

ХЕРСОНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ФАКУЛЬТЕТ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ТРАНСПОРТУ

КАФЕДРА АВТОМАТИЗАЦІЇ, РОБОТОТЕХНІКИ І МЕХАТРОНІКИ

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи бакалавра

на тему: «Автоматизація технологічного процесу виробництва гранульованих
кормів для домашніх тварин»

«Automation of the technological process of granular feed production for domestic
animals»

Виконав: студент 2 курсу, групи 2Ас
спеціальності 174 - «Автоматизація,
комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка»

Мочалюк В.В.

Керівник: к.т.н., доцент Сарафаннікова Н.В.

Рецензент: Корніловська Н.В.

Херсон – 2026 рік

Херсонський національний технічний університет

Факультет	Інженерії та транспорту
Кафедра	Автоматизації, робототехніки і мехатроніки
Освітньо-кваліфікаційний рівень	бакалавр
Спеціальність	174 - «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри автоматизації,
робототехніки і мехатроніки
Селіверстов І.А.

«___» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу студенту

Мочалюку Володимирі Васильовичу

1. Тема роботи:	Автоматизація технологічного процесу виробництва гранульованих кормів для домашніх тварин Automation of the technological process of granular feed production for domestic animals
керівник роботи:	к.т.н., доцент Сарафаннікова Н.В. затверджені наказом вищого навчального закладу від «23 » січня 2026 р. № 97-с
2. Строк подання студентом проекту	«12» червня 2026 р.
3. Вихідні дані до проекту:	Розробити автоматизовану систему керування технологічного процесу виробництва гранульованих кормів для домашніх тварин згідно Технічного завдання
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки	1) Аналіз технологічного процесу виробництва гранульованих кормів для домашніх тварин; 2) Математичний аналіз екструзійної установки для виробництва гранульованих кормів як об'єкта керування; 3) Проектування автоматизованої системи керування екструзійною установкою для виготовлення гранульованих кормів; Висновки.
5. Перелік графічного матеріалу	1) Загальна технологічна схема виробництва гранульованих кормів для домашніх тварин. 2) Схема автоматизації функціональна 3) Схема з'єднань зовнішніх проводок; 4) Математична модель . 5) Екранні форми.

6. Консультанти розділів проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Основна частина	Сарафаннікова Н.В., к.т.н., доцент		

7. Дата видачі завдання

« 23 » січня 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технологічного процесу виробництва гранульованих кормів для домашніх тварин	01.04.2026	
2	Математичний аналіз екструзійної установки для виробництва гранульованих кормів як об'єкта керування	15.04.2026	
3	Проектування автоматизованої системи керування екструзійною установкою для виготовлення гранульованих кормів	30.04.2026	
4	Оформлення пояснювальної записки	15.05.2026	
5	Розробка технічної документації на кваліфікаційну роботу	30.05.2026	
6	Підготовка роботи до захисту	05.06.2026	

Студент

Мочалюк В.В.

(підпис)

Керівник проекту

Сарафаннікова Н.В.

(підпис)

Номер рядка	Формат	Позначення	Найменування	Кількість	Шифр документа	Примітка
1	A4		Завдання на проектування	1		
2	A4	ХНТУ 151.КРБ.26.001ТЗ	Технічне завдання	6	ТЗ	
3	A4	ХНТУ 151.КРБ.26.001ПЗ	Пояснювальна записка	105	ПЗ	
4	A1	Демонстраційне креслення	Загальна технологічна	1		
			виробництва			
			кормів для домашніх			
5	A1	ХНТУ 151.КРБ.26.001А2	Автоматизована система	1	A2	
			керування процесом			
			гранульованих кормів для .			
			для домашніх тварин.			
			автоматизації			
6	A1	ХНТУ 151.КРБ.26.001Е4	Автоматизована система	1	E4	
			керування процесом			
			гранульованих кормів для .			
			для домашніх тварин.			
			з'єднань зовнішніх			
7	A1	Демонстраційне креслення	Автоматизована система	1		
			керування процесом			
			гранульованих кормів для .			
			для домашніх тварин.			
			Математична модель			
8	A1	Демонстраційне креслення	Автоматизована система	1		
			керування процесом			
			гранульованих кормів для .			
			для домашніх тварин..			
			форми			

		.			ХНТУ 174.КРБ.26.001 ВП									
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата	Відомість об'єму роботи					Лім.	Лист	Аркушів		
Розроб.	Мочалюк													
Перевір.	Сарафанніков											4	1	
оРеценз.										ХНТУ, гр. 2Ас				
Н.	Сарафанніков													
Затверд	Селіверстов													

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота бакалавра: 105 сторінки, 23 рисунки, 11 таблиць, 5 додатків. Графічна частина – 5 аркушів формату А1 .

Кваліфікаційна робота присвячена підвищенню ефективності та стабільності виробництва гранульованих кормів для домашніх тварин шляхом створення автоматизованої системи керування екструзійною лінією.

Проведено аналіз процесу екструзійного варіння сухих кормів, визначено ключові параметри якості: температура зон та матриці, тиск перед матрицею, вологість сировини і питома механічна енергія.

Розроблено математичну модель шнекового циліндра, отримано рівняння перехідного процесу та передатні функції. На основі моделювання спроектовано трирівневу систему керування: ПІД-регулювання температури, каскадне регулювання вологості, захисти й блокування на рівні контролера; SCADA-інтерфейс збору даних та управління; електричні схеми.

Практичне значення полягає у стабілізації параметрів процесу, зниженні варіабельності якості, оптимізації витрат енергії та сировини. Система забезпечує вологість продукту менше 10%, частку дрібних частинок не більше 2% та високу простежуваність виробництва.

АВТОМАТИЗАЦІЯ, ЕКСТРУЗІЯ, ГРАНУЛЬОВАНІ КОРМИ, СИСТЕМА КЕРУВАННЯ, РЕГУЛЯТОР, МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

					ХНТУ 174.КРБ.26.001 РФ							
Зм	Лис	№ докум	Підпис	Дат	Реферат					Лім.	Лист	Аркушів
Розроб.	Мочалюк											
Перевір.	Сарафанніков										5	2
Реценз.										ХНТУ, гр. 2Ас		
Н.	Сарафанніков											
Затверд	Селіверстов											

THE ABSTRACT

Bachelor's qualification work: 105 pages, 23 figures, 11 tables, 5 appendixes. A graphic part - 5 sheets of a format A1.

The qualification work is devoted to improving the efficiency and stability of pet feed pellet production by developing an automated control system for the extrusion line.

An analysis of the extrusion cooking process of dry feeds was carried out, identifying key quality parameters: temperature in the extruder zones and die, pressure before the die, raw material moisture, and specific mechanical energy.

A mathematical model of the screw cylinder was developed, yielding the transient process equation and transfer functions. Based on modeling, a three-level control system was designed: PID temperature regulation (CHR method), cascade moisture control, protections and interlocks at the controller level; SCADA interface for data collection and management; electrical diagrams.

The practical significance lies in stabilizing process parameters, reducing product variability, and optimizing energy and raw material consumption. The system ensures product moisture below 10%, fine particle fraction $\leq 2\%$, and high production traceability.

AUTOMATION, EXTRUSION, PELLETED FEED, CONTROL SYSTEM,
REGULATOR, MATHEMATICAL MODELING

					ХНТУ 174.КРБ.26.001 РФ	Лис
						6
Зм	Лис	№ докум	Підпис	Дат		

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

1 НАЙМЕНУВАННЯ ПРОЕКТУ

Повне найменування – Автоматизована система керування технологічним процесом виробництва гранульованих кормів для домашніх тварин.

2. ПРИЗНАЧЕННЯ ТА ЦІЛІ СТВОРЕННЯ СИСТЕМИ

2.1 Призначення системи

Автоматизована система керування (АСК) технологічним процесом виробництва гранульованих кормів для домашніх тварин призначена для автоматизованого контролю і керування екструзійною лінією виробництва сухих гранульованих кормів з метою забезпечення стабільних якісних характеристик кінцевого продукту.

Система виконує такі основні функції:

- неперервний моніторинг ключових технологічних параметрів: температури в зонах екструдера, тиску перед матрицею, вологості сировини, швидкості шнека, питомої механічної енергії (SME);
- автоматичне керування виконавчими механізмами (нагрівачами зон, приводами шнека, клапанами подачі пари і води, різальним вузлом) для стабілізації температурно-вологісного режиму та якісних характеристик гранул;

					ХНТУ 174.КРБ.26.001 ТЗ				
Зм	Лис	№ докум	Підпис	Дат	Технічне завдання	Лім.	Лист	Аркушів	
Розроб.	Мочалюк								
Перевір.	Сарафанніков						7	3	
Реценз.									
Н.	Сарафанніков								
Затверд	Селіверстов								
						ХНТУ, гр. 2Ас			

– регулювання подачі сировини через гравіметричний дозатор із точністю $\pm 0,5\%$ від заданої витрати;

– сигналізація про критичні відхилення параметрів: перевищення тиску матриці, вихід температури зон за допустимі межі, розрив нитки (гранул), аварійне перевантаження двигунів;

– архівування вимірних параметрів та подій із передачею даних на верхній рівень для аналізу, звітності та забезпечення простежуваності партій продукції;

– відображення оперативному персоналу стану технологічного процесу через SCADA-інтерфейс у режимах автоматичного та ручного керування.

Об'єктом керування є технологічний процес виробництва сухих гранульованих кормів для домашніх тварин на базі одношнекового екструдера, що включає підготовку сировини, кондиціонування, екструзійне варіння, різання, сушіння та нанесення покриттів.

2.2 Цілі створення системи

Метою створення АСК є:

– забезпечення стабільно високої якості гранульованих кормів (твердість, однорідність, вологість $< 10\%$, відсоток дрібних частинок $\leq 2\%$) шляхом точного керування параметрами екструзійного процесу;

– зниження впливу людського фактора на якісні характеристики продукту та варіабельності від партії до партії;

– раннє виявлення та попередження аварійних ситуацій (перегрів зон екструдера, надмірний тиск матриці, збій дозування сировини) до виникнення браку;

– зменшення витрат сировини та енергоресурсів за рахунок оптимізованого автоматизованого керування;

					ХНТУ 174.КРБ.26.001 ПЗ	Лис
						8
Зм	Лис	№ докум	Підпис	Дат		

– забезпечення документування умов обробки кожної партії продукції для контролю якості.

3 ТЕХНІЧНІ ВИМОГИ ДО СИСТЕМИ

3.1 Структура системи

АСК повинна мати трирівневу розподілену структуру:

Рівень 1 – Польовий рівень (датчики та виконавчі механізми). Включає:

- термопари та термоперетворювачі для вимірювання температури в зонах екструдера (мінімум 3 зони) і в головці; діапазон 0–250°C; похибка $\leq \pm 1^\circ\text{C}$;
- п'єзоелектричний датчик тиску перед матрицею; діапазон 0–100 бар; вихідний сигнал 4–20 мА;
- мікрохвильовий або NIR-вологомір для вимірювання вологості сировини та кінцевого продукту; діапазон 5–40%; похибка $\leq \pm 0,5\%$;
- тахометричні датчики (енкодери) для вимірювання частоти обертання шнека та різального вузла;
- гравіметричний дозатор (loss-in-weight feeder) із точністю дозування $\pm 0,5\%$;
- частотні перетворювачі (ЧП) для регулювання швидкості приводних двигунів шнека, живильника, різального вузла;
- регулювальні клапани з електроприводом для управління витратою пари та води в кондиціонер і барабан екструдера; вихідний сигнал керування 4–20 мА;
- нагрівачі (ТЕНи) зон барабана екструдера з керуванням від тиристорних регуляторів потужності.

Рівень 2 – Рівень контролера (ПЛК/промисловий комп'ютер). Реалізує:

- збір аналогових (4–20 мА) та дискретних сигналів від датчиків;

					ХНТУ 174.КРБ.26.001 ПЗ	Лис
						9
Зм	Лис	№ докум	Підпис	Дат		

- виконання алгоритмів ПІД-регулювання температури в зонах екструдера, тиску матриці, вологості;
- логіку захистів і блокувань: захист при перевищенні тиску > 80 бар, аварійне відключення при температурі зони $> 200^{\circ}\text{C}$, блокування подачі сировини при відсутності потоку пари;
- передачу даних на верхній рівень за протоколом Ethernet/OPC DA;
- автономне функціонування при втраті зв'язку з верхнім рівнем.

Рівень 3 – Рівень SCADA/HMI. Включає:

- SCADA-систему на базі промислового ПК для відображення мнемосхем, трендів, аварійних повідомлень;
- архівування параметрів з налаштовуваною дискретністю (не рідше 1 раз на 10 с для критичних параметрів);
- формування звітів у форматах Excel/XML по кожній партії;
- розмежування прав доступу: оператор, старший оператор, інженер АСУ ТП.

3.3 Вимоги до керування

Система керування повинна реалізовувати:

- ПІД-регулювання температури в кожній зоні екструдера з виходом на нагрівачі/охолодження;
- каскадне регулювання вологості в кондиціонері (зовнішній контур – вологість, внутрішній – витрата пари/води);
- підтримку заданої швидкості подачі сировини гравіметричним дозатором;
- синхронізацію частоти обертання різального вузла зі швидкістю шнека для підтримки заданої довжини гранул;
- автоматичне регулювання положення зворотного клапана (ЗК) для підтримки об'ємної щільності продукту;

					ХНТУ 174.КРБ.26.001 ПЗ	Лис
Зм	Лис	№ докум	Підпис	Дат		10

– захисні блокування згідно з п. 3.1.

3.4 Вимоги до програмного забезпечення

Програмне забезпечення має відповідати наступним вимогам:

- мова програмування ПЛК – відповідно до стандарту IEC 61131-3 (Ladder, FBD або ST);
- SCADA-система – з підтримкою OPC DA 2.0/3.0;
- операційна система верхнього рівня – Windows 10/11;
- інтерфейс зв'язку між рівнями – Ethernet, протокол OPC DA;
- архів даних – MySQL або аналог; мінімальний термін зберігання – 12 місяців без стиснення.

					ХНТУ 174.КРБ.26.001 ПЗ	Лис
						11
Зм	Лис	№ докум	Підпис	Дат		

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ.....	15
ВСТУП.....	17
1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА ГРАНУЛЬОВАНИХ КОРМІВ ДЛЯ ДОМАШНІХ ТВАРИН.....	20
1.1 Характеристика продукту та сировини.....	21
1.2 Склад рецептури та роль окремих інгредієнтів	22
1.2.1 Крохмаль	22
1.2.2 Білок.....	23
1.2.3 Жир	23
1.2.4 Клітковина.....	24
1.2.5 Вітаміни та мікронутрієнти.....	24
1.2.6 Підсилювачі смаку та харчові добавки.....	25
1.2.7 Підготовка сировини та контроль розміру частинок	26
1.3 Опис технологічного процесу виробництва.....	28
1.3.1 Підготовка та змішування сировини.....	28
1.3.2 Екструзійне варіння	29
1.3.3 Різання	29
1.3.4 Сушіння.....	29
1.3.5 Охолодження та просіювання.....	32
1.3.6 Нанесення покриттів	32
1.4 Екструзійна частина технологічної лінії.....	32
1.4.1 Бункер-живильник	33
1.4.2 Попередній кондиціонер	33
1.4.3 Барабан екструдера та шнек.....	35
1.4.4 Матриця та різальний вузол.....	37
1.5 Фактори, що впливають на процес екструзії гранульованих кормів.....	38
1.5.1 Питома механічна енергія як ключовий показник процесу	39
1.5.2 Тиск та температура матриці	40

Зм	Лис	№ докум	Підпис	Дат

ХНТУ 174.КРБ.26.001 ПЗ

Лис

12

1.5.3	Вплив вологості на реологію екструдату та якість продукту.....	41
1.5.4	Клейстеризація крохмалю та денатурація білків	41
1.5.5	Властивості розширення та структура пор.....	42
1.5.6	Взаємозв'язок параметрів процесу та якості продукту	43
1.6	Аналіз сучасного стану автоматизації екструзійних ліній виробництва гранульованих кормів для домашніх тварин.....	44
1.6.1	Структура системи управління екструзійною лінією	44
1.6.2	Керування подачею сировини.....	45
1.6.3	Керування попереднім кондиціонуванням.....	46
1.6.4	Керування екструдером	46
1.6.5	Керування сушінням та нанесенням покриттів	47
1.6.6	Сучасні підходи до автоматизації та перспективи	47
1.7	Висновки до розділу 1	48
2	МАТЕМАТИЧНИЙ АНАЛІЗ ЕКСТРУЗІЙНОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ГРАНУЛЬОВАНИХ КОРМІВ ЯК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ .	50
2.1	Одержання математичного опису об'єкту керування.....	50
2.2	Опис рівнянь динаміки циліндру екструзійної установки	52
2.2.1	Рівняння матеріального та теплового балансів.....	52
2.2.2	Лінеаризація та отримання диференціального рівняння перехідного процесу	53
2.2.3	Передатні функції об'єкта керування	55
2.2.4	Вибір каналів управляючого впливу.....	56
2.2.5	Знаходження математичної моделі експериментальним методом.	57
2.3	Розрахунок параметрів налаштувань регулятора	60
2.3.1	Вибір регульованого параметра та алгоритму регулювання.....	60
2.3.2	Модель об'єкта керування в середовищі Simulink	62
2.3.3	Визначення коефіцієнтів ПІД-регулятора методом CHR	64
2.4	Висновки до розділу 2	66

3	ПРОЕКТУВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕКСТРУЗІЙНОЮ УСТАНОВКОЮ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ГРАНУЛЬОВАНИХ КОРМІВ	68
3.1	Розробка архітектури автоматизованої системи керування	68
3.2	Вибір технічних засобів автоматизації	71
3.2.1	Технічне забезпечення нижнього рівня.....	72
3.2.2	Технічне забезпечення середнього рівня	74
3.2.3	Технічне забезпечення верхнього рівня.....	76
3.3	Функціональна схема автоматизації	77
3.4	Опис інформаційних потоків	79
3.5	Розробка схеми зовнішніх проводок.....	82
3.6	Програмне забезпечення автоматизованої системи керування.....	84
3.6.1	Архітектурні принципи та інформаційна безпека програмного комплексу	84
3.6.2	Алгоритм збору даних вимірювань технологічного процесу виробництва гранульованих кормів	87
3.6.3	Екранні форми автоматизованої системи	88
3.7	Висновки до розділу 3	91
	ВИСНОВКИ.....	92
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	93
	ДОДАТОК А ЗАГАЛЬНА СХЕМА ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ЛІНІЇ ВИРОБНИЦТВА ГРАНУЛЬОВАНИХ КОРМІВ ДЛЯ ДОМАШНІХ ТВАРИН.....	99
	ДОДАТОК Б ЗАГАЛЬНА СХЕМА ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ЛІНІЇ ВИРОБНИЦТВА ГРАНУЛЬОВАНИХ КОРМІВ ДЛЯ ДОМАШНІХ ТВАРИН.....	100
	ДОДАТОК В КОДУВАННЯ ОСНОВНИХ СИГНАЛІВ В SCADA-СИСТЕМІ.....	101
	ДОДАТОК Г СХЕМА ЗОВНІШНІХ ПРОВОДОК.....	104
	ДОДАТОК Д БЛОК_СХЕМА АЛГОРИТМУ	105

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

CHR – метод налаштування ПІД-регуляторів;

FBD – Function Block Diagram – мова функціональних блокових діаграм ;

HMI – Human Machine Interface – людино-машинний інтерфейс;

IEC – International Electrotechnical Commission – Міжнародна електротехнічна комісія;

ISA – International Society of Automation – Міжнародне товариство з автоматизації;

LD – Ladder Diagram – мова релейних схем ;

OPC DA – OPC Data Access – специфікація обміну даними реального часу OPC;

PLC– Programmable Logic Controller – програмований логічний контролер;

SCADA – Supervisory Control And Data Acquisition – диспетчерське управління і збір даних;

SME – Specific Mechanical Energy – питома механічна енергія;

ST – Structured Text – мова структурованого тексту;

VFD – Variable Frequency Drive – частотний перетворювач;

WAI – Water Absorption Index – індекс поглинання води;

WSI– Water Solubility Index – індекс водорозчинності;

APM – автоматизоване робоче місце;

АС – автоматизована система;

АСК Т – автоматизована система керування;

АСУ ТП – автоматизована система управління технологічним процесом;

АСУ – автоматизована система управління;

АЦП – аналого-цифровий перетворювач;

					ХНТУ 174.КРБ.26.001 ПЗ	Лис
						15
Зм	Лис	№ докум	Підпис	Дат		

БД – база даних;
 ВМ – виконавчий механізм;
 Д – датчик;
 ДБЖ – джерело безперебійного живлення;
 ДСТУ – Державний стандарт України;
 ЗК – зворотний клапан (регулятор діаметра матриці);
 КВП і А – контрольно-вимірювальні прилади і автоматика;
 НВЧ – надвисокочастотний (мікрохвильовий);
 НКП – низьковольтний комплектний пристрій;
 ОК – об'єкт керування;
 П – пропорційний;
 ПЗ – програмне забезпечення;
 ПІ – пропорційно-інтегральний;
 ПІД – пропорційно-інтегрально-диференціальний;
 ПК – промисловий комп'ютер;
 ПЛК – програмований логічний контролер;
 ПП – перетворювальний пристрій;
 РП – розподільний пристрій;
 САУ – система автоматичного управління;
 СМЕ – питома механічна енергія;
 ТЕН – трубчастий електронагрівник;
 ТП – технологічний процес;
 ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач;
 ЧП – частотний перетворювач;
 ЩСУ – щит станції управління.

ВСТУП

Виробництво гранульованих кормів для домашніх тварин є однією з найбільш технологічно розвинених та швидкозростаючих галузей харчової промисловості. За даними аналітичних досліджень, глобальний ринок кормів для домашніх тварин досяг 35,27 млн тонн у 2022 році з вартістю \$117,34 млрд і прогнозується на рівні \$201,39 млрд до 2033 року [1]. Такий динамічний розвиток обумовлений зростанням кількості домашніх тварин, підвищенням стандартів їх утримання та вимог власників до якості, безпечності та поживності кормів.

Ключовою технологічною операцією у виробництві сухих розширених кормів є екструзійне варіння – безперервний термомеханічний процес, під час якого суміш інгредієнтів піддається одночасній дії тепла, вологи та механічного тиску. Сьогодні 95% сухих кормів для домашніх тварин у світі виробляються методом екструзії [2]. Якість кінцевого продукту – твердість, об'ємна щільність, ступінь розширення, засвоюваність – визначається складним і нелінійним взаємозв'язком великої кількості технологічних параметрів: температури в зонах екструдера, тиску перед матрицею, вологості сировини, швидкості шнека, питомої механічної енергії (SME).

Актуальність теми кваліфікаційної роботи. На більшості вітчизняних підприємств з виробництва кормів контроль параметрів екструзійного процесу здійснюється переважно вручну або з використанням відокремлених локальних регуляторів, що не дозволяє оперативно компенсувати відхилення і не забезпечує необхідної стабільності якості продукту від партії до партії. Існуючі системи автоматизації часто застарілі, не охоплюють усіх критичних параметрів і не мають замкненого контуру регулювання за показниками якості. Це призводить до значних економічних збитків через нестабільність якості, понаднормативні втрати сировини та неефективне використання енергоресурсів. Тому розробка сучасної, надійної та комплексної

автоматизованої системи керування технологічним процесом виробництва гранульованих кормів є надзвичайно актуальним науково-технічним завданням.

Метою дослідження є підвищення ефективності та стабільності процесу виробництва гранульованих кормів для домашніх тварин шляхом розробки автоматизованої системи керування екструзійною лінією, яка забезпечить стабілізацію технологічних параметрів, зниження варіабельності якості продукту та оптимізацію споживання енергоресурсів і сировини.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести системний аналіз технологічного процесу виробництва гранульованих кормів для домашніх тварин як об'єкта автоматизації, визначити ключові параметри, що впливають на якість кінцевого продукту, та обґрунтувати вибір каналів керування;

- розробити математичну модель шнекового циліндра екструзійної установки як об'єкта керування на основі рівнянь матеріального та енергетичного балансів; ідентифікувати параметри моделі експериментальним методом;

- на основі проведеного аналізу та математичного моделювання обґрунтувати вибір комплексу технічних засобів, розробити структурну, функціональну та принципову електричну схеми автоматизованої системи керування;

- синтезувати алгоритми ПД-регулювання параметрів екструзійного процесу; провести налаштування регуляторів і перевірити якість перехідних процесів засобами комп'ютерного моделювання;

- розробити програмне забезпечення системи керування та екранні форми SCADA для оперативного моніторингу й управління технологічним процесом.

