

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

бакалавр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Розробка автоматизованої системи керування технологічним процесом з використанням двошнекового екструдера

Виконав(ла): студент(ка) IV курсу, групи КТс-41

спеціальності 174 – Автоматизація, комп'ютерно-

інтегровані технології та робототехніка

(шифр і назва спеціальності)

Карпишин А.С.

Керівник

(підпис)

Корольок Р.І.

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

(підпис)

Чихіра І.В.

(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

(підпис)

Голотенко О.С.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(підпис)

Оробчук Б.Я.

(прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)
Кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
Голотенко О.С.
(підпис) (прізвище та ініціали)
« » 2026 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

на здобуття освітнього ступеня бакалавр
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка
(шифр і назва спеціальності)

Студенту Карпишин Анатолій Степанович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка автоматизованої системи керування технологічним процесом з використанням двошнекового екструдера

Керівник роботи старший викладач кафедри КТ Корольок Ростислав Ігорович
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «14» квітня 2026 року № 4/9-185

2. Термін подання студентом завершеної роботи 26 червня 2026р.

3. Вихідні дані до роботи Технічні вимоги до процесу екструзії

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ

Аналітична частина

Проектна частина

Спеціальна частина

Безпека життєдіяльності, основи охорони праці

Висновки

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

Титульний слайд

Актуальність роботи

Завдання роботи

Основна частина

Висновки

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Безпека життєдіяльності,			
основи охорони праці			

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Ознайомлення з завданням до кваліфікаційної роботи	20.05.2026	
2.	Підбір джерел по темі роботи	22.05.2026-24.05.2026	
3.	Опрацювання публікацій та збір даних по темі роботи	24.05.2026-27.05.2026	
4.	Виконання роботи згідно мети	27.05.2026-29.05.2026	
5.	Оформлення першого та другого розділів	29.05.2026-31.05.2026	
6.	Оформлення третього розділу	31.05.2026-11.06.2026	
7.	Оформлення четвертого розділу	11.06.2026-13.06.2026	
8.	Підготовка презентації	14.06.2026	
9.	Підготовка доповіді	15.06.2026	
10.	Оформлення кваліфікаційної роботи	15.06.2026	
11.	Нормоконтроль	16.06.2026	
12.	Перевірка на плагіат	16.06.2026	
13.	Попередній захист кваліфікаційної роботи	16.06.2026	
14.	Захист кваліфікаційної роботи	26.06.2026	

Студент

(підпис)

Карпишин А.С.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Корольок Р.І.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота бакалавра складається з пояснювальної записки та графічної частини (ілюстративний матеріал – слайди).

Об'єм графічної частини кваліфікаційної роботи становить _____.

Об'єм пояснювальної записки складає ____ друкованих сторінок формату А4.

В роботі використано ____ літературних джерел.

У роботі описується створення та впровадження вдосконаленої схеми керування для пластифікуючого двошнекового екструдера, включаючи налаштування збору даних, розробку моделі, проектування контролера та реалізацію контролера в режимі реального часу. Вдосконалена схема керування була розроблена для лабораторного двошнекового екструдера ZSK-25, що обертається в одному напрямку та використовується для переробки полімерів.

Було проведено поглиблений огляд моделювання та керування процесом двошнекової екструзії та виявлено низку проблем керування процесом,.

Було розроблено інфраструктуру для збору даних та проведено модернізацію автоматизації екструдера. Такі структури є вкрай важливими для моделювання, валідації, керування та моніторингу екструдерів у режимі реального часу. Збір даних був проведений за допомогою RSlinx як OPC-сервера та LabVIEW як OPC-клієнта. Автоматизація процесів дозволяє керувати приводом двигуна та швидкістю подачі, надсилаючи команди системі з ПК.

Ключові слова: ЕКСТРУДЕР, КОНТРОЛЕР, МОДЕЛЮВАННЯ, АВТОМАТИЗАЦІЯ, ЗБІР ДАНИХ

ЗМІСТ

ВСТУП	5
1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	6
1.1 Огляд полімерних сумішей	6
1.2 Двошнековий екструдер	8
1.3 Огляд розширених схем керування процесом екструзії	11
1.4 Аналіз процесу екструзії	15
1.5 Модель процесу	20
2. ПРОЄКТНА ЧАСТИНА	22
2.1. Опис реалізації системи керування двошнековим екструдером.....	22
3 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА.....	36
3.1 Моделювання роботи екструдера для ефективного керування	36
3.2 Ідентифікація системи	39
3.3 Експериментальна секція	41
3.4 Результати та обговорення	46
4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ХОРОНИ ПРАЦІ	54
4.1 Організація охорони праці при роботі з системою управління	54
4.2 Електробезпека	56
4.3 Розрахунок заземлення	59
ВИСНОВКИ.....	62
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	63

ВСТУП

Полімери дедалі частіше використовуються в багатьох галузях промисловості, таких як харчова промисловість, електроніка, а також виробництво та ремонт автомобілів. Пластики, як правило, є полімерами з високою молекулярною масою, і можуть містити інші речовини для покращення характеристик та/або зниження вартості. Таким чином, необхідно розробляти технології, які покращують властивості полімерів і збільшують виробництво полімерів. Спочатку властивості полімерів контролювалися шляхом вибору відповідних мономерів. Різноманітне використання сучасних пластмас вимагає більш суворих вимог до якості, яких важко досягти з індивідуальними базовими полімерами. Таким чином, полімери зазвичай змішують або компаундують з іншими полімерами, волокнами або композитами. Полімерне компаундування є більш економічним та доцільним, ніж синтез нових полімерів, для задоволення вимог конкретних застосувань. У більшості випадків продукти, які ми бачимо на ринку сьогодні, виготовляються із суміші полімерів.

Екструзія полімерів є основним процесом компаундування, що використовується в промисловості пластмас для безперервного виробництва труб, плівки, листів, дроту з покриттям та інших полімерних виробів. Близько 60% усіх полімерів проходять через екструдери перед виготовленням кінцевого продукту. У процесі екструзії полімерів відповідна сировина проштовхується через металеву фільтру для отримання розплаву бажаної форми. В одній машині можна виконувати кілька одиничних операцій, включаючи змішування, нагрівання, замішування, різання, реакцію та формування.

1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Огляд полімерних сумішей

Концепція змішування полімерів не є новою. Оскільки вартість розробки та індустріалізації нових полімерів різко зросла, значення змішування полімерів почало привертати дедалі більшу увагу. Протягом останніх кількох десятиліть щороку публікується понад 4000 патентів на полімерні суміші. Останнім часом кількість патентів зросла майже до 10 000 на рік. Крім того, збільшення використання сполук, що містять високомолекулярні полімери з низькомолекулярними органічними та неорганічними речовинами, прискорило розробку нових полімерних матеріалів.

Характеристики матеріалу є одним з найважливіших факторів у розробці нових полімерних сумішей. Характеристики полімерної суміші залежать від двох основних факторів: компонентів суміші та процесу змішування. Компонентами полімерної суміші є окремий(і) полімер(и) та різні добавки або агенти. Взаємодія між компонентами за певних умов обробки призводить до певної морфології полімерної суміші. Ця морфологія змінюється за різних умов обробки, навіть з ідентичними компонентами. Тобто, процес тісно корелює з властивостями та морфологією полімерної суміші. Таким чином, для отримання полімерної суміші з бажаними властивостями, вибір компонентів та методу обробки є надзвичайно важливим.

У промисловості широко використовуються три методи приготування полімерних сумішей: змішування розплаву, змішування розчину та сухе змішування. Змішування розплаву є домінуючим методом, що використовується в екструдерах для виготовлення полімерних сумішей у промисловості. Ряд дослідників намагався співвіднести властивості полімерних сумішей зіх морфологію. Покращення нових полімерів включають механічні властивості, такі як в'язкість, міцність на розрив, термостійкість, жорсткість та подовження

при розриві; функціональні властивості, такі як проникність, провідність, а також антистатичні, вогнестійкі та антибактеріальні властивості.

Екструдери.

Найдавнішим промисловим екструдером була комбінація ручного плунжера та матриці, винайдена Джозефом Брамою в 1797 році та використовувана для безперервного виробництва свинцевих труб. Перший двошнековий екструдер (twin screw extruder, TSE) був розроблений Фоллоузом та Бейтсом у 1873 році. Перший шнековий екструдер, розроблений спеціально для термопластичних матеріалів у Німеччині Паулем Троєстером у 1935 році. Для обробки матеріалів використовуються три типи екструдерів: шнекові, барабанні або дискові та зворотно-поступальні.

Шнекова екструзія, по суті, являє собою шнек спеціальної форми, що обертається в нагрітому циліндричному корпусі, і матеріал проштовхується вперед обертанням шнека. Шнековий екструдер перетворює твердий полімер на розплав і безперервно прокачує розплав з дуже високою в'язкістю через фільтру під високим тиском. Принаймні 95% термопластичних виробів виробляється за допомогою шнекових екструдерів. Хоча існує безліч різних типів шнекових екструдерів, основний поділ полягає в тому, що вони мають одношнековий екструдер (single screw extruder, SSE) та двошнековий екструдер (TSE).

Одношнековий екструдер складається з одного шнека, що обертається в щільно прилеглому барабані. Матеріали транспортуються завдяки їхньому тертю об стінки каналу. Якщо полімерні матеріали ковзають по стінці барабана, матеріал обертатиметься разом зі шнеком, не рухаючись вперед. Більше того, ефект екструзії буде нульовим, якщо матеріал прилипає до шнека. Нарощування тиску за допомогою екструдеру з одностороннім нагрівом є слабким через зворотний потік матеріалу.

1.2 Двошнековий екструдер

Першою метою технології з двома шнеками було подолання проблем, з якими стикалася система SSE. Наявність двох шнеків дозволяє примусово перемішувати матеріали вперед у машині, роблячи рух матеріалів менш залежним від тертя. Технологія подвійного шнека (TSE) має кілька переваг над SSE:

- Краща подача та позитивніші характеристики транспортування дозволяють машині обробляти матеріали, які важко подавати (порошки, слизькі матеріали тощо);
- Краще перемішування та велика площа поверхні теплопередачі дозволяють добре контролювати температуру бульйону;
- Розподіл часу перебування короткий та вузький;
- Існує хороший контроль над часом витримки та температурою заготовки для профільної екструзії термочутливих матеріалів; та
- Змінні секції шнека та барабана можуть бути розташовані для задоволення різних та точних потреб обробки.

Опис процесу TSE.

На рис. 1.1 показано схему типового подвійного шнека (TSE). Вали шнеків з'єднані з двигуном для обертання шнека. Барабан має електричні системи нагрівання та водяного охолодження. Зазвичай сировина завантажується в екструдер при кімнатній температурі через бункер. Більше однієї сировини може завантажуватися з різних живильників за допомогою контролера подачі для підтримки певного складу сировини. Сировина транспортується з бункера до кінця барабана, тобто до матриці, за допомогою сили опору через тертя та обертання шнека. Подвійний шнек, по суті, діє як об'ємний насос. Тверда сировина плавиться, рухаючись вздовж нагрітого барабана, через прикладене тепло, в'язке розсіювання та тертя.

Подаваний матеріал майже твердий у зоні транспортування. Через обертання шнека та тертя матеріал транспортується із зони транспортування до

зони плавлення, де сировина частково плавиться та відбувається низка процесів, таких як змішування та реакція. Зона перекачування або транспортування розплаву знаходиться поруч із зоною плавлення; тут сировина по суті вважається повністю розплавленою. Тиск розплаву в цій зоні збільшується обертанням шнека для екструдуювання розплавленого полімеру через фільтру.

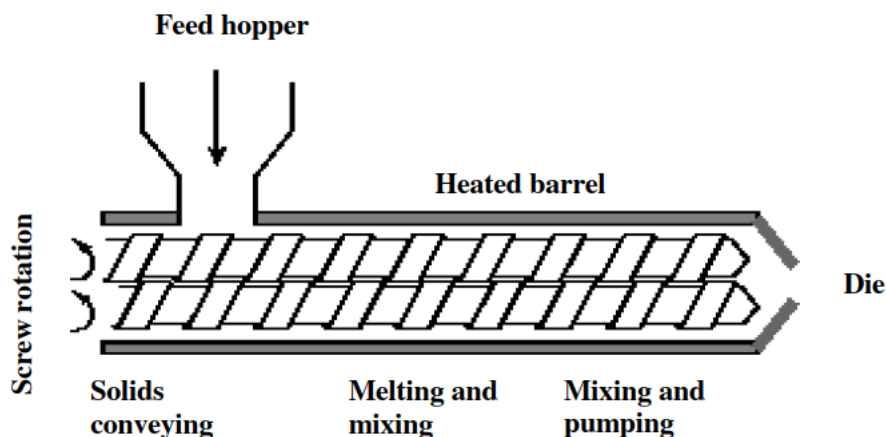


Рисунок 1.1 - Принципова схема типового двошнекового екструдера TSE.

Класифікація TSE.

Як випливає з назви, TSE містить два паралельні гвинти, що обертаються всередині нагрітого циліндра. Однак, залежно від напрямку обертання та зачеплення гвинта, TSE можна класифікувати таким чином:

- Напрямок обертання: Коли два шнеки мають однаковий напрямок обертання, екструдер називається екструдером, що обертається одночасно. напрямках.
- Взаємопроникнення: Залежно від ступеня проникнення двох шнеків один в одного, екструдер TSE класифікується як двошнековий екструдер із зчепленням або без зчеплення. Зчеплення шнеків означає наявність С-подібних камер, які щільно переміщують оброблюваний матеріал до фільтри екструдера.

Основні елементи TSE.

TSE складається з приводної секції та оброблювальної секції. Приводна секція зазвичай складається з редуктора та двигуна. Оброблювальна секція включає шнеки, оточені барабаном. Шнекова секція та барабан описані нижче:

- Шнекова секція: Шнекова секція виготовляється шляхом комбінування різних елементів шнекового модуля. Кожен шнековий модуль забезпечує окрему дію транспортування, змішування, зсуву або нарощування тиску. Це дозволяє створювати геометричну конфігурацію відповідно до застосування. Існує три типи шнеків: шнековий елемент для прямого потоку (позитивний кут нахилу спіралі), шнековий елемент для зворотного потоку (негативний кут нахилу спіралі) та місильний блок. Місильні блоки – це комбінації будь-якої бажаної кількості місильних дисків різної ширини та кутів зміщення. Крім того, для підвищення ступеня змішування використовуються спеціальні змішувальні елементи. На рисунку 1.2(a) показано різні типи шнекових модулів.

- Секція ствола: Секція ствола являє собою нерухому зовнішню оболонку, в якій обертаються гвинти. Як і секція шнека, блок ствола зібраний модульним способом. Ця модульність забезпечує велику гнучкість. Секція ствола може бути виготовлена з різних модулів ствола залежно від конкретної функції (харчування, вентиляція тощо). Геометрична форма ствола може бути прямокутною або циліндричною. На рисунку 1.2(b) показано фотографію прямокутних модульних елементів ствола.

Геометрія TSE.

Геометрію гвинта TSE досліджували Буй (1978) та Потенте та ін. (1994). Наступні чотири параметри достатні для повного опису геометрії TSE.

- Зовнішній діаметр гвинта (D_{ext});
- Відстань між осями гвинтів (Cl);
- Крок гвинта (B); та
- Кількість гвинтових витків (S).

У таблиці 1.1 наведено геометричні залежності TSE.

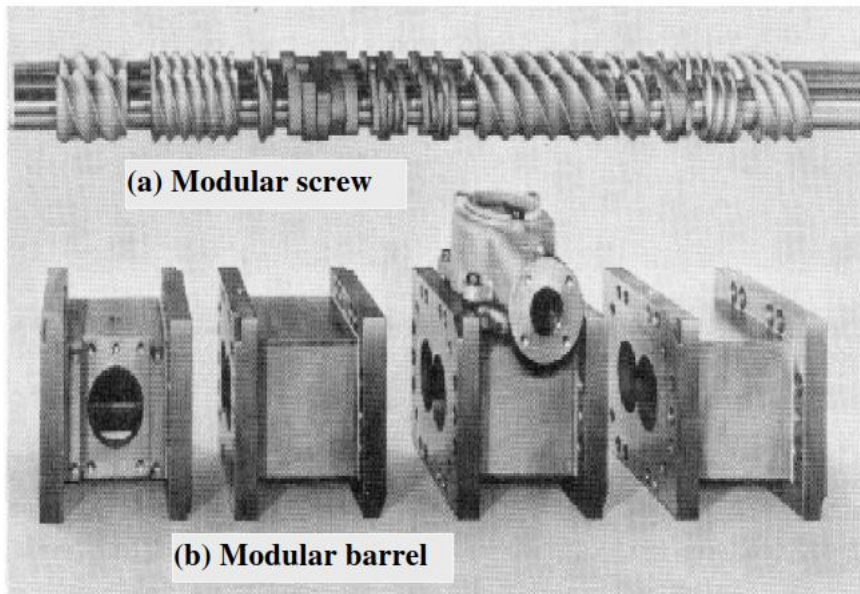


Рисунок 1.2 - Основні елементи секції обробки TSE.

