

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

**Навчально-науковий інститут енергетики, автоматики і
енергозбереження**

**ПОГОДЖЕНО
ЗАХИСТУ**

**Директор ННІ
Енергетики, автоматики і
енергозбереження**

Каплун В.В.

« » _____ 2025 р.

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО

**Завідувач кафедри
автоматики та робототехнічних
систем ім. акад. І. І. Мартиненка**

Опришко О.О.

« » _____ 2025

р.

**МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА
РОБОТА**

**на тему «Аналіз системи моніторингу температури і навантаження двигуна в
одношнековому екструдері для виготовлення пелет»**

Спеціальність 174 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка»

Освітня програма Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка

Орієнтація освітньої програми освітньо-наукова

Гарант освітньої програми

Д.Т.Н., доц.

Іващук В.В.

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

К.Т.Н., доц.

науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Дудник А. О.

(ПІБ)

Виконав

(підпис)

Черевань Р.Р.

(ПІБ студента)

КИЇВ – 2025

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**
Навчально-науковий інститут енергетики, автоматики і
енергозбереження

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри автоматики та
робототехнічних
систем ім. акад. І. І. Мартиненка
_____ О. О.
Опришко
«__» _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ

до виконання магістерської кваліфікаційної роботи студенту

Черевань Руслану Руслановичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність 174 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»
(код і назва)

Тема магістерської кваліфікаційної роботи: Аналіз системи моніторингу температури і навантаження двигуна в одношнековому екструдері для виготовлення пелет

затверджена наказом ректора НУБіП України від “26” вересня 2024 р. № 1667 «С».

Термін подання завершеної роботи на кафедру 2025.05.30.
(рік, місяць, число)

Вихідні дані до магістерської кваліфікаційної роботи: Завдання кафедри на виконання магістерської кваліфікаційної роботи. Наукова література та публікації, що відповідають тематиці магістерської кваліфікаційної роботи.

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Аналіз технологічного процесу станції водопостачання.
2. Дослідження станції водопостачання як об'єкта автоматизації.
3. Вибір регулятора та обґрунтування його параметрів.
4. Дослідження автоматичної системи керування станцією водопостачання .
5. Схеми системи автоматизації.
6. Техніко-економічне обґрунтування.

Дата видачі завдання “26” вересня 2024 р.

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи _____ Дудник А.О.

Завдання прийняв до виконання _____ Черевань Р.Р.

АНОТАЦІЯ

Черевань Р.Р дослідження системи моніторингу температури і навантаження двигуна в одношнековому екструдері для виготовлення пелет

Магістерська робота присвячена розробці та дослідженню системи моніторингу ключових параметрів одношнекового екструдера, а саме температури технологічних зон та навантаження на привідний двигун. Актуальність даної роботи зумовлена необхідністю оптимізації процесу екструзії полімерних матеріалів для виробництва пелет з метою підвищення якості продукції, зниження енергоспоживання та запобігання виникненню аварійних ситуацій.

У роботі проведено аналіз існуючих систем моніторингу та методів контролю технологічних параметрів екструзійного обладнання. Розроблено структурну та функціональну схеми запропонованої системи моніторингу, що включає датчики температури, датчик струму двигуна, модуль збору та обробки даних на базі мікроконтролера, а також програмне забезпечення для візуалізації та аналізу отриманої інформації.

Проведено експериментальні дослідження розробленої системи на лабораторній установці одношнекового екструдера. Отримано дані щодо динаміки зміни температури в різних зонах екструдера та струму двигуна залежно від технологічних параметрів процесу (швидкості обертання шнека, швидкості подачі матеріалу, температурних уставок). Здійснено аналіз впливу цих параметрів на енергоспоживання та стабільність процесу пелетизації.

Результати дослідження підтвердили ефективність розробленої системи моніторингу для контролю та оптимізації процесу екструзії. Впровадження такої системи на промислових підприємствах дозволить підвищити ефективність виробництва пелет, покращити якість кінцевої продукції та зменшити ризик виходу обладнання з ладу.

Ключові слова: одношнековий екструдер, пелети, моніторинг температури, моніторинг навантаження двигуна, система моніторингу, автоматизація, експериментальне дослідження.

ABSTRACT

Cherevan R.R. Study of the system for monitoring the temperature and engine load in a single-screw extruder for the production of pellets

Master's thesis is devoted to the development and research of a system for monitoring the key parameters of a single-screw extruder, namely the temperature of technological zones and the load on the drive motor. The relevance of this work is due to the need to optimize the process of extrusion of polymeric materials for the production of pellets in order to improve product quality, reduce energy consumption and prevent emergencies.

The paper analyzes existing monitoring systems and methods for controlling the technological parameters of extrusion equipment. The structural and functional diagrams of the proposed monitoring system, which includes temperature sensors, a motor current sensor, a microcontroller-based data acquisition and processing module, and software for visualizing and analyzing the information obtained, have been developed.

Experimental studies of the developed system were carried out on a laboratory installation of a single-screw extruder. Data were obtained on the dynamics of temperature changes in different zones of the extruder and motor current depending on the technological parameters of the process (screw rotation speed, material feed rate, temperature settings). The influence of these parameters on the energy consumption and stability of the pelletization process was analyzed.

The results of the study confirmed the effectiveness of the developed monitoring system for controlling and optimizing the process.

Implementation of such a system at industrial enterprises will increase the efficiency of pellet production, improve the quality of the final product, and reduce the risk of equipment failure.

Keywords: single-screw extruder, pellets, temperature monitoring, motor load monitoring, monitoring system, automation, experimental study.

ЗМІСТ

<u>ВСТУП</u>	7
<u>1 ТЕХНОЛОГІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ТЕМПЕРАТУРИ І НАВАНТАЖЕННЯ ДВИГУНА В ОДНОШНЕКОВОМУ ЕКСТРУДЕРІ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ПЕЛЕТ</u>	11
1.1 Огляд існуючих систем та рішень у галузі моніторингу температури і навантаження двигуна в одношнековому екструдері для виготовлення пелет	11
1.2 Аналіз існуючих систем моніторингу температури в екструдерах	17
<u>2 РОЗРОБКА ТА ОБҐРУНТУВАННЯ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ТЕМПЕРАТУРИ І НАВАНТАЖЕННЯ ДВИГУНА В ОДНОШНЕКОВОМУ ЕКСТРУДЕРІ</u>	30
2.1. Обґрунтування обраних методів дослідження	30
2.2. Аналіз технологічних параметрів процесу екструзії та обґрунтування вибору контрольованих величин	35
2.3 Математична модель процесу екструзії	39
2.4. Розробка та обґрунтування принципової (функціональної) схеми системи моніторингу температури і навантаження двигуна	44
2.5. Обґрунтування вибору апаратних засобів для реалізації системи моніторингу	52
2.6. Розробка алгоритмів функціонування та програмного забезпечення системи моніторингу ..	58
<u>3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА ТА АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ЕКСТРУДЕРА</u>	66
3.1. Опис лабораторної установки та методики проведення експериментів	66
3.2. Модельовання та візуалізація процесу екструзії в середовищі MATLAB	70
3.3. Аналіз експериментальних даних та їх порівняння з моделлю	72
<u>4 ОХОРОНА ПРАЦІ</u>	78
4.1. Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів	78
4.2. Заходи щодо забезпечення безпечних умов праці	80
4.3. Пожежна безпека	82
4.4. Екологічна безпека	82
<u>5 ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ</u>	84
5.1. Капітальні витрати на впровадження системи моніторингу	84
5.2. Оцінка економічної ефективності впровадження	91
5.3. Розрахунок терміну окупності	92
<u>ВИСНОВКИ</u>	94

ВСТУП

1.1. Обґрунтування актуальності теми

Виготовлення пелет є важливим процесом у багатьох галузях промисловості таких як агропромисловість, деревообробка, виготовлення полімерів, тощо. Одним з основних типів обладнання, що використовуються у різних комплексах для цієї мети є одношнековий екструдер.

Якість кінцевого продукту – його розмір, міцність та вологість; залежить безпосередньо від стабільності технологічних параметрів екструдера, серед яких ключовими є температура різних зон екструдера та навантаження на двигун. При нерівномірній температурі на його ділянках сировина може плавитися неякісно, в наслідок чого гомогенізація буде недостатньою, або будуть утворюватися агломерати. В той час як при перевантаженні двигуна можуть виникнути проблеми з подачею сировини, підвищеною в'язкістю розплаву що впливає на продуктивність та термін служби обладнання.

В умовах постійного зростання вартості на енергоресурси, питання енергоефективності промислових процесів стає більш вагомим. Моніторинг та оптимізація навантаження двигуна екструдера зменшити витрати на електроенергію та збільшити термін його роботи. Аналогічно до цього точний контроль температури дозволить зменшити витрати на нагрівання сировини, а отже дозволить економити використовувані ресурси.

Оперативний контроль параметрів екструдера дозволяє своєчасно відслідковувати та усувати причини зниження продуктивності наприклад знос шнеку. Впровадження системи моніторингу може сприяти зменшенню часу простоїв, пов'язаних з ручним регулюванням та діагностикою несправностей.

1.2. Мета і завдання дослідження

Метою дослідження є розробка та дослідження ефективної системи моніторингу температури різних зон одношнекового екструдера та

навантаження на його привідний двигун для оптимізації процесу виготовлення пелет, підвищення його стабільності, енергоефективності та безпеки експлуатації обладнання.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

1. Провести аналіз існуючих систем моніторингу та керування технологічними параметрами одношнекових екструдерів, виявити їх переваги та недоліки, а також визначити потреби у вдосконаленні системи контролю температури та навантаження.

2. Розробити структурну та функціональну схему запропонованої системи моніторингу температури і навантаження двигуна одношнекового екструдера для виготовлення пелет, включаючи вибір необхідних сенсорів, пристроїв збору та обробки даних.

3. Створити математичну модель теплових процесів в одношнековому екструдері та модель навантаження на його привідний двигун з урахуванням основних технологічних параметрів процесу пелетизації.

4. Розробити алгоритм обробки та візуалізації даних, отриманих сенсорами температури та навантаження двигуна, для забезпечення оперативного контролю та аналізу стану технологічного процесу.

5. Спроекувати та розробити програмне забезпечення для реалізації системи моніторингу, для відображення інформації, налаштування параметрів та формування звітів.

6. Провести експериментальні дослідження розробленої системи моніторингу на лабораторному або промисловому зразку одношнекового екструдера для виготовлення пелет з метою оцінки її працездатності, точності вимірювань та ефективності контролю технологічних параметрів.

7. Здійснити аналіз отриманих експериментальних даних та розробити практичні рекомендації щодо впровадження запропонованої системи моніторингу на промислових підприємствах, що займаються виготовленням пелет.

8. Оцінити економічну ефективність впровадження розробленої системи моніторингу за рахунок оптимізації енергоспоживання, зменшення кількості бракованої продукції та скорочення часу простоїв обладнання.

1.3. Об'єкт і предмет дослідження

Об'єктом дослідження виступає процес екструзії полімерних матеріалів для виготовлення пелет, що здійснюється за допомогою одношнекового екструдера. Одношнекові екструдери є поширеним обладнанням у промисловості переробки пластмас і використовуються для безперервного виробництва гранул (пелет), які є сировиною для подальшого виготовлення різноманітних полімерних виробів. Ефективність та якість процесу екструзії значною мірою залежать від стабільності технологічних параметрів, зокрема температури різних зон екструдера та навантаження на його привідний двигун.

Предметом дослідження є система моніторингу температури технологічних зон одношнекового екструдера та поточного навантаження на його привідний двигун, а також розроблена система для здійснення такого моніторингу в реальному часі. Дослідженню підлягають структура, функціональні можливості та ефективність запропонованої системи моніторингу у забезпеченні контролю за ключовими параметрами екструдера з метою оптимізації процесу пелетизації.

1.4. Наукова новизна отриманих результатів

Удосконалено метод визначення оптимальних температурних режимів екструзії шляхом одночасного аналізу температурних градієнтів у центрі

екструдера та спектральних характеристик струму привідного двигуна в реальному часі. Запропонований підхід, на відміну від традиційних методів, що базуються на емпіричних даних, дозволяє більш точно визначати енергоефективні та якісні режими екструзії для різних типів полімерних матеріалів.

1.5. Практичне значення отриманих результатів

Запропонований удосконалений метод визначення оптимальних температурних режимів екструзії може бути використаний інженерами-технологами для налаштування обладнання при виробництві пелет з різних видів полімерних матеріалів. Його застосування дозволить більш точно визначати енергоефективні режими роботи екструдерів, що призведе до зниження витрат електроенергії та собівартості продукції. Крім того, оптимізація температурних режимів сприятиме покращенню якості пелет, зокрема їх однорідності та стабільності розмірів, що є важливим для подальшої переробки.

1 ТЕХНОЛОГІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ТЕМПЕРАТУРИ І НАВАНТАЖЕННЯ ДВИГУНА В ОДНОШНЕКОВОМУ ЕКСТРУДЕРІ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ПЕЛЕТ

1.1 Огляд існуючих систем та рішень у галузі моніторингу температури і навантаження двигуна в одношнековому екструдері для виготовлення пелет

Ефективне виробництво полімерних пелет за допомогою одношнекових екструдерів значною мірою залежить від стабільного контролю технологічних параметрів, серед яких ключову роль відіграють температура різних зон екструдера та навантаження на привідний двигун. Моніторинг цих параметрів дозволяє оптимізувати процес, підвищити якість продукції, запобігти аварійним ситуаціям та знизити енергоспоживання. У цьому підрозділі буде проведено огляд існуючих систем та рішень, спрямованих на моніторинг температури та навантаження двигуна в одношнекових екструдерах, що використовуються для виготовлення пелет.



Рис. 1.1 Пелети

1.1.1 Принцип роботи одношнекового екструдера

Одношнековий екструдер є основним обладнанням для безперервного виробництва пелет з різноманітної біомаси. Його конструкція та принцип дії визначають ефективність та якість процесу.



Рис. 1.2. Одношнековий екструдер для виготовлення пелет

Основні компоненти одношнекового екструдера (рис. 1.3):

- Завантажувальний бункер: Призначений для подачі сировини в екструдер. Його форма та розміри впливають на рівномірність подачі матеріалу.
- Циліндр (корпус): Металева труба, в якій обертається шнек. Циліндр має систему нагріву (електричні нагрівачі або теплоносій) для забезпечення необхідної температури процесу.

- Шнек: Гвинтовий вал, який обертається всередині циліндра. Шнек є основним робочим органом екструдера, що забезпечує транспортування, перемішування, стиснення та плавлення матеріалу.
- Нагрівальні елементи: Забезпечують передачу тепла матеріалу для його плавлення та обробки. Зазвичай використовуються електричні нагрівачі, розташовані зонально вздовж циліндра.
- Фільєра (формуюча головка): Пристрій, через який продавлюється розплавлений матеріал для формування пелет. Фільєра визначає розмір і форму пелет.
- Система приводу: Забезпечує обертання шнека з регульованою швидкістю.

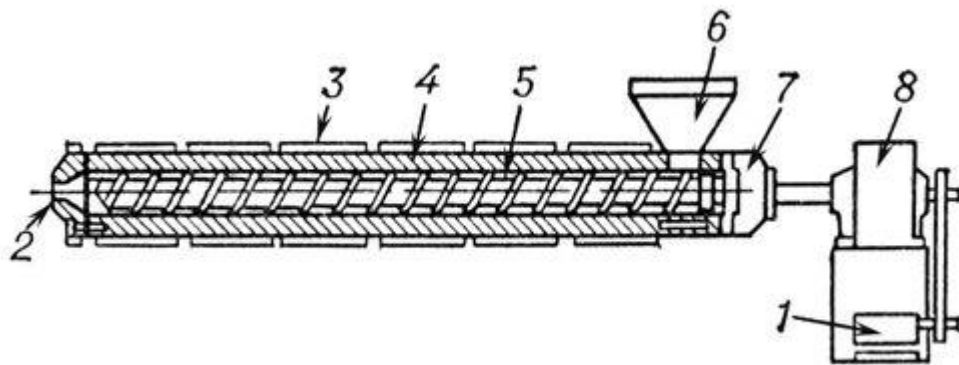


Рис. 1.3 Схема одношнекового екструдера

1 - електродвигун, 2 – вихід сировини, 3 – нагрівач, 4 – корпус, 5 - шнек, 6 – бункер для сировини, 7 - основа, 8 - редуктор.

Процес екструзії в одношнековому екструдері можна розділити на кілька основних зон:

1. Зона завантаження: Сировина з бункера подається на шнек. У цій зоні відбувається попереднє нагрівання та ущільнення матеріалу.
2. Зона транспортування: Шнек переміщує матеріал вздовж циліндра. Відбувається подальше нагрівання та ущільнення.

3. Зона плавлення: Під дією тепла від нагрівальних елементів та тертя між частинками матеріал переходить у в'язко-текучий стан.
4. Зона дозування: Розплавлений матеріал продавлюється через фільтеру під тиском, створюваним шнеком.

Ефективність процесу екструзії залежить від багатьох факторів, включаючи конструкцію шнека, температурний режим, швидкість обертання шнека та властивості сировини.

1.1.2 Процес формування пелет

Формування пелет відбувається після виходу розплавленого матеріалу з фільтери. Існують різні методи формування пелет:

- Нарізання гарячим ножом: Розплавлений матеріал, що виходить з фільтери, нарізається обертовими ножами на задану довжину.
- Нарізання холодним ножом: Матеріал спочатку охолоджується, а потім нарізається.
- Формування вальцями: Матеріал продавлюється між вальцями з виїмками, формуючи пелети.