Об'єктом дослідження є технологічний процес виробництва гранульованих сухих кормів для домашніх тварин на базі одношнекової екструзійної лінії.

Предметом дослідження є методи, алгоритми та технічні засоби

автоматизації керування параметрами екструзійного процесу – температурою в зонах барабана, тиском матриці, вологістю сировини та питомою механічною енергією.

Практичне значення отриманих результатів полягає у створенні комплексного проектного рішення, що забезпечує стабілізацію параметрів екструзійного процесу та відтворюваність якісних характеристик продукту. Впровадження запропонованої системи дозволяє гарантувати вологість кінцевого продукту менше 10%, частку дрібних частинок не більше 2%, знизити втрати сировини та енергоспоживання, а також забезпечити повну простежуваність умов виробництва кожної партії. Результати роботи можуть бути використані при модернізації існуючих та проектуванні нових екструзійних ліній виробництва кормів для домашніх тварин в Україні.

					ХНТУ 174.КРБ.26.001 ПЗ	Лис
Зм	Лис	№ докум	Підпис	Дат		19

1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА ГРАНУЛЬОВАНИХ КОРМІВ ДЛЯ ДОМАШНІХ ТВАРИН

Промислове виробництво гранульованих кормів для домашніх тварин є однією з найбільш технологічно розвинених галузей харчової промисловості. Від перших дослідних ліній до сучасних повністю автоматизованих комплексів ця індустрія пройшла шлях, що охопив понад вісім десятиліть інженерних пошуків, біохімічних досліджень та вдосконалення систем управління.

Шнековий екструдер вперше був використаний як пристрій безперервної обробки наприкінці 1930-х років. Перший комерційний варильний екструдер для харчових продуктів запатентований у Сполучених Штатах у 1940-х роках. Його широке промислове застосування розпочалося у 1950-х роках. Тоді ж у США вперше з'явилися сухі розширені корми для домашніх тварин, виготовлені за допомогою екструзійних варочних апаратів. Ринок таких продуктів із моменту виникнення виріс більш ніж у тисячу разів. Сьогодні 95% сухих кормів для домашніх тварин у світі виробляються методом екструзії [1].

За даними Alltech (2024), глобальний ринок кормів для домашніх тварин досяг 35,27 млн тонн у 2022 році з вартістю \$117,34 млрд і прогнозується на рівні \$201,39 млрд до 2033 року. Цей динамічний розвиток зумовлений зростанням кількості домашніх тварин, підвищенням стандартів їх утримання та зростаючими вимогами власників до якості, безпечності та поживності кормів [2].

Ключовою технологічною операцією, що визначає якість кінцевого продукту, є екструзія – безперервний термомеханічний процес, під час якого суміш інгредієнтів піддається одночасній дії тепла, вологи та механічного тиску. Управління цим процесом є складним завданням, оскільки вихідні характеристики продукту залежать від великої кількості взаємопов'язаних технологічних параметрів. Саме тому автоматизація екструзійних ліній

розглядається як один із пріоритетних напрямків підвищення ефективності та стабільності виробництва.

Даний розділ присвячено системному аналізу технологічного процесу виробництва гранульованих кормів для домашніх тварин. Розглядаються характеристики продукту та сировини, загальна та детальна структура виробничої лінії, особливості екструзійного підпроцесу, наявні підходи до автоматизації та перспективи розвитку галузі.

1.1 Характеристика продукту та сировини

Гранульовані корми для домашніх тварин – це складний харчовий продукт, що одночасно є комерційним товаром і повноцінним харчовим раціоном для тварини. Вимоги до такого продукту поєднують харчову адекватність, стабільність при зберіганні, органолептичну привабливість, безпечність та технологічну відтворюваність. Рецепт сировини, вибір технологічного обладнання та умови обробки – це три незалежних, але взаємопов'язаних сфери управління якістю [3].

Комерційні корми для домашніх тварин поділяються на чотири основні категорії:

1. Сухі корми (вміст води 8–10%) – найбільший сегмент ринку. Продукти бувають розширеними або частково розширеними. Виготовляються переважно методом екструзійного варіння. Забезпечують зручність зберігання та дозування, тривалий термін придатності.

2. Напіввологі корми (вміст води 22–30%) – менш поширені через складність систем консервації. Потребують регулювання активності води для запобігання мікробному росту без охолодження. В останні роки частково витісняються технологіями вологих кормів у зручній упаковці.

3. Ласощі та снеки (сухі або напіввологі) – екструдовані у формі печива, кісток, вафель або смужок. Відрізняються формою, текстурою та

харчовим профілем від основних кормів. Широкий асортимент форм досягається зміною матриць та параметрів різання.

4. Консервовані та заморожені корми (вміст вологи понад 65%) – розроблені як повноцінні раціони або харчові добавки. Окремі компоненти можуть оброблятися екструзією. Потребують ретортної обробки для стерилізації.

Дана робота зосереджена на виробництві сухих розширених кормів – найбільш технологічно складному та автоматизованому сегменті.

1.2 Склад рецептури та роль окремих інгредієнтів

1.2.1 Крохмаль

Крохмаль є основним вуглеводом у рецептурах сухих кормів для домашніх тварин. Його вміст може варіюватися від 5 до 60% від маси рецептури [1]. Під час екструзійного варіння відбувається клейстеризація крохмалю – гранули поглинають воду, набухають, кристалічна структура руйнується, утворюється аморфна гель-матриця. Цей процес є ключовим для формування структури гранули, її розширення та зв'язуючих властивостей продукту.

Амілозна фракція крохмалю забезпечує кращі зв'язуючі властивості порівняно з амілопектиною. Бульбові крохмалі (картопляний, маніоковий) мають вищий вміст амілопектину, що сприяє більш інтенсивному розширенню, але знижує зв'язуючу здатність. Зернові крохмалі (кукурудзяний, пшеничний) забезпечують кращий баланс між розширенням та структурою продукту. За даними Nielsen та ін. (2025), вміст вуглеводів у рецептурах кормів для домашніх тварин становить у середньому 381 г/кг, що значно більше, ніж в акваторних кормах (183 г/кг) [4].

1.2.2 Білок

Білковий баланс рецептури має вирішальне значення як для харчової цінності, так і для технологічних властивостей продукту. Рослинні джерела білка (соевий шрот, пшенична клейковина, кукурудзяна клейковина) суттєво впливають як на структурні, так і на харчові характеристики кормів. Пшенична клейковина, зокрема, сприяє радіальному розширенню гранули завдяки своїм в'язкопружним властивостям.

Тваринні білки (м'ясо-кісткове борошно, рибне борошно, борошно з птиці) здебільшого не сприяють структурному формуванню продукту при екструзії, оскільки піддаються денатурації ще на стадії первинної обробки. Вони є важливим джерелом незамінних амінокислот. Середній вміст білка в рецептурах кормів для домашніх тварин становить близько 304 г/кг [1]. Взаємодія білків із крохмалем визначає реологію екструдату – при підвищеному вмісті білка зростає в'язкість та питома механічна енергія (SME), що безпосередньо впливає на управління екструдером [5].

1.2.3 Жир

Жири та ліпіди є концентрованим джерелом енергії та носіями жиророзчинних вітамінів і ароматичних сполук. Вміст жиру може перевищувати 30%, але зазвичай складає менше 20% від повної рецептури. Жир, введений до складу рецептури, суттєво впливає на характеристики продукту та параметри екструзійного процесу (Таблиця 1.1).

Нагрівання жирів до 40–60°C перед їх введенням у рецептуру мінімізує залежні від температури зміни в'язкості, покращує рівномірність приготування та зменшує ефект пригнічення розширення. Зовнішній жир (для покриття гранул після сушіння) забезпечує кращий результат ніж введення жиру безпосередньо у барабан екструдера при рівнях понад 8–10% [6].

Таблиця 1.1 – Вплив рівня жиру в рецептурі на якість продукту

Вміст жиру в рецептурі, %	Вплив на якість продукту
До 12	Максимальне розширення продукту; висока хрускіткість гранули
12–17	Хороше розширення; стабільна форма; рекомендований діапазон
17–20	Дещо знижене розширення; можливе злипання; одношнекові екструдери справляються
Понад 20	Значне зниження розширення; знижена стабільність продукту; рекомендується двошнековий екструдер
Понад 22	Критичне обмеження: надмірне утворення дрібних частинок; потребує корегування вологості та профілю шнека

1.2.4 Клітковина

Клітковина набуває дедалі більшого значення у рецептурах низькокалорійних кормів для тварин з надмірною вагою або малорухливих тварин. Клітковинні інгредієнти (целюлоза, гуарова камедь, бурякова меляса) порушують безперервну вуглеводну матрицю екструдованого продукту: знижують розширення, збільшують SME та тиск у матриці, надають шорсткості поверхні гранули. Середній вміст клітковини у кормах для домашніх тварин становить близько 77 г/кг [7].

1.2.5 Вітаміни та мікронутрієнти

Вітаміни є важливою, але вразливою категорією мікроінгредієнтів. Кожен вітамін має характерну поведінку під час термічної обробки. Нестабільність при екструзії та подальшому зберіганні потребує застосування надлишків або термостабільних форм (Таблиця 1.2).

Таблиця 1.2 – Типові втрати вітамінів при екструзійній обробці

Вітамін	Типові втрати при екструзії, %	Фактори, що збільшують втрати
А (ретинол)	10–30	Висока температура, наявність жирів, тривалий час обробки
D3	5–15	Температура понад 140°C, окиснення
Е (токоферол)	10–20	Висока температура, окиснення, наявність металів
К3 (менадіон)	5–20	Вологість, висока температура
В1 (тіамін)	15–50	Температура понад 120°C, лужне середовище, вологість
В2 (рибофлавін)	10–25	Температура, фотолітичне розкладання
Ніацин	5–10	Стабільний; невеликі втрати при стандартних умовах
В6 (піридоксин)	10–30	Висока температура, лужне середовище
Фолієва кислота	10–30	Температура понад 130°C, окиснення
С (аскорбінова кислота)	50–90	Найнестабільніший; висока температура, окиснення, вологість

Для компенсації термічних втрат вітамінів застосовуються три підходи: використання надлишків, термостабільні форми (інкапсульовані кремнієм або желатином), а також нанесення вітамінів у складі жирових покриттів після сушіння – найбільш ефективний метод для термолабільних вітамінів А, D та С.

1.2.6 Підсилювачі смаку та харчові добавки

Підсилювачі смаку та аромату додаються для покращення прийнятності продукту. До них відносяться тваринні жири, рідкі м'ясні екстракти, дріжджові

екстракти та різні ароматичні суміші. Місце та спосіб введення цих компонентів суттєво впливають на кінцеві смакові якості (Таблиця 1.3).

Таблиця 1.3 – Вплив підсилювачів смаку та місця їх введення на якість продукту

Компонент та місце введення	Вплив на смакові якості	Примітки
Свіже м'ясо у попередній кондиціонер	Помірне покращення	Часткова денатурація в умовах пари знижує ефект
Свіже м'ясо у барабан екструдера (через бічний порт)	Хороше покращення	Краща збереженість ароматичних сполук порівняно з подачею через попередній кондиціонер
Рідкий жир у попередній кондиціонер	Помірне	До 8% без суттєвого зниження розширення
Рідкий жир через бічний порт екструдера	Хороше	Оптимальне для жиру понад 8% від рецептури
Ароматизатори/екстракти після сушіння (покриття)	Найвище	Збереження летких ароматичних сполук; найефективніший спосіб

1.2.7 Підготовка сировини та контроль розміру частинок

Розмір частинок сировини суттєво впливає на текстуру та однорідність кінцевого продукту. Оптимальний розмір частинок після подрібнення залежить від типу продукту та вимог до якості. Занадто великі частинки погіршують однорідність, тоді як занадто дрібний помел може знизити розширення продукту (Таблиця 1.4).

Рекомендовано, щоб після фінального подрібнення 85–95% частинок проходили через сито з розміром отворів 600 мікрон.

Таблиця 1.4 – Аналіз розміру частинок типових рецептур кормів для домашніх тварин

Розмір сита (мікрон)	Типовий вміст, %	Характеристика фракції
Понад 2000	0–3	Великі нерозмелені частинки (небажані)
1000–2000	5–15	Великі частинки; потребують повторного подрібнення
500–1000	20–35	Середня фракція; допустима у рецептурах
250–500	25–40	Цільова фракція; найкраще засвоєння та однорідність продукту
125–250	15–25	Дрібна фракція; сприяє зв'язуванню рецептури
До 125	5–10	Борошниста фракція; сприяє ущільненню та зменшенню розширення
Оптимум після фінального помелу	85–95% < 600 мкм	Рекомендований розподіл частинок для стандартних кормів

Для більшості кормів для домашніх тварин принаймні 80% рецептури має проходити через отвір 500 мікрон. Деякі спеціалізовані продукти, такі як ультрадрібні гранули (0,8–2,0 мм у діаметрі), потребують більш тонкого помелу всіх компонентів [1].

Рецептурні компоненти після подрібнення змішуються у відповідних пропорціях у стрічкових або гвинтових змішувачах. Точність дозування кожного компонента є критичною для стабільності продукту та відповідності нормативним вимогам. Відхилення у складі безпосередньо впливають на реологію екструдату в екструдері, а отже – на необхідний характер управляючих впливів.

1.3 Опис технологічного процесу виробництва

Виробництво гранульованих сухих кормів для домашніх тварин є безперервним технологічним процесом, що включає послідовність взаємопов'язаних стадій: підготовку сировини, попереднє кондиціонування, екструзійне варіння, різання, сушіння, охолодження, нанесення покриттів та пакування. Кожна стадія впливає як на якість кінцевого продукту, так і на умови роботи наступної ділянки [3].

Загальна схема технологічної лінії виробництва гранульованих кормів для домашніх тварин наведена в додатку А.

Технологічна лінія функціонує за принципом матеріального балансу: збої або відхилення параметрів на будь-якій ділянці поширюються по всьому ланцюгу виробництва. Так, підвищена вологість суміші на вході в екструдер змінює в'язкість екструдату, що тягне за собою зміну тиску матриці, ступеня розширення та, відповідно, умов сушіння. Цей ланцюговий характер залежностей визначає складність задачі автоматизації та необхідність системного підходу до управління.

1.3.1 Підготовка та змішування сировини

На стадії підготовки сировини виконуються: приймання та зберігання компонентів, попереднє подрібнення великих фракцій (зернові, висівки), точне гравіметричне дозування всіх складових рецептури та їх ретельне перемішування. Гравіметричні дозатори (loss-in-weight feeder) забезпечують точність дозування в межах $\pm 0,5\%$ від заданої швидкості сухої подачі [8].

Якість змішування оцінюється коефіцієнтом варіації (CV) – для промислових ліній допустиме значення $CV \leq 5\%$. Неоднорідна суміш призводить до нерівномірного завантаження екструдера та коливань параметрів процесу. Після фінального змішування суміш може надходити безпосередньо до живильника або проміжно зберігатись у силосах над живильником.

					ХНТУ 174.КРБ.26.001 ПЗ	Лис
Зм	Лис	№ докум	Підпис	Дат		28

1.3.2 Екструзійне варіння

Екструзійне варіння є центральним та найбільш критичним підпроцесом, що визначає фізичну структуру, харчову цінність та мікробіологічну безпеку продукту [9]. Процес включає попереднє кондиціонування та власне екструзію у шнековому апараті.

Під час проходження через барабан екструдера суміш зазнає поступово наростаючих тиску та температури, що призводить до клейстеризації крохмалю, денатурації білків та формування гомогенного екструдату. Тиск перед матрицею досягає 34–37 атмосфер, температура – 125–150°C при вмісті вологи 23–28%. При виході через отвори матриці миттєве випаровування вологи спричиняє розширення продукту – ступінь розширення може перевищувати 50% від площі отвору матриці [10].

1.3.3 Різання

Різання екструдату здійснюється обертовими ножами, що рухаються у площині, паралельній до поверхні матриці. Відносна швидкість ножів та лінійна швидкість екструдату визначають довжину гранули. Точність різання впливає на рівномірність форми продукту та подальшу ефективність сушіння. Висока швидкість різання дає більш рівний зріз, але збільшує знос ножів. Управління частотою обертання різального вузла є одним із параметрів, що підлягають регулюванню в системі автоматизації.

1.3.4 Сушіння

Основна мета сушіння – зниження вмісту вологи в продукті до значення менше 10% (для сухих розширених кормів) або до нормативного рівня активності води для напіввологих продуктів [11]. Температура сушіння, швидкість повітря та глибина шару продукту є основними керованими параметрами (рис. 1.1, 1.2).

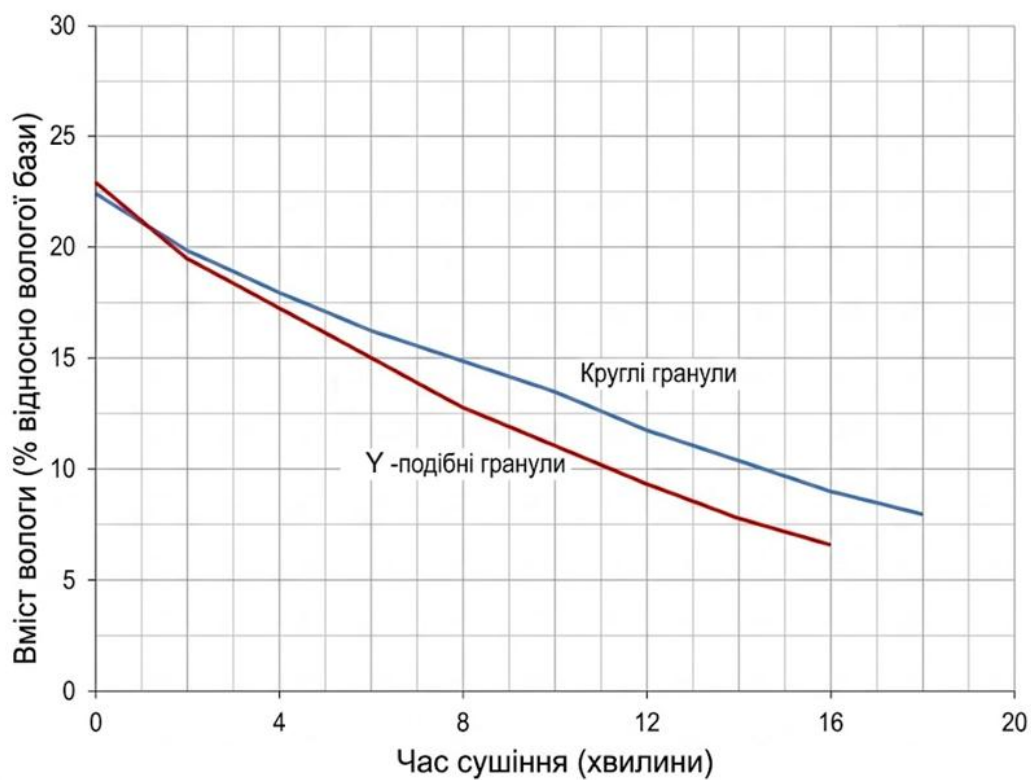


Рисунок 1.1 – Вплив форми продукту на криву сушіння

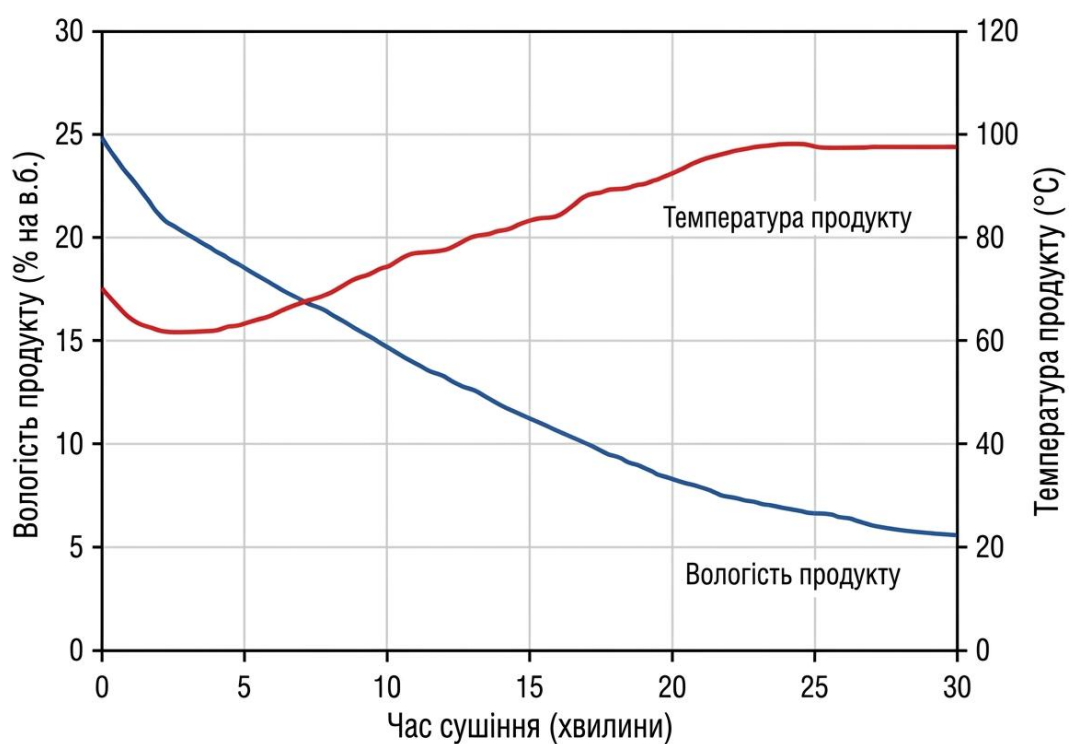


Рисунок 1.2 – Приклад кривої сушіння

Застосовуються два типи сушарок (рис. 1.3). Конвеєрні (горизонтальні) сушарки розподіляють продукт по стрічці, що рухається через камери з контрольованим температурним профілем.

а)



б)



Рисунок 1.2 – Сушарки для гранульованих кормів:
а) конвеєрна (горизонтальна); б) вертикальна (баштова)

Гаряче повітря продувається через шар продукту знизу вгору або зверху вниз. Вертикальні (баштові) сушарки організовують послідовне перетікання продукту з деки на деку. Обидва типи споживають порівнянні енерговитрати на видалення рівної кількості вологи.

Зм	Лис	№ докум	Підпис	Дат

1.3.5 Охолодження та просіювання

Після сушіння продукт охолоджують до температури, близької до навколишнього середовища ($\leq 40^{\circ}\text{C}$), перш ніж упаковувати або зберігати насипом. Без попереднього охолодження волога гарячого повітря та залишкова волога продукту конденсуються на поверхнях упаковки, що спричиняє злипання та утворення цвілі.

Після сушіння та охолодження обов'язковим є просіювання для відділення дрібних частинок та крихт. Ці відсівки можуть повторно вводитися у суміш перед екструзією для зменшення відходів. Норматив для більшості виробників – частка дрібних частинок (пил) у кінцевому продукті не повинна перевищувати 1–2%.

1.3.6 Нанесення покриттів

Більшість підприємств наносять рідкий жир та/або ароматизатори після сушіння та охолодження для покращення прийнятності продукту. Рівень нанесеного покриття може сягати 5–12% від маси продукту. Застосовуються барабанні змішувачі з розпилювальними форсунками або системи нанесення каскадом.

Системи вакуумного інфузійного покриття дозволяють вводити до 40% рідини, інфузуючи її у внутрішню пористу структуру гранули. Це особливо важливо для продуктів із підвищеним вмістом жирів та олій. Рівномірність нанесення покриттів є критичним параметром для стабільності смакових якостей партії до партії.

1.4 Екструзійна частина технологічної лінії

Екструзійна частина технологічної лінії включає (рис. 1.4): бункер-живильник, попередній кондиціонер, барабан екструдера з шнеком та вузол матриці/ножа [8, 9]. Кожен компонент призначений для виконання певної функції в процесі приготування та формування кормів.