Таблиця 1.1 - Геометричні зв'язки в тісно переплетену TSE.

Геометричні параметри-тер	Опис	Відношення
Ширина каналу (Ш)	Відстань між двома послідовними прольотами гвинта	$W = \frac{BC \cos \phi}{S} - e$
Кут спіралі або тангажу (ϕ)	Кут польоту гвинта	$\phi = \arctan \frac{B}{\pi D_{ext}}$
Ширина наконечника (e)	Ширина кінчика польоту	$e = \alpha R_{ext} \sin \phi$
Кут зачеплення (ψ)	Кут зони взаємодії проникнення	$\psi = \arccos \frac{C_1}{D_{ext}}$
Кут польоту (α)	Кут польоту з північною пошкодження поверхні гвинта	$\alpha = \frac{\pi}{S} - 2\psi$

1.3 Огляд розширених схем керування процесом екструзії

У 1960-х роках розширене керування використовувалося для опису будь-якого алгоритму чи стратегії, окрім класичного пропорційно-інтегрально-диференціального (ПІД) регулятора.

У той час NASA використовувала програмування в реальному часі та дистанційне керування за допомогою моделей. За останні 50 років було

проведено значні дослідження вдосконаленого керування, його основної теорії, реалізації та переваг, які принесе його застосування. Поява сучасних комп'ютерів та цифровізація зробили виконання алгоритмів простішим, ніж це було можливо за допомогою аналогових технологій. Сьогодні вдосконалене керування є синонімом впровадження комп'ютерних технологій. Передові методи керування включають низку методів, від прогнозуючих контролерів на основі моделей до інтелектуальних датчиків, нейронечіткого керування та експертних систем. Модельне прогнозне керування, керування з прямою зворотною передачею, багатовимірне керування та стратегії оптимального керування є практичними альтернативами. Ці методи використовувалися в хімічній та нафтохімічній промисловості. Вдосконалене керування може покращити вихід продукції, зменшити споживання енергії, збільшити потужність, покращити якість та консистенцію продукції, зменшити втрати продукції, підвищити швидкість реагування, покращити безпеку процесів та зменшити викиди в навколишнє середовище. Передові методи керування процесами з використанням цифрових комп'ютерів мають значний потенціал для покращення роботи екструдерів.

Розширене керування – це міждисциплінарний метод. Він описує вправу, яка поєднує елементи з низки дисциплін, починаючи від інженерії керування, обробки сигналів, статистики, теорії рішень, штучного інтелекту, а також апаратної та програмної інженерії. Розширене керування вимагає інженерного розуміння проблеми, розуміння процесу та розумного використання технологій керування. Динамічні зв'язки між змінними використовуються для прогнозування поведінки змінних у майбутньому. На основі цього прогнозу можна негайно вжити необхідних заходів для підтримки змінних у їхніх межах, перш ніж відбудеться відхилення. Таким чином, такі схеми в основному базуються на моделях. Розширені стратегії керування успішно використовуються в нестабільних процесах, таких як аерокосмічна галузь, робототехніка, радіолокаційне відстеження та системи керування транспортними засобами. Розширені контролери також використовуються на переробних підприємствах для підвищення ефективності або зниження витрат.

Однак переробні підприємства є відносно стабільними процесами. Таким чином, розширені стратегії керування для переробних підприємств відрізняються від стратегій керування для нестабільних систем.

Контроль процесів двошнекової екструзії.

Молекулярні та морфологічні властивості полімерного продукту сильно впливають на його фізичні, хімічні, реологічні та механічні властивості, а також властивості кінцевого продукту. На ці властивості впливають умови обробки. Полімерна промисловість прагне виробляти полімери або полімерні суміші, які відповідають таким специфікаціям, як ударна в'язкість та індекс розплаву. Однак вимірювання властивостей кінцевого використання в режимі реального часу є дуже складним. Параметри, які відносно легко вимірюються та корелюють з властивостями кінцевого використання, зазвичай зазначаються в специфікаціях.

Наприклад, замість молекулярної маси вказується індекс розплаву (IP) або власна в'язкість. IP має обернену степеневу залежність від середньомолекулярної маси продукту. IP полімерного розплаву зазвичай вимірюється відповідно до стандартів. У більшості випадків IP вимірюється офлайн та нечасто. Тому на більшості заводів процес полімеризації контролюється без індикатора якості в режимі реального часу протягом кількох годин. Відсутність онлайн-вимірювання є основною проблемою для вдосконаленого та автоматичного контролю в процесі екструзії.

Крім того, процес екструзії має значну затримку транспортування. Наприклад, датчик температури, розташований на матриці, потребує значного часу, щоб відчувати будь-який ефект від будь-якої зміни швидкості подачі. Більше того, зміна однієї змінної процесу викликає зміни кількох інших змінних, залежно від конкретних умов, що використовуються в цей момент. Таким чином, процес є високоінтерактивним і має значну затримку в часі. Однак дуже важливо мати стабільний процес екструзії для забезпечення постійної якості продукції. Будь-яке коливання робочих змінних може призвести до змін якості кінцевого продукту. Таким чином, замкнутий цикл з вдосконаленою стратегією керування є вкрай важливим для подолання цієї проблеми.

Обсяг дослідження.

Хоча TSE дуже поширена в технології компаундування, її безперебійної роботи важко досягти. Ряд дослідників виділили такі проблеми контролю якості продукції в TSE:

- взаємодії між масою, імпульсом та передачею енергії, а також недостатнє розуміння цих взаємодій;
- властива процесу затримка в часі;
- процес з кількома входами та кількома виходами;
- високонелінійні процеси;
- відсутність вимірювання змінних якості в режимі реального часу; та
- порушення.

Екструзія – це складний процес. Управління процесом двошнекової екструзії є активною сферою досліджень. Характеристики процесів екструзії свідчать про необхідність удосконалених схем управління для забезпечення стабільної якості продукції. Дослідники розробили деякі передові стратегії керування двошнековими харчовими екструдерами існують, але передові можливості керування двошнековим екструдером для пластифікації дуже обмежені, і в цій галузі переробки полімерів потрібні значні дослідження.

Метою роботи було розробити та впровадити вдосконалені схеми керування, які забезпечують стабільну роботу двошнекового екструдера для пластифікації. Мета була досягнута шляхом виконання наступних кроків:

- Найбільш чутливі параметри якості продукції були визначені та пов'язані з доступними та вимірюваними змінними процесу для вибору змінних-кандидатів як індикаторів. Ці співвідношення були отримані за допомогою статистичних методів та перевірені експериментальними даними.
- Як контрольовані змінні були обрані змінні, які давали краще прогнозування параметрів якості продукції.
- Динамічні моделі були розроблені з використанням контрольованих змінних та доступних маніпульованих змінних.

- На основі отриманих моделей та симуляцій замкнутого циклу було розроблено вдосконалені схеми керування.
- Схеми керування були впроваджені в режимі реального часу, а також була оцінена продуктивність контролера.

1.4 Аналіз процесу екструзії

Значні дослідження були проведені в багатьох галузях процесу екструзії, таких як вивчення поведінки потоку всередині двошнекового екструдера, моделювання процесів екструзії та контроль параметрів якості продукції. Система контролю TSE забезпечує стабільну якість продукції, незважаючи на збої та збої в процесі. Р точки зору контролю систему зображено на блок-схемі з розімкнутим циклом (рис. 1.3). Діаграма надає інформацію про керовані змінні, маніпульовані змінні, змінні збурень та параметри якості продукції. Пояснюється сучасний стан моделювання з використанням маніпульованих та керованих змінних.

Процес екструзії характеризується сильною взаємодією між передачею маси, енергії та імпульсу. Така взаємодія пов'язана з фізико-хімічними перетвореннями, які переважно визначають властивості кінцевих продуктів. Процес екструзії, по суті, є системою з кількома входами та кількома виходами (МІМО). Традиційні стратегії керування неефективні в керуванні МІМО-системами. Для правильного проектування систем керування необхідна ідентифікація або вибір маніпульованих змінних, змінних збурень та керованих змінних.

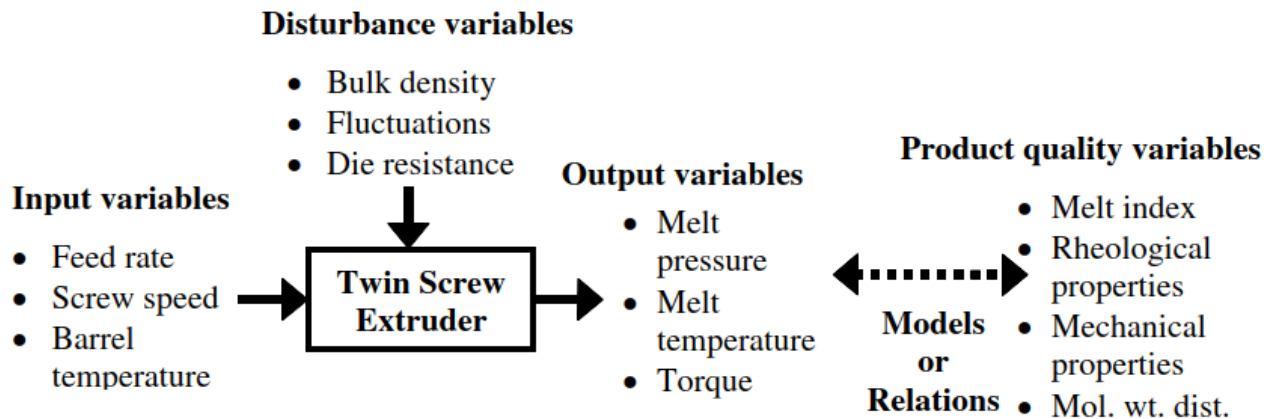


Рисунок 1.3 - Діаграма відкритого циклу пластифікуючого двошнекового екструдера.

Змінні.

Для пластифікуючого екструдера доступними вхідними змінними є швидкість шнека, температура циліндра та швидкість подачі. Якщо сировини більше однієї, то склад є ще однією вхідною змінною. Вхідні змінні можна використовувати як маніпульовані змінні (МЗ), а також для керування процесом екструзії. Критерії вибору МЗ, наприклад, через низьку швидкість корекції температура циліндра є найменш підходящою МЗ. Крім того, нагрівання та охолодження в багатьох випадках мають різну динаміку. Інноваційні МЗ можуть бути, такі як швидкість захоплення, обмежувальний клапан та плунжер, але ці МЗ зазвичай не використовуються в промисловості. У процесах екструзії харчових продуктів вміст вологи використовується як МЗ разом з іншими раніше згаданими МЗ.

Змінні збурення.

Якби на системи не впливали збурення, не було б потреби в управлінні. Збурення неминучі в будь-якому процесі. Перш ніж розробляти схему керування для регулювання процесу, необхідно знати, які типи збурень пов'язані з конкретною системою. Нижче обговорюються три основні збурення, пов'язані з процесами екструзії.

Коливання

Для якісної екструзії необхідні стабільна швидкість потоку, постійний тиск, постійна температура та однорідний склад екструдату. Таким чином, стабільність цих змінних визначає якість екструдату. Однак ці коливання взаємопов'язані. Коливання тиску спричинятиме коливання швидкості потоку; температура коливання спричинятиме коливання в'язкості, що зрештою призведе до коливань тиску, а також коливань швидкості потоку. Тип та джерело цих коливань зазвичай називають помпажами:

- **Високочастотні коливання:** Це коливання відбувається з однаковою частотою як швидкість обертання шнека. Таке коливання легко виявити в даних тиску. Воно спричинене періодичними змінами швидкості подачі через проходження лопатей через отвір бункера. Такий вид коливань зазвичай виникає, коли екструдер працює при дуже низькому протитиску, наприклад, надзвичайно охолоджені шнеки та шнеки з недостатнім ступенем стиснення. Високочастотні коливання вловлюються датчиком тиску, якщо він встановлений близько до кінчика шнека. У цьому випадку коливання зумовлені періодичним проходженням лопатей шнека і не мають нічого спільного з нестабільністю.

- **Коливання проміжної частоти:** Такий вид коливань відбувається з досить постійною частотою (1-15 циклів/хв) і є однією з основних причин низької якості продукту. Походження цих коливань може бути пов'язане з механізмом плавлення полімеру в екструдері. Твердий шар, утворений нерозплавленими полімерними гранулами, руйнується в певній точці зони плавлення, і стаціонарний процес плавлення переходить у нестабільний стан. Цей процес утворює блоки твердого полімеру, які продовжують плавитися протягом певного періоду, після чого вони спливають каналом і повільно плавляться завдяки теплопровідності. Цей процес руйнування залежить від типу полімеру, розміру гранул і геометрії шнека. Однак стаціонарні робочі умови мало впливають на цей процес. Ця зміна довжини області плавлення викликає ефект помпажу в екструдері. Таким чином, у зоні плавлення виникають коливання середньої частоти. Один із способів, який може допомогти подолати цю проблему, - це перемістити точку початку якомога далі від вихідного кінця

екструдера. Високий зворотний тиск і високий рівень тепла в задніх зонах також допомагають подолати цей ефект помпажу.

- Низькочастотні коливання: Таке коливання має період величини порядку години. Воно спричинене зовнішніми причинами, такими як коливання тиску охолоджувальної води, цикли ввімкнення та вимкнення нагрівача, коливання напруги установки тощо.

Іноді високочастотні коливання, зумовлені обертанням гвинта, накладаються на низькочастотні коливання, роблячи амплітуду коливань ще вищою.

Насипна щільність

Це порушення виникає на стороні подачі через зміни насипної щільності корму та його природи. Порушення на стороні подачі можуть призвести до низької якості продукції та потребують контролю. Таким чином, вхідні змінні, пов'язані з кормом, наприклад, швидкість подачі, можна використовувати як мінливі значення для зменшення впливу цієї змінної.

Опір штамп

Це порушення виникає через раптові зміни опору штамп. Зміни опору штамп зумовлені частковим або повним блокуванням штамп. У термоелектричних перетворювачах (TSE) порушення на торцях штамп часто мають різкий характер, іноді призводячи до раптового зупинення. У більшості випадків порушення на торцях штамп виникають під час запуску або після раптових змін умов експлуатації.

Знос шнека, втрати тепла з екструдера та зміни значення коефіцієнта теплопередачі між стінкою циліндра та розплавом зазвичай є причиною повільного дрейфу в процесах екструзії. Ці змінні збурення важливі для якості кінцевого продукту. Флуктуації є переважними збуреннями, пов'язаними з процесом екструзії. Будь-які коливання роблять швидкість потоку нестабільною, а якість екструдата низькою.

Контрольовані змінні.

У більшості випадків вихідні змінні процесу використовуються як контрольовані змінні (КЗ) в процесі екструзії через труднощі використання змінних якості продукції як первинних контрольованих змінних. Звичайними вимірюваними вихідними змінними процесу пластифікуючої TSE є тиск розплаву полімеру та температура розплаву полімеру. Крутний момент та енергія, які розраховуються на основі доступної інформації про процес, також є вихідними змінними процесу. Наприклад, збільшення температури розплаву полімеру зменшує в'язкість, а збільшення тиску розплаву полімеру збільшує в'язкість. Крутний момент, необхідний для обертання шнекового валу, зменшується зі збільшенням температури та збільшується зі збільшенням тиску.

Ці вихідні змінні також можна використовувати як керовані змінні для проектування схеми керування із замкнутим циклом. Вибір вихідних змінних процесу як керованих змінних також служить для врахування міркувань стабільності. Варто зазначити, що хоча вихідні змінні процесу мають сильну кореляцію з фактичною якістю продукту, кінцевими керованими змінними є якості продукту. Вибір вихідних змінних процесу, які будуть використовуватися як керовані змінні, повинен ґрунтуватися на їхньому впливі на параметри якості, найбільш характерні для продукту. Наприклад, крутний момент може бути найважливішою керованою змінною для одного продукту, а тиск розплаву на матриці для іншого.

