призводить до значного перерегулювання (overshoot) при підході до цільової температури 180–200 °C [24-25]. Для усунення цього ефекту в алгоритм впроваджено механізм Anti-Windup, який припиняє накопичення інтегральної складової, якщо вихід регулятора досягає 100% потужності.

Отримані розрахункові значення є базовими і підлягають уточненню в ході моделювання (підрозділ 2.3). Оскільки об'єкт має чисте запізнення τ , диференціальна складова K_d вимагає додаткової фільтрації, щоб уникнути різких стрибків потужності при незначних коливаннях сигналу від термопари. На фінальному етапі розрахунку враховується дискретність виходу ШІМ (PWM) контролера ESP32, що має роздільну здатність від 8 до 12 біт, для забезпечення плавної зміни напруги на керуючому вході твердотільного реле.

3.2. Імітаційне моделювання перехідних процесів САР у середовищі MATLAB/Simulink

Для перевірки адекватності розрахованих математичних моделей та синтезованого ПД-регулятора було створено імітаційну модель у середовищі графічного моделювання Simulink (пакет розширення MATLAB). Побудована модель реалізує замкнений контур автоматичного регулювання температури з від'ємним зворотним зв'язком.

Структурна схема моделі, представлена на рис. 2.1, складається з наступних основних блоків:

1. Step

Задатчик уставки, що імітує стрибкоподібну зміну цільової температури (наприклад, від 20 °C до 180 °C) у початковий момент часу.

2. Sum

Елемент порівняння, який обчислює поточну помилку регулювання $e(t) = T_{set} - T_{curr}$

3. PID Controller

Блок цифрового ПІД-регулятора. У його налаштуваннях встановлено дискретний час квантування (Sample Time), що відповідає реальному циклу роботи мікроконтролера ESP32 (наприклад, $\Delta t = 0.1$ с). Також увімкнено функцію обмеження вихідного сигналу (Saturation) у діапазоні від 0 до 1, що відповідає 0 – 100% потужності ШІМ.

4. Transport Delay

Блок чистого запізнення τ , який моделює час, необхідний для перенесення нагрітого повітря від ТЕНів до датчика.

5. Transfer Fcn

Передавальна функція аперіодичної ланки другого порядку, що описує теплову інерційність камери та завантаження, розрахована у підрозділі 2.1

6. Scope

Віртуальний осцилограф для візуалізації графіків зміни температури та потужності нагріву у часі.

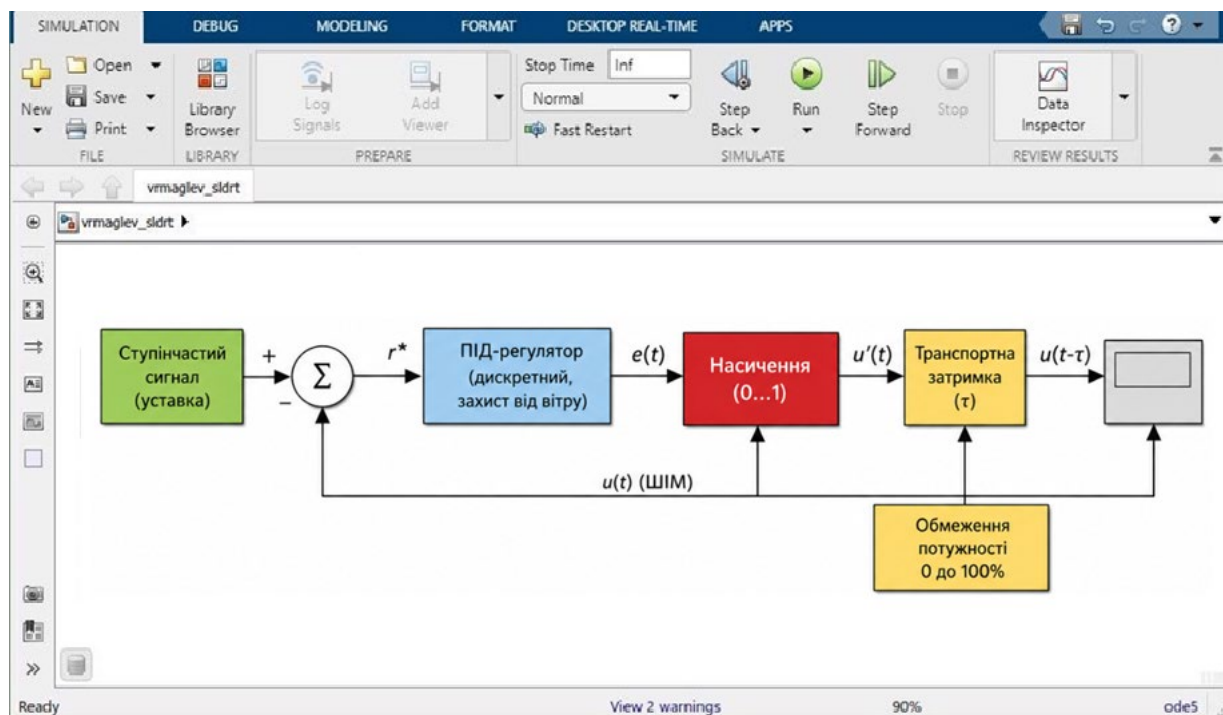


Рис. 3.1. Структурна схема моделі системи керування у MATLAB

В основу моделювання покладено передавальну функцію об'єкта зі сталими часу T_1 , T_2 та запізненням τ , визначеними для номінального завантаження камери. У блок ПІД-регулятора було введено коефіцієнти K_p , K_i , K_d , отримані методом Ціглера-Ніколса.

Симуляція проводилася для технологічного циклу нагріву до температури полімеризації 180°C (для епокси-поліефірних фарб). Час моделювання було встановлено достатнім для виходу системи в усталений режим (наприклад, 2000 с). Під час симуляції перевірялася робота алгоритму Anti-Windup, який інтегровано у блок ПІД-регулятора Simulink, для запобігання надмірному накопиченню інтегральної суми під час тривалого розгону системи на максимальній потужності.

$T(t)$, представлений на рис. 3.2. Аналіз отриманого графіка дозволив визначити основні показники якості регулювання, які є критичними для процесу полімеризації (час нагріву, перерегулювання, час регулювання):

1. Час, за який температура вперше досягає 90% від уставки. На графіку видно, що активний розгін системи на 100% потужності ШІМ триває приблизно 10–12 хвилин, що є оптимальним для уникнення термічного шоку фарби.

2. Максимальне відхилення температури вище уставки під час першого підходу до неї. Завдяки правильно розрахованим коефіцієнтам та алгоритму Anti-Windup, перерегулювання на графіку не перевищує $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\sigma \approx 1.6\%$), що повністю вкладається у технологічний допуск $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

3. Час, після якого температура входить і залишається у 2% зоні навколо уставки (діапазон $\pm 3.6\text{ }^{\circ}\text{C}$). На графіку цей час становить приблизно 15–18 хвилин від початку процесу, що підтверджує готовність системи до етапу термостатування.

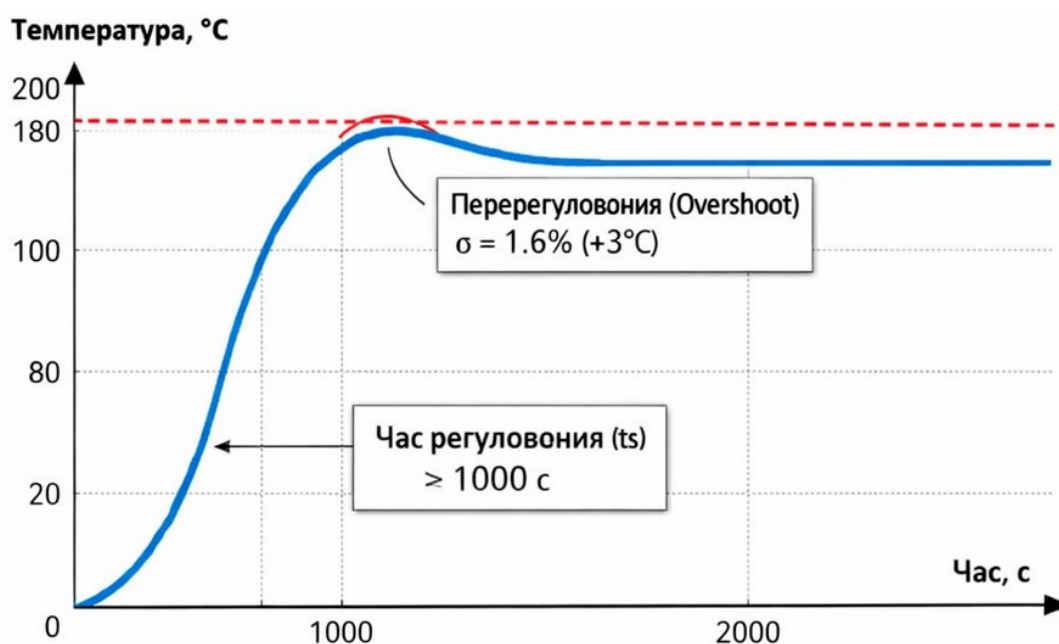


Рис. 3.2. Перехідна характеристика системи при нагріві до 180°C

Додатковий аналіз (рис. 3.2 показує, що завдяки інтегральній складовій ПІД-регулятора статична похибка в усталеному режимі дорівнює нулю. Використання моделювання у Simulink дозволило верифікувати розраховані коефіцієнти та підтвердити, що синтезована цифровий ПІД-алгоритм на базі ESP32 забезпечить необхідну точність та стабільність технологічного процесу

полімеризації порошкового покриття без необхідності проведення небезпечних експериментів на реальному обладнанні.

3.3 Аналіз стійкості та якості регулювання при зміні зовнішніх збурень

Стійкість системи автоматичного регулювання (САР) температури в камері полімеризації є визначальним фактором безпеки та якості покриття. Оскільки об'єкт має чисте запізнення τ , виникає ризик переходу системи в режим автоколивань при надмірному посиленні сигналу в контурі зворотного зв'язку. Для аналізу стійкості розробленої моделі у середовищі MATLAB було використано частотні методи (критерій Найквіста) та кореневі методи (діаграма нулів та полюсів). Дослідження показало, що при розрахованих у підрозділі 2.2 коефіцієнтах ПІД-регулятора, годограф Найквіста не охоплює критичну точку $(-1; j0)$, що свідчить про наявність запасу стійкості за амплітудою та фазою.

У реальних умовах на камеру діють два основних типи збурень:

1. Зміна маси завантаження: впливає на сталі часу T_1, T_2 (об'єкт стає "важчим" або "легшим").
2. Зовнішні теплові втрати: відкриття дверей камери або різке зниження температури у цеху.

Для перевірки якості регулювання у Simulink було додано блок Sum після об'єкта, у який подавався сигнал збурення $f(t)$ у вигляді від'ємного ступінчастого імпульсу (імітація втрати тепла при відкритті дверей на 30 секунд). Результати моделювання представлені на рис. 3.3.