					ХНТУ 174.КРБ.26.001 ПЗ	Лис
Зм	Лис	№ докум	Підпис	Дат		32

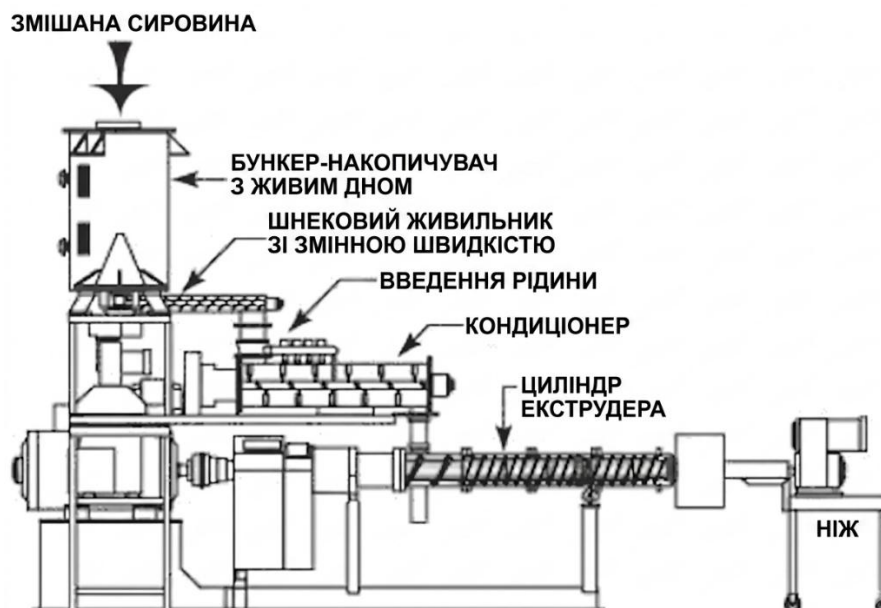


Рисунок 1.4 – Система екструзії гранульованих кормів

1.4.1 Бункер-живильник

Бункер-живильник забезпечує рівномірне та безперервне дозування підготовленої суміші у попередній кондиціонер. Цей потік сировини повинен бути строго контрольованим – живильник визначає продуктивність усієї системи. Шнекові, вібраційні або стрічкові живильники з гравіметричним управлінням підтримують задану швидкість подачі з точністю $\pm 0,5\%$.

Живильник безперервно реєструє втрату ваги бункера і коригує швидкість подачі для підтримки заданої продуктивності. Зміна продуктивності живильника без відповідного коригування параметрів екструдера призводить до нестабільності процесу. Захисні блокування запобігають потраплянню сухої сировини у барабан екструдера у разі відсутності потоку пари або води.

1.4.2 Попередній кондиціонер

Рівномірне та повне проникнення вологи в сировину у попередньому кондиціонері значно підвищує стабільність екструдера та якість кінцевого продукту. Пластифікація частинок перед екструзією суттєво зменшує знос обладнання, спричинений абразивними компонентами рецептури [11].

Атмосферний попередній кондиціонер подає воду та/або пару для досягнення вологості 10–25%. Один або два вали з радіально закріпленими лопатями забезпечують перемішування та транспортування матеріалу. Час перебування у попередньому кондиціонері та кількість введеної пари – основні керовані параметри (рис. 1.5).

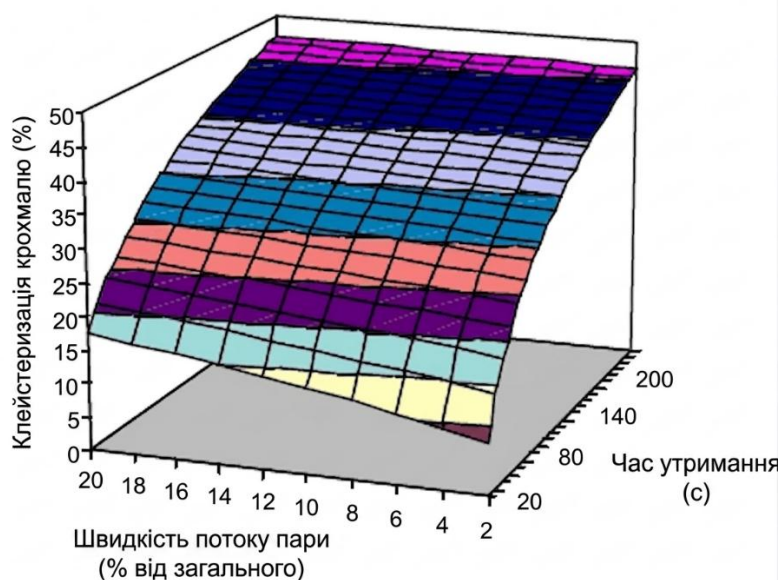


Рисунок 1.5 – Вплив часу утримання та додавання пари у попередньому кондиціонері на ступінь приготування

Перші 120 секунд впливу пари є найважливішими для процесу приготування. Введення пари безпосередньо в попередній кондиціонер підвищує вологість субстрату не більш ніж на 5 відсотків від початкового рівня сухої рецептури. Для досягнення більш високого рівня вологи необхідне введення рідкої води у поєднанні з парою.

Сучасні конструкції попередніх кондиціонерів, встановлених на тензодатчиках, у поєднанні з дозуючими пристроями на виході дозволяють повністю контролювано управляти завантаженням та очищенням апарата. У попередньому кондиціонері також можуть вводитися рідкі добавки: свіже м'ясо у вигляді слаку, олії, ароматизатори та барвники.

1.4.3 Барабан екструдера та шнек

Барабан екструдера є основною зоною термомеханічної трансформації сировини. Початкова секція барабана є зоною подачі, де матеріал із попереднього кондиціонера транспортується від вхідного отвору вглиб. Потім матеріал потрапляє в зону обробки, де аморфна сипка маса перетворюється на в'язкий пластичний екструдат [10].

Більша частина підвищення температури в барабані відбувається за рахунок механічної енергії, що розсіюється обертовим шнеком. Цьому сприяє пряме впорскування пари або зовнішні джерела теплової енергії. Профіль шнека можна змінити, замінивши елементи шнека, щоб збільшити або зменшити тертя матеріалу в барабані.

Швидкість шнека є впливовою змінною для контролю механічної енергії, що підводиться до продукту (рис. 1.6).

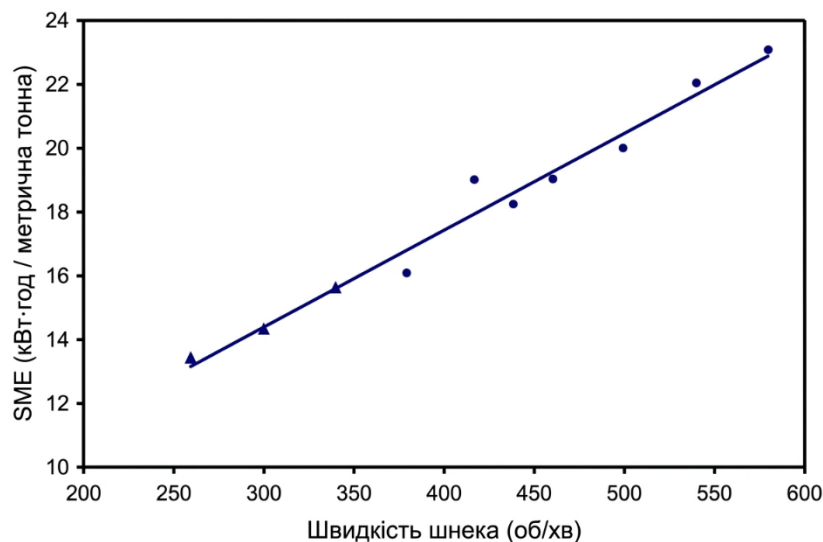


Рисунок 1.6 – Вплив швидкості шнека екструдера на питому механічну енергію

Перевага встановлення приводу зі змінною швидкістю (частотний перетворювач) полягає у гнучкому регулюванні SME (питомої механічної енергії). Впорскування пари безпосередньо в барабан екструдера знижує щільність продукту і є додатковим засобом управління ступенем розширення.

Три основних типи екструдерів для виробництва кормів для домашніх тварин (рис. 1.7) – одношнековий, двошнековий зі спільним обертанням та конічний двошнековий – відрізняються як конструктивно, так і за характеристиками продуктивності.

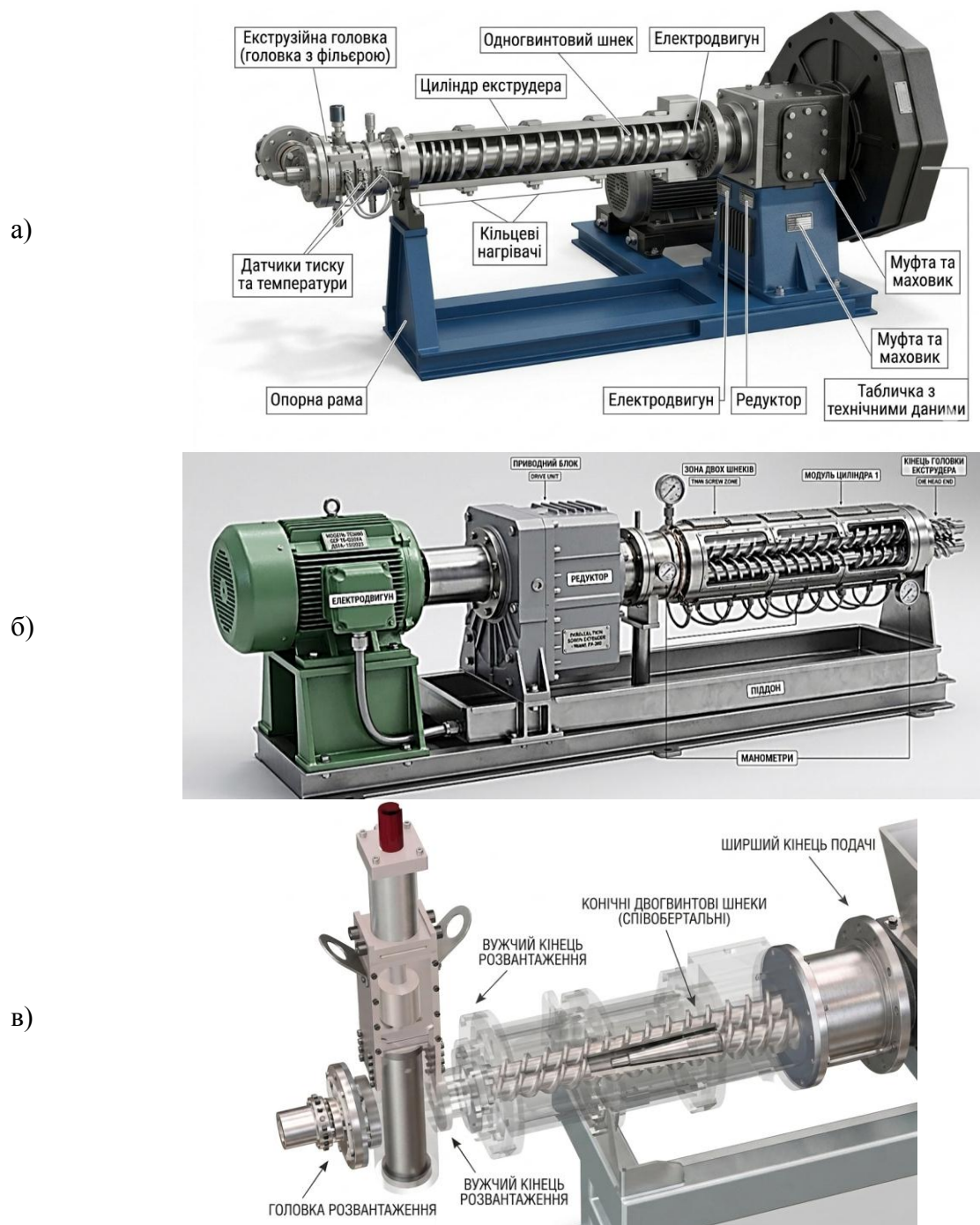


Рисунок 1.7 – Типи екструдерів:

а) одношнековий; б) двошнековий; в) конічний двошнековий

Одношнекові екструдери є класичним рішенням із понад 40-річним досвідом промислового застосування. Двошнекові системи застосовуються для специфічних задач: рецептури з понад 17% жиру, понад 35% свіжого м'яса, ультрадрібні продукти (0,8–2,0 мм), коекстуровані продукти.

1.4.4 Матриця та різальний вузол

Матриця є кінцевою зоною екструдера. Вона виконує дві основні функції: обмежує потік продукту, забезпечуючи необхідний тиск у барабані, та формує форму екструдату при виході. Бажаний рівень розширення продукту контролюється через маніпуляції з рецептурою та відкритою площею матриці [12].

Зворотний клапан (ЗК) – сучасний пристрій, що дозволяє змінювати обмеження на виході з екструдера під час роботи (рис. 1.8). Зміна відкритої площі матриці за допомогою ЗК дозволяє оперативно регулювати щільність продукту без зупинки системи (Таблиця 1.5).

Таблиця 1.5 – Вплив положення зворотного клапана (ЗК) на щільність продукту

Положення ЗК	Щільність продукту, г/л	Ступінь розширення
Повністю відкрите (мінімальне обмеження)	280–330	Максимальне; понад 50% від отвору матриці
Часткове обмеження (25%)	330–380	Помірно високе
Часткове обмеження (50%)	380–430	Середнє; типово для стандартних кормів
Часткове обмеження (75%)	430–490	Знижене; щільніший продукт
Повністю закрито (максимальне обмеження)	490–560	Мінімальне; продукт практично не розширений

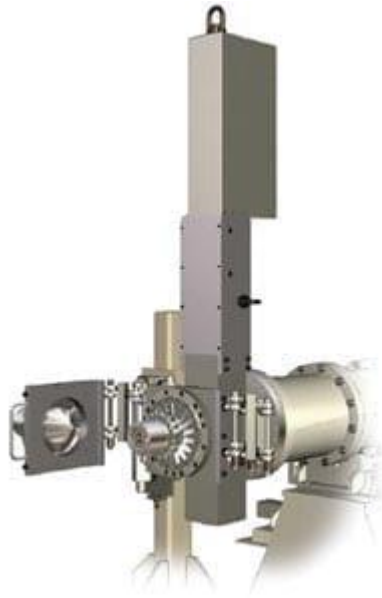


Рисунок 1.8 – Зворотний клапан

Конструкція «швидкої зміни кількох матриць» дозволяє змінювати матриці без зупинки екструзійної системи, що скорочує час переналагодження на 50%. Різальний вузол складається з обертових ножів, що рухаються у площині поверхні матриці. Відносна швидкість ножів і лінійна швидкість екструдату визначають довжину гранули. Управління частотою обертання ножів синхронізується зі швидкістю шнека.

1.5 Фактори, що впливають на процес екструзії гранульованих кормів

Екструзія є центральним та найбільш складним підпроцесом у виробництві гранульованих кормів для домашніх тварин. Її особливість полягає в тому, що одночасно відбуваються тепломасообмін, зсувна деформація, фазові перетворення біополімерів та формування макроструктури продукту. Нелінійні взаємозалежності між контрольованими параметрами та вихідними характеристиками роблять цей процес складним об'єктом як для ручного управління, так і для автоматизації [4].

На рисунку 1.9 представлена загальна схема екструдера з позначенням функціональних секцій та параметрів, що охоплюються в огляді Nielsen et al.

(2025). Схема структурує процес за трьома групами: керовані параметри, теплові та гідраційні параметри, а також вихідні змінні відгуку.

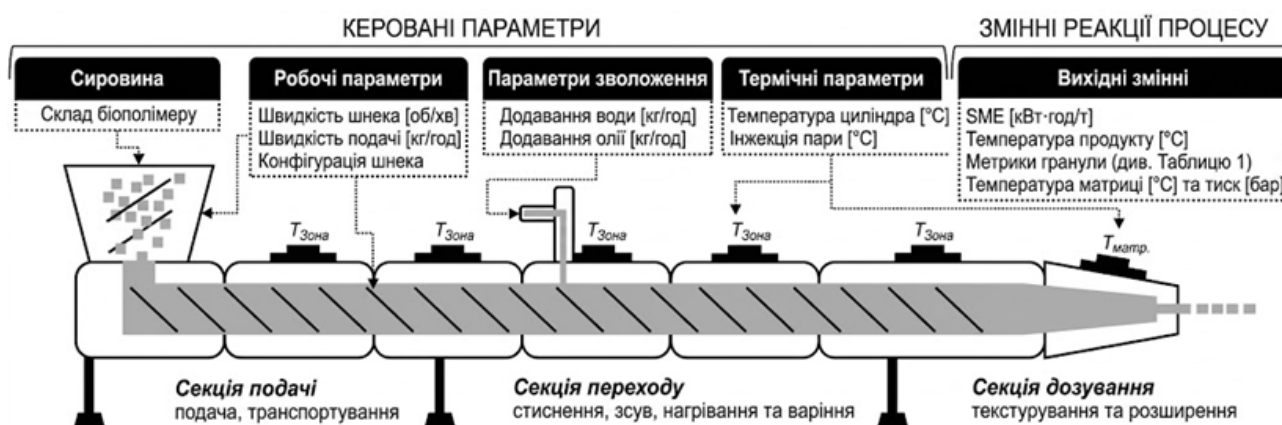


Рисунок 1.9 – Загальна схема екструдера з поясненням секцій та параметрів процесу

Як видно зі схеми, керовані параметри включають склад рецептури, швидкість шнека (RPM), витрату сировини, конфігурацію шнека, а також гідраційні параметри – додавання води та олії. Теплові параметри – температура барабана та впорскування пари – доповнюють картину. Усі ці фактори разом формують вихідні змінні: SME, температуру продукту, показники якості гранул, температуру та тиск матриці.

1.5.1 Питома механічна енергія як ключовий показник процесу

Питома механічна енергія (SME, Specific Mechanical Energy) є одним із найважливіших інтегральних показників екструзійного процесу [5]. Вона відображає кількість механічної роботи, вкладеної в одиницю маси продукту (кДж/кг або кВт·год/т), і безпосередньо пов'язана з перетвореннями, що відбуваються з біополімерами: клейстеризацією крохмалю, денатурацією білків, формуванням екструдату.

За даними узагальненого аналізу [2], SME при виробництві кормів для домашніх тварин (переважно одношнекові екструдери) становить 8,5–28 кВт·год/т, тоді як для аквакормів (двошнекові) – 9,9–89 кВт·год/т. Значно вища SME при виробництві аквакормів пояснюється їх рецептурою: вищий вміст білка та жиру підвищує в'язкість екструдату та знижує потенціал розширення.

SME позитивно корелює з температурою матриці та зменшується зі збільшенням вологості в барабані, оскільки вода є пластифікатором і знижує в'язкість екструдату. Підвищення температури, навпаки, може замінити частину механічної енергії тепловою – цей ефект підміни (energy substitution) є важливим для оптимізації енерговитрат лінії.

1.5.2 Тиск та температура матриці

Тиск перед матрицею та температура матриці є ключовими вихідними змінними процесу, що визначають ступінь розширення, текстуру та мікроструктуру гранул. Обидва параметри тісно взаємопов'язані, хоча й визначаються різними факторами [6].

Тиск матриці формується переважно конфігурацією шнека, витратою сировини та реологічними властивостями екструдату. Для одношнекових екструдерів при виробництві кормів для домашніх тварин характерний діапазон 35–80 бар, для двошнекових – 5–50 бар. Температура матриці для обох типів екструдерів зазвичай перебуває в діапазоні 100–150°C.

Між тиском і температурою матриці існує позитивна кореляція: вищий тиск, як правило, відповідає вищій температурі матриці. При виході продукту через отвори матриці миттєве падіння тиску до атмосферного спричиняє «флеш-випаровування» вологи – саме цей ефект є рушійною силою розширення гранули. Чим вища температура матриці та вищий вміст вологи у барабані, тим більш виражене розширення.

1.5.3 Вплив вологості на реологію екструдату та якість продукту

Вологість є першорядним параметром управління процесом екструзії. Вода виступає пластифікатором біополімерів: вона підвищує мобільність ланцюгів крохмалю та білка, знижує в'язкість екструдату, полегшує клейстеризацію та денатурацію. Типовий робочий діапазон вологості у барабані екструдера – 20–30%.

Недостатня вологість (<20%) призводить до надмірного зростання тиску та механічного навантаження (SME), погіршення пластифікації та ризику блокування барабана. Надлишкова вологість (>35%) знижує в'язкість нижче необхідного рівня: екструдат не здатен утримувати бульбашки газу при розширенні, що дає щільніший, менш пористий продукт.

Збільшення вмісту води, як правило, знижує твердість та об'ємну щільність гранули, а також підвищує SME аквакормів. Водночас дослідження Baller et al. (2018, 2021) показали, що підвищена вологість у барабані є статистично значущим чинником зростання об'ємної щільності у кормах для домашніх тварин – ця, на перший погляд, суперечлива залежність пояснюється різним ступенем флеш-випаровування при різних температурах матриці.

1.5.4 Клейстеризація крохмалю та денатурація білків

Клейстеризація крохмалю – перетворення кристалічної структури крохмальних гранул на аморфну гель-матрицю – є визначальним процесом для формування структури гранули [8, 13]. При недостатньому ступені клейстеризації продукт є крихким, має низьку міцність та засвоюваність. Повна клейстеризація при відсутності зсуву вимагає вологості щонайменше 30%; в умовах екструзії із зсуву достатньо 23–28%.

На ступінь клейстеризації позитивно впливають підвищення температури матриці та вологості. Присутність жиру у рецептурі знижує клейстеризацію через ізолюючий ефект: жировий шар на поверхні крохмальних гранул перешкоджає їхньому набухання. Волокнисті інгредієнти також знижують

клейстеризацію, збільшуючи механічний опір матриці та скорочуючи ефективний час перебування.

Денатурація білків відбувається паралельно з клейстеризацією крохмалю: під дією тепла та зсуву білкові молекули розгортаються і утворюють зшиті мережі, що підвищує в'язкість та еластичність екструдату. Для рослинних білків (пшенична клейковина) цей ефект особливо виражений – вони безпосередньо сприяють радіальному розширенню гранул завдяки в'язкопружним властивостям. Тваринні білки (рибне борошно, борошно з птиці), що пройшли попередню термічну обробку, мають нижчу функціональну активність при екструзії.

1.5.5 Властивості розширення та структура пор

Розширення гранули при виході з матриці є результатом сукупності факторів: флеш-випаровування вологи, в'язкопружних властивостей екструдату та реологічного стану на момент виходу. Ступінь радіального розширення (Sectional Expansion Index, SEI) може перевищувати 50% від площі отвору матриці для сухих розширених кормів для домашніх тварин.

Вміст крохмалю та розчинного білка позитивно корелює з розширенням, тоді як жир, клітковина та тваринний білок знижують його. Монти та ін. (2016) виявили сильну позитивну кореляцію між тиском матриці та радіальним розширенням, незважаючи на наявність харчових волокон у рецептурі. Водночас підвищений тиск матриці негативно впливає на поздовжнє розширення (питому довжину продукту). Ці результати підкреслюють, що тиск матриці є ключовою вихідною змінною управління.

Внутрішня мікроструктура гранули визначає її здатність поглинати ліпідні покриття після сушіння. Більш пориста структура забезпечує вищу поглинальну здатність олії (ОАС), але водночас підвищує витікання олії (OLR) при зберіганні. Зв'язок між розширенням, мікроструктурою та ліпідними характеристиками є нелінійним і залежить від рецептури.

1.5.6 Взаємозв'язок параметрів процесу та якості продукту

Складний і нелінійний характер взаємодій між параметрами екструзії та вихідними характеристиками продукту є одним із ключових викликів як для управління процесом, так і для його моделювання [8]. У таблиці 1.6 узагальнено результати низки досліджень щодо впливу основних параметрів процесу на найважливіші показники якості гранул.