Змінні якості продукції

Кінцевою метою будь-якої системи керування в пластифікувальній установці для термопластичної обробки є керування змінними якості продукту (ЗЯП), такими як індекс розплаву, реологічні властивості, розподіл молекулярної маси та механічні властивості в межах заданого діапазону. Однак ці параметри часто не вимірюються онлайн через вартість, експлуатаційні зусилля та обслуговування, і оцінити їх можна лише після відкладеного лабораторного аналізу. Контроль ЗЯП вимагає гарного розуміння процесу та прогнозування ЗЯП за доступними змінними процесу. Для прогнозування ЗЯП за доступними змінними процесу можна використовувати ряд методів. У цитованих

дослідженнях співвідношення між змінними якості продукту та змінними процесу розробляються за допомогою статистичних методів або першопринципів. Наприклад, індекс розплаву має логарифмічну залежність від температури. Такі співвідношення дозволяють нам прогнозувати або робити висновки про значення ЗЯП за даними процесу. Отримані співвідношення відомі як модель виводу або м'який сенсор. Це активна галузь досліджень, але виходить за рамки цієї роботи.

1.5 Модель процесу

Модель процесу повинна інкапсулювати динамічну інформацію. Однак деякі методи аналізу та проектування вимагають лише інформації про стаціонарний стан. Загалом, моделі використовують спрощені властивості системи та зберігають лише інформацію, що стосується постановки проблеми або мети. Тому використання моделей зменшує потребу в реальних експериментах та сприяє досягненню багатьох різних цілей зі зниженими витратами, ризиком та часом. З точки зору управління, модель повинна містити інформацію, яка дозволяє передбачити наслідки, що виникнуть внаслідок змін умов роботи процесу. У цьому контексті модель може бути сформульована на основі фізико-хімічних або механістичних знань про процес, вона може бути отримана з даних процесу або може бути отримана з комбінації знань та вимірювань. Вона також може бути у формі якісних описів поведінки процесу. На рис. 1.4 показано класифікацію форм моделей. Тип моделі, що використовується, залежить від завдання або мети.

Головною метою системи керування є забезпечення стабільної якості продукції, незважаючи на збої та збої в процесі. Схема керування повинна базуватися на розумінні процесу, яким потрібно керувати. Тому гарна математична модель процесу є надзвичайно важливою та необхідною умовою для проектування систем керування для процесів екструзії.

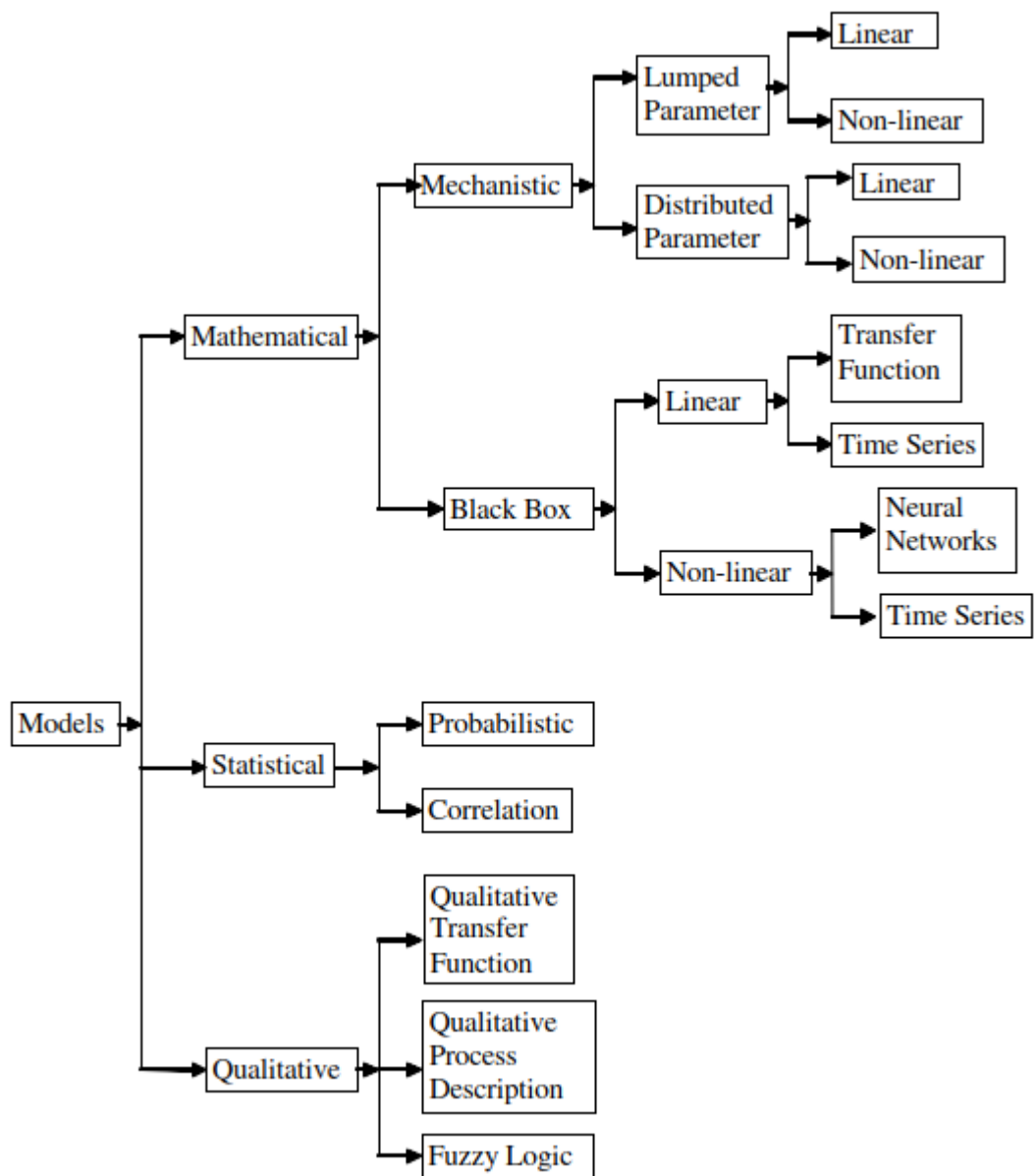


Рисунок 1.4 - Класифікація моделей для моніторингу та управління процесами.

2. ПРОЄКТНА ЧАСТИНА

2.1. Опис реалізації системи керування двошнековим екструдером

Однією з важливих вимог моделювання процесу є валідація моделі за допомогою реальних заводських даних. Таким чином, необхідно створити інфраструктуру для збору даних. Важливою передумовою для побудови та валідації моделі є наявність технологічних даних. Крім того, цю інфраструктуру можна використовувати з деякими розширеннями для автоматизації процесів. Автоматизація процесів передбачає використання комп'ютерних технологій та програмної інженерії, щоб допомогти процесам працювати ефективніше та безпечніше. В автоматизації процесів дані процесу збираються комп'ютером, а керовані комп'ютером команди надсилаються до процесу. Ця автоматизація включає розробку як апаратного, так і програмного забезпечення.

Двошнековий екструдер, що використовується в цьому дослідженні, описано на початку цього розділу. Також обговорюється необхідна робота, що виконується для збору вихідних змінних процесу. Для впровадження схеми комп'ютерного керування важливо також налаштувати автоматизацію процесу.

Екструдер

Цю роботу було виконано на двошнековому екструдері ZSK-25 World Lab зі спільним обертанням та переплетеними шнеками. Профіль шнека розроблений таким чином, що гребінь одного шнека обтирає бічні поверхні та основу іншого шнека, що призводить до самоочищення.

Екструдер має взаємозамінні шнекові та барабанні секції, які можна налаштувати для задоволення різних та точних вимог обробки, забезпечуючи оптимальну гнучкість лабораторних та технологічних умов. Екструдер ZSK-25 складається з приводної секції та секції обробки, встановлених на загальній базовій шафі; схема показана на рис. 2.1.

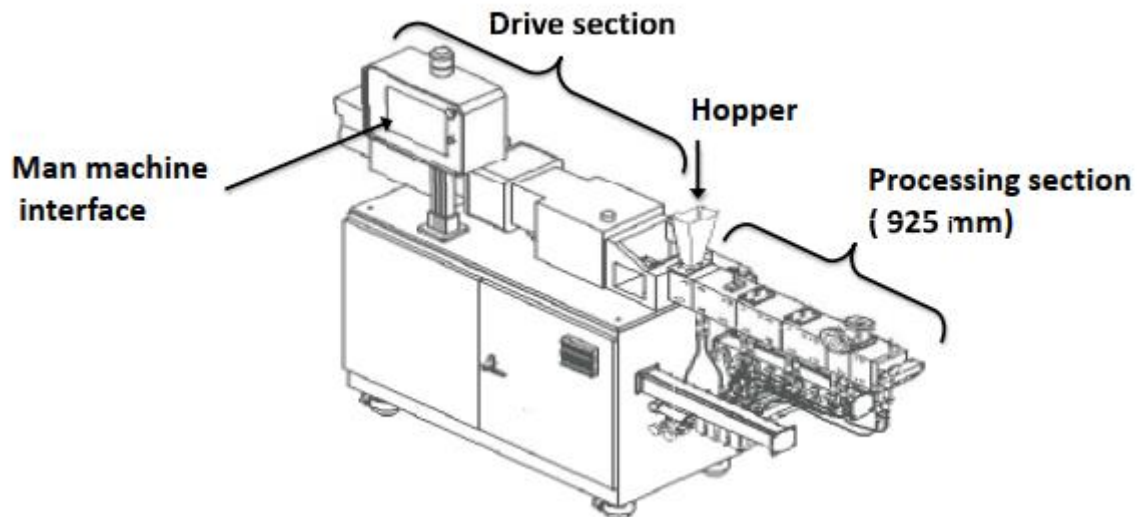


Рисунок 2.1 - Принципова схема екструдера ZSK-25.

Привідна секція екструдера складається з редукторно-розподільної передачі з інтегрованим масляним змащенням, двигуна та муфти обмеження крутного моменту з датчиком розмикання муфти.

Двигун: Двигун змінного струму з відповідним векторним приводом змінного струму розроблений для забезпечення постійного крутного моменту 10:1 у своєму базовому діапазоні швидкостей. Обрана система двигуна та приводу забезпечує повний пусковий момент і чудове регулювання швидкості.

Муфта обмеження крутного моменту: Обмежувач крутного моменту являє собою пружинний кульковий фіксатор, який налаштований на відключення вала двигуна від вхідного вала коробки передач, коли крутний момент двигуна перевищує 115% від номінального вхідного крутного моменту коробки передач.

Редуктор екструдера: Редуктор екструдера — це багатоступеневий редуктор з розділеним крутним моментом, типовий для екструдерів з паралельним обертанням; він складається з редукційної та розподільчої секцій. З вихідного боку ліхтар з'єднує барабан екструдера з корпусом редуктора. Корпус редуктора виготовлений з литого чавуну (сірий чавун). Шестерні редуктора надміцні, виготовлені з загартованої легованої сталі. Зубчаста частина...боки шліфуються. Упорні підшипники використовуються для поглинання зусилля, що

створюється шнеки екструдера. Усі підшипники антифрикційного типу. Радіальні ущільнення на вхідному та вихідному валах запобігають витоку оливи. Шестерні входять у зачеплення, а підшипники редуктора змащуються розбризкуванням. Внутрішнє циркуляційне змащення оливи передбачено для опорних підшипників та для підшипників, розташованих вище за загальний рівень оливи в коробці передач. Редуктор ZSK-25 з передаточним числом 3,22 для швидкості шнека до 600 об/хв зазвичай охолоджується конвекцією повітря. Редуктор з передаточним числом 2,5 для швидкості шнека до 1200 об/хв має з'єднання для водяного охолодження, які підключені трубопроводами до колектора водяного охолодження екструдера.

Модульний принцип побудови шнеків та барабана дозволяє створювати послідовні зони транспортування, пластифікації, гомогенізації, вентиляції та підвищення тиску відповідно до конкретного технологічного процесу. У таблиці 2.1 наведено розміри технологічної секції ZSK-25 TSE. Взаємозачеплені подвійні шнеки, що обертаються разом, мають ущільнювальний профіль. Технологічна секція складається з барабана та шнекової секції.

Таблиця 2.1 - Дані для секції обробки.

Кількість бочок	9
Довжина обробної ділянки	925 мм
Швидкість гвинтових валів	1200 об/хв
Довжина набору гвинтових елементів	925 мм
Відстань між осьовими лініями вала	21,1 мм
Діаметр гвинта	25 мм
Допустимий крутний момент на валу гвинта	82 Нм/вал
Глибина польоту	4,15 мм
Обсяг обробки (на метр)	0,32 л/м

Секція барабана: Секція барабана складається з окремих змінних барабанів. Залежно від процесу, можуть бути передбачені з'єднання для подачі твердих речовин, з'єднання для подачі рідини, вентиляційні з'єднання або бічні з'єднання для бічних живильників. Більшість барабанів мають поздовжні отвори для нагрівання або охолодження водою та два трубопровідні з'єднання. Закриті барабани мають температурні колодязі та, за потреби, отвори для вимірювання тиску або температури продукту. На рис. 2.2 показано фотографію секції барабана екструдера ZSK-25. Окремі секції барабана збираються для досягнення бажаної довжини процесу. Доступні різні конструкції барабанів, що дозволяють багаторазову подачу інгредієнтів, впорскування рідин та вентиляцію вологи або видалення інших летких речовин вздовж технологічної секції.

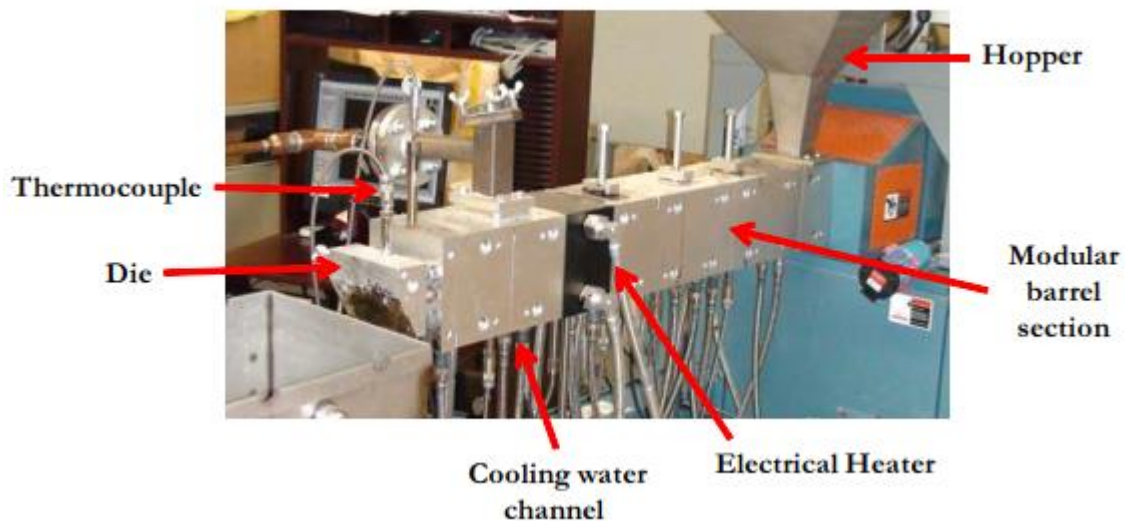


Рисунок 2.2 - Фотографія циліндричної секції екструдера ZSK-25.

Екструдер ZSK-25 World Lab постачається з електричними нагрівачами барабана та охолоджувальним колектором з електромагнітним клапаном для охолоджувальної води для кожного барабана (див. рис. 2.2). Схема контролю температури забезпечує контрольований нагрів та охолодження екструдера. Регулятор температури має подвійний вихід для нагріву/охолодження з адаптивним автоматичним налаштуванням, що підходить для процесу екструзії. Потужність нагріву керує електричним нагрівачем, а потужність охолодження керує електромагнітним клапаном охолоджувальної води для певної зони за

допомогою алгоритмів, пропорційних за часом. Барабан розділений на п'ять температурних зон, і температура кожної зони контролюється окремо. У таблиці 2.2 наведено споживання енергії різними зонами.

Таблиця 2.2 - Дані щодо електричного нагрівання екструдера ZSK-25.

