

**Міністерство освіти і науки України**

**Луцький національний технічний університет  
Факультет робототехніки та штучного інтелекту  
Кафедра автоматизації та безпілотних систем**

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА  
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «БАКАЛАВР»**

**Автоматизована система керування ділянкою подачі молока в  
зважувально-фасувальну машину технологічного процесу  
виробництва пастеризованого молока**

**Automated Control System for the Milk Supply Section to the  
Weighing and Filling Machine in the Pasteurized Milk Production  
Process**

спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології  
(шифр і назва спеціальності)

освітня програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»  
(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти  
групи АВ-41  
**ДЕРБАК Ярослав Васильович**

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Керівник:  
К.т.н., доцент  
**РЕШЕТИЛО Олександр Миколайович**

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Кваліфікаційну роботу  
допущено до захисту  
«  » \_\_\_\_\_ 2026 р.

К.т.н., доцент

Гарант освітньої програми:

**Решетило Олександр Миколайович**

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Луцьк – 2026 року

# ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет комп'ютерних та інформаційних технологій

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Ступінь вищої освіти: бакалавр

Галузь знань: 15 Автоматизація та приладобудування.

Спеціальність: 151 Автоматизація, та комп'ютерно-інтегровані технології

Освітня програма: «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ О. Ю. Повстяной  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

\_\_\_\_\_ Дербак Ярослав Васильович \_\_\_\_\_

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи \_\_\_\_\_ Автоматизована система керування ділянкою подачі молока в зважувально-фасувальну машину технологічного процесу виробництва пастеризованого молока \_\_\_\_\_

керівник роботи \_\_\_\_\_ Решетило Олександр Миколайович, к.т.н., доцент \_\_\_\_\_

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від " 31 " 12 2026 року 1307/01-04

2. Строк подання студентом роботи \_\_\_\_\_ 1.06.2026 р. \_\_\_\_\_

3. Вихідні дані до роботи \_\_\_\_\_ Автоматизована система керування ділянкою подачі молока в зважувально-фасувальну машину технологічного процесу виробництва пастеризованого молока \_\_\_\_\_

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) \_\_\_\_\_ Аналіз технологічного процесу як об'єкта керування. Обґрунтування вибору функціональної схеми автоматизованої системи керування. Обґрунтування вибору технічних засобів автоматизації. Обґрунтування і опис принципових електричних схем системи керування. Розробка програмного забезпечення програмованого логічного контролера та людино-машинного інтерфейсу. Дослідження перехідної характеристики та визначення показників якості системи автоматичного регулювання. Техніко-економічне обґрунтування \_\_\_\_\_

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

\_\_\_\_\_ Графічний матеріал виконано у вигляді презентації, яка складається з 16 слайдів. \_\_\_\_\_

## 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Розділ 1</i>	<i>Решетило О. М.</i>		
<i>Розділ 2</i>	<i>Решетило О. М.</i>		
<i>Розділ 3</i>	<i>Решетило О. М.</i>		
<i>Розділ 4</i>	<i>Решетило О. М.</i>		
<i>Розділ 5</i>	<i>Решетило О. М.</i>		
<i>Розділ 6</i>	<i>Решетило О. М.</i>		
<i>Розділ 7</i>	<i>Решетило О. М.</i>		
<i>Нормоконтроль</i>	<i>Лапченко Ю. С.</i>		
<i>Показник запозичень тексту</i>		_____ %	
<i>Академічна доброчесність</i>	<i>Лапченко Ю. С.</i>		

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_ 31.12.2025 р.**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів випускної кваліфікаційної роботи	Примітка
1	<i>Аналіз об'єкта керування</i>	<i>20.02.2026 р.</i>	
2	<i>Обґрунтування вибору функціональної схеми</i>	<i>10.03.2026 р.</i>	
3	<i>Обґрунтування вибору ТЗА</i>	<i>20.03.2026 р.</i>	
4	<i>Обґрунтування і опис принципових електричних схем</i>	<i>1.04.2026 р.</i>	
5	<i>Програмне забезпечення систем автоматизації</i>	<i>10.04.2026 р.</i>	
6	<i>Розрахункова частина</i>	<i>20.04.2026 р.</i>	
7	<i>Техніко-економічне обґрунтування</i>	<i>1.05.2026 р.</i>	
8	<i>Оформлення роботи</i>	<i>1.06.2026 р.</i>	

Здобувач вищої освіти \_\_\_\_\_  
(підпис)Дербак.Я.В.  
(прізвище та ініціали)Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)Решетило.О.М.  
(прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

У кваліфікаційній роботі розроблено автоматизовану систему керування ділянкою подачі пастеризованого молока до зважувально-фасувальної машини технологічної лінії виробництва молочної продукції.

У роботі виконано аналіз технологічного процесу як об'єкта автоматизації, визначено основні контрольовані та регульовані параметри, до яких належать рівень, тиск, температура та витрата. Обґрунтовано вибір функціональної структури системи керування, яка побудована за дворівневою архітектурою з використанням сучасних промислових засобів автоматизації.

Як основні технічні засоби обрано програмований логічний контролер SIMATIC S7-300 CPU 315-2 PN/DP, частотний перетворювач SINAMICS G120C, промислові датчики провідних виробників ifm electronic та Endress+Hauser, а також панель оператора SIMATIC TP700 Comfort. Розроблено принципову електричну схему системи керування з урахуванням вимог промислової безпеки та надійності.

У середовищі TIA Portal V21 створено програмне забезпечення керування, яке включає ПІД-регулювання тиску на основі стандартного блоку FB41 CONT\_C, алгоритми захисту обладнання, а також систему аварійної сигналізації та блокувань. Розроблено людино-машинний інтерфейс з відображенням технологічних параметрів, тривог та архівацією даних.