Таблиця 1.6 – Вплив параметрів процесу на показники якості гранул

Параметр процесу	Діапазон	Клейстер. крохм.	Твердість	Насипна щільність	Розширення	Водорозчинність
Температура матриці, °C	112,7–147,5	↔	↓	↓↓↓	↓↓↓	↑↑↑
Температура матриці, °C	115,2–132,2	↑↑	↑↑	↓↓↓	↑↑	↓↓↓
Тиск матриці, бар	52,6–61,7	↓↓	↓↓↓	↓↓↓	↑↑↑	↔
Вміст вологи, %	22,5–26,2	↑↑	↓↓↓	↔	↔	↔
Вміст вологи, %	21,8–36,0	↔	↑↑↑	↑↑	↓↓↓	↓↓↓

* Позначення: ↑↑↑ – сильно позитивний вплив, ↓↓↓ – сильно негативний, ↔ – відсутність значущого зв'язку.

Таблиця 1.6 наочно демонструє, що характер впливу параметрів на якість продукту залежить від дослідження – тобто від конкретної рецептури та умов обробки. Такі суперечності є наслідком відмінностей у вологості барабана, рецептурі та типі екструдера, що підкреслює необхідність моделей, здатних враховувати специфічні умови конкретного виробництва.

Ця складність є фундаментальним обґрунтуванням необхідності автоматизованих систем керування та математичного моделювання процесу екструзії для кормів для домашніх тварин.

1.6 Аналіз сучасного стану автоматизації екструзійних ліній виробництва гранульованих кормів для домашніх тварин

Автоматизація виробництва гранульованих кормів для домашніх тварин є стратегічним напрямом галузі. Вона забезпечує зменшення впливу людського фактора та пов'язаної з ним варіабельності продукту, зниження витрат на комунальні послуги та сировину, покращення однорідності продукту від партії до партії, документування процесу та можливість прогнозуючого технічного обслуговування [14].

Контроль та автоматизація процесів усувають вплив людини та неминучу мінливість продукту, пов'язану з роботою екструдера. Сучасні промислові системи управління об'єднують вимірювання, регулювання та логіку захистів у єдину цифрову платформу.

1.6.1 Структура системи управління екструзійною лінією

Система управління екструзійною лінією включає ієрархічну структуру: польовий рівень (датчики та виконавчі механізми), рівень управління (ПЛК або DCS) та рівень супервізорного управління (SCADA, HMI) [15, 16]. На рівні поля збираються сигнали від датчиків тиску, температури, витратомірів, тензодатчиків та енкодерів. На рівні управління виконуються алгоритми регулювання – PID-контролери, логіка захистів та блокувань. Супервізорний рівень забезпечує відображення тенденцій, зберігання рецептів, звітність та інтерфейс оператора.

У таблиці 1.7 наведено основні параметри та змінні екструзійної лінії з точки зору систем управління.

					ХНТУ 174.КРБ.26.001 ПЗ	Лис
Зм	Лис	№ докум	Підпис	Дат		44

Таблиця 1.7 – Керовані параметри та змінні відгуку екструзійної лінії виробництва кормів для домашніх тварин

Параметр	Тип	Засіб вимірювання
Швидкість подачі сировини	Керований вхід	Гравіметричний дозатор
Витрата пари у кондиціонер	Керований вхід	Регулювальний клапан
Витрата води у кондиціонер	Керований вхід	Регулювальний клапан
Швидкість шнека екструдера	Керований вхід	Частотний перетворювач
Впорскування пари/води в барабан	Керований вхід	Клапан з витратоміром
Положення ЗК	Керований вхід	Зворотний зв'язок
Швидкість різального вузла	Керований вхід	Частотний перетворювач
Температура в барабані	Змінна відгуку	Термопари
Тиск перед матрицею	Змінна відгуку	П'єзоелектричний датчик
Температура матриці	Змінна відгуку	Термопара
Навантаження приводного двигуна	Змінна відгуку	Ватметр
Об'ємна щільність продукту	Змінна відгуку	Ваговий стакан
Вологість кінцевого продукту	Змінна відгуку	НВЧ-вологомір

1.6.2 Керування подачею сировини

Бункер-живильник із гравіметричним управлінням (loss-in-weight feeder) є першою керованою ланкою лінії. Пристрій безперервно реєструє зменшення ваги бункера як функцію часу та порівнює фактичну швидкість подачі з заданою. Відхилення компенсується регулюванням швидкості шнека подачі. Точність підтримки заданої витрати – $\pm 0,5\%$ – є необхідною умовою стабільної роботи екструдера, оскільки будь-яке коливання подачі безпосередньо змінює ступінь заповнення барабана, тиск та температуру матриці [16].

Захисні блокування запобігають подачі сухої сировини у барабан екструдера у разі відсутності потоку пари або води. Втрата пари без блокування подачі може спричинити критичне перевантаження двигуна та механічне пошкодження шнека.

1.6.3 Керування попереднім кондиціонуванням

Управління попереднім кондиціонером передбачає регулювання витрати пари та води як функції від швидкості сухої подачі. Заданий рівень вологості на виході з кондиціонера (зазвичай 10–25%) підтримується шляхом зміни відкриття відповідних регулювальних клапанів. Температура суміші на виході контролюється термопарою та використовується як діагностична змінна.

Сучасні конструкції попередніх кондиціонерів, встановлених на тензодатчиках, у поєднанні з дозуючими пристроями на виході дозволяють повністю контролювано здійснювати наповнення та очищення апарата. Це суттєво знижує перехресне забруднення між рецептурами при переналагодженні лінії.

1.6.4 Керування екструдером

Ключовими керованими параметрами безпосередньо екструдера є швидкість шнека та витрата пари/води, що впорскуються в барабан. Швидкість шнека регулюється частотним перетворювачем і визначає рівень підведення механічної енергії (SME). Моніторинг навантаження приводного двигуна у режимі реального часу дозволяє відстежувати тенденції, що свідчать про знос або зміни рецептури.

Профілі температури по зонах барабана вимірюються термопарами і можуть коригуватися зонними нагрівачами або охолодженням. Тиск перед матрицею є критичним показником заповнення та реологічного стану екструдату. Швидкість сухої подачі може використовуватися як командний

сигнал для запобігання перевантаженню двигуна при збереженні максимальної продуктивності.

Зворотний клапан (ЗК) є додатковим виконавчим механізмом, що дозволяє оперативно змінювати щільність продукту (до 25%) без зупинки лінії та зміни матриці. Управління ЗК може бути включене в контур автоматичного регулювання об'ємної щільності за результатами онлайн-вимірювання.

1.6.5 Керування сушінням та нанесенням покриттів

Сушарка управляється за температурним профілем зон, швидкістю повітряного потоку та часом перебування продукту. Мета управління – досягнення заданого кінцевого вмісту вологи (<10% для сухих розширених кормів). Онлайн-вологоміри (на базі мікрохвильових або NIR-технологій), розміщені на виході сушарки, забезпечують безперервний зворотний зв'язок для регулювання теплового режиму.

Альтернативним підходом є вимірювання відносної вологості у відпрацьованому повітрі сушарки та використання цієї змінної для непрямого контролю вологості кінцевого продукту. Нанесення жирових покриттів автоматизується через точне дозування рідкого жиру або ароматизаторів у відсотках від маси продукту, що проходить через систему покриття.

1.6.6 Сучасні підходи до автоматизації та перспективи

Традиційні системи управління базуються на окремих PID-регуляторах для кожного параметра. Більш сучасний підхід передбачає реалізацію багатозмінного управління (MIMO, multi-input multi-output control), що враховує взаємозалежності між параметрами [17]. Наприклад, зміна швидкості подачі одночасно впливає на SME, тиск матриці та час перебування – ізольоване регулювання кожного з цих параметрів окремим PID-контролером є субоптимальним.

Іншим напрямком є реалізація прогностичного управління (MPC, Model Predictive Control), де математична модель процесу використовується для обчислення оптимальних управляючих дій з урахуванням майбутніх обмежень. Бібліотека накопичених виробничих даних відкриває можливості для впровадження статистичного управління процесом (SPC) та виявлення аномалій засобами машинного навчання. Системи управління рухаються до рівня, коли оператор вводитиме цільові характеристики продукту – щільність, засвоюваність, прийнятність, – а система управління самостійно коригуватиме умови обробки на основі моделі рецептури та поточного стану процесу [18].

1.7 Висновки до розділу 1

За результатами системного аналізу технологічного процесу виробництва гранульованих кормів для домашніх тварин можна сформулювати такі висновки.

1. Промислове виробництво сухих розширених кормів для домашніх тварин є складним безперервним технологічним процесом, в якому екструзійне варіння визначає ключові характеристики кінцевого продукту – фізичну структуру, харчову цінність та мікробіологічну безпеку. Ринок галузі є потужним стимулом для подальшого технологічного вдосконалення.

2. Рецептура сировини та параметри екструзійного процесу формують нелінійну багатовимірну систему взаємозалежностей. Характер цих зв'язків є рецептурно-специфічним і не завжди відтворюється стандартними емпіричними моделями.

3. Питома механічна енергія, температура та тиск матриці є ключовими інтегральними показниками стану процесу. Ступінь клейстеризації крохмалю, об'ємна щільність, ступінь розширення та індекс міцності гранул є відповідними цільовими характеристиками якості продукту, що перебувають у складних нелінійних залежностях від параметрів процесу.

					ХНТУ 174.КРБ.26.001 ПЗ	Лис
Зм	Лис	№ докум	Підпис	Дат		49

2 МАТЕМАТИЧНИЙ АНАЛІЗ ЕКСТРУЗІЙНОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ГРАНУЛЬОВАНИХ КОРМІВ ЯК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

2.1 Одержання математичного опису об'єкту керування

У контексті розробки ефективних систем автоматичного керування (САК) процесом екструзії кормів для тварин, ключовим етапом є адекватна ідентифікація об'єкта керування. Визначення статичних та динамічних властивостей екструдера як складної, багатозв'язної та нелінійної термодинамічної системи концептуально спирається на три базові підходи: аналітичний, експериментальний та їхню синергію – експериментально-аналітичний метод.

Аналітичний підхід ґрунтується на глибокому теоретичному аналізі фізико-хімічних перетворень, що відбуваються з кормовою сумішшю під дією температури, тиску та зсувних деформацій. Математична модель формується шляхом запису систем диференціальних рівнянь, які базуються на фундаментальних законах збереження маси, імпульсу та термодинамічної енергії. При цьому обов'язково враховуються реологічні характеристики неньютонівського екструдату, кінетика фазових переходів (наприклад, клейстеризація крохмалю, денатурація білкових фракцій) та конструктивна геометрія робочої камери (конфігурація шнека, профіль матриці). Цей метод є незамінним на стадії проєктування нових технологічних ліній, оскільки дозволяє предиктивно оцінювати поведінку системи у стаціонарних та перехідних режимах без фізичного втручання. Однак, практичне використання аналітичних моделей для синтезу алгоритмів автоматизації ускладнюється їхньою громіздкістю. Реальний процес екструзії супроводжується стохастичними збуреннями, а точний математичний опис вимагає введення низки спрощувальних припущень (ізотермічність окремих зон, ідеалізація потоку), що неминуче знижує точність відображення реальних умов. До того ж, розв'язання таких рівнянь потребує точних числових значень теплофізичних коефіцієнтів, які

важко визначити апіорі.

Експериментальний підхід передбачає отримання динамічних характеристик шляхом безпосереднього дослідження діючого технологічного об'єкта. У цьому випадку екструдер розглядається як багатовимірний об'єкт типу "чорний ящик", а математичний опис формується на основі аналізу реакцій вихідних координат (температури продукту, тиску перед матрицею, питомої механічної енергії) на цілеспрямовані тестові впливи керуючих параметрів (швидкості обертання шнека, рівня зволоження, витрати сировини). Даний метод відрізняється меншою трудомісткістю математичного синтезу та гарантує високу адекватність моделі для конкретної робочої точки. Проте, його реалізація вимагає дооснащення екструзійної лінії високоточним вимірювальним обладнанням та проведення тривалих промислових випробувань, що часто призводить до утворення бракованої продукції під час налаштування. Найбільшим недоліком чистого експерименту є відсутність розуміння внутрішніх механізмів: отримані емпіричні залежності між технологічними режимами та якістю готового корму жорстко прив'язані до поточної конструкції апарату та конкретної рецептури. Їх неможливо екстраполювати на інше обладнання.

З огляду на зазначені обмеження, у сучасній теорії автоматичного керування екструзією кормів найдоцільнішим вважається комбінований експериментально-аналітичний (напівемпіричний) підхід. Він передбачає використання спрощених аналітичних рівнянь для визначення загальної фізичної структури взаємозв'язків процесу, тоді як невідомі коефіцієнти адаптуються за допомогою експериментальних даних, що забезпечує оптимальний баланс між точністю моделі та її обчислювальною складністю для мікропроцесорних контролерів.

2.2 Опис рівнянь динаміки циліндру екструзійної установки

Для побудови математичного опису об'єкта керування розглянемо шнековий циліндр екструзійної установки як термодинамічну систему [19]. Нехай об'єм екструдату в циліндрі дорівнює V , до нього надходить гранульована суміш інгредієнтів з масовою витратою F_1 та температурою T_1 . Завдяки тепловій дії нагрівачів та механічній роботі шнека суміш плавиться і нагрівається, поглинаючи кількість теплоти Q при споживанні нагрівачами потужності P . Гомогенізований екструдат залишає циліндр із масовою витратою F_2 та температурою T_2 . Оскільки нагрівачі усіх секцій циліндра функціонують у єдиному тепловому режимі, з метою спрощення розрахунків вони розглядаються як один еквівалентний нагрівач. Схема шнекового циліндру екструзійної установки наведена на рис. 2.1.

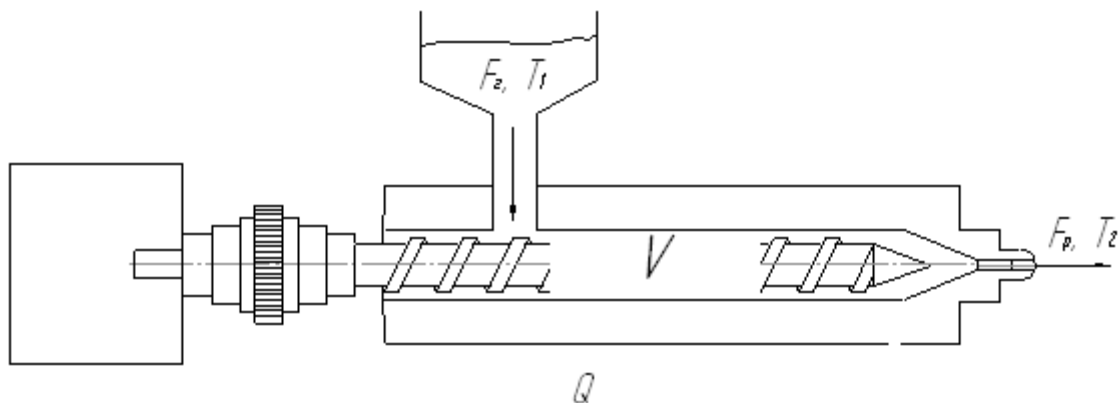


Рисунок 2.1 – Схема шнекового циліндру екструзійної установки

2.2.1 Рівняння матеріального та теплового балансів

Складемо рівняння матеріального балансу для речовини, що протікає через шнековий циліндр за нескінченно малий проміжок часу dt [14]. Приріст маси екструдату всередині об'єму V дорівнює різниці між надходженням та відбором:

$$d(\rho \cdot V) = F_r \cdot dt - F_p \cdot dt$$

де ρ – середня густина екструдату, кг/м³.

За умови усталеного режиму $F_r = F_p = F$ та $V = \text{const}$, тобто маса екструдату в циліндрі не змінюється в часі. Запишемо тепловий баланс для того самого елементарного проміжку часу dt . Зміна внутрішньої теплової енергії екструдату в об'ємі V складається із теплоти, привнесеної потоком вхідного матеріалу, та теплоти, виділеної нагрівачами, за вирахуванням теплоти, винесеної потоком екструдату на виході:

$$\rho \cdot c \cdot V \cdot dT_2 = F \cdot c \cdot (T_1 - T_2) \cdot dt + \eta \cdot P \cdot dt$$

де c – питома теплоємність матеріалу, Дж/(кг·К); η – коефіцієнт корисної дії нагрівачів; P – споживана потужність нагрівачів, Вт.

Розділимо обидві частини рівняння (2.2) на dt :

$$\rho \cdot c \cdot V \cdot \frac{dT_2}{dt} = F \cdot c \cdot (T_1 - T_2) + \eta \cdot P$$

2.2.2 Лінеаризація та отримання диференціального рівняння перехідного процесу

Рівняння (2.3) є нелінійним відносно змінних стану T_1 , T_2 , P . Для побудови передатних функцій виконаємо лінеаризацію в точці номінального (базисного) режиму роботи установки, що характеризується значеннями T_{10} , T_{20} , P_0 , F_0 . Запровадимо відхилення від базисних значень:

$$\Delta T_1 = T_1 - T_{10}, \quad \Delta T_2 = T_2 - T_{20}, \quad \Delta P = P - P_0$$

Приріст нелінійної функції двох аргументів $f(x, y)$ у точці (x_0, y_0) визначається як:

$$\Delta f \approx \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_0 \cdot \Delta x + \left. \frac{\partial f}{\partial y} \right|_0 \cdot \Delta y$$

Застосовуючи лінеаризацію (2.5) до рівняння (2.3) відносно відхилень від базисних значень, отримаємо диференціальне рівняння перехідного процесу об'єкта керування:

$$\rho \cdot c \cdot V \cdot \frac{d\Delta T_2}{dt} = F_0 \cdot c \cdot (\Delta T_1 - \Delta T_2) + \eta \cdot \Delta P$$

Розділимо усі складові рівняння (2.6) на $F_0 \cdot c$:

$$\frac{\rho \cdot V}{F_0} \cdot \frac{d\Delta T_2}{dt} = \Delta T_1 - \Delta T_2 + \frac{\eta}{F_0 \cdot c} \cdot \Delta P$$

Введемо позначення для параметрів об'єкта керування:

$$T_0\delta = \frac{\rho \cdot c \cdot V}{F_0 \cdot c} = \frac{\rho \cdot V}{F_0}$$

$$k_x = 1$$

$$k_z = \frac{\eta}{F_0 \cdot c}$$

де $T_{об}$ – стала часу об'єкта, с; k_x – коефіцієнт передачі каналу «температура входу → температура виходу»; k_z – коефіцієнт передачі каналу «потужність нагрівачів → температура виходу», К/Вт.

Підставляючи введені позначення, отримаємо шукане диференціальне рівняння у стандартній формі:

$$T_{об} \cdot \frac{d\Delta T_2}{dt} + \Delta T_2 = k_x \cdot \Delta T_1 + k_z \cdot \Delta P$$

2.2.3 Передатні функції об'єкта керування

Застосуємо перетворення Лапласа до рівняння (2.11) за нульових початкових умов ($\Delta T_2(0) = 0$) [18]:

$$(T_{об} \cdot s + 1) \cdot \Delta T_2(s) = k_x \cdot \Delta T_1(s) + k_z \cdot \Delta P(s)$$

З урахуванням того, що в реальних екструзійних установках між зміною потужності нагрівачів та реакцією температури екструдату існує транспортне запізнення τ_3 , обумовлене інерцією теплопередачі через стінки циліндра та масою матеріалу, передатні функції об'єкта по каналах «збурення $\Delta T_1 \rightarrow$ вихід ΔT_2 » та «керування $\Delta P \rightarrow$ вихід ΔT_2 » мають вигляд:

$$W_x(s) = \frac{\Delta T_2(s)}{\Delta T_1(s)} = \frac{k_x}{T_{об} \cdot s + 1}$$

$$W_z(s) = \frac{\Delta T_2(s)}{\Delta P(s)} = \frac{k_z}{T_{об} \cdot s + 1} \cdot e^{-\tau_3 \cdot s}$$

де s – комплексна змінна перетворення Лапласа; τ_3 – час транспортного запізнення, с.

Таким чином, шнековий циліндр екструзійної установки по каналу керування «потужність нагрівачів $\rightarrow$ температура екструдату» описується передатною функцією аперіодичної ланки першого порядку з чистим запізненням (2.14), що є типовою моделлю для теплових об'єктів з розподіленими параметрами.

2.2.4 Вибір каналів управляючого впливу

У системі керування екструдером для виробництва гранульованих кормів ключовим завданням є визначення каналів, через які реалізується регулюючий вплив [19]. Конфігурація рухомих проміжків шнекового циліндру (рис. 2.2) свідчить про обмеженість можливостей прямого втручання у процес транспортування та обробки кормової суміші.

Єдиним ефективним каналом є залежність між тиском у робочій зоні та температурою другої секції екструдера, що позначається як $P(x) \rightarrow T_2(y)$. Це означає, що стабілізація температури кормової суміші на виході барабана здійснюється шляхом корегування енергії, яка подається на нагрівальні елементи.

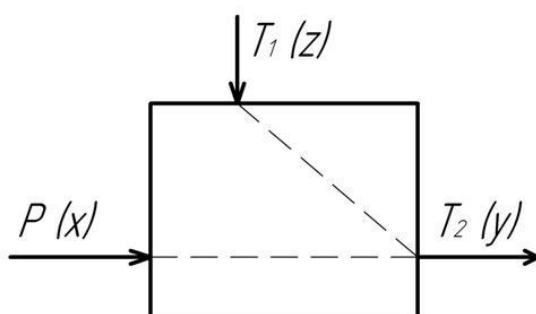


Рисунок 2.2 – Схема динамічних каналів шнекового циліндру

Такий вибір каналу управляючого впливу визначає архітектуру системи регулювання: енергетичний вплив реалізується через електричні нагрівачі, а контроль параметрів забезпечує сталість технологічного процесу, однорідність гранул та відповідність готового продукту вимогам якості.

2.2.5 Знаходження математичної моделі експериментальним методом.

Експериментальний метод ідентифікації є найбільш практичним способом отримання математичної моделі реального об'єкта керування, оскільки не потребує детального знання фізико-хімічних властивостей матеріалу та конструктивних параметрів установки. Його основним недоліком є те, що отримана модель є справедливою лише для конкретної екструзійної установки та визначеного діапазону технологічних режимів і не може бути безпосередньо перенесена на інший об'єкт.

Вхідні дані для ідентифікації отримують шляхом зняття кривої розгону – перехідної характеристики об'єкта – на діючому обладнанні [21]. Схема підключення вимірювальної апаратури для реєстрації кривої розгону шнекового циліндру екструзійної установки наведена на рис. 2.3.

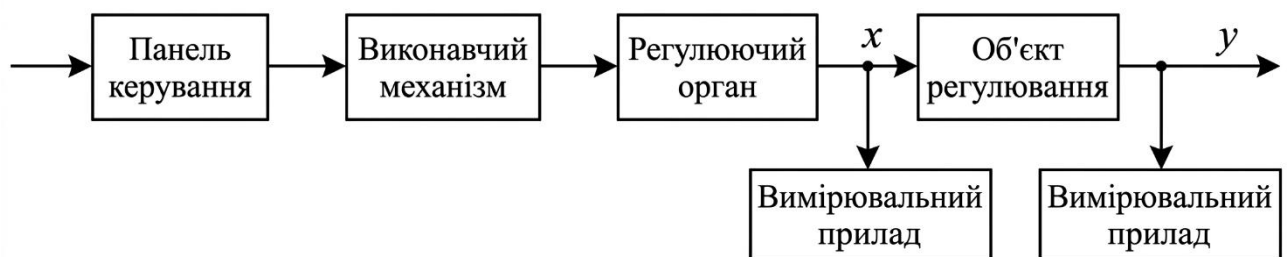


Рисунок 2.3 – Схема установки апаратури для зняття кривої розгону

Процедура зняття кривої розгону полягає в наступному: виконавчий механізм (ВМ) – тиристорний регулятор потужності – стрибкоподібно змінює потужність нагрівачів шнекового циліндру на величину $\Delta P = 7 - 10\%$ від номінального значення P_0 . З моменту подання ступінчастого збурення виконується неперервна реєстрація температури T_2 на виході циліндру аж до досягнення нового сталого режиму або до встановлення лінійного характеру зміни вихідної величини.

Об'єкти теплотехнології, до яких відноситься шнековий циліндр екструзійної установки, як правило, описуються передатними функціями другого і вищого порядків. У загальному вигляді передатна функція об'єкта n -го порядку записується як:

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

де n – порядок об'єкта; T – постійна часу аперіодичної ланки, с; τ – час транспортного запізнення, с; k – статичний коефіцієнт передачі об'єкта; s – комплексна змінна перетворення Лапласа.