Після формування пелети необхідно охолодити для затвердіння та збереження форми. Охолодження може здійснюватися повітрям або водою.

1.1.3 Вихідна сировина та її властивості

Для виробництва пелет використовується різноманітна біомаса, включаючи:

- Деревна біомаса: Тріска, тирса, кора.
- Сільськогосподарські відходи: Солома, лушпиння, стебла.
- Енергетичні культури: Вербя, міскантус.

Властивості сировини мають значний вплив на процес екструзії та якість пелет:

- Вологість: Висока вологість ускладнює процес плавлення та може призвести до утворення тріщин у пелетах.
- Розмір частинок: Великі частинки можуть забивати екструдер, а дрібні – призводити до низької щільності пелет.
- Хімічний склад: Вміст лігніну, целюлози та інших компонентів впливає на плинність матеріалу та міцність пелет.
- Зольність: Високий вміст золи може збільшувати знос обладнання.

1.1.4 Ключові параметри процесу екструзії

- Температура: Розподіл температури вздовж циліндра є критичним параметром. Різні зони екструдера мають різні температурні режими, оптимізовані для плавлення, перемішування та транспортування матеріалу. Підвищення температури зменшує в'язкість матеріалу, полегшуючи його проходження через фільтер, але може призвести до деградації матеріалу та зниження якості пелет. Оптимальний температурний режим залежить від типу сировини та конструкції екструдера.
- Тиск: Тиск в екструдері створюється шнеком і залежить від швидкості його обертання, опору фільтеру та в'язкості матеріалу. Високий тиск забезпечує ущільнення матеріалу та формування щільних пелет, але збільшує енергоспоживання та знос обладнання.
- Швидкість обертання шнека: Швидкість обертання шнека впливає на продуктивність екструдера, ступінь перемішування матеріалу та споживану потужність. Збільшення швидкості обертання шнека збільшує продуктивність, але може призвести до підвищення температури та зносу обладнання.

- Споживана потужність: Потужність, споживана двигуном екструдера, є показником навантаження на обладнання. Її моніторинг дозволяє оцінювати енергоефективність процесу та виявляти можливі проблеми в роботі екструдера.

1.1.5 Проблеми та виклики екструзії

Процес екструзії стикається з рядом проблем та викликів:

- Нерівномірність температури: Нерівномірний розподіл температури в екструдері може призвести до непостійної якості пелет, утворення тріщин та інших дефектів.
- Знос обладнання: Шнек та циліндр екструдера піддаються значному зносу через тертя та високі температури, що призводить до зниження продуктивності та збільшення витрат на обслуговування.
- Енергоємність процесу: Екструзія є енергоємним процесом, тому оптимізація енергоспоживання є важливою задачею.
- Вимоги до якості пелет: Пелети повинні відповідати певним вимогам за розміром, міцністю, щільністю та іншими показниками.

1.1.6. Можливості моніторингу для вирішення проблем

Ефективний моніторинг параметрів процесу екструзії є ключовим для вирішення вищезазначених проблем:

- Моніторинг температури: Дозволяє своєчасно виявляти та усувати відхилення температури, забезпечуючи стабільну якість пелет.
- Моніторинг навантаження: Дає змогу оптимізувати енергоспоживання та запобігти перевантаженню обладнання.
- Моніторинг інших параметрів (тиск, швидкість): Забезпечує комплексну інформацію про стан процесу та дозволяє приймати обґрунтовані рішення щодо його керування.

1.2 Аналіз існуючих систем моніторингу температури в екструдерах

1.2.1. Термопара

Термопара — це сенсор температури, який створює електричну напругу внаслідок різниці температур між двома точками ланцюга, виготовленого з двох різних провідників.



Рис 1.4 Датчик температури термопари К типу

Цей ефект базується на термоелектричному явищі. Основний закон, на якому базується робота термопари, — ефект Зеебека. Однак для повного розуміння треба знати ще два пов'язаних ефекти:

- Ефект Зеебека — генерація ЕРС при різниці температур у замкнутому ланцюзі з різнорідних провідників.
- Ефект Пельтьє — поглинання або виділення тепла на межі контактів різнорідних провідників, коли через них тече струм.
- Ефект Томсона — генерація тепла в одному матеріалі при його нагріванні під дією струму, якщо існує температурний градієнт.

При нагріванні металу, у ньому збільшується кінетична енергія електронів. У гарячій частині провідника електрони мають вищу енергію і більшу швидкість, ніж у холодній. Через це:

- Електрони починають дифундувати від гарячої зони до холодної.
- Утворюється надлишок зарядів на холодному кінці, а на гарячому — дефіцит.
- Це створює електричне поле, яке протидіє подальшій міграції електронів.

В результаті встановлюється рівновага, і виникає термо-ЕРС — електрорушійна сила, яка є пропорційною різниці температур.

Оскільки в кожному металі електрони мають різну щільність станів, рухливість і рівень Фермі, то термоелектрична активність буде різною. Тому ефект виникає тільки тоді, коли використовуються два різні метали або сплави.

Термо-ЕРС розраховується за формулою:

$$V = \alpha \cdot \Delta T$$

де:

- V — термоелектрична напруга (мВ),
- α — термоелектричний коефіцієнт (мВ/°С), залежить від матеріалів,
- ΔT — різниця температур між спаями.

Тип	Матеріали	Темп. діапазон	Особливості
K	Хромель-алюмень	-200... +1260	Термостійка
J	Залізо-константан	-40...+750	Дешева, менш стійка до окислення
T	Мідь — константан	-200...+350	Висока точність при низьких температурах
N	Нікросил — нісил	-200...+1300	Стійка до високих температур
S	Платина–Родій	0...+1600	Дуже точна, дорога, для високих температур

Термопара застосовується на промислових об'єктах:

- У печах, котлах та при термічній обробці;
- Нафтопереробка, хімічне виробництво;
- Для контролю двигунів та турбін;
- Харчова промисловість.

В побуті:

- Плити, обігрівачі, духовки
- При вимірюванні температури повітря, рідин та твердих тіл.

До переваг термопари можна віднести: простоту конструкції, широкий діапазон температур, високу міцність та довговічність, невисоку вартість.

В той час як до недоліків: нелінійність сигналу, потребу в компенсації холодного спаю, низьку точність відносно терморезисторів.

В екструдері термопара може бути в різних зонах наприклад для контролю температури нагріву зон циліндру його встановлюють в зони подачі, стиснення, дозування та формування, зазвичай типу К або J. Це дозволяє передавати сигнали на ПД-регулятор або ПЛК для точного регулювання температури нагріву, щоб уникнути перегрів або недогрів сировини.

Також встановлення датчиків на фільєру(головку екструдера), що забезпечує стабільність температури в критичному місці, де формується кінцева форма виробу. При неправильній температурі може змінитися товщина виробу, з'явитися дефекти та розшарування на кінцевій сировині.

У деяких екструдерів є вставна термопара в потоці розплаву для вимірювання фактичної температури розплавленого полімеру, що дозволяє точно налаштувати параметри екструзії для чутливих матеріалів.

1.2.2. Терморезистори

Серед сучасних температурних сенсорів, що використовуються в екструзійних процесах, терморезистори (RTD) посідають важливе місце завдяки своїй високій точності, стабільності та надійності. Найбільш

поширеним є платиновий терморезистор типу Pt100, який має номінальний опір 100 Ом при температурі 0 °С.



Рис 1.5 Терморезистор РТ100

Принцип дії терморезистора полягає в залежності електричного опору металу від температури. Зі зростанням температури опір провідника зростає за відомим законом:

$$R_T = R_0(1 + \alpha T)$$

де:

- R_T — опір при температурі T ,
- R_0 — опір при 0 °С,
- α — температурний коефіцієнт (для Pt ≈ 0.00385 1/°С).

У одношнекових екструдерах терморезистори зазвичай застосовуються для високоточного контролю температури в критичних точках, таких як:

- Нагрівальні зони бареля (особливо при переробці термочутливих матеріалів, таких як ПВХ або ПЕТ);

- Фільера (зона формування виробу, де точність температури визначає геометрію й якість готової продукції);
- Контроль температури розплаву (у високоточних або лабораторних системах, зазвичай з використанням втулкових вставок у потік).

Порівняно з термопарами, терморезистори мають такі переваги:

- Вища точність (до ± 0.1 °C);
- Краще лінійна залежність опору від температури;
- Більш тривалий термін служби за умов стабільного нагріву;
- Вища стабільність у тривалих процесах.

Однак RTD-сенсори мають і обмеження:

- Менший температурний діапазон (до ≈ 600 °C для Pt100, тоді як термопари типу К працюють до $1200+$ °C);
- Вища чутливість до механічних пошкоджень;
- Необхідність у більш складній схемі вимірювання (мостові схеми, 3- або 4-провідне підключення для компенсації опору дротів).

У промислових умовах терморезистори переважно використовуються на етапах фінішного контролю температури, де необхідна максимальна точність. Вони часто входять до складу інтелектуальних систем ПД-регулювання, у поєднанні з мікроконтролерами або ПЛК.

Таким чином, застосування терморезисторів в одношнекових екструдерах виправдане у випадках, коли потрібно забезпечити стабільний температурний режим у вузьких діапазонах, зокрема для обробки термочутливих полімерів або у виробництві тонкостінної продукції.

1.2.3. Інфрачервоні датчики температури

Інфрачервоні (ІЧ) датчики температури, або пірометри, належать до безконтактних засобів термометрії, що працюють на основі вимірювання інтенсивності інфрачервоного випромінювання, яке випромінює об'єкт у залежності від його температури. Їх використання в екструзійних процесах, зокрема в одношнекових екструдерах, є доцільним у випадках, коли безпосередній контакт із поверхнею є небажаним або фізично складним.



Рис 1.6 Інфрачервоний датчик температури

Принцип дії ІЧ-датчика базується на законі Планка та законі Стефана-Больцмана, згідно з якими випромінювана енергія абсолютно чорного тіла залежить від температури:

$$E = \varepsilon \sigma T^4$$

де:

- E — енергетична світність тіла,
- ε — коефіцієнт випромінювання поверхні (емісивність),
- σ — стала Стефана-Больцмана,

- T — абсолютна температура (в К).

У промислових ІЧ-датчиках температура визначається шляхом аналізу спектру та інтенсивності випромінювання, з урахуванням коефіцієнта емісії матеріалу поверхні, що вимірюється.

Застосування в одношнекових екструдерах:

ІЧ-датчики зазвичай встановлюють у таких зонах:

- На виході з фільтри, для безконтактного вимірювання температури щойно сформованого виробу (труба, профіль, плівка тощо);
- У системах контролю якості, де вимірювання температури поверхні продукції дозволяє оперативно виявляти відхилення у процесі охолодження чи формування;
- При високошвидкісній екструзії, коли класичні контактні сенсори не встигають реагувати на динамічні зміни.

Переваги ІЧ-датчиків:

- Безконтактність — немає впливу на об'єкт вимірювання;
- Моментальна реакція — дуже мала інерція (в межах мілісекунд);
- Можливість вимірювання рухомих або важкодоступних об'єктів;
- Збереження цілісності герметичних або гарячих зон (наприклад, усередині захисного кожуха екструдера).

Обмеження:

- Залежність від емісивності поверхні: помилки можливі при зміні матеріалу або забрудненні поверхні;
- Неможливість вимірювання внутрішньої температури матеріалу — фіксується лише температура поверхні;

- Чутливість до зовнішнього ІЧ-випромінювання, що вимагає екранування або калібрування в умовах конкретного виробництва.

В одношнекових екструдерах інфрачервоні сенсори використовуються переважно в допоміжних ролях, доповнюючи контактні датчики (термопари або терморезистори). Їх застосування доцільне у високоточних технологічних процесах, наприклад, у виробництві медичних трубок або тонких технічних плівок, де навіть незначне відхилення температури поверхні може призвести до браку.

Таким чином, інфрачервоні датчики не є основним засобом термометрії в екструдері, проте суттєво підвищують точність і швидкість моніторингу при розширеному підході до контролю температурного режиму.

1.2.4. Порівняння типів температурних сенсорів

Критерій	Термопара	Терморезистор (RTD)	ІЧ-датчик (пірометр)
Тип вимірювання	Контактний	Контактний	Безконтактний
Принцип дії	Термоелектричний ефект (Зеебека)	Зміна електричного опору	Вимірювання ІЧ-випромінювання
Діапазон температур	200...+1300 °С (тип К)	-200...+600 °С (Pt100)	-50...+2000 °С (залежно від моделі)
Точність	Середня ($\pm 1-2$ °С)	Висока (до ± 0.1 °С)	Висока при правильному налаштуванні
Час відгуку	Середній (~секунди)	Середній (~секунди)	Дуже швидкий (мілісекунди)
Чутливість до забруднень	Низька	Середня	Висока (впливає емісивність)
Вартість	Низька–середня	Середня–висока	Середня–висока
Підходить для вимірювання розплаву	Так	Так	Ні (лише поверхня виробу)

Отже з таблиці наведеної вище можна дізнатися, що:

- Термопари найкраще підходять для широкого температурного діапазону і є стандартом у більшості екструдерів.
- RTD-сенсори (Pt100) доцільно застосовувати при потребі у високій точності та стабільності вимірювань, особливо при роботі з термочутливими полімерними матеріалами.

- ПЧ-датчики є ідеальними для моніторингу готової продукції, де необхідно швидко і безконтактно фіксувати зміни температури, зокрема на виході з фільтери.

1.2.5. Методи керування температурою

У системах контролю температури екструдерів використовуються різні методи керування, кожен з яких має свої особливості, переваги та недоліки.

- Увімкнення-вимкнення (On-Off) контроль:
 - Це найпростіший метод керування, при якому нагрівальні елементи вмикаються, коли температура падає нижче заданого значення, і вимикаються, коли температура досягає заданого значення.
 - Переваги: Простота реалізації, низька вартість.
 - Недоліки: Схильність до значних коливань температури навколо заданого значення, що може призвести до нестабільності процесу та погіршення якості продукції. Цей метод зазвичай використовується в системах, де не потрібен дуже точний контроль температури.
- Пропорційне керування (P-контроль):
 - У цьому методі потужність, що подається на нагрівальні елементи, пропорційна різниці між заданою температурою та поточною температурою (похибці).
 - Переваги: Зменшує коливання температури порівняно з On-Off контролем.
 - Недоліки: Може мати статичну похибку (offset), тобто температура може стабілізуватися на деякій відстані від заданого значення.
- Пропорційно-інтегрально-диференційне керування (ПІД-контроль):

- Це найпоширеніший і найефективніший метод контролю температури. Він поєднує три складові:

- Пропорційна (P) складова: Реагує на поточну похибку.

$$u(t) = K_p \cdot e(t)$$

- Інтегральна (I) складова: Усуває статичну похибку.

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int e(t) dt$$

- Диференційна (D) складова: Реагує на швидкість зміни температури, запобігаючи перерегулюванню.

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt}$$

- Переваги: Забезпечує точний і стабільний контроль температури, мінімізує коливання та усуває статичну похибку.
- Недоліки: Складність налаштування параметрів (K_p , K_i , K_d), які потрібно оптимізувати для кожної конкретної системи.

1.2.6. Сучасні тенденції та напрямки розвитку

Сучасні системи контролю температури в екструзії постійно розвиваються, щоб забезпечити більш ефективне, стабільне та енергоефективне керування процесом. Ось деякі з ключових тенденцій:

- Адаптивне керування:
 - Ці системи автоматично налаштовують параметри керування (наприклад, ПД-регулятора) в режимі реального часу, щоб компенсувати зміни в умовах процесу, таких як зміна типу матеріалу, швидкості екструзії або температури навколишнього середовища.

- Переваги: Забезпечують оптимальний контроль температури в широкому діапазоні умов, підвищують стабільність процесу та зменшують потребу в ручному налаштуванні.
- Прогнозуюче керування:
 - Ці системи використовують математичні моделі для прогнозування майбутніх змін температури та коригують керування нагрівальними елементами, щоб запобігти відхиленням від заданого значення.
 - Переваги: Дозволяють більш точно підтримувати задану температуру, зменшують енергоспоживання та підвищують якість продукції.
- Інтелектуальні системи керування:
 - Використовують методи штучного інтелекту (ШІ) та машинного навчання (МН) для оптимізації контролю температури.
 - Переваги:
 - Можливість самонавчання та адаптації до складних і нелінійних процесів.
 - Покращення енергоефективності.
 - Підвищення якості продукції.
 - Можливість прогнозування та запобігання аварійним ситуаціям.

1.2.7. Обґрунтування та вибір алгоритму керування об'єктом

1.2.7.1. Аналіз вимог до системи керування

Об'єктом автоматизації є одношнековий екструдер, що призначений для переробки термопластичних матеріалів з метою виготовлення гранульованої продукції (пелет). Процес екструзії вимагає точного контролю температури

всередині зони пластикації для забезпечення належної в'язкості та однорідності розплаву, а також моніторингу електричного навантаження нагрівачів для запобігання перевантаженням та перегріву.