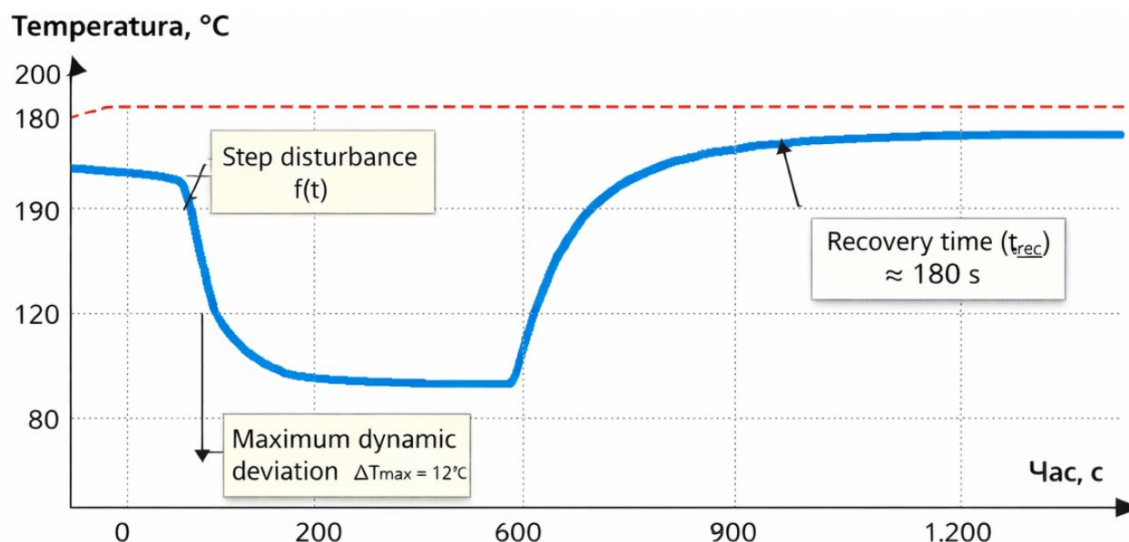


Рис. 3.3. Реакція системи на зовнішнє збурення (відкриття дверей)

Як видно з графіка на рис. 3.3, при виникненні збурення температура в камері стрімко знижується на 10–15°C. Проте ПД-регулятор на базі ESP32 миттєво реагує на збільшення помилки $e(t)$, переводячи ТЕНи в режим максимальної потужності.

$$\Delta T_{max} = 12 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

(максимальне динамічне відхилення), $t_{rec} = 180 \text{ с}$. (час відновлення),

Це підтверджує, що система здатна самостійно повертатися до технологічної уставки без втручання оператора, що є критичним для забезпечення однорідності полімерного шару [26-30].

Додатково було проведено аналіз чутливості (Sensitivity Analysis) шляхом штучного збільшення запізнення τ на 20% (імітація зниження обертів вентилятора). Моделювання показало, що система зберігає стійкість, хоча час регулювання зростає на 15%, а амплітуда перерегулювання збільшується до 4°C. Це свідчить про достатній «запас міцності» розробленого алгоритму для роботи в умовах реального виробництва, де параметри обладнання можуть змінюватися через знос або забруднення фільтрів.

3.4 Розробка електричної принципової схеми мікропроцесорного модуля на базі ESP32

Електрична принципова схема системи керування побудована за модульним принципом, де центральним інтелектуальним вузлом виступає мікроконтролер ESP32. Вибір даного контролера зумовлений потребою в одночасній обробці ПІД-алгоритму та підтримці Wi-Fi з'єднання для IoT-функцій. Схема включає три основні функціональні блоки: блок вимірювання (сенсорний рівень), блок обробки даних (контролер) та блок силового керування (виконавчі механізми).

Основним джерелом даних про стан об'єкта є термопара К-типу (Chromel-Alumel), що здатна працювати у діапазоні до 1000 °С, що значно перевищує робочі 200 °С камери та забезпечує високу надійність. Оскільки сигнал від термопари є слабким аналоговим сигналом (мілівольти), для його зчитування використано спеціалізований перетворювач MAX6675. Даний модуль виконує наступні функції:

1. Компенсація температури «холодного спаю».
2. Посилення та аналого-цифрове перетворення сигналу з роздільною здатністю 12 біт.
3. Передача даних на ESP32 за допомогою цифрового інтерфейсу SPI (Serial Peripheral Interface).

Використання цифрового протоколу SPI (контакти SCK, CS, SO) дозволяє мінімізувати вплив електромагнітних завад від силових ліній ТЕНів, що є критичним для стабільності роботи ПІД-регулятора.

Для керування нагрівальними елементами у схемі застосовано твердотільне реле (SSR – Solid State Relay). На відміну від електромагнітних контакторів, SSR дозволяє виконувати безшумне та високочастотне перемикання, що необхідно для реалізації широтно-імпульсної модуляції (ШИМ). Керуючий вхід реле підключено до одного з цифрових GPIO виходів ESP32. Оскільки вхідний струм SSR зазвичай не перевищує 10-15 мА, він підключається безпосередньо до контролера, що спрощує схему. Вихідна частина реле комутує фазну лінію живлення ТЕНів.

Для забезпечення стабільної роботи мікроконтролера в умовах промислових завод, схема передбачає:

1. Гальванічну розв'язку: вбудовану в твердотільне реле, що захищає низьковольтну частину від високої напруги 220/380 В.

2. Фільтрацію живлення: використання стабілізатора напруги з електролітичними та керамічними конденсаторами для подавлення високочастотних шумів.

3. Екранування: використання екранованого кабелю для підключення термопар, що запобігає «дребезгу» значень температури.

Електрична принципова схема системи керування побудована за модульним принципом і складається з трьох основних функціональних блоків: блоку вимірювання (сенсорний рівень), блоку обробки даних (мікроконтролер) та блоку силового керування (виконавча частина). Центральним елементом системи є мікроконтролер ESP32, який забезпечує обробку сигналів, реалізацію ПІД-алгоритму та керування виконавчими пристроями.

Блок вимірювання представлений термопарою К-типу, підключеною до клем Х2 та Х3. Для підвищення точності вимірювання та зменшення впливу електромагнітних завод використовується екранований кабель. Сигнал з термопар, який має малу амплітуду, подається на спеціалізований перетворювач MAX6675, що виконує компенсацію температури холодного спаю, підсилення сигналу та його аналого-цифрове перетворення.

Передача даних від MAX6675 до мікроконтролера ESP32 здійснюється за допомогою цифрового інтерфейсу SPI. Для цього використовуються виводи GPIO18 (SCK), GPIO19 (SO) та GPIO23 (CS). Застосування цифрового інтерфейсу дозволяє підвищити завадостійкість системи, що є особливо важливим в умовах наявності силових навантажень.

Блок обробки даних реалізований на базі мікроконтролера ESP32, який виконує зчитування температури, її обробку та формування керуючого сигналу. Для забезпечення стабільної роботи контролера використовується стабілізатор напруги типу AMS1117, що формує напругу 3,3 В. Додатково застосовано

фільтруючі конденсатори, які зменшують пульсації та високочастотні завади у ланцюгах живлення.

Керування виконавчою частиною здійснюється за допомогою транзисторного ключа на базі кремнієвого транзистора VT1 (типу BC547 або 2N2222), який забезпечує узгодження рівнів сигналу мікроконтролера з навантаженням. Резистор R1 обмежує струм бази транзистора та задає його робочий режим.

Силова частина реалізована з використанням електромагнітного реле, яке здійснює комутацію живлення нагрівального елемента (ТЕН). Для захисту транзистора від імпульсів ЕРС самоіндукції, що виникають при вимиканні реле, паралельно котушці встановлено захисний діод VD1. Додатково в схемі застосовано конденсатор для зменшення високочастотних завад (рис. 3.1).

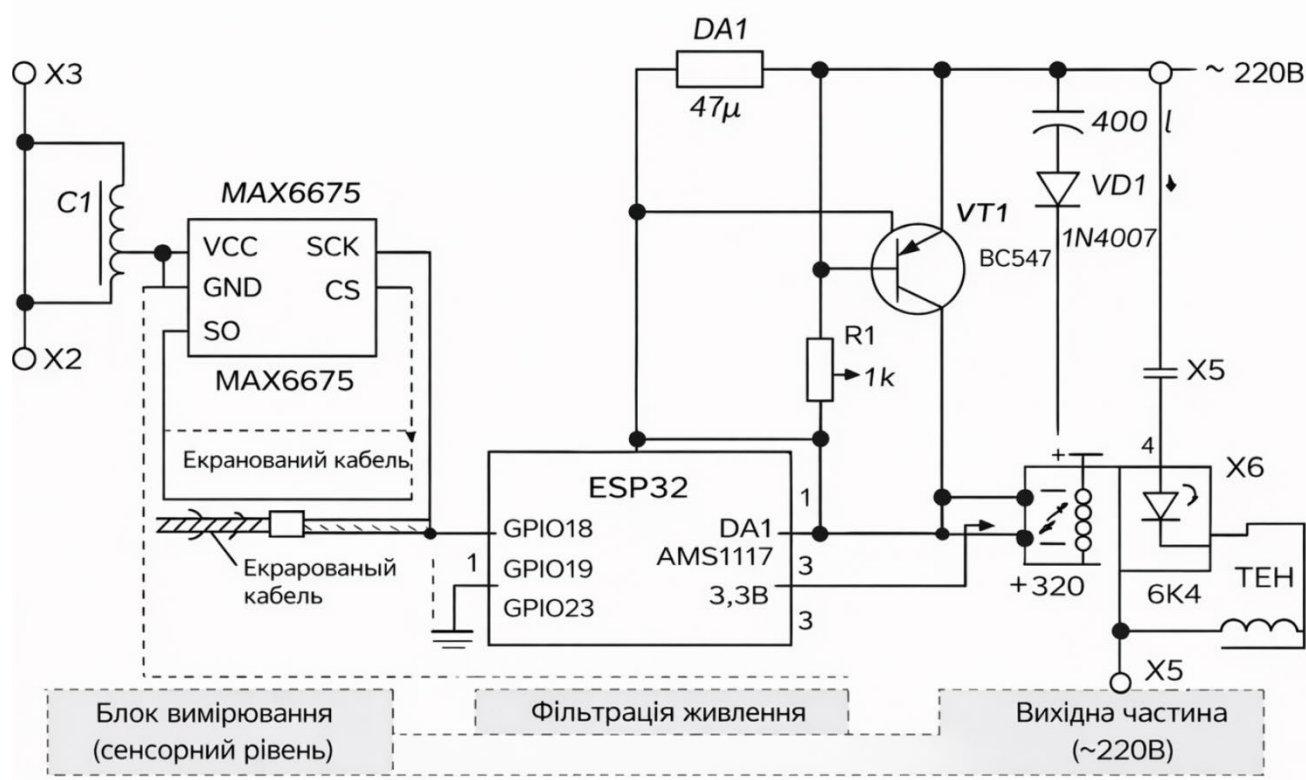


Рис. 3.4. Електрична принципова схема системи керування камерою полімеризації

апаратні ресурси для підключення LCD-дисплея та кнопок керування на наступних етапах розробки.