Для визначення параметрів передатної функції виконаємо стрибкоподібну зміну потужності нагрівачів шнекового циліндру на $\Delta P = 7\%$ від номінального значення та зареєструємо відгук – динаміку зміни температури екструдату T_2 на виході. Отримана крива розгону шнекового циліндру екструзійної установки наведена на рис. 2.4.

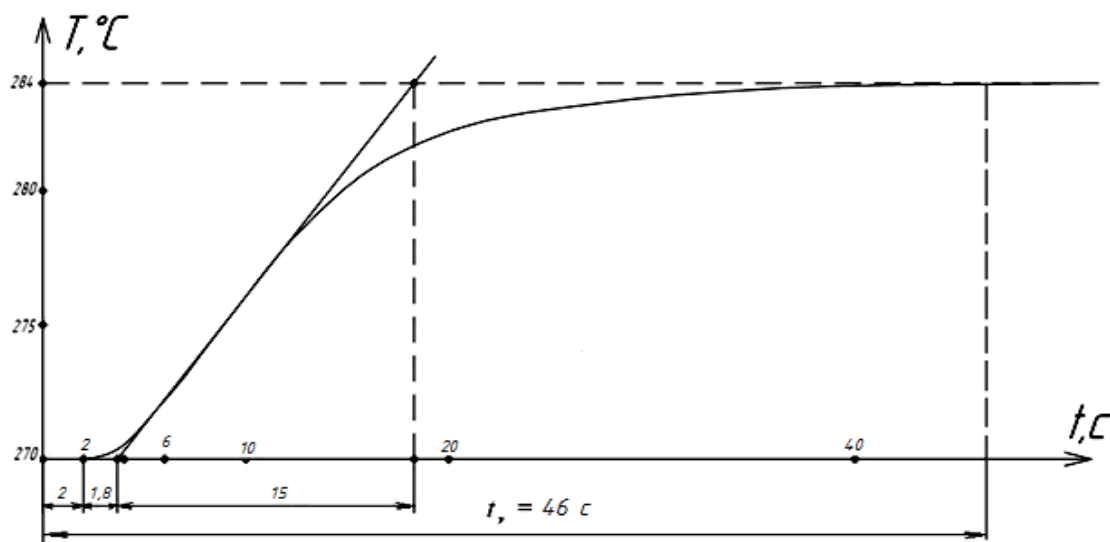


Рисунок 2.4 – Крива розгону шнекового циліндру екструзійної установки

За графіком кривої розгону визначаємо характерні часові інтервали методом дотичної: $T_{0a} = 2$ с; $T_{ab} = 1,8$ с; $T_{bd} = 15$ с.

Порядок об'єкта n встановлюється за значенням відношення T_{ab}/T_{bd} з використанням таблиці 2.1, в якій також наведені значення коефіцієнтів k_1 та k_2 , необхідних для розрахунку параметрів передатної функції.

Таблиця 2.1 – Таблиця для визначення порядку та параметрів передатної функції об'єкта

T_{ab}/T_{bd}	n	k_1	k_2
0	1	1	0
0,104	2	2,718	0,282
0,218	3	3,695	0,805
0,319	4	4,463	1,425
0,410	5	5,119	2,100

Обчислимо відношення характерних інтервалів кривої розгону:

$$\frac{T_{ab}}{T_{bd}} = \frac{1,8}{15} = 0,12$$

Отримане значення $0,12 \approx 0,104$ відповідає порядку об'єкта $n = 2$. За таблицею 2.1 знаходимо коефіцієнти: $k_1 = 2,718$; $k_2 = 0,282$.

Оскільки порядок об'єкта $n = 2 > 1$, передатна функція є добутком двох аперіодичних ланок першого порядку. Визначаємо постійні часу цих ланок:

$$T_1 = \frac{T_{bd}}{k_1} = \frac{15}{2,718} \approx 5,52 \text{ с}; \quad T_2 = \frac{T_{bd}}{k_1} \cdot k_2 = \frac{15 \cdot 0,282}{2,718} \approx 1,56 \text{ с}$$

Визначаємо час запізнення τ_1 , що відповідає ділянці чистого транспортного запізнення:

$$\tau_1 = T_{oa} = 2 \text{ с}$$

Умовний час запізнення (з урахуванням внеску аперіодичних ланок) дорівнює:

$$\tau = \tau_1 + T_{ab} - (T_1 + T_2 - T_{bd}) = 2 + 1,8 - (5,52 + 1,56 - 15) \approx 2 \text{ с}$$

Статичний коефіцієнт передачі об'єкта по каналу керування «потужність нагрівачів → температура екструдату» визначається як відношення сталого приросту вихідної величини до величини вхідного збурення [22, 23]:

$$k = \frac{\Delta T_{2\infty}}{\Delta P} = \frac{T_{2\text{уст}} - T_{20}}{P_0 \cdot 0,07}$$

де $T_{2\text{уст}}$ – температура екструдату в новому сталому стані, °С; T_{20} – початкова температура екструдату, °С; P_0 – номінальна потужність нагрівачів, Вт.

Таким чином, підставляючи знайдені значення у вираз (2.10), отримуємо передатну функцію шнекового циліндру екструзійної установки по каналу «потужність нагрівачів → температура екструдату»:

$$W(s) = \frac{k}{(5,52 \cdot s + 1)(1,56 \cdot s + 1)} \cdot e^{-2s}$$

Отримана модель є аперіодичною ланкою другого порядку з чистим запізненням і являє собою типову структуру для теплових об'єктів екструзійного виробництва. Вона буде використана в наступному підрозділі для синтезу параметрів ПД-регулятора температури екструдату [24, 25].

2.3 Розрахунок параметрів налаштувань регулятора

2.3.1 Вибір регульованого параметра та алгоритму регулювання

Регульованим технологічним параметром у процесі екструзійного виробництва гранульованих кормів для домашніх тварин є температура екструдату в зоні дозування шнекового циліндра – останній ділянці барабана

					ХНТУ 174.КРБ.26.001 ПЗ	Лис
Зм	Лис	№ докум	Підпис	Дат		60

безпосередньо перед матрицею. Саме в цій зоні встановлюється кінцева температура кормової маси, яка визначає ступінь клейстеризації крохмалю, денатурації білків, ступінь розширення гранул після виходу з матриці та загальну консистенцію кінцевого продукту. Відхилення температури від заданого значення призводить до погіршення якісних показників: зниження температури – до недостатньої клейстеризації та твердих гранул; підвищення – до деградації термолабільних поживних речовин і надмірного розширення [26].

Як алгоритм регулювання обрано пропорційно-інтегрально-диференціальний (ПІД) алгоритм, який усуває недоліки П- та ПІ-регулювання. Пропорційна складова забезпечує швидку реакцію на відхилення температури від уставки. Інтегральна складова усуває статичну похибку, що особливо важливо при зміні рецептури та пов'язаній з нею зміні теплоємності кормової суміші. Диференціальна складова підключається при різких змінах температури – наприклад, при переході на новий режим або аварійному перегріві – і формує випереджаючий керуючий сигнал, пропорційний швидкості зміни відхилення, що суттєво скорочує час перехідного процесу.

ПІД-регулятор вимірює відхилення регульованої величини від заданого значення (уставки) та формує керуючий сигнал $u(t)$ за законом:

$$u(t) = K_{\Pi} \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\xi) d\xi + T_d \frac{de(t)}{dt} \right]$$

де $e(t) = T_{\text{зад}} - T_2(t)$ – відхилення температури екструдату від уставки, °С; K_{Π} – пропорційний коефіцієнт; T_i – час інтегрування, с; T_d – час диференціювання, с.

Структурна схема системи автоматичного керування температурою екструдату наведена на рис. 2.5.

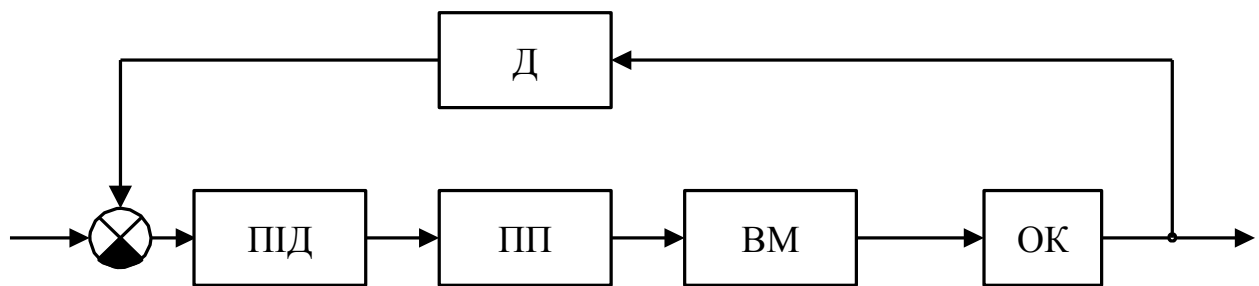


Рисунок 2.5 – Структурна схема контуру регулювання температури екструдату

На рисунку 2.5: ПІД – пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор; ПП – перетворювач потужності (тиристорний регулятор); ВМ – виконавчий механізм (нагрівачі зони дозування); Д – датчик температури (термопара); ОК – об’єкт керування (зона дозування шнекового циліндру).

Блок-схема ПІД-регулятора наведена на рис. 2.6.

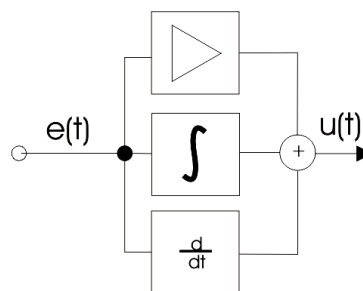


Рисунок 2.6 – Блок-схема ПІД-регулятора

2.3.2 Модель об’єкта керування в середовищі Simulink

Відповідно до результатів ідентифікації, отриманих у підрозділі 2.2.5, зона дозування шнекового циліндру екструзійної установки по каналу «потужність нагрівачів → температура екструдату» описується передатною функцією другого порядку з чистим запізненням, що являє собою послідовне з’єднання двох аперіодичних ланок першого порядку та ланки запізнення [23]:

$$W_1(s) = \frac{k}{(T_1 \cdot s + 1)(T_2 \cdot s + 1)} \cdot e^{-\tau s} = \frac{k}{(5,52 s + 1)(1,56 s + 1)} \cdot e^{-2s}$$

де k – статичний коефіцієнт передачі об'єкта, $^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$; $T_1 = 5,52$ с, $T_2 = 1,56$ с – постійні часу аперіодичних ланок; $\tau = 2$ с – час транспортного запізнення.

На основі отриманої передатної функції побудовано імітаційну модель об'єкта керування в програмному середовищі Simulink (рис. 2.7).

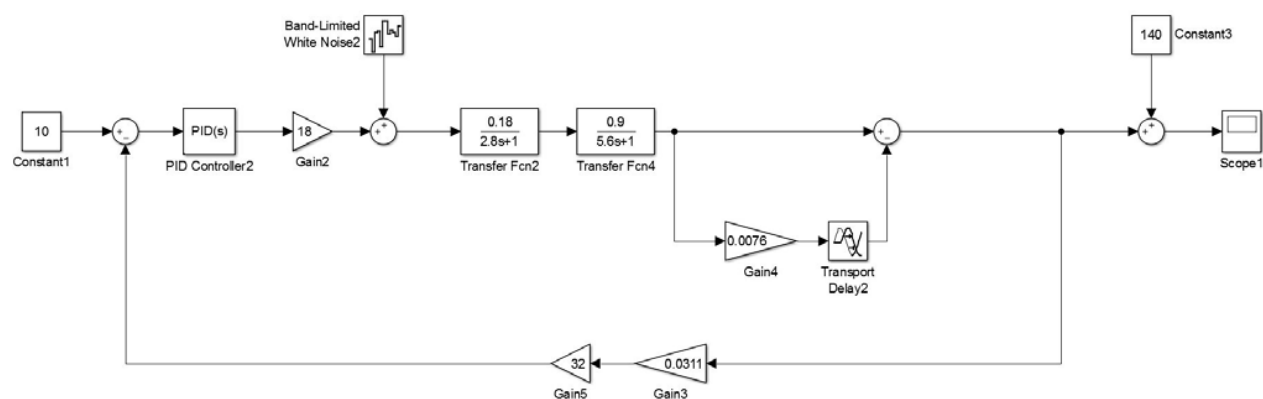


Рисунок 2.7 – Імітаційна модель контуру регулювання температури екструдату в Simulink

Графік перехідного процесу нерегульованого об'єкта наведено на рис. 2.8. Для забезпечення належної якості клейстеризації крохмалю та денатурації білків кормової маси необхідно підтримувати температуру екструдату в зоні дозування на рівні $T_{\text{зад}} = 140^{\circ}\text{C}$ з допустимим перерегулюванням не більше $\sigma \leq 5\%$.

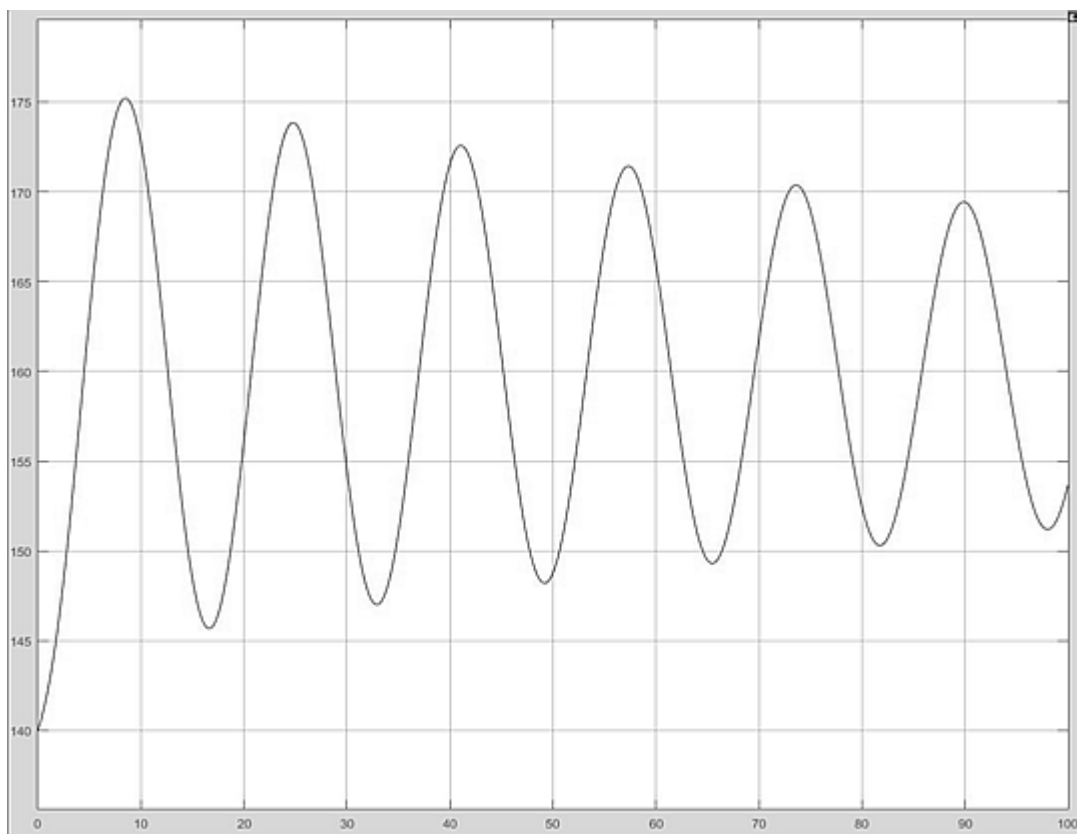


Рисунок 2.8 – Графік перехідного процесу об’єкта керування до налаштування регулятора

2.3.3 Визначення коефіцієнтів ПД-регулятора методом CHR

Налаштування параметрів ПД-регулятора виконано методом CHR (Chien, Hrones and Reswick), розробленим спеціально для систем з критерієм максимальної швидкості наростання за відсутності перерегулювання [21]. На відміну від емпіричних методів Зіглера–Нікольса, метод CHR дозволяє безпосередньо врахувати вимогу $\sigma = 0\%$, що є актуальним для процесів екструзії, де перерегулювання температури навіть на кілька градусів може призвести до деградації поживних речовин.

Для застосування методу CHR за кривою розгону (рис. 2.8) визначаються два параметри: α – нахил кривої розгону в точці перегину, та L – час запізнення, що відповідає перетину дотичної з віссю часу. Коефіцієнти регулятора визначаються за формулами таблиці 2.2.

Зм	Лис	№ докум	Підпис	Дат

Таблиця 2.2 – Формули визначення коефіцієнтів ПД-регулятора за методом CHR (без перерегулювання)

Тип регулятора	K_P	T_i	T_d
П	$0,3/a$	–	–
ПІ	$0,35/a$	$1,2 L$	–
ПІД	$0,6/a$	$1,0 L$	$0,5 L$

За параметрами кривої розгону об'єкта з передатною функцією (2.18) розраховано значення a та L і за формулами таблиці 2.2 отримано такі коефіцієнти ПД-регулятора:

$$K_P = 23,8; \quad T_i = 0,1 \text{ с}; \quad T_d = 30,7 \text{ с}$$

Результат налаштування підтверджено моделюванням у Simulink. Графік перехідного процесу налаштованої системи регулювання наведено на рис. 2.9.

Аналіз отриманого перехідного процесу свідчить про те, що система забезпечує час регулювання порядку $t_p \approx 50$ с без перерегулювання ($\sigma = 0\%$), що повністю відповідає вимогам технологічного процесу виробництва гранульованих кормів: стабілізація температури екструдату на заданому рівні $T_{\text{зад}} = 140^\circ\text{C}$ досягається без небезпечних температурних піків, здатних погіршити поживну цінність готового продукту.

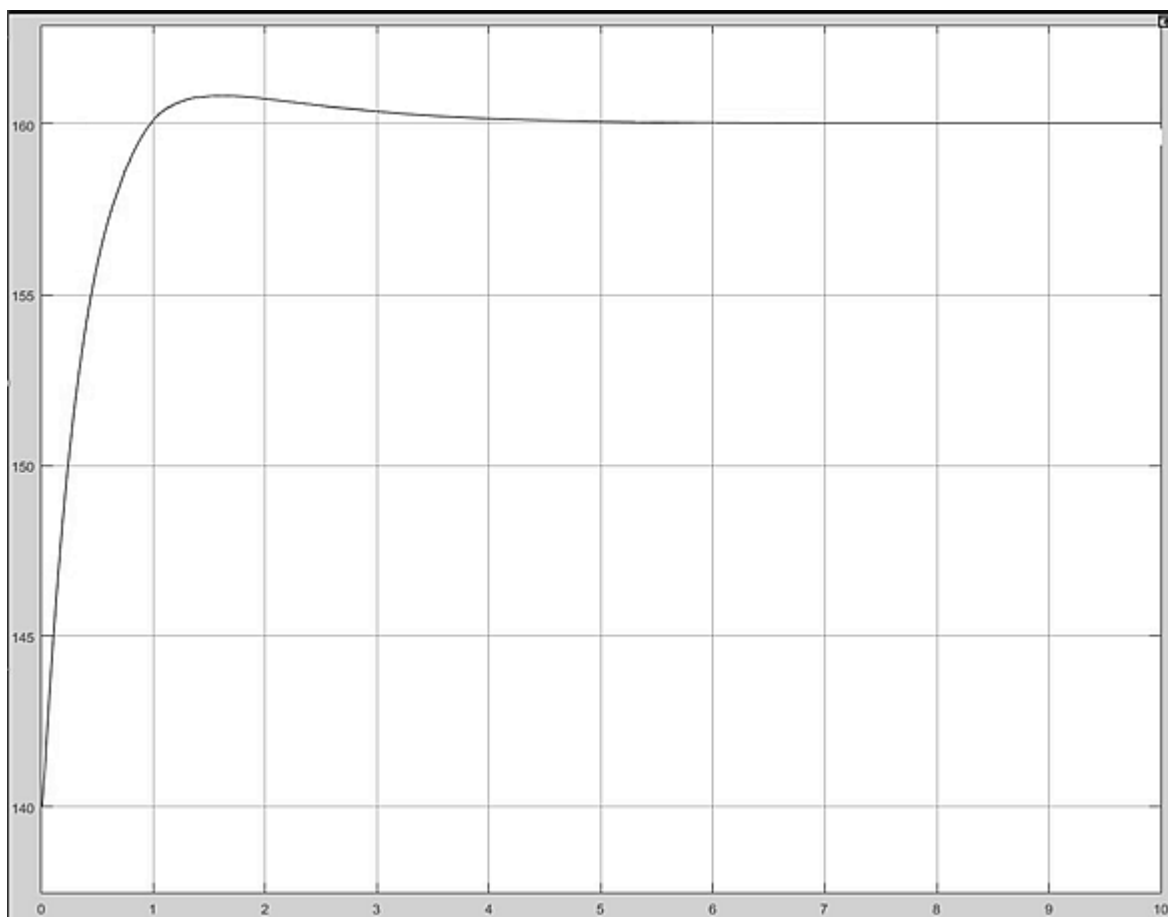


Рисунок 2.9 – Графік перехідного процесу системи регулювання після налаштування регулятора

2.4 Висновки до розділу 2

У другому розділі виконано повний математичний аналіз шнекового циліндра екструзійної установки для виробництва гранульованих кормів як об'єкта керування. На підставі рівнянь матеріального та теплового балансів отримано диференціальне рівняння перехідного процесу, яке після лінеаризації відносно номінального технологічного режиму перетворено на передатні функції по каналу управляючого впливу та каналу збурення. Як основний канал керування обрано «потужність нагрівачів $\rightarrow$ температура екструдату в зоні дозування» – єдиний канал, що забезпечує оперативну стабілізацію теплового стану кормової маси перед матрицею.

Зм	Лис	№ докум	Підпис	Дат

Методом кривої розгону ідентифіковано параметри передатної функції: об'єкт описується аперіодичною ланкою другого порядку з чистим запізненням. За отриманою моделлю методом CHR (Chien, Hrones and Reswick) розраховані оптимальні коефіцієнти ПД-регулятора, що забезпечують час перехідного процесу порядку 5 с при нульовому перерегулюванні. Адекватність і якість налаштувань підтверджені комп'ютерним моделюванням у середовищі MATLAB/Simulink.

Отримані результати є безпосередньою основою для третього розділу: розраховані коефіцієнти ПД-регулятора визначають алгоритм програмування контролера, структура контуру керування – архітектуру програмного забезпечення, а вимога до точності стабілізації температури (відхилення не більше $\pm 2^{\circ}\text{C}$ від уставки 160°C) – критерії вибору датчиків, виконавчих механізмів і технічних засобів автоматизації.

3 ПРОЕКТУВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕКСТРУЗІЙНОЮ УСТАНОВКОЮ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ГРАНУЛЬОВАНИХ КОРМІВ

3.1 Розробка архітектури автоматизованої системи керування

Для забезпечення високої надійності, відмовостійкості та швидкодії процесу виробництва гранульованих кормів запропоновано класичну трьохрівневу ієрархічну структуру АСУ ТП (рис. 3.1) [27].

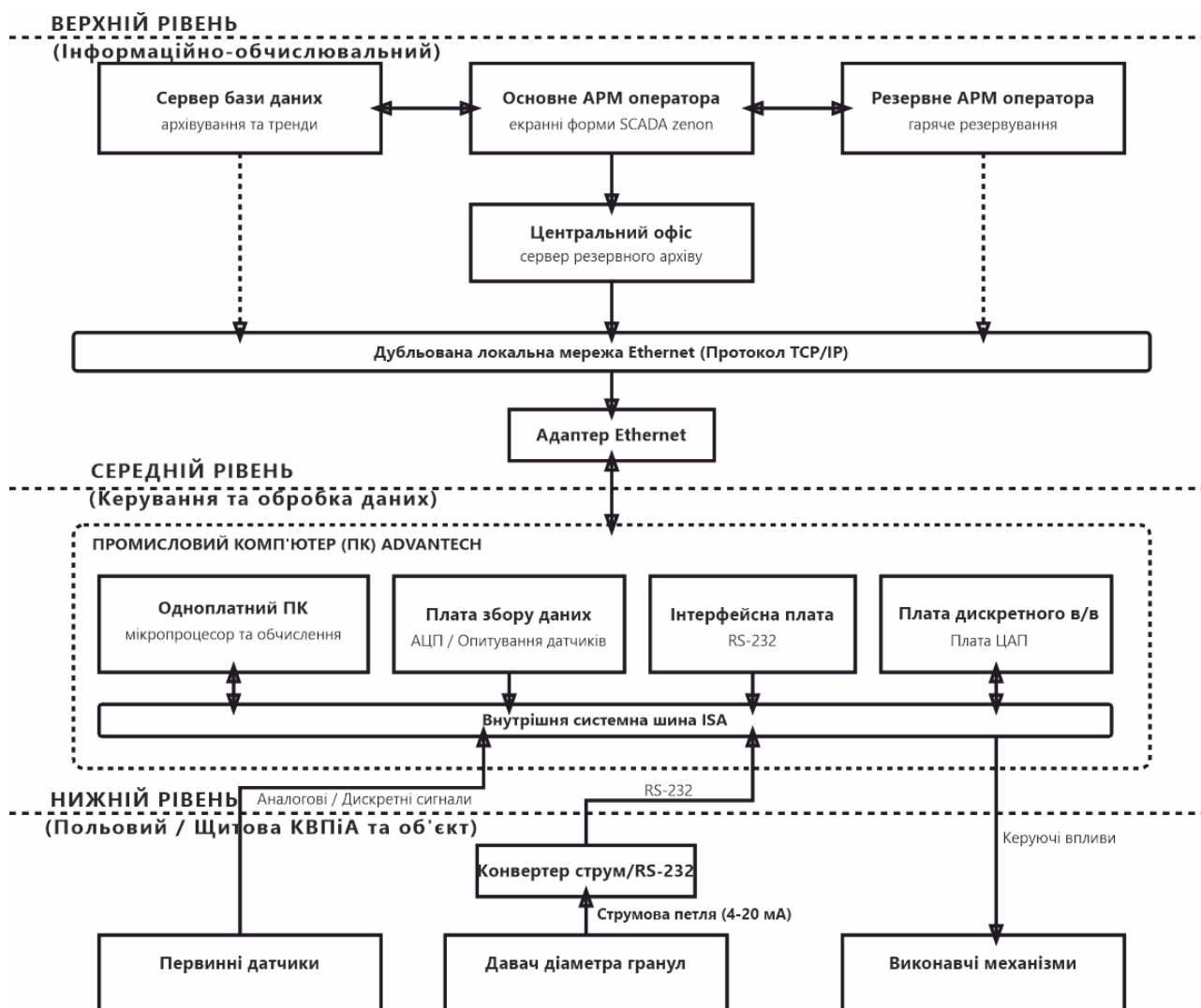


Рисунок 3.1 - Трирівнева структура АСУ ТП

Така архітектура дозволяє чітко розмежувати функції збору первинної інформації, безпосереднього цифрового керування та диспетчерського моніторингу. Інформаційна взаємодія між компонентами системи базується на вертикальній інтеграції «знизу-вгору» та передачі керуючих директив «згори-вниз».

Детальна організація апаратних та програмних засобів комплексу на кожному з ієрархічних рівнів наведена нижче [28, 29].

1. Нижній щабель ієрархії безпосередньо взаємодіє з технологічним устаткуванням екструзійної лінії. Він виконує функції сприйняття фізичних величин, перетворення їх у стандартизовані електричні сигнали та відпрацювання отриманих команд від контролерів. Основу цього рівня складають такі компоненти:

– Первинні датчики. Група вимірювальних пристроїв, що здійснюють безперервний моніторинг витрати, температурних режимів, тиску, а також електричних параметрів (струму й напруги). Вони генерують аналогові та дискретні сигнали, які передаються на обробку до середнього рівня системи.

– Давач діаметра гранул. Спеціалізований аналоговий пристрій, що контролює геометричні параметри готової продукції на виході екструдера. Вихідний сигнал сенсора формується у вигляді уніфікованого струмового сигналу «струмова петля». Для інтеграції давача в цифрове середовище промислового комп'ютера застосовано проміжний перетворювач «струм / RS-232», який трансформує аналогову величину в послідовний цифровий інтерфейс.

– Виконавчі механізми. Сюди належать електроприводи, запірно-регулююча арматура (клапани, засувки) та нагрівальні елементи. Вони безпосередньо приймають аналогові та дискретні керуючі впливи з виходу плат керування і змінюють положення робочих органів або теплову потужність для стабілізації ходу технологічного процесу.

Фізично польове обладнання змонтоване безпосередньо на технологічних вузлах лінії, а комутаційні блоки, кросові клеми та проміжні реле розташовуються всередині проєктованих щитів КВПіА з обмеженим доступом.

2. Середній рівень виступає центральною ланкою обчислень та логіко-програмного керування АСУ ТП. Його головним ядром є високонадійний промисловий комп'ютер (ПК) виробництва компанії Advantech, конфігурація якого адаптована під жорсткі умови експлуатації [30, 31]. Обчислювальна платформа ПК побудована на базі внутрішньої системної шини стандарту ISA, що об'єднує такі функціональні модулі:

- Одноплатний ПК. Містить центральний мікропроцесор, оперативну та флеш-пам'ять. Він виконує обчислювальні операції, реалізує алгоритми автоматичного автоматизованого регулювання (зокрема ПД-регулятори) та координує роботу периферійних плат.

- Плата збору даних. Оснащена інтегрованими модулями аналогово-цифрового перетворення (АЦП). Вона здійснює циклічне опитування первинних аналогових датчиків та перетворює напругу або струм у цифрові коди.

- Інтерфейсна плата RS-232. Відповідає за приймання цифрових даних від конвертера струмової петлі, який обслуговує давач діаметра гранул.

- Плата дискретного введення/виведення та ЦАП. Виконує реєстрацію дискретних сигналів стану обладнання (увімкнено/вимкнено, аварія), а також за допомогою цифро-аналогових перетворювачів (ЦАП) формує безперервні або імпульсні керуючі впливи на виконавчі механізми польового рівня.

Для трансляції оброблених масивів даних на верхній рівень промисловий комп'ютер оснащений адаптером Ethernet, який підключає його до загальної промислової мережі підприємства.

3. Верхній щабель призначений для людино-машинної взаємодії (НМІ), глобальної диспетчеризації, довгострокового зберігання інформації та

системної інтеграції. Робота цього рівня організована за допомогою дубльованої локальної мережі Ethernet, що функціонує за мережевим протоколом TCP/IP. До складу апаратного комплексу верхнього рівня входять:

- Основне АРМ оператора. Автоматизоване робоче місце, де розгорнуто графічні екранні форми SCADA-системи. Через цей інтерфейс оператор здійснює візуальний моніторинг, змінює уставки та подає директивні команди на запуск або зупинку лінії.

- Резервне АРМ оператора. Функціонує в режимі «гарячого резервування». Воно безперервно дублює роботу основного робочого місця і в разі апаратного чи програмного збою головної станції миттєво перебирає на себе функції керування без втрати темпу технологічного процесу.

- Сервер бази даних. Виділена обчислювальна одиниця, що відповідає за збір, структурування та довгострокову архівацію історичних даних. Тут зберігаються тренди всіх параметрів, журнали дій персоналу та звіти.

- Центральний офіс (Сервер резервного архіву). Окремий серверний вузол, який виконує періодичне резервне копіювання баз даних для запобігання втраті інформації у випадку глобальних аварій на рівні цеху.

Застосування такої багаторівневої структури та дублювання магістральних мережеских ліній зв'язку гарантує високу живучість системи. Автономність середнього рівня дозволяє промисловому комп'ютеру Advantech продовжувати виконання алгоритмів стабілізації екструдера навіть за умови тимчасової втрати зв'язку із верхнім рівнем SCADA, що повністю нівелює ризики випуску бракованої продукції або виникнення аварійних ситуацій на виробництві гранульованих кормів.

3.2 Вибір технічних засобів автоматизації

3.2.1 Технічне забезпечення нижнього рівня

Для реалізації функцій збору первинних даних та здійснення керуючих впливів у межах технологічного комплексу використано засоби автоматизації від провідних світових виробників. Вибір конкретних моделей обладнання базується на критеріях високої метрологічної точності, стійкості до специфічних умов експлуатації (запиленість, вібрація, теплові удари) та повної апаратної сумісності з обчислювальною платформою Advantech [31, 32].

Контроль теплових та динамічних показників у зонах кондиціонування та екструзії забезпечується інтелектуальними польовими пристроями:

1. Для моніторингу стану нагрівальних елементів інтегровано смарт-перетворювачі температури. Вони здійснюють трансформацію сигналу від термометрів опору в уніфікований струмовий сигнал 4–20 мА. Відсутність локальних дисплеїв компенсується підтримкою протоколу HART, що дозволяє персоналу виконувати дистанційне калібрування та діагностику приладів без їх демонтажу, безпосередньо з автоматизованого робочого місця (АРМ).

2. Моніторинг надлишкового та диференційного тиску реалізовано за допомогою інтелектуальних сенсорів Endress+Hauser Cerabar [35]. Дані прилади адаптовані до агресивних середовищ та різких термічних перепадів, притаманних зоні екструзії. Вихідний сигнал 4–20 мА у поєднанні з протоколом HART гарантує високу точність передачі даних та зручність обслуговування. Додатково для візуального контролю в критичних точках встановлено технічні манометри Tekknow A31.

3. На виході екструдера, де важливо одночасно відстежувати кілька показників маси, застосовано мультисенсорний датчик Tekknow Vx-35. Він реєструє температуру та тиск екструдату в межах однієї точки врізки, що спрощує монтаж та мінімізує втручання в конструкцію обладнання.

4. Для обліку масової витрати зернових сумішей та добавок у трубопроводах використовуються витратоміри SolidFlow (SWR-engineering).

Пристрої стабільно функціонують в умовах високої концентрації пилу та коливань вологості, видаючи точний сигнал 4–20 мА [36].

5. Для контролю геометрії продукції на виході з фільтри встановлено прецизійний лазерний датчик діаметра Sick OD Mini [37]. Використовуючи метод лазерної тріангуляції, пристрій миттєво визначає поперечний переріз продукту. Відсутність механічного контакту з гарячою масою запобігає деформації продукції та забезпечує довговічність самого вимірювача в умовах виробничого цеху.

Керування рухомими механізмами та регулюючою арматурою розподілено за функціональним призначенням:

1. Для приводу основних шнеків, живильників, ріжучих вузлів та конвеєрних ліній застосовано перетворювачі частоти Danfoss VLT Micro Drive [38]. Дані пристрої виконують ряд критичних функцій:

- плавне регулювання швидкості обертання асинхронних двигунів;
- комплексний захист обмоток від перевантажень та коротких замикань;
- інтеграція в загальну цифрову шину через інтерфейс RS-485/Modbus RTU, що забезпечує повний контроль параметрів привода в режимі реального часу.

2. Контроль енергоспоживання та аналіз навантаження на силові агрегати здійснюється за допомогою вимірювальних трансформаторів НПСИ-ДНТВ. Наявність цифрової індикації дозволяє технічному персоналу оперативно оцінювати поточний стан електрообладнання та виявляти передвісники несправностей за непрямыми ознаками (стрибки струму чи просідання напруги).

3. Для маніпуляцій із парою та водою в системах терморегулювання використовуються електроприводи St-mini («Авангард»). Їхня архітектура дозволяє приймати аналоговий сигнал 4–20 мА безпосередньо з плат цифро-

аналогового перетворення промислового комп'ютера, що забезпечує високу швидкість відпрацювання команд та точність позиціонування запірних органів.

3.2.2 Технічне забезпечення середнього рівня

Уся апаратно-модульна база середнього рівня інтегрована в локальний комплекс, що складається з двох спеціалізованих металевих шаф збірної конструкції серії Rittal (типорозміром $800 \times 600 \times 2000$ мм). Для запобігання несанкціонованому доступу сторонніх осіб, випадковим механічним пошкодженням та впливу виробничого середовища (пилу й вологи) корпуси шаф оснащені механічними замками із суворим регламентом ключового доступу.

За функціональним призначенням і характером розміщених компонентів виділяють два конструктивні блоки:

- Шафа промислового комп'ютера (ЩК-1130.01). Виступає центральним обчислювальним та логічним ядром системи автоматизації.
- Релейна шафа (ЩР-1130.01). Призначена для силової та гальванічної комутації, а також розподілу керуючих сигналів.

Головним обчислювальним компонентом у ЩК-1130.01 є промисловий комп'ютер Advantech IPC-6908. Конструкція цього комп'ютера оптимізована для безперервної роботи в жорстких промислових умовах і має такі особливості:

- використання високошвидкісних надійних твердотільних накопичувачів (SSD), стійких до вібраційних навантажень;
- наявність інтегрованого апаратного сторожового таймера (watchdog timer), який здійснює автоматичне перезавантаження системи у випадку програмного зависання робочих циклів;
- спеціалізоване захищене шасі з пасивним крос-блейдом, що забезпечує швидку заміну та надійну фіксацію плат розширення і модулів введення/виведення.

Для забезпечення безперервної безпеки виробництва, зокрема контролю екологічних та вибухонебезпечних показників, до обчислювального комплексу підключені серійні пости аварійної сигналізації ПАСВ. Ці пристрої здійснюють безперервний газовий аналіз повітряного середовища на об'єкті й, у разі фіксації гранично допустимих концентрацій токсичних або горючих газів, миттєво генерують дискретний сигнал тривоги для активації систем аварійного захисту [40, 41].

Внутрішня архітектура комутаційних шаф має чіткий поділ за типами модулів та джерел живлення.

1. Шафа промислового комп'ютера (ЩК-1130.01) містить мікропроцесорні та інтерфейсні засоби збору й обробки даних:

- Система гарантованого електроживлення APC Smart-UPS у комбінації із дубльованими (резервованими) блоками живлення виробництва Phoenix Contact.

- Пара промислових ПК (головний та резервний) за схемою гарячого резервування, а також інтегрований одноплатний комп'ютер Advantech PCA-6770.

- Субмодулі введення/виведення аналогових і дискретних сигналів (Advantech PCL-722 [34] – плата паралельного дискретного введення/виведення сигналів; Advantech PCL-812PG [32] – багатофункціональний модуль збору даних із вбудованими аналого-цифровими перетворювачами; Advantech PCL-726 [33] – багатоканальна плата цифро-аналогового перетворення (ЦАП) для генерації керуючих сигналів; Advantech PCL-741 [31] – спеціалізована інтерфейсна плата для розширення комунікаційних портів).

- Плата мережевого інтерфейсу стандарту Ethernet для зв'язку зі SCADA-системою, світлодіодні індикатори поточного стану апаратури та кросові клемні колодки Phoenix Contact [39].

2. Релейна шафа (ЩР-1130.01) містить апаратуру для узгодження низьковольтних логічних рівнів комп'ютера із силовими ланцюгами виконавчого обладнання:

- дубльована система вторинних блоків живлення Phoenix Contact;
- комутаційні промислові реле та бар'єри іскрозахисту від Pepperl+Fuchs;
- модульні плати клем із вбудованою оптичною та гальванічною ізоляцією ліній виробництва Fastwel, що захищають керуючу електроніку від перенапруг та завад;
- сполучні клемні ряди Phoenix Contact для підключення зовнішніх кабельних зв'язків.

3.2.3 Технічне забезпечення верхнього рівня

Верхній рівень автоматизованої системи керування виконує функції людино-машинної взаємодії, довгострокового накопичення даних та інтеграції з корпоративною мережею підприємства. Він забезпечує централізований контроль технологічної лінії та стратегічне управління процесами [42, 43].

До складу комплексу входять:

- Сервер бази даних із розгорнутими СУБД (наприклад, Microsoft SQL Server), що забезпечують архівацію та швидкий доступ до історичних показників.
- Основні АРМ операторів, оснащені клієнтськими модулями SCADA Zenon (COPA-DATA), які реалізують моніторинг та керування в реальному часі [44].
- Резервне АРМ у режимі гарячого резервування з ОС Windows 10 Pro та інстальованим SCADA-клієнтом.
- АРМ інженера АСУ ТП, де використовується інженерна версія SCADA Zenon для конфігурування, модифікації алгоритмів та адміністрування екранних форм [45].

Мережева інфраструктура базується на промислових комутаторах Ethernet, локальному сервері та інтеграції з корпоративною ІТ-мережею, що забезпечує резервне копіювання даних. Для підвищення живучості

застосовуються джерела безперебійного живлення, фізична ізоляція обладнання в диспетчерській та система контролю доступу.

3.3 Функціональна схема автоматизації

Розробка функціональної схеми автоматизації (ФСА) є визначальним етапом проектування, оскільки саме цей документ акумулює в собі ключові технічні та інженерні рішення, спрямовані на забезпечення стабільного функціонування лінії з виготовлення гранульованих кормів. Об'єктом автоматизації в даному контексті виступає розгалужений комплекс основного технологічного обладнання, допоміжних вузлів, а також інтегрованих у магістралі запірних і регулювальних органів [40].

Функціональна схема є базовим технічним документом, що детермінує структуру вузлів моніторингу, контури автоматичного регулювання та ієрархію логічного управління. Вона наочно демонструє оснащеність об'єкта засобами автоматизації, включаючи системи дистанційного диспетчерського керування, аварійної сигналізації, протиаварійного захисту (ПАЗ) та технологічних блокувань. Усі графічні позначення приладів, засобів автоматизації та ліній зв'язку на схемі виконані у суворій відповідності до вимог ДСТУ 21.404-2013, що забезпечує уніфікацію проектної документації [40].

Основними концептуальними завданнями, які вирішуються за допомогою ФСА, є:

- забезпечення безперервного отримання достовірної інформації про динаміку виробничого процесу;
- реалізація керуючих впливів для прецизійної стабілізації технологічних параметрів;
- організація системної реєстрації, візуалізації та довгострокового архівування масивів даних.

Згідно з прийнятою архітектурою, функціональна схема структурована за трьома взаємопов'язаними рівнями, що забезпечує вертикальну інтеграцію даних (див. додаток В).

Система автоматизації забезпечує комплексний контроль параметрів, критично важливих для якості кінцевого продукту.

– Термічний моніторинг та терморегулювання. Спеціалізовані контури керування температурою в зонах кондиціонування та нагріву базуються на даних від перетворювачів (позиції за схемою 9-1, 13-1, 15-1) та комбінованого модуля тиску/температури Tekknow Vx-35 (поз. 11-1). Уніфіковані сигнали постійного струму (4...20 мА) транслюються на багатофункціональну плату Advantech PCL-812PG. Програмне забезпечення промислового комп'ютера, використовуючи алгоритм пропорційно-інтегрального (ПІ) регулювання, формує команди для релейних блоків, що комутують нагрівальні елементи. Окрім автоматичного режиму, передбачена можливість оперативного дистанційного втручання диспетчера через HMI-інтерфейс SCADA Zenon.

– Керування електроприводами та силовими параметрами. Енергетичні характеристики двигунів (напруга та споживаний струм) фіксуються датчиками (поз. 3-1, 6-1, 20-1) і використовуються частотними перетворювачами Danfoss VLT Micro Drive. Це дозволяє здійснювати автоматичну синхронізацію швидкості шнекових живильників та основного шнека екструдера. Вся поточна інформація паралельно передається на верхній рівень для моніторингу навантаження та архівування в базі даних SQL.

– Контроль тиску та витрати сировини. На основі даних від прецизійних датчиків Endress+Hauser Cerabar (поз. 1-1, 22-1), витратоміра SolidFlow (поз. 24-1) та термічного сенсора (поз. 17-1), центральний процесор розраховує та видає команди на електропривід клапана St-mini. У разі виходу значень тиску за встановлені регламентом межі, активується багаторівнева

система оповіщення: світлозвукова індикація на локальних щитах та аварійні аларми на моніторі оператора.

– Контроль якості та геометричних параметрів. Найбільш відповідальним вузлом є контур регулювання діаметра гранул. Лазерний датчик Sick OD Mini (поз. 6-4) за принципом тріангуляції вимірює переріз продукту після фільтри. Отриманий сигнал використовується для автоматичної корекції швидкості витяжної машини. Будь-яке значне відхилення геометричних параметрів від заданої уставки негайно ініціює формування аварійного звіту в SCADA-системі з одночасною фіксацією часу та величини похибки.

Отже, реалізована функціональна схема забезпечує цілісність технологічного циклу, гарантуючи безперервність контролю, точність регулювання та високий рівень інформаційної підтримки персоналу, що безпосередньо впливає на надійність та експлуатаційну безпеку всього виробництва.

3.4 Опис інформаційних потоків

Проектована база даних АСУ ТП містить структуру для оброблення такої інформації [43]:

а) поточні та архівні значення всіх давачів і виконавчих механізмів екструзійної лінії;

б) параметри для розрахунку похідних технологічних величин (питома механічна енергія SME, індекс желатинізації крохмалю);

в) події та відповідні їм керуючі реакції системи (аварійні зупинки, блокування, підтвердження оператора).

Для нормалізації інформації в базі даних використовуються таблиці із записами, поля яких містять такі атрибути:

а) code – унікальний ідентифікатор (TAG) джерела інформації;

б) description – текстовий опис параметра та його місцезнаходження;

					ХНТУ 174.КРБ.26.001 ПЗ	Лис
Зм	Лис	№ докум	Підпис	Дат		79

в) type – тип сигналу (AI – аналоговий вхід, DI – дискретний вхід, AO – аналоговий вихід, DO – дискретний вихід);

г) address – адреса каналу в структурі OPC-сервера;

д) event_code / alarm_code – коди події та аварійного стану;

е) sample_sec – інтервал вибірки, с;

є) raw_value – необроблене значення сигналу з АЦП;

ж) converted_value – масштабоване значення у фізичних одиницях;

з) coefficient, units, min, max – коефіцієнт перетворення, одиниця вимірювання та допустимий діапазон.

Приклад запису бази даних для каналу температури зони I екструдера наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.1 – Приклад полів запису бази даних АСУ ТП

Ім'я поля	Значення	Коментар
code	TEM_EXT_Z1	Ідентифікатор: температура зони I екструдера
description	Extruder Zone I Temp.	Температура зони I екструдера, °C
type	AI	Аналоговий вхідний сигнал
address	EXT_Z1_T_01	Адреса каналу в OPC-сервері
event_code	1	Код події – відхилення від уставки
alarm_code	3	Код аварії
sample_sec	5	Інтервал вибірки, с
raw_value	16384	Необроблене значення АЦП
converted_value	135.0	Температура, °C
alarm_state	no	Аварійний стан відсутній
coefficient	0.00824	Коефіцієнт масштабування

units	°C	Одиниця вимірювання
min	0	Мінімальне значення діапазону
max	200	Максимальне значення діапазону

Параметри, що передаються в локальну обчислювальну мережу у форматі OPC DA через SCADA-систему Zenon, охоплюють такі технологічні величини:

- а) температура в зонах I, II, III екструдера та у формуючій головці, °C;
- б) тиск екструдату перед матрицею, МПа;
- в) тиск пари на вході й виході кондиціонера, МПа;
- г) витрата сипкої суміші на вході в кондиціонер (давач SolidFlow), кг/год;
- д) діаметр гранул після фільтри (давач Sick OD Mini), мм;
- е) частота обертання двигунів шнека, ножового вузла та живильника, об/хв;
- є) ступінь відкриття клапанів подачі пари та охолодної води, %;
- ж) споживані струм і напруга кожного електродвигуна технологічної лінії.

Кожен контрольований або керований параметр має унікальний текстовий ідентифікатор (TAG). Структура TAG-коду має вигляд: AAA_BBB_CCCC_DDDDD, де:

- а) AAA – тип параметра (3 символи);
- б) BBB – ідентифікатор технологічного вузла або апарата (3 символи);
- в) CCCC – уточнення (до 4 символів);
- г) DDDDD – суфікс аварійного рівня (до 5 символів);

Символ підкреслення у складі TAG-коду слугує роздільником між складовими частинами ідентифікатора та не несе самостійного змістового навантаження. Повний перелік кодування сигналів у SCADA-системі Zenon наведено в додатку В.

На верхньому рівні база даних АСУ ТП обслуговується підсистемою Zenon Historian. Інформація структурується наборами екранних форм АРМ: на моніторі оператора відображаються оперативні значення параметрів, стани виконавчих механізмів та активні аварійні повідомлення; на АРМ диспетчера формуються звіти у форматі XML за такими розкладами:

- а) двогодинний звіт – автоматично кожні дві години;
- б) добовий звіт – автоматично о 00:00 кожної доби;
- в) місячний звіт – автоматично в останній день місяця;
- г) оперативний звіт – на вимогу оператора в будь-який момент часу.

Звіти формуються за заздалегідь визначеними шаблонами, що містять зведення поточного стану обладнання та таблиці поточних і архівних вимірів. Доступ до інформації, що зберігається в базі даних, реалізується через операції вибірки, проекції та сортування. Для типових запитів (аварійні події, журнал дій оператора, протоколи технічного обслуговування) у Zenon попередньо налаштовано набір стандартних запитів-протоколів, що дозволяють оперативно отримувати необхідні вибірки без додаткового налаштування.

3.5 Розробка схеми зовнішніх проводок

На основі схеми зовнішніх проводок (додаток Г) та специфікації первинних засобів вимірювальної техніки (табл. 3.2) виконано проектування кабельних зв'язків нижнього рівня АСУ ТП [40].

Таблиця 3.2 – Специфікація первинних вимірювальних засобів

№ позиції	Тип засобу вимірювання / найменування	Кількість	Тип сигналу
9-1, 13-1, 15-1, 17-1	Перетворювач температури (термоперетворювач опору ТСПУ)	4	4–20 мА

11-1	Tekknow Vx-35 – суміщений давач тиску й температури	1	4–20 мА
24-1	SolidFlow – витратомір сипких матеріалів	1	4–20 мА
1-1, 22-1	Endress+Hauser Cerabar – перетворювач надлишкового тиску та перепаду тиску	2	4–20 мА / HART
3-1, 6-1, 20-1	Перетворювач вимірювальний напруги	3	0–10 В (дискретний)
6-4	Sick OD Mini – лазерний давач діаметра	1	4–20 мА
–	Прилади місцевої індикації	4	–

Організація кабельного господарства забезпечує стабільну передачу сигналів від периферійних пристроїв до промислового комп'ютера в умовах вібраційних і термічних навантажень.

1. Інформаційні лінії (4–20 мА). Для більшості датчиків застосовано екранований кабель КВВГенг-LS, що мінімізує вплив електромагнітних завад. Ним підключаються термометричні канали (поз. 9-1, 13-1, 15-1, 17-1), комбінований датчик Tekknow Vx-35 (поз. 11-1), перетворювачі тиску Endress+Hauser Cerabar та витратомір SolidFlow (поз. 1-1, 22-1, 24-1), а також лазерний давач Sick OD Mini (поз. 6-4).

2. Лінії вимірювання електричних параметрів (0–10 В). Перетворювачі напруги й струму НПСИ-ДНТВ (поз. 3-1, 6-1, 20-1) підключаються кабелем КВВГенг-LS до плати збору даних Advantech PCL-812PG. Для зменшення падіння напруги використовується переріз жили не менше 1,5 мм².

3. Керуючі та силові ланцюги. Електроприводи клапанів St-mini комутуються кабелем КПВГ, стійким до вібрацій і високих температур. Лінії живлення ТЕНів виконуються силовими провідниками відповідного перерізу.

Зм	Лис	№ докум	Підпис	Дат

ХНТУ 174.КРБ.26.001 ПЗ

Лис

83

Усі кабелі прокладаються у металевих лотках і захисних трубах, сигнальні лінії розділяються з силовими на відстані не менше 0,5 м. Зв'язок між шафами реалізовано через системні шлейфи з гальванічною ізоляцією.

3.6 Програмне забезпечення автоматизованої системи керування

3.6.1 Архітектурні принципи та інформаційна безпека програмного комплексу

Для побудови ефективної системи диспетчерського керування та збору даних (SCADA) інтегровано програмний комплекс Zenon, розроблений австрійською компанією COPA-DATA [45]. Обране програмне забезпечення є високотехнологічним промисловим рішенням, що повністю відповідає чинним міжнародним стандартам у сфері промислової автоматизації. Застосування цієї платформи дозволяє досягти повної технологічної незалежності від програмних продуктів тих виробників, щодо яких на загальнодержавному рівні впроваджено обмежувальні заходи (санкції).

Базовим системним оточенням для розгортання верхнього рівня автоматизації визначено операційну систему Windows 10 Pro. Комплексна інформаційна безпека та захист від зовнішніх кіберзагроз реалізуються синергетичним поєднанням штатних інструментів безпеки ОС Windows та внутрішніх вбудованих механізмів контролю, автентифікації та розмежування прав доступу, що є невіддільною частиною SCADA-системи Zenon.

Організація програмного забезпечення автоматизованої системи базується на концептуальній моделі взаємодії відкритих систем (OSE/RM), загальну структуру якої наведено на рисунку 3.2.

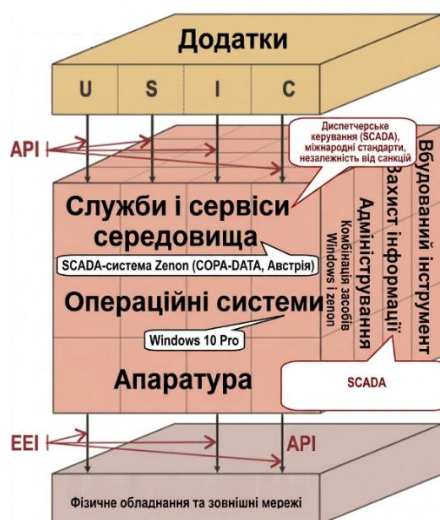


Рисунок 3.2 – Концептуальна OSE/RM модель ПЗ АС

Відповідно до цієї моделі, архітектура ПЗ розділена на два ключові блоки:

- функціональні прикладні додатки, які безпосередньо реалізують алгоритми автоматизованого керування;
- уніфіковане середовище взаємодії, що відповідає за передпускову підготовку, конфігурування та безпосередній запуск цих додатків.

Стабільний обмін даними між прикладними програмами та середовищем взаємодії забезпечується за допомогою стандартизованих інтерфейсів прикладного програмування (API).

Сучасні SCADA-системи, функціонують саме за принципом «клієнт-сервер», використовуючи для міжрівневого обміну даними загальноприйняті стандарти OPC. Фундаментальний принцип технології OPC полягає в забезпеченні відкритих комунікаційних зв'язків за допомогою уніфікованих протоколів. Сама технологія є детермінованим набором специфікацій, де кожен окремий стандарт регламентує чітко визначений комплекс функцій для вирішення конкретних інженерних завдань. Структурну організацію OPC-сервера деталізовано на рисунку 3.3 [42].

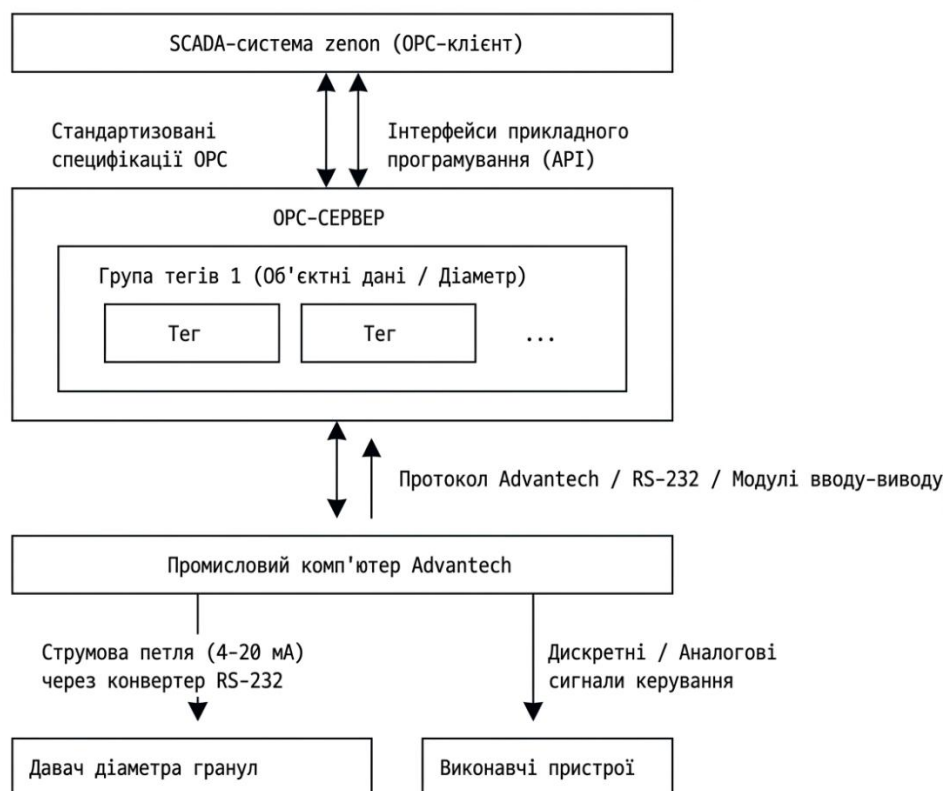


Рисунок 3.3 – Структура OPC-сервера

Інформаційне сполучення між промисловим обчислювальним комплексом Advantech та SCADA-системою Zenon організовано за допомогою програмного OPC-сервера. Периферійні компоненти системи, які представлені первинними вимірювальними датчиками та виконавчими механізмами, комутуються з промисловим комп'ютером за допомогою ліній передачі аналогових та дискретних сигналів відповідно.

Окрему увагу приділено каналу отримання даних від датчика контролю діаметра готових гранул. Оскільки цей пристрій використовує аналоговий струмовий інтерфейс, його інтеграція до загальної структури промислового комп'ютера реалізована через спеціалізований апаратний конвертер сигналів «струмова петля / RS-232» виробництва компанії Advantech. Це забезпечує точність передачі вимірювальних величин без втрати якості сигналу на лінії.

Для мінімізації ризиків несанкціонованого втручання в перебіг технологічного процесу в проєкті передбачено багаторівневу систему захисту:

– Фізичний захист. Усе ключове обладнання АСУ ТП, включаючи серверні шафи та обчислювальні блоки, розміщується у виробничих приміщеннях із суворо обмеженим режимом доступу. Проектовані щити автоматизації додатково оснащуються надійними механічними запірними пристроями (замками), що виключає випадковий або навмисний фізичний доступ сторонніх осіб до комутаційної та мікропроцесорної апаратури.

– Програмний захист. Доступ до інструментів керування, візуалізації та зміни налаштувань у SCADA-системі суворо обмежений індивідуальними паролями. Рівень доступу кожного працівника чітко диференційований та відповідає його посадовим обов'язкам і затвердженому обсягу повноважень.

3.6.2 Алгоритм збору даних вимірювань технологічного процесу виробництва гранульованих кормів

У даній кваліфікаційній роботі розроблено алгоритм збору даних вимірювань. Як канал вимірювання обрано давач температури зони екструзії. Для даного каналу вимірювання розроблено алгоритм збору даних. Алгоритм представлено додатку Д.

Алгоритм збору даних вимірювань у каналі температури зони екструзії має чітко визначену послідовність дій, спрямовану на забезпечення достовірності та оперативності контролю. На початковому етапі здійснюється ініціалізація системи та зчитування показників із давача температури. Далі відбувається перевірка коректності сигналу аналого-цифрового перетворювача, що гарантує надійність подальшої обробки. Наступним кроком є масштабування отриманих значень, яке дозволяє привести їх до фізично інтерпретованих одиниць вимірювання.

Алгоритм передбачає аналіз динаміки температури з метою виявлення змін та визначення її відповідності встановленим нормам. У випадку відхилення від допустимого діапазону формується попереджувальний сигнал: окремо для ситуацій зниження температури нижче норми та її перевищення. Це

забезпечує можливість оперативного реагування на потенційно небезпечні режими роботи. Завершальним етапом є виведення даних на дисплей, що дозволяє оператору отримувати актуальну інформацію про стан процесу в реальному часі.

Алгоритм має циклічну структуру, яка забезпечує безперервний моніторинг параметрів та своєчасне інформування про відхилення. Його реалізація сприяє підвищенню точності вимірювань та надійності функціонування автоматизованої системи керування екструзійним процесом.

3.6.3 Екранні форми автоматизованої системи

Дерево екранних форм наведено на рис. 3.4. Доступ до інтерактивного середовища керування надається виключно після проходження користувачем процедури автентифікації. За умови успішного підтвердження облікових даних відкривається екранна форма «Головне меню», яка виступає центральним комутаційним вузлом для навігації проєктом.

Шляхом взаємодії з відповідними елементами керування (кнопками) забезпечується перехід до спеціалізованих вікон: інформаційного блоку, панелі налаштувань, системи сповіщень про тривоги, загальної технологічної схеми, вікна ключових показників ефективності, графічного аналізу (трендів) та системного журналу. Крім того, інтерфейс містить форми для перегляду циклограм, моніторингу стану приводів, запірних механізмів, нагрівальних елементів, а також інтерактивне вікно зворотного зв'язку [44].

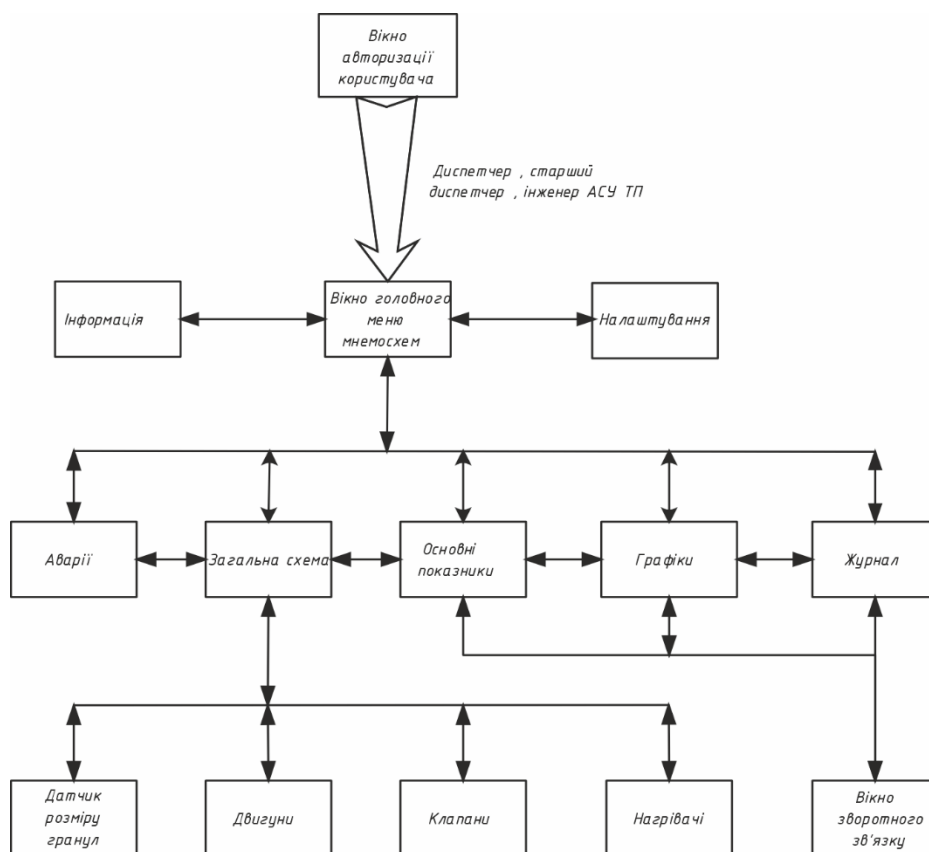


Рисунок 3.4 – Дерево екранних форм

Безпечна та регламентована експлуатація комплексу забезпечується поділом персоналу на три ієрархічні категорії:

1. Оператор володіє повним набором функцій для поточного ведення технологічного процесу та має дозвіл на перегляд усіх наявних графічних форм.
2. Старший оператор наділений повноваженнями оператора, проте додатково має ексклюзивний доступ до довгострокових архівів історичних даних.
3. Інженер АСУ ТП виконує виключно спостережні функції без можливості прямого втручання в алгоритми керування обладнанням. Водночас він може здійснювати сервісне налагодження та конфігурування екранних форм за умови отримання тимчасової авторизації від старшого оператора.

На базовій мнемосхемі комплексу (див. рис. 3.4) зосереджено ключову інформацію про фізичні параметри виробництва.

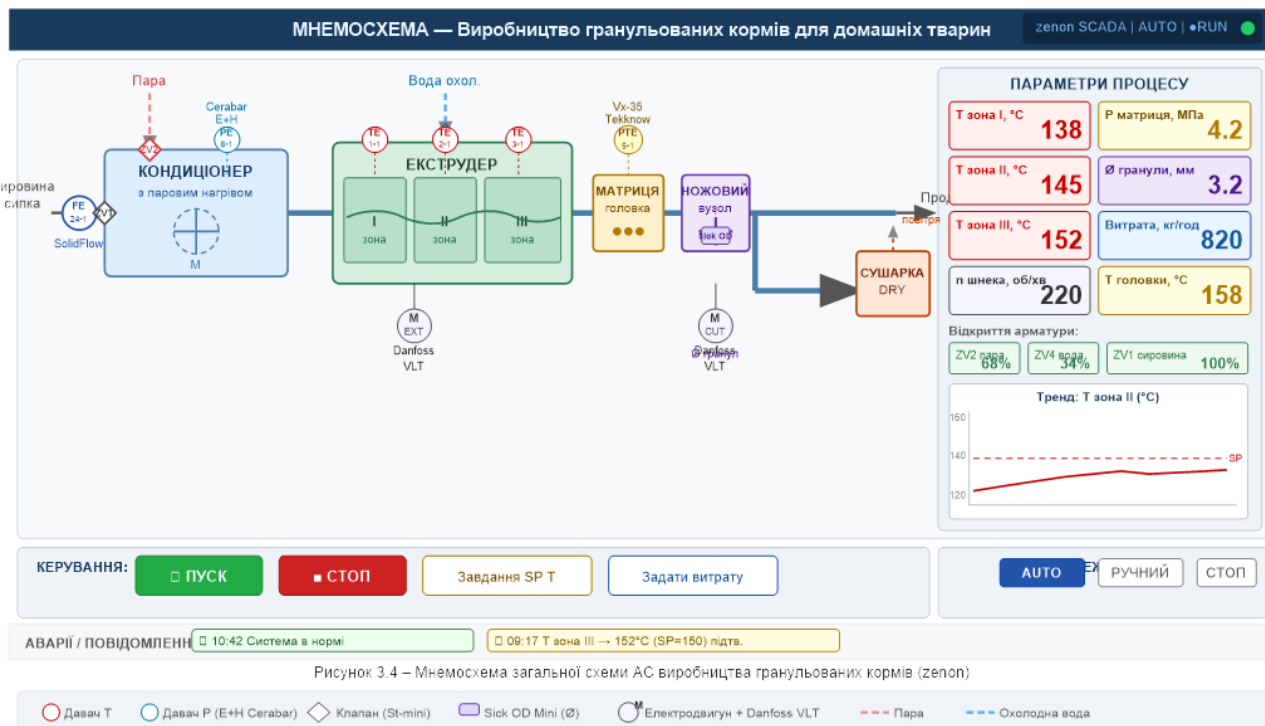


Рисунок 3.5 – Базова мнемосхема комплексу

Диспетчер отримує актуальні дані з первинних перетворювачів витрати середовища, температурних режимів, тиску в системі, а також електричних характеристик (напруги та споживаного струму). Для візуальної оцінки стану виконавчих механізмів на схемі відображається відсотковий ступінь відкриття запірної арматури, що дає змогу оперативно діагностувати стан обладнання.

З метою оперативного аналізу динаміки змін, безпосередньо на загальну форму виведено графічне вікно, де користувач може самостійно обрати та відстежувати будь-який вимірюваний параметр у часі. На цій же панелі зосереджені органи безпосереднього керування для активації або повної зупинки ліній виготовлення гранульованих кормів. Таким чином, робоче місце забезпечує цілісне сприйняття стану промислового об'єкта та надає всі необхідні інструменти для стабілізації параметрів у межах регламентних норм.

3.7 Висновки до розділу 3

У розділі було здійснено комплексне проектування програмно-технічного комплексу та інформаційного забезпечення автоматизованої системи керування екструзійною установкою для виробництва гранульованих кормів. Основна увага приділялася вибору сучасного програмного забезпечення, формуванню багаторівневої архітектури, визначенню складу апаратних засобів та забезпеченню надійності й безпеки функціонування системи.

Для диспетчерського управління та збору даних обрано SCADA-систему Zenon компанії COPA-DATA. Архітектура системи побудована за класичною трирівневою моделлю: нижній рівень забезпечує збір первинної інформації та виконання керуючих дій, середній рівень реалізує аналого-цифрове перетворення й логічне керування на базі промислового комп'ютера Advantech IPC-6908, а верхній рівень відповідає за інтерфейс оператора, архівацію даних та координацію через дубльовану мережу Ethernet.

Розроблений комплекс забезпечує точність підтримання технологічних параметрів, високу відмовостійкість та комплексний

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі вирішено актуальне завдання підвищення ефективності та стабільності процесу виробництва гранульованих кормів шляхом створення трирівневої автоматизованої системи керування екструзійною лінією. На основі системного аналізу та математичного моделювання обґрунтовано склад об'єкта автоматизації, визначено критичні параметри процесу та їхній вплив на якість продукції. Побудовано диференціальну модель шнекового циліндра екструдера, ідентифіковано її параметри та визначено основний канал регулювання, що забезпечує стабілізацію температури екструдату.

Синтез алгоритмів керування здійснено із застосуванням методу CHR, що дозволило отримати оптимальні налаштування ПД-регулятора. Моделювання підтвердило здатність системи підтримувати температуру з точністю ± 2 °C при уставці 160 °C, а також реалізувати каскадне регулювання вологості та захист від перевищення тиску й температури.

Розроблено функціональну схему та визначено склад технічних засобів: прецизійні датчики температури й тиску, комбіновані сенсори, витратоміри та лазерний комплекс для контролю геометрії гранул. Середній рівень реалізовано на базі промислового комп'ютера Advantech, а верхній рівень – у середовищі Windows 10 Pro з використанням SCADA-системи Zenon, що забезпечує архівацію даних, формування звітів та захист інформації.

Практичне значення роботи полягає у створенні інтегрованого рішення, яке гарантує стабільну якість продукції, зниження витрат сировини та енергії, мінімізацію впливу людського фактора й повну простежуваність виробничих партій. Результати мають високий потенціал для впровадження на підприємствах харчової та кормовиробничої промисловості України.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Nielsen B. L. Sustainable raw materials and processing technologies in modern pet food production / B. L. Nielsen, K. M. Andersen, H. S. Jensen // *Animals*. – 2025. – Vol. 15, iss. 1. – P. 42–56. – DOI: <https://doi.org/10.3390/ani15010042>.
2. Alltech Global Feed Survey 2024 [Електронний ресурс] / Alltech Inc. – Electronic data. – Nicholasville : Alltech, 2024. – Режим доступу: <https://www.alltech.com/feed-survey> (дата звернення: 01.06.2026).
3. Rokey G. J. Pet food and fish feed extrusion / G. J. Rokey // *The Technology of Extrusion Cooking* / ed. by N. D. Frame. – Boston : Springer, 1994. – P. 144–189. – DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4615-2135-8_6.
4. Ilo S. The effect of extrusion operating conditions on the starch composition of extruded corn starch / S. Ilo, E. Berghofer // *Journal of Food Engineering*. – 1999. – Vol. 39, no. 2. – P. 169–182.
5. Baller J. L. Effects of thermal energy on extrusion characteristics, digestibility and palatability of a dry pet food for cats / J. L. Baller, N. M. Jeffrey, C. G. Aldrich et al. // *Journal of Animal Science*. – 2021. – Vol. 99, iss. 11. – Art. skab302. – DOI: <https://doi.org/10.1093/jas/skab302>.
6. Monti M. The effects of fiber source on extrusion processing parameters and kibble characteristics of dry cat foods / M. Monti, D. E. Do, K. S. Swanson et al. // *Journal of Animal Science*. – 2016. – Vol. 94, iss. 11. – P. 4634–4645. – DOI: <https://doi.org/10.2527/jas.2016-0683>.
7. Baller J. L. Processing traits and digestibility of extruded dog foods with soy protein concentrate / J. L. Baller, C. G. Aldrich, J. M. Benz et al. // *Journal of Animal Science*. – 2018. – Vol. 96, suppl. 3. – P. 231–232. – DOI: <https://doi.org/10.1093/jas/sky404.507>.
8. Aldrich C. G. Extrusion of pet food / C. G. Aldrich // *Extrusion Processing Technology: Food and Non-Food Biomaterials* / ed. by J.-M. Bouvier, O. H. Campanella. – Oxford : Wiley-Blackwell, 2014. – P. 419–450.

9. Riaz M. N. Extruders in Food Applications / M. N. Riaz. – Boca Raton : CRC Press, 2000. – 212 p. – ISBN 1-56676-779-3.
10. Huber G. R. Snack Food Technology / G. R. Huber // Snack Food Technology / ed. by S. A. Matz. – 3rd ed. – New York : Van Nostrand Reinhold, 1993. – P. 23–67.
11. Gamble H. R. Thermal inactivation of *Trichinella spiralis* in ground pork using microwave energy / H. R. Gamble // Journal of Food Science. – 1983. – Vol. 48, no. 3. – P. 670–672.
12. Rossen J. L. Food extrusion / J. L. Rossen, R. C. Miller // Food Technology. – 1973. – Vol. 27, no. 8. – P. 46–53.
13. Díaz-Galindo E. P. Influence of extrusion conditions on physicochemical and functional properties of corn extrudates / E. P. Díaz-Galindo, M. A. Valdez-Morales, G. Davila-Ortiz et al. // Food and Bioprocess Technology. – 2020. – Vol. 13, no. 5. – P. 822–834.
14. Chessari C. J. Control of a food extrusion process / C. J. Chessari, R. P. Sellaheewa // Computers and Electronics in Agriculture. – 1997. – Vol. 18, no. 1. – P. 11–27.
15. Mackey A. C. Statistical process control applied to an extrusion process / A. C. Mackey, C. E. Walker // Cereal Foods World. – 1991. – Vol. 36, no. 10. – P. 859–863.
16. Ладанюк А. П. Автоматизація технологічних процесів і виробництв харчової промисловості / А. П. Ладанюк, В. Г. Трегуб, І. В. Ельперін. – Київ : Аграрна освіта, 2001. – 224 с.
17. Пупена О. М. Промислові мережі та інтеграційні технології в автоматизованих системах : навч. посіб. / О. М. Пупена, І. В. Ельперін, Н. М. Луцька, А. П. Ладанюк. – К. : Ліра-К, 2011. – 552 с.
18. Системи управління якістю. Вимоги (ISO 9001:2015, IDT) : ДСТУ ISO 9001:2015. – Чинний від 2016-07-01. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. – 33 с.

19. Діордієв В. Т. Синтез і аналіз узагальненої структури малогабаритної комбікормової установки / В. Т. Діордієв // Праці Таврійської державної агротехнічної академії. – 2001. – Вип. 1, т. 18. – С. 14–19.

20. Ладанюк А. П. Методи сучасної теорії управління : підручник / А. П. Ладанюк, Н. М. Луцька, В. Д. Кишенько, Л. О. Власенко, В. В. Іващук. – Київ : Ліра-К, 2019. – 368 с.

21. Луцька Н. М. Оптимальні та робастні системи керування технологічними об'єктами : монографія / Н. М. Луцька, А. П. Ладанюк. – К. : Ліра-К, 2015. – 288 с.

22. Ладанюк А. П. Сучасні технології конструювання систем автоматизації складних об'єктів : монографія / А. П. Ладанюк, Н. А. Заєць, Л. О. Власенко. – К. : Ліра-К, 2016. – 312 с.

23. Harmann A. Heat and mass transfer in a single-screw extruder / A. Harmann, C. Linß // Journal of Food Engineering. – 2006. – Vol. 76, no. 1. – P. 35–47.

24. Tadmor Z. Principles of Polymer Processing / Z. Tadmor, C. G. Gogos. – 2nd ed. – Hoboken : Wiley-Interscience, 2006. – 984 p. – ISBN 978-0-471-38770-1.

25. Гільчук А. В. Теорія теплопровідності / А. В. Гільчук, А. А. Халатов. – Київ, 2017. – 86 с.

26. Трегуб В. Г. Проектування, монтаж та експлуатація систем автоматизації : навч. посіб. / В. Г. Трегуб. – К. : НМК ВО, 1990. – 80 с.

27. Гончаренко Б. М. Автоматизація виробничих процесів : навч. посіб. / Б. М. Гончаренко, С. І. Осадчий, Л. Г. Віхрова [та ін.]. – Кіровоград : Лисенко В. Ф., 2016. – 352 с.

28. Ельперін І. В. Промислові контролери : навч. посіб. / І. В. Ельперін. – К. : НУХТ, 2003. – 320 с.

29. Прокопенко Т. О. Інформаційні технології управління організаційно-технологічними системами : монографія / Т. О. Прокопенко, А. П. Ладанюк. – Черкаси : Вертикаль, 2015. – 224 с.

30. Advantech IPC-6908: 4U 8-slot Desktop/Wallmount Chassis with Front I/O and Safety Features. Datasheet [Електронний ресурс] / Advantech Co., Ltd. – Electronic data. – Taipei : Advantech, 2023. – Режим доступу: <https://www.advantech.com/en/products/ipc-6908> (дата звернення: 01.06.2026).

31. Advantech PCA-6770: Slot PC ISA Half-size Single Board Computer. User Manual [Електронний ресурс] / Advantech Co., Ltd. – Electronic data. – Taipei : Advantech, 2018. – Режим доступу: <https://support.advantech.com/Support/DownloadCenter.aspx?type=Manual&keyword=PCA-6770> (дата звернення: 01.06.2026).

32. Advantech PCL-812PG: Multi-Function Data Acquisition Card. User Manual [Електронний ресурс] / Advantech Co., Ltd. – Electronic data. – Taipei : Advantech, 2020. – Режим доступу: <https://support.advantech.com/Support/DownloadCenter.aspx?type=Manual&keyword=PCL-812PG> (дата звернення: 01.06.2026).

33. Advantech PCL-726: 6-channel D/A Output Card with 12-bit Resolution. Datasheet [Електронний ресурс] / Advantech Co., Ltd. – Electronic data. – Taipei : Advantech, 2019. – Режим доступу: <https://support.advantech.com/Support/DownloadCenter.aspx?type=Datasheet&keyword=PCL-726> (дата звернення: 01.06.2026).

34. Advantech PCL-722: 144-channel Digital I/O Card. User Manual [Електронний ресурс] / Advantech Co., Ltd. – Electronic data. – Taipei : Advantech, 2017. – Режим доступу: <https://support.advantech.com/Support/DownloadCenter.aspx?type=Manual&keyword=PCL-722> (дата звернення: 01.06.2026).

35. Cerabar PMP51B: Process pressure transmitter with metal membrane. Technical Information [Електронний ресурс] / Endress+Hauser Group Services AG.

– Electronic data. – Reinach : Endress+Hauser, 2025. – Режим доступу: <https://www.endress.com/en/field-instruments-overview/pressure-measurement/Cerabar-PMP51B> (дата звернення: 01.06.2026).

36. SolidFlow 2.0: Microwave sensor for mass flow measurement of solids. Technical Documentation [Електронний ресурс] / SWR engineering Messtechnik GmbH. – Electronic data. – Schliengen : SWR engineering, 2024. – Режим доступу: <https://www.swr-engineering.com/en/products/product/solidflow-20.html> (дата звернення: 01.06.2026).

37. OD Mini (OD1-B): Short range distance sensors (laser triangulation). Operating Instructions [Електронний ресурс] / SICK AG. – Electronic data. – Waldkirch : SICK, 2024. – Режим доступу: <https://www.sick.com/de/en/distance-sensors/od-mini/c/g201655> (дата звернення: 01.06.2026).

38. Danfoss VLT Micro Drive FC 51: Compact general-purpose drive. Design Guide [Електронний ресурс] / Danfoss A/S. – Electronic data. – Nordborg : Danfoss Drives, 2024. – Режим доступу: <https://www.danfoss.com/en/products/dds/vlt-micro-drive-fc-51/> (дата звернення: 01.06.2026).

39. Phoenix Contact Quint Power: Power supply unit with SFB technology. Product Page & Documentation [Електронний ресурс] / Phoenix Contact GmbH & Co. KG. – Electronic data. – Blomberg : Phoenix Contact, 2025. – Режим доступу: <https://www.phoenixcontact.com/en-pc/products/power-supplies/quint-power> (дата звернення: 01.06.2026).

40. ДСТУ 21.404-2013. Система проектної документації для будівництва. Автоматизація технологічних процесів. Позначення умовні приладів і засобів автоматизації в схемах. – Чинний від 2014-01-01. – Київ : Мінрегіон України, 2013. – 14 с.

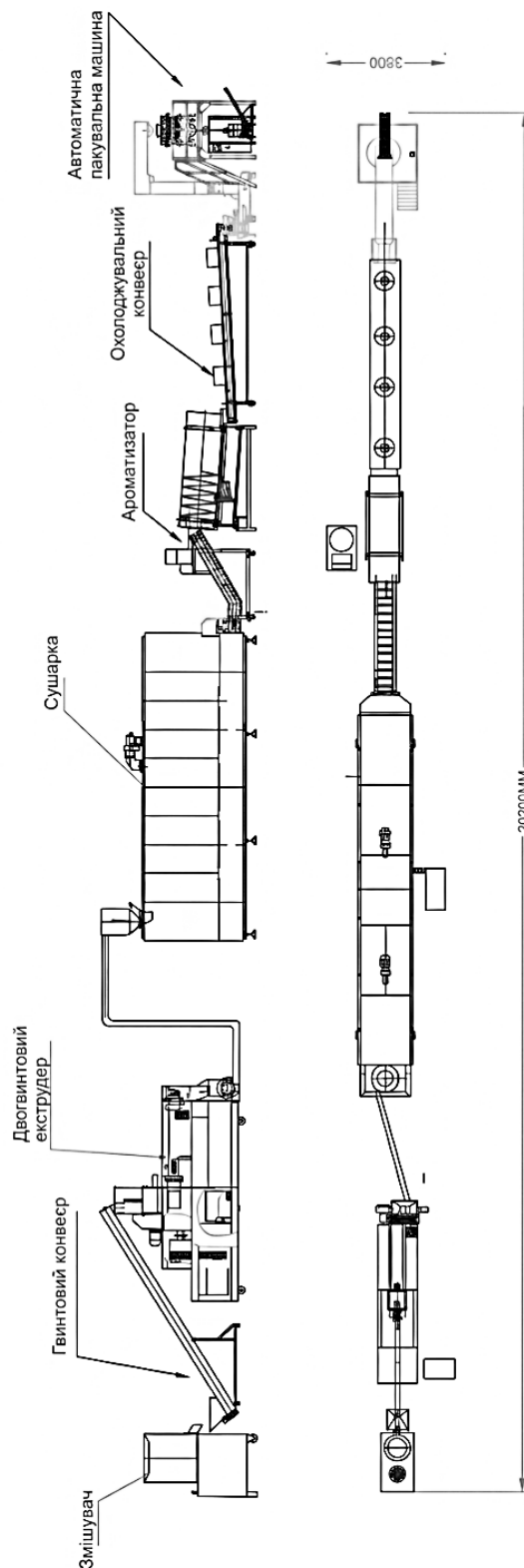
41. Трегуб В. Г. Автоматизація об'єктів періодичної дії : підручник / В. Г. Трегуб. – Київ : Ліра-К, 2017. – 136 с.

					ХНТУ 174.КРБ.26.001 ПЗ	Лис
Зм	Лис	№ докум	Підпис	Дат		97

42. Mahnke R. K. OPC Unified Architecture / R. K. Mahnke, J. Leitner, T. Terzic. – Berlin : Springer, 2009. – 336 p. – DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-540-68899-0>.
43. Сучасні методи автоматизації технологічних об'єктів : монографія / А. П. Ладанюк [та ін.]. – К. : Інтер Логістик Україна, 2015. – 408 с.
44. zenon Software Platform for Industrial Automation [Електронний ресурс] / COPA-DATA GmbH. – Electronic data. – Salzburg : COPA-DATA GmbH, 2026. – Режим доступу: <https://www.copadata.com/en/products/zenon-software-platform/> (дата звернення: 01.06.2026).
45. Obermaisser R. COPA-DATA zenon in industrial automation: a software platform perspective / R. Obermaisser // IFAC-PapersOnLine. – 2022. – Vol. 55, iss. 4. – P. 139–144. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.06.024>.

ДОДАТОК А

ЗАГАЛЬНА СХЕМА ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ЛІНІЇ ВИРОБНИЦТВА ГРАНУЛЬОВАНИХ КОРМІВ ДЛЯ ДОМАШНІХ ТВАРИН



Зм	Лис	№ докум	Підпис	Дат

ХНТУ 174.КРБ.26.001 ПЗ

Лис

99

The diagram illustrates the control system for a gas turbine engine. It shows the engine's mechanical components and the associated electrical control system. The control system is organized into three main functional areas: 'Питання за місцем' (Questions on site), 'Операторський цуп' (Operator's console), and 'SCADA'. The diagram includes various sensors (TE, PT, PE, TI, PI, etc.) and actuators (M, V, etc.) connected to the control system. The control system is also connected to a 'Моніторинг' (Monitoring) section and a 'Керування' (Control) section. The diagram is labeled with various numbers and letters, indicating different components and connections.

ДОДАТОК В

КОДУВАННЯ ОСНОВНИХ СИГНАЛІВ В SCADA-СИСТЕМІ

Кодування (TAG)	Розшифрування кодування
Параметри тиску (DAV)	
DAV_KON_INP	Тиск пари на вході кондиціонера
DAV_KON_OUT	Тиск пари на виході кондиціонера
DAV_KON_INP_ALMH	Верхня аварійна межа тиску пари на вході кондиціонера
DAV_KON_INP_ALML	Нижня аварійна межа тиску пари на вході кондиціонера
DAV_KON_OUT_ALMH	Верхня аварійна межа тиску пари на виході кондиціонера
DAV_KON_OUT_ALML	Нижня аварійна межа тиску пари на виході кондиціонера
DAV_CAP_STAT	Тиск екструдату перед матрицею (формуючою головкою)
DAV_CAP_ALMH	Верхня аварійна межа тиску перед матрицею
DAV_CAP_ALML	Нижня аварійна межа тиску перед матрицею
Параметри температури (TEM)	
TEM_EXT_Z1_STAT	Температура зони I екструдера
TEM_EXT_Z1_CHNG	Команда вмикання/вимикання нагрівача зони I
TEM_EXT_Z1_ALMH	Верхня аварійна межа температури зони I
TEM_EXT_Z1_ALML	Нижня аварійна межа температури зони I
TEM_EXT_Z2_STAT	Температура зони II екструдера
TEM_EXT_Z2_CHNG	Команда вмикання/вимикання нагрівача зони II
TEM_EXT_Z2_ALMH	Верхня аварійна межа температури зони II
TEM_EXT_Z2_ALML	Нижня аварійна межа температури зони II
TEM_EXT_Z3_STAT	Температура зони III екструдера
TEM_EXT_Z3_CHNG	Команда вмикання/вимикання нагрівача зони III
TEM_EXT_Z3_ALMH	Верхня аварійна межа температури зони III
TEM_EXT_Z3_ALML	Нижня аварійна межа температури зони III
TEM_CAP_STAT	Температура екструдату у формуючій головці
TEM_CAP_CHNG	Команда вмикання/вимикання нагрівача головки
TEM_CAP_ALMH	Верхня аварійна межа температури формуючої головки
TEM_CAP_ALML	Нижня аварійна межа температури формуючої головки

Кодування (TAG)	Розшифрування кодування
TEM_KON_STAT	Температура маси на виході кондиціонера
TEM_KON_ALMH	Верхня аварійна межа температури на виході кондиціонера
TEM_DRY_INP_STAT	Температура теплоносія на вході сушарки
TEM_DRY_OUT_STAT	Температура продукту на виході сушарки
TEM_DRY_OUT_ALMH	Верхня аварійна межа температури продукту на виході сушарки
Параметри витрати (RAS)	
RAS_KON_INP_STAT	Витрата сипкої суміші на вході кондиціонера
RAS_KON_INP_ALMH	Верхня аварійна межа витрати сипкої суміші
RAS_KON_INP_ALML	Нижня аварійна межа витрати сипкої суміші
RAS_KON_PAR_STAT	Витрата пари до кондиціонера
Геометричні параметри гранул (DMR)	
DMR_CAP_STAT	Поточне значення діаметра гранул після матриці (Sick OD Mini)
DMR_CAP_ALMH	Верхня аварійна межа відхилення діаметра гранул
DMR_CAP_ALML	Нижня аварійна межа відхилення діаметра гранул
Швидкість обертання приводів (SPD)	
SPD_EXT_STAT	Частота обертання шнека екструдера
SPD_EXT_CHNG	Команда зміни частоти обертання шнека (Danfoss VLT)
SPD_EXT_ALMH	Верхня аварійна межа швидкості шнека
SPD_KON_STAT	Частота обертання приводу кондиціонера
SPD_KON_CHNG	Команда зміни частоти приводу кондиціонера
SPD_CUT_STAT	Частота обертання ножового механізму
SPD_CUT_CHNG	Команда зміни частоти ножового механізму
SPD_FED_STAT	Частота обертання шнека живильника-дозатора
SPD_FED_CHNG	Команда зміни частоти шнека живильника-дозатора
Стан і керування засувками та клапанами (SST)	
SST_ZV1_STAT	Стан засувки подачі сипкої суміші до кондиціонера (ZV1)
SST_ZV1_INP_CHNG	Команда відкриття/закриття засувки ZV1
SST_ZV2_STAT	Стан засувки подачі пари до кондиціонера (ZV2)
SST_ZV2_PAR_CHNG	Команда відкриття/закриття засувки пари ZV2
SST_ZV3_STAT	Стан засувки відведення конденсату кондиціонера (ZV3)
SST_ZV3_PAR_CHNG	Команда відкриття/закриття засувки ZV3

Зм	Лис	№ докум	Підпис	Дат

ХНТУ 174.КРБ.26.001 ПЗ

Лис

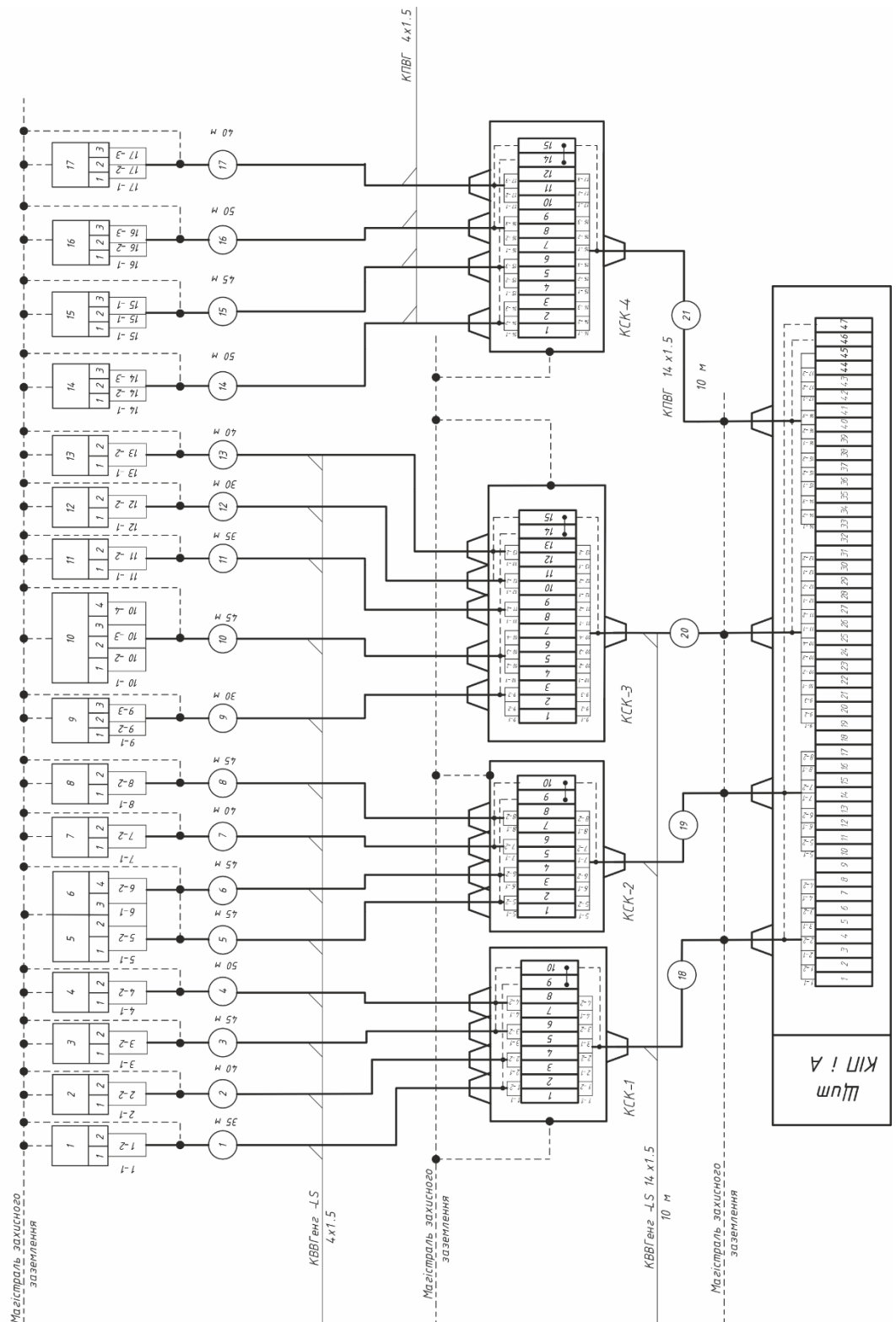
102

Кодування (TAG)	Розшифрування кодування
SST_ZV4_STAT	Стан засувки подачі охолодної води до корпусу екструдера (ZV4)
SST_ZV4_COOL_CHNG	Команда відкриття/закриття засувки охолодження ZV4
SST_ZV5_STAT	Стан засувки подачі пари до зони кондиціонування (ZV5)
SST_ZV5_PAR_CHNG	Команда відкриття/закриття засувки ZV5
Електричні параметри приводів (EL)	
EL_EXT_CUR_STAT	Струм споживання двигуна шнека екструдера, А
EL_EXT_CUR_ALMH	Верхня аварійна межа струму двигуна шнека
EL_KON_CUR_STAT	Струм споживання приводу кондиціонера, А
EL_CUT_CUR_STAT	Струм споживання двигуна ножового механізму, А
EL_FED_CUR_STAT	Струм споживання двигуна живильника, А
EL_EXT_VOLT_STAT	Напруга живлення двигуна шнека екструдера, В

ДОДАТОК Г

СХЕМА ЗОВНІШНІХ ПРОВОДОК

Найменування параметра		Температура				Тиск			Витрата	Розмір	Напруга			Виконавчий механізм клапана			
Место відбору інтулія	Резерватор	1 зона екстрима	2 зона екстрима	3 зона екстрима	голова екстрима	голова екстрима	На виході	На виході	На виході	Перед різаним вмістом	Напруга 1 дивитися	Напруга 2 дивитися	Напруга 3 дивитися	Відкриття засувки кондиціонера сигналу матеріалу	Відкриття засувки сигналу для пари	засувка відбору з 1 шини	
	ТПУ 0304 М1-Н	ТПУ 0304 М1-Н	ТПУ 0304 М1-Н	ТПУ 0304 М1-Н	Текно Vx-35	Текно Vx-35	Endress+Hauser Cerabar	Endress+Hauser Cerabar	Endress+Hauser Cerabar	Sick OD Mini	HTC/DHTB	HTC/DHTB	HTC/DHTB	S1-mini	S1-mini	S1-mini	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
	Тип пристрою	ТПУ 0304 М1-Н	ТПУ 0304 М1-Н	ТПУ 0304 М1-Н	Текно Vx-35	Текно Vx-35	Endress+Hauser Cerabar	Endress+Hauser Cerabar	Endress+Hauser Cerabar	Sick OD Mini	HTC/DHTB	HTC/DHTB	HTC/DHTB	S1-mini	S1-mini	S1-mini	S1-mini
Позиція																	



ДОДАТОК Д

БЛОК_СХЕМА АЛГОРИТМУ