Проведено математичне моделювання контуру регулювання тиску в середовищі MATLAB Simulink, результати якого підтвердили працездатність та ефективність запропонованої системи.

Ключові слова: автоматизована система, PLC, SIMATIC S7-300, TP700 Comfort, SINAMICS G120C, ПІД-регулювання, SCADA, TIA Portal, WinCC, молочна промисловість.

					АтаБС-002.00.00.00.000 ПЗ			
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дат</i>				
<i>Розроб.</i>		<i>Дербак Я.В.</i>			Автоматизована система керування ділянкою подачі молока в зважувально-фасувальну машину технологічного процесу виробництва пастеризованого молока	<i>Лім.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Певевін.</i>		<i>Решетило О.М</i>					4	50
<i>Н. контр.</i>		<i>Лапченко Ю.С</i>				ЛНТУ, гр. АВ-41		
<i>Затв.</i>		<i>Повстяной О.Ю.</i>						

## ANNOTATION

This qualification thesis presents the development of an automated control system for a milk supply section feeding a weighing and packaging machine in a dairy production line.

The technological process was analyzed as a control object, and the main measured and controlled variables were identified, including level, pressure, temperature, and flow rate. The functional structure of the control system was justified and designed based on a two-level architecture using modern industrial automation equipment.

The main hardware components include the SIMATIC S7-300 CPU 315-2 PN/DP programmable logic controller, the SINAMICS G120C frequency converter, industrial sensors from ifm electronic and Endress+Hauser, and the SIMATIC TP700 Comfort operator panel. The electrical schematic of the system was developed in compliance with industrial safety and reliability requirements.

The control software was implemented in the TIA Portal V21 environment. It includes pressure PID control based on the standard FB41 CONT\_C block, equipment protection algorithms, alarm handling, and a data archiving system. A human-machine interface (HMI) was developed to display process parameters, alarms, and historical trends.

Mathematical modeling of the pressure control loop was performed in MATLAB Simulink, and the obtained results confirmed the operability and effectiveness of the proposed system.

Keywords: automated control system, PLC, SIMATIC S7-300, TP700 Comfort, SINAMICS G120C, PID control, SCADA, TIA Portal, WinCC, dairy industry.

					АтаБС-002.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						5
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ЗМІСТ

### ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ.....	4
ВСТУП .....	8
РОЗДІЛ 1 .....	10
АНАЛІЗ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ.....	10
1.1 Опис та аналіз об'єкта керування .....	10
1.2 Перелік задач контролю та керування.....	15
1.3 Критичний аналіз системи автоматизації .....	16
РОЗДІЛ 2 ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ .....	17
РОЗДІЛ 3 ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ.....	21
3.1 Вибір датчиків.....	21
3.2 Вибір виконавчих пристроїв.....	22
3.3 Вибір пристроїв управління та живлення .....	23
РОЗДІЛ 4 ОБҐРУНТУВАННЯ І ОПИС ПРИНЦИПОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ СХЕМ .....	25
4.1 Загальний опис електричної схеми.....	25
4.2 Підключення датчиків і виконавчих механізмів .....	25
РОЗДІЛ 5 ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ .....	28
5.1 Розробка програмного забезпечення програмованого логічного контролера .....	28
5.2 Розробка алгоритму та програмного коду контролера.....	29
5.3 Розробка програмного забезпечення верхнього рівня.....	32
РОЗДІЛ 6 ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ.....	34

					АтаБС-002.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

6.1 Математичний опис та визначення передавальної функції об'єкта автоматизації .....	34
6.2 Розрахунок параметрів ПД-регулятора.....	35
6.3 Моделювання перехідного процесу в системі автоматичного регулювання.....	36
<b>РОЗДІЛ 7 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕОБҐРУНТУВАННЯ.....</b>	<b>39</b>
7.1 Визначення вартості технічних засобів автоматизації .....	39
7.2 Розрахунок загальних капітальних витрат.....	40
<b>ВИСНОВКИ.....</b>	<b>42</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>	<b>45</b>
<b>ДОДАТКИ.....</b>	<b>47</b>

					АтаБС-002.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

## ВСТУП

Сучасні технологічні процеси харчової промисловості характеризуються високими вимогами до стабільності режимів роботи, точності дозування та безпеки виробництва. Особливо це стосується молочної галузі, де якість кінцевої продукції безпосередньо залежить від точності підтримання технологічних параметрів на всіх етапах виробничого процесу.

Однією з ключових ділянок є система подачі пастеризованого молока до зважувально-фасувального обладнання. Нестабільність тиску, коливання витрати або порушення рівня в накопичувальних ємностях можуть призводити до зниження точності фасування, втрат продукту та порушення технологічного режиму. У зв'язку з цим виникає необхідність впровадження сучасних автоматизованих систем керування, які забезпечують безперервний контроль і регулювання основних параметрів процесу.

Актуальність теми зумовлена необхідністю підвищення ефективності роботи технологічних ліній, зменшення впливу людського фактора, підвищення якості продукції та забезпечення стабільності виробничого процесу за рахунок впровадження сучасних засобів автоматизації.

Метою кваліфікаційної роботи є розробка автоматизованої системи керування ділянкою подачі пастеризованого молока до зважувально-фасувальної машини з використанням сучасних програмно-технічних засобів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати технологічний процес як об'єкт керування;
- обґрунтувати вибір функціональної схеми автоматизації;
- здійснити вибір технічних засобів системи керування;
- розробити принципову електричну схему системи;
- створити програмне забезпечення керування в середовищі TIA Portal;
- реалізувати алгоритми ПД-регулювання та аварійного захисту;
- розробити людино-машинний інтерфейс оператора;
- виконати математичне моделювання та аналіз якості системи керування.