Зона	Бочка	Потужність
1	2 та 3	3,2 кВт
2	4 та 5	3,2 кВт
3	6 та 7	3,2 кВт
4	8 та 9	3,2 кВт
5	-	0,8 кВт

Коли контролер температури для певної зони (1 або більше бочок) вимагає нагрівання, час увімкнення нагрівача збільшується залежно від потреби. Коли контролер температури для певної зони вимагає охолодження, електромагнітний клапан охолодження бочки регулюється часом, щоб відкриватися та закриватися, посилаючи воду до бочки. Вода спалахує, перетворюючись на пару, і тепло відводиться від бочки. Ця пульсуюча дія забезпечує простір в охолоджувальних отворах бочки, щоб забезпечити розширення води під час переходу її стану на пару. Утворена пара конденсується назад у воду в зворотній трубі або одразу після її потрапляння у зворотний колектор води.

Температура кожної зони контролюється локальним пропорційно-інтегрально-похідним (PID) контролером. Однак температура барабана в зоні 4 контролюється неправильно. При вищих швидкостях шнека температура в зоні 4 коливається. Температура розплаву полімеру зростає при вищих швидкостях шнека через вищі швидкості зсуву. Якщо різниця температур між температурою розплаву полімеру та температурою зони 4 перевищує 6°C, то виникає це коливання, що вказує на поганий контроль температури в цій зоні. Таким чином, для цієї технологічної обробки не рекомендується використовувати вищу швидкість шнека (> 200 об/хв). Також не рекомендується використовувати

Таблиця 2.3 - Пояснення позначень гвинтів ZSK-25.

Тип гвинта	Нотація	Пояснення	Застосування
Вперед кон- гвинтовий перехідник	36x36	Транспортний елемент 36 мм довгий з кроком 36 мм	Прошовхує матеріали вперед.
Зворотний кон- гвинтовий перехідник	24x12 лівий	Лівий гвинт довжиною 12 мм з кроком 24 мм	Прошовхує матеріали відсталий.
Замішуванн я блок	KB45/5/12	Двопольотний блок для замішування містить 5 дисків з кутом зміщення 45° між сусідніми дисками; блок має довжину 12 мм	Збільшує ступінь змішування.
Замішуванн я блок	KB45/5/18 N- 3-й поверх	Блок для замішування містить 5 диски з кутом зміщення 45° між сусідніми дисками; блок має довжину 18 мм. Цей блок також містить перехід від двопольотного диска до трипольотного диска	Збільшує ступінь змішування.

У цьому дослідженні для подачі полімерів в екструдер ZSK-25 використовуються дозатори з втратою ваги (LWF). Система подачі з втратою ваги включає бункер або резервуар для подачі, дозувальний дозатор або насос, допоміжну систему ваг та мікропроцесорний контролер.

Система електронно збалансовує вагу тари, тому контролер виявляє лише вагу матеріалу в бункері для подачі. Переваги використання LWF:

- Він справляється з матеріалами, що затоплюються, гарячими та складними для використання.
- Він не піддається впливу пилу та накопичення матеріалів.
- Він добре працює при низьких швидкостях подачі.
- Немає помилок від натягу та відстеження ремня, оскільки вся система зважується.
- Він використовує лише один вхід процесу для зменшення помилок в роботі.
- Немає затримки під час транспортування, вся вага вимірюється постійно.
- Точність подачі завжди можна перевірити під час нормальної роботи без необхідності відбору проб.

Живильники керуються контролером багаторівневого живлення KSL/KLCD виробництва K-Tron America. KSL/KLCD забезпечує можливість взаємодії з максимум 8 живильниками в межах однієї лінії.

Модифікація секції ствола.

На початку цього проекту були доступні дві вихідні змінні процесу: тиск розплаву на фільтрі та крутний момент. Цієї кількості вихідних змінних процесу було недостатньо. Необхідно було виміряти більше вихідних змінних процесу, пов'язаних з процесом екструзії, щоб співвіднести їх з якістю кінцевого продукту. Таким чином, довелося встановити деякі прилади для вимірювання тиску та температури. Однак важливо мати повністю заповнену область, щоб отримати стабільні показники тиску в продукті. Така область доступна на лівому шнековому елементі, місильному блоці або фільтрі. Таким чином, як потенційне

місце для нових вимірювальних приладів було обрано місильний блок, розташований на відстані 625 мм від кінця живильника.

Існуюча секція ствола не мала можливості встановити нові вимірювальні прилади. Таким чином, необхідно було спроектувати та підготувати нову секцію ствола з цими засобами. На рис. 2.4 показано фотографію модифікованої секції ствола. Стару секцію ствола було замінено на модифіковану секцію ствола. Модифіковану секцію ствола також можна побачити на рис. 2.2.

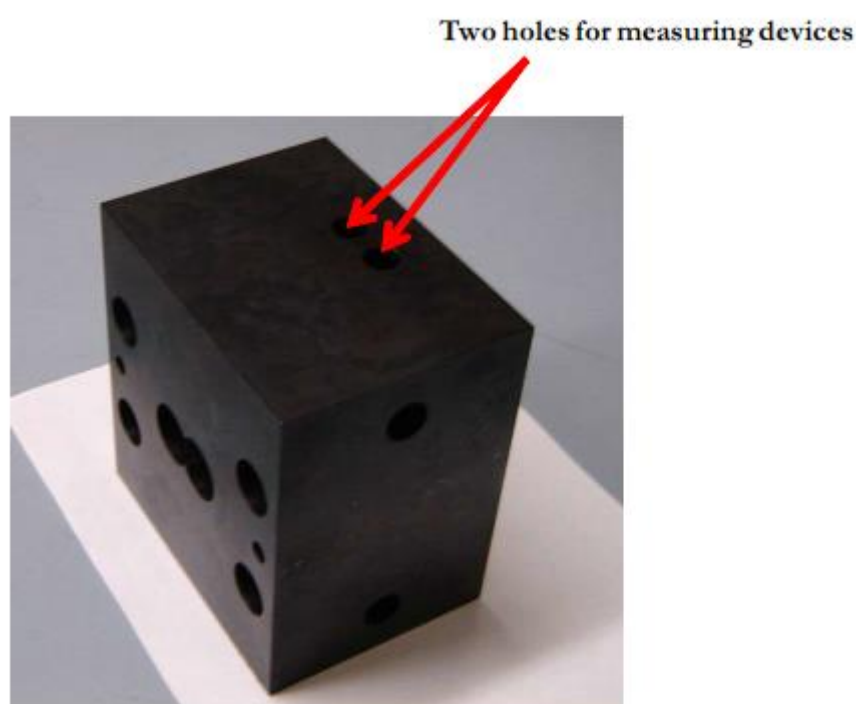


Рисунок 2.4 - Модифікований переріз ствола.

Модифікована секція ствола має два отвори, розташування А та розташування В, на однаковий поперечний переріз. Центри цих отворів знаходяться на відстані 625 мм від кінця живильника за такої конструкції. У місці А було встановлено датчик тиску з вбудованою термопарою для вимірювання як тиску розплаву, так і температури в одному місці. У місці В було встановлено один датчик тиску для вимірювання тиску розплаву в цьому місці. Всі датчики виготовлені компанією Dynisco. Встановлення обох датчиків тиску в одному поперечному перерізі покаже вплив напрямку обертання гвинта на тиск. Крім

того, на матриці було встановлено ще одну термопару для вимірювання температури розплаву в секції матриці. Ці вимірювальні пристрої надають ще 4 вихідні змінні процесу.

Доступ до даних.

Екструдер ZSK-25 має інтерфейс людина-машина для спостереження за даними. На початку цього проекту не було можливості збору та поширення даних. Однак важливо мати доступ до даних для моделювання, валідації, контролю та моніторингу роботи екструдера, що є цілями цього дослідження.

OPC-комунікації даних.

Зв'язування та вбудовування об'єктів для керування процесами є стандартом для зв'язку на заводському рівні між серверами даних та клієнтськими програмами. Це стандарт, розроблений OPC Foundation для зв'язку технологічних даних між системами. Кожен стандарт має своє застосування залежно від необхідної функції. Існує багато постачальників регуляторного контролю та постачальників розширеного контролю систем, що використовуються на заводах. Ці системи використовують заводські дані через OPC-зв'язок. OPC дозволяє кінцевому користувачеві мати свободу вибору поєднання систем без проблем із взаємозв'язком систем. OPC Foundation опублікував низку стандартів; наступні три - це стандарти, що використовуються переважно в промисловості:

- Доступ до даних у режимі реального часу - OPC DA;
- Тривога та події-OPC AE; та
- Доступ до історичних даних – OPC HDA.

Доступ до даних процесу.

Екструдер має програмований логічний контролер (ПЛК). Дані з ПЛК можна отримувати за допомогою OPC DA. Для повного налаштування OPC DA необхідні OPC-сервер та OPC-клієнт. ПК із OPC-сервером RSLinx підключається до ПЛК екструдера за допомогою кабелю RS232. RSLinx сумісний з OPC сервер даних, що підтримує OPC DA. LabVIEW 7.1 виступає в ролі OPC-клієнта. На рис. 2.5 показано деталі налаштування збору даних між ПК та екструдером. Ця

Дані для всіх змінних процесу могли бути отримані зі швидкістю до 0,1 секунди та занесені в електронні таблиці для подальшого використання. На рис. 2.5 показано, що дані були зібрані з двох різних джерел: ПЛК екструдера та контролера подачі K-Tron. Однак усі дані були синхронізовані та занесені в електронну таблицю з однаковою міткою часу.

Автоматизація процесів.

Необхідно встановити двосторонній зв'язок між комп'ютером та процесом для реалізації схем комп'ютерного керування, тобто автоматизації процесів. У розширеній стратегії керування алгоритми керування виконуються на комп'ютері, а результуючий вихід надсилається в процес. У цьому дослідженні алгоритм керування було виконано у скрипті MATLAB LabVIEW. LabVIEW надсилає необхідні вхідні аргументи до MATLAB. MATLAB виконує алгоритм керування та надсилає вихідні дані контролера до LabVIEW. Нарешті, ці вихідні дані контролера надсилаються з ПК до приводу двигуна екструдера та контролера подачі.

На рис. 2.5 показано зв'язок, встановлений між контролером подачі та ПК. Тобто, будь-яку команду з ПК можна надіслати на контролер подачі, і контролер подачі виконає необхідні дії для керування швидкістю подачі. Однак для зв'язку ПК-ПЛК такий зв'язок не був встановлений, лише здійснювався збір даних з ПЛК екструдера. ПЛК має складні програми блокування, що ускладнює надсилання команд керування з комп'ютера для керування вхідними змінними процесу, наприклад, швидкістю шнека, через ПЛК. Більше того, розуміння та переписування програми ПЛК для надсилання команд керування є непростим завданням. Таким чином, швидкість шнека контролювалася в обхід ПЛК. Вихід (швидкість шнека) алгоритму керування надсилався безпосередньо з ПК на привід двигуна за допомогою кабелів RS232. У цьому маршруті для передачі аналогового сигналу використовувався цифро-аналоговий перетворювач вхід до приводу двигуна (див. рис. 2.5). Варто зазначити, що зв'язок між ПК та приводом двигуна був одностороннім.

Для отримання даних на ПК у LabVIEW було розроблено графічний інтерфейс користувача (GUI). Дані були отримані з ПЛК екструдера за допомогою цього інтерфейсу. Рисунок.

На рис. 2.6 показано інтерфейс збору даних ПК-екструдера. Цей інтерфейс показує тиск розплаву в трьох місцях (фільтра, місцезнаходження А та місцезнаходження В), температуру розплаву в двох місцях (фільтра та місцезнаходження А), крутний момент, швидкість шнека та температуру барабана в п'яти зонах. Цей графічний інтерфейс відображає всі змінні процесу в табличному форматі та на графіках для перевірки аномалій процесу. Частоту збору даних можна змінювати з цього інтерфейсу.

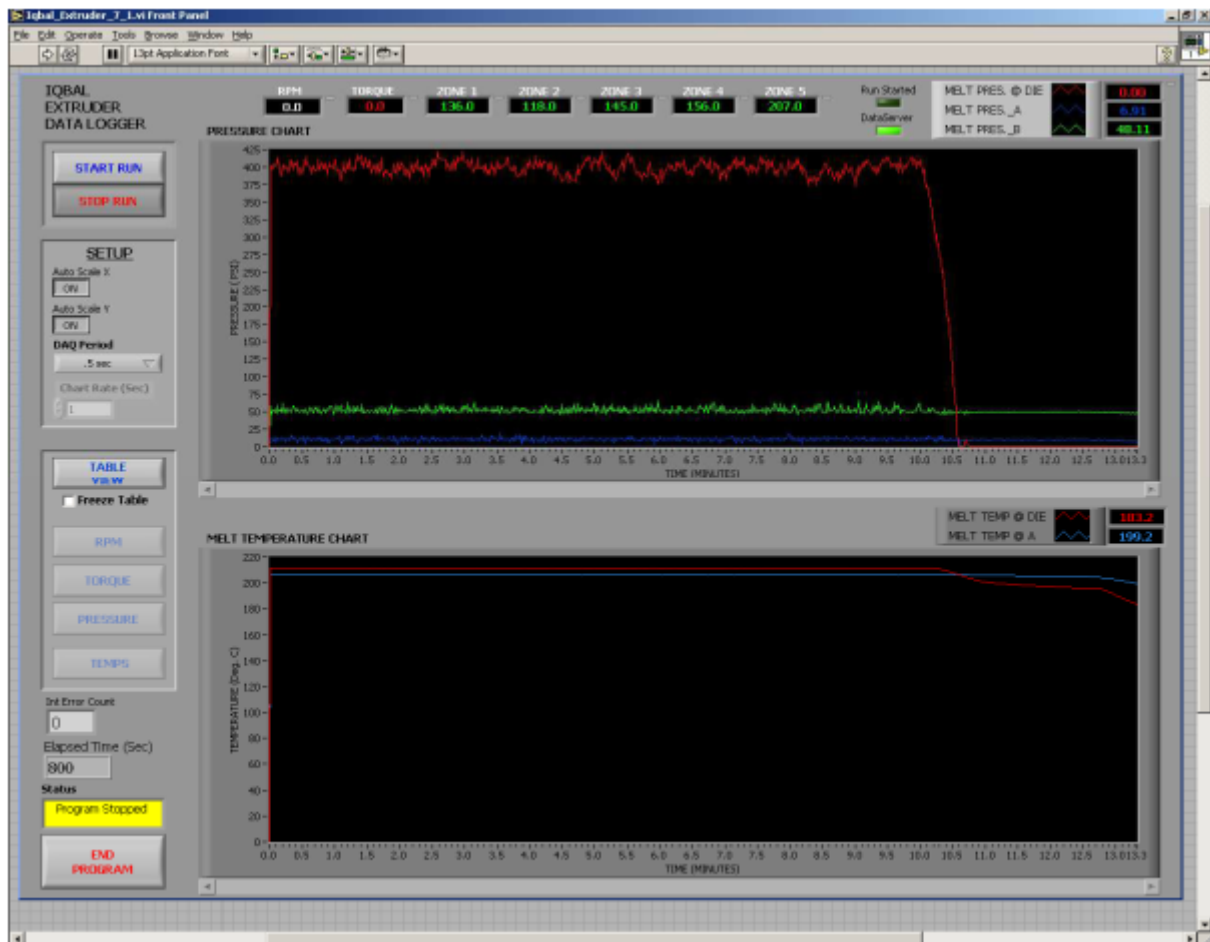


Рисунок 2.6 - Інтерфейс збору даних ПК-екструдера.

Було розроблено ще один графічний інтерфейс користувача (GUI) для отримання даних з ПЛК живильника. На рис. 2.7 показано інтерфейс збору даних

ПК-живильник. Цей інтерфейс також використовувався для керування в замкнутому циклі. За допомогою цього графічного інтерфейсу здійснювався плавний перехід з ручного в автоматичний режим. Інтерфейс ПК-живильник отримував необхідні дані з інтерфейсу ПК-екструдер для виконання будь-якого алгоритму керування. Вихідні дані алгоритмів, маніпульовані змінні, надсилалися до кінцевих елементів керування з цього інтерфейсу.