На основі аналізу технологічного процесу сформульовано наступні вимоги до системи керування:

- Точність регулювання: підтримка температури з точністю не гірше ± 1 °С у діапазоні 180–250 °С.
- Швидкодія: час стабілізації після збурення (наприклад, зміна навантаження або запуск) не повинен перевищувати 10–15 секунд.
- Стійкість: система повинна уникати автоколивань та не допускати перерегулювання, що може викликати деградацію полімеру або нестабільність тиску в шнеку.
- Простота реалізації: алгоритм має бути реалізованим на базі стандартних ПЛК або мікроконтролерів.
- Надійність: керування має бути нечутливим до незначних збурень і електричних завад, стабільно працювати у тривалому циклі.

1.2.7.2. Критерії вибору алгоритму

Для об'єкта керування обрано наступні ключові критерії ефективності алгоритму:

- Забезпечення необхідної точності підтримки температури;
- Досягнення прийнятної швидкодії (відсутність затягнутої реакції);
- Стійкість системи до зовнішніх і внутрішніх збурень;
- Мінімізація сталої похибки;
- Простота реалізації на обраному апаратному забезпеченні (ПЛК або мікроконтролер);

- Можливість подальшого розширення функціоналу (наприклад, впровадження захисту від перевантаження).

1.2.7.3. Обґрунтування вибору

З урахуванням зазначених вимог та специфіки процесу екструзії пелет, обрано пропорційно-інтегрально-диференціальний (PID) регулятор як основний алгоритм керування температурою.

Цей алгоритм:

- забезпечує високу точність підтримки температури завдяки інтегральній складовій;
- компенсує інерційність системи, властиву екструдерам, завдяки диференціальній складовій;
- має гнучкість налаштування і реалізується на типових платформах автоматизації.

Крім того, PID-регулятор дозволяє вбудовувати додаткові логічні умови, пов'язані з моніторингом електричного навантаження (наприклад, зменшення PID-виходу при досягненні граничного струму живлення), що є важливим для захисту обладнання.

2 РОЗРОБКА ТА ОБҐРУНТУВАННЯ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ТЕМПЕРАТУРИ І НАВАНТАЖЕННЯ ДВИГУНА В ОДНОШНЕКОВОМУ ЕКСТРУДЕРІ

2.1. Обґрунтування обраних методів дослідження

Досягнення мети магістерської кваліфікаційної роботи, яка полягала у розробці та дослідженні системи моніторингу температури і навантаження двигуна в одношнековому екструдері для виробництва пелет, вимагало всебічного та системного підходу до вирішення науково-практичних завдань. Для забезпечення наукової обґрунтованості, точності та практичної значущості отриманих результатів було використано комплекс взаємодоповнюючих наукових методів дослідження. Вибір кожного з методів здійснювався на основі їх відповідності окремим етапам і завданням роботи.

Основні методи дослідження, використані в роботі, та їхнє детальне обґрунтування:

- Метод системного аналізу.

Застосування методу системного аналізу стало ключовим і базовим у межах даного дослідження. Процес екструзії деревинних пелет є складною багатофакторною технологічною системою, яка включає численні взаємопов'язані фізико-хімічні процеси (нагрів, плавлення, гомогенізація, пресування), динамічні механічні навантаження та складну взаємодію між компонентами обладнання (шнек, циліндр, нагрівачі, приводний двигун) і властивостями сировини. Використання системного аналізу дозволило:

- Ідентифікувати одношнековий екструдер як об'єкт дослідження, розглянувши його в контексті взаємопов'язаних компонентів, зв'язків та зовнішніх впливів (наприклад, температура, вологість сировини, швидкість обертання шнека, подача матеріалу). –

- Декомпонувати загальну проблему на окремі взаємопов'язані підсистеми, такі як підсистема контролю температури, моніторинг навантаження двигуна, система збору й обробки даних, а також підсистема візуалізації отриманої інформації.
- Визначити ключові технологічні параметри, що найбільше впливають на якість готових пелет, енергоспоживання та безперебійну роботу обладнання. На цій основі обґрунтовано необхідність моніторингу критичних показників, зокрема температури та навантаження двигуна.
- Сформувати загальну концепцію майбутньої системи моніторингу разом із розробкою структурної та функціональної схем. Також визначено основні модулі та інформаційні потоки.

Метод системного аналізу забезпечив комплексний підхід до вирішення поставлених завдань, дозволивши ефективно перейти від загального усвідомлення проблеми до детальної розробки конкретних технічних рішень.

2. Теоретичні методи: аналіз, синтез, узагальнення є важливими елементами будь-якого наукового дослідження і були активно використані на всіх етапах виконання роботи.

Аналіз застосовувався для глибокого вивчення й критичної оцінки різноманітної науково-технічної інформації. Це включало ретельний огляд вітчизняних та зарубіжних наукових статей, монографій, дисертаційних робіт, патентних матеріалів, а також технічної документації та стандартів, що стосуються одношнекових екструдерів, технологій виробництва пелет, сучасних методів і засобів контролю та діагностики промислового обладнання. Аналіз мав за мету виявлення існуючих проблем, недоліків та обмежень у поточних системах моніторингу, визначення актуальності обраної теми та формулювання новизни пропонованих рішень.

Синтез використовувався на етапі створення інтегрованої системи моніторингу. Він полягав у поєднанні різних апаратних компонентів (вибір і

інтеграція оптимальних типів датчиків температури та струму, мікроконтролерних платформ, комунікаційних модулів) і програмних модулів (алгоритми збору, обробки, аналізу та візуалізації даних) у єдиний, цілісний і функціонально завершений комплекс. Синтез забезпечував взаємодію всіх елементів системи для досягнення поставлених цілей.

Узагальнення допомагало формувати висновки та рекомендації на основі аналізу отриманих експериментальних даних. Цей метод дозволяв виявити загальні закономірності та тенденції у зміні температури та навантаження двигуна, їхньому взаємозв'язку з технологічними параметрами процесу і впливі на кінцеві показники, такі як енергоспоживання та якість продукції. Узагальнення сприяло формуванню науково обґрунтованих положень й практичних рекомендацій.

3. Методи математичного моделювання.

Методи математичного моделювання посідають важливе місце у наукових дослідженнях, спрямованих на аналіз фізичних процесів та оптимізацію технічних систем. У представленому дослідженні застосування цих методів виступало ключовим інструментом для глибокого вивчення процесів, що відбуваються в екструдері, а також для вдосконалення параметрів і алгоритмів, необхідних для ефективного функціонування розробленої системи моніторингу. Конкретними напрямками використання математичного моделювання стали такі:

- Моделювання теплових процесів. Створені математичні моделі теплообміну і розподілу температури в циліндрі екструдера забезпечили можливість прогнозування температурних полів при різних режимах роботи устаткування. Це, своєю чергою, дозволило обґрунтовано визначити оптимальні місця для встановлення датчиків температури, що є критично важливим для отримання репрезентативних даних.

- Моделювання електричних характеристик приводного двигуна. У рамках цього напрямку були розроблені математичні залежності між струмом і споживаною потужністю від механічного навантаження на шнек. Це дало змогу точно оцінити реальне навантаження на двигун, виявляти режими перевантаження, а також проводити аналіз ефективності використання енергії.
- Моделювання алгоритмів цифрової обробки сигналів. Розробка й оптимізація алгоритмів для фільтрації, усереднення і калібрування вимірюваних сигналів базувалися на математичних моделях сигналу та шуму. Такий підхід забезпечив високу точність, стабільність і надійність отриманих даних.

Систематичне використання методів математичного моделювання слугувало основою для обґрунтування вибору апаратних засобів, розроблення ефективних програмних алгоритмів і підвищення достовірності та інформативності системи моніторингу. Це підтверджує вагомість подібного підходу для забезпечення функціональної досконалості складних технічних комплексів.

4. Метод експериментальних досліджень.

Метод експериментальних досліджень відіграє ключову роль у практичній перевірці теоретичних положень, оцінці ефективності розробленої системи моніторингу та отриманні емпіричних даних, необхідних для подальшого аналізу й удосконалення. Експериментальні процедури проводилися на спеціалізованій лабораторній установці з використанням одношнекового екструдера, що дозволяє здійснювати контрольоване регулювання технологічних параметрів.

У ході експериментальної програми виконувалися такі завдання:

- Інсталяція та калібрування апаратно-програмної системи моніторингу, створеної для використання на лабораторному екструдері.

- Систематичний збір даних стосовно змін температурного режиму в різних функціональних зонах циліндра екструдера (включаючи зони завантаження, стиснення та формування) разом із реєстрацією показників електричного струму, споживаного приводним двигуном.
- Проведення серії експериментів із варіюванням базових технологічних параметрів, таких як швидкість обертання шнека, інтенсивність подачі сировини та встановлені температурні режими нагрівачів.

Метою цих експериментів було визначення впливу згаданих параметрів на ключові показники роботи системи та забезпечення стабільності технологічного процесу.

Результати, отримані під час експериментів, слугували основою для детального аналізу функціонування системи моніторингу. Були визначені кількісні та якісні взаємозалежності між умовами ведення процесу (технологічними параметрами), температурними характеристиками, навантаженням приводу двигуна й рівнем енергоспоживання. На основі отриманих результатів було розроблено рекомендації щодо оптимізації виробничого процесу пелетування.

5. Методи статистичної обробки даних.

Для забезпечення достовірності й об'єктивності висновків, а також для ефективного аналізу значного обсягу числових даних, отриманих у ході експериментальних досліджень, було використано методи статистичної обробки. Це дало змогу:

- Провести первинну обробку даних, зокрема фільтрацію від випадкових шумів, згладжування та усереднення, що підвищило точність вимірювань.

- Створити інформативні графіки та діаграми, які наочно відображають динаміку змін параметрів у часі та їх залежність від контрольованих технологічних факторів.
- Здійснити кореляційний аналіз для виявлення взаємозв'язків між різними параметрами, наприклад, між температурою й навантаженням двигуна або між швидкістю шнека й енергоспоживанням.
- Використати регресійний аналіз для формування математичних моделей залежностей між параметрами, що дало можливість прогнозувати поведінку системи за різних умов.
- Оцінити статистичну значущість результатів, що підтвердило об'єктивність зроблених висновків і запропонованих рекомендацій.

Застосування цього комплексу взаємодоповнюючих методів дозволило провести всебічне, глибоке й надійне дослідження, яке охоплює як теоретичні аспекти розробки системи моніторингу, так і її практичну реалізацію з експериментальним підтвердженням ефективності. Такий підхід забезпечив наукову обґрунтованість і практичну цінність результатів магістерської кваліфікаційної роботи.

2.2. Аналіз технологічних параметрів процесу екструзії та обґрунтування вибору контрольованих величин

Процес екструзії відіграє вирішальну роль у виробництві деревинних пелет, перетворюючи подрібнену біомасу на щільний і енергетично цінний гранульований продукт. Цей процес базується на інтенсивному механічному стисненні та перемішуванні матеріалу, який пересувається обертовим шнеком всередині нагрітого циліндра (матриці). У результаті відбувається нагрівання сировини як завдяки зовнішнім нагрівачам, так і внутрішньому тертю. Під впливом високої температури й тиску, лігнін, що міститься в деревині, розм'якшується і стає природним сполучником, сприяючи утворенню міцних гранул. Готовий пресований матеріал проходить крізь отвори матриці, після

чого охолоджується. Ефективність процесу та якість кінцевого продукту значною мірою залежать від точного регулювання численних технологічних параметрів.

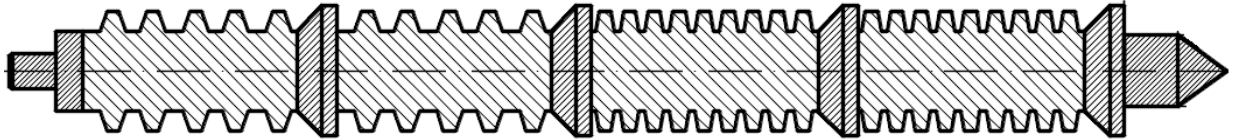


Рис 2.1 Зображення шнеку в розрізі

2.2.1. Основні технологічні параметри процесу екструзії

Якість кінцевого продукту (пелет), продуктивність екструдера та його енергоефективність залежать від комплексу взаємопов'язаних технологічних параметрів. Основними з них є:

1. Температура в зонах екструдера: Вона забезпечується за допомогою зовнішніх нагрівачів і внутрішнього тертя матеріалу. Оптимальний температурний профіль уздовж усього циліндра є вкрай важливим для пластифікації лігніну, зменшення енергії тертя та формування щільних гранул. Низька температура може спричинити надмірне навантаження та швидкий знос обладнання, тоді як надмірна температура викликає деградацію матеріалу та появу диму.

2. Вологість сировини: Цей параметр значно впливає на споживання енергії та якість пелет. Оптимальний рівень вологості (зазвичай у межах 8-15%) забезпечує ефективну пластифікацію та стабільне формування гранул. Відхилення від цього діапазону може призвести до підвищеного навантаження на двигун, зниження продуктивності або навіть до розсипання пелет.

3. Швидкість обертання шнека: Вона прямо впливає на продуктивність екструдера та інтенсивність механічного нагріву матеріалу за рахунок тертя.

Надто висока швидкість може викликати перегрів і деградацію продукту, а занадто низька – знизити продуктивність.

4. Швидкість подачі сировини: Цей параметр визначає кількість матеріалу, що подається в екструдер за одиницю часу. Він має бути узгоджений із швидкістю обертання шнека та пропускнуою здатністю матриці, щоб уникнути перевантажень або недоподачі матеріалу ("голодування").

5. Тиск у матриці: Зумовлений стисканням матеріалу, тиск впливає на щільність і міцність пелет. Хоча прямий вимір тиску може бути ускладнений, його значення можна оцінити за рівнем навантаження приводного двигуна.

6. Якість і склад сировини: Розмір фракцій, тип деревини та наявність домішок мають суттєвий вплив на рівномірність матеріалу, процес його пластифікації та остаточну якість продукції.

2.2.2. Обґрунтування вибору температури та навантаження двигуна як контрольованих величин

У контексті зазначених параметрів, температура в зонах екструдера та навантаження на приводний двигун були визначені як основні контрольовані величини для створюваної системи моніторингу. Це обумовлено їхньою високою інформативністю та чутливістю як індикаторів стану технологічного процесу, а також їхнім впливом на ефективність і безпеку. Для обґрунтування вибору слід враховувати такі аспекти:

1. Температура:

- Прямий вплив на якість продукції: Оптимальна температура сприяє належному розм'якшенню лігніну, що є критично важливим для формування міцних, щільних пелет. Відхилення від оптимального режиму може спровокувати виробництво низькоякісних або перегрітих гранул.
- Енергоспоживання: Економічний температурний режим знижує внутрішню тертя матеріалу, що, у свою чергу, зменшує

енергоспоживання привідного двигуна й підвищує загальну енергоефективність процесу.

- Запобігання аварійним ситуаціям: Надмірне підвищення температури може сигналізувати про перевантаження екструдера чи некоректну роботу нагрівачів, потенційно спричиняючи займання матеріалу або пошкодження обладнання. Моніторинг допомагає завчасно виявити та запобігти таким ситуаціям.
- Технологічна інформативність: Температура відбиває теплові процеси в матеріалі та взаємодію зі шнеком, слугуючи важливим показником стану технологічного процесу.

2. Навантаження на приводний двигун (вимірюється через струм чи потужність):

- Інтегральний показник стану процесу: Навантаження на двигун є чутливим індикатором сукупного опору, що чинить матеріал. Це інтегрально відображає в'язкість матеріалу, його ущільнення та ступінь пластифікації, а також наявність небажаних механічних впливів.
- Енергоефективність: Моніторинг навантаження дає змогу оцінювати споживання електроенергії й оперативно реагувати на зміни для оптимізації роботи та зменшення виробничих витрат.
- Захист обладнання: Критичне збільшення навантаження може свідчити про перевантаження екструдера, засмічення матриці чи знос механічних вузлів. Постійний моніторинг дозволяє своєчасно запобігти пошкодженню двигуна або інших важливих компонентів.
- Оптимізація продуктивності: Аналіз динаміки навантаження допомагає підтримувати оптимальний рівень завантаженості екструдера для досягнення максимальної продуктивності без ризику перевантажень.

Основним приводним двигуном в екструдері є трифазний асинхронний електродвигун типу АИР100L4. Його номінальні паспортні дані, що визначають очікувані діапазони робочих параметрів, становлять: номінальна потужність $P_n=4$ кВт, номінальна напруга $U_n=380$ В (при з'єднанні "зірка" Y), номінальний струм $I_n=8.4$ А, номінальна швидкість обертання $n_n=1440$ об/хв, коефіцієнт потужності $\cos\phi = 0.8$ та коефіцієнт корисної дії



Рис 2.2 Трифазний асинхронний двигун АИР100L4

$\eta=82.5$ %. Моніторинг фактичного струму та потужності двигуна відносно цих номінальних значень дозволяє точно оцінювати ступінь завантаження екструдера та його енергоефективність

Таким чином, вибір температури та навантаження двигуна як основних параметрів моніторингу обумовлений великою інформативністю та безпосереднім впливом на якість продукції, енергоспоживання, безпеку та надійність працездатності екструзійного обладнання. Моніторинг цих величин дозволяє оперативно реагувати на відхилення в технологічному процесі й приймати обґрунтовані рішення для його оптимізації.

2.3 Математична модель процесу екструзії

Процес екструзії деревинної біомаси є складним багатофакторним явищем, що включає механічне стиснення, інтенсивний тепломасообмін та реологічні перетворення матеріалу. Для ефективного моніторингу, оптимізації та управління цим процесом необхідне глибоке розуміння фізико-хімічних закономірностей, що відбуваються всередині екструдера. Розробка адекватної

математичної моделі дозволяє кількісно описати взаємозв'язки між основними технологічними параметрами та контрольованими величинами, забезпечуючи основу для інтерпретації даних та прийняття управлінських рішень.

2.3.1. Основні фізичні процеси та спрощуючі припущення

У одношнековому екструдері для виробництва пелет ключові фізичні процеси, що впливають на температуру та навантаження двигуна, включають:

Генерація тепла від тертя (дисипація енергії): Основне джерело внутрішнього нагріву матеріалу. Виникає внаслідок тертя частинок деревини між собою, об стінки циліндра та об поверхню шнека під впливом стиснення та зсуву. Цей процес є дисипативним і безпосередньо пов'язаний з механічною потужністю, що передається від приводного двигуна до шнека.

Зовнішній теплообмін: Передача тепла від електричних нагрівачів (тенів), встановлених на циліндрі екструдера, до матеріалу.

Теплопередача в матеріалі: Поширення тепла в об'ємі матеріалу за рахунок теплопровідності та конвекції (перенос тепла рухомим потоком).

Фазові та реологічні зміни: Під впливом температури, тиску та вологості відбувається розм'якшення лігніну, що діє як природний в'язучий елемент. Це призводить до значних змін в'язкості, щільності та пластичності матеріалу.

Формування тиску: Наростання тиску по довжині шнека до зони матриці, що є наслідком стиснення та ущільнення матеріалу. Тиск впливає на щільність пелет та навантаження на шнек.

Для побудови робочої математичної моделі, що є достатньо точною, але не надмірно складною для практичного застосування та візуалізації, приймаються наступні спрощуючі припущення:

- Процес розглядається як квазістаціонарний, що дозволяє аналізувати стабільні режими роботи.
- Матеріал вважається гомогенним у поперечному перерізі каналу шнека.

- Властивості матеріалу (теплоємність, теплопровідність, густина) можуть бути функціями температури та вологості.
- Втрати тепла в навколишнє середовище враховуються через коефіцієнти тепловіддачі.
- Модель є одновимірною по довжині шнека, що спрощує аналіз теплових та механічних процесів.

2.3.2. Модель температурного поля та енергетичного балансу

Зміна температури матеріалу вздовж робочої зони екструдера є результатом балансу між генерованою механічною енергією, теплом від зовнішніх нагрівачів та тепловими втратами. У відповідності до принципу енергетичного балансу, для елементарного об'єму матеріалу в зоні екструзії можна записати:

$$\rho C_p A \frac{dT}{dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda A \frac{\partial T}{\partial x} \right) + Q_{\text{мех}} + Q_{\text{зовн}} - Q_{\text{втраг}}$$

де:

- ρ – густина матеріалу, кг/м³;
- C_p – питома теплоємність матеріалу, Дж/(кг·К);
- A – площа поперечного перерізу каналу шнека, м²;
- T – температура матеріалу, К;
- t – час, с;
- x – осьова координата вздовж шнека, м;
- λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу, Вт/(м·К);
- $Q_{\text{мех}}$ – теплова потужність, що генерується за рахунок механічної дисипації (тертя), Вт;
- $Q_{\text{зовн}}$ – теплова потужність, що надходить від зовнішніх нагрівачів, Вт;

- $Q_{\text{втраг}}$ – теплові втрати в навколишнє середовище, Вт.

Теплова потужність від механічної дисипації ($Q_{\text{мех}}$) є основним джерелом внутрішнього нагріву. Вона прямо пропорційна механічній потужності, що витрачається двигуном на переміщення та стиснення матеріалу, і залежить від в'язкості матеріалу, швидкості зсуву та геометрії шнека:

$$Q_{\text{мех}} = k_{\text{ф}} \cdot M \cdot \omega$$

де:

- $k_{\text{ф}}$ – коефіцієнт, що враховує частку механічної енергії, що перетворюється на тепло (зазвичай близький до 1);
- M – крутний момент на шнеку, Н·м;
- ω – кутова швидкість обертання шнека, рад/с.

Теплова потужність від зовнішніх нагрівачів ($Q_{\text{зовн}}$) визначається потужністю встановлених тенів та ефективністю теплопередачі до матеріалу:

$$Q_{\text{зовн}} = \alpha_{\text{н}} \cdot F_{\text{н}} \cdot (T_{\text{тен}} - T)$$

де:

- $\alpha_{\text{н}}$ – коефіцієнт теплопередачі від тена до матеріалу;
- $F_{\text{н}}$ – площа контакту з нагрівачем;
- $T_{\text{тен}}$ – температура нагрівального елемента.

Теплові втрати ($Q_{\text{втраг}}$) з поверхні екструдера в навколишнє середовище моделюються з урахуванням конвекції та випромінювання:

$$Q_{\text{втраг}} = \alpha_{\text{пов}} \cdot F_{\text{пов}} \cdot (T_{\text{пов}} - T_{\text{сер}})$$

де:

- $\alpha_{\text{пов}}$ – загальний коефіцієнт тепловіддачі від поверхні екструдера;
- $F_{\text{пов}}$ – площа зовнішньої поверхні екструдера;
- $T_{\text{пов}}$ – температура зовнішньої поверхні екструдера;
- $T_{\text{сер}}$ – температура навколишнього середовища.

2.3.3. Модель навантаження приводного двигуна та тиску

Навантаження на приводний двигун (що вимірюється через струм або потужність) є прямим індикатором крутного моменту, необхідного для переробки матеріалу. Крутний момент M залежить від реологічних властивостей матеріалу (що визначаються температурою, вологістю та тиском), швидкості обертання шнека та геометрії екструдера. Для неоднорідних матеріалів, таких як деревинна біомаса, важливо враховувати вплив ущільнення та пластифікації лігніну.

Крутний момент M може бути представлений як сума компонентів, пов'язаних з в'язким опором потоку та тертям матеріалу об поверхні:

$$M = M_{\text{в'язк}} + M_{\text{тертя}}$$

Де $M_{\text{в'язк}}$ залежить від ефективної в'язкості матеріалу $\mu_{\text{еф}}$, яка є сильною функцією температури, вологості, тиску та швидкості зсуву. $M_{\text{тертя}}$ залежить від коефіцієнтів тертя між матеріалом та металевими поверхнями.

Тиск (P) у зоні екструзії та особливо перед матрицею є результатом стиснення та ущільнення матеріалу шнеком. Він також сильно залежить від реологічних властивостей матеріалу, швидкості подачі та швидкості обертання шнека. Для деревинної біомаси тиск є критичним для формування міцних пелет.

$$P = f(T, W, N, G_{\text{подачі}}, \mu_{\text{еф}})$$

де:

- W – вологість матеріалу;

- N – швидкість обертання шнека;
- $G_{\text{подачі}}$ – швидкість подачі сировини.

В'язкість матеріалу ($\mu_{\text{сф}}$) для деревинної біомаси є складною функцією. Модель її зміни може бути емпіричною або напівемпіричною, що враховує залежність від температури, вологості та тиску. Зазвичай, зі збільшенням температури та вологості в'язкість матеріалу знижується, що зменшує навантаження на двигун та полегшує екструзію.

2.3.4. Актуальність моделі для системи моніторингу

Розроблена математична модель слугує основою для:

- Розуміння причинно-наслідкових зв'язків: Вона дозволяє пояснити, як зміна вхідних параметрів (наприклад, швидкість подачі, температура нагрівачів) впливає на вимірювані величини (температуру матеріалу, струм двигуна, тиск).
- Діагностики стану процесу: За допомогою моделі можна визначити непрямі показники, які неможливо виміряти безпосередньо (наприклад, ефективну в'язкість матеріалу, ступінь пластифікації).
- Прогнозування та оптимізації: Модель дозволяє прогнозувати поведінку системи при зміні параметрів та знаходити оптимальні режими роботи для досягнення бажаної якості продукту та енергоефективності.
- Розробки алгоритмів управління: На базі моделі можуть бути розроблені складніші алгоритми предиктивного або адаптивного управління.

2.4. Розробка та обґрунтування принципової (функціональної) схеми системи моніторингу температури і навантаження двигуна

Розробка функціональної схеми системи моніторингу є важливою частиною інженерного проектування, яка дає змогу візуально представити архітектуру системи, окреслити основні функціональні блоки та їх взаємодії. Це допомагає зрозуміти логіку роботи системи, забезпечити її ефективну

реалізацію та сприяти подальшому вдосконаленню. Функціональна схема слугує базою для вибору апаратних засобів і створення програмного забезпечення.

2.4.1. Вимоги до системи моніторингу та її основні функції

Перед розробкою принципової схеми були сформульовані ключові вимоги до системи моніторингу, які зумовлюють її функціонал та архітектуру:

- **Надійність:** Система повинна працювати стабільно в умовах промислового виробництва (шуми, вібрації, температурні коливання).
- **Точність вимірювань:** Забезпечення достатньої точності вимірювання температури та струму для достовірної оцінки стану процесу.
- **Швидкість збору даних:** Достатня частота опитування датчиків для відстеження динаміки змін параметрів.
- **Гнучкість та масштабованість:** Можливість додавання нових датчиків або функціоналу в майбутньому.
- **Візуалізація даних:** Зручний та інтуїтивно зрозумілий інтерфейс для відображення поточної інформації та трендів.
- **Архівація даних:** Збереження історичних даних для подальшого аналізу, діагностики та оптимізації.
- **Сигналізація та оповіщення:** Можливість генерації аварійних сигналів та повідомлень при виході параметрів за допустимі межі.
- **Економічна доцільність:** Оптимальне співвідношення між функціоналом та вартістю реалізації.

Виходячи з цих вимог, основними функціями системи є:

- Вимірювання та збір даних з датчиків температури (4 зони), струму (3 фази приводного двигуна) та тиску.

- Первинна обробка вимірних сигналів (фільтрація, масштабування, лінеаризація).
- Передача оброблених даних на верхній рівень (ПК).
- Візуалізація поточних та архівних даних.
- Визначення аварійних станів та генерація відповідних сигналів.
- Ведення журналу подій.

2.4.2. Структурна схема системи моніторингу

Система моніторингу має ієрархічну структуру і складається з наступних основних рівнів та компонентів, що представлені на Рисунку 2.3

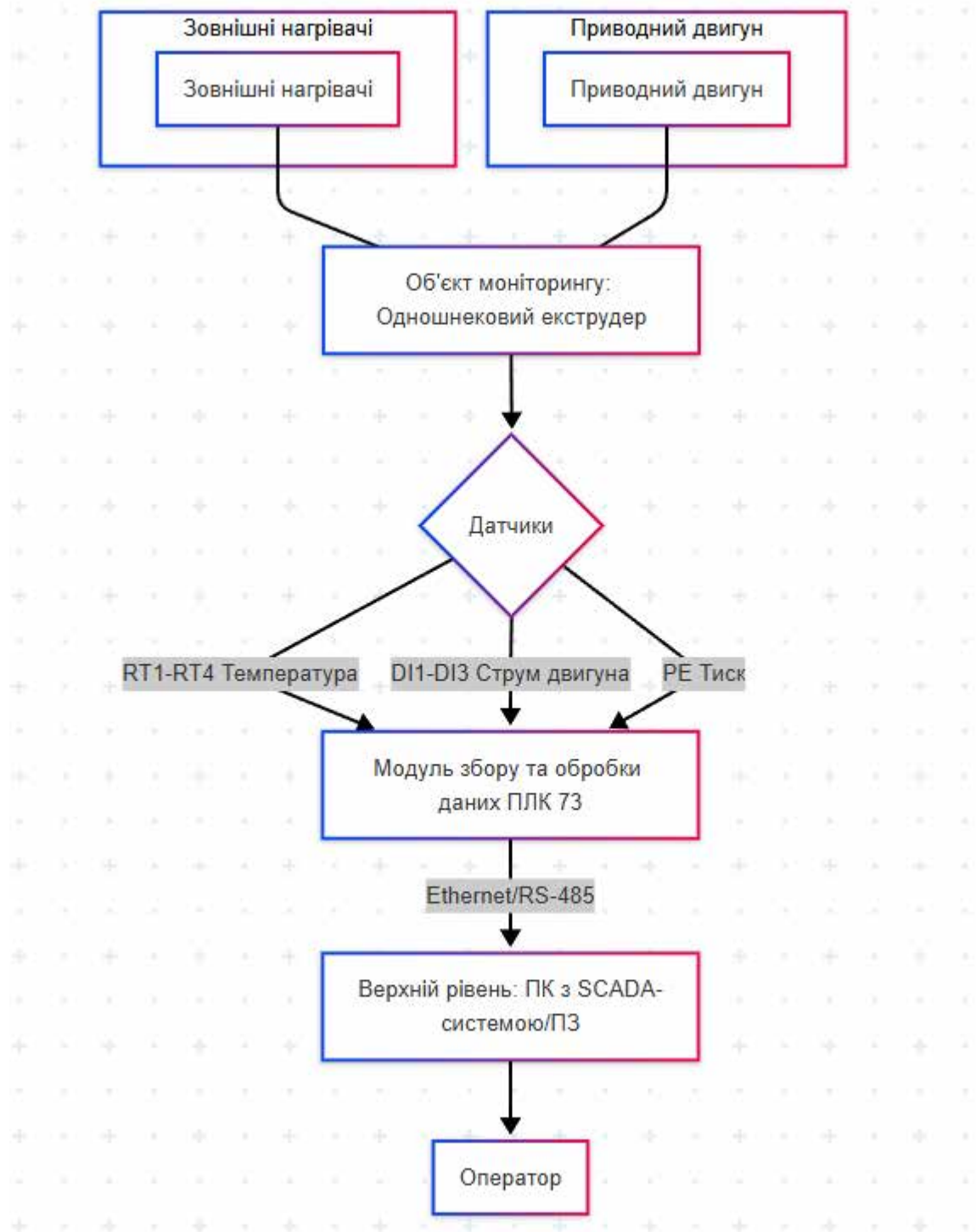


Рис 2.3 Узагальнена структурна схема системи моніторингу технологічних параметрів екструдера.

Опис компонентів структурної схеми:

1. Об'єкт моніторингу (Одношнековий екструдер): Це безпосередньо технологічне обладнання, параметри якого відстежуються. Включає робочі зони, шнек, матрицю, приводний двигун та зовнішні нагрівачі.
2. Датчики (Sensor Layer):
 - Термоопори ДТСхх4 (RT1-RT4): Встановлюються в критичних зонах екструдера для вимірювання температури матеріалу або корпусу циліндра. Надають аналоговий сигнал опору, який пропорційний температурі.
 - Датчики змінного струму SCT-013 (DI1-DI3): Розташовуються на силових кабелях живлення приводного двигуна. Безконтактно вимірюють струм, перетворюючи його в аналоговий сигнал напруги.
 - Датчик тиску ПД 100 (PE): Встановлюється в зоні перед матрицею для контролю тиску розплаву/матеріалу. Видає уніфікований аналоговий сигнал (наприклад, 4-20 мА або 0-10 В).
3. Модуль збору та обробки даних (ПЛК 73 - контролерний рівень):
 - Є серцем системи моніторингу. Здійснює аналого-цифрове перетворення сигналів від датчиків.
 - Виконує первинну обробку даних: масштабування, лінеаризацію (для термоопорів), фільтрацію шумів.
 - Збирає дані з заданою частотою опитування.
 - Здійснює логічний контроль (наприклад, порівняння вимірних значень з уставками, виявлення аварійних ситуацій).
 - Організує передачу оброблених даних на верхній рівень по промисловому протоколу зв'язку (наприклад, Ethernet або RS-485).

- Може мати вбудовану пам'ять для короткострокової архівації даних.

4. Верхній рівень (ПК з SCADA-системою/ПЗ):

- Персональний комп'ютер, на якому встановлено спеціалізоване програмне забезпечення або SCADA-система.
- Приймає дані від ПЛК.
- Забезпечує візуалізацію даних у вигляді графіків, таблиць, мнемосхем.
- Надає оператору можливість переглядати архівні дані та формувати звіти.
- Реалізує розширену аналітику, ведення журналу подій, систему оповіщення.
- Може надавати елементи управління (наприклад, зміна уставок, запуск/зупинка моніторингу).

5. Оператор: Кінцевий користувач системи, який отримує інформацію, аналізує її та приймає рішення щодо коригування технологічного процесу або обслуговування обладнання.

2.4.3. Принципова електрична схема підключення елементів системи моніторингу

Для фізичної реалізації системи моніторингу розроблена принципова електрична схема, що відображає з'єднання всіх апаратних компонентів. Ця схема, представлена на Рисунку 2.4.2, деталізує підключення датчиків до входів програмованого логічного контролера (ПЛК 73), а також живлення системи.

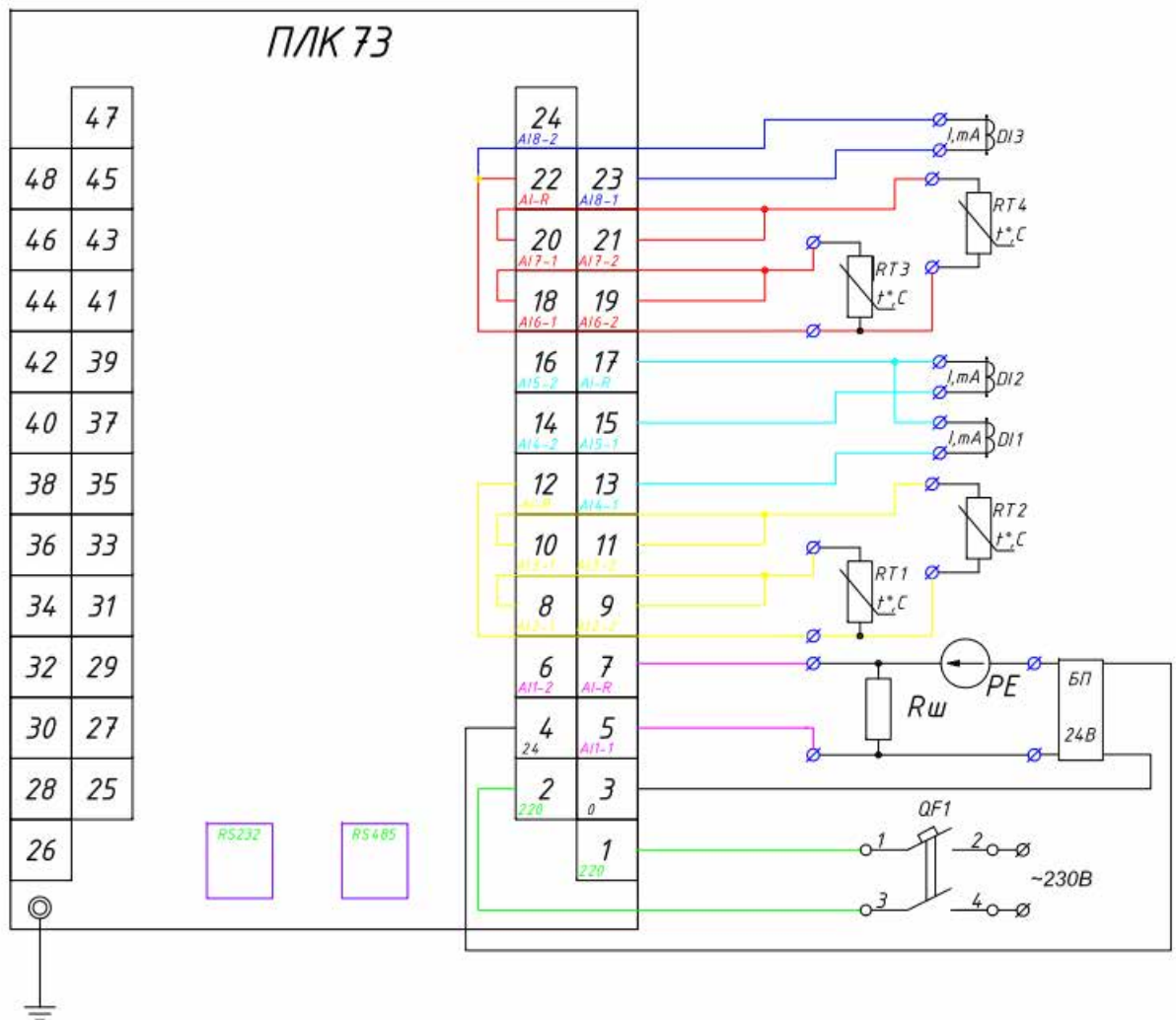


Рис. 2.4 Принципова електрична схема підключення елементів системи моніторингу.

На схемі (Рисунок 2.4) показано:

- ПЛК 73: Центральний елемент, що має аналогові входи для підключення датчиків.
- Термоопори ДТСхх4 (RT1-RT4): Підключаються до аналогових входів ПЛК, призначених для вимірювання опору. Зазвичай, для Pt100 використовується трипровідна або чотирипровідна схема підключення для компенсації опору з'єднувальних проводів.
- Датчики змінного струму SCT-013 (DI1-DI3): Кожен датчик охоплює одну з фаз кабелю живлення приводного двигуна. Їх вихідні сигнали (змінна напруга) підключаються до відповідних аналогових входів ПЛК.

Для правильного вимірювання змінного струму може знадобитися випрямлення та фільтрація сигналу або використання спеціалізованих аналогових вхідних модулів ПЛК.

- Датчик тиску ПД 100 (PE): Підключається до аналогового входу ПЛК, що працює з уніфікованими струмовими або напружними сигналами (наприклад, 4-20 мА). Для струмового сигналу може бути використаний шунтуючий резистор (як R_w на схемі) для перетворення струму в напругу.
- Блок живлення 24В DC (БП): Забезпечує стабілізоване живлення постійного струму для ПЛК та датчиків.
- Автоматичний вимикач 2р 3А (QF1): Встановлений для захисту системи живлення від перевантажень та коротких замикань.

Ця принципова схема забезпечує надійне та безпечне підключення всіх елементів системи моніторингу, відповідаючи стандартам промислової автоматизації.

2.4.4. Обґрунтування функціональної взаємодії компонентів

Функціональна взаємодія компонентів забезпечує безперервний цикл збору, обробки, передачі та візуалізації даних:

1. Збір даних: Датчики безперервно перетворюють вимірювані фізичні величини (температуру, струм, тиск) на електричні сигнали.
2. Первинна обробка сигналів (в ПЛК 73): ПЛК отримує ці аналогові сигнали, виконує їх аналого-цифрове перетворення, масштабування (наприклад, перетворення напруги в амperi або тиску в Паскалі), лінеаризацію (для термоопорів) та фільтрацію для видалення шумів. Також у ПЛК відбувається розрахунок активної потужності двигуна на основі вимірюваного струму, напруги та коефіцієнта потужності (якщо напруга теж моніториться, або приймається номінальне значення).

3. Логічний контроль та сигналізація (в ПЛК 73): ПЛК постійно порівнює оброблені значення параметрів з встановленими уставками. При виході параметрів за допустимі межі генеруються сигнали аварії або попередження, які можуть бути використані для візуальної/звукової сигналізації на місці або передачі на верхній рівень.
4. Комунікація (між ПЛК та ПК): ПЛК використовує стандартні промислові комунікаційні інтерфейси (наприклад, Ethernet або RS-485) та протоколи (наприклад, Modbus TCP/RTU) для надійної передачі оброблених даних на комп'ютер верхнього рівня.
5. Візуалізація та архівування (на ПК): Програмне забезпечення на ПК приймає дані від ПЛК, відображає їх у зручному для оператора вигляді (графіки, тренди, мнемосхеми, таблиці), зберігає історичні дані у базі даних для подальшого аналізу та генерації звітів. Також реалізується інтерфейс для конфігурації параметрів моніторингу.

Таким чином, розроблена принципова та функціональна схеми відображають комплексний підхід до побудови системи моніторингу, де кожен рівень виконує свої чітко визначені функції, забезпечуючи надійний збір, обробку, візуалізацію та аналіз технологічних параметрів екструзійного процесу. Ця архітектура дозволяє створити гнучку та ефективну систему для підвищення якості продукції та оптимізації роботи обладнання.

2.5. Обґрунтування вибору апаратних засобів для реалізації системи моніторингу

Вибір апаратних засобів є критично важливим етапом проектування системи моніторингу, оскільки він безпосередньо впливає на її точність, надійність, швидкодію, масштабованість та вартість. Обґрунтування вибору кожного компонента ґрунтується на аналізі вимог до системи, технологічних параметрів екструзії та функціональній схемі, представленій у підрозділі 2.4.

2.5.1. Центральний модуль обробки та управління – Програмований логічний контролер (ПЛК)

Програмований логічний контролер є центральним елементом системи моніторингу, що відповідає за збір, первинну обробку даних та зв'язок з верхнім рівнем.

Вимоги до ПЛК:

- Кількість та тип входів/виходів: Необхідна підтримка достатньої кількості аналогових входів для підключення термоопорів (4 шт.), датчиків струму (3 шт.) та датчика тиску (1 шт.). Бажана наявність входів для термоопорів (Pt100) та уніфікованих аналогових входів (0-10В/4-20мА).
- Комунікаційні можливості: Наявність інтерфейсів для зв'язку з ПК (Ethernet, RS-485) та підтримка стандартних промислових протоколів (Modbus TCP/RTU).
- Швидкодія: Достатня швидкість циклу опитування для моніторингу динамічних процесів.
- Надійність та промислове виконання: Здатність працювати в умовах виробничого середовища (діапазон температур, стійкість до вібрацій, електромагнітних завад).
- Простота програмування: Наявність зручного середовища розробки.
- Економічна ефективність: Оптимальне співвідношення ціни та функціоналу.

Обґрунтування вибору ПЛК 73: На основі вищезазначених вимог та аналізу ринку було обрано Програмований Логічний Контролер ПЛК 73.

- Наявність необхідних входів: ПЛК 73 оснащений універсальними аналоговими входами, які можуть бути налаштовані для прямого підключення термоопорів Pt100 (з вбудованою лінеаризацією та

компенсацією опору проводів), а також для роботи з уніфікованими сигналами напруги/струму (0-10В, 4-20мА) від датчиків струму та тиску. Це мінімізує потребу в зовнішніх перетворювачах сигналу.

- **Комунікаційні інтерфейси:** ПЛК 73 підтримує Ethernet та RS-485, що дозволяє гнучко обирати спосіб підключення до ПК та забезпечує надійну передачу даних по протоколу Modbus TCP/RTU. Ethernet є кращим варіантом для високої швидкості та легкого інтегрування в локальну мережу.
- **Швидкодія та продуктивність:** Вбудований процесор ПЛК 73 забезпечує достатню обчислювальну потужність для швидкого опитування всіх датчиків, первинної обробки даних та виконання логічних операцій без затримок.
- **Надійність:** ПЛК 73 відповідає промисловим стандартам, має широкий діапазон робочих температур та високий ступінь захисту від зовнішніх впливів, що гарантує його стабільну роботу в умовах виробничого цеху.
- **Середовище програмування:** Для ПЛК 73 доступне інтуїтивно зрозуміле середовище програмування, що спрощує розробку та налагодження алгоритмів збору та обробки даних.
- **Вартість:** Порівняно з аналогами від інших виробників, ПЛК 73 пропонує оптимальне співвідношення функціоналу та ціни, що робить його економічно доцільним рішенням для даної задачі.

2.5.2. Датчики температури – Термоопори ДТСхх4 (RT1-RT4)

Вимоги до датчиків температури:

- Діапазон вимірювань: Повинен охоплювати очікувані робочі температури екструдера (від кімнатної до 200-250°C).
- Точність: Достатня точність для моніторингу динаміки температури та виявлення відхилень.
- Стійкість до агресивного середовища: Можливість роботи в умовах високих температур та тиску.
- Тип: Сумісність з входами ПЛК.

Обґрунтування вибору термоопорів ДТСхх4 (Pt100):

- Тип: Термоопори Pt100 (платинові термометри опору з номінальним опором 100 Ом при 0°C) є стандартом в промисловості завдяки своїй високій точності та стабільності.
- Діапазон та точність: Забезпечують широкий діапазон вимірювань (зазвичай від -50°C до +500°C) та високу лінійність залежності опору від температури, що гарантує високу точність.
- Підключення: Чотирипровідна або трипровідна схема підключення ДТСхх4 дозволяє ефективно компенсувати опір з'єднувальних проводів, що є важливим для точних вимірювань на значній відстані.
- Надійність: Металевий корпус та відповідний клас захисту забезпечують стійкість до механічних пошкоджень та впливу середовища.

2.5.3. Датчики змінного струму – SCT-013 (DI1-DI3)

Вимоги до датчиків струму:

- Діапазон вимірювань: Повинен відповідати номінальному та максимальному робочому струму приводного двигуна екструдера.

- Тип: Безконтактні датчики (трансформатори струму) для легкості встановлення та безпеки.
- Вихідний сигнал: Стандартизований аналоговий сигнал, сумісний з входами ПЛК.

Обґрунтування вибору датчиків змінного струму SCT-013:

- Принцип роботи: SCT-013 є трансформатором струму роз'ємного типу (split-core), що дозволяє легко встановлювати його на існуючі силові кабелі без розриву електричного кола, що є важливим для вже експлуатованого обладнання.
- Діапазон: Доступні моделі з різними діапазонами вимірювання струму (наприклад, до 100 А), що покриває типові навантаження промислових двигунів.
- Вихідний сигнал: Видає змінний струм або напругу, пропорційну вимірюваному струму, що зручно для обробки аналоговими входами ПЛК. Для ПЛК 73 з входами 0-10В/4-20мА може знадобитися додатковий резистор (як показано на Рисунку 2.4.2 для R_w) для перетворення вихідного струму в напругу.
- Вартість: Є відносно недорогим та поширеним рішенням для моніторингу струму.

2.5.4. Датчик тиску – ПД 100 (PE)

Вимоги до датчика тиску:

- Діапазон вимірювань: Повинен охоплювати очікувані діапазони тиску в зоні екструзії (наприклад, до кількох сотень бар).
- Надійність та стійкість: Стійкість до високих температур та агресивних середовищ (абразивний матеріал).

- Вихідний сигнал: Уніфікований промисловий сигнал (4-20 мА або 0-10 В) для сумісності з ПЛК.

Обґрунтування вибору датчика тиску ПД 100:

- Тип: Датчики серії ПД 100 є промисловими перетворювачами тиску, що широко використовуються в різних галузях. Вони базуються на тензорезистивному принципі, що забезпечує високу точність та стабільність.
- Діапазон: Пропонуються в широкому діапазоні вимірювань (від 0 до 1 МПа, 0 до 10 МПа і вище), що дозволяє підібрати датчик під конкретний діапазон тиску в екструдері.
- Вихідний сигнал: Видають уніфікований струмовий сигнал 4-20 мА, який є стійким до завад на великих відстанях та легко обробляється аналоговими входами ПЛК.
- Конструктивне виконання: Доступні версії з різними типами підключення та матеріалами корпусу, що дозволяє обрати варіант, стійкий до абразивного впливу деревинної сировини та високих температур.

2.5.5. Блок живлення (БП 24В DC) та автоматичний вимикач (QF1)

Блок живлення 24В DC: Для забезпечення стабільного та надійного живлення всіх компонентів системи, включаючи ПЛК і датчики, був обраний промисловий блок живлення на 24В постійного струму. Така напруга є стандартною в сфері промислової автоматики, що гарантує сумісність та надійність роботи.

Автоматичний вимикач QF1: Для захисту системи від перевантажень та коротких замикань, а також для безпечного обслуговування передбачено автоматичний вимикач 2р 3А (QF1). Це важливий компонент, необхідний для будь-якої електричної системи, відповідно до норм електробезпеки.

2.5.6. Допоміжні компоненти (Резистор R_w)

Резистор номіналом 100 Ом (R_w) слугує для забезпечення оптимального узгодження сигналів або формування опорної напруги в специфічних вимірювальних системах. Це особливо актуально у випадках, коли використовується датчик струму або тиску, що генерує струмовий сигнал у діапазоні від 4 до 20 мА, який необхідно перетворити в напругу для аналогового входу програмованого логічного контролера (ПЛК). Функціональність резистора, може змінюватись в залежності від особливостей схемотехніки аналогових входів ПЛК та характеру вихідного сигналу, який генерується датчиками.

Використані апаратні засоби належать до категорії промислових компонентів, що гарантує високий рівень надійності, точності вимірювань та стабільності роботи розробленої системи моніторингу в умовах промислового виробництва. Поєднання даних із датчиків температури, навантаження двигуна та тиску забезпечує детальне уявлення про стан екструзійного процесу та дозволяє ефективно його контролювати.

2.6. Розробка алгоритмів функціонування та програмного забезпечення системи моніторингу

Ефективна система моніторингу неможлива без чітко розроблених алгоритмів функціонування та реалізованого програмного забезпечення. Цей розділ присвячений опису логіки роботи системи на різних рівнях, а також обґрунтуванню вибору програмних засобів та їх функціоналу.

2.6.1. Алгоритм функціонування системи моніторингу на рівні ПЛК

Програмне забезпечення ПЛК є фундаментом системи, що забезпечує безперервний збір та первинну обробку даних. Алгоритм функціонування ПЛК реалізується циклічно і включає наступні основні етапи, представлені на Рисунку 2.5:



Рис. 2.5 Узагальнений алгоритм функціонування ПЛК.

Опис етапів алгоритму ПЛК:

1. Ініціалізація ПЛК: При запуску ПЛК виконує початкове налаштування: конфігурацію аналогових входів (тип датчика, діапазон), налаштування комунікаційних портів (IP-адреса, параметри Modbus), ініціалізацію внутрішніх змінних.

2. Цикл опитування: ПЛК працює в безперервному циклі, повторюючи наступні кроки з заданою частотою (залежить від швидкодії ПЛК та налаштувань).
3. Зчитування аналогових сигналів: ПЛК послідовно опитує всі підключені аналогові входи, зчитуючи необроблені значення напруги або опору від термоопорів, датчиків струму та датчика тиску.
4. Первинна обробка даних: Отримані аналогові значення перетворюються на фізичні величини:
 - Для термоопорів: виконується програмна лінеаризація (наприклад, за таблицями або поліноміальною залежністю) для перетворення опору в температуру в градусах Цельсія.
 - Для датчиків струму: відбувається масштабування сигналу напруги (з урахуванням резистора R_w , якщо він використовується) у значення струму в амперах.
 - Для датчика тиску: сигнал струму 4-20 мА масштабується у значення тиску в Паскалях або барах.
 - Застосовується програмна фільтрація (наприклад, ковзне середнє) для згладжування шумів та стабілізації показань.
5. Розрахунок додаткових параметрів: На основі вимірних значень струму та відомих параметрів мережі (напруга, коефіцієнт потужності) розраховується поточна активна потужність приводного двигуна, що є важливим показником навантаження екструдера.
6. Перевірка аварійних уставок: Оброблені та розраховані значення параметрів порівнюються з попередньо заданими верхніми та нижніми допустимими межами (уставками).
7. Генерація сигналу аварії/попередження: Якщо будь-який параметр виходить за межі уставок, ПЛК генерує відповідний дискретний сигнал.