					АтаБС-002.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Об'єктом дослідження є процес подачі пастеризованого молока до зважувально-фасувальної машини.

Предметом дослідження є методи та засоби автоматизованого керування технологічними параметрами зазначеного процесу.

Практичне значення роботи полягає у створенні функціонально завершеної системи автоматизації, яка може бути впроваджена на підприємствах молочної промисловості для підвищення точності, надійності та ефективності виробничого процесу.

					АтаБС-002.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

# РОЗДІЛ 1

## АНАЛІЗ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

### 1.1 Опис та аналіз об'єкта керування

Об'єктом автоматизації в даній кваліфікаційній роботі є ділянка подачі пастеризованого молока до зважувально-фасувальної машини технологічної лінії виробництва пастеризованого молока. Ця ділянка забезпечує транспортування готового продукту від накопичувальної ємності до фасувального обладнання з підтриманням необхідних технологічних параметрів.

Пастеризоване молоко отримують шляхом теплової обробки сирого молока при температурі 72-76 °С з наступним швидким охолодженням до 2-6 °С. Після пастеризації продукт надходить у накопичувальний резервуар, звідки за допомогою насосного агрегату подається до зважувально-фасувальної машини [1].

Якість роботи ділянки безпосередньо впливає на точність дозування, продуктивність фасувального обладнання та загальну ефективність виробництва. Нерівномірність подачі молока, коливання тиску або рівня може призводити до порушення технологічного режиму, збільшення втрат продукту та зниження якості готової продукції.

До складу технологічного обладнання ділянки входять:

- зрівнювальний бак – резервуар для накопичення пастеризованого молока, що слугує буфером між пастеризаційною установкою та фасувальним обладнанням;
- молочний насос – відцентровий агрегат, який забезпечує транспортування продукту по трубопроводу;
- пластинчатий апарат – теплообмінник для рекуперації тепла та пастеризації молока;

					АтаБС-002.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- молокоочисник – механічний фільтр для видалення домішок і покращення якості продукту;
- водяний насос – забезпечує циркуляцію охолоджувальної води в секціях теплообміну;
- бойлер – джерело гарячої води, яка використовується для пастеризації;
- інжектор – вузол для подачі пари в систему гарячої води;
- електрогідравлічний клапан – автоматичний регулятор подачі пари залежно від температури молока;
- витримувач – секція для витримки молока при високій температурі для забезпечення пастеризаційного ефекту;
- перепускний клапан – використовується для повернення молока у зрівнювальний бак у випадку недотримання температурного режиму;
- молочний танк– технологічна ємність для накопичення та тимчасового зберігання молока, яка забезпечує стабільний рівень продукту і безперервність його подачі на наступні стадії технологічного процесу;
- зважувально-фасувальна машина – технологічне обладнання, призначене для дозування, зважування та фасування пастеризованого молока у споживчу тару відповідно до встановлених параметрів продуктивності та точності дозування;
- запірний клапан – трубопровідна арматура, призначена для перекриття або відкриття потоку молока під час запуску, зупинки та обслуговування технологічного обладнання. Забезпечує локалізацію окремих ділянок трубопроводу та безпечну експлуатацію системи.

Технологічний процес починається з накопичення молока в резервуарі [2]. При отриманні команди на запуск відкриваються запірні клапани та запускається насос. Система автоматично підтримує стабільний тиск у нагнітальному трубопроводі шляхом зміни частоти обертання двигуна насоса за допомогою частотного перетворювача.

						АтаБС-002.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
							11
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

Пастеризоване молоко після завершення технологічної обробки надходить до резервуара зберігання, з якого подається на ділянку фасування. Для забезпечення безперервної роботи зважувально-фасувальної машини використовується автоматизована система керування подачею молока.

У резервуарі встановлено ультразвуковий давач рівня, який забезпечує контроль запасу продукту. При досягненні мінімально допустимого рівня формується попереджувальний сигнал, а при критичному зниженні рівня насос подачі автоматично відключається для запобігання роботі без продукту.

Подача молока до фасувальної машини здійснюється насосом, електродвигун якого керується частотним перетворювачем SINAMICS G120C. Регулювання швидкості обертання двигуна дозволяє підтримувати необхідний тиск у трубопроводі незалежно від зміни продуктивності фасувальної машини.

Контроль тиску здійснюється давачем тиску ifm PI2794, сигнал з якого надходить до програмованого логічного контролера SIMATIC S7-300 CPU 315-2 PN/DP. На основі виміряного значення контролер реалізує ПІД-регулювання та формує керуючий сигнал для частотного перетворювача [3]. Завдяки цьому забезпечується стабільний режим транспортування молока та точність дозування продукту.

Для контролю кількості продукту, що подається на фасування, використовується електромагнітний витратомір ifm SM8100. Отримані дані застосовуються для контролю продуктивності системи та діагностики відхилень технологічного режиму. Схема взаємозв'язків параметрів системи керування показано на рисунку 1.1.