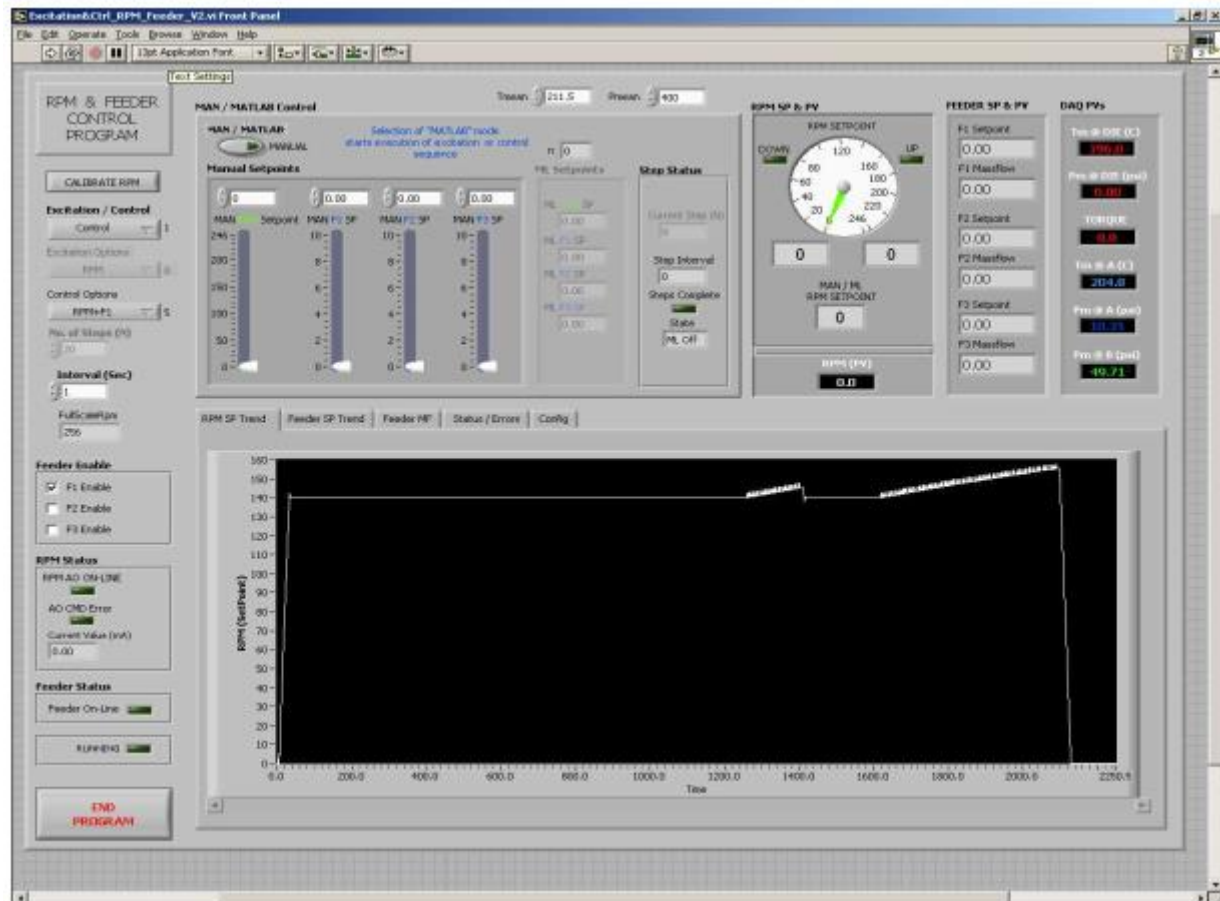


Рисунок 2.7 - Інтерфейс збору даних для ПК-живильника.

3 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

3.1 Моделювання роботи екструдера для ефективного керування

Моделювання "сірої коробки" включає як фундаментальні знання про процес, так і доступ до даних процесу. Включення вищого рівня інтелекту про систему та знань про процес у метод ідентифікації системи показало значний прогрес у методах моделювання. Вкрай важливо враховувати атрибути якості продукту в методах моделювання, а також для процесів екструзії. Метою будь-якої системи керування в пластифікаційній екструзійній установці TSE є контроль властивостей продукту. Властивості продукту часто не вимірюються в режимі онлайн; отже, якості продукту в більшості випадків неможливо контролювати безпосередньо. Ряд дослідників розробили моделі "сірої коробки" для процесів пластифікаційної екструзії, але жоден з методів моделювання не був використаний для керування процесами.

У цьому розділі детально описано систематичний підхід до розробки динамічних моделей «сірого ящика» для прогнозування поведінки вихідних змінних внаслідок змін швидкості обертання вхідної змінної гвинта N для паралельно обертаючогося термоперетворюючого агрегату TSE. Керовані змінні були обрані на основі стаціонарного та динамічного аналізу, а потім розроблені динамічні моделі «сірого ящика», що пов'язують контрольовані змінні з N . Процедура вибору, що базується на параметрах якості продукції, описана в цьому розділі. Моделі, розроблені з використанням цього підходу, були використані для проектування вдосконалених схем керування.

Теорія.

Вкрай важливо зрозуміти основну поведінку змінних процесу, використовуючи фундаментальні знання про процес двошнекової екструзії. Включення таких механістичних знань робить модель більш надійною. Вплив зміни на швидкість шнека від різних вихідних змінних процесу, наприклад,

температури розплаву татиск, можна моделювати на основі знань про першооснови процесу екструзії.

Вплив швидкості шнека на температуру розплаву

У TSE швидкість зсуву для будь-якої швидкості гвинта може бути визначена згідно з рівнянням 3.1:

$$\dot{\gamma} = \frac{\pi D_{ext} N}{H} \quad (3.1)$$

де $\dot{\gamma}$ – швидкість зсуву;

D_{ext} – діаметр гвинта;

H – довжина гвинта глибина каналу.

У процесі екструзії розплави полімерів зазнають високих швидкостей зсуву і, таким чином, знаходяться в режимі розрідження при зсуві, де в'язкість відповідає степеневому закону залежності від швидкості зсуву згідно з рівнянням 3.2:

$$\eta = k \dot{\gamma}^{n-1} \quad (3.2)$$

де η – в'язкість;

k – індекс консистенції;

n – індекс степеневого закону.

Необхідну потужність ($\dot{E}$) на одиницю об'єму для обертання гвинта з певною швидкістю можна виразити як:

$$\dot{E} = \eta \dot{\gamma}^2 \quad (3.3)$$

Температура розплаву полімеру збільшується головним чином за рахунок розсіювання енергії за умови відсутності втрат енергії в системі. Таким чином, потужність нагріває розплав полімеру та пропорційна зміні температури розплаву (T_m):

$$\dot{E} = \dot{m} c_p \Delta T_m \quad (3.4)$$

де m' – масова витрата;

c_p – теплоємність розплаву полімеру.

Об'єднуючи рівняння 3.1, 3.2, 3.3 та 3.4, отримуємо наступне співвідношення між T_m та N отримується:

$$\Delta T_m \propto N^{n+1} \quad (3.5)$$

Рівняння 3.5 вказує на нелінійний зв'язок між T_m та N . Однак лінійний зв'язок можна отримати за допомогою перетворення змінних, такого як $u_1 = N^{n+1}$.

Вплив швидкості шнека на тиск розплаву.

Зміна N впливає як на пропускну здатність, так і на в'язкість. Тиск розплаву (P_m) має лінійну залежність від пропускну здатності та в'язкості. Таким чином, вплив зміни N на P_m , ймовірно, є продуктом подвійного впливу пропускну здатності та в'язкості. Однак, вплив пропускну здатності є миттєвим для TSE. Оскільки TSE працює на умовах голодування, пропускну здатність миттєво повертається до свого початкового значення. Тобто, ефект заповнення екструдера змінюється при зміні N , але встановлюється новий стаціонарний стан досягнуто досить швидко. Отже, поведінка P_m , пов'язана зі зміною N , вважається головним чином зумовленою зміною в'язкості. Це співвідношення можна записати так:

$$P_m \propto \eta \quad (3.6)$$

Поєднуючи рівняння 3.1, 3.2 та 3.6, отримуємо наступне співвідношення між P_m та N :

$$P_m \propto N^{n-1} \quad (3.7)$$

Як і зв'язок між T_m та N , рівняння 4.7 показує нелінійний зв'язок у P через зміну N . Швидкість гвинта можна перевести як $u = N^{n-1}$, щоб отримати лінійний зв'язок з P_m .

Рівняння 3.5 та 3.7 показують, що моделі для T_m та P_m є моделями зі зосередженими параметрами. Однак параметри моделі можна оцінити за допомогою експериментальних даних. Використання експериментальних даних для оцінки параметрів моделі усуває потенційні недоліки моделей, розроблених виключно на основі перших принципів. Наприклад, вплив пропускнуої здатності внаслідок зміни N не враховувався при розробці рівнянь 3.5 та 3.7, щоб зробити моделі якомога простішими. Однак можна зафіксувати вплив пропускнуої здатності, оцінивши параметри моделі за допомогою експериментальних даних.

3.2 Ідентифікація системи

З точки зору моделювання, система – це об'єкт, в якому взаємодіють змінні різних видів та створюють спостережувані сигнали. Як правило, ці спостережувані сигнали називаються виходами. Різні зовнішні подразники впливають на систему. Сигнали, якими можна маніпулювати, називаються входами. Ідентифікація системи означає розробку моделі динамічної системи на основі виміряних вхідно-вихідних даних. По суті, це експериментальний підхід до моделювання динамічних систем. Термін «система» – це широке та узагальнене поняття, яке відіграє важливу роль у сучасній науці. Знання моделі важливе для багатьох промислових процесів, оскільки воно необхідне для проектування та моделювання установки. Ідентифікація системи розробляє модель системи без будь-яких попередніх знань про фізичний процес. Це дозволяє нам моделювати процес високого порядку, щоб отримати процес нижчого порядку з дуже хорошою відповідністю, використовуючи лише вхідні та вихідні дані системи, за умови, що вхідні дані мають достатнє збудження. Навіть коли суттєві параметри процесу неможливо розрахувати або процес занадто складний для аналітичного вираження, ідентифікація системи може бути успішно застосована.

Основні кроки процедури ідентифікації системи для розробки моделі на основі даних:

- Експериментуйте зі збором даних, використовуючи заздалегідь розроблені експериментальні процедури.
- Попередньо обробіть дані, щоб видалити шум, викиди тощо з виміряних даних.
- Виберіть набір моделей-кандидатів.
- Оцініть параметри моделі, використовуючи дані.
- Перевірте модель бажано з іншим набором даних.

Гнучкість моделі дозволяє використовувати одну й ту саму модель для опису динаміки об'єкта за різних ситуацій та умов експлуатації. Тобто, модель повинна бути здатною охопити справжню систему. Однак існування збурень, які користувач не може контролювати, ускладнює досягнення параметрів справжньої системи.

Тип структури моделі та її порядок слід вибрати на основі факторів, викладених нижче:

- Бажано добре узгоджувати прогнозовані моделі результати з експериментальними даними. Таке узгодження моделі показує, наскільки близькі прогнози моделі до виміряних станів.
- Слід проводити статистичні тести на помилки прогнозування моделі. Якщо модель досить добре відображає динаміку процесу, помилки прогнозування повинні бути білим шумом.
- Вибирається модель з найменшою кількістю незалежних параметрів (принцип парсимонії).
- Вибирається модель з найменшим значенням кінцевої помилки прогнозування.
- Вибирається модель з найменшим значенням інформаційного критерію Акайке.

Апроксимація моделі розраховується згідно з рівнянням 3.8

$$Model\ fit = 100 \times \left[1 - \frac{norm(y_{measured} - y_{predicted})}{norm(y_{measured} - y_{average})} \right] \quad (3.8)$$

де y – вихід процесу.

3.3 Експериментальна секція

Змінні процесу.

Цю роботу було виконано на двошнековому екструдері ZSK-25. На рис. 3.1 показано розташування однієї термопари та одного датчика тиску на кінці секції обробки (тобто, на фільтрі) для вимірювання відповідно температури та тиску розплаву полімеру. Крім того, ще два датчики тиску, один з інтегрованою термопарою, були встановлені на відстані 625 мм (точки A та B) від кінця живильника для вимірювання температури та тиску розплаву полімеру. Усі датчики температури та тиску були виготовлені компанією Dynisco (Акрон, Огайо, США). За допомогою цих датчиків вимірюються п'ять вихідних змінних, три тиски розплаву та дві температури розплаву. Крутний момент – ще одна вихідна змінна процесу. Загалом доступно шість вихідних змінних для кореляції зі змінними якості продукту (PQV), і ці вихідні змінні також можна використовувати як керовані змінні.

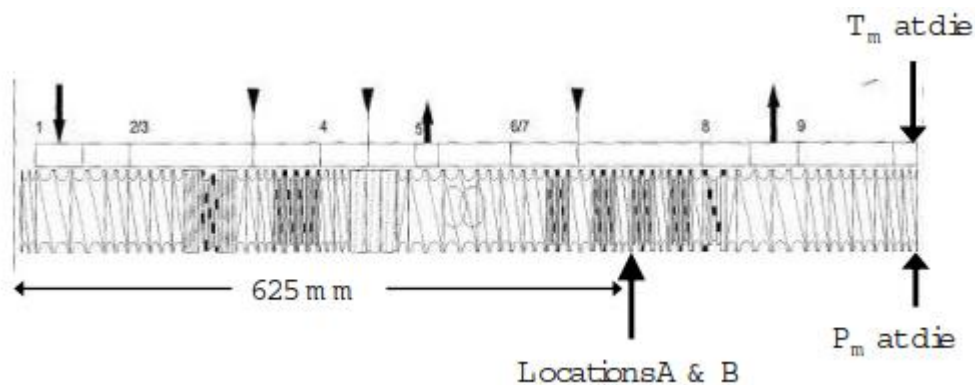


Рисунок 3.1 - Схема ZSK-25 TSE з датчиками.

Матеріали.

У цьому дослідженні було використано два поліетилену високої щільності (HDPE). Комерційні назви цих полімерів - SCLAIR 2907 та SCLAIR 19G, але в цьому дослідженні вони називаються HDPE1 та HDPE2 відповідно. За даними

виробника, індекс розплаву HDPE1 становить 4,9 г/10 хв, а HDPE2 - 1,2 г/10 хв. Обидва полімери мають температура плавлення 135°C.

Експериментальні процедури.

Стаціонарний режим роботи.

Для кореляційного аналізу між шістьма вихідними змінними процесу та коефіцієнтами квантової якості (PQV) було проведено стаціонарний режим роботи термотрансферного прес-агрегату (TSE) для сумішей двох HDPE. Як номінальні робочі умови використовувалися температура барабана 200°C, швидкість шнека 150 об/хв та швидкість подачі 5 кг/год. Три склади HDPE1 (30%, 50% та 70%) змішували з HDPE2 у TSE. TSE дозволяли працювати протягом достатнього часу для досягнення всіх робочих умов при їх номінальних значеннях перед відбором зразків екструдату. Зразки збирали у вигляді таблеток у контейнер протягом 50 секунд. Загалом було зібрано 20 контейнерів зі зразками для вимірювання PQV. Дані процесу збиралися кожні 0,1 секунди. Для кореляційного аналізу вивчали два різні типи PQV: індекс розплаву та реологічні властивості.

Індекс розплаву.

Індекс розплаву (IP) зразків екструдату вимірювали згідно з процедурою ASTM D1238. Використовували температуру 190°C та вага 2,16 кг. Індикатор розплаву, що використовувався в цьому аналізі, був виготовлений компанією Tinius Olsen, Хоршем, Пенсильванія, США, та щедро наданий компанією AT Plastics Inc., Едмонтон, Альберта, Канада.

Реологічна характеристика.

За однакових робочих умов реологічні властивості змінюватимуться залежно від концентрації суміші зразків (Hussein et al. 2005). Таким чином, для реологічної характеристики було розглянуто два зразки з кожного складу суміші HDPE1. Для реологічного аналізу було підготовлено круглі диски діаметром 25 мм завтовшки 2 мм при 200°C за допомогою преса Carver (Wabash, IN). Для динамічної реологічної характеристики використовувався реометр Rheometrics RMS800 з геометрією паралельних пластин. Частотні зміни виконувалися від 0,1

до 100 рад/с з 10% деформацією при 200°C. Азот використовувався для запобігання будь-якій можливій деградації матеріалів під час експерименту. Аналогічна процедура була виконана для визначення показника степеневого закону для HDPE1.

Вхідне збудження.