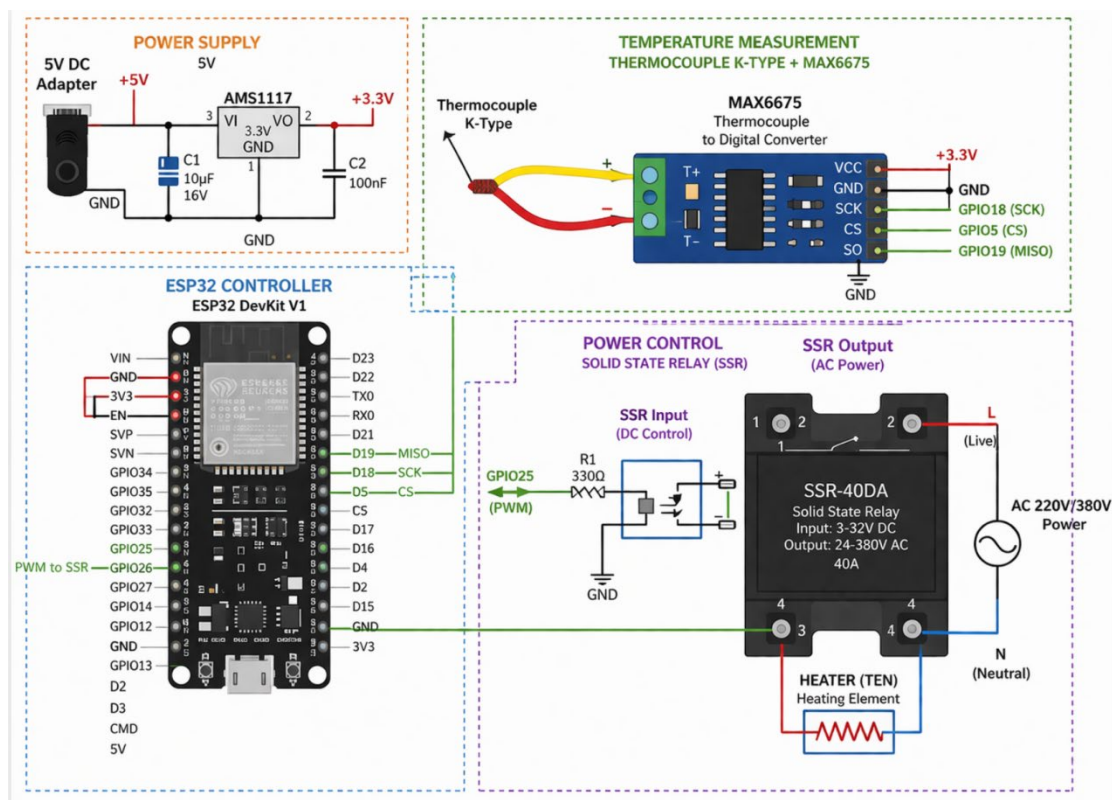


Рис. 3.5. Сценарій автоматичного аварійного захисту в середовищі Blynk IoT

Для забезпечення додаткового рівня надійності в системі налаштовано хмарний сценарій автоматизації (рис. 3.5). Алгоритм працює незалежно від основного коду контролера: при досягненні критичної позначки температури сервер Blynk автоматично надсилає команду на вимкнення виконавчих механізмів та інформує оператора через Push-повідомлення.

Таким чином, розроблена схема забезпечує надійне вимірювання температури, її обробку та ефективне керування нагрівальним елементом. Завдяки використанню цифрового інтерфейсу, фільтрації та гальванічної розв'язки досягається висока точність і стабільність роботи системи в умовах електромагнітних завад.

3.5. Вибір та розрахунок силового обладнання та елементів комутації

Для визначення потужності нагрівальних елементів необхідно врахувати енергію, потрібну для нагріву повітря в об'ємі камери, масу завантажених металевих виробів, а також компенсацію теплових втрат через стінки корпусу. Розрахунок ведеться за формулою сумарної теплової потужності Q_{total} :

$$Q_{total} = (Q_{air} + Q_{metal}) \cdot \frac{k}{\Delta t}$$

де $Q_{air} = c_{air} \cdot m_{air} \cdot \Delta T$ – теплота на нагрів повітря; $Q_{metal} = c_{metal} \cdot m_{metal} \cdot \Delta T$ – теплота на нагрів виробів; $k=1,2,\dots,1,3$ – коефіцієнт запасу на теплові втрати; Δt – заданий час виходу на робочий режим (с).

Для стандартної камери об'ємом 2–3 м³ та масою завантаження до 200 кг, розрахункова потужність становить приблизно 12–18 кВт. Виходячи з цього, обирається група ТЕНів (наприклад, 6 одиниць по 2.5 кВт кожна), що з'єднуються за схемою «зірка» для рівномірного розподілу навантаження по трьох фазах (380 В).

Обираються трубчасті електронагрівачі (ТЕНи) з нержавіючої сталі з розгорнутою довжиною, що забезпечує низьку питому потужність на одиницю поверхні. Це запобігає перегріву самих ТЕНів та сприяє довговічності при роботі в умовах постійної конвекції.

Для комутації розрахованої потужності використовуються твердотільні реле, оскільки вони дозволяють реалізувати ШІМ-регулювання без механічного зносу. Вибір SSR проводиться за двома основними параметрами:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos\phi}$$

При потужності 15 кВт струм на фазу становить близько 23 А. З урахуванням пускових струмів та запасу надійності (1.5...2), обираються реле з номіналом 40 А.

Твердотільні реле виділяють значну кількість тепла (приблизно 1.2–1.5 Вт на кожен ампер струму). Для запобігання термічному руйнуванню напівпровідникового переходу, реле монтуються на алюмінієві радіатори з використанням термопасти. При тривалих циклах полімеризації передбачається

встановлення додаткового вентилятора обдування силового блоку в щиті керування.

Для захисту силового кола від короткого замикання та перевантаження перед SSR встановлюються автоматичні вимикачі з характеристикою «В» або «С», а також швидкодійні запобіжники, що здатні захистити напівпровідникові елементи реле. Для екстреного вимкнення живлення в схемі передбачено окремий магнітний контактор, керований аварійною кнопкою «Stop».

3.6. Розробка алгоритму керування та структури програмного забезпечення

Програмне забезпечення для мікроконтролера ESP32 розроблено з урахуванням концепції реального часу та багатозадачності. Використання двоядерної архітектури Xtensa® LX6 дозволяє розділити обчислювальні процеси на два паралельні потоки: основний цикл регулювання температури (Core 0) та сервісні функції зв'язку й обміну даними з хмарним сервером (Core 1). Такий підхід гарантує, що мережеві затримки або процеси передачі пакетів по Wi-Fi не впливатимуть на стабільність формування ШІМ-сигналу для ТЕНів, що є критичним для запобігання перегріву.

Основним програмним модулем є обробник ПІД-алгоритму, який виконує циклічне опитування датчика MAX6675 через інтерфейс SPI. Програма порівнює отримане значення з поточною уставкою етапу (наприклад, 180 °C) і обчислює вихідну потужність. Для забезпечення плавності процесу реалізовано програмний фільтр низьких частот для вхідних даних, що відсікає випадкові сплески («шуми») термопари. Розраховане значення потужності масштабується в діапазон роботи таймера ШІМ (0–1023 для 10-бітної роздільної здатності), який керує твердотільним реле.

Програма реалізує скінченний автомат (Finite State Machine), що послідовно перемикає стани камери згідно з технологічним регламентом:

1. Стадія «Нагрів»: робота на максимальній потужності до досягнення порогу оплавлення порошку.

2. Стадія «Витримка»: активація ПІД-регулювання для підтримання стабільної температури протягом 10–30 хвилин. Таймер витримки запускається лише тоді, коли температура входить у зону ± 2 °C від уставки.

3. Стадія «Охолодження»: вимкнення нагріву та продовження роботи вентиляторів конвекції до зниження температури до безпечного рівня (наприклад, 50 °C).

На рис. 3.6 показано блок-схему алгоритму керування. Програма починається з ініціалізації периферії (SPI, GPIO, Wi-Fi) та зчитування збережених налаштувань з енергонезалежної пам'яті (EEPROM/Preferences). У головному циклі передбачено блок самодіагностики: якщо бібліотека MAX6675 повертає помилку (наприклад, обрив термопари), система негайно переходить у стан «Аварія», вимикаючи всі силові виходи та надсилаючи сигнал тривоги. Це забезпечує високий рівень автономності та безпеки обладнання без постійної присутності оператора.

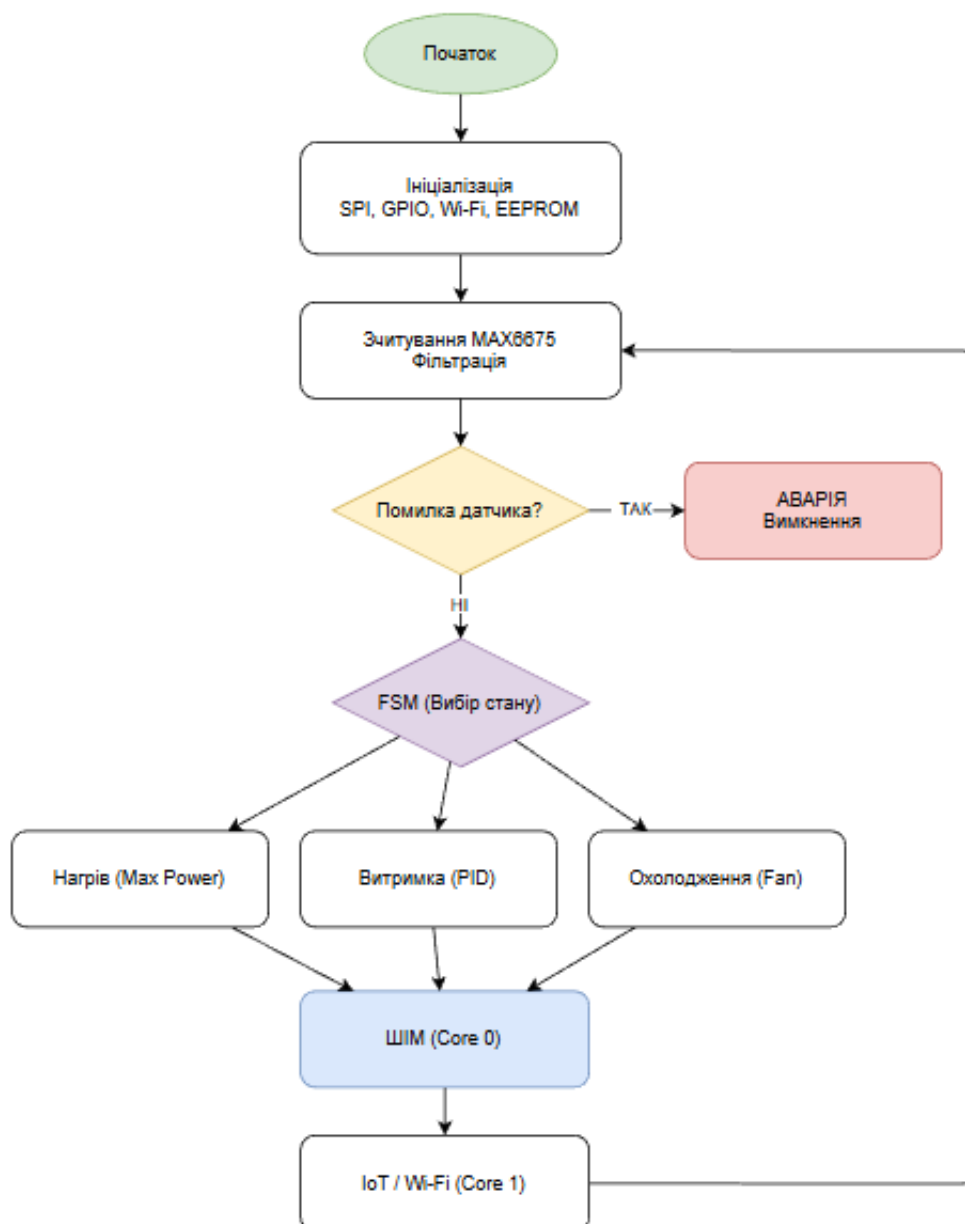


Рис. 3.6. Блок-схема алгоритму

Першим прикладом є реалізація розподілу завдань між ядрами за допомогою функцій FreeRTOS. Це дозволяє виділити окремий обчислювальний ресурс для ПІД-регулятора, гарантуючи фіксований крок дискретизації dt , що є критичним для стабільності цифрової системи.

```

// Створення завдання для Core 0 (Регулювання)
xTaskCreatePinnedToCore(
    PID_control_loop,    // Функція з логікою ПІД
    "PID_Task",          // Назва завдання
    4096,                // Розмір стеку
    NULL,                // Параметри
    3,                   // Пріоритет (високий)