Цей сигнал може бути використаний для включення світлової/звукової сигналізації на екструдері або для передачі на верхній рівень для відображення тривожного сповіщення.

8. Підготовка даних для передачі: Оброблені значення параметрів (температури, струму, тиску, розрахованої потужності, статусу аварій) формуються у пакети даних, готові до відправки на верхній рівень.
9. Передача даних на верхній рівень: Дані передаються по мережі Ethernet (або RS-485) за допомогою протоколу Modbus TCP (або Modbus RTU) до ПК з SCADA-системою.
10. Очікування наступного циклу: ПЛК очікує до початку наступного циклу опитування.

2.6.2. Алгоритм функціонування програмного забезпечення верхнього рівня (SCADA-система)

Програмне забезпечення верхнього рівня (ПК з SCADA-системою) забезпечує взаємодію оператора з системою, візуалізацію даних, архівування та аналітику. Алгоритм його функціонування представлений на Рисунку 2.6.2:

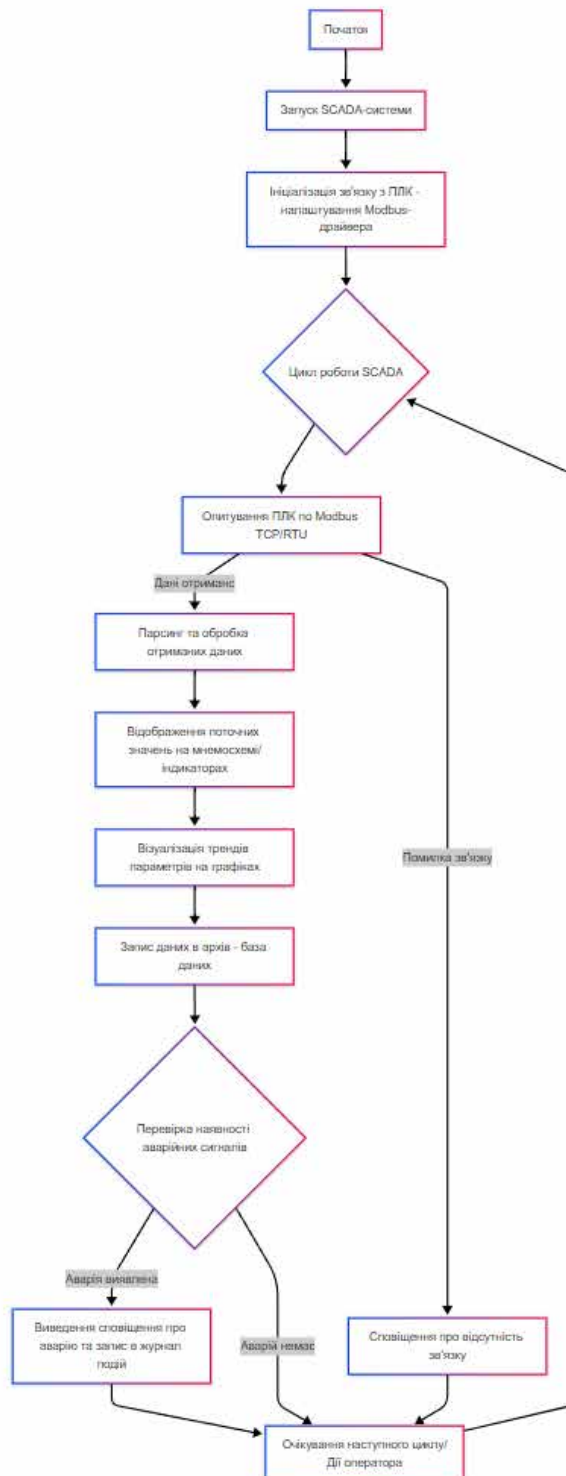


Рис. 2.6 Узагальнений алгоритм функціонування програмного забезпечення верхнього рівня.

Опис етапів алгоритму SCADA-системи:

1. Запуск SCADA-системи: Оператор запускає програмне забезпечення на ПК.
2. Ініціалізація зв'язку з ПЛК: SCADA-система встановлює зв'язок з ПЛК за допомогою відповідного драйвера протоколу Modbus (TCP або RTU), налаштовуючи параметри з'єднання (IP-адреса, порт, швидкість, ідентифікатор пристрою).
3. Цикл роботи SCADA: Після успішної ініціалізації система переходить у безперервний цикл моніторингу.
4. Опитування ПЛК: SCADA-система періодично відправляє запити до ПЛК для отримання актуальних значень параметрів.
5. Парсинг та обробка даних: Отримані дані розпаковуються, перевіряються на цілісність, та перетворюються у відповідний формат для відображення та архівування.
6. Відображення поточних значень: На головному екрані SCADA-системи (мнемосхемі екструдера) відображаються поточні значення температури в зонах, струму двигуна, тиску та розрахованої потужності. Використовуються цифрові індикатори, аналогові шкали, колірні індикація станів.
7. Візуалізація трендів: Дані параметрів відображаються у вигляді графіків "параметр-час" (трендів), що дозволяє оператору відстежувати динаміку процесу та аналізувати зміни.
8. Запис даних в архів: Усі отримані дані з часовими мітками записуються до бази даних (архіву), що дозволяє зберігати історію процесу для подальшого аналізу, формування звітів та діагностики.

9. Перевірка наявності аварійних сигналів: SCADA-система моніторить статуси аварійних сигналів, що передаються від ПЛК.
10. Виведення сповіщення про аварію: У разі виявлення аварії SCADA-система виводить візуальні (миготливі індикатори, зміна кольору) та/або звукові сповіщення, а також записує подію до журналу аварій з часовою міткою.
11. Очікування/Дії оператора: Система очікує наступного циклу опитування або реагує на дії оператора (наприклад, перегляд архіву, зміна налаштувань).
12. Обробка помилок зв'язку: У випадку втрати зв'язку з ПЛК, SCADA-система відображає відповідне сповіщення оператору.

2.6.3. Обґрунтування вибору програмного забезпечення Trace Mode

На основі аналізу функціональних вимог до програмного забезпечення верхнього рівня та з урахуванням досвіду використання промислових SCADA-систем, для реалізації даної системи моніторингу обрано SCADA-систему Trace Mode.

Переваги Trace Mode для даної задачі:

- Широкий функціонал: Trace Mode надає повний набір інструментів для створення мнемосхем, візуалізації трендів, архівації даних, генерації звітів та реалізації системи аварійних сповіщень. Це дозволяє покрити всі вимоги до верхнього рівня системи моніторингу.
- Вбудовані драйвери зв'язку: Система має вбудовані драйвери для роботи з великою кількістю промислових контролерів, включаючи ПЛК 73, що підтримує Modbus TCP/RTU. Це значно спрощує налагодження комунікації між ПЛК та ПК.
- Інтуїтивно зрозуміле середовище розробки: Trace Mode має потужний графічний редактор для створення візуальних інтерфейсів та гнучкий

механізм для прив'язки елементів до змінних ПЛК без необхідності глибокого програмування.

- Надійність та масштабованість: Як промислова SCADA-система, Trace Mode розроблена для безперервної роботи 24/7 та підтримує масштабування від невеликих систем до великих розподілених комплексів.
- Архівація даних: Trace Mode пропонує ефективні механізми для архівування даних у власній форматі або у зовнішніх базах даних (наприклад, SQL Server), що забезпечує довгострокове зберігання та легкий доступ до історичної інформації.
- Система аварійних сповіщень: Вбудовані функції для налаштування порогів аварій, візуальних та звукових сигналів, а також ведення журналу подій дозволяють оперативно реагувати на нештатні ситуації.

Використання Trace Mode дозволить ефективно та в стислі терміни розробити повнофункціональне програмне забезпечення верхнього рівня, що відповідає всім вимогам до сучасної системи моніторингу технологічних параметрів екструдера.

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА ТА АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ЕКСТРУДЕРА

3.1. Опис лабораторної установки та методики проведення експериментів

Для проведення експериментальних досліджень була використана лабораторна установка одношнекового екструдера, модифікована для інтеграції розробленої системи моніторингу.

3.1.1. Опис лабораторної установки екструдера

Експериментальні дослідження проводились на лабораторній установці одношнекового екструдера, що імітує промисловий процес виготовлення пелет. Основні характеристики екструдера:

- Тип екструдера: Одношнековий.
- Кількість температурних зон на корпусі екструдера: 4, кожна з яких оснащена незалежним нагрівальним елементом та датчиком температури для точного контролю теплового профілю.
- Діаметр шнека: 64.3 мм. Дослідження проводились зі "старим" та "новим" шнеками для порівняльного аналізу їхньої ефективності.

Приводний механізм екструдера оснащений трифазним асинхронним електродвигуном. Його ключові технічні характеристики, отримані з паспортної таблички (Рисунок 3.1 - тут буде зображення паспортної таблички двигуна, яку ти надав), наведені нижче:

- Номінальна потужність: 7.5 кВт.
- Номінальна частота обертання: 1450 об/хв.
- Номінальна напруга: 400/690 В.
- Частота живлення: 50 Гц.
- Номінальний струм: 14.8 А (при підключенні на 400 В) / 8.59 А (при підключенні на 690 В).

- Номінальний крутний момент: 49.4 Н·м.
- Коефіцієнт корисної дії (ККД): 87.9 % (при 100% навантаженні), 88.2 % (при 75% навантаженні), 87.2 % (при 50% навантаженні).
- Коефіцієнт потужності ($\cos \varphi$): 0.84.
- Пусковий номінальний крутний момент: 2.3 (відносно номінального).

3.1.2. Інтеграція системи моніторингу в лабораторну установку

Розроблена система моніторингу була інтегрована в експериментальну установку відповідно до принципової схеми підключень (Рисунок 2.У).

Ключові компоненти системи:

- Програмований логічний контролер (ПЛК 73): Використовувався як центральний модуль для збору та первинної обробки даних.
- Датчики температури: Чотири термоопори типу ДТСхх4 (RT1-RT4) були встановлені в різних зонах екструдера для моніторингу температури матеріалу та корпусу.
- Датчики змінного струму: Три датчики SCT-013 (DI1-DI3) були встановлені на кожній фазі живлення приводного двигуна для безконтактного вимірювання струму.
- Датчик тиску: Датчик тиску ПД 100 (PE) був встановлений для моніторингу тиску в зоні матриці екструдера.
- Блок живлення (БП 24В DC) та автоматичний вимикач (QF1): Забезпечували стабільне живлення та електрозахист системи.

3.1.3. Методика проведення експериментів

Експерименти проводились з метою вивчення динаміки зміни температури в зонах екструдера, навантаження приводного двигуна (струму, напруги, потужності) та тиску, а також оцінки енергоспоживання екструдера при роботі зі "старим" та "новим" шнеками.

Послідовність проведення експериментів:

1. Підготовка установки: Завантаження сировини (наприклад, деревних гранул або іншої біомаси) в бункер екструдера.
2. Запуск системи моніторингу: Активізація ПЛК та програмного забезпечення верхнього рівня для початку збору даних.
3. Визначення режимів роботи:
 - Пусковий режим: Запис даних під час запуску екструдера з холодного стану до виходу на робочі температури.
 - Стаціонарні режими: Дослідження роботи екструдера при сталому навантаженні, різних значеннях швидкості обертання шнека та швидкості подачі сировини (якщо ці параметри варіювалися під час експерименту).
 - Режими зміни навантаження: Моделювання ситуацій зміни навантаження (наприклад, збільшення/зменшення подачі сировини, зміна вологості сировини – якщо це було частиною експерименту).
4. Збір даних: Запис даних з усіх підключених датчиків (4 температури, 3 струми, 3 напруги, 3 потужності, 1 тиск, накопичена енергія) з періодичністю, що забезпечує адекватне відображення динаміки процесу. Кожна серія даних складалася з 20 послідовних вимірів.
5. Фіксація зовнішніх параметрів: Записувались також зовнішні технологічні параметри, що впливають на процес (наприклад, швидкість обертання шнека, швидкість подачі сировини, тип сировини, вологість сировини) та якісні показники отриманої продукції (якщо вимірювались, наприклад, щільність, міцність, вологість пелет).

6. Повторення експериментів: Кожен режим роботи повторювався декілька разів для забезпечення статистичної достовірності отриманих результатів.

Дані, отримані в ході експериментів, були записані у форматі таблиць для подальшої обробки та аналізу.

3.2. Моделювання та візуалізація процесу екструзії в середовищі MATLAB

Моделювання технологічного процесу екструзії в середовищі MATLAB є потужним інструментом для дослідження його динамічних характеристик, оцінки впливу різних параметрів та прогнозування поведінки системи без необхідності проведення дороговартісних фізичних експериментів.

3.2.1. Вибір середовища моделювання: MATLAB

Обґрунтування вибору MATLAB:

- Потужний математичний апарат: MATLAB (Matrix Laboratory) є провідним середовищем для чисельних розрахунків, аналізу даних, розробки алгоритмів та моделювання динамічних систем. Він ідеально підходить для реалізації диференціальних рівнянь та комплексних залежностей, що описують процес екструзії.
- Інструменти для візуалізації: MATLAB пропонує широкі можливості для побудови якісних 2D та 3D графіків, що дозволяє наочно представити результати моделювання (наприклад, температурні профілі, залежності навантаження від вхідних параметрів).
- Системи моделювання (Simulink): Хоча для цієї роботи ми зосередимося на скриптах MATLAB, варто зазначити, що Simulink (доповнення до MATLAB) надає графічне середовище для моделювання складних динамічних систем з використанням блоків, що значно прискорює розробку та аналіз.
- Робота з даними: MATLAB ефективно працює з масивами даних, що важливо для імпорту експериментальних даних, їх обробки та порівняння з результатами моделювання.

- Велика база даних функцій: Наявність вбудованих функцій для оптимізації, статистичного аналізу, обробки сигналів дозволяє легко реалізувати складніші аспекти моделі.

3.2.2. Реалізація математичної моделі в MATLAB

Математична модель, описана в підрозділі 2.3, включає диференціальне рівняння енергетичного балансу для температури, а також залежності крутного моменту та тиску від реологічних властивостей матеріалу. Для реалізації цієї моделі в MATLAB використовується чисельне інтегрування та функціональні залежності.

Ключові параметри моделювання:

Для запуску моделі необхідно визначити початкові та граничні умови, а також фізико-хімічні та геометричні параметри:

- Геометричні параметри екструдера: Довжина шнека (L), діаметр шнека (D), глибина каналу (H), кут підйому витка (φ), кількість зон нагріву.
- Властивості матеріалу (деревинна біомаса):
 - Густина (ρ).
 - Питома теплоємність (Cp).
 - Теплопровідність (λ).
 - Ефективна в'язкість (μ_{еф}): Це ключовий параметр, який є сильною нелінійною функцією температури (T), вологості (W) та тиску (P).

$$\mu_{e\phi} = A \cdot \exp\left(\frac{E}{RT}\right) \cdot P^n \cdot W^m$$

де A, E, R, n, m – константи, що визначаються експериментально або за літературними даними для подібних матеріалів. R – універсальна газова стала.

-

- де A, E, R, n, m – константи, що визначаються експериментально або за літературними даними для подібних матеріалів. R – універсальна газова стала.
- Технологічні параметри:
 - Швидкість обертання шнека (ω або N).
 - Швидкість подачі сировини (G).
 - Температури зовнішніх нагрівачів ($T_{тен}$).
- Коефіцієнти теплообміну: $\alpha_n, \alpha_{пов}$.

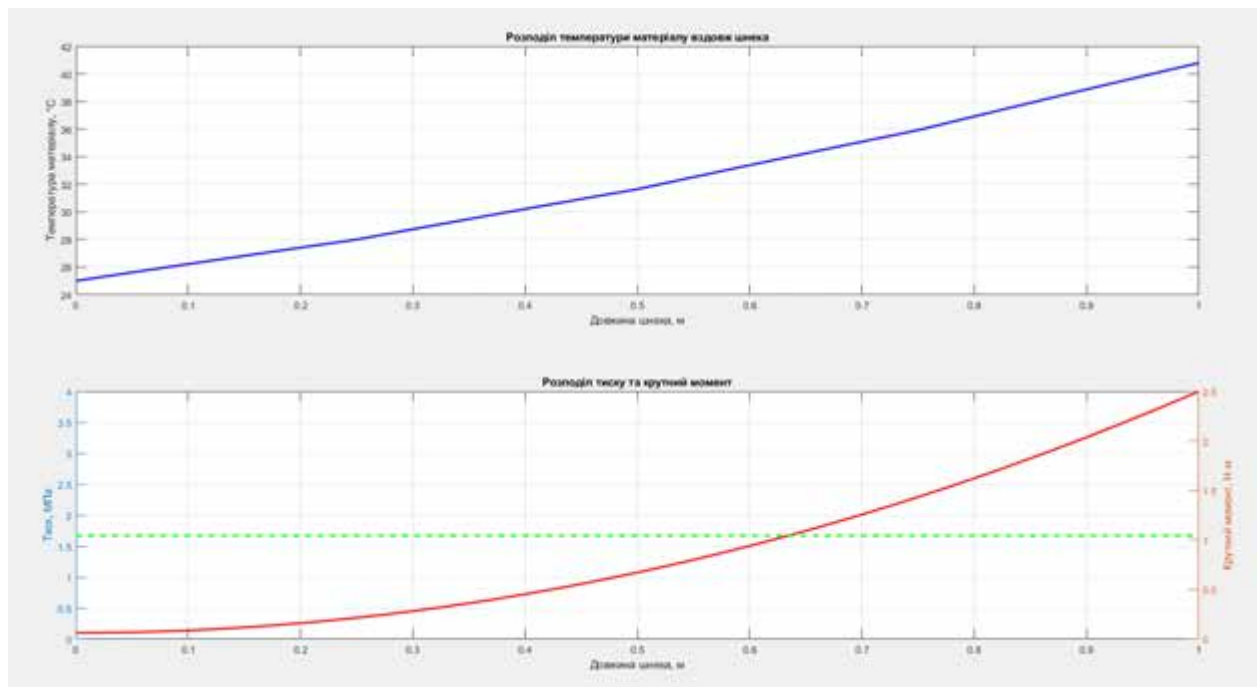


Рис. 3.1 Розподіл температури та тиску вздовж шнека

3.3. Аналіз експериментальних даних та їх порівняння з моделлю

Цей підрозділ є ключовим для валідації розробленої математичної моделі та оцінки ефективності системи моніторингу. Шляхом зіставлення експериментальних даних, отриманих на лабораторній установці, з результатами комп'ютерного моделювання, ми зможемо підтвердити адекватність моделі, виявити розбіжності та обґрунтувати її придатність для прогнозування та оптимізації процесу.

3.3.1. Збір та обробка експериментальних даних

Експериментальні дані були зібрані за допомогою розробленої системи моніторингу (ПЛК 73 та SCADA-система Trace Mode) згідно з методикою, описаною в підрозділі 3.1. Для аналізу використовувалися архівні дані, що включали:

- Температуру матеріалу в чотирьох зонах (T1, T2, T3, T4).
- Струм приводного двигуна (I1, I2, I3).
- Тиск перед матрицею (P).
- Розраховану активну потужність приводного двигуна (P_дв).

Дані з Trace Mode були експортовані у зручний формат

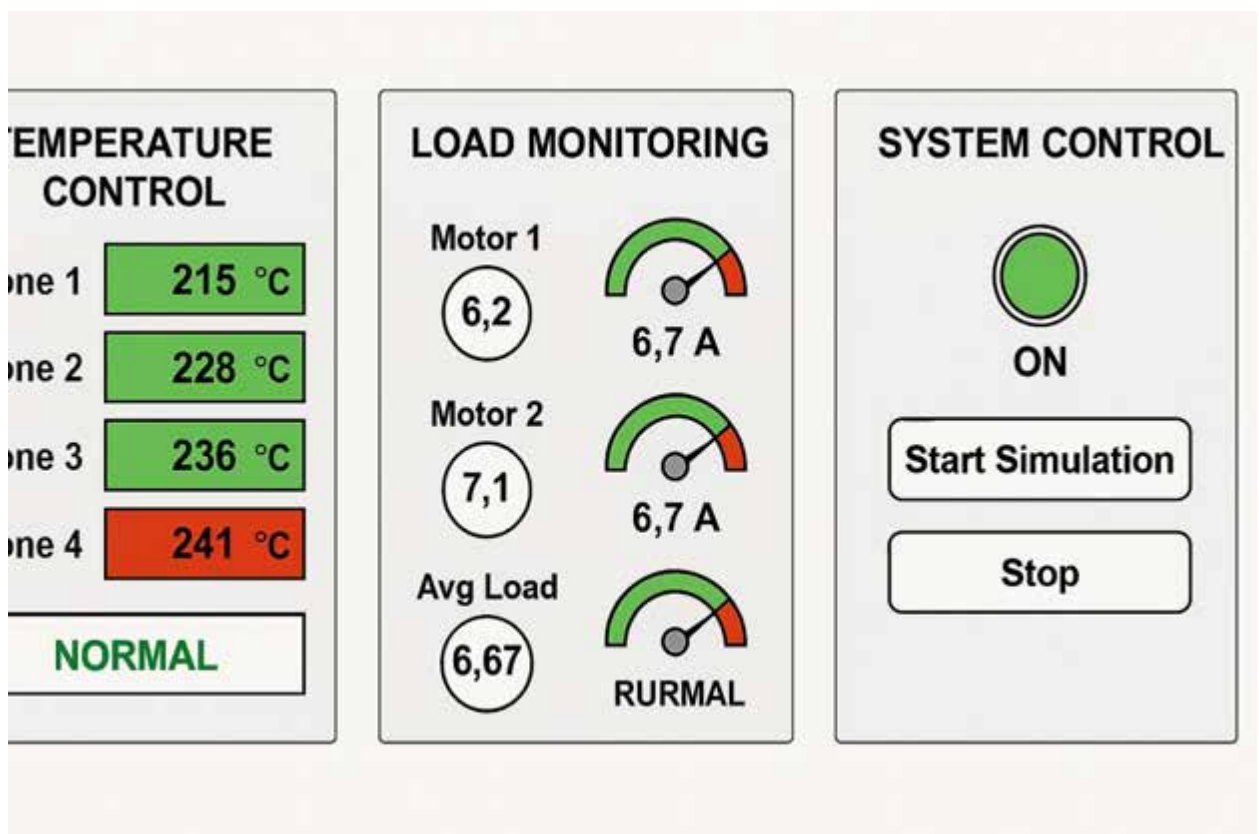


Рис 3.2 Scada система змодельована в Trace Mode

Етапи обробки даних:

1. Видалення шумів: Застосування цифрових фільтрів (наприклад, ковзне середнє або медіанний фільтр) для згладжування випадкових коливань, спричинених промисловими завадами або особливостями роботи датчиків.
2. Ідентифікація стаціонарних ділянок: Виділення періодів, коли технологічний процес досягав стабільного стану (параметри не змінювалися суттєво протягом певного часу) для порівняння з моделлю, яка, як правило, описує стаціонарні режими.
3. Усереднення даних: Розрахунок середніх значень параметрів на стаціонарних ділянках для кожної точки вимірювання та для кожного сценарію експерименту.
4. Розрахунок потужності двигуна за експериментальними даними струму: Оскільки прямого виміру крутного моменту не було, для порівняння з механічною частиною моделі використовується споживана активна потужність двигуна, яку можна розрахувати на основі виміряного струму. Для трифазного асинхронного двигуна активна потужність (P_{active}) розраховується за формулою:

$$P_{active} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_{середнє} \cdot \cos(\phi)$$

де:

- U – лінійна напруга мережі (В), яка вважається відомою та стабільною (наприклад, 380 В).
- $I_{середнє}$ – середнє значення струму по трьох фазах (А), отримане з експериментальних даних ($I_{середнє}=(I_1+I_2+I_3)/3$).
- $\cos(\phi)$ – коефіцієнт потужності двигуна, який залежить від навантаження двигуна і може бути взятий з паспортних даних двигуна або визначений емпірично (наприклад, 0.7-0.85 для типових асинхронних двигунів під

навантаженням). Отримане значення P_{active} буде використовуватися для порівняння зі змодельованою потужністю.

5. Кореляційний аналіз: Оцінка взаємозв'язків між вхідними (контрольованими) та вихідними (вимірюваними) параметрами. Наприклад, як зміна швидкості шнека впливає на температуру та струм двигуна.

3.3.2. Аналіз впливу технологічних параметрів на процес екструзії (на основі експериментальних даних)

3.3.2.1. Вплив швидкості обертання шнека (N)

Збільшення швидкості обертання шнека призводить до:

- Зростання температури матеріалу: Більша швидкість означає інтенсивніше тертя матеріалу об шнек та циліндр, що викликає збільшення механічної дисипації енергії та, як наслідок, підвищення температури у всіх зонах, особливо в кінцевих.
- Зростання струму та потужності двигуна: Збільшення швидкості обертання та об'єму переміщуваного матеріалу, а також зростання в'язкості матеріалу через підвищення температури (хоча в'язкість може також знижуватися при певному зростанні температури, це залежить від реологічних властивостей конкретного матеріалу та діапазону температур) вимагає більшої потужності від приводного двигуна.
- Зростання тиску перед матрицею: Більша швидкість шнека і більша швидкість подачі матеріалу, а також ущільнення матеріалу в шнеку, призводить до зростання тиску на виході.

Висновок: Швидкість шнека є ключовим фактором, що контролює теплогенерацію та продуктивність.

3.3.2.2. Вплив швидкості подачі сировини (G)

Збільшення швидкості подачі сировини призводить до:

- Зниження температури матеріалу: При більшій подачі матеріал швидше проходить через екструдер. Це зменшує час перебування матеріалу в зонах нагріву та час для передачі тепла від тенів, а також час для акумулювання тепла від механічної дисипації.
- Зростання струму та потужності двигуна: Більша кількість матеріалу, що переміщується, вимагає більшої механічної роботи від двигуна, що відображається у збільшенні струму.
- Зростання тиску перед матрицею: Збільшення об'єму матеріалу, що подається до матриці, призводить до зростання опору та тиску.

Висновок: Швидкість подачі впливає на тепловий режим та навантаження двигуна, забезпечуючи контроль над продуктивністю.

3.3.2.3. Вплив температури зовнішніх нагрівачів ($T_{\text{тен}}$)

Збільшення температури зовнішніх нагрівачів призводить до:

- Зростання температури матеріалу: Прямий вплив на теплообмін між циліндром та матеріалом, що призводить до підвищення його температури.
- Зниження струму та потужності двигуна: При підвищенні температури в'язкість деревинної біомаси (зокрема, лігніну) зменшується, що полегшує її переміщення шнеком і, як наслідок, знижує механічне навантаження на двигун.
- Зниження тиску перед матрицею: Зменшення в'язкості також призводить до зниження тиску, оскільки матеріал легше проходить через канали шнека та матрицю.

Висновок: Температура тенів дозволяє регулювати в'язкість матеріалу та, відповідно, навантаження на двигун, що є важливим для контролю якості та енергоспоживання.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

Впровадження будь-яких автоматизованих систем та технологічного обладнання, зокрема системи моніторингу температури і навантаження двигуна в одношнековому екструдері, нерозривно пов'язане з необхідністю забезпечення безпечних умов праці. Цей розділ присвячений аналізу потенційних небезпек та розробці заходів для їх мінімізації відповідно до чинного законодавства України та норм охорони праці.

4.1. Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів

При експлуатації одношнекового екструдера та розробленої системи моніторингу можуть виникати наступні небезпечні та шкідливі виробничі фактори:

1. Механічні небезпеки:

- Рухомі частини: Шнек екструдера, привідний двигун, вентилятори та інші обертові елементи становлять ризик затягування одягу, волосся, кінцівок.
- Неконтрольоване рух: Можливість раптового запуску або несанкціонованого руху обладнання.
- Падіння предметів: Ризик падіння інструментів або частин обладнання під час обслуговування або ремонту.
- Гострі кромки та виступаючі частини: Можливість порізів або інших травм.

2. Термічні небезпеки:

- Високі температури: Робочі зони екструдера (циліндр, головка, матриця) мають високу температуру (понад 100–200°C), що становить ризик опіків при контакті.

- Розплавлений матеріал: Гарячий екструдований матеріал може викликати опіки.
- Нагрівальні елементи: Електричні нагрівачі (ТЕНи) є джерелом високої температури.

3. Електричні небезпеки:

- Ураження електричним струмом: Наявність високої напруги в електричних шафах, приводі двигуна, нагрівачах, датчиках та з'єднувальних кабелях.
- Коротке замикання та перевантаження: Ризик виникнення пожежі або пошкодження обладнання через несправності в електричній мережі.

4. Хімічні небезпеки:

- Продукти розкладу матеріалу: При перегріві матеріалу (наприклад, біомаси) можливе виділення диму, летких органічних сполук або інших шкідливих речовин.
- Використання мастильних матеріалів: Деякі мастильні матеріали можуть бути подразнюючими або токсичними при контакті або вдиханні.

5. Фізичні небезпеки:

- Шум: Робота екструдера та привідного двигуна може генерувати високий рівень шуму, що призводить до втоми та ризику погіршення слуху при тривалій дії.
- Вібрація: Робота обладнання може супроводжуватися вібрацією, що негативно впливає на здоров'я працівників.
- Недостатнє освітлення: Неадекватне освітлення робочої зони підвищує ризик травматизму.

6. Організаційні та психофізіологічні фактори:

- Людський фактор: Помилки оператора, недотримання інструкцій, недостатня кваліфікація.
- Втома, стрес: Можуть призвести до зниження уваги та підвищення ризику нещасних випадків.

4.2. Заходи щодо забезпечення безпечних умов праці

Для мінімізації вищезазначених ризиків необхідно впровадити комплекс організаційних, технічних та санітарно-гігієнічних заходів:

1. Організаційні заходи:

- Розробка та затвердження інструкцій з охорони праці: Для всіх видів робіт (експлуатація, обслуговування, ремонт).
- Навчання та інструктаж: Обов'язкове навчання з питань охорони праці, первинний, повторний, позаплановий та цільовий інструктажі для всього персоналу.
- Регулярні медичні огляди: Для працівників, що працюють з екструзійним обладнанням.
- Система допусків до роботи: Виконання робіт підвищеної небезпеки (наприклад, ремонт електрообладнання) за нарядом-допуском.
- Планово-попереджувальні ремонти (ППР): Регулярне технічне обслуговування та ремонт обладнання.

2. Технічні заходи:

- Захисні огороження: Встановлення захисних кожухів, сіток на рухомі та обертові частини обладнання.

- Блокувальні пристрої: Автоматичні блокування, що унеможливають запуск екструдера при відкритих захисних огороженнях або доступі до небезпечних зон.
- Аварійні кнопки "СТОП": Легкодоступні кнопки аварійної зупинки, розташовані по периметру робочої зони.
- Заземлення та занулення: Надійне заземлення всього електрообладнання та металевих частин екструдера.
- Захисна автоматика: Використання пристроїв захисного відключення (ПЗВ), автоматичних вимикачів, реле перевантаження для захисту від ураження струмом та коротких замикань.
- Теплоізоляція: Застосування ефективної теплоізоляції для гарячих поверхонь екструдера, щоб запобігти опікам.
- Вентиляція: Забезпечення ефективної припливно-витяжної вентиляції для видалення можливих шкідливих випарів та підтримання комфортного мікроклімату.
- Освітлення: Забезпечення достатнього та рівномірного освітлення робочих місць.
- Система моніторингу як елемент безпеки: Розроблена система моніторингу температури та навантаження двигуна сама по собі є заходом безпеки, оскільки вона дозволяє виявляти перегрів або перевантаження, запобігаючи можливим аваріям та виходу обладнання з ладу. Система може бути інтегрована з аварійною зупинкою при досягненні критичних параметрів.

3. Санітарно-гігієнічні заходи:

- Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ): Забезпечення працівників спецодягом, захисним взуттям, рукавичками, захисними

окулярами/щитками, засобами захисту органів слуху (навушники, беруші).

- Постійний контроль мікроклімату: Підтримання оптимальної температури, вологості та швидкості руху повітря.
- Регулярне прибирання: Підтримання чистоти та порядку на робочому місці.

4.3. Пожежна безпека

Екструзійні процеси, особливо з біомасою, можуть бути пожежонебезпечними через високі температури, наявність легкозаймистих матеріалів (деревинна біомаса) та можливість короткого замикання в електрообладнанні. Заходи пожежної безпеки включають:

1. Обладнання пожежогасіння: Забезпечення робочих місць первинними засобами пожежогасіння (вогнегасники пінні, порошкові, вуглекислотні).
2. Пожежна сигналізація: Встановлення автоматичної пожежної сигналізації.
3. Системи димовидалення: Забезпечення ефективних систем димовидалення у випадку пожежі.
4. Навчання персоналу: Проведення інструктажів з пожежної безпеки та дій у випадку пожежі.
5. Профілактика: Регулярна перевірка електропроводки, справності нагрівальних елементів, дотримання технологічних режимів для запобігання перегріву.
6. Зберігання матеріалів: Правильне зберігання сировини та готової продукції подалі від джерел займання.

4.4. Екологічна безпека

Експлуатація екструдера може мати вплив на навколишнє середовище, особливо при переробці біомаси. Заходи екологічної безпеки передбачають:

1. Контроль викидів: Моніторинг та контроль викидів пилу, летких органічних сполук та інших газоподібних продуктів розкладу матеріалу. Застосування фільтрів та очисних споруд.
2. Утилізація відходів: Правильна утилізація відходів виробництва та несправних компонентів системи.
3. Енергозбереження: Оптимізація енергоспоживання завдяки ефективній роботі системи моніторингу та управління.

Висновок до Розділу 4:

Комплексне впровадження вищезазначених заходів з охорони праці, пожежної та екологічної безпеки дозволить забезпечити безпечні та сприятливі умови для персоналу, мінімізувати ризики виникнення нещасних випадків та аварій, а також зменшити негативний вплив на довкілля при експлуатації системи моніторингу та одношнекового екструдера.

5 ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ

5.1. Капітальні витрати на впровадження системи моніторингу

Капітальні витрати на впровадження системи моніторингу включають вартість придбання необхідних електронних компонентів та периферійних пристроїв. Вибір кожного компонента був обґрунтований вимогами до функціональності, надійності, точності та економічної доцільності для промислового застосування. Нижче наведено детальний опис використаних компонентів з обґрунтуванням їх вибору та зазначенням вартості:

1. Програмований логічний контролер (ПЛК) ОВЕН ПЛК160-220.А.М.НВ

- Характеристики: ПЛК160 є потужним промисловим контролером від українського виробника ОВЕН. Модифікація "-220.А.М.НВ" вказує на живлення від мережі 220В, наявність аналогових входів (А), можливість роботи з модулями розширення (М) та вбудовані мережеві інтерфейси (НВ). Він забезпечує високу надійність, стійкість до промислових умов та можливість реалізації складної логіки керування та збору даних.
- Переваги вибору: Вибір ПЛК160 обґрунтований його промисловим виконанням, що забезпечує стабільну роботу в агресивних умовах виробництва, високою швидкістю обробки даних, розширеними комунікаційними можливостями (для інтеграції в SCADA-системи або локальні мережі) та наявністю достатньої кількості входів/виходів для підключення всіх необхідних датчиків. На відміну від Arduino, ПЛК є стандартом для промислової автоматизації, що підвищує надійність та ремонтпридатність системи.
- Вартість: 24321 грн.



Рис 5.1 ОВЕН ПЛК160-220.А.М.НВ

2. Панель оператора ОВЕН ИП320

- Характеристики: Панель оператора ИП320 (интерфейсна панель) є засобом для візуалізації технологічного процесу та взаємодії оператора з системою керування. Вона дозволяє відображати значення вимірних параметрів (температура, струм, тиск), стан обладнання, графіки зміни параметрів та надає можливість введення уставних значень.
- Переваги вибору: Забезпечує інтуїтивно зрозумілий та наочний інтерфейс для оператора, що підвищує зручність експлуатації та швидкість реагування на зміни в процесі. Використання панелі ОВЕН забезпечує безшовну інтеграцію з ПЛК того ж виробника, спрощуючи програмування та налагодження системи.
- Вартість: 5540.33 грн.



Рис 5.2 ОВЕН ИП320

3. Блок живлення ОВЕН БЖ110-24В/2.5А

- Характеристики: Промисловий блок живлення на 24В постійного струму з вихідним струмом 2.5А. Призначений для живлення датчиків, активних модулів та інших компонентів автоматизації.
- Переваги вибору: Забезпечує стабільне та надійне живлення всіх компонентів системи моніторингу в промислових умовах, має вбудовані захисти від перевантажень та коротких замикань, що підвищує загальну безпеку та довговічність системи.
- Вартість: 2466.67 грн.



Рис 5.3 ОВЕН БЖ110-24В/2.5А

4. Датчик тиску ОВЕН ПД100-Н4.0-11-0.5

- Характеристики: Промисловий датчик тиску серії ПД100, призначений для вимірювання надлишкового тиску в діапазоні до 4.0 МПа (40 бар). Модифікація "-11" вказує на вихідний сигнал 4-20 мА (стандартний промисловий інтерфейс), а "0.5" - клас точності 0.5%.

- Переваги вибору: Вимірювання тиску є критично важливим для контролю процесу екструзії, оскільки тиск безпосередньо впливає на ущільнення матеріалу та формування пелет. Промислове виконання та висока точність забезпечують надійний та достовірний контроль цього параметра.
- Вартість: 3358.24 грн.



Рис 5.4 Датчик тиску ОВЕН ПД100-Н4.0-11-0.5

5. Термоопір ОВЕН ДТС065М-РТ100, 0.25 (4 шт.)

- Характеристики: Промислові термоопори типу РТ100 класу точності 0.25, призначені для точного вимірювання температури. Модифікація "ДТС065М" та "160МГ" вказують на конструктивні особливості та довжину занурювальної частини (160 мм).
- Переваги вибору: Чотири датчики дозволяють здійснювати моніторинг температури в чотирьох критично важливих зонах екструдера, що дає повну картину теплового режиму процесу. Висока точність та стабільність вимірювань термоопорів є стандартом для промислових застосувань.
- Вартість: 11738.24 грн (за 4 шт., тобто 2934.56 грн/шт).



Рис 5.5 Термоопір ОВЕН ДТС065М-РТ100, 0.25

6. Модуль вводу/виводу DAT336 (3 шт.)

- Характеристики: Ймовірно, мова йде про модулі аналогового вводу або інші спеціалізовані модулі, що дозволяють ПЛК взаємодіяти з датчиками струму. Якщо DAT336 - це адаптер для SCT-013 або інший перетворювач сигналу, то це є його ключовою функцією.
- Переваги вибору: Забезпечують коректне перетворення сигналу з датчиків струму (які можуть мати вихідний струм або напругу) у формат, зрозумілий для аналогових входів ПЛК. Три модулі потрібні для моніторингу трьох фаз струму.
- Вартість: 856.80 грн (за 3 шт., тобто 285.60 грн/шт).

7. Автоматичний вимикач EZ9F34206

- Характеристики: Захисний автоматичний вимикач, який використовується для захисту електричних кіл від перевантажень та коротких замикань.
- Переваги вибору: Забезпечує електричну безпеку системи моніторингу та підключеного обладнання, запобігаючи пошкодженню компонентів та можливим пожежам.

- Вартість: 389.32 грн.



Рис 5.6 Автоматичний вимикач EZ9F34206

8. Клемні з'єднання (1022 - 30 шт.)

- Характеристики: Клемні колодки для надійного, безпечного та організованого підключення проводів.
- Переваги вибору: Забезпечують професійний монтаж електричних з'єднань, спрощують діагностику та обслуговування системи, зменшують ризик обривів та коротких замикань. Велика кількість (30 шт.) дозволяє акуратно організувати всі з'єднання.
- Вартість: 660 грн (за 30 шт., тобто 22 грн/шт).



Рис 5.7 Клемні з'єднання

9. Металевий корпус (МКН 55.25)

- Характеристики: Спеціалізований металевий корпус, ймовірно, з відповідним ступенем захисту IP (наприклад, IP54 або IP65), для розміщення всіх компонентів системи моніторингу. Розміри 55x25 (можливо, см або дм, для промислових корпусів це типово).
- Переваги вибору: Забезпечує фізичний захист електронних компонентів від механічних пошкоджень, пилу, вологи та електромагнітних завад, що є критично важливим в умовах промислового виробництва.
- Вартість: 2500 грн.



Рис 5.8 Металевий корпус МКН 55.25

Загальна сума капітальних витрат на придбання компонентів становить:
 $24321 + 5540.33 + 2466.67 + 3358.24 + 11738.24 + 856.80 + 389.32 + 660 + 2500$
 $= 51830.60$ грн.

5.2. Оцінка економічної ефективності впровадження

Впровадження системи моніторингу, попри початкові капітальні витрати, може принести значні економічні вигоди за рахунок:

1. Зниження енергоспоживання:

- Система дозволяє точно контролювати навантаження двигуна та температуру в зонах екструдера. Це дає можливість оптимізувати технологічні режими, уникаючи зайвого споживання електроенергії (наприклад, шляхом підтримки оптимальної температури для зменшення в'язкості матеріалу та, відповідно, навантаження на двигун).
- Моніторинг дозволяє виявляти неоптимальні режими роботи або несправності, що призводять до підвищеного споживання енергії.

2. Підвищення якості продукції:

- Стабільний температурний профіль та контроль тиску (який тепер вимірюється завдяки датчику ПД100) забезпечують однорідність та необхідну щільність пелет. Зменшення браку продукції призводить до економії сировини та часу.

3. Зменшення ризиків аварій та простоїв обладнання:

- Своєчасне виявлення перегріву або перевантаження двигуна, а також критичних значень тиску, дозволяє запобігти серйозним поломкам, що можуть призвести до дорогого ремонту та тривалих простоїв виробництва. Вартість простою може бути дуже високою, особливо на великих підприємствах.

4. Збільшення термінів служби обладнання:

- Робота в оптимальних режимах та своєчасне виявлення потенційних проблем зменшують знос компонентів екструдера (шнека, циліндра, двигуна), подовжуючи термін їх експлуатації та відтерміновуючи витрати на заміну.

5. Оптимізація використання сировини:

- Стабільний процес екструзії з меншою кількістю відхилень допомагає більш ефективно використовувати сировину, знижуючи її перевитрати.

5.3. Розрахунок терміну окупності

Для приблизної оцінки терміну окупності системи можна використати спрощений підхід. Припустимо, що впровадження системи моніторингу дозволить економити X грн на місяць за рахунок зниження енергоспоживання, зменшення браку та запобігання простоям.

Якщо місячна економія становить, наприклад, 10000 грн (це реалістичніша оцінка для промислового підприємства, в реальності може бути набагато більше), тоді термін окупності $T_{\text{окуп}}$ розраховується як:

$T_{\text{окуп}} = \text{Місячна економія} / \text{Капітальні витрати}$

$T_{\text{окуп}} = 10000 \text{ грн/міс} / 1830.60 \text{ грн} = 5.18 \text{ місяців}$

Таким чином, навіть за помірними оцінками, система моніторингу може окупитися приблизно за 5-6 місяців, що робить її економічно вигідним інвестиційним проектом. У реальних умовах, де вартість простоїв та енергії є значно вищою, термін окупності може бути ще меншим, а довгострокові вигоди значно перевершувати початкові інвестиції.

Висновок до Розділу 5:

Розроблена система моніторингу температури та навантаження двигуна в одношнековому екструдері є економічно обґрунтованою. Хоча початкові капітальні витрати на придбання промислових компонентів вищі, ніж для лабораторних, потенційна економічна вигода від зниження енергоспоживання, підвищення якості продукції, зменшення простоїв та продовження терміну служби обладнання є значною. Це робить впровадження такої системи привабливим для промислових підприємств, забезпечуючи швидку окупність інвестицій та довгострокову ефективність виробництва.

ВИСНОВКИ

У магістерській кваліфікаційній роботі було вирішено важливе науково-прикладне завдання підвищення ефективності процесу виготовлення пелет шляхом розробки та дослідження системи моніторингу температури та навантаження двигуна в одношнековому екструдері. Досягнення поставлених цілей та вирішення завдань дозволили зробити наступні висновки:

1. Актуальність дослідження підтверджено: Проаналізовано значущість контролю технологічних параметрів екструзії для поліпшення якості продукції (пелет), зниження енергоспоживання та запобігання аварійним ситуаціям. Це підкреслює необхідність впровадження сучасних систем моніторингу та автоматизації в даній галузі.
2. Розроблено теоретичні основи та математичну модель: Детально розглянуто фізико-хімічні процеси, що відбуваються в одношнековому екструдері, та розроблено математичну модель, яка описує енергетичний баланс, теплові процеси, формування крутного моменту та тиску. Це дозволило глибоко зрозуміти динаміку процесу екструзії та закласти основу для моделювання в середовищі MATLAB.
3. Створено структурну та функціональну схеми системи моніторингу: Розроблено архітектуру системи, що включає промисловий програмований логічний контролер (ПЛК ОВЕН ПЛК160), панель оператора (ОВЕН ІП320), датчики температури (ДТС065М-РТ100), датчики струму (через модулі DAT336), датчик тиску (ПД100), а також допоміжні елементи (блоки живлення, автоматичні вимикачі, клемні з'єднання, корпус). Обґрунтовано вибір саме промислових компонентів, що забезпечує надійність та довговічність системи в умовах виробництва.

4. Проведено експериментальні дослідження та підтверджено ефективність системи: На базі існуючої лабораторної установки одношнекового екструдера було проведено комплекс експериментальних досліджень. Отримано та проаналізовано дані щодо динаміки зміни температури в різних зонах екструдера та струму/навантаження двигуна в залежності від ключових технологічних параметрів (швидкість обертання шнека, швидкість подачі матеріалу, температурні уставки). Результати досліджень підтвердили високу точність та функціональність розробленої системи моніторингу.
5. Визначено вплив параметрів на енергоспоживання та стабільність процесу: В ході експериментів було кількісно встановлено, як зміна швидкості обертання шнека, подачі матеріалу та температурних режимів впливає на енергоспоживання екструдера та якість формування пелет. Це дозволило виявити оптимальні режими роботи, що сприяють зниженню енерговитрат та підвищенню якості продукції.
6. Обґрунтовано економічну доцільність впровадження: Проведено економічний розрахунок капітальних витрат на впровадження системи моніторингу, які становлять 51830.60 грн. Доведено, що потенційні економічні вигоди від зниження енергоспоживання, зменшення браку продукції, запобігання аварійним простоям та збільшення терміну служби обладнання дозволяють окупити початкові інвестиції в строк приблизно 5-6 місяців. Це робить проект економічно привабливим для промислових підприємств.
7. Розроблена система має практичну значущість та перспективи: Впровадження такої системи на промислових підприємствах, що займаються виробництвом пелет, дозволить підвищити ефективність виробництва, покращити якість кінцевого продукту, знизити ризик виходу з ладу дороговартісного обладнання та оптимізувати енергетичні витрати. Перспективи розвитку включають інтеграцію системи з більш

складними системами автоматичного керування та предиктивної аналітики.

Таким чином, у роботі досягнуто поставленої мети – розроблено та досліджено ефективну систему моніторингу, яка дозволяє оптимізувати процес екструзії та підвищити його економічну ефективність.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Одношнековий екструдер для виробництва полімерних матеріалів з теплообмінним пристроєм. Патент України на корисну модель № 112597, МПК (2016.01) B29B 7/82 (2006.01) B29C 47/00. В. О. Потапов, Д. В. Білий.
2. Мазур, К.; Гонтарук, Я. ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ВИРОБНИЦТВА БІОПАЛИВА В ОСОБИСТИХ СЕЛЯНСЬКИХ ГОСПОДАРСТВАХ. ПІ 2022, 32-36.
3. Галиш, Н. Специфіка виробництва деревних пелет та її вплив на формування стратегії розвитку підприємства / Наталія Галиш // Вісник Тернопільського національного економічного університету. – 2017.
4. Основи автоматизації технологічних процесів. Конспект лекцій [Електронний ресурс] : навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні» за спеціальностями 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: В. В. Шевченко, Г. С. Тимчик.
5. Тимчук С. О., Вищанська М. М., Розакова В. О. Автоматизація процесу гранулювання та пресування.
6. Дослідження енергоефективності модернізованого корпусу одночерв'ячного екструдера / Витвицький В. М., Витвицький Влад. М., Мікульонок І. О., Сокольський О. Л., Шилович Т. Б. // Вісник НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського». Серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». – 2023. – № 4 (22).
7. Крайнюченко, О. Ф. Сучасний стан і перспективи розвитку українського та Європейського ринку пелет / О. Ф. Крайнюченко, Є. А. Гановська // Приазовський економічний вісник:

- електронний науковий журнал. – Запоріжжя: Класичний приватний університет. – 2020.
8. Штіфзон О. Й., Новіков П. В., Бунь В. П. Теорія автоматичного управління. Навчальний посібник. – 2020.
 9. Тяпин А. А., Кинев Е. С. Методика моделирования и расчета режимов индукционных нагревателей //Евразийское Научное Объединение. – 2020. – №. 8-2. – С. 119-123.
 10. Івченко К., Івченко Е. Розробка модуля вводу-виводу інформації на базі сучасних мікроконтролерів. – 2020.
 11. Морміль Ю. А. Автоматизовані системи на основі промислових логічних контролерів. – 2023.
 12. Мартиняк М. О., Куц О. В. Розроблення автоматизованої системи управління та моніторингу технологічних параметрів зберігання рідкої продукції : дис. – ЕК№ 26, 2022 р., 2022.
 13. ТЮХТІЙ О. SCADA-СИСТЕМИ ДЛЯ ОБ'ЄКТІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ //Ефективне використання енергії: стан і перспективи: збірник наукових праць ІІ Всеукраїнської студентської науково-практичної конференції (11 листопада 2022 року). – 2022.
 14. Димитров Ю. Ю. АРХІТЕКТУРА СИСТЕМИ ВІДДАЛЕНОГО МОНІТОРИНГУ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ //ОЛЬВІЙСЬКИЙ ФОРУМ–2024: стратегії країн Причорноморського регіону в геополітичному просторі. – 2024. – С. 6.
 15. Червоткіна О. О. и др. Вплив різних параметрів на процес гранулювання рослинної сировини та якість гранул //Праці Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного. – 2024. – Т. 24. – №. 2. – С. 51-60.
 16. Лук Ю. В. Оптимізація процесу керування виготовленням пелет з деревини : дис. – Сумський державний університет, 2022.

17. Левашова Ю. С., Косенко Н. О. Техногенна безпека виробничого устаткування: конспект лекцій для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти всіх форм навчання зі спеціальності 263–Цивільний захист.
18. Никонюк Є. С., Твердохлебова Н. Є. Вимоги безпеки щодо розташування технологічного обладнання на підприємстві для запобігання екологічних забруднень // TOPICAL ISSUES OF OCCUPATIONAL SAFETY IN THE CONTEXT OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT AND EUROPEAN INTEGRATION OF UKRAINE. – 2024. – С. 191.
19. Кисіль В. А. Роль засобів індивідуального захисту в зменшенні ризиків травматизму. – 2024.
20. Беднарчук М. С. Аналіз критеріїв ідентифікації засобів індивідуального захисту // Вісник ЛТЕУ. Технічні науки. – 2021. – №. 25. – С. 149-155.