Класичний метод збудження для процесу з розімкнутим циклом полягає в тому, щоб піддати процес ступінчастій зміні кожної з маніпульованих змінних та подальшому вимірюванню реакції вихідних змінних. Були проведені як позитивні, так і негативні ступінчасті випробування швидкості шнека, щоб отримати оцінку постійних часу для тиску розплаву та температури розплаву у фільтері. Номінальні робочі умови для температури барабана та швидкості подачі становили 210°C та 6 кг/год відповідно. Як технологічний матеріал для динамічного аналізу використовувався лише HDPE1. Швидкість шнека збуджувалася в діапазоні від 120 об/хв до 160 об/хв, щоб отримати краще співвідношення сигнал/шум у вихідних змінних процесу. Реакції вихідних змінних процесу, спричинені меншою зміною швидкості шнека, можуть бути змішані з коливаннями. Починаючи з центральної заданої точки швидкості шнека (140 об/хв), величина 10 об/хв використовувалася на кожному кроці в позитивному напрямку до 160 об/хв, і було надано достатньо часу для встановлення реакції змінних процесу між двома послідовними кроками. Подібна величина кроку та та сама процедура використовувалися в негативному напрямку до 120 об/хв. Постійні часу (τ) 50 с та 10 с були оцінені для температури розплаву на фільтері та тиску розплаву на фільтері відповідно за допомогою ступінчастого випробування швидкості шнека.

Випробування на східчасту характеристику переважно збуджують низькочастотні компоненти процесу; отже, динамічні моделі, розроблені на основі цих експериментів, погано відповідають процесу на вищих частотах. Тому для швидкості гвинта з мінімальною та максимальною швидкостями обертання гвинта 120 об/хв та 160 об/хв було розроблено збудження типу випадкової двійкової послідовності (RBS) для отримання набору значущих

даних. Таке збудження є повністю випадковим. Розрахована постійна часу з даних східчастого випробування показала, що реакція P_m досить швидка порівняно з реакцією T_m . Щоб правильно відобразити динаміку P_m , сигнал RBS був розроблений на основі реакції P_m . Таким чином, τ_r , отримане з реакції P_m , було використано для проектування RBS для N .

Інтервал дискретизації (t_s) 1 секунду був обраний відповідно до $\frac{\tau_p}{20} \leq t_s \leq \frac{\tau_p}{10}$.

Частота Найквіста (f_N) тоді дорівнює половині частоти дискретизації (f_s). Для нижньої межі вхідної частоти (ω_L) було використано значення нуля, щоб отримати точну оцінку коефіцієнта підсилення. Була розрахована нормалізована верхня межа вхідних частот згідно з рівнянням 3.9:

$$\omega_U = K \frac{\omega_{CF}}{\omega_N} \quad (3.9)$$

де K – будь-яке значення від 2 до 3;

ω_{CF} – кутова частота процесу;

ω_N – частота Найквіста ($2\pi f_N$).

Діапазон вхідних частот, отриманий з рівняння 3.9, значення 0,08 було обрано як верхня межа вхідної частоти для експериментального плану. Загалом було згенеровано 120 зразків RBS N між 120 об/хв та 140 об/хв у межах вхідних частот. На рис. 3.2 показано розроблене збудження RBS при швидкості гвинта.

Середнє значення та стандартне відхилення цього збудження становили 141 об/хв та 20 об/хв відповідно. Кожен зразок N збуджувався протягом 1 хвилини, тому, як показано на рисунку 4.2, коли послідовність RBS показує, що перші п'ять зразків мають швидкість 120 об/хв, TSE проводився зі швидкістю 120 об/хв протягом перших п'яти хвилин. Це збудження охоплювало як низькочастотні, так і високочастотні спектри. Дані процесу збиралися кожні 0,1 секунди (10 Гц).

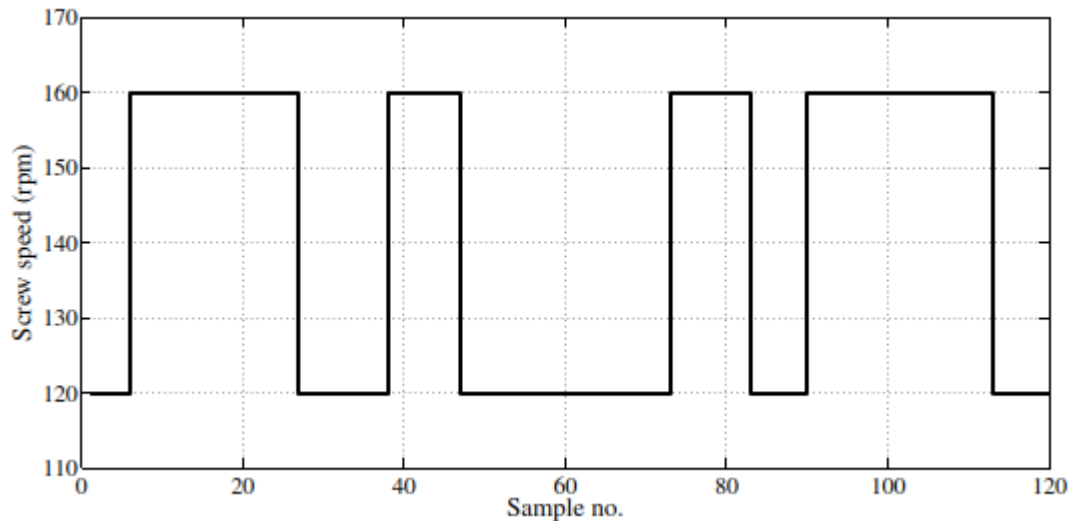


Рисунок 3.2 - Збудження випадковою двійковою послідовністю при швидкості гвинта.

Попередня обробка даних.

У більшості випадків вимірювання змінних процесу спотворюється різними типами шуму процесу або збурень, що виникають з низки джерел, згаданих раніше. Крім того, виміряні дані можуть мати викиди, що може суттєво впливати на моделювання процесу. По суті, попередня обробка даних є ключем до отримання бажаного кінцевого застосування. Вплив шуму можна зменшити за допомогою обробки сигналу або фільтрації. У літературі існує ряд методів фільтрації. У цьому аналізі для зменшення рівня шуму у вимірних даних було використано фільтр експоненціально зваженої ковзної середньої (EWMA). Аналогову версію цього фільтра можна представити диференціальним рівнянням першого порядку,

$$\tau_f \frac{dy_f(t)}{dt} + y_f(t) = y_r(t) \quad (3.10)$$

де y_r – необроблені дані (виміряні);

y_f – відфільтровані дані;

τ_f – стала часу фільтра.

τ_f вибирається значно меншою за домінуючу сталу часу (τ_{do}) процесу, щоб уникнути внесення будь-якої динаміки від фільтра в процес.

Зазвичай для виконання цієї вимоги використовується $\tau_f < 0,1 \tau_{do}$. Рівняння 3.10 можна апроксимувати за допомогою зворотної різниці першого порядку рівняння на k -му кроці та кінцеве рівняння фільтра в дискретній часовій області можна записати так:

$$y_f(k) = \alpha y_r(k) + (1 - \alpha)y_f(k - 1) \quad (3.11)$$

де $\alpha = \frac{t_s}{\tau_f + t_s}$;

t_s – час вибірки.

Рівняння 3.11 має форму фільтра EWMA. Рівняння 3.11 показує, що якщо $\alpha = 1$, фільтрація відсутня, а якщо $\alpha \rightarrow 0$, дані сильно фільтруються, і вимірювання ігнорується.

3.4 Результати та обговорення

Аналіз стаціонарного стану

Аналіз індексу розплаву

На рис. 3.3 показано логарифмічну діаграму індексу розплаву 20 зразків з шістьма вихідними змінними процесу. Склади HDPE1 з вмістом 30%, 50% та 70% були представлені відкритими трикутниками, колами та квадратами відповідно. Для жодного складу HDPE1 суттєвих варіацій у вимірюванні МІ не спостерігалось. МІ полімерної суміші збільшувався зі збільшенням складу HDPE1, оскільки HDPE1 має вищий МІ, ніж HDPE2. Однак, загалом, зі збільшенням МІ значення шести вихідних змінних процесу зменшуються. МІ має обернену залежність від в'язкості. Таким чином, збільшення МІ призводить до зниження в'язкості полімеру. Полімери з нижчою в'язкістю забезпечують меншу в'язку тепловіддачу та менше тепловиділення від тертя; отже, температура розплаву також знижується зі збільшенням МІ. Тиск пропорційний в'язкості, тому збільшення МІ супроводжується зниженням тиску розплаву. Ці характеристики відображені на рис. 3.3.

На рис. 3.3 показано значну варіацію тиску розплаву, особливо P_m в А та P_m в В. Це є доцільним, оскільки ці два датчики тиску встановлені в зоні місильних блоків та поверх шнекових лопатей. Періодичне проходження шнекових лопатей над датчиками вносить значний шум у дані. Крім того, безперервне перемішування та розбиття твердого полімерного шару в розплав у місильних блоках збільшує рівень шуму. Спостерігається, що варіабельність P_m в А та P_m в В збільшується зі збільшенням складу HDPE1. HDPE1 має нижчу в'язкість, ніж HDPE2; отже, в'язка тепловіддача HDPE1 нижча, ніж у HDPE2. Таким чином, для сумішей з вищим складом HDPE1 більше твердого полімеру потрапляє в зону місильного блоку. Додатковий твердий матеріал плавиться в цій зоні та збільшує рівень шуму. З іншого боку, вища в'язкість HDPE2 генерує більше тепла через в'язку тепловіддачу. Тому менше твердого полімеру досягає цієї зони, і, отже, шум менший. Жодна з цих двох вихідних змінних не показала кореляції з МІ. Отримані дані крутного моменту також не показали гарної кореляції з МІ. Суміш з концентрацією 50% HDPE1 показала нижчий крутний момент, ніж суміші з 30% та 70% HDPE1. Однак, P_m на фільтері показав незначні зміни та добре корелював з МІ. Обидві температури розплаву показали гарну кореляцію з МІ. Однак, T_m у точці А має значні зміни, особливо при 70% HDPE1.

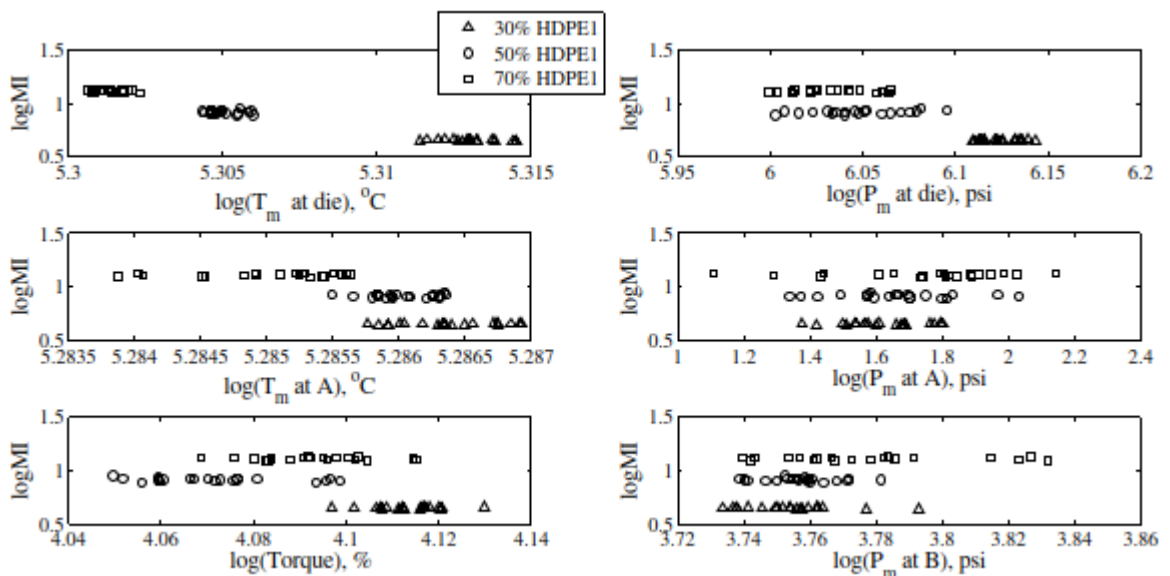


Рисунок 3.3 - Логарифмічні графіки залежності індексу розплаву від вихідних змінних.

Реологічний аналіз

Динамічні реологічні дані були отримані за допомогою частотних змін, виконаних на двох зразках з кожної суміші. Використовуючи ці дані, для кожного зразка була розроблена степенева модель з використанням правила Кокса-Мерца, яке стверджує, що крива залежності в'язкості від стаціонарної швидкості зсуву ідентична кривій динамічної в'язкості від динамічної частоти. Індекс степеневого закону чистого HDPE1 був визначений як 0,8. Швидкість зсуву TSE у стаціонарному стані була розрахована приблизно на 48 с^{-1} згідно з рівнянням 3.1. Стаціонарну зсувну в'язкість при цій швидкості зсуву було розраховано за допомогою отриманої степеневої моделі, а середні значення в'язкості становили $(1270 \pm 7) \text{ Па} \cdot \text{с}$ та $(1155 \pm 7) \text{ Па} \cdot \text{с}$ для 50% HDPE1 та 70% HDPE1 відповідно. Стандартні відхилення в'язкості були дуже малими для 50% HDPE1 та 70% HDPE1. Однак, дещо вищі стандартні відхилення в'язкості спостерігалися серед зразків з 30% HDPE1. Таким чином, для реологічного випробування було використано ще два зразки для розрахунку середньої в'язкості. Отримана середня в'язкість становила $(1570 \pm 35) \text{ Па} \cdot \text{с}$ для суміші з 30% HDPE1. Було помічено, що мінливість в'язкості між зразками зменшувалася зі збільшенням концентрації HDPE1. Це, по суті, вказує на те, що змішування стає більш рівномірним зі збільшенням частки HDPE1 у суміші.

На рис. 3.4 показано логарифмічний графік залежності в'язкості від шести вихідних змінних процесу. Було виявлено, що значення P_m в точці А, P_m в точці В та крутного моменту не показували жодної тенденції зі змінами в'язкості. Зауважте, що графіки залежності в'язкості від температури розплаву на рис. 3.4 показали, що зміни температури розплаву та в'язкості були зумовлені лише змінами складу HDPE1. Графіки не вказували на жодну зміну в'язкості зі змінами температури, що зазвичай моделюється рівнянням Ар-Реніуса. Два зразки з 50% та 70% HDPE1 та чотири зразки з 30% HDPE1 були використані на цьому графіку для спостереження за тенденцією зміни в'язкості з вихідними змінними процесу. В'язкість HDPE загалом не має сильної залежності від температури. Збільшення HDPE1 у суміші зменшило в'язкість; отже, температура розплаву також

знизилися. Обидві температури розплаву показали добру кореляцію з в'язкістю. Однак, T_m в точці А показала більшу варіацію, ніж T_m у фільєрі.

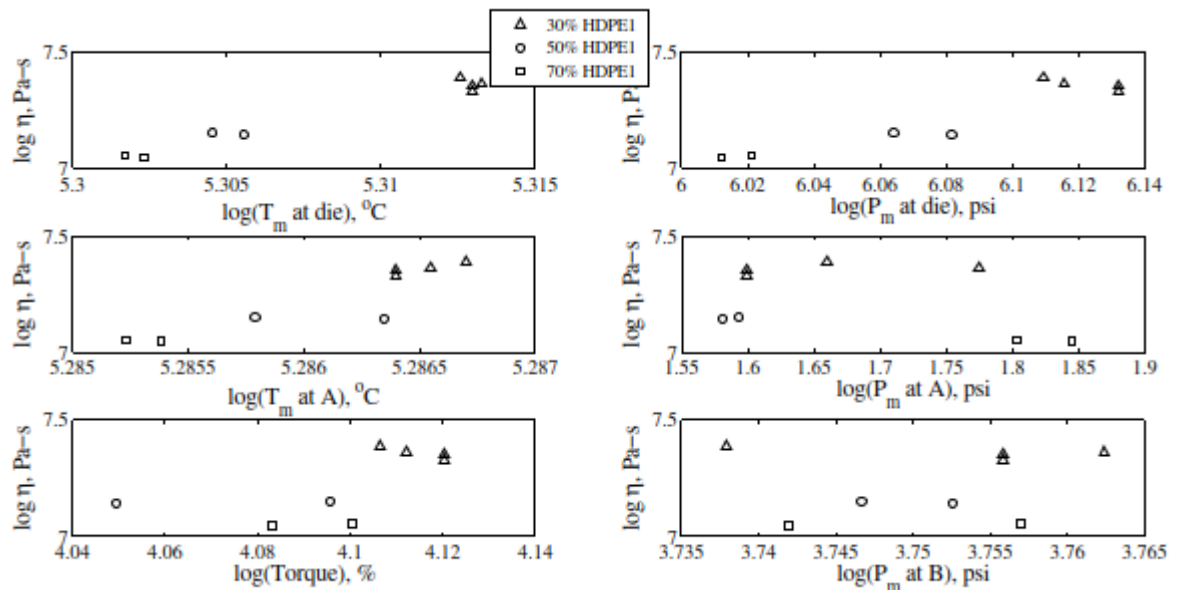


Рисунок 3.4 - Логарифмічні графіки залежності в'язкості від вихідних змінних.