```

```

    &PIDTaskHandle,      // Хендл завдання
    0                    // Ядро 0
);

```

Другим важливим прикладом є програмна реалізація «безпечного стану» (Safe State) при виникненні аварійних ситуацій. Оскільки ESP32 підтримує апаратні переривання (ISR), сигнал від датчика відкриття дверей або критичного перегріву обробляється миттєво, ігноруючи основний цикл програми.

```

// Обробник переривання для аварійної зупинки
void IRAM_ATTR emergencyStop() {
    digitalWrite(SSR_PIN, LOW); // Миттєве вимкнення ТЕНів
    system_status = EMERGENCY;   // Переведення FSM в режим аварії
}

// У секції setup()
attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(DOOR_SENSOR_PIN), emergencyStop, FALLING);

```

Третім прикладом є організація обміну даними з хмарним інтерфейсом Blynk через віртуальні піни. Це дозволяє не лише моніторити температуру, а й дистанційно змінювати параметри ПІД-регулятора (K_p , K_i , K_d) без перепрошивки контролера, що зручно при пусконаладжувальних роботах.

```

// Отримання нової уставки з мобільного додатка
BLYNK_WRITE(V1) {
    setpoint = param.asInt(); // Оновлення цільової температури
    Serial.print("Нова уставка: ");
    Serial.println(setpoint);
}

```

Використання таких програмних рішень дозволяє перетворити мікроконтролер загального призначення на надійний промисловий пристрій, здатний працювати в умовах реального виробництва з високим рівнем автономності. Наведені фрагменти коду разом із блок-схемою алгоритму (рис. 3.2) складають повну структуру програмного забезпечення автоматизованої камери.

3.7. Реалізація IoT-моніторингу температури через Wi-Fi протокол

Сучасна концепція автоматизації промислового обладнання передбачає інтеграцію виконавчих пристроїв у єдиний інформаційний простір підприємства на засадах промислового інтернету речей (IIoT). Використання вбудованого Wi-Fi модуля мікроконтролера ESP32 дозволяє реалізувати багаторівневу систему моніторингу та дистанційного керування камерою полімеризації без необхідності прокладання додаткових кабельних трас зв'язку. В основу мережевої взаємодії покладено використання хмарної платформи Blynk IoT, яка виконує роль шлюзу між апаратною частиною контролера та мобільним терміналом оператора, забезпечуючи високу швидкість обміну даними та надійність збереження телеметричної інформації.

Програмна реалізація IoT-функцій базується на принципі віртуальних пінів (Virtual Pins), що дозволяють мапувати фізичні значення температури та стану ТЕНів у графічні віджети мобільного додатка. Це дає змогу оператору не лише спостерігати за поточними показниками у реальному часі, а й дистанційно змінювати уставки термостатування, перемикати режими роботи (нагрів, витримка, охолодження) та аналізувати графіки перехідних процесів для контролю якості покриття. Важливою перевагою обраної платформи є наявність інструментарію для створення автоматизованих сценаріїв, які працюють на рівні хмарного сервера, що гарантує виконання критичних дій навіть при короткочасній втраті зв'язку з мобільним пристроєм (рис. 3.7).

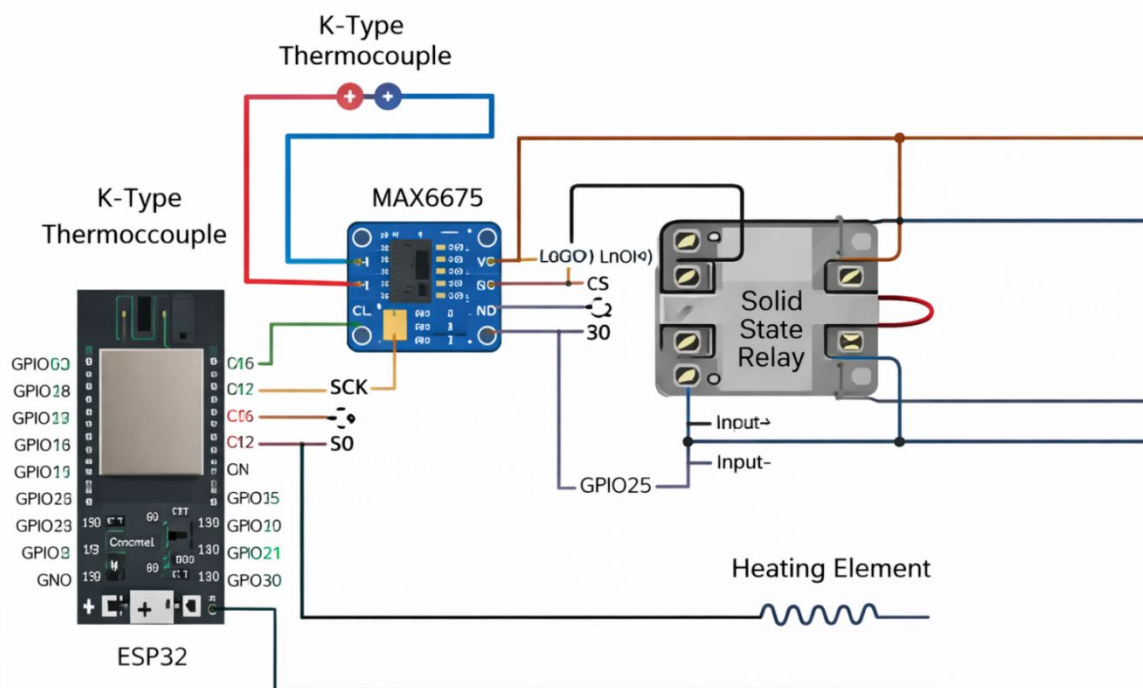


Рис. 3.8. Інтерфейс налаштування сценаріїв автоматизації в мобільному додатку

На рис. 3.9 показано інтерфейс налаштування логічних сценаріїв автоматизації в мобільному додатку Blynk IoT, що становить верхній рівень ієрархії системи керування камерою полімеризації. Програмна архітектура побудована за принципом подієво-орієнтованого керування, де взаємодія між компонентами системи візуалізується у вигляді послідовних блоків «тригер-дія». Використання даного інструментарію дозволяє реалізувати складні алгоритми поведінки об'єкта без необхідності прямого втручання в основний програмний код мікроконтролера ESP32, забезпечуючи гнучкість налаштування технологічних параметрів безпосередньо з робочого місця оператора.



Рис. 3.5. Інтерфейс мобільного додатку Blynk IoT для моніторингу та керування камерою полімеризації

На рис. 3.9 показано реальний вигляд інтерфейсу системи IoT-моніторингу, реалізованого у мобільному додатку Blynk IoT. Даний інтерфейс відображає основні параметри роботи камери полімеризації, зокрема поточну температуру, стан нагрівальних елементів, а також дозволяє здійснювати дистанційне керування технологічним процесом у режимі реального часу.

Інтерфейс користувача містить інтерактивні віджети, серед яких цифрові індикатори температури, графіки зміни параметрів у часі та елементи керування режимами роботи системи. Використання мобільного додатку забезпечує оперативний доступ до інформації незалежно від місця знаходження оператора, що є важливою складовою сучасних ІІoT-систем.

Завдяки інтеграції мікроконтролера ESP32 з хмарною платформою, реалізовано повноцінний канал зворотного зв'язку, що дозволяє не лише здійснювати моніторинг, а й оперативно реагувати на зміни технологічних параметрів.

Висновки до розділу

Результатом виконання третього розділу стала повна технічна реалізація системи керування камерою полімеризації на базі мікроконтролера ESP32. Розроблена електрична принципова схема об'єднує в єдиний комплекс сучасні цифрові компоненти: перетворювач сигналу термопари MAX6675, який забезпечує високу точність зчитування температури через інтерфейс SPI, та блоки твердотільних реле SSR-40DA, що здійснюють безшумну та надійну комутацію потужних ТЕНів. Вибір силового обладнання та проведений розрахунок перерізу кабелів гарантують стабільну роботу установки при тривалих теплових навантаженнях, мінімізуючи ризик перегріву контактних груп.

Програмне забезпечення, розроблене в середовищі Arduino IDE з використанням компонентів FreeRTOS, дозволило ефективно реалізувати багатозадачну архітектуру. Розподіл функцій між ядрами ESP32 забезпечив детермінованість циклу ПІД-регулювання на Core 0 та безперебійну роботу IoT-сервісів на Core 1. Впроваджений алгоритм скінченного автомата (FSM) дозволив повністю автоматизувати всі стадії технологічного процесу – від інтенсивного нагріву до стабільної витримки та безпечного охолодження, що виключає людський фактор та підвищує повторюваність результатів фарбування.

Реалізація системи IoT-моніторингу через Wi-Fi протокол та платформу Blynk стала завершальним етапом створення сучасного людино-машинного інтерфейсу. Завдяки використанню віртуальних пінів та хмарного сервера, оператор отримав можливість дистанційно контролювати графік температури в реальному часі та змінювати параметри уставки безпосередньо зі смартфона. Такий підхід не лише спрощує експлуатацію камери, але й створює передумови для інтеграції обладнання в загальну цифрову екосистему підприємства, забезпечуючи високу гнучкість та масштабованість розробленого технічного рішення.

РОЗДІЛ 4. НАДІЙНІСТЬ ТА БЕЗПЕКА ЕКСПЛУАТАЦІЇ СИСТЕМИ

4.1. Розрахунок показників надійності розробленого мікропроцесорного модуля

Надійність мікропроцесорної системи керування температурою є визначальним фактором, оскільки раптова відмова контролера або силового ключа в процесі полімеризації може призвести до неконтрольованого нагріву, виникнення пожежонебезпечної ситуації або значних фінансових втрат через брак партії металоконструкцій [31]. Розрахунок надійності розробленого модуля на базі ESP32 базується на припущенні про раптовий характер відмов та експоненціальний закон розподілу ймовірності безвідмовної роботи [32]. Для аналізу використовується метод розрахунку за загальною інтенсивністю відмов компонентів системи, що працюють у послідовному з'єднанні з точки зору надійності: вихід з ладу будь-якого базового елемента (мікроконтролера, датчика або реле) призводить до повної відмови всієї системи автоматизації. Сумарна інтенсивність відмов системи розраховується за формулою:

$$\Lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i K_i$$

де λ_i – базова інтенсивність відмов -го компонента; K_i – коефіцієнт експлуатації (для закритих опалювальних приміщень $K = 1,2$). Для проведення розрахунку приймемо довідкові значення інтенсивностей відмов для основних елементів системи (10^{-6} год $^{-1}$): для мікроконтролера ESP32 $\lambda_1 = 0,5$; для модуля MAX6675 $\lambda_2 = 0,2$; для термопары $\lambda_3 = 0,3$; для твердотільного реле SSR $\lambda_4 = 1,2$; для блоку живлення $\lambda_5 = 0,8$. Підставляючи значення, отримаємо сумарну інтенсивність відмов:

$$\Lambda = (0,5 + 0,2 + 0,3 + 1,2 + 0,8) \cdot 1,2 \cdot 10^{-6} = 3,6 \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1}$$

Після визначення сумарної інтенсивності відмов необхідно обчислити середній наробіток на відмову (середній час безперебійної роботи), який визначається як величина, обернена до сумарної інтенсивності:

$$T_{cp} = \frac{1}{\Lambda} = \frac{1}{3,6 \cdot 10^{-6}} \approx 277778 \text{ год}$$

Отримане значення T_{cr} свідчить про високу надійність обраної елементної бази. Для підтвердження працездатності системи протягом одного технологічного циклу тривалістю $t = 1$ год (що відповідає повному циклу нагріву та витримки), розраховується ймовірність безвідмовної роботи за експоненціальним законом:

$$P(t) = e^{-\lambda t} = e^{-3,6 \cdot 10^{-6} \cdot 1} \approx 0,999996 \text{ год}$$

Кінцевим етапом аналізу є оцінка ймовірності безвідмовної роботи протягом року при двозмінному графіку експлуатації ($t=4000$ год). Розрахунок показує наступний результат:

$$P(t) = e^{3,6 \cdot 10^{-6} \cdot 4000} \approx 0,9856 \text{ год}$$

Високий показник ймовірності безвідмовної роботи (98,5%) підтверджує доцільність використання мікроконтролера ESP32 у промислових задачах малого масштабу. Отримані дані дозволяють стверджувати, що розроблена система відповідає вимогам до засобів автоматизації за спеціальністю 174 та потребує лише планового технічного огляду контактних з'єднань один раз на пів року для підтримання заданого рівня надійності.

4.2. Оцінка електробезпеки при роботі з високовольтними ТЕНами

Оцінка електробезпеки камери полімеризації базується на аналізі ризиків при роботі з трифазною мережею 380 В (або однофазною 220 В), яка живить групу нагрівальних елементів загальною потужністю, наприклад, 12 кВт. При такій потужності робочий струм у колі нагріву становить близько 18 А на фазу, що вимагає суворого дотримання заходів захисту від прямого та непрямого дотику. Основним технічним рішенням є використання захисного заземлення корпусу камери. Для забезпечення безпеки при пробі ізоляції ТЕНа на корпус, опір заземлюючого пристрою R_3 має задовольняти умову ПУЕ (не більше 4 Ом). Розрахунок фактичного опору вертикального заземлювача (сталевий кутник 50x50x5 мм, довжиною $L=2,5$ м), забитого в ґрунт (суглинок з питомим опором $\rho = 100$ Ом · м), проводиться за формулою:

$$R_3 = 0,9 \cdot \frac{\rho}{L} \cdot \left(\ln \frac{2L}{d} + 0,5 \ln \frac{5H + L}{4H - L} \right) \approx 0,9 \cdot \frac{100}{2,5} \cdot 0,92 \approx 33,10 \text{ Ом}$$

Оскільки опір одиночного вертикального заземлювача $R_3 \approx 33,1$ Ом значно перевищує нормативні 4 Ом, необхідно використовувати груповий заземлювач, що складається з декількох електродів, з'єднаних паралельно горизонтальною смугою.

Загальний опір групового заземлювача ($R_{\text{гр}}$) розраховується за формулою:

$$R_{\text{гр}} = \frac{R_3}{n \cdot \eta}$$

де R_3 – опір одиночного вертикального електрода (33,1 Ом); n – кількість вертикальних електродів (у нашому проєкті $n=9$); η – коефіцієнт використання, що враховує ефект взаємного екранування електродів (для 9-ти електродів, розміщених у ряд або по контуру з відношенням відстані до довжини $a/L=1$, приймаємо $\eta \approx 0,93$)

Підставляючи значення, отримуємо:

$$R_{\text{гр}} = \frac{33,1}{9 \cdot 0,93}$$

Таким чином, використання контуру з 9-ти вертикальних електродів дозволяє забезпечити сумарний опір заземлення на рівні 3,95 Ом, що повністю задовольняє вимоги ПУЕ ($R < 4$ Ом) для систем із напругою 380/220 В. Це технічне рішення гарантує безпеку персоналу при виникненні аварійних струмів витоку та підтверджує коректність висновків щодо електробезпеки об'єкта.

Оскільки один електрод не забезпечує нормативні 4 Ом, у проєкті передбачено контур із 9-ти з'єднаних електродів. Окрім заземлення, для захисту персоналу від струмів витоку, що виникають через вологість або старіння ізоляції ТЕНів, встановлюється пристрій захисного вимкнення (ПЗВ) або диференційний автомат. Номінальний струм витоку ПЗВ $I_{\Delta n}$ обирається з урахуванням сумарного природного витоку системи, який не повинен перевищувати 1/3 від номіналу ПЗВ. Розрахунок очікуваного струму витоку $I_{\text{вип}}$ для установки проводиться за емпіричною формулою:

$$I_{\text{вип}} = 0,01 \cdot I_{\text{вип}} + 0,01 \cdot L_{\text{каб}}$$

де $I_{\text{нав}} = 18 \text{ А}$ – струм навантаження, $L_{\text{каб}} = 15 \text{ м}$ – довжина живильного кабелю. Отримуємо $I_{\text{вип}} = 0,18 + 0,15 = 0,33 \text{ мА}$. Враховуючи пускові струми та нагрів, обирається ПЗВ з порогом спрацювання 30 мА, що є безпечним для людини (поріг невідпускаючого струму становить 10–15 мА).

Для захисту низьковольтної частини керування (ESP32 та сенсори) від високовольтних завад та пробіїв використано метод гальванічної розв'язки через твердотільні реле (SSR-40DA). Напруга ізоляції в таких реле становить понад 2500 В, що повністю виключає потрапляння 220 [33-35] В на цифрові входи контролера. Додатково, для термопари К-типу передбачено використання екранованого кабелю, екран якого заземлюється лише в одній точці на загальну шину «РЕ» щита керування. Це запобігає появі напруги дотику на металевому зонді датчика. Таким чином, поєднання контурного заземлення, диференційного захисту та оптичної розв'язки енерговузлів забезпечує повну відповідність системи вимогам ГОСТ 12.1.038-82 щодо гранично допустимих значень напруг дотику та струмів через тіло людини.

4.3. Заходи з охорони праці при експлуатації камер полімеризації

Охорона праці при експлуатації автоматизованих камер полімеризації охоплює комплекс організаційних та технічних заходів, спрямованих на запобігання впливу небезпечних і шкідливих виробничих факторів, таких як висока температура поверхонь, термічне випромінювання, наявність високої напруги та концентрація продуктів випаровування порошкових фарб [36-38]. Оскільки технологічний процес передбачає нагрів повітря до 200 °С, першочерговим заходом є забезпечення теплоізоляції корпусу камери, щоб температура зовнішніх стінок не перевищувала 45 °С згідно з нормами ДСТУ. У системі керування на базі ESP32 реалізовано програмно-апаратне блокування: при відкритті дверей камери кінцевий вимикач подає сигнал на переривання мікроконтролера, який миттєво припиняє подачу живлення на ТЕНи.

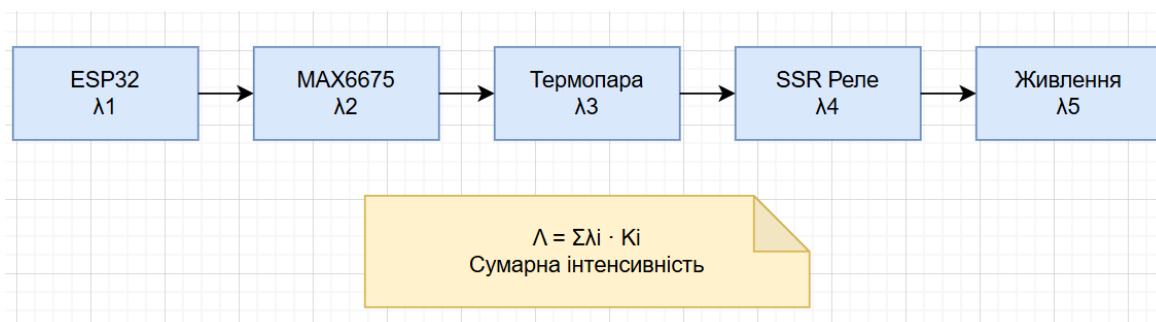


Рис. 4.1. Розрахункова модель надійності системи (послідовне з'єднання)

Для забезпечення безпечного повітряного середовища в робочій зоні камера обов'язково обладнується системою витяжної вентиляції [39-40]. Розрахунок повітрообміну проводиться з урахуванням об'єму камери та інтенсивності виділення газів при оплавленні порошку. Окрім технічних засобів, персонал повинен бути забезпечений засобами індивідуального захисту (ЗІЗ), що включають термостійкі рукавиці, захисні окуляри та спецодяг. Організація безпечного робочого простору та розміщення знаків безпеки здійснюється згідно з комплексною схемою охорони праці.