					АтаБС-002.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

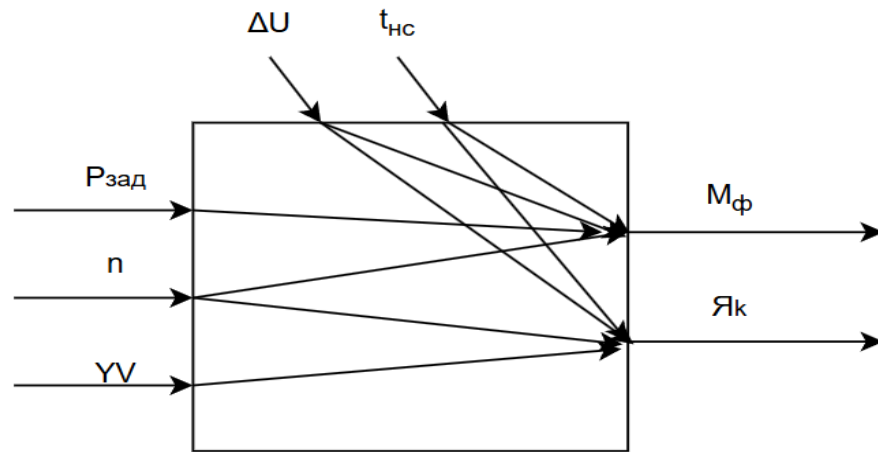


Рисунок 1.1 – Схема взаємозв'язків параметрів системи керування

- $P_{зад}$  (задане значення) – сигнал завдання, який визначає цільовий режим роботи системи (наприклад, потрібний тиск чи витрата);
- $n$  (частота обертання) – параметр, що характеризує швидкість роботи виконавчого механізму (насоса, двигуна);
- $YV$  (керуючий вплив) – сигнал від контролера, який регулює роботу виконавчого пристрою;
- $\Delta U$  (відхилення) – різниця між заданим і фактичним значенням параметра, використовується для корекції роботи системи;
- $t_{нс}$  (час налаштування/перехідний процес) – характеристика динаміки системи, що впливає на швидкість досягнення стабільного режиму;

Усі ці входи надходять у блок системи керування, де відбувається їхня обробка. На виході отримуємо:

- $M_{ф}$  (молочний потік) – фактичний результат роботи системи, тобто подача молока у фасувальну машину;
- $Я_{к}$  (якість процесу) – інтегральний показник, що відображає відповідність технологічним вимогам (стабільність тиску, точність дозування, дотримання температурного режиму).

Таким чином, схема демонструє, як різні параметри (задане значення, швидкість, відхилення, час реакції) впливають на кінцевий результат – стабільний потік молока та якість виробничого процесу.

					АтаБС-002.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						13
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Після проходження ділянки подачі молоко надходить до зважувально-фасувальної машини, де виконується його дозування та фасування в споживчу тару.

Автоматизована система керування ділянкою подачі молока в зважувально-фасувальну машину представлена на рисунку 1.2



Рисунок 1.2 – Автоматизована система керування ділянкою подачі молока в зважувально-фасувальну машину [4]

Основними контрольованими та регульованими параметрами технологічного процесу є (таблиця 1.1):

Таблиця 1.1 – Основні технологічні параметри процесу

Параметр	Нормальне значення	Допустиме відхилення
Температура молока	4-6 °С	±2 °С
Тиск у трубопроводі	0,25-0,40 МПа	±0,05 МПа
Рівень молока в резервуарі	0,5-2,0 м	не нижче 0,2 м
Витрата молока	2-10 м <sup>3</sup> /год	±10 %
Частота обертання насоса	20-50 Гц	залежно від режиму

## 1.2 Перелік задач контролю та керування

Автоматизована система повинна виконувати такі основні функції:

- безперервний контроль рівня молока в накопичувальній ємності (LE2-a);
- аварійний контроль нижнього (LE3-a) та верхнього (LE4-a) рівнів;
- контроль тиску в трубопроводі (PIT1-a) з ПІД-регулюванням;
- контроль температури молока (TE1-a);
- контроль витрати молока (FIC1-a);
- автоматичне керування пневматичними клапанами;
- захист насоса від сухого ходу та перевантаження;
- формування аварійної та попереджувальної сигналізації;
- відображення параметрів на панелі оператора TP700 Comfort;
- реалізація ручного та автоматичного режимів роботи.

Основні параметри контролю та керування наведені в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Параметри контролю та керування

№	Параметр	Вид контролю	Спосіб керування	Вимоги до точності
1	Рівень молока (LE2-a)	Безперервний	Сигналізація та блокування	$\pm 2 \%$
2	Мінімальний рівень (LE3-a)	Дискретний	Захист від сухого ходу	0,2 м
3	Тиск у трубопроводі (PIT1-a)	Безперервний	ПІД-регулювання	$\pm 2 \%$
4	Максимальний тиск	Безперервний	Аварійне відключення	$\pm 1 \%$
5	Витрата молока (FIT1-a)	Безперервний	Моніторинг	$\pm 3 \%$
6	Температура молока (TE1-a)	Безперервний	Попереджувальна сигналізація	$\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$

					АтаБС-002.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

### 1.3 Критичний аналіз системи автоматизації

Ділянка подачі молока є динамічним об'єктом з взаємопов'язаними параметрами. Основним регульованим параметром є тиск перед фасувальною машиною. Збуреннями виступають зміна витрати фасувального обладнання, коливання рівня в ємності та зміна гідравлічного опору.

Для ефективного керування необхідне застосування сучасної системи на базі PLC з ПІД-регулюванням, розвинутою системою захисту та людино-машинним інтерфейсом.

Таким чином, проведений аналіз підтверджує необхідність розробки автоматизованої системи керування з використанням сучасних технічних засобів (CPU 315-2 PN/DP, SINAMICS G120C, гігієнічні датчики), яка забезпечить стабільність технологічного процесу, підвищення якості продукції та зменшення впливу людського фактора [5].

Висновки: проведено детальний аналіз технологічного процесу ділянки подачі молока, виділено основні контрольовані параметри: рівень, тиск, температура та витрата, а також встановлено їх нормальні значення і допустимі відхилення. Визначено критичні точки контролю – накопичувальна ємність, нагнітальний трубопровід і насосний агрегат – та проаналізовано вплив коливань параметрів на точність фасування і втрати продукту. На основі аналізу сформовано вимоги до точності вимірювань, швидкодії системи та надійності захистів, що дозволяє коректно підібрати датчики, регулятори і побудувати структуру управління.

					АтаБС-002.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

## РОЗДІЛ 2

### ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

Функціональна схема автоматизованої системи керування ділянкою подачі молока в зважувально-фасувальну машину наведена на слайді 9 графічної частини проекту. Схема розроблена відповідно до вимог ДСТУ 21.408:2013 [6].

Функціональна схема побудована за дворівневою архітектурою:

- нижній (польовий) рівень – датчики (PIT 1-а, LE 2-а, LE 3-а, LE 4-а, TE 1-а, FIT 1-а), частотний перетворювач SINAMICS G120C.
- верхній рівень – програмований логічний контролер SIMATIC S7-300 CPU 315-2 PN/DP з модулями розширення та панель оператора SIMATIC TP700 Comfort.

З молокозбірника молоко надходить у зрівнювальний бак (1), де підтримується необхідний буферний об'єм для безперервної подачі.

При досягненні уставки рівня запускається молочний насос (2), який подає молоко в першу секцію пластинчатого апарата (3) – секцію рекуперації (А), холодне молоко підігрівається за рахунок теплообміну з гарячим молоком, що повертається з секції пастеризації через витримувач (9). Підігріте до приблизно 37-40 °С молоко проходить через молокоочисник (4) для механічного очищення, після чого надходить у секцію рекуперації (В) для подальшого донагріву за рахунок тепла пастеризованого потоку.

Після другої рекуперації молоко переходить у секцію пастеризації (С), де в пластинчатому апараті за допомогою гарячої робочої рідини з водяний насос (5), підготовленої в бойлері (6) і підігрітої паром через інжектор (7) паропроводу котельної установки, його температура піднімається до робочої величини 90 °С для установки. Після пастеризації продукт надходить у витримувач, де витримується необхідний час для забезпечення санітарно-технологічного ефекту.

					АтаБС-002.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

Пастеризоване гаряче молоко далі послідовно проходить через секції рекуперації D та E, віддаючи частину свого тепла припливному холодному молоку; у результаті його температура знижується до приблизно 20-25 °С. Остаточне охолодження здійснюється в секціях охолодження та, де температура доводиться до 5-8 °С залежно від параметрів охолоджувальної води. Якщо під час охолодження температура молока, що виходить із секції пастеризації, падає нижче заданої межі, перепускний клапан (10) переводить потік назад у зрівнювальний бак (1) для повторної пастеризації або корекції режиму.

Подача пари в систему циркуляції гарячої води автоматично регулюється електрогідравлічним клапаном (8) залежно від вимірювань температури пастеризованого молока; це дозволяє підтримувати стабільну температуру у секції пастеризації. Усі польові датчики (рівня, тиску, температури, витрати) передають сигнали в PLC SIMATIC S7-300 CPU 315-2 PN/DP, яке реалізує логіку запуску/зупинки насоса, ПІД-регулювання тиску через SINAMICS G120C, управління клапанами та формування аварійних блокувань; живлення і розподіл 24 V DC організовані через PS 307 5A у шафі керування. Після завершення процесу пастеризації та охолодження молоко надходить у молочний танк (11), який у розробленій системі виконує функцію зрівнювального бака ділянки подачі молока до зважувально-фасувальної машини. Із молочного танка пастеризоване молоко подається молочним насосом (2) до технологічного трубопроводу фасувальної лінії.

Для підтримання стабільних параметрів подачі в системі здійснюється безперервний контроль рівня продукту в резервуарі, тиску та витрати молока в трубопроводі у випадку аварій існує клапан подачі (12). Сигнали від давачів надходять до програмованого логічного контролера SIMATIC S7-300 CPU 315-2 PN/DP.

Регулювання продуктивності насоса здійснюється за допомогою частотного перетворювача SINAMICS G120C.

					АтаБС-002.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						18
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Контролер реалізує алгоритм ПІД-регулювання тиску, забезпечуючи стабільну подачу молока незалежно від зміни продуктивності зважувально-фасувальної машини. При досягненні аварійно низького рівня молока в резервуарі насос автоматично відключається, а оператор отримує відповідне повідомлення на панелі оператора TP700 Comfort.

Після проходження ділянки подачі молоко надходить у зважувально-фасувальну машину (13), де виконується його дозування та фасування в споживчу тару. Застосування автоматизованої системи керування забезпечує стабільність технологічного процесу, підвищення точності дозування продукції та зменшення впливу людського фактора на роботу виробничої лінії.

Функціональна схема зображена на слайді 9 презентації графічної частини.

Основним контуром системи є контур автоматичного регулювання тиску (PIC 1-b) з використанням ПІД-регулятора FB41 CONT\_C. Додатково реалізовані контури контролю рівня (LIC 2-b), температури (TIC 1-b), витрати (FIC 1-b), а також аварійні контури захисту від сухого ходу (LE 3-a), переповнення (LE 4-a) та надлишкового тиску.

Функціональна блок-схема подачі молока показана на слайді 10.

Обмін даними між контролером, частотним перетворювачем та HMI-панеллю здійснюється по мережі PROFINET.

Обрана функціональна схема є оптимальною для даного об'єкта керування, забезпечує високу надійність, точність підтримання технологічних параметрів та відповідає завданню кваліфікаційної роботи [7, 8].

Висновки: обрана дворівнева архітектура з розподілом функцій між польовим рівнем і рівнем керування PLC/HMI забезпечує необхідну надійність, масштабованість і зручність обслуговування.

Інтеграція по PROFINET/PN-DP дозволяє реалізувати швидкий обмін даними між SIMATIC S7-300 CPU 315-2 PN/DP і приводом SINAMICS G120C, що критично для реалізації ПІД-контролю тиску і оперативних блокувань.

					<i>AKIT-011.00.00.00.000IT3</i>	Арк.
						19
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Така схема дозволяє розмістити первинні вимірювальні прилади в полі з мінімальною логікою на місці, а централізувати регулювання і архівацію даних.

					АтаБС-002.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						20
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

## РОЗДІЛ 3

# ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ

### 3.1 Вибір датчиків

Молочна галузь висуває підвищені санітарно-гігієнічні вимоги до всіх засобів вимірювання, які контактують з продуктом. Усі поверхні, що стикаються з пастеризованим молоком, повинні бути виготовлені з нержавіючої сталі AISI 316L, не мати застійних зон і витримувати регулярну СІР-мійку гарячими лужними та кислотними розчинами [9].

Для забезпечення надійного контролю технологічних параметрів у системі обрано сучасні промислові прилади провідних виробників:

- датчик тиску – ifm electronic PI2794 з плоскою гігієнічною мембраною та асептичним адаптером. Діапазон вимірювання 0-1,0 МПа, вихідний сигнал 4-20 мА, клас точності 0,2 % [10];

- датчик рівня (безперервний) – ультразвуковий давач Endress+Hauser Prosonic FMU30. Діапазон 0,25-4,0 м, вихід 4-20 мА [11];

- аварійні сигналізатори рівня – два вібраційні давачі Endress+Hauser Liquiphant FTL31 (LE3-а – нижній рівень для захисту від сухого ходу насоса, LE4-а – верхній рівень для захисту від переповнення) [12];

- датчик температури – ifm electronic TA2405 на базі Pt100 з вбудованим нормуючим перетворювачем, вихід 4-20 мА [13];

- витратомір – електромагнітний ifm electronic SM8100 (без рухомих частин, точність  $\pm 0,5$  %, вихід 4-20 мА + імпульсний) [14].

Технічні характеристики обраних датчиків наведені в таблиці 3.1

					АтаБС-002.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						21
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 3.1 – Технічні характеристики обраних датчиків

Параметр	Прилад	Виробник	Діапазон	Сигнал	З'єднання
Тиск	PI2794	Ifm електроні ка	0–1,0 МПа	4–20 мА	Асептичний адаптер
Рівень (безперервни й)	Просонічний FMU30	Endress+ Hauser	0,25–4,0 м	4–20 мА	G 1½"
Рівень аварійний	Ліквіфант FTL31	Endress+ Hauser	Дискретний	ПНП 24 В	Затискач 1,5 дюйма
Температура	TA2405	ifm електроні ка	0–100 °С	4–20 мА	Затискач 1,5 дюйма
Витрати	SM8100	ifm електроні ка	0,2–100 л/хв	4–20 мА	ДІН 11851

### 3.2 Вибір виконавчих пристроїв

Для плавного регулювання продуктивності насосного агрегату та підтримання стабільного тиску в трубопроводі обрано частотний перетворювач Siemens SINAMICS G120C потужністю 1,5 кВт з векторним керуванням і вбудованим інтерфейсом PROFINET.

Для відсікання потоків молока під час запуску, зупинки та СІР-мійки використовуються пневматичні односідельні клапани Alfa Laval Unique SSV (3 шт.) з нормально-закритим виконанням і харчовими ущільненнями EPDM [15].

Технічні характеристики виконавчих пристроїв наведені в таблиці 3.2.

						АтаБС-002.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
							22
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

Таблиця 3.2 – Технічні характеристики виконавчих пристроїв

Обладнання	Модель	Виробник	Характеристики	Сигнал
Частотний перетворювач	SINAM ICS G120C	Siemens	1,5 кВт, 3×380 В, PROFINET	PROFINET
Запірний клапан	Unique SSV	Alfa Laval	до 1,0 МПа, AISI 316L, НЗ	24 В DC

### 3.3 Вибір пристроїв управління та живлення

Як головний обчислювальний пристрій системи обрано компактний програмований логічний контролер SIMATIC S7-300 CPU 315-2 PN/DP. Завдяки наявності потужної інтегрованої периферії (24 DI / 16 DO та 5 AI / 2 AO) цей процесор дозволяє повністю відмовитися від зовнішніх сигнальних модулів розширення, що оптимізує архітектуру шафи керування, зменшує її вартість і габарити.

Живлення контролера та польових пристроїв здійснюється стабілізованим блоком SIMATIC PS 307 5A (6ES7307-1EA01-0AA0), встановленим у першому слоті стійки. Обмін даними між контролером, частотним перетворювачем SINAMICS G120C та панеллю оператора виконується по промисловій мережі PROFINET, що забезпечує високу швидкість і завадостійкість.

Для візуалізації технологічного процесу та оперативного керування застосовується сенсорна панель оператора SIMATIC TP700 Comfort з 7-дюймовим дисплеєм. Електрична схема підключення технічних засобів автоматизації (слайд 11 графічної частини) Специфікація мікропроцесорного комплексу наведені в таблиці 3.3.

					АтаБС-002.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						23
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 3.3 – Специфікація мікропроцесорного комплекту

Позначення	Найменування	Модель	Кількість
PS	Блок живлення	PS 307 5A	1
CPU	Центральний процесор	CPU 315-2 PN/DP	1
HMI	Панель оператора	SIMATIC TP700 Comfort	1

Висновки: підібрані технічні засоби відповідають санітарним, функціональним і інтерфейсним вимогам об'єкта: SIMATIC S7-300 CPU 315-2 PN/DP забезпечує достатню кількість аналогових і дискретних входів/виходів і комунікацію з приводом.

SINAMICS G120C дає можливість плавного регулювання частоти насоса; датчики виробників ifm та Endress+Hauser гарантують точність і надійність вимірювань. Комплект обладнання забезпечує сумісність інтерфейсів, резервування критичних сигналів і відповідає вимогам гігієнічного виконання для харчової промисловості.

Вибір компонентів дозволяє реалізувати необхідні режими роботи, захисти і забезпечити довготривалу експлуатацію з мінімальними витратами на обслуговування.

					АтаБС-002.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						24
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## РОЗДІЛ 4

### ОБҐРУНТУВАННЯ І ОПИС ПРИНЦИПОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ СХЕМ

Принципова електрична схема автоматизованої системи керування ділянкою подачі молока наведена на слайді 10 презентації. Схема розроблена відповідно до вимог ДСТУ 2.702:2022. та ДСТУ ІЕС 61131-3:2022. [16, 17].

#### 4.1 Загальний опис електричної схеми

Живлення системи здійснюється від мережі змінного струму  $\sim 380/220$  В, 50 Гц.

На вводі встановлено вимикач навантаження QF0. Силове коло частотного перетворювача UZ1 (SINAMICS G120C) захищено триполюсним автоматичним вимикачем QF1 (Acti9 iC60N 3P 6A, характеристика C).

Живлення логічної частини (контролер, датчики, панель оператора) виконане постійною напругою 24 В від блоку PS 307 5A, який встановлений у першому слоті стійки контролера.

Кола 24 В захищені автоматичними вимикачами QF2 і QF3 (1P 2A, характеристика B).

Головним пристроєм керування є SIMATIC S7-300 CPU 315-2 PN/DP з інтегрованою периферією. Завдяки цьому відмовлено від зовнішніх сигнальних модулів SM, що спростило монтаж і зменшило кількість точок з'єднання.

#### 4.2 Підключення датчиків і виконавчих механізмів

Аналогові датчики (PI2794, FMU30, TA2405, SM8100) підключені до вбудованих аналогових входів CPU 315-2 PN/DP за двопровідною схемою струмової петлі 4-20 мА.

					АтаБС-002.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						25
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



1	2	3	4
M1	Електродвигун насоса	АИР 80В2, 1,5 кВт	1
KA1-KA3	Проміжні реле	Phoenix Contact RIF-0	3
YV1-YV3	Соленоїди пневмоклапанів	24 В DC	3
SB0	Кнопка аварійної зупинки	Гриб з фіксацією, НЗ	1
HL1	Сигнальна колона	24 В, трикольорова	1
TP1	Панель оператора	SIMATIC TP700 Comfort	1

Висновки: розроблені принципові електричні схеми охоплюють живлення, захист, підключення аналогових і дискретних сигналів, а також інтеграцію приводу і панелі оператора. Схеми передбачають розділення силових і сигнальних кіл, захисні автомати, апаратні блокування і заземлення, що забезпечує безпеку персоналу і надійність роботи обладнання. Для полегшення монтажу і пусконаладження передбачені маркування клем, резервні входи для критичних сигналів і зрозуміла структуризація шафи керування, що зменшує час на технічне обслуговування і усунення несправностей.

					АтаБС-002.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						27
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## РОЗДІЛ 5

### ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

#### 5.1 Розробка програмного забезпечення програмованого логічного контролера

Для розробки програмного забезпечення автоматизованої системи керування ділянкою подачі молока в зважувально-фасувальну машину використано інтегроване інженерне середовище TIA Portal V21 компанії Siemens.

Дане середовище забезпечує єдиний підхід до конфігурування апаратної частини, програмування контролера, налаштування промислових мереж та створення людино-машинного інтерфейсу.

Програмне забезпечення розроблено для програмованого логічного контролера SIMATIC S7-300 CPU 315-2 PN/DP (6ES7315-2EH14-0AB0). Основне живлення стійки здійснюється блоком PS 307 5A, встановленим у першому слоті.

Програмне забезпечення реалізовано за циклічним принципом. Головний організаційний блок OB1 виконує безперервне опитування входів, обробку логіки та видачу команд на виконавчі механізми. Для задач неперервного регулювання використовується циклічне переривання OB35 з періодом 100 мс, у якому працює стандартний ПІД-регулятор FB41 CONT\_C.

Структура програмного забезпечення наведена на рисунку 5.1.

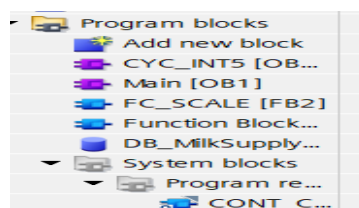


Рисунок 5.1 – Структура програмного забезпечення PLC-контролера SIMATIC S7-300 у TIA Portal V21

					АтаБС-002.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						28
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

До складу структури входять:

- OB1 – головний цикл програми;
- OB35 – циклічне переривання для ПІД-регулювання;
- FB\_MilkSupply – функціональний блок керування технологічним процесом;
- DB\_MilkSupply – глобальний блок даних (уставки та технологічні змінні);
- FC\_SCALE – функція масштабування аналогових сигналів 4-20 мА;
- FB41 CONT\_C – стандартний блок ПІД-регулювання тиску.

Алгоритм передбачає:

- зчитування всіх аналогових (TE1-a, LE2-a, PIT1-a, FIT1-a) та дискретних (LE3-a, LE4-a, аварійна кнопка, аварія ПЧ) сигналів;
- перевірку аварійних блокувань (пріоритетний рівень):
- сухий хід (LE3-a);
- переповнення (LE4-a);
- перевищення тиску;
- аварія частотного перетворювача;
- контроль технологічних параметрів (температура, рівень, витрата);
- виконання ПІД-регулювання тиску (PIC1-b) через блок FB41 CONT\_C;
- формування команд на насос (M1), клапани (YV1, YV2) та сигналізацію.

## 5.2 Розробка алгоритму та програмного коду контролера

На основі розробленого алгоритму функціонування автоматизованої системи керування ділянкою подачі молока в зважувально-фасувальну машину було створено програмне забезпечення програмованого логічного контролера в середовищі TIA Portal V21 [18]. Конфігурація апаратних засобів проекту представлена на рисунку 5.2.

					АтаБС-002.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						29
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

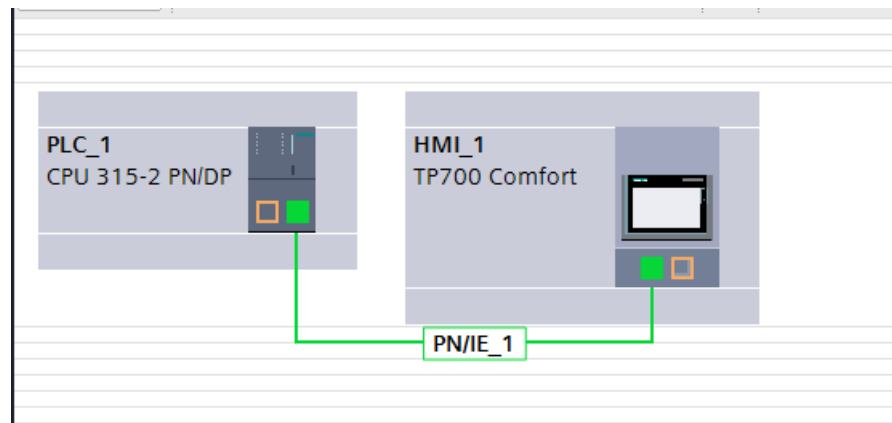


Рисунок 5.2 – Конфігурація апаратних засобів проєкту

Для реалізації системи керування використано контролер SIMATIC S7-300 CPU 315 PN/DP, який забезпечує збір інформації з технологічних датчиків, обробку сигналів, виконання алгоритмів керування та формування команд для виконавчих механізмів.

Програмне забезпечення складається з таких основних блоків:

- OB1 – головний організаційний блок циклічного виконання програми;
- FB\_MilkSupply – функціональний блок керування ділянкою подачі молока;
- DB\_MilkSupply – блок даних технологічних параметрів;
- FC\_SCALE – блок масштабування аналогових сигналів;
- FB41 CONT\_C – стандартний ПІД-регулятор Siemens;

У процесі роботи контролер виконує такі задачі:

- контроль тиску в трубопроводі;
- контроль рівня продукту в накопичувальній ємності;
- керування насосною станцією;
- регулювання частоти обертання електродвигуна насоса через перетворювач частоти SINAMICS G120C;
- контроль аварійних режимів;
- забезпечення ручного та автоматичного режимів роботи.

										АтаБС-002.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
											30
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							

Функціонування програми реалізовано відповідно до циклічного принципу сканування контролера.

Після запуску контролер виконує зчитування сигналів з датчиків тиску P1T 1-а та рівня L1T 2-а, виконує їх масштабування та передає отримані значення до блоку регулювання.

Лістинг основної частини функціонального блоку FB\_MilkSupply наведено в додатку А.

Для підтримання необхідного тиску в молокопроводі використовується стандартний ПІД-регулятор Siemens FB41 CONT\_C. Регулятор формує керуючий сигнал відповідно до відхилення між заданим та фактичним значенням тиску.

Лістинг виклику регулятора в головному блоці OB1 наведений нижче.

#### Лістинг 5.1 – Виклик FB41 CONT\_C в OB1

---

```
CALL FB41 , DB41
(
  COM_RST := FALSE,
  MAN_ON  := FALSE,
  PV_IN   := PressurePV,
  SP_INT  := PressureSP,

  P_SEL   := TRUE,
  I_SEL   := TRUE,
  D_SEL   := FALSE,
  GAIN    := 2.0,
  TI      := 10.0,
  LMN_HLM := 100.0,
  LMN_LLM := 0.0,
  LMN     := PumpSpeed
);
```

---

кінець лістингу 5.1

					АтаБС-002.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

Отриманий вихідний сигнал PumpSpeed передається на аналоговий вихід контролера, який підключений до перетворювача частоти SINAMICS G120C. Перетворювач змінює частоту живлення електродвигуна насоса та забезпечує плавне регулювання продуктивності системи подачі молока [19].

Для перевірки працездатності програми було виконано тестування в середовищі TIA Portal V21 із використанням режиму онлайн-моніторингу. Результати тестування підтвердили правильність роботи алгоритму автоматичного регулювання, функцій запуску та зупинки насоса, а також аварійних блокувань за низьким рівнем молока в резервуарі.

Розроблена програма програми керування в TIA Portal V21 (OB1, FB41 CONT\_C, FB\_MilkSupply) наведена в додатку А.

### 5.3 Розробка програмного забезпечення верхнього рівня

Для візуалізації технологічного процесу, оперативного контролю та керування обладнанням був розроблений людинно-машинний інтерфейс (НМІ) на сенсорній панелі оператора SIMATIC TP700 Comfort.

Розробка здійснювалась у середовищі WinCC Comