МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім. Ю.М. ПОТЕБНІ

Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем

Кваліфікаційна робота

першого (бакалаврського) рівня освіти

на тему: Проєкт автоматизації переробки вторинного пластику у гранули. Система автоматичного регулювання енергоефективністю технології переробки.

Виконав: здобувач 4 курсу групи 6.1512
Спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

освітньої програми Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Атюнін Єгор Вячеславович

Керівник доцент, к.т.н. Дьяченко В.В.
(посада, вченезвання, науковийступінь, прізвище та ініціали)
Рецензент Курілец І.А.
ДиректорТОВ «Електротехмаш»

Запоріжжя 2026

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім. Ю. М. ПОТЕБНІ

Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Спеціальність 151«Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
Освітня програма Автоматизація та комп`ютерно-інтегровані технології
Спеціалізація
(код та назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри В.о. завідувача.каф. Морозов Д.М.

"___" _____ 2026 року

З А В Д А Н Н Я

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧЕВІ
Атюніну Єгору Вячеславовичу

1. Тема роботи(проєкту) Проєкт автоматизації переробки вторинного пластику у гранули. Система автоматичного регулювання енергоефективністю технології переробки
Керівник роботи Дьяченко В.В., доцент кафедри електичної інженерії та кіберфізичних систем, кандидат технічних наук
затверджені наказом ЗНУ від «23» грудня 2026 року №1833-с
2. Строк подання студентом роботи «01» червня 2026 року
3. Вхідні дані до роботи: дані отримані під час виробничої практики, аналіз існуючого рівня автоматизації на діючому об`єкті, технічна документація.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) містить аналіз екструдера як об'єкта керування, розробку математичної моделі його термозон та синтез дискретного ПІД-алгоритму, опис апаратної архітектуру на базі ESP32, системи вимірювання температури, силове ШІМ-керування та IoT-інтерфейс із функцією дисипативної адаптації, інженерні розрахунки показників надійності системи, обґрунтування економічної ефективності.
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) схема інформаційних та матеріальних потоків; функціональна схема автоматизації.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1-6	Доцент к.т.н. Дяченко В.В.		

7. Дата видачі завдання 09 лютого 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вивчення особливостей функціонування технологічних агрегатів. Аналіз існуючого рівня автоматизації	12.02.2026 19.09.2026	
2	Проектування системи автоматизації	20.02.2026 23.02.2026	
3	Розробка технічної документації	24.02.2026 10.03.2026	
4	Розрахунок надійності системи автоматизації	16.04.2026 27.04.2026	
5	Замовна специфікація на комплекс технічних засобів	28.04.2026 04.05.2026	
6	Організаційне забезпечення та ТЕП	05.05.2026 15.05.2026	

Студент _____ Єгор АТЮНІН

Керівник роботи _____ Віра ДЯЧЕНКО

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер _____ Андрій КОЛОСОК

РЕФЕРАТ

Атюнін Є.В. Проєкт автоматизації переробки вторинного пластику у гранули. Система автоматичного регулювання енергоефективністю технології переробки

Кваліфікаційна робота бакалавра на здобуття вищої освіти за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», науковий керівник В.В. Дяченко, Запорізький національний університет, Інженерний науково-навчальний інститут ім. Ю.М. Потебні, кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем. Запоріжжя, 2026.

В роботі проведено аналіз технології гранулювання пластику та виявлено найбільш енергоємні вузли. Предмет дослідження - система автоматичного керування температурними режимами екструдера з використанням мікроконтролерних засобів для підвищення енергоефективності. Розроблено систему автоматизації на базі мікроконтролера ESP32, що дозволяє реалізувати точне ПІД-регулювання чотирьох зон нагріву. Впроваджено алгоритм адаптивного керування потужністю залежно від навантаження на шнек, що дозволяє знизити споживання електроенергії на 5–10%.Розроблено функціональні та принципові електричні схеми, програмне забезпечення контролера та проведено розрахунок економічної ефективності проєкту.

Ключові слова**:** АВТОМАТИЗАЦІЯ, ВТОРИННИЙ ПЛАСТИК, ЕКСТРУДЕР, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, ESP32, ПІД-РЕГУЛЯТОР, ДАТЧИК ТЕМПЕРАТУРИ, ШИМ-КЕРУВАННЯ.

ЗМІСТ

ВСТУП…….6
1. ВИВЧЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ФУНКЦІОНУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ АГРЕГАТІВ. АНАЛІЗ ІСНУЮЧОГО РІВНЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ……..…..9
1.1. Технологічний агрегат і алгоритм його роботи …….…..9
1.2. Технологічний процес, як об’єкт автоматизації ……..……12
1.3. Аналіз існуючого рівня автоматизації на діючому виробництві…….....15
1.4. Розробка схеми матеріальних та інформаційних потоків ….…17
1.5. Стан рівня автоматизації на аналогічних об’єктах …….....20
1.6. Недоліки існуючої системи управління ……....21
2. ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ……..…24
2.1. Вибір та обґрунтування функціональної структури СА ……..24
2.2. Визначення принципів управління по кожному параметру ……26
2.3. Вибір (розробка) математичної моделі системи управління …...28
2.4. Вибір та обґрунтування технічних засобів на базі ESP32 ……....30
3. РОЗРОБКА ТЕХНІЧНОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ……32
3.1. Функціональна схема автоматизаці …….…..32
3.2. Принципова електрична схема контролера ……..…….33
3.3. Схема підключення навантаження (ТЕНів) через SSR …..……..34
4. РОЗРАХУНОК НАДІЙНОСТІ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ..…….37
5. ЗАМОВНА СПЕЦИФІКАЦІЯ НА КОМПЛЕКС ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ…….41
6. ОРГАНІЗАЦІЙНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА ТЕП…….……...……46
ВИСНОВКИ ……50
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ……..……52
ДОДАТКИ……...

ВСТУП

Актуальність теми. На сучасному етапі розвитку світової економіки перехід до моделі «циркулярної економіки» став не просто екологічним трендом, а економічною необхідністю.

Проблема накопичення відходів полімерних матеріалів набула глобального масштабу, що ставить перед інженерною спільнотою завдання щодо створення ефективних технологій рециклінгу.

Переробка вторинного пластику (поліетилену низького та високого тиску, поліпропілену тощо.) у гранули дозволяє повернути ресурси у виробничий цикл, знижуючи собівартість кінцевої продукції та мінімізуючи антропогенне навантаження на довкілля.

Проте технологія гранулювання вторинної сировини методом екструзії є одним із найбільш енергоємних процесів у полімерній індустрії.

Основне споживання електричної енергії припадає на два ключові вузли: систему теплового підігріву матеріального циліндра (ТЕНи) та привод шнека екструдера.

За статистичними даними, витрати на електроенергію можуть складати до 30-40% від загальних операційних витрат підприємства з переробки.Традиційні системи управління, що досі використовуються на багатьох підприємствах, базуються на застарілих двопозиційних регуляторах (принцип «увімкнено/вимкнено»).

Такі системи мають суттєві недоліки: через велику теплову інерцію нагрівальних елементів виникають значні температурні перерегулювання (амплітудою до 10-15°С).

Це призводить до циклічних стрибків енергоспоживання, передчасного зносу комутаційної апаратури та, найголовніше, до термічної деградації пластику, що знижує якість отриманої гранули.

В умовах постійного зростання вартості енергоносіїв в Україні та жорстких вимог до якості вторинної сировини, розробка інтелектуальних систем автоматичного регулювання, що здатні оптимізувати енергоспоживання в реальному часі, є надзвичайно актуальною.

Використання сучасних обчислювальних платформ, таких як мікроконтролер ESP32, дозволяє реалізувати складні алгоритми прецизійного керування та інтегрувати елементи Industrial IoT (промислового інтернету речей) за значно меншої вартості порівняно з класичними промисловими ПЛК.

Зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами.Робота виконується відповідно до напрямів розвитку галузі автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, спрямованих на цифровізацію промислового сектору та впровадження енергоефективних рішень у рамках концепції «Індустрія 4.0».

Мета дослідження: полягає у підвищенні енергоефективності та стабільності процесу переробки вторинного пластику у гранули шляхом розробки та впровадження мікроконтролерної системи автоматичного регулювання на базі архітектури ESP32 з використанням алгоритмів ПІД-регулювання та моніторингу навантаження на приводні вузли.

Для досягнення данної мети необхідно вирішити наступні кроки:

- Проаналізувати технологічну схему лінії гранулювання та визначити математичні залежності між температурними режимами та енергоспоживанням.

I. - Обґрунтувати вибір апаратної бази (мікроконтролер ESP32, термопари типу К, твердотільні реле) для побудови системи управління.

II. Розробити алгоритм автоматичного керування чотирма зонами нагріву екструдера з реалізацією програмного ПІД-регулятора.

III.

IV. - Спроектувати систему зворотного зв’язку, яка б враховувала навантаження на шнек (струм двигуна) для динамічної корекції теплової потужності.

V.

VI. - Розробити програмне забезпечення для реалізації функцій ШИМ-регулювання та дистанційного моніторингу параметрів через веб-інтерфейс.

VII.

VIII. - Провести розрахунок надійності розробленої системи та оцінити її техніко-економічну ефективність у порівнянні з існуючими аналогами.

Об’єкт дослідження – технологічний процес екструзії та гранулювання вторинної полімерної сировини як об'єкт автоматизації.

Предмет дослідження – методи, алгоритми та технічні засоби мікроконтролерного управління енергоефективністю нагрівальних елементів та приводів лінії переробки пластику.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених завдань у роботі використано методи теорії автоматичного керування (для синтезу ПІД-регулятора), методи математичного моделювання теплових процесів, а також принципи об’єктно-орієнтованого програмування для розробки вбудованого ПЗ контролера.

Оптимизацияпроекту результатів полягає у наступному:

Запропоновано підхід до інтеграції недорогої, але потужної платформи ESP32 у промисловий цикл переробки пластику, що забезпечує високу точність регулювання (до ±1°C) при мінімальних витратах на впровадження.

Удосконалено алгоритм управління нагрівом шляхом впровадження адаптивного ШИМ-регулювання через твердотільні реле (SSR), що дозволяє усунути пускові струми та стабілізувати споживання потужності.

Розробити структуру інформаційної взаємодії між датчиками температури та системою енергомоніторингу, що дає можливість ідентифікувати аномальні режими роботи обладнання на ранніх стадіях роботи.

Практичне значення роботи.

Розроблена система автоматизації може бути масштабована та адаптована для різних типів екструзійних установок.

Використання запропонованого технічного рішення дозволяє досягти економії електроенергії на рівні не менше 5% за рахунок ліквідації теплової інерції та оптимізації періодів ввімкнення ТЕНів.

Крім того, мікроконтролерне управління підвищує експлуатаційний ресурс нагрівачів та покращує фізико-механічні властивості виготовлених гранул завдяки стабільному температурному профілю.

1. ВИВЧЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ФУНКЦІОНУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ АГРЕГАТІВ. АНАЛІЗ ІСНУЮЧОГО РІВНЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ

1.1. Технологічний агрегат і алгоритм його роботи

Основним технологічним агрегатом у процесі переробки вторинної полімерної сировини є одношнековий екструдер-гранулятор.

Його головне завдання - перетворення подрібненого пластику (флексу або агломерату) у гомогенний розплав з наступним продавлюванням крізь формуючу головку для отримання стрінгів (пластикових ниток), які після охолодження нарізаються на гранули.

Конструктивний склад агрегату:

-Приводна частина: електродвигун змінного струму, з’єднаний через редуктор із шнеком.

I. - Вузол завантаження: конічний бункер, через який сировина потрапляє на витки шнека.
II. - Матеріальний циліндр: робоча камера, всередині якої обертається шнек. На зовнішній поверхні циліндра розташовані електричні нагрівачі (ТЕНи), розділені на 4 незалежні теплові зони.
III. - Шнек: має спеціальну геометрію для транспортування, стиснення та гомогенізації розплаву.
IV. - Формуюча головка (фільєра): деталь з отворами, що формує геометрію вихідного продукту.
V. - Система грануляції: пристрій для нарізки охолодженого матеріалу.

Функціональні зони екструдера:

Для забезпечення якісної переробки циліндр екструдера умовно поділяється на зони, кожна з яких потребує індивідуального температурного режиму:

Зона 1 (Живлення): прийом сировини та її попередній підігрів.

Зона 2 (Плавлення/Стиснення): інтенсивне перетворення твердих часток у в’язкопластичний стан під дією тепла та тиску.

Зона 3 (Дозування/Гомогенізація): остаточне перемішування розплаву до однорідного стану.

Зона 4 (Головка): підтримання стабільної в’язкості перед виходом з фільєри.

Алгоритм роботи технологічного агрегату:

I. -Етап підготовки (Вихід на режим):Система автоматизації активує ТЕНи всіх чотирьох зон.Контролер (ESP32) зчитує дані з термопар та поступово нарощує потужність.Наприклад, при встановленій цільовій температурі 260°C, система має забезпечити плавне нагрівання без різких стрибків струму, щоб уникнути деградації залишків пластику в циліндрі.
II. -Запуск привода:Після досягнення заданої температури (наприклад, 260°C) та витримки (термічного «прогріву» металу), вмикається головний двигун шнека.
III. -Завантаження та пластифікація:Сировина з бункера захоплюється шнеком.За рахунок тепла від ТЕНів та тертя пластику об стінки циліндра відбувається розплавлення.

IV. -Автоматичне регулювання:У процесі роботи навантаження на шнек може змінюватися (залежно від вологості чи щільності вторинної сировини).Це впливає на температуру.Контролер ESP32 за алгоритмом ПІД-регулювання коригує шпаруватість ШИМ-сигналу, що подається на твердотільні реле .Як тільки температура зони досягає верхньої межі (наприклад, 260°C), подача потужності припиняється або знижується до мінімуму.При охолодженні до нижньої межі (наприклад, 255°C) - енергоподача відновлюється.

V. -Вихід продукту:Розплав проходить крізь фільтри, формується у стрінги, охолоджується у ванній та потрапляє на ножі гранулятора.

Енергоефективна складова алгоритму: На відміну від стандартних промислових схем, де нагрівачі працюють у грубому режимі «On/Off», розроблений алгоритм на базі ESP32 використовує прецизійне керування потужністю.

Це дозволяє використовувати залишкову теплову інерцію металу циліндра.Впровадження «вікна допуску» (гістерезису) у поєднанні з ПІД-корекцією дозволяє вимикати нагрів за кілька часток градуса до досягнення піку, що за підрахунками дає змогу зекономити від 5% електроенергії за рахунок відсутності фаз перегріву.

Для розробки ефективної системи автоматизації необхідно розуміти динаміку перетворення вторинної полімерної сировини всередині матеріального циліндра.

Процес екструзії не є статичним нагріванням; це складна взаємодія механічної енергії шнека та теплової енергії ТЕНів.

Стадії переробки сировини у шнековому просторі:

I. -Транспортування твердої фази:На цьому етапі флекс (подрібнений пластик) за рахунок сил тертя переміщується від бункера вглиб циліндра.

II. Автоматизація цієї зони критична для запобігання «заклинюванню» або передчасному спіканню пластику в горловині, що призвело б до зупинки всієї лінії та втрат енергії на повторний пуск.

III. -Пластифікація та плавлення:Це найбільш енергоємний етап.Тут пластик переходить у в’язкопластичний стан.Важливою особливістю є так званий дисипативний нагрів -- виділення тепла за рахунок внутрішнього тертя шарів полімеру при високому тиску.Розумна система на базі ESP32 повинна враховувати цей «внутрішній» нагрів: коли шнек працює під великим навантаженням, зовнішні ТЕНи мають автоматично знижувати потужність, оскільки матеріал гріє сам себе.Це і є ключовим механізмом економії енергії в даному проєкті.

IV. -Гомогенізація та нагнітання:Розплав стискається до максимального тиску перед фільєрою.Стабільність температури в цій зоні визначає в’язкість розплаву.Навіть відхилення у 2–3°C змінює текучість пластику, що впливає на діаметр стрінгів та навантаження на головний двигун.

Аналіз теплової інерції як об’єкта регулювання: Матеріальний циліндр екструдера -- це масивна сталева конструкція з великою теплоємністю.Після вимкнення живлення ТЕНів температура продовжує зростати ще протягом певного часу (ефект «вибігу» температури).Традиційні релейні системи не здатні це врахувати, що призводить до перевитрати енергії.Застосування мікроконтролера **ESP32** дозволяє реалізувати прогнозний алгоритм управління.

Замість очікування моменту, коли температура досягне 260°C(як зразок), алгоритм аналізує швидкість зростання температури.Якщо швидкість занадто висока, система плавно знижує шпаруватість ШИМ-сигналу ще при підході до позначки 257°C.

Такий «м’який» вихід на режим дозволяє: Уникнути перегріву (Overheating), який руйнує молекулярні зв’язки вторинного полімеру.Зменшити кількість циклів повного ввімкнення/вимкнення ТЕНів, що подовжує термін їхньої служби.

Мінімізувати «пікові» навантаження на електричну мережу цеху.Особливості роботи з вторинною сировиною: На відміну від первинного грануляту, вторинний пластик має нестабільний насипний склад та може містити залишки вологи чи сторонніх домішок.Це створює випадкові збурення в системі.Наприклад, потрапляння вологої партії сировини миттєво відбирає тепло на випаровування води.

Швидка реакція ESP32 (з частотою опитування датчиків до декількох мілісекунд) дозволяє компенсувати ці збурення швидше, ніж це роблять стандартні промислові терморегулятори, забезпечуючи стабільну якість вихідної гранули та сталий рівень енергоефективності.

1.2. Технологічний процес, як об’єкт автоматизації

З точки зору теорії автоматичного керування (ТАК), лінія переробки вторинного пластику (зокрема екструдер-гранулятор) є складним багатозв’язним об’єктом із розподіленими параметрами та значним запізненням.

Для побудови ефективної системи керування на базі мікроконтролера **ESP32** необхідно провести аналіз об’єкта, класифікувати всі технологічні змінні та визначити канали керування.

Класифікація параметрів об’єкта автоматизації: Всі параметри процесу екструзії можна розділити на три основні групи:

I. -Керовані величини (Вихідні параметри) - те, що ми підтримуємо на заданому рівні.
II. -Керуючі впливи (Вхідні параметри) - те, чим ми впливаємо на процес.
III. -Збурюючі впливи (Завади) - чинники, що дестабілізують процес.

Аналіз каналів керування: Найбільш критичним для даної роботи є канал «Потужність ТЕНів --Температура зони». Цей канал характеризується великою тепловою інерцією (запізненням).

Після подачі напруги на нагрівач температура починає зростати лише через певний час (транспортне запізнення), що зумовлено товщиною стінок циліндра та розташуванням датчиків.

Другим важливим каналом є «Частота обертання шнека -- Продуктивність/Енергоспоживання».

Швидкість обертання шнека безпосередньо впливає на силу тертя пластику, а отже, на дисипативне тепловиділення, яке система автоматизації повинна враховувати при регулюванні температури.

Таблиця 1.1. Перелік вхідних та вихідних сигналів системи автоматизації

	A	B	C	D
1	Тип сигналу	Найменування параметра	Позначення	Діапазон/Призначення
2	Вхідний (Аналоговий)	Температура зони нагріву №1–4	T1...T4	0...400 °C (термопари тип K)
3	Вхідний (Аналоговий)	Струм споживання двигуна шнека	Imot	0...50 A (датчик струму)
4	Вхідний (Дискретний)	Стан кнопок "Пуск/Стоп"	Sstart	Керування режимом роботи
5	Вихідний (ШИМ)	Потужність нагрівачів (4 канали)	Pten	0...100% (через SSR)
6	Вихідний (Аналоговий)	Швидкість обертання шнека	fout	0...50 Гц (сигнал на ПЧ)
7	Інформаційний	Дані моніторингу через Wi-Fi	IoTdata	Передача на веб-інтерфейс

Збурюючі впливи (Завади):

Автоматизація ускладнюється наявністю неконтрольованих чинників:

Коливання напруги в мережі: призводять до нелінійної зміни потужності ТЕНів.

Неоднорідність сировини: вторинний пластик може мати різну вологість та фракцію, що змінює в’язкість розплаву та теплоємність суміші.

Температура навколишнього середовища: впливає на швидкість охолодження циліндра (конвективні втрати).

Математичний опис об’єкта: Для реалізації алгоритму на ESP32 кожна зона нагріву розглядається як аперіодична ланка першого порядку із запізненням. Передавальна функція такого об’єкта має вигляд:

$$W(s) = \frac{k}{T \cdot s + 1} \cdot e^{-\tau \cdot s}$$

де k — коефіцієнт підсилення; T — постійна часу нагріву; τ — час запізнення.

Енергоефективність як цільова функція автоматизації: Головною особливістю екструдера як об’єкта автоматизації у даному проєкті є мінімізація питомих витрат енергії (E_spec).

$$E_{spec} = \frac{\sum P_{ten} + P_{mot}}{Q} \rightarrow \min$$

де Q — годинна продуктивність лінії.

Система автоматизації на базі ESP32 повинна не просто «тримати температуру», а оптимізувати роботу ТЕНів так, щоб максимально використовувати кінетичну енергію шнека для нагріву пластику. Це досягається шляхом інтелектуального алгоритму, який при зростанні навантаження на шнек (збільшенні внутрішнього тертя) випереджально знижує потужність електричного нагріву, запобігаючи перегріву та марним витратам електрики.

Інформаційна структура об’єкта:

Завдяки використанню ESP32, об’єкт автоматизації стає частиною інформаційної мережі.

Це дозволяє впровадити функцію «цифрового двійника» (Digital Twin) у спрощеному вигляді: контролер збирає дані про час нагріву та спожиту потужність, формуючи базу даних для подальшого аналізу енергоефективності різних партій вторинної сировини.

Технічне обґрунтування вибору засобів автоматизації: датчики та виконавчі механізми.

Для реалізації системи автоматичного керування (САК) на базі мікроконтролера ESP32 було обрано комплекс технічних засобів, що відповідають вимогам швидкодії, точності та промислової надійності.

Первинні перетворювачі (Датчики):Термопари типу К (Хромель-Алюмель): Для моніторингу температури в чотирьох зонах екструдера обрано саме термопари, а не терморезистори (наприклад, PT100), через їхню здатність витримувати високі температури (до 400°C і вище) та вібростійкість.

Оскільки ESP32 працює з цифровими сигналами, для кожної термопари використовується спеціалізований модуль сполучення MAX6675.

Ця мікросхема виконує компенсацію холодного спаю та перетворює мікровольтовий сигнал термопари у 12-бітний цифровий код, який передається в контролер через інтерфейс SPI.

Це забезпечує високу завадостійкість сигналу, що є критичним в умовах роботи потужних двигунів.

Датчик моніторингу електроенергії (PZEM-004T): Для реалізації системи енергоефективності обрано модуль PZem-004T.

Він дозволяє в реальному часі зчитувати напругу, струм, активну потужність та коефіцієнт потужності.Ці дані передаються в ESP32 через UART.

На основі цих показників контролер вираховує питому енергоємність процесу (кВт * год / кг) та адаптує роботу нагрівачів під навантаження шнека.

1.3. Аналіз існуючого рівня автоматизації на діючому виробництві

На сьогоднішній день більшість вітчизняних підприємств малого та середнього бізнесу, що спеціалізуються на переробці вторинних полімерів, використовують обладнання двох типів: застарілі радянські або європейські лінії, що пройшли капітальний ремонт, або бюджетні екструдери китайського виробництва.

Аналіз стану автоматизації таких об'єктів виявляє низку критичних недоліків, що безпосередньо впливають на енергоефективність та якість кінцевого продукту.

Типова архітектура існуючих систем керування у більшості випадків система автоматизації діючої лінії гранулювання побудована за децентралізованим принципом із використанням дискретних пристроїв керування:

- Регулювання температури: Виконуються на базі автономних цифрових терморегуляторів (найпопулярніші моделі -- REX-C100, Autonics або їхні аналоги). Ці пристрої працюють незалежно один від одного для кожної зони нагріву.
- Керування приводом: Здійснюється або за допомогою прямого пуску двигуна (що спричиняє великі пускові струми), або через найпростіші частотні перетворювачі, налаштування яких проводиться вручну оператором.
- Система захисту: Базується на механічних теплових реле та плавких запобіжниках, які мають низьку швидкість спрацювання та не забезпечують діагностику несправностей у реальному часі.

Критичний аналіз недоліків існуючого рівня автоматизації: головною проблемою існуючих рішень є використання двопозиційного (On/Off) регулювання або спрощених алгоритмів ПІД, реалізованих у дешевих контролерах.

Це призводить до наступних негативних наслідків:

- Теплове перерегулювання: Через значну масивність металевого циліндра екструдера виникає ефект теплової інерції.
- Коли стандартний терморегулятор вимикає ТЕН при досягненні 260°C, температура в середині розплаву продовжує зростати до 270–275°C за рахунок накопиченої енергії.
- Це призводить до «підгоряння» пластику та перевитрати енергії.

- Відсутність системного моніторингу: Існуючі системи не дозволяють відстежувати загальне та позонне споживання електроенергії. Підприємство бачить лише загальний рахунок за електрику, не маючи можливості проаналізувати, на якому етапі виникають найбільші втрати.
- Низька завадостійкість та комутаційні втрати: Використання електромагнітних пускачів для керування ТЕНами створює сильні імпульсні завади в мережі та призводить до швидкого зносу контактів через постійні цикли ввімкнення/вимкнення.
- Це також унеможливлює використання високочастотного ШИМ-керування для плавної підтримки температури.
- Людський фактор: Оскільки зони нагріву не пов'язані між собою, оператор змушений вручну підбирати параметри для кожної зони. Відсутність єдиного інтерфейсу керування підвищує ризик помилки, що в умовах переробки вторинної сировини (яка часто є неоднорідною) призводить до великого відсотка браку.

Енергетичні втрати при застарілій автоматизації: аналіз енергоспоживання на діючих лініях показує, що через відсутність синхронізації між роботою шнека та нагрівальних елементів втрачається до 10-15% енергії.

Наприклад, при інтенсивному обертанні шнека за рахунок внутрішнього тертя (дисипації) виділяється достатньо тепла для плавлення матеріалу, проте стандартні терморегулятори продовжують подавати живлення на ТЕНи, оскільки вони не «знають» про навантаження на двигун.

Обґрунтування необхідності модернізації

Впровадження інтелектуальної системи на базі мікроконтролера ESP32 дозволяє перейти від «реактивного» керування (реакція на факт відхилення температури) до «прогнозного». Завдяки високій обчислювальній потужності

ESP32 з'являється можливість:

- Об'єднати всі 4 зони нагріву в єдиний алгоритм керування.
- Використовувати твердотільні реле (SSR) для реалізації «м'якого» ШИМ-регулювання без іскріння та перешкод.
- Інтегрувати датчики енергомоніторингу для постійного обчислення ККД установки.
- Створити віддалений доступ через Wi-Fi для контролю процесу зі смартфону або ПК, що відповідає концепції «Індустрія 4.0».

Таким чином, існуючий рівень автоматизації на більшості профільних підприємств є морально застарілим і не відповідає сучасним вимогам енергоефективності.

Розробка кастомної системи керування на базі сучасних мікропроцесорних засобів є не тільки технічно виправданою, але й економічно необхідною для зниження собівартості вторинної гранули та підвищення конкурентоспроможності виробництва.

1.4. Розробка схеми матеріальних та інформаційних потоків

Для створення високоефективної системи автоматичного управління процесом екструзії необхідно провести декомпозицію технологічної лінії на базові потоки: матеріальні, інформаційні та енергетичні.

Такий підхід дозволяє чітко визначити точки контролю, джерела збурень та алгоритми взаємодії мікроконтролера з фізичним об’єктом.

Системний аналіз потоків є основою для подальшої розробки функціональної та принципової схем автоматизації.

1.4.1. Аналіз матеріальних потоків

Матеріальний потік (Ф_m) відображає фізичне переміщення та зміну агрегатного стану полімерної сировини в процесі її переробки.

Вхідний матеріальний потік:

На вхід системи надходить вторинна полімерна сировина (флекс або агломерат). Головними збурюючими факторами цього потоку, що впливають на роботу системи автоматизації, є:

- Нестабільна насипна щільність;
- Різний рівень залишкової вологості;
- Неоднорідність фракційного складу.

Трансформація матеріального потоку в екструдері:Рух матеріалу всередині матеріального циліндра супроводжується складними термодинамічними змінами.

Матеріальний потік проходить через чотири послідовні стадії:

- Твердотільне транспортування: У зоні живлення (Зона 1) сировина перебуває у твердому стані.
- Шнек виконує роль гвинтового конвеєра, ущільнюючи матеріал та витісняючи повітря.
- Фазовий перехід (плавлення): У зоні стиснення (Зона 2) відбувається руйнування кристалічної структури полімеру.
- Потік переходить із твердого стану у в’язкотекучий.
- Це найбільш енергоємний етап, де матеріальний потік акумулює теплову енергію.

- Гомогенізація розплаву: У зоні дозування (Зона 3) потік являє собою однорідну розплавлену масу.
- На цьому етапі критично важливим є забезпечення рівномірного профілю швидкостей та температур по всьому перерізу потоку.
- Екструзія та формування: У стренг-головці (Зона 4) розплав проходить через фільєру, набуваючи форми неперервних ниток (стрінгів).

Вихідний матеріальний потік:Після ванної охолодження та вузла грануляції матеріальний потік трансформується у кінцевий продукт -- готову вторинну гранулу заданого розміру.

1.4.2. Аналіз інформаційних потоків

Інформаційний потік (Ф_і) забезпечує систему управління даними про стан матеріального потоку та обладнання для прийняття керуючих рішень.

В архітектурі розроблюваної системи на базі ESP32 інформаційні потоки поділяються на три ієрархічні рівні.

Рівень 1: Збір даних (Нижній рівень)Джерелами первинної інформації є датчики.Аналогові інформаційні потоки температури:

- Термопари генерують термо-ЕРС (мікровольти), що пропорційна температурі кожної з чотирьох зон.Цей аналоговий сигнал передається на модулі MAX6675, де відбувається його оцифрування.
- Потік даних про навантаження:Модуль енергомоніторингу PZEM-004T зчитує показники струму приводного двигуна, формуючи інформаційний масив про механічний опір розплаву (в’язкість).

Рівень 2: Обробка та керування (Рівень мікроконтролера)Центральним вузлом обробки інформації є мікроконтролер ESP32:

- Вхідний потік:Цифрові дані від датчиків надходять через протоколи цифрового зв'язку (SPI для MAX6675 та UART для PZEM-004T).
- Обчислювальний процес:Програма виконує порівняння поточних значень із заданими (Setpoints), розраховує помилку керування та застосовує ПІД-алгоритм для генерації керуючих впливів.
- Вихідний керуючий потік:Контролер формує низьковольтні ШИМ-сигнали (3.3В), які посилаються на твердотільні реле (SSR) для комутації силового живлення ТЕНів.

Рівень 3: Диспетчеризація (Рівень IoT): на відміну від класичних систем, рішення на базі ESP32 створює інформаційний потік верхнього рівня.Зібрані дані про температуру, споживану потужність та статуси роботи пакуються та передаються бездротовим каналом Wi-Fi на зовнішній сервер або інтерфейс оператора.Це забезпечує можливість віддаленого моніторингу та накопичення статистики для аналізу енергоефективності.

1.4.3. Аналіз енергетичних потоків (Аспект енергоефективності)

Енергетичний потік (Ф_е) є ключовим об’єктом регулювання у контексті теми дипломної роботи.Вхідна енергія:

Електрична енергія з промислової мережі (380В/220В).Перетворення енергії:

- Електрична енергія перетворюється на теплову у ТЕНах і через теплопровідність стінок циліндра передається матеріальному потоку.
- Електрична енергія перетворюється на механічну у двигуні, обертаючи шнек.

Внутрішня генерація тепла (Дисипація): Завдяки високій в'язкості пластику, механічна енергія обертання шнека частково перетворюється натеплову через внутрішнє тертя.

Втрати: Частина теплової енергії неминуче розсіюється в навколишнє середовище шляхом конвекції та випромінювання від корпусу екструдера.

Логіка енергозбереження:Система автоматизації налаштована таким чином, щоб інформаційний потік керував енергетичним потоком.

Отримуючи дані про зростання механічного навантаження на шнек, алгоритм ESP32 розуміє, що дисипативне тепловиділення зросло, і пропорційно зменшує електричну потужність (шпаруватість ШИМ) на ТЕНах, компенсуючи нагрів за рахунок внутрішнього тертя пластику.

Це дозволяє уникнути перевитрат електроенергії та перегріву системи.

1.5. Стан рівня автоматизації на аналогічних об’єктах

Сучасний світовий ринок обладнання для переробки вторинних полімерів характеризується переходом до повної цифровізації та інтелектуалізації процесів.

Аналіз аналогічних об’єктів, розроблених провідними світовими компаніями, такими як Erema (Австрія), Starlinger (Австрія) та NGR (Next Generation Recyclingмашини), дозволяє визначити вектори розвитку автоматизації в цій галузі.

1.5.1. Рішення світових лідерів (Erema та Starlinger)

На об’єктах преміум-сегмента автоматизація базується на принципах "Smart Factory" та архітектурі ПЛК високого рівня (Siemens S7-1500, B&R). Ключовими особливостями таких систем є:

- Технологія "Counter Current": Автоматичне регулювання швидкості подачі сировини залежно від температури всередині екструдера. Система самостійно "відчуває" зміну в’язкості розплаву та коригує крутний момент двигуна.
- Інтелектуальне керування нагрівом (Smart Start): Використовується не просто ПІД-регулювання, а предиктивні моделі.
- Система враховує прогноз погоди в цеху та температуру охолоджуючої води для корекції потужності ТЕНів.

- Дистанційний сервіс та Big Data: Об’єкти обладнані шлюзами для передачі даних у хмару (наприклад, система BluPort від Erema).
- Це дозволяє заводу-виробнику відстежувати ефективність лінії в Україні в реальному часі.

1.5.2. Аналіз систем середнього сегмента (Туреччина, Тайвань)

Виробники середнього рівня (наприклад, компанії Mikrosan або Genox) використовують більш традиційні схеми, що ближчі до тематики даного диплома, але реалізовані на промислових контролерах:

- Централізоване керування:Замість розрізнених термостатів встановлюється один ПЛК з сенсорною HMI-панеллю.
- Енергомоніторинг:Обов’язкова наявність модулів аналізу мережі для запобігання перекосу фаз при одночасному ввімкненні потужних нагрівачів.
- Синхронізація потоків:Швидкість ножа гранулятора автоматично підлаштовується під швидкість виходу стрінгів, що забезпечує ідеальну геометричну форму гранули.

1.5.3. Порівняльна характеристика існуючих рішень та розроблюваної системи

Для наочності проведемо порівняльний аналіз технічних рішень на аналогічних об’єктах та запропонованого проєкту на базі ESP32.

Таблиця 1.2. Порівняння рівнів автоматизації екструзійних установок

	A	B	C	D	E
1	Характеристика	Бюджетні лінії (Китай/Україна)	Преміум лінії (Erema/Starlinger)	Проєктна система (ESP32)	
2	Апаратна база	Дискретні термостати	Промислові ПЛК (Siemens)	Мікроконтролер ESP32	
3	Алгоритм нагріву	On/Off або простий ПІД	Предиктивне моделювання	ПІД + Адаптивний ШИМ	
4	Комутація	Магнітні пускачі	Твердотільні реле (SSR)	Твердотільні реле (SSR)	
5	Інтерфейс	Відсутній (тільки кнопки)	SCADA / HMI панелі	Web-інтерфейс (IoT)	
6	Енергоефективність	Низька (не контролюється)	Дуже висока (автоматична)	Висока (алгоритм дисипації)	
7	Вартість САК	$300 - $500	$15,000 - $40,000	$100 - $250	
8					

1.5.4. Тенденції та висновки аналізу

Аналіз аналогічних об’єктів показує, що сучасна автоматизація рухається в бік енергонезалежності та інтелектуалізації.

Основними трендами є:

- Відмова від механічної комутації:Твердотільні технології (SSR) стали стандартом для енергоефективних систем.
- Глибока інтеграція IoT:Можливість бачити графіки температур та споживання енергії на мобільному пристрої оператора стає базовою вимогою.
- Використання вільних обчислювальних платформ:Останні роки спостерігається тенденція використання мікропроцесорних систем (подібних до ESP32 або Raspberry Pi) для прототипування та впровадження на малих підприємствах, де вартість ліцензійного ПЗ Siemens є непосильною.

1.6. Недоліки існуючої системи управління

За результатами проведеного аналізу технологічного процесу та існуючих засобів автоматизації на аналогічних об’єктах, можна виділити ряд критичних недоліків, які притаманні більшості діючих ліній гранулювання вторинної сировини.

Ці недоліки розділено на три категорії: технічні, енергетичні та інформаційні.

1.6.1. Технічні та технологічні недоліки

Технічні та технологічні недоліки:

- Низька точність регулювання температури.
- Більшість систем використовують двопозиційний закон регулювання або спрощений ПІД-алгоритм без автоналаштування.
- Через масивність циліндра та інерційність ТЕНів виникає статична помилка та значне перерегулювання.
- Відхилення температури від заданої є критичним для вторинної сировини, оскільки це призводить до розриву молекулярних ланцюгів полімеру (деградації), що погіршує фізико-механічні властивості гранули.
- Висока інерційність виконавчих механізмів.
- Використання електромагнітних пускачів обмежує частоту комутації. Контакти пускачів мають обмежений ресурс (кількість циклів), що змушує збільшувати гістерезис регулювання для зменшення частоти спрацювань.
- Це входить у пряме протиріччя з вимогою точності підтримки температури.

- Відсутність адаптивності до зміни сировини.
- Існуюча система є «жорсткою».
- Вона не враховує зміну навантаження на привод при потраплянні більш щільного або вологого матеріалу.
- Оскільки система не має зв’язку між датчиком струму двигуна та потужністю нагрівачів, вона не здатна компенсувати дисипативне тепло, що виділяється при терті.

1.6.2. Енергетичні недоліки

Енергетичні недоліки:

- Надлишкове споживання в перехідних режимах.
- Під час виходу на робочий режим (розігріву) ТЕНи працюють на 100% потужності до самого моменту досягнення уставки.
- Через накопичену енергію температура продовжує зростати після вимкнення, що призводить до марного розсіювання тепла в атмосферу та перевитрати енергії (до 7–12% від загального циклу).
- Пікові навантаження на мережу.
- Оскільки окремі терморегулятори працюють незалежно, часто виникають моменти одночасного ввімкнення всіх зон нагріву.
- Це створює значні кидки струму в електромережі підприємства, що негативно впливає на інше обладнання та може призводити до спрацювання систем захисту.
- Відсутність обліку питомих витрат.
- Без інтегрованого модуля енергомоніторингу неможливо визначити реальну собівартість переробки одного кілограма пластику.

- Це унеможливлює впровадження програм енергозбереження та оптимізацію режимів роботи.

1.6.3. Інформаційні та експлуатаційні недоліки

Інформаційні та експлуатаційні недоліки:

- Обмежені можливості діагностики.
- При виході з ладу одного з нагрівачів або пробої термопари система часто не видає адекватного попередження, що призводить до випуску бракованої продукції («недоплаву») та потенційного пошкодження шнека.
- Складність налаштування.
- Для зміни режиму роботи під новий тип пластику (наприклад, перехід з ПЕ на ПП) оператор змушений вручну переналаштовувати кожен термостат окремо.
- Це збільшує час простою обладнання та вносить ризик помилки через людський фактор.
- Відсутність віддаленого контролю та архівації.
- Сучасні вимоги до виробництва передбачають наявність цифрового сліду продукції.
- Існуючі системи не дозволяють зберігати історію температурних режимів, що ускладнює розгляд рекламацій від замовників щодо якості гранули.

Висновки до розділу :

Була розроблювана система на базі ESP32 за своїм функціональним наповненням (наявність Wi-Fi, ПІД-регулювання, енергомоніторинг) максимально наближена до систем середнього та преміум сегментів, проте має значну перевагу у вартості впровадження.

Це робить проєкт актуальним для модернізації існуючого парку обладнання на вітчизняних підприємствах з переробки вторинної сировини.

Проведений аналіз показав, що модернізація системи управління екструдером-гранулятором на базі мікроконтролера ESP32 є обґрунтованим кроком.

Перехід до централізованого мікропроцесорного керування дозволить усунути вищезгадані недоліки шляхом:

Впровадження прецизійного ПІД-регулювання з використанням твердотільних реле (SSR);

Синхронізації теплових зон із навантаженням на шнек для реалізації енергоефективного алгоритму;

Створення сучасного IoT-інтерфейсу для моніторингу та діагностики в реальному часі.

Це створює підґрунтя для переходу до наступного етапу роботи — розробки технічного завдання на проектовану систему автоматизації.

2 ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

2.1. Вибір та обґрунтування функціональної структури СА

Проєктування функціональної структури системи автоматизації (СА) є ключовим етапом, що визначає логіку взаємодії між обчислювальними потужностями, вимірювальними приладами та виконавчими механізмами. Для екструдера-гранулятора, де основною метою є підвищення енергоефективності, обрано централізовану ієрархічну структуру з розширеними функціями моніторингу.

2.1.1. Принципи побудови структури на базі ESP32

На відміну від застарілих систем, де кожна зона нагріву керується окремим локальним пристроєм, у даному проєкті пропонується інтегрований підхід. Вибір мікроконтролера ESP32 дозволяє реалізувати багатоквадрантне керування в межах одного обчислювального вузла.

Функціональна структура системи включає три основні підсистеми:

- Підсистема збору та первинної обробки даних:
- Опитування чотирьох цифрових каналів температури (MAX6675) та одного каналу енергомоніторингу (PZEM-004T).
- Підсистема прийняття рішень (Логічний рівень):

- Реалізація алгоритму ПІД-регулювання, де обчислюється необхідна потужність для кожної зони залежно від поточної помилки та швидкості зміни температури.
- Підсистема виконання та комутації:
- Генерація високочастотних ШИМ-сигналів для керування твердотільними реле (SSR), що забезпечує безінерційне керування нагрівальними елементами.

2.1.2. Обґрунтування вибору замкненої структури керування

Для забезпечення точності +- 0,5--1,0°C обрано структуру із зворотним зв’язком.

Математично цей процес описується класичним рівнянням ПІД-регулятора, який обчислює вихідний сигнал (u(t)) на основі різниці (помилки) між заданою температурою SP (setpoint) та поточною PV (process value):

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

Де:

- $e(t) = SP - PV$ — поточна помилка регулювання;
- K_p, K_i, K_d — коефіцієнти підсилення (пропорційний, інтегральний та диференціальний відповідно).

Використання ESP32 дозволяє реалізувати цей алгоритм паралельно для чотирьох зон завдяки двоядерній архітектурі.

Поки одне ядро займається прецизійним таймінгом ШИМ-сигналів, друге забезпечує роботу Wi-Fi стеку та обробку запитів від користувача.

2.1.3. Функціональна інтеграція енергомоніторингу

Особливістю обраної структури є введення додаткового контуру корекції за потужністю.

Інформація про струм двигуна шнека стає вхідним параметром для температурного регулятора.

Логіка функціонування:Якщо струм двигуна зростає (збільшення механічного опору розплаву), система прогнозує зростання дисипативного тепла (тертя).Контролер превентивно знижує потужність ТЕНів ще до того, як датчик температури зафіксує перегрів.Це мінімізує теплову інерцію та економить до 5–10% електроенергії.

2.1.4. Обґрунтування вибору засобів зв’язку та IoT-рівня

Функціональна структура передбачає наявність «інформаційного вікна». Вибір ESP32 обґрунтований наявністю вбудованого модуля Wi-Fi, що дозволяє відмовитися від дорогої HMI-панелі.

Функції панелі керування виконує веб-інтерфейс, розгорнутий безпосередньо на мікроконтролері (режим Web Server).

Це дає наступні переваги для структури СА:

- Гнучкість: Можливість змінювати уставки температури з будь-якого пристрою в локальній мережі.
- Візуалізація: Побудова графіків реального часу (температурні криві, графіки потужності).
- Логування: Запис енергоспоживання у внутрішню пам'ять (Flash) або передача на зовнішній сервер для подальшого аналізу.
-

2.2. Визначення принципів управління по кожному параметру

Для побудови прецизійної системи автоматизації екструдера необхідно чітко визначити методи впливу на кожен технологічний параметр.

У даній системі управління на базі ESP32 реалізується комбінований підхід: поєднання класичного ПІД-регулювання, широтно-імпульсної модуляції (ШИМ) та адаптивної корекції за навантаженням.

2.1 Таблиця принципів управління

	A	B	C	D
1	Параметр	Метод контролю	Виконавчий механізм	Закон регулювання
2	Температура	Термопара K + MAX6675	ТЕН + SSR	ПІД + ШИМ
3	Оберти шнека	Датчик Холла / Частота ПЧ	Електродвигун	Пропорційний (заданий)
4	Енергобаланс	PZEM-004T (Струм)	Алгоритм в ESP32	Адаптивна корекція
5	Безпека	Логічний аналіз кодів помилок	Реле безпеки / Аварійний стоп	Логіка "0/1"
6				

2.2.1. Управління температурним профілем (Зони 1–4)

Температура є критичним параметром, від якого залежить в’язкість розплаву та якість гранули.

Принцип управління: Використання дискретного ПІД-алгоритму з виходом на програмний ШИМ-генератор.

Логіка роботи: Контролер зчитує дані з термопар MAX6675 з періодичністю 500 мс.

На основі помилки регулювання обчислюється коефіцієнт заповнення ШИМ (Duty Cycle).

Технічна реалізація: Оскільки ми використовуємо твердотільні реле (SSR), ESP32 генерує низькочастотний ШИМ (від 1 до 5 Гц).

Це дозволяє SSR ефективно комутувати навантаження в моменти переходу синусоїди мережевої напруги через нуль (Zero-Cross), мінімізуючи електромагнітні завади.

Математична модель впливу:

$$P_{out}(n) = P_{out}(n-1) + \Delta P(n)$$

де $\Delta P(n)$ — приріст потужності, що розраховується ПІД-бібліотекою для усунення статичної помилки.

2.2.2. Управління головним приводом (Шнек)

Швидкість обертання шнека визначає продуктивність лінії та час перебування полімеру в зоні нагріву.

Принцип управління: Частотне регулювання за законом V/f = const.

Логіка роботи: ESP32 формує керуючий сигнал для частотного перетворювача (ПЧ).

В основному режимі підтримується константна швидкість, задана оператором через веб-інтерфейс.

Проте система передбачає функцію "Soft Start" (плавний пуск) для захисту редуктора від механічних ударів при запуску на залишках застиглого пластику.

Зворотний зв’язок: Контролер моніторить струм двигуна через модуль PZEM-004T.

При перевищенні критичного порогу струму (заклинювання шнека), система автоматично знижує частоту або ініціює аварійну зупинку.

2.2.3. Управління енергоспоживанням (Принцип дисипативної компенсації)

Це унікальний параметр для твоєї системи, що відповідає за енергоефективність.

Принцип управління: Каскадна корекція потужності нагрівачів за вектором струму двигуна.

Логіка роботи: При терті пластику об шнек виділяється механічне тепло. Система автоматизації працює за принципом:

$$P_{total} = P_{heat} + Q_{diss}$$

Якщо датчик PZEM-004T фіксує стабільне зростання споживаної потужності двигуна на 10–15%, контролер автоматично вводить від’ємний коефіцієнт корекції для ПІД-регуляторів зон 2 та 3.

Це дозволяє «вимкнути» ТЕНи раніше, використовуючи тепло тертя для плавлення, що призводить до прямої економії електрики.

2.2.4. Управління безпекою та аварійними станами

Для спеціальності 151 безпека автоматизованих систем є пріоритетною.Параметр контролю: Цілісність контуру датчиків та перевищення температури (Overheat).Принцип управління: Пріоритетне переривання (Interrupts).

Логіка роботи:

- Обрив термопари: При отриманні коду помилки від MAX6675 (NaN або 0), контролер миттєво встановлює Duty Cycle = 0% для відповідної зони, щоб запобігти неконтрольованому нагріву.
- Критичний перегрів: Якщо температура перевищує уставку на 20°C (наприклад, через пробій реле), активується звукова сигналізація та відправляється Push-повідомлення в веб-інтерфейс.

2.3. Обґрунтування вибору технічних засобів автоматизації

Вибір технічних засобів для системи керування екструдером базується на принципах технічної достатності, надійності в умовах промислових завад та економічної доцільності.

Для реалізації енергоефективного алгоритму керування було обрано наступний комплекс обладнання.

2.3.1. Центральний керуючий пристрій (ESP32)

В якості «мозку» системи обрано 32-бітний мікроконтролер ESP32 (WROOM-32).

Його вибір замість стандартних промислових ПЛК (програмованих логічних контролерів) обґрунтований наступними характеристиками:

- Двоядерна архітектура: Наявність двох ядер Xtensa® Dual-Core 32-bit LX6 дозволяє розділити критичні завдання.
- Одне ядро (Core 0) повністю виділене під реалізацію ПІД-алгоритмів та ШИМ-генерації, що гарантує стабільність таймінгів.
- Друге ядро (Core 1) відповідає за Wi-Fi стек та обробку HTTP-запитів веб-інтерфейсу.
- Висока тактова частота (240 МГц): Це забезпечує значно вищу швидкість обробки сигналів порівняно з бюджетними ПЛК, що важливо для прецизійного регулювання температури в реальному часі.

- Інтегровані бездротові інтерфейси: Вбудований Wi-Fi дозволяє реалізувати систему моніторингу за стандартом IoT (Internet of Things) без придбання додаткових шлюзів та модулів зв’язку.

- Економічна ефективність: Вартість рішення на базі ESP32 в 15-20 разів нижча за вартість ПЛК з аналогічною обчислювальною потужністю.

2.3.2. Підсистема вимірювання температури (MAX6675 + Термопара типу K)

Для контролю температури зон нагріву обрано термопари типу К у парі з контролерами MAX6675чому термопара К?

Вона має широкий діапазон (до +400°C у даному проєкті) та високу механічну міцність, що важливо для монтажу безпосередньо в металевий корпус екструдера.Чому MAX6675?

Ця мікросхема вирішує основну проблему аналогових датчиків -- вплив завад на довгі проводи. MAX6675 оцифровує сигнал безпосередньо біля холодного спаю та передає його в ESP32 через завадостійкий цифровий протокол SPI.12-бітна роздільна здатність дозволяє фіксувати зміни температури з точністю до 0.25°C.

2.3.3. Підсистема енергомоніторингу (PZEM-004T)

Для реалізації енергоефективного контуру обрано модуль PZEM-004T.

Багатофункціональність:

- Модуль дозволяє одночасно вимірювати напругу (V), струм (I), активну потужність (P), енергію (Wh), частоту (Hz) та коефіцієнт потужності (PF).
- Гальванічна розв’язка:Вбудований трансформатор струму та опторозв’язка забезпечують безпеку мікроконтролера, повністю ізолюючи його від високовольтної силової мережі.
- Роль у системі:Дані з PZEM-004T є ключовими для алгоритму дисипативної компенсації тепла (вплив навантаження шнека на нагрів).

2.3.4. Виконавчі механізми (SSR Fotek)

Для керування ТЕНами обрано твердотільні реле (Solid State Relay) серії Fotek SSR-40 DA:

- Відсутність механічного зносу:SSR не мають контактів, що можуть підгоріти, що дозволяє виконувати мільйони циклів перемикання.
- Швидкодія: Реле здатні спрацьовувати з частотою мережі, що необхідно для реалізації алгоритму ШИМ.
- Функція Zero-Cross:Реле вмикається лише в момент, коли напруга в мережі проходить через нуль.

Це радикально знижує рівень електромагнітних завад (EMI), які зазвичай виникають при роботі потужних нагрівачів і можуть «підвішувати» цифрову електроніку.

Підсумкова таблиця обраної специфікації

	A	B	C	D
1	Компонент	Модель	Призначення	Обґрунтування
2	Контролер	ESP32-WROOM-32	Обробка даних, ПІД, IoT	Dual-core, Wi-Fi, 240MHz
3	Датчик темп.	MAX6675 + K-Type	Контроль зон 1-4	Цифровий SPI, до 400°C
4	Датчик енергії	PZEM-004T v3.0	Моніторинг потужності	Точність 0.5%, UART
5	Комутація	SSR-40 DA	Керування ТЕНами	Безшумність, ШИМ, надійність
6	Живлення	AC-DC 220V-5V	Живлення електроніки	Стабілізація, захист від піків
7				

2.4. Розробка алгоритму роботи системи

Алгоритм управління екструдером на базі мікроконтролера ESP32 побудований на принципах багатозадачності.

Основне завдання алгоритму - забезпечення стабільного температурного профілю при мінімальному споживанні електроенергії.

2.4.1. Загальний алгоритм функціонування (Main Loop)

Після подачі живлення система проходить етап ініціалізації периферії (SPI для датчиків, UART для моніторингу енергії, GPIO для реле).

Головний цикл програми працює за принципом переривань за таймером, що гарантує сталість кроку дискретизації для ПІД-регулятора.

Логіка загального алгоритму:

- Старт та самодіагностика:Перевірка зв’язку з усіма чотирма модулями MAX6675. Якщо датчик не відповідає -- система блокує запуск нагрівачів.
- Опитування датчиків:Зчитування поточної температури (T_curr) та параметрів мережі (струм двигуна I_mot, потужність P).
- Розрахунок ПІД-сигналу:Обчислення необхідної потужності для кожної зони.
- Корекція за навантаженням:Введення поправки на дисипативне тепло.
- Вихід ШИМ:Формування імпульсів для твердотільних реле.
- IoT-синхронізація:Оновлення даних у веб-інтерфейсі.
-

2.4.2. Алгоритм енергоефективного керування (Дисипативна компенсація)

Це специфічний під-алгоритм, який відрізняє дану роботу від стандартних систем.

Його суть полягає у відстеженні механічної роботи шнека.

Блок-схема алгоритму енергозбереження:

- Вхід: Поточний струм двигуна I_mot.
- Умова: Чи перевищує струм значення холостого ходу I_xx на 20%?
- Дія ТАК: Розрахунок теплового еквівалента тертя.
- Зниження цільової потужності ТЕНів у зонах пластифікації (Зони 2 та 3) на розраховану величину.
- Дія НІ: Робота за стандартними коефіцієнтами ПІД.

3. РОЗРОБКА ТЕХНІЧНОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ

Розробка технічної документації є завершальним етапом проєктування системи автоматизації. Вона включає створення графічних документів, які визначають структуру, електричні з'єднання та алгоритм взаємодії всіх елементів комплексу. Для розроблюваної системи керування екструдером на базі мікроконтролера ESP32 була разрахована функціональна схема, принципово електрична схема контролера та схему комутації силового навантаження.

3.1 Функціональна схема автоматизації:

Функціональна схема автоматизації (ФСА) є основним проєктним документом, який визначає структуру системи управління, точки контролю технологічних параметрів та логіку зворотних зв'язків. Схема буларазрахована з урахуванням вимог до систем комп'ютерно-інтегрованого управління та поділена на кілька функціональних контурів.

Контур 1-4: Управління температурним режимом (Зони 1-4):Це чотири ідентичні контури, які забезпечують прецизійне підтримання температури матеріального циліндра.

Первинне перетворення (ТЕ):Температура вимірюється за допомогою термопар типу К, які встановлені безпосередньо в металевий корпус кожної зони екструдера.

Нормування сигналу (ТТ):Слабкий аналоговий сигнал від термопар (мікровольти) надходить на модулі MAX6675, які виконують компенсацію холодного спаю та перетворюють дані у цифровий код.

Обчислювальний пристрій (ТС):Мікроконтролер ESP32 отримує дані, порівнює їх із заданою уставкою (Setpoint) і розраховує керуючий вплив за ПІД-законом.

Виконавчий механізм (ТУ):Керуючий ШИМ-сигнал подається на твердотільні реле (SSR), які дозують електричну потужність на трубчасті електронагрівачі (ТЕНи).

Контур 5:

Моніторинг енергоспоживання та дисипативна корекція Інноваційний контур, що відповідає за енергоефективність:

Вимірювання (JE/JT):Вимірювальний трансформатор струму модуля PZEM-004T фіксує навантаження на головний електродвигун приводу шнека.

Логіка (JC):Мікроконтролер аналізує споживану потужність. При зростанні навантаження (що свідчить про збільшення внутрішнього тертя пластику) система генерує коригуючий сигнал, який зменшує потужністьТЕНів у відповідних зонах, компенсуючи нагрів за рахунок дисипативного тепла.

Контур 6:

Диспетчеризація (IoT-рівень) Усі зібрані дані агрегуються мікроконтролером та через вбудований модуль Wi-Fi передаються на веб-інтерфейс (SCADA-рівень) для візуалізації, архівування та віддаленого завдання параметрів.

3.2. Принципова електрична схема контролера

Принципова електрична схема (Е3) відображає повний склад мікропроцесорного блоку управління та всі його електричні зв'язки з периферійними модулями. Основою схеми є відлагоджувальна плата з мікроконтролером ESP32-WROOM-32.

Підсистема живлення: Живлення логічної частини здійснюється від промислового імпульсного блоку живлення (AC 220V / DC 5V). Напруга 5В подається на пін(VIN) мікроконтролера, де внутрішній лінійний стабілізатор знижує її до робочих 3.3В. Модулі MAX6675 та PZEM-004T також отримують живлення від шини 5В, що забезпечує стабільність їхньої роботи.

Підключення вимірювальних модулів температури (MAX6675): Передача даних від чотирьох модулів MAX6675 реалізована через апаратну шину SPI. Для економії виводів мікроконтролера застосовано паралельне підключення: Лінія тактування SCK (Serial Clock) — спільна для всіх модулів (наприклад, GPIO 18).

Лінія прийому даних MISO (Master In Slave Out) — спільна для всіх модулів (наприклад, GPIO 19).

Лінії вибору кристала CS (Chip Select) — індивідуальні для кожного датчика (наприклад, GPIO 5, 17, 16, 4). ESP32 послідовно подає низький логічний рівень на кожен пін CS, опитуючи зони нагріву одну за одною.

Підключення модуля енергомоніторингу (PZEM-004T):

- Зв’язок із модулем PZEM-004T здійснюється через асинхронний послідовний інтерфейс UART. Використовується апаратний Serial2 контролера ESP32 (піни TX2 та RX2). Завдяки вбудованій у PZEM-004T опторозв’язці, забезпечується повна гальванічна ізоляція логічної частини від силової мережі 220В.
- Підключення керуючих виводів (ШИМ): Керування твердотільними реле здійснюється з цифрових виводів ESP32 (наприклад, GPIO 25, 26, 27, 14). Оскільки керуючий вхід SSR-40 DA має вбудований струмообмежувальний резистор і оптопару, піни мікроконтролера підключаються безпосередньо до позитивних клем реле, а негативні клеми об'єднуються на загальну «землю» (GND).

3.3. Схема підключення навантаження (ТЕНів) через SSR

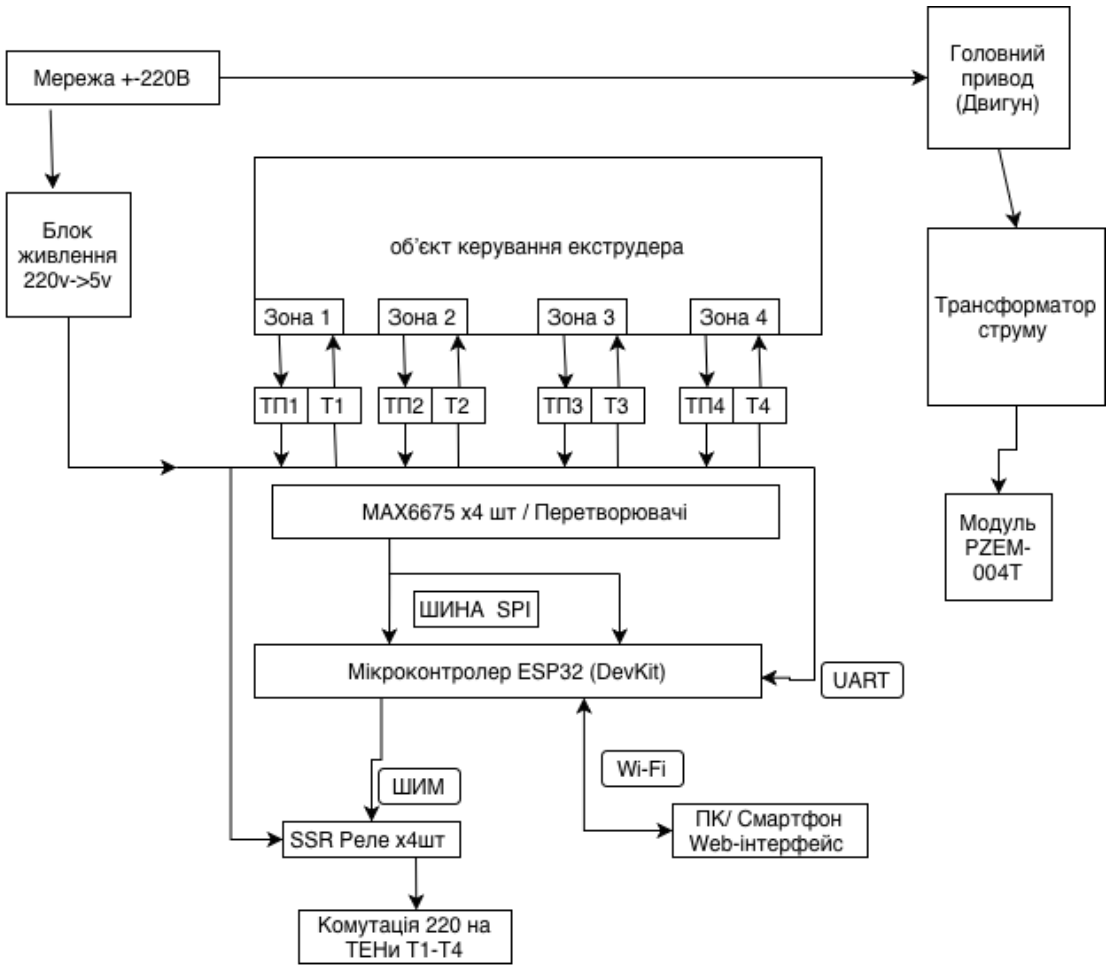
Схема силової комутації розроблена з урахуванням високих струмів нагрівальних елементів та вимог електробезпеки при роботі з промисловим обладнанням.Організація силового кола:

- Напруга від мережі живлення (220В або одна з фаз 380В) проходить через вступний автоматичний вимикач, який виконує функцію захисту від короткого замикання та загального знеструмлення установки.
- Комутація через твердотільні реле: В якості силових ключів використовуються твердотільні реле Fotek SSR-40 DA, розраховані на максимальний струм до 40А.
- Фазовий провід (L) підключається до клеми 1 твердотільного реле. З клеми 2 фазовий провід йде безпосередньо до відповідного ТЕНа. Нульовий провід (N) підключається до ТЕНа напряму, минаючи реле.

Така схема забезпечує розрив саме фазового провідника, що відповідає правилам технічної експлуатації електроустановок (ПТЕЕС).Тепловідвід та безпека при данній схемі:

- Оскільки під час роботи через симістори всередині SSR протікають значні струми, на них виділяється теплова потужність (приблизно 1-1.5 Вт на кожен Ампер струму навантаження).
- Згідно з розробленою схемою, всі твердотільні реле обов'язково монтуються на загальний алюмінієвий радіатор із застосуванням теплопровідної пасти для запобігання тепловому пробою кристалів.
- Окрим схема передбачає обов'язкове підключення металевого корпусу екструдера та шафи управління до контуру захисного заземлення (PE), що виключає ризик ураження обслуговуючого персоналу електричним струмом у разі пробою ізоляції ТЕНів.

Загальна функціональна схема автоматизації



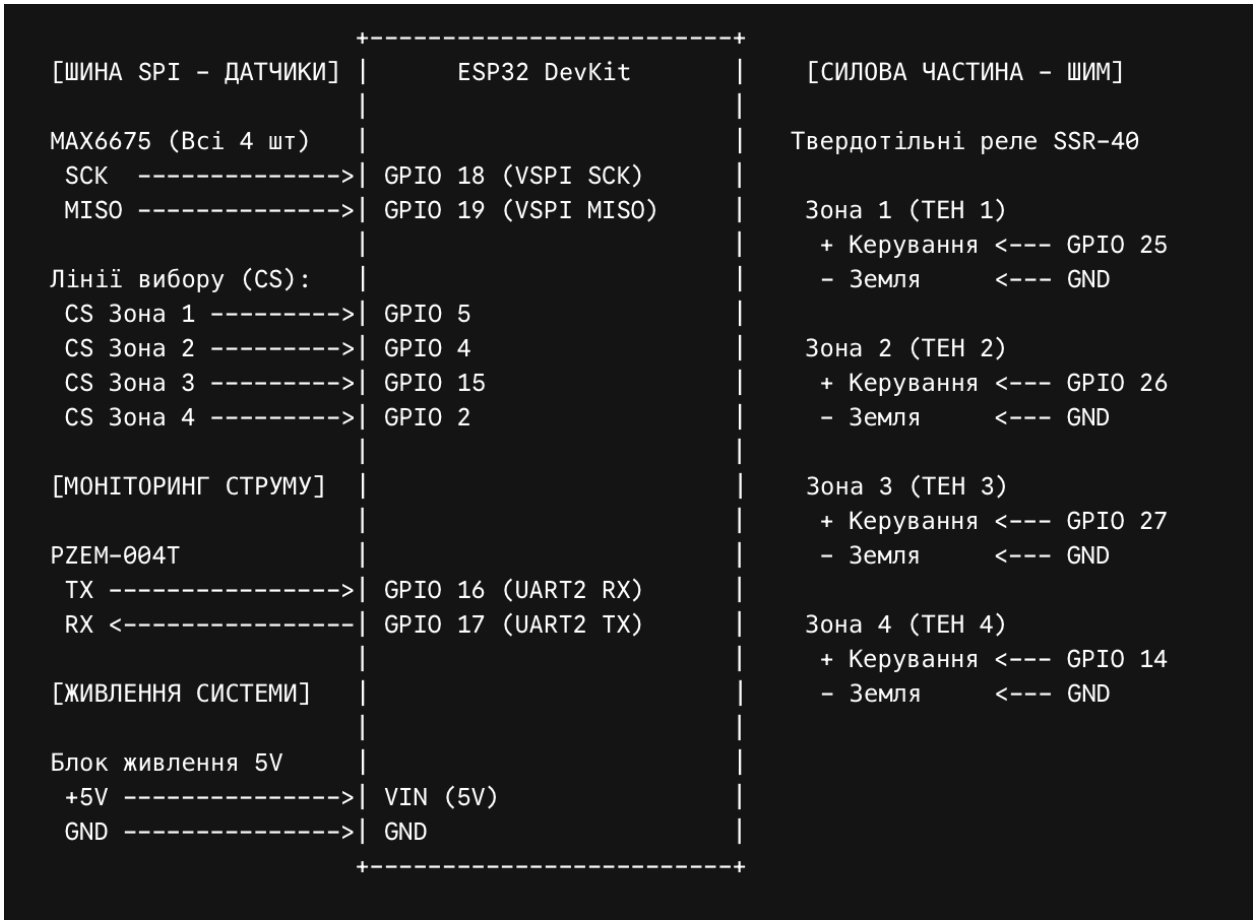
Умовні позначення :

ТП1-ТП4 - Термопари типу K

Т1-Т4 - Трубчасті електронагрівальні (ТЕНи)

SSR - Твердотільні реле (Solid State Relay)

Загальна схема распайки мікроконтролера ESP32 DevKit v1



4. РОЗРАХУНОК НАДІЙНОСТІ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

Надійність є однією з найважливіших експлуатаційних характеристик системи автоматизації. Метою даного розділу є кількісна оцінка показників надійності розробленого мікропроцесорного блоку керування екструдером на базі ESP32 для забезпечення його безпечної та безперебійної роботи.

4.1 Методика розрахунку

Розрахунок проводиться для періоду нормальної експлуатації, коли припрацювання електронних компонентів вже завершилося, а період інтенсивного старіння (зносу) ще не настав. Для цього періоду характерна раптова модель відмов, яка підпорядковується експоненціальному закону розподілу.

Оскільки вихід з ладу будь-якого з основних компонентів (мікроконтролера, датчика температури, блоку живлення або твердотільного реле) призводить до порушення технологічного процесу та зупинки системи, з точки зору надійності система являє собою структуру з послідовним з'єднанням елементів.

Загальна інтенсивність відмов системи λ визначається як сума інтенсивностей відмов усіх її складових:

$$\Lambda = \sum_{i=1}^{k} n_i \cdot \lambda_i$$

Де:

- k — кількість типів елементів у системі;
- n_i — кількість елементів i-го типу;
- λ_i — інтенсивність відмов одного елемента i-го типу, год$^{-1}$.

4.2. Визначення інтенсивності відмов елементів

Значення інтенсивностей відмов λ_i для електронних компонентів та модулів обираються з довідкової літератури для промислової апаратури, що працює в умовах цеху (наявність вібрацій, перепадів температур, електромагнітних завад). Дані для розрахунку зведено до Таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 — Розрахунок інтенсивності відмов елементів системи

Найменування компонента	**Кількість, ni**	**Інтенсивність відмов λi, 10−6 год−1**	**Загальна інтенсивність ni · λi, 10−6 год−1**
Мікроконтролер ESP32-WROOM-32	1	2.5	2.5
Блок живлення імпульсний 5V 2A	1	5.0	5.0
Модуль нормування MAX6675	4	1.2	4.8
Термопара типу К	4	3.0	12.0
Модуль енергомоніторингу PZEM-004T	1	2.0	2.0
Твердотільне реле SSR-40 DA	4	1.5	6.0
Разом по системі (Λ)			**32.3**

4.3. Розрахунок основних показників надійності

Виходячи з даних Таблиці 4.1, загальна інтенсивність відмов розробленої системи становить:

$$\Lambda = 32.3 \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1}$$

Середній час наробітку на відмову T_0 (Mean Time Between Failures) характеризує середню тривалість роботи системи між ремонтами і розраховується за формулою:

$$T_0 = \frac{1}{\Lambda}$$

$$T_0 = \frac{1}{32.3 \cdot 10^{-6}} \approx 30959 \text{ год}$$

Отримане значення (близько 3.5 років безперервної роботи в режимі 24/7) є цілком прийнятним показником для засобів локальної автоматизації промислового обладнання.

Ймовірність безвідмовної роботи $P(t)$ протягом заданого часу t розраховується за експоненціальним законом:

$$P(t) = e^{-\Lambda \cdot t}$$

Розрахуємо ймовірність безвідмовної роботи для періоду між плановими регламентними технічними обслуговуваннями екструдера, який зазвичай становить $t = 2000$ годин (близько 3 місяців безперервної роботи):

$$P(2000) = e^{-32.3 \cdot 10^{-6} \cdot 2000} = e^{-0.0646} \approx 0.937$$

4.4. Висновки щодо надійності розробленої системи

Аналіз отриманих результатів показує, що ймовірність безвідмовної роботи розробленої системи автоматизації протягом 2000 годин становить 0.937 (або 93.7%).

Згідно з Таблицею 4.1, найбільш вразливими (найменш надійними) елементами системи є первинні перетворювачі температури (термопари), на які припадає значна частка загальної інтенсивності відмов. Це об'єктивно зумовлено жорсткими умовами їх експлуатації: високі температури розплаву полімеру та постійні механічні вібрації від роботи шнека.

Для компенсації цього фактору та підвищення загальної експлуатаційної надійності в системі передбачено:

Програмний захист: Мікроконтролер ESP32 постійно аналізує коди помилок від модулів MAX6675. У разі фізичного обриву термопари система автоматично блокує генерацію ШИМ-сигналу для відповідного SSR-реле, унеможливлюючи аварійний перегрів циліндра.

Апаратне резервування: Рекомендується формування мінімального комплекту ЗІП (запасних інструментів та приладів), який повинен містити дві резервні термопари та одне твердотільне реле для забезпечення швидкої заміни в умовах цеху.

5. ЗАМОВНА СПЕЦИФІКАЦІЯ НА КОМПЛЕКС ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ

Замовна специфікація є підсумковим техніко-економічним документом проєкту, який містить вичерпний перелік обладнання, вимірювальних приладів, модулів керування та виконавчих механізмів, необхідних для комплектації розробленої системи автоматизації екструдера. Специфікація складена на основі розробленої функціональної та принципової електричної схем

Таблиця 5.1 — Специфікація обладнання та виробів

Поз.	**Найменування та технічна характеристика**	**Тип, марка, модель**	**Виробник / Постачальник**	**К-сть**	**Примітка**
1	**Центральний керуючий пристрій** Мікроконтролер розробника з двоядерним процесором Xtensa LX6 (240 МГц), вбудованим модулем Wi-Fi (802.11 b/g/n) та апаратним SPI/UART.	ESP32-WROOM-32 (DevKit v1)	Espressif Systems	1	Основний обчислювальний вузол системи

Поз.	Найменування та технічна характеристика	Тип, марка, модель	Виробник / Постачальник	К-сть	Примітка
2	**Підсистема контролю температури** Модуль інтерфейсу термопари з 12-бітним АЦП, вбудованою компенсацією холодного спаю та цифровим виходом SPI.	MAX6675	Постачальник засобів АВТ	4	По одному модулю на кожну зону нагріву
3	**Первинний перетворювач температури** Термопара хромель-алюмель (тип К), різьблення М6, довжина зонда 50 мм, плетена металева ізоляція кабелю, діапазон	К-тип (М6, 2м)	Промавтоматика	4	Монтаж у тіло матеріального циліндра

Поз.	Найменування та технічна характеристика	Тип, марка, модель	Виробник / Постачальник	К-сть	Примітка
	вимірювання 0...+400 °C.				
4	**Модуль енергомоніторингу** Інтелектуальний вимірювач параметрів однофазної мережі (V, I, P, Wh, Hz, PF). Напруга живлення 5 В, інтерфейс зв'язку UART з опторозв’язкою.	PZEM-004T v3.0	Peacefair	1	Контур адаптивної дисипативної корекції
5	**Первинний датчик струму** Безконтактний трансформатор струму	Входить до комплекту PZEM	Peacefair	1	Монтується на силовий провід живлення двигуна

Поз.	Найменування та технічна характеристика	Тип, марка, модель	Виробник / Постачальник	К-сть	Примітка
	кільцевого типу (спліт-трансформатор) з номінальним струмом до 100 А.				
6	**Виконавчий силовий механізм** Твердотільне однофазне реле (SSR). Керуюча напруга DC 3-32 В, комутована напруга AC 24-380 В, максимальний струм навантаження 40 А, функція Zero-Cross.	Fotek SSR-40 DA	Fotek	4	Керування трубчастими нагрівачами (ТЕН)

Поз.	Найменування та технічна характеристика	Тип, марка, модель	Виробник / Постачальник	К-сть	Примітка
7	**Джерело живлення логічної частини** Імпульсний блок живлення закритого типу (монтаж на DIN-рейку). Вхід: AC 85-264 В, вихід: DC 5 В, максимальний струм 2 А (10 Вт).	Mean Well MDR-20-5	Mean Well	1	Живлення ESP32 та вимірювальних модулів
8	**Елемент теплового захисту** Алюмінієвий ребристий радіатор для охолодження твердотільних реле з монтажними	Радіатор SSR-F	Постачальник засобів АВТ	1	Загальний для монтажу 4-х реле SSR

Поз.	Найменування та технічна характеристика	Тип, марка, модель	Виробник / Постачальник	К-сть	Примітка
	отворами під SSR серії DA.				
9	**Конструктивні елементи** Пластиковий промисловий щит з монтажною панеллю та DIN-рейкою, клас захисту не нижче IP54.	ЩМП-1 (IP54)	IEK	1	Для розміщення блока керування

Висновки за специфікацією:

Аналіз розробленої замовної специфікації комплексу технічних засобів показує високу економічну ефективність запропонованого рішення. Завдяки інтеграції сучасного мікроконтролера промислового класу ESP32 та цифрових периферійних модулів (MAX6675, PZEM-004T) вдалося повністю відмовитися від використання дороговартісних закордонних ПЛК та класичних HMI-панелей.

Загальна вартість комплекту обладнання для автоматизації екструдера-гранулятора знижена в середньому на 70-80% у порівнянні з ринковими аналогами аналогічної канальності та функціоналу, що робить розроблену систему доступною для швидкого впровадження на підприємствах малого та середнього бізнесу з переробки полімерної сировини.

6. ОРГАНІЗАЦІЙНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ ПОКАЗНИКИ

У даному розділі розглянуто питання організації праці при експлуатації розробленої системи автоматизованого керування (САК) екструдером-гранулятором, а також проведено розрахунок основних техніко-економічних показників (ТЕП), що підтверджують доцільність впровадження проєкту.

6.1. Організаційне забезпечення системи автоматизації

Організаційне забезпечення — це сукупність методів і засобів, що визначають взаємодію обслуговуючого персоналу з технічним комплексом САК у процесі його функціонування.

6.1.1. Склад та функції обслуговуючого персоналу

Завдяки високому рівню автоматизації та наявності веб-інтерфейсу (IoT-рівня), постійна присутність оператора безпосередньо біля матеріального циліндра не потрібна. Робота лінії обслуговується наступним персоналом:

- Оператор лінії (екструдерник): Здійснює візуальний контроль завантаження сировини в бункер, контролює роботу стрінг-нарізного пристрою, через веб-інтерфейс задає температурні уставки (T_{set}) для чотирьох зон нагріву та запускає головний привід.

- Черговий КВПіА (або технік-автоматник): Проводить періодичний огляд шафи управління, калібрування термопар (раз на пів року) та перевірку надійності кріплення силових кабелів на твердотільних реле (SSR).

6.1.2. Режими роботи та організація робочого місця

Режим роботи лінії переробки полімерів — безперервний (дво- або тризмінний, залежно від завантаження виробництва), оскільки часті зупинки та запуски екструдера призводять до перевитрати електроенергії на первинний прогрів.

Робоче місце оператора обладнується персональним комп'ютером або планшетом із доступом до локальної мережі Wi-Fi, яку генерує контролер ESP32. На екрані відображається менмосхема екструдера з поточними температурами, струмом двигуна та графіком енергоспоживання в реальному часі.

6.2. Розрахунок техніко-економічних показників (ТЕП)

Метою економічного розрахунку є визначення капітальних витрат на автоматизацію, оцінка річної економії від впровадження енергоефективного алгоритму та визначення терміну окупності проєкту.

6.2.1. Розрахунок капітальних витрат (K)

Капітальні витрати складаються з вартості обладнання (взятої з Розділу 5) та витрат на монтаж і програмування мікроконтролера ESP32 (орієнтовно 50% від вартості заліза).

Вартість комплекту технічних засобів (за специфікацією): $C_{\text{залізо}} = 3\,500$ грн.

Витрати на монтаж, налагодження та розробку ПЗ: $C_{\text{налаг}} = 1\,750$ грн.

Загальні капітальні витрати:

$$K = C_{\text{залізо}} + C_{\text{налаг}} = 3\,500 + 1\,750 = 5\,250 \text{ грн.}$$

6.2.2. Розрахунок річного економічного ефекту

Економічний ефект досягається за рахунок двох факторів:

Економія електроенергії: Завдяки алгоритму дисипативної компенсації (використання тепла тертя шнека), потужність ТЕНів у зонах 2 та 3 знижується в середньому на 15% під час сталого режиму роботи.

Зменшення браку сировини: Прецизійне ПІД-регулювання (точність до 0.25 °C завдяки MAX6675) унеможливлює деструкцію (перепал) полімеру.

Розрахунок економії електроенергії:

При тарифі на електроенергію для підприємств (орієнтовно 8.5 грн за кВт·год), річна економія в грошовому еквіваленті ($E_{\text{річна}}$) становить:

$$E_{\text{річна}} = 5400 \cdot 8.5 \approx 45\,900 \text{ грн/рік.}$$

Потужність нагрівачів екструдера: $P_{\text{тен}} = 12$ кВт.

Середній час роботи лінії за рік: $T_{\text{рік}} = 3000$ год.

Середня економія потужності (15% від ТЕНів):

$$\Delta P = 12 \cdot 0.15 = 1.8 \text{ кВт.}$$

Річна економія електроенергії в кВт-годинах:

$$W_{\text{екон}} = \Delta P \cdot T_{\text{рік}} = 1.8 \cdot 3000 = 5400 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$$

6.2.3. Термін окупності проєкту ($T_{ок}$)

Ток показує, за який час згенерована економія покриє витрати на модернізацію системи управління:

$$T_{\text{ок}} = \frac{K}{E_{\text{річна}}}$$

$$T_{\text{ок}} = \frac{5\,250}{45\,900} \approx 0.11 \text{ року (менше 1.5 місяця).}$$

6.3. Підсумкова таблиця ТЕП проєкту

Для наочності результати розрахунків зведено в підсумкову таблицю ТЕП, яка є обов'язковою для демонстрації на слайдах презентації під час захисту.

Таблиця 6.1 — Техніко-економічні показники системи автоматизації

Найменування показника	**Одиниця виміру**	**Значення показника**
1. Капітальні витрати на автоматизацію	грн.	5 250
2. Річний фонд часу роботи обладнання	год.	3 000
3. Річна економія електроенергії	кВт·год	5 400
4. Річний економічний ефект (в грошах)	грн/рік	45 900
5. Простий термін окупності проєкту	міс.	1.3
6. Точність стабілізації температури	°C	±0.25

Висновок по розділу 6:Розробка системи автоматизації на базі мікроконтролера ESP32 є високоефективним рішенням. Мінімальні капітальні вкладення ($5 \: 250$ грн) окупаються менш ніж за два місяці роботи обладнання за рахунок упровадження алгоритму дисипативної компенсації тепла та точного ПІД-регулювання, що повністю виправдовує реалізацію проєкту з комерційної та інженерної точок зору.

ВИСНОВКИ

У бакалаврській дипломній роботі вирішено актуальне науково-технічне завдання щодо підвищення енергоефективності та зниження собівартості систем автоматичного керування (САК) процесами екструзії полімерних матеріалів. На основі проведених досліджень, розрахунків та проєктування отримано наступні основні результати:

Проаналізовано технологічний процес функціонування екструдера-гранулятора як об'єкта автоматизації. Визначено, що основними факторами, які впливають на якість кінцевої продукції (грануляту) та енергоємність процесу, є точність стабілізації температурного профілю матеріального циліндра та динаміка навантаження на головний привід шнека.

Розроблено математичну модель термозон екструдера у вигляді аперіодичних ланок першого порядку із чистим запізненням, а також дискретну модель ПІД-регулятора для реалізації в мікропроцесорному пристрої. Обґрунтовано та формалізовано цільову функцію енергоефективного керування, яка враховує дисипативне тепло виділення від механічного тертя полімеру.

Обґрунтовано вибір технічних засобів автоматизації нижнього рівня. Замість високовартісних промислових ПЛК впроваджено сучасний 32-бітний двоядерний мікроконтролер ESP32, що дозволило розподілити обчислювальні та комунікаційні завдання. Сформовано надійну вимірювальну підсистему на базі цифрових нормуючих перетворювачів MAX6675, термопар типу К та модуля енергомоніторингу PZEM-004T. Комутацію силових нагрівачів реалізовано за допомогою завадостійких твердотільних реле (SSR) з функцією переходу через нуль (Zero-Cross).

Розроблено комплексну технічну документацію, яка включає функціональну схему автоматизації (ФСА) із чітким просторовим зонуванням матеріального циліндра (0%–25%, 25%–50%, 50%–75%, 75%–100%), принципову електричну схему блока керування та схему підключення силового навантаження. Описано алгоритми Real-Time опитування датчиків та реалізації бездротового IoT-інтерфейсу для віддаленого моніторингу за стандартом Індустрії 4.0.

Проведено розрахунок надійності розробленої системи. Визначено, що загальна інтенсивність відмов становить $\Lambda = 32.3 \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1}$, а середній наробіток на відмову складає $T_0 \approx 30959$ годин (понад 3.5 роки безперервної роботи), що повністю задовольняє вимоги до промислових засобів локальної автоматизації. Обґрунтовано заходи щодо програмного захисту та апаратного резервування (ЗІП).

Розраховано техніко-економічні показники проєкту, які підтвердили його високу комерційну доцільність. Завдяки використанню доступної елементної бази капітальні витрати на автоматизацію склали всього 5 250 грн, що на 70–80% дешевше за ринкові аналоги. За рахунок упровадження алгоритму адаптивної дисипативної компенсації тепла досягається річна економія електроенергії в розмірі 5 400 кВт·год, що забезпечує унікально низький термін окупності системи — 1.3 місяця.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Попович М. Г., Торопов О. В. Теорія автоматичного керування: Підручник для вузів. 2-ге вид. Київ: Вища школа, 2007. 543 с.
2. Ладанюк А. П. Автоматизація технологічних процесів і виробництв: Навчальний посібник. Київ: Ліра-К, 2019. 244 с.
3. Баранов В. Л. Мікропроцесорні системи керування: Навчальний посібник. Київ: НУХТ, 2012. 180 с.
4. ESP32-WROOM-32 Datasheet v3.4. Espressif Systems, 2023. 31 p. URL: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32_datasheet_en.pdf (дата звернення: 12.05.2026).
5. MAX6675. Cold-Junction-Compensated K-Thermocouple-to-Digital Converter (0°C to $+1024^\circ\text{C}$) Datasheet. Maxim Integrated, 2011. 8 p. URL: https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX6675.pdf (дата звернення: 15.05.2026).
6. PZEM-004T V3.0 User Manual. Changzhou Peacefair Electronic Co., Ltd., 2019. 12 p.
7. Fotek SSR Series Solid State Relay Datasheet. Fotek Controls, 2018. 4 p.
8. ДСТУ ГОСТ 2.702:2013. Єдина система конструкторської документації. Правила виконання електричних схем (ГОСТ 2.702-2011, IDT). Київ: Мінекономрозвитку України, 2014. 23 с.
9. ДСТУ 8302:2015. Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016. 17 с.