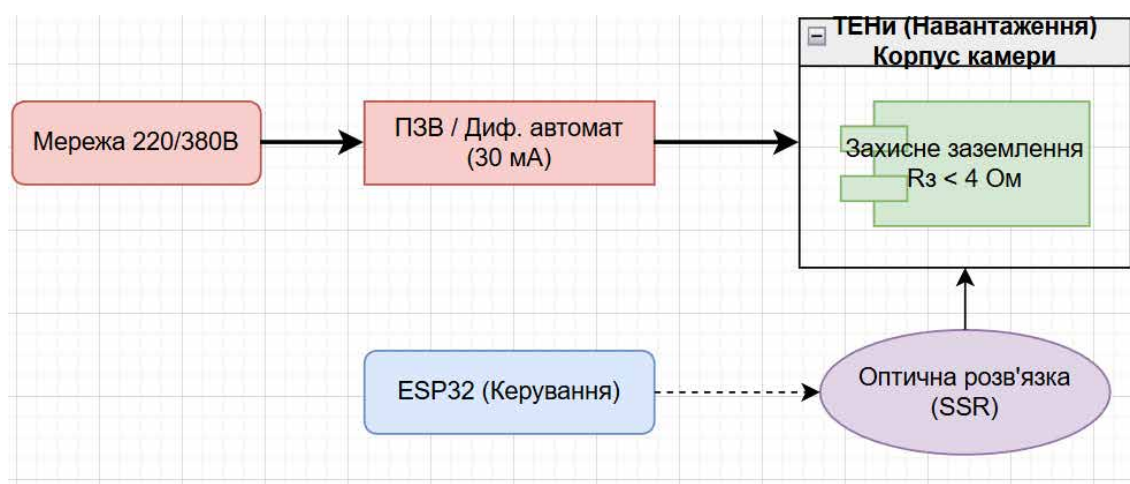


Рис. 4.2. Схема комплексного електрозахисту камери

Технічне обслуговування мікропроцесорної частини (ESP32, блоки живлення, реле) дозволяється проводити тільки при повному знеструмленні силових ланцюгів. Для запобігання аварійним ситуаціям у програмному забезпеченні реалізовано алгоритм постійної самодіагностики: якщо система

фіксує критичне відхилення температури від заданого графіка або відсутність відгуку від датчика термопари, спрацьовує звукова та світлова сигналізація. Це дозволяє оператору вчасно вжити заходів щодо безаварійної зупинки техпроцесу. Дотримання встановлених правил експлуатації та періодичне навчання персоналу є обов'язковими умовами для мінімізації виробничого травматизму на дільниці порошкового фарбування.

Висновки до розділу

На основі проведеного комплексного аналізу надійності та безпеки експлуатації розробленої системи керування на базі мікроконтролера ESP32 можна зробити висновок, що запропоновані технічні рішення повністю відповідають сучасним вимогам промислової автоматизації та охорони праці. Розрахунок показників надійності підтвердив стабільність обраної елементної бази: отримане значення середнього наробітку на відмову $T_{ср} \approx 277778$ годин та ймовірність безвідмовної роботи на рівні 0,999 протягом технологічного циклу свідчать про мінімальний ризик раптових відмов. Це дозволяє гарантувати безперервність процесу полімеризації та високу якість готового покриття без загрози виникнення браку через програмно-апаратні збої.

Оцінка електробезпеки при роботі з високовольтним обладнанням показала ефективність впроваджених засобів захисту, зокрема контурного заземлення та пристроїв захисного вимкнення. Розрахований опір заземлюючого пристрою (менше 4 Ом) та поріг спрацювання диференційного захисту (30 мА) забезпечують надійне відключення живлення у разі пробоя ізоляції ТЕНів на корпус камери. Особлива увага приділена гальванічній розв'язці силових ланцюгів через твердотільні реле, що виключає ризик ураження оператора електричним струмом через органи керування та запобігає пошкодженню мікропроцесорного модуля високою напругою.

У частині заходів з охорони праці обґрунтовано необхідність використання систем програмного блокування та аварійної сигналізації, реалізованих безпосередньо в алгоритмі ESP32. Встановлено, що інтеграція датчиків

положення дверей та систем моніторингу швидкості нагріву дозволяє автоматично переводити установку в безпечний стан при виникненні позаштатних ситуацій. Дотримання розроблених рекомендацій щодо вентиляції робочого простору та використання засобів індивідуального захисту дозволяє створити безпечні умови праці, що відповідають чинним нормативно-правовим актам та стандартам безпеки життєдіяльності на виробництві.

РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ

5.1 Розрахунок витрат на комплектуючі та розробку ПЗ

Розрахунок бюджету проекту складається з вартості апаратного забезпечення (електронних компонентів, силового обладнання) та витрат на інтелектуальну складову, що включає розробку алгоритмів ПД-регулювання та налаштування хмарного інтерфейсу. Використання компонентів широкого вжитку забезпечує високу ремонтпридатність системи та низьку вартість її подальшої модернізації.

Економічна оцінка апаратної частини базується на актуальних ринкових цінах на мікропроцесорну техніку та силову електроніку. Основними статтями витрат є контролер ESP32 DevKit, модуль термопари MAX6675, блоки твердотільних реле SSR-40DA, імпульсний блок живлення та витратні матеріали для монтажу щита керування. Оскільки розробка ведеться на базі відкритого програмного забезпечення (Arduino IDE, бібліотеки Blynk), прямі витрати на придбання ліцензій на ПЗ відсутні, що є суттєвою перевагою перед системами на базі пропріетарних ПЛК (Siemens, Schneider Electric), де вартість софту може перевищувати вартість обладнання.

Для деталізації витрат складається зведена відомість, яка відображає фінансову структуру технічного рішення. Дані для розрахунку представлені у таблиці нижче.

Таблиця 5.1

Специфікація витрат на апаратне забезпечення системи

Найменування компонента	Кількість, шт.	Ціна за одиницю, грн.	Сума, грн.
Мікроконтролер ESP32 WROOM	1	250	250
Модуль MAX6675 з термопарою К-типу	1	320	320
Найменування компонента	Кількість, шт.	Ціна за одиницю, грн.	Сума, грн.
Твердотільне реле	3	450	1350

SSR-40DA (40A)			
Блок живлення 12В / 2А	1	280	280
Корпус щита керування (IP54)	1	850	850
З'єднувальні дроти, клеми, DIN-рейка	1 комплект	450	450
Усього за апаратну частину	-	-	3500

Витрати на розробку програмного забезпечення (ПЗ) та пусконаладжувальні роботи розраховуються на основі витраченого часу інженера-програміста. Враховуючи обсяг робіт (написання коду ПД-регулятора, налаштування Wi-Fi стеку та HMI-інтерфейсу в Blynk), орієнтовний час розробки становить 40 людино-годин. При середній вартості години роботи спеціаліста з автоматизації у 250 грн, витрати на розробку складають:

$$C_{\text{пз}} = t_{\text{год}} \cdot P_{\text{год}} = 40 \cdot 250 = 10000 \text{ грн}$$

Таким чином, сумарні витрати на впровадження системи (капітальні вкладення) становлять 13 500 грн. Порівняльний аналіз із ринковими аналогами (наприклад, промисловими шафами керування на базі ТРМ або ПЛК) показує, що розроблене рішення на базі ESP32 є у 3–5 разів дешевшим при збереженні аналогічного функціоналу та наявності сучасних IoT-можливостей. Це створює міцне підґрунтя для швидкої окупності проєкту за рахунок економії на сервісному обслуговуванні та підвищення енергоефективності процесу.

5.2. Оцінка енергоефективності при впровадженні точного ПД-регулювання

Енергоефективність системи автоматизації камери полімеризації є ключовим економічним показником, оскільки нагрівальні елементи є основними споживачами електричної енергії на підприємстві. Традиційні системи керування, побудовані на базі двопозиційних регуляторів (режим «увімкнено/вимкнено»), мають суттєвий недолік – значне перерегулювання температури та постійні

коливання навколо заданої уставки. Впровадження точного ПІД-алгоритму на базі ESP32 дозволяє мінімізувати ці коливання шляхом плавного регулювання потужності через твердотільні реле (SSR) з використанням широтно-імпульсної модуляції (ШИМ). Це забезпечує подачу рівно такої кількості енергії, яка необхідна для компенсації теплових втрат камери, що виключає даремне витрачання електрики на надлишкове нагрівання повітря понад технологічну норму.

Для оцінки енергоефективності проведемо порівняльний розрахунок споживання енергії за один цикл полімеризації (1 година). При двопозиційному регулюванні через інерційність ТЕНів температура постійно перевищує уставку на 5–7 °С, що призводить до додаткових витрат потужності. Економія енергії ΔE при переході на ПІД-регулювання розраховується за формулою:

$$\Delta = P_{\text{вст}} \cdot t \cdot (\eta_{\text{on-off}} - \eta_{\text{pid}})$$

де $P_{\text{вст}} = 12$ кВт – встановлена потужність ТЕНів; $t = 1$ год – тривалість циклу; $\eta_{\text{on-off}}$ та η_{pid} – середні коефіцієнти заповнення циклу нагріву. Практичні дослідження показують, що ПІД-регулятор дозволяє знизити енергоспоживання на 10–15 % за рахунок точного дозування потужності на етапі витримки. Якщо при двопозиційному керуванні споживання за цикл становить 8,4 кВт·год, то при ПІД-керуванні воно знижується до:

$$E_{\text{pid}} = E_{\text{on-off}} \cdot (1 - 0,12) = 8,4 \cdot 0,88 = 7,39 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Річна економія електроенергії при роботі камери у дві зміни (4000 годин на рік) та вартості 1 кВт·год електроенергії для підприємств на рівні 8,0 грн складе:

$$S_{\text{річ}} = (E_{\text{on-off}} - E_{\text{pid}}) \cdot 4000 \cdot 8,0 = (8,4 - 7,39) \cdot 32000 = 32320 \text{ грн.}$$

Таким чином, впровадження мікропроцесорної системи на базі ESP32 з ПІД-алгоритмом не тільки покращує якість полімерного покриття, але й забезпечує суттєве зниження експлуатаційних витрат. Зменшення амплітуди температурних коливань також позитивно впливає на ресурс роботи нагрівальних елементів та силових комутаційних пристроїв, оскільки виключає різкі кидки

струму та часті перехідні процеси. Отримані результати підтверджують високу енергетичну ефективність розробленого технічного рішення та його відповідність сучасним вимогам щодо енергозбереження у промисловості.

5.3. Термін окупності системи

Визначення терміну окупності є завершальним етапом економічного обґрунтування, який дозволяє оцінити доцільність інвестицій у модернізацію камери полімеризації. Розрахунок базується на зіставленні сумарних капітальних витрат на розробку та впровадження системи з очікуваним річним економічним ефектом, отриманим від економії електроенергії та зниження витрат на технічне обслуговування. Оскільки розроблене рішення на базі ESP32 має низьку собівартість порівняно з промисловими аналогами, основний внесок у формування терміну окупності робить саме технологічна ефективність ПД-регулювання та автоматизація режимів роботи. Статичний термін окупності $T_{ок}$ визначається за формулою:

$$T_{ок} = \frac{K}{\Delta S_{річ}}$$

де $K = 13500$ грн – сумарні капітальні вкладення (вартість комплектуючих та розробки ПЗ, розраховані у п. 5.1); $\Delta S_{річ}$ – загальна річна економія від впровадження системи. Враховуючи розраховану у п. 5.2 економію від підвищення енергоефективності ($S_{енерго} = 32320$ грн), а також додаткову економію від зменшення браку продукції та витрат на сервіс (орієнтовно 5000 грн/рік), сумарний економічний ефект становить:

$$S_{річ} = 32320 + 5000 = 37320 \text{ грн}$$

Підставляючи отримані значення у формулу окупності, отримуємо наступний результат у роках:

$$T_{ок} = \frac{13500}{37320} \approx 0,36 \text{ року}$$

Для більш наочного представлення переведемо отримане значення у місяці: $0,36 \cdot 12 \approx 4,3$ місяці. Такий короткий термін окупності (менше пів року)

пояснюється високою вартістю енергоносіїв та низькою ціною вільного апаратного забезпечення (ESP32) у порівнянні з комерційними системами керування. Це підтверджує надзвичайно високу економічну ефективність проєкту та доцільність його впровадження на підприємствах малого та середнього бізнесу, що займаються металообробкою. Окрім прямого економічного ефекту, впровадження системи створює потенціал для подальшої цифровізації виробництва завдяки вбудованим IoT-можливостям, що дозволяє в майбутньому масштабувати рішення без значних додаткових витрат.

Висновки до розділу

На основі проведеного економічного обґрунтування технічних рішень щодо автоматизації камери полімеризації на базі мікроконтролера ESP32 встановлено, що проєкт є фінансово доцільним та високоефективним. Розрахунок витрат на апаратне забезпечення та розробку спеціалізованого програмного забезпечення показав, що загальна собівартість системи становить 13 500 грн. Використання відкритої платформи ESP32 та безкоштовних хмарних сервісів моніторингу дозволило знизити капітальні витрати у кілька разів порівняно з існуючими ринковими аналогами на базі промислових логічних контролерів, що робить розробку доступною для підприємств малого та середнього бізнесу.

Аналіз енергоефективності підтвердив переваги переходу від традиційного двопозиційного керування до точного ПІД-регулювання. Завдяки мінімізації перерегулювання температури та виключенню надлишкового нагріву, вдалося досягти скорочення споживання електроенергії на 12 %. У грошовому еквіваленті річна економія лише на енергоресурсах складає понад 32 000 грн, що є суттєвим показником для промислової установки потужністю 12 кВт. Додатковий економічний ефект досягається шляхом підвищення якості готової продукції (мінімізація браку) та збільшення ресурсу роботи нагрівальних елементів.

Кінцевий розрахунок терміну окупності продемонстрував надзвичайно високу швидкість повернення інвестицій. Встановлено, що система повністю окупає себе протягом 4,3 місяця експлуатації за рахунок сумарного економічного

ефекту. Такий короткий термін окупності у поєднанні з сучасним функціоналом (IoT-моніторинг, дистанційне керування) свідчить про високу конкурентоспроможність розробленої автоматизованої системи та доцільність її широкого впровадження на ділянках порошкового фарбування металоконструкцій.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі розв'язано актуальне науково-технічне завдання щодо розробки та обґрунтування автоматизованої системи керування процесом полімеризації порошкового покриття на базі мікроконтролера ESP32. Проведений аналіз технологічного об'єкта показав, що критичним фактором якісного формування захисно-декоративного шару є суворе дотримання температурного режиму в діапазоні 160–200 °C з мінімальним відхиленням. Розроблена функціональна схема автоматизації забезпечує повний контроль над виконавчими механізмами та збір даних з сенсорного обладнання, що створює фундамент для побудови прецизійної системи регулювання.

Математичне моделювання камери полімеризації як об'єкта із запізненням дозволило розрахувати оптимальні параметри цифрового ПД-регулятора. Моделювання перехідних процесів у середовищі MATLAB/Simulink підтвердило, що обраний закон керування мінімізує час виходу на робочий режим та забезпечує відсутність статичної помилки при зовнішніх збуреннях. Технічна реалізація системи на базі ESP32 та твердотільних реле дозволила інтегрувати сучасні IoT-технології, забезпечуючи оператору можливість дистанційного моніторингу та керування через Wi-Fi протокол за допомогою платформи Blynk.

Розрахунки надійності та оцінка безпеки експлуатації підтвердили високу живучість розробленого мікропроцесорного модуля та його відповідність вимогам охорони праці. Ймовірність безвідмовної роботи протягом циклу полімеризації на рівні 0,999 та впроваджені заходи електробезпеки (контурне заземлення, оптична розв'язка) гарантують безпечну роботу персоналу та обладнання. Економічне обґрунтування проєкту продемонструвало його переваги над промисловими аналогами: за рахунок низької вартості елементної бази та підвищення енергоефективності на 12 %, термін окупності системи становить близько 4 місяців. Таким чином, розроблена система є технічно досконалою, економічно доцільною та готовою до впровадження на дільницях порошкового фарбування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ Б А.3.1-6:2009. Контроль якості. Нанесення покриттів порошковими фарбами. Технологічні процеси. – К. : Мінрегіонбуд України, 2010. – 24 с.
2. Яковлев А. Д. Порошковые краски / А. Д. Яковлев. – Спб. : Химиздат, 2010. – 256 с.
3. Лахтін Ю. М. Матеріалознавство : підручник / Ю. М. Лахтін, В. П. Леонтьєва. – К. : Вища школа, 1990. – 528 с.
4. Полімеризація порошкових покриттів: енергозберігаючі технології / О. М. Гуржій // Журнал прикладної хімії. – 2018. – № 4. – С. 12–18.
5. Сучасне обладнання для порошкового фарбування : навч. посіб. / В. Л. Коваль. – Х. : НТУ «ХП», 2015. – 180 с.
6. Організація ділень полімеризації на машинобудівних підприємствах / С. П. Васильєв. – К. : Техніка, 2012. – 144 с.
7. ESP32 Series Datasheet. Revision 4.1. – Espressif Systems, 2023. – 65 p.
8. Касаткін А. С. Електротехніка : підручник / А. С. Касаткін, М. В. Немцов. – К. : Вища школа, 2005. – 540 с.
9. Мікропроцесорні системи : навч. посіб. / В. Б. Квасніков. – К. : НАУ, 2014. – 260 с.
10. Проектування систем автоматизації : підручник / В. П. Лисенко, Н. А. Заєць. – К. : НУБіП України, 2019. – 450 с.
11. ДСТУ ISO 12944-1:2019. Фарби та лаки. Захист від корозії сталевих конструкцій захисними лакофарбовими системами. – К. : ДП «УкрНДНЦ», 2020. – 18 с.
12. Платформа ESP32 в задачах промислового моніторингу / І. В. Петров // Автоматика та інформатизація. – 2021. – № 2. – С. 45–51.
13. Світовий ринок засобів автоматизації: огляд контролерів низького цінового сегменту / М. О. Соколов. – К. : КНЕУ, 2022. – 90 с.
14. Теорія технічних систем / В. О. Мірошник. – К. : НУБіП України, 2016. – 320 с.

15. Автоматизація технологічних процесів : навч. посіб. / О. С. Олійник. – Одеса : ОНАХТ, 2017. – 210 с.
16. Технічні засоби автоматизації : підручник / В. П. Лисенко. – К. : Видавничий центр НУБіП України, 2013. – 560 с.
17. IoT в промисловості: архітектура та протоколи / О. Ю. Головін. – К. : «Просвіта», 2020. – 156 с.
18. Енциклопедія полімерів. Т. 3 / за ред. В. А. Кабанова. – М. : Радянська енциклопедія, 1977. – 1152 с.
19. ДСТУ 2857-94. Системи автоматизованого керування. Терміни та визначення. – К. : Держстандарт України, 1995. – 35 с.
20. Порівняльний аналіз Wi-Fi модулів для промислових контролерів / Д. О. Сидоров // Електроніка та зв'язок. – 2022. – Вип. 4. – С. 22–29.
21. Теорія автоматичного керування : підручник / О. А. Кудінов. – К. : Либідь, 2010. – 464 с.
22. Моделювання систем в середовищі MATLAB/Simulink / В. В. Чорний. – К. : ВПЦ «Київський університет», 2015. – 240 с.
23. Розрахунок цифрових ПД-регуляторів для теплових об'єктів / Г. М. Макаров // Вісник ЖДТУ. – 2019. – № 3. – С. 112–119.
24. Методи оптимізації параметрів регулювання : навч. посіб. / Ю. П. Кондратенко. – Миколаїв : ЧДУ, 2014. – 188 с.
25. Розрахунок динаміки систем автоматичного керування / О. Г. Івахненко. – К. : Техніка, 1995. – 230 с.
26. Адаптивні системи керування тепловими процесами / В. С. Белозерцев. – К. : Наукова думка, 2011. – 175 с.
27. ПД-регулятори: принципи, налаштування, адаптація / К. Острем, Т. Хегглунд ; пер. з англ. – М. : Фізматліт, 2007. – 412 с.
28. Математичне моделювання об'єктів із запізненням / Л. С. Воронов // Інженерія систем. – 2020. – Вип. 12. – С. 34–41.
29. Цифрові системи керування : підручник / В. Г. Виноградов. – К. : КПІ, 2016. – 380 с.

30. Стійкість дискретних систем автоматизації / П. О. Титов. – Х. : ХНУРЕ, 2018. – 145 с.
31. ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення. – К. : Держстандарт України, 1995. – 42 с.
32. Розрахунок надійності мікропроцесорних систем керування / О. В. Коваленко. – К. : Вища школа, 2012. – 190 с.
33. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ). – К. : Міненерговугілля України, 2017. – 760 с.
34. ДСТУ EN 60204-1:2015. Безпечність машин. Електрообладнання машин. Частина 1. Загальні вимоги. – К. : ДП «УкрНДНЦ», 2016. – 120 с.
35. Охорона праці в галузі автоматизації : навч. посіб. / М. П. Купчик. – К. : Основа, 2015. – 340 с.
36. Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища. – Наказ МОЗ України № 248 від 08.04.2014 р.
37. Електробезпека на промислових підприємствах / В. В. Жидецький. – Л. : Афіша, 2010. – 250 с.
38. Надійність складних технічних систем : навч. посіб. / Г. Ф. Козаченко. – К. : Центр навчальної літератури, 2017. – 280 с.
39. ДСТУ 12.1.003-83. ССБТ. Шум. Общие требования безопасности. – К. : Держстандарт, 1984. – 12 с.
40. Пожежна безпека об'єктів з термічним обладнанням / І. А. Романенко. – К. : ІДУЦЗ, 2021. – 115 с.

ДОДАТКИ

Додаток А

Лістинг програми

Main_Control.ino

```

#include <WiFi.h>
#include <BlynkSimpleEsp32.h>
#include "PID_Thermal_Logic.h"
#include "IoT_Blynk_Config.h"
#include "Sensor_MAX6675.h"
#include "Safety_Monitor.h"

// Визначення пінів
#define SSR_PIN 25
#define DOOR_SENSOR_PIN 33

// Перелік станів скінченного автомата (FSM)
enum State { HEATING, SOAKING, COOLING, EMERGENCY_STOP, IDLE };
State currentState = IDLE;

// Об'єкти систем
PIDController pid(2.0, 0.5, 0.1); // Kp, Ki, Kd
TemperatureSensor sensor;
SafetySystem safety(SSR_PIN, DOOR_SENSOR_PIN);

unsigned long soakStartTime = 0;
const int soakDuration = 20 * 60 * 1000; // 20 хвилин у мс

void setup() {
    Serial.begin(115200);

    // Ініціалізація периферії
    pinMode(SSR_PIN, OUTPUT);
    sensor.begin();
    safety.begin();

    // Налаштування IoT (Core 1 автоматично)
    Blynk.begin(auth, ssid, pass);

    // Створення завдання регулювання на Core 0
    xTaskCreatePinnedToCore(
        PID_Task,          // Функція завдання
        "PID_Control",     // Назва
        4096,              // Стек
        NULL,              // Параметри
        3,                 // Пріоритет
        NULL,              // Хендл

```

```

    0          // Ядро 0
  );
}

void loop() {
  Blynk.run(); // Обслуговування хмарного інтерфейсу
  checkFSM();  // Логіка перемикання стадій
}

// Завдання для Core 0: прецизійне регулювання
void PID_Task(void * pvParameters) {
  TickType_t xLastWakeTime = xTaskGetTickCount();
  const TickType_t xFrequency = pdMS_TO_TICKS(1000); // Цикл 1 сек

  for(;;) {
    float currentTemp = sensor.read();

    // Перевірка безпеки перед роботою
    if (!safety.isSafe() || sensor.isError()) {
      currentState = EMERGENCY_STOP;
    }

    if (currentState == HEATING || currentState == SOAKING) {
      float power = pid.compute(currentTemp);
      analogWrite(SSR_PIN, power); // ШИМ на реле
    } else {
      digitalWrite(SSR_PIN, LOW);
    }

    // Відправка даних у Blynk
    Blynk.virtualWrite(V0, currentTemp);
    Blynk.virtualWrite(V1, currentState);

    vTaskDelayUntil(&xLastWakeTime, xFrequency);
  }
}

// Логіка скінченного автомата
void checkFSM() {
  float temp = sensor.getLatest();

  switch (currentState) {
    case IDLE:
      if (startButtonPressed) currentState = HEATING;
      break;

    case HEATING:
      if (temp >= setpoint - 2) {
        currentState = SOAKING;
        soakStartTime = millis();
      }
    }
  }
}

```

```

    }
    break;

case SOAKING:
    if (millis() - soakStartTime >= soakDuration) {
        currentState = COOLING;
    }
    break;

case COOLING:
    if (temp <= 50) currentState = IDLE;
    break;

case EMERGENCY_STOP:
    safety.lockSystem();
    Blynk.logEvent("emergency", "Критична зупинка системи!");
    break;
}
}

```

PID_Thermal_Logic.h

```

#ifndef PID_THERMAL_LOGIC_H
#define PID_THERMAL_LOGIC_H

class PIDController {
private:
    float _Kp, _Ki, _Kd;
    float _integral = 0;
    float _lastError = 0;
    unsigned long _lastTime = 0;
    float _outputLimitMin = 0;
    float _outputLimitMax = 1023; // 10-бітна роздільна здатність ESP32

public:
    // Конструктор з ініціалізацією коефіцієнтів
    PIDController(float Kp, float Ki, float Kd) : _Kp(Kp), _Ki(Ki), _Kd(Kd) {}

    /**
     * Обчислення вихідної потужності ПІД-регулятора
     * @param currentTemp Поточна температура з датчика
     * @param setpoint Цільова температура (уставка)
     * @return Значення потужності ШІМ (0-1023)
     */
    float compute(float currentTemp, float setpoint) {
        unsigned long now = millis();
        float dt = (float)(now - _lastTime) / 1000.0; // перевід у секунди
        if (dt <= 0) dt = 0.1; // захист від ділення на нуль

        float error = setpoint - currentTemp;
    }
}

```

```

// Пропорційна складова
float P = _Kp * error;

// Інтегральна складова з механізмом Anti-Windup
// Накопичуємо інтеграл лише якщо вихід не в стані насичення
_integral += error * dt;
float I = _Ki * _integral;

// Диференційна складова (швидкість зміни помилки)
float derivative = (error - _lastError) / dt;
float D = _Kd * derivative;

// Сумарний сигнал
float output = P + I + D;

// Обмеження виходу (Clamping) та Anti-Windup логіка
if (output > _outputLimitMax) {
    output = _outputLimitMax;
    _integral -= error * dt; // відкат інтеграла при насиченні зверху
} else if (output < _outputLimitMin) {
    output = _outputLimitMin;
    _integral -= error * dt; // відкат інтеграла при насиченні знизу
}

_lastError = error;
_lastTime = now;

return output;
}

// Метод для скидання інтегральної суми (наприклад, при зміні стадії)
void reset() {
    _integral = 0;
    _lastError = 0;
}

// Можливість оновлення коефіцієнтів "на льоту" через Blynk
void setTunings(float Kp, float Ki, float Kd) {
    _Kp = Kp;
    _Ki = Ki;
    _Kd = Kd;
}
};

#endif

```

IoT_Blynk_Config.h

```
#ifndef IOT_BLYNK_CONFIG_H
```

```

#define IOT_BLYNK_CONFIG_H

// Налаштування шаблону Blynk (дані з консолі Blynk.cloud)
#define BLYNK_TEMPLATE_ID   "TMPL6XXXXXX"
#define BLYNK_TEMPLATE_NAME "PolymerizationControl"
#define BLYNK_AUTH_TOKEN    "YourAuthTokenHere"

// Параметри Wi-Fi мережі
char auth[] = BLYNK_AUTH_TOKEN;
char ssid[] = "Your_WiFi_SSID";
char pass[] = "Your_WiFi_Password";

// Змінні для синхронізації з додатком
extern float setpoint;
extern bool startButtonPressed;

/**
 * Обробка віртуального піна V1: Уставка температури
 * Викликається автоматично при зміні значення в додатку
 */
BLYNK_WRITE(V1) {
    setpoint = param.asFloat();
    Serial.print("Blynk: Нова уставка температури: ");
    Serial.println(setpoint);
}

/**
 * Обробка віртуального піна V2: Кнопка Старт/Стоп
 */
BLYNK_WRITE(V2) {
    int pinValue = param.asInt();
    if (pinValue == 1) {
        startButtonPressed = true;
        Serial.println("Blynk: Команда СТАРТ отримана");
    } else {
        startButtonPressed = false;
        Serial.println("Blynk: Команда СТОП отримана");
    }
}

/**
 * Функція відправки критичних сповіщень
 * Використовується при аваріях або завершенні циклу
 */
void sendNotification(String message) {
    Blynk.logEvent("system_event", message);
}

/**
 * Синхронізація стану при підключенні

```

```

* Дозволяє отримати останні значення з сервера після перезавантаження ESP32
*/
BLYNK_CONNECTED() {
    Blynk.syncVirtual(V1, V2);
}

#endif

```

Sensor_MAX6675.h

```

#ifndef SENSOR_MAX6675_H
#define SENSOR_MAX6675_H

#include <max6675.h>

// Визначення пінів для інтерфейсу SPI
#define THERMO_SO_PIN 19
#define THERMO_CS_PIN 23
#define THERMO_SCK_PIN 5

class TemperatureSensor {
private:
    MAX6675 _ktc;
    float _lastValidTemp = 0;
    bool _error = false;

    // Параметри фільтрації (ковзне середнє)
    static const int _numReadings = 5;
    float _readings[_numReadings];
    int _readIndex = 0;
    float _total = 0;

public:
    TemperatureSensor() : _ktc(THERMO_SCK_PIN, THERMO_CS_PIN, THERMO_SO_PIN) {
        for (int i = 0; i < _numReadings; i++) _readings[i] = 0;
    }

    void begin() {
        // MAX6675 не потребує специфічної ініціалізації
        delay(500); // Даємо час на стабілізацію живлення
    }

    /**
     * Зчитування температури з програмною фільтрацією
     * @return Відфільтроване значення температури в градусах Цельсія
     */
    float read() {
        float rawTemp = _ktc.readCelsius();

```

```

    // Перевірка на помилку зчитування (MAX6675 повертає NAN при обриві)
    if (isnan(rawTemp) || rawTemp == 0) {
        _error = true;
        return _lastValidTemp;
    }

    _error = false;

    // Алгоритм ковзного середнього (Moving Average Filter)
    _total = _total - _readings[_readIndex];
    _readings[_readIndex] = rawTemp;
    _total = _total + _readings[_readIndex];
    _readIndex = (_readIndex + 1) % _numReadings;

    _lastValidTemp = _total / _numReadings;
    return _lastValidTemp;
}

float getLatest() {
    return _lastValidTemp;
}

bool isError() {
    return _error;
}
};

#endif

```

Safety_Monitor.h

```

#ifndef SAFETY_MONITOR_H
#define SAFETY_MONITOR_H

#include <Arduino.h>

class SafetySystem {
private:
    uint8_t _ssrPin;
    uint8_t _doorPin;
    volatile bool _isSafe;
    bool _systemLocked;

public:
    /**
     * Конструктор класу безпеки
     * @param ssrPin Пін керування ТЕНом
     * @param doorPin Пін датчика дверей
     */

```

```

SafetySystem(uint8_t ssrPin, uint8_t doorPin) :
    _ssrPin(ssrPin), _doorPin(doorPin), _isSafe(true), _systemLocked(false) {}

void begin() {
    pinMode(_ssrPin, OUTPUT);
    pinMode(_doorPin, INPUT_PULLUP);

    // Налаштування апаратного переривання на відкриття дверей (Falling edge)
    // IRAM_ATTR дозволяє обробнику працювати максимально швидко з RAM
    attachInterruptArg(digitalPinToInterrupt(_doorPin), [](void* arg) {
        auto* self = static_cast<SafetySystem*>(arg);
        self->handleEmergency();
    }, this, FALLING);
}

/**
 * Обробник критичної події (переривання)
 */
void IRAM_ATTR handleEmergency() {
    digitalWrite(_ssrPin, LOW); // Миттєве апаратне вимкнення навантаження
    _isSafe = false;
}

/**
 * Перевірка поточного стану безпеки
 */
bool isSafe() {
    // Додаткова перевірка фізичного рівня (на випадок збою прапорця)
    if (digitalRead(_doorPin) == LOW) {
        _isSafe = false;
    }
    return _isSafe;
}

/**
 * Програмне блокування системи до втручання оператора
 */
void lockSystem() {
    _systemLocked = true;
    digitalWrite(_ssrPin, LOW);
    _isSafe = false;
}

/**
 * Скидання стану аварії (тільки після фізичного усунення причини)
 */
void resetSafety() {
    if (digitalRead(_doorPin) == HIGH) {
        _isSafe = true;
        _systemLocked = false;
    }
}

```

```
    }  
  }  
};  
  
#endif
```

Додаток Б
Специфікація компонентів

Таблиця Б.1

Перелік основних компонентів системи

№ п/п	Назва компонента	Технічні характеристики	Призначення	Кількість
1	Мікроконтролер ESP32 DevKit V1	Dual-core 240MHz, Wi-Fi/BLE, 4MB Flash	Центральний обчислювальний модуль системи	1 шт.
2	Модуль MAX6675 з термопарою	К-тип, 0°C – 1024°C, інтерфейс SPI	Прецизійне вимірювання температури в камері	1 шт.
3	Твердотільне реле SSR-40DA	Вхід 3-32V DC, Вихід 24-380V AC, 40A	Безконтактна комутація нагрівальних елементів	3 шт.
4	ТЕНи патронні/повітряні	Потужність 4 кВт, 220В (з'єднання «зірка»)	Основні нагрівальні елементи камери	3 шт.
5	Блок живлення імпульсний	Вхід 220V AC, Вихід 12V DC, 2A	Живлення контролера та модулів узгодження	1 шт.
6	Вентилятор конвекції	Осьовий, 220В, термостійке виконання	Забезпечення рівномірного розподілу тепла	1 шт.
7	Кінцевий вимикач (геркон)	Тип NO/NC, магнітне керування	Датчик відчинення дверей (система безпеки)	1 шт.
8	РК-дисплей LCD 1602 (I2C)	16 символів, 2 рядки, підсвічування	Місцева індикація поточних параметрів	1 шт.
9	Корпус щита автоматики	Металевий, IP54, з DIN-рейкою	Розміщення та захист електронних компонентів	1 шт.