З кореляційного аналізу між змінними якості продукції та вихідними змінними процесу в стаціонарному режимі, P_m на матриці, T_m при А та T_m на матриці були обрані як потенційні контрольовані змінні. Однак динамічна поведінка цих змінних також враховувалася для остаточного вибору контрольованих змінних. Зрештою, динамічна модель буде використана для розробки схеми керування на основі моделі, тому необхідно перевірити динамічну поведінку змінних.

Динамічний аналіз

На рис. 3.5 показано часову тенденцію шести вихідних змінних, спричинену попередньо розробленим збудженням RBS в N. Було помічено, що T_m на кристалі збільшується з збільшення N та T_m на фільєрі зменшувалося зі зменшенням N. Однак було помічено повільний дрейф, що зробило цю змінну нестационарною. Цей дрейф може бути пов'язаний з втратою тепла екструдером під час роботи. Однак цей дрейф настільки повільний, що ним знехтували. Було виявлено, що T_m в точці А також змінюється з N, але не на таку ж величину, як

T_m на фільтрі. Таким чином, T_m на фільтрі була обрана як контрольована змінна серед двох температур розплаву. Спостерігалися значні коливання даних тиску та крутного моменту через шум. Тому P_m в точці А, P_m в точці В та крутний момент не розглядалися для подальшого аналізу.

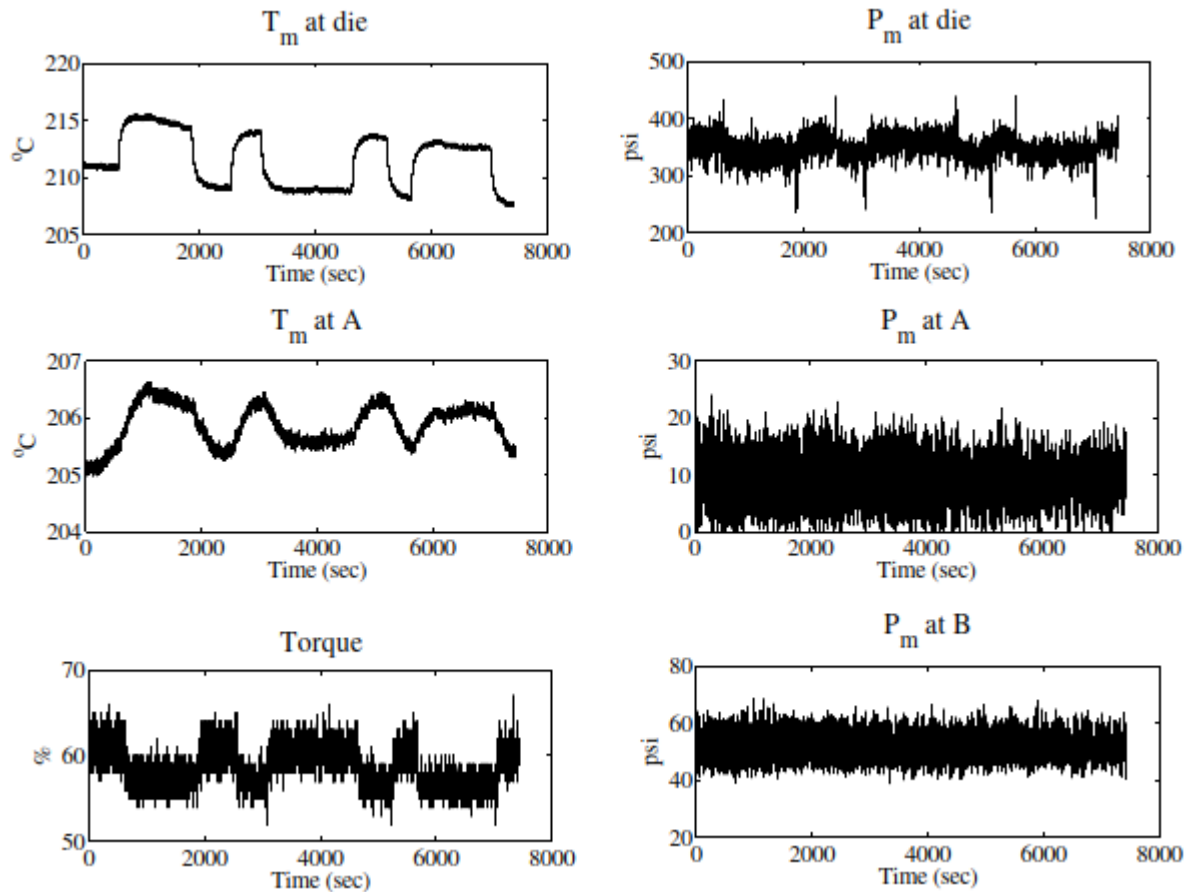


Рисунок 3.5 - Часові графіки вихідних змінних.

ВечораДані були відфільтровані через шум перед розробкою моделі з використанням цих даних. Середній час перебування було розраховано як 98 секунд для TSE з заданими конфігураціями шнеків та стаціонарними робочими умовами. Цей час перебування вважався домінуючою постійною часу. Таким чином, було використано $\tau_f = 8$ секунд, щоб уникнути внесення динаміки фільтра в процес, що дає 0,012 як попередню оцінку α . Однак, деяке точне налаштування цього параметра фільтра було виконано на основі рівня шуму у вимірних даних. Для фільтрації даних використовувалися різні значення α , а рівень шуму в даних

використовувався для вибору кінцевого значення α . Отриманий кінцевий дискретний фільтр представлено в рівнянні 3.12,

$$y_f(k) = 0.03y_r(k) + 0.97y_f(k - 1) \quad (3.12)$$

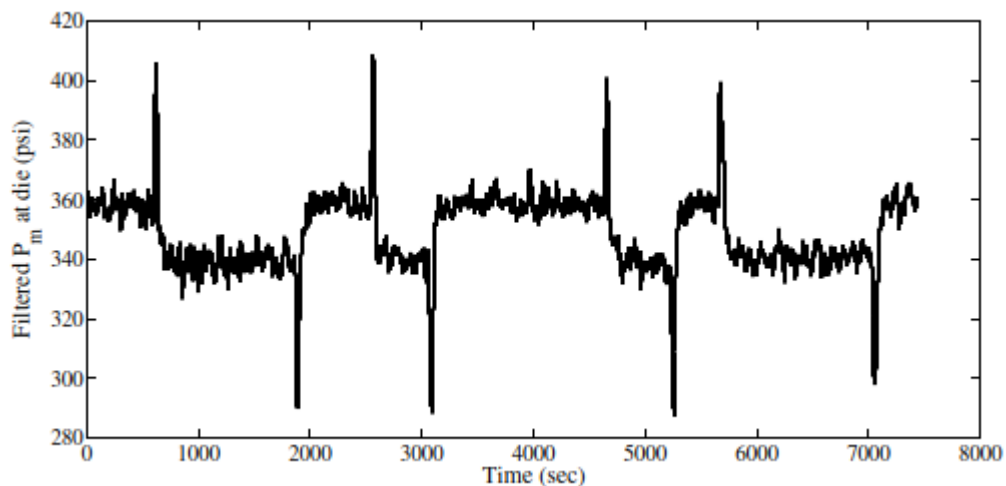


Рисунок 3.6 -Графік залежності фільтрованого P_m від часу на кристалі.

На основі аналізу стаціонарного та динамічного стану, T_m та P_m на матриці були обрані як контрольовані змінні. Розробка динамічних моделей «сірого ящика» між цими двома вихідними змінними процесу та N детально описана в наступних розділах цього розділу.

Для розробки динамічної моделі, що пов'язує температуру розплаву та швидкість шнека, було виконано нелінійне перетворення N згідно з рівнянням 3.5. Однак, щоб зробити дані стаціонарними, лінійний тренд з даних було видалено, тобто дані були детрендовані. Оскільки повна реакція на теплові зміни, спричинені будь-яким вхідним збудженням, набагато повільніша порівняно з іншими змінними процесу, використання високочастотних даних перешкоджає моделюванню низькочастотної та середньочастотної динаміки процесу. Таким чином, дані були знижені до кожні 1 секунду. Така частота дискретизації була використана для проектування збудження RBS в N . Нелінійне перетворення N також було виконано згідно з рівнянням 3.7 для розробки моделі між

відфільтрованими P_m та N . Лінійні тренди з набору даних було видалено. Як і набір даних T_m , дані для P_m на матриці також були знижені до кожні 1 секунду.

Імпульсна реакція.

Щоб оцінити можливу часову затримку та порядок процесу, було оцінено імпульсну характеристику між T_m на матриці з детрендом та N , яка представлена на рис. 3.7(a). Оцінка імпульсної характеристики показує, що перший пік за межами 99% довірчого інтервалу з'являється на сьомому затримці, що вказує на те, що часова затримка між входом та виходом становить 7 вибірок. Однак фізика процесу вказує на те, що не повинно бути жодної значної часової затримки. Щоразу, коли відбувається будь-яка зміна N , ця зміна відбувається одночасно по всьому валу гвинта. Термопара на матриці також негайно відчуває цю зміну. Більше того, спостерігалось поступове збільшення коефіцієнта імпульсної характеристики, починаючи з другої затримки. Це підтверджує твердження, що в цьому процесі може не бути жодної часової затримки, за винятком мінімальної затримки на одну затримку через дискретизацію процесу за допомогою пристрою утримання нульового порядку (ZOH). Таким чином, між T_m та N існує лише одна вибіркова часова затримка. Форма коефіцієнтів імпульсної характеристики вказувала на те, що порядок моделі є щонайменше другого порядку.

Також було перевірено оцінку імпульсної характеристики для відфільтрованого та вилученого тренду P_m на кристалі, яка зображена на рис. 3.7(b). Було помічено, що перший статично ненульовий пік, тобто пік поза 99% довірчим інтервалом, з'явився на другому затримці. Отже, можлива затримка часу між P_m на кристалі та N дорівнює 1 зразку. Однак це властива затримка часу через дискретизацію за допомогою пристрою ZOH. Розташування коефіцієнта імпульсної характеристики вказувало на обернену характеристику P_m через зміну N , а порядок моделі був другим або вищим.

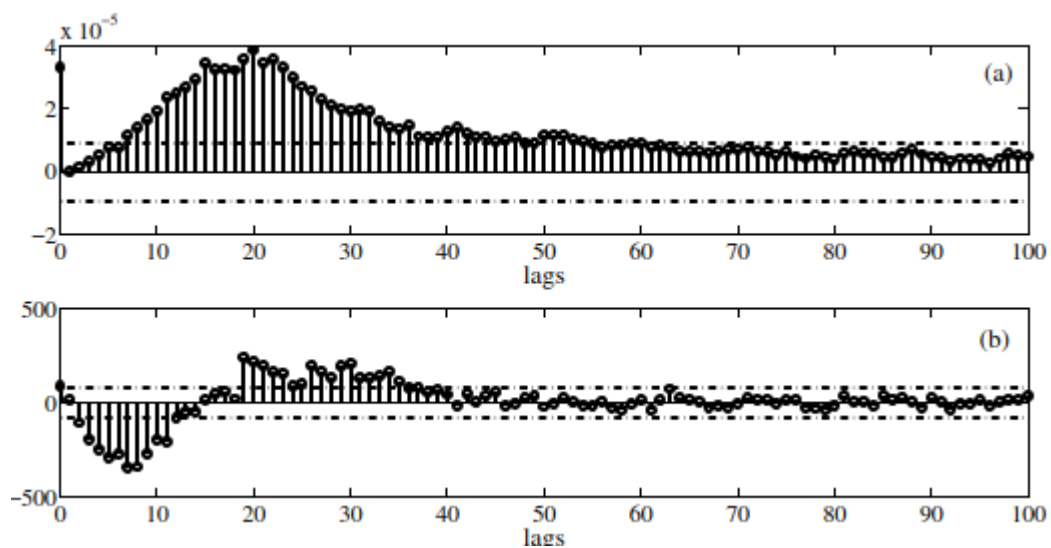


Рисунок 3.7 - (а) Імпульсна реакція детрендованої T_m на кристалі. (б) Імпульсвідгук відфільтрованого P_m з відхиленням тренду на кристалі.

4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ХОРОНИ ПРАЦІ

4.1 Організація охорони праці при роботі з системою управління

Охорона праці розглядає проблеми забезпечення здорових і безпечних умов праці. Виявляє і вивчає можливі причини нещасних випадків, професійних захворювань, аварій, вибухів, пожеж і розробляє систему заходів і вимог з метою виключення цих причин і створення безпечних і сприятливих для людини умов праці.

Завдання охорони праці є зведення до мінімуму імовірності пошкодження або захворювання працівників з одночасним забезпеченням комфорту при максимальній продуктивності праці.

Навчання працівників безпеці праці проводять відповідно до вимог ГОСТ 12. 0.004 - 79, який встановлює порядок і види навчання. На всіх підприємствах і в організаціях незалежно від характеру і ступеню небезпеки виробництва навчання працівників проводять при підготовці нових робітників, проведенні різноманітних видів інструктажів і підвищенні кваліфікації.

Контроль за своєчасним і якісним навчанням виконує відділ охорони праці чи інженер з охорони праці, або ІТП, на якого наказом керівника підприємства покладено ці обов'язки. Ті, що вперше поступають на роботу, навчання проходять згідно з "Типовим положенням про підготовку і підвищення кваліфікації робітників". В журналі обліку навчальної роботи реєструють навчальну тему, за якою проводилось навчання.

Інструктаж працюючих поділяють на вступний, початковий, на робочому місці, повторний, позаплановий і початковий.

Вступний інструктаж з усіма, хто поступає на роботу незалежно від їх освіти і стажу роботи по даній професії, проводить інженер з охорони праці за

програмою, затвердженою головним інженером підприємства, про проведення вступного інструктажу з обов'язковим підписом того, хто проводив інструктаж і того, хто його отримував.

Початковий інструктаж на робочому місці, повторний, позаплановий і поточний проводить керівник робіт.

Початковий інструктаж на робочому місці проводять при прийомі на роботу нових робітників за інструкцією з охорони праці, розробленою для окремих професій або видів робіт. Всі робітники після цього інструктажу і перевірки знань 2-5 змін (залежно від навичок і стажу роботи) працюють під наглядом бригадира чи майстра, потім оформляється допуск до їх самостійної праці.

Повторний інструктаж проходять всі працівники незалежно від кваліфікації, освіти і стажу роботи через три місяці. Його проводять з метою перевірки знання робітниками правил і норм з охорони праці.

Позаплановий інструктаж проводять коли змінилися правила охорони праці або технологічний процес, обладнання, інструмент та інші фактори, що впливають на безпеку праці; коли працівники порушують правила охорони праці, що можуть призвести чи призвели до травм, аварій чи пожежі, вибуху. Його проводять індивідуально чи з групою робітників однієї професії за програмою початкового інструктажу на робочому місці. При його реєстрації вказують причину, яка спричинила його проведення.

Умови праці мають велике значення практично для всіх виробничих показників - продуктивності праці, якості робіт, безпеки працівників та інше.

Санітарно-гігієнічні умови праці характеризуються показниками виробничого середовища - рівнем освітлення, мікрокліматичними параметрами, загазованістю і запиленістю повітряного середовища, рівнем шуму і вібрації, наявністю іонізуючого випромінювання та інше.

4.2 Електробезпека

Електричні установки, з якими доводиться мати справу практично всім працюючим по встановленню та налагодженню засобів автоматизації, виявляють для людини велику потенційну небезпеку, яка збільшується у зв'язку з тим, що органи чуття людини не можуть на відстані виявити присутність електричної напруги на обладнанні.

Степінь ураження електричним струмом залежить від цілого ряду факторів: значення сили струму, електричного опору тіла людини та тривалості протікання через неї струму, виду та частоти струму, індивідуальних властивостей людини та умов навколишнього середовища.

Конструкція електроустановок має відповідати умовам їх експлуатації та забезпечувати захист персоналу від дотику з струмоведучими та рухомими частинами, а обладнання - від попадання всередину посторонніх твердих тіл та води.

Конструкція, вид виконання, спосіб встановлення, клас ізоляції застосовуваних провідників, кабелів, пристроїв та іншого електрообладнання відповідають вимогам електробезпеки. За ступенем ураження людей електричним струмом котельня відноситься згідно ПУЕ 1.1.13 до категорії приміщень з підвищеною небезпекою (висока температура, можливість одночасного дотику до металевих елементів технологічного обладнання або металоконструкцій будинку та металевих корпусів електрообладнання).

У нормальному режимі роботи обладнання - можливість ураження працівників електричним струмом виключена. Але на випадок аварії для запобігання ураження струмом людей передбачене захисне заземлення. Згідно ПУЕ 1.7.65 допустимий опір заземлення повинен бути не більшим 10 Ом.

При виконанні монтажних робіт використовуються переносні електроінструменти (електродрилі, електрошліфувальні установки, тощо).

Для забезпечення безпечної праці корпуси однофазних електроприймачів повинні занулюватись.

Захист людини від ураження електричним струмом в мережах з зануленням здійснюється тим, що при замиканні одної з фаз на занулений корпус в ланці цієї фази виникає струм короткого замикання, що діє на струмовий захист (плавкий запобіжник, автомат), в результаті чого відбувається відключення аварійної ділянки від мережі. Крім того, ще до спрацювання захисту струм короткого викликає перерозподіл напруги в мережі, що приводить до зниження напруги корпусу відносно землі. Таким чином, занулення зменшує напругу дотику та обмежує час, на протязі якого людина, що доторкнулася до корпусу, може потрапити під дію напруги.

Для того, щоб забезпечити швидке (на протязі декількох секунд) відключення аварійної ділянки, струм короткого замикання повинен бути достатньо великим. Відповідно до вимог ПУЕ струм короткого замикання повинен не менше ніж в три рази перевищувати номінальний струм плавкої вставки найближчого запобіжника або номінальний струм нерегульованого розчеплювача автоматичного вимикача. При використанні автоматичних вимикачів, що мають тільки електромагнітний розчіплювач (відсічку), струм короткого замикання повинен перевищувати значення струму встановлення миттєвого спрацювання в 1,25-1,4 рази в залежності від номінального струму.

В однофазних електроприймачів, що включені між фазним та нульовим робочим проводами, занулення корпусів слід виконувати з допомогою окремого (третього) провідника, який повинен з'єднувати корпус електроприймача з нульовим захисним проводом. В таких випадках під'єднувати корпуси електроприймачів для забезпечення електробезпеки до нульового робочого проводу недопустимо, оскільки при його розриві (перегоранні запобіжника) всі під'єднані до нього корпуси виявляться під фазною напругою відносно землі.

В мережі з зануленням недопустимо використовувати заземлення окремих електроприймачів, не під'єднавши їх перед цим до нульового захисного провідника. В цьому випадку при замиканні фази на заземлений, але не приєднаний до нульового захисного провідника корпус створюється коло струму через заземлення цього корпусу та заземлення нейтралі джерела струму. Такий випадок небезпечний, оскільки засоби захисту не зможуть відключити такий електроприймач через мале значення струму і тому небезпечна напруга на всіх корпусах може зберігатися тривалий період, поки заземлений приймач не буде відключений вручну.

Важливо відмітити, що якщо занулений корпус одночасно заземлений, то це тільки покращує умови безпеки, оскільки забезпечує додаткове заземлення нульового захисного проводу.

Для ізоляції людини від частин електроустановок, що знаходяться під напругою, використовуються основні та допоміжні ізолюючі засоби, а саме слюсарно-монтажний інструмент з ізольованими ручками, коврики, ізолюючі підставки, тощо.

У приміщеннях, де знаходяться вимірювальні прилади, необхідно забезпечити виконання заходів по боротьбі з статичною електрикою (тобто прилади повинні бути заземлені). Найпростішим засобом є підтримка відносної вологості повітря на рівні 50 - 60 % за допомогою побутового електрозволожувача.

Підлогу слід виконувати відповідно до ГОСТ 12.4.124-83, використовуючи антистатичне покриття на проходах і біля робочих місць.

Робітникам рекомендовано носити одержу з природних матеріалів або з комбінованих - природних і штучних волокон. Для зняття електростатичних зарядів з одержу слід використовувати антистатики побутового призначення.

Оскільки корпуси приладів виконані з металу, то для усунення небезпеки ураження людини електричним струмом (можливий пробій на корпус приладу) використовується захисне заземлення.

4.3 Розрахунок заземлення

Розрахуємо систему заземлення для електроустаткування, яке працює від напруги 220 В.

$$R_{\text{заз}} \leq \frac{U}{I_p} = \frac{220}{66} = 3.3 \leq 4 \text{ Ом}$$

Визначаємо опір ґрунту: $\rho = \kappa_n * \rho_n = 2 * 200 = 400 \text{ Ом м}$,

де κ_n - коефіцієнт підсилення;

ρ_n — питомий опір ґрунту (вибирається з довідкової літератури).

Визначаємо опір одиночного вертикального заземлювача:

$$R_B = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} * \frac{4t+1}{4t-1} \right)$$

де t - відстань від середини заземлювача до поверхні ґрунту, м;

l, d - довжина і діаметр стержня заземлювача, м;

$$R_B = 96 \text{ Ом.}$$

Визначаємо опір сталевій полоси, що з'єднує стержневі заземлювачі:

$$R_{II} = (\rho / 2\pi l) * \ln(l^2 / dt) = 61 \text{ Ом.}$$

Визначаємо орієнтовне число стержневих заземлювачів:

$$n = R_B / [r_B] \eta_B = 96 / 4 * 1 = 24 \text{ шт.};$$

r_B - допустимий по нормам опір заземляючого пристрою,

η_B - коефіцієнт використання вертикальних заземлювачів (для орієнтовного розрахунку приймається рівним 1).

Приймаємо розміщення вертикальних заземлювачів по контуру з відстанню між сталевими заземлювачами рівним 21. З довідкової літератури визначаємо $\eta_B = 0,66$ і $\eta_I = 0,39$.

Визначаємо необхідну кількість вертикальних заземлювачів

$$n = R_B / [r_B] \eta_B = 96 / (4 * 0.66) = 36$$

Розраховуємо загальний розрахунковий опір аземлюючого пристрою R з врахуванням з'єднувальної полоси

$$R = R_B R_{II} / (R_B \eta_I + R_{II} \eta_B n) = 3.9 \text{ Ом.}$$

Розрахунок проведено правильно, оскільки виконується умова $R \leq [r_B]$.

Розрахунок штучного заземлення:

Приймаємо, що опір захисного заземлення не повинен перевищувати 4 Ом:

$$R_{33} = \frac{R_c R_n}{R_c + R_n} \leq 4 \text{ Ом}$$

де R_{33} – опір захисного заземлення;

R_c – опір стержневих заземлювачів;

R_{II} – опір поперечних заземлювачів.

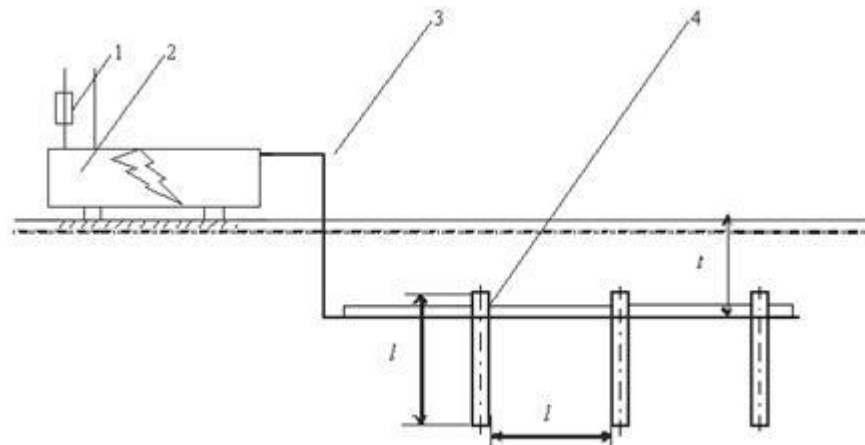


Рисунок 6.1 - Пристрій заземлення

4 – плавка вставка; 2 – електроустановка; 3 – з'єднувальна штаба; 4 – трубчатий заземлювач

Опір одиночного стержневого заземлювача розтіканню електричного струму:

$$R_{oc} = \frac{\rho_p}{2\pi l} \left(\ln \frac{2l}{d} + \ln \frac{4h' + l}{4h' - l} \right)$$

де h – відстань від поверхні ґрунту до заземлювача і становить 0,8 м;

l – довжина стержневого заземлювача 3 м;

d – діаметр стержневого заземлювача 50 мм.

$$R_{oc} = \frac{750}{2 \cdot 3,14 \cdot 3} \left(\ln \frac{2 \cdot 3}{0,05} + \ln \frac{4 \cdot 0,8 + 3}{4 \cdot 0,8 - 3} \right) = 39,8 \cdot (0,18 + 3,43) = 143,8 \text{ Ом}$$

Опір одиночного поперечного заземлювача:

$$R_{ок} = \frac{\rho_p}{2\pi l} \ln \frac{2l^2}{bh'}$$

де l – довжина поперечного заземлювача 2,5 м;

b – ширина полоси заземлювача 30 мм;

ρ_p – розрахунковий опір ґрунту: для поперечних електродів 1000 Ом·м, для стержневих електродів 750 Ом·м.

$$R_{ок} = \frac{1000}{2 \cdot 3,14 \cdot 2,5} \ln \frac{2 \cdot 2,5^2}{0,03 \cdot 0,8} = 63,7 \cdot 6,25 = 398,1 \text{ Ом}$$

В наслідок взаємовпливу вводимо коефіцієнт використання заземлювачів:

$$\eta = \frac{R_0}{nR_0}$$

де R_d – допустимий опір заземлення, що становить 4 Ом;

R_0 – опір одиночного заземлювача.

ВИСНОВКИ

У роботі описується створення та впровадження вдосконаленої схеми керування для пластифікуючого двошнекового екструдера, включаючи налаштування збору даних, розробку моделі, проектування контролера та реалізацію контролера в режимі реального часу. Вдосконалена схема керування була розроблена для лабораторного двошнекового екструдера ZSK-25, що обертається в одному напрямку та використовується для переробки полімерів. Як технологічні матеріали використовувалися два поліетилену високої щільності з різними індексами плавлення.

Було проведено поглиблений огляд моделювання та керування процесом двошнекової екструзії та виявлено низку проблем керування процесом, включаючи багатовхідні та багатовихідні процеси, нелінійність процесу, затримку в часі, взаємодію між змінними процесу та вимірювання якості продукту в режимі реального часу.

Було розроблено інфраструктуру для збору даних та проведено модернізацію автоматизації екструдера. Такі структури є вкрай важливими для моделювання, валідації, керування та моніторингу екструдерів у режимі реального часу. Збір даних був проведений за допомогою RSlinx як OPC-сервера та LabVIEW як OPC-клієнта. Автоматизація процесів дозволяє керувати приводом двигуна та швидкістю подачі, надсилаючи команди системі з ПК.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Akdogan, H.; Rumsey, T. R. Dynamic response of a twin-screw lab-size extruder to changes in operating variables // *Food Science and Technology*. – 1996. – Vol. 29, No. 8. – P. 691–701.
2. Anderson, P. G. *Mixing Practice in Co-rotating Twin-screw Extruders*. – New York: Hanser Publishers, 1994. – 250 p.
3. Bai, S. L.; Wang, G. T.; Hiver, J.; G'Sell, C. Microstructures and mechanical properties of polypropylene/polyamide 6/polyethylene-octene elastomer blends // *Polymer*. – 2004. – Vol. 45. – P. 3063–3071.
4. Barres, C.; Vergnes, B.; Tayeb, J. An improved thermal model for the solid conveying section of a twin-screw extrusion cooker // *Journal of Food Engineering*. – 1991. – Vol. 15, No. 3. – P. 167–185.
5. Bawiskar, S.; White, J. L. Melting model for modular self wiping co-rotating twin screw extruders // *Polymer Engineering and Science*. – 1998. – Vol. 38, No. 5. – P. 727–740.
6. Booy, M. L. The influence of non-newtonian flow on effective viscosity and channel efficiency in screw pumps // *Polymer Engineering and Science*. – 1981. – Vol. 21, No. 9. – P. 93–99.
7. Box, G. E. P.; Jenkins, G. M.; Reinsel, G. C. *Time Series Analysis, Forecasting and Control*. – New Jersey: Prentice Hall, 1994. – 598 p.
8. Chen, H.; Sundararaj, U.; Nandakumar, K. Investigation of the melting mechanism in a twin-screw extruder using a pulse method and online measurement // *Industrial Engineering and Chemistry Research*. – 2004. – Vol. 43. – P. 6822–6831.
9. Chiu, S.; Pong, S. In-line viscosity fuzzy control // *Journal of Applied Polymer Science*. – 2001. – Vol. 79, No. 7. – P. 1249–1255.

10. Costin, M. H.; Taylor, P. A.; Wright, J. D. On the dynamics and control of a plasticating extruder // *Polymer Engineering and Science*. – 1982. – Vol. 22, No. 17. – P. 1095–1106.
11. Iqbal, M. H.; Sundararaj, U.; Shah, S. L. New approach to develop dynamic grey box model for a plasticating twin-screw extruder // *Industrial Engineering and Chemistry Research*. – 2010. – Vol. 49. – P. 648–657.
12. McAfee, M. Enhancing process insight in polymer extrusion by grey box modelling // *Transactions of the Institute of Measurement and Control*. – 2007. – Vol. 29, No. 5. – P. 467–488.
13. Nabar, Y.; Narayan, R. Analysis of the dynamic behavior of a starch foam extrusion process // *Journal of Applied Polymer Science*. – 2006. – Vol. 101, No. 6. – P. 3983–3995.
14. Poulesquen, A.; Vergnes, B.; Cassagnau, P.; Michel, A. A study of residence time distribution in co-rotating twin-screw extruders. Part II: Experimental validation // *Polymer Engineering and Science*. – 2004. – Vol. 43, No. 12. – P. 1849–1862.
15. Previdi, F.; Savaresi, S. M.; Panarotto, A. Design of a feedback control system for real-time control of flow in a single-screw extruder // *Control Engineering Practice*. – 2006. – Vol. 14, No. 9. – P. 1111–1121.
16. Vergnes, B.; Berzin, F. Modelling of flow and chemistry in twin screw extruders // *Plastics, Rubbers and Composites*. – 2004. – Vol. 33, No. 9/10. – P. 409–415.
17. Wang, L.; Smith, S.; Chessari, C. Continuous-time model predictive control of food extruder // *Control Engineering Practice*. – 2008. – Vol. 16, No. 10. – P. 1173–1183.
18. Zhang, Q. H.; Chen, D. J. Percolation threshold and morphology of composites of conducting carbon black/polypropylene/EVA // *Journal of Material Science*. – 2004. – Vol. 39. – P. 1751–1757.
19. А.Г. Микитишин, М.М. Митник, П.Д. Стухляк, В.В. Пасічник Комп'ютерні мережі. Книга 1. [навчальний посібник] (Лист МОНУ №1/11-8052 від 28.05.12р.) - Львів, "Магнолія 2006", 2013. – 256 с.

20. А.Г. Микитишин, М.М. Митник, П.Д. Стухляк, В.В. Пасічник Комп'ютерні мережі. Книга 2. [навчальний посібник] (Лист МОНУ №1/11-11650 від 16.07.12р.) - Львів, "Магнолія 2006", 2014. – 312 с.
21. Микитишин А.Г., Митник, П.Д. Стухляк. Комплексна безпека інформаційних мережевих систем: навчальний посібник – Тернопіль: Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2016. – 256 с.
22. Микитишин А.Г., Митник М.М., Стухляк П.Д. Телекомунікаційні системи та мережі : навчальний посібник для студентів спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» – Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2017 – 384 с.
23. Введення в комп'ютерну графіку та дизайн: Навчальний посібник для студентів спеціальності 174 "Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка"/Укладачі: О.В. Тотосько, П.Д. Стухляк, А.Г. Микитишин, В.В. Левицький, Р.З. Золотий - Тернопіль: ФОП Паляниця В.А., 2023 - 304с. <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/41166>.
24. Пилипець М. І. Правила заповнення основних форм технологічних документів : навч.-метод. посіб. / Уклад. Пилипець М. І., Ткаченко І. Г., Левкович М. Г., Васильків В. В., Радик Д. Л. Тернопіль : ТДТУ, 2009. 108 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/42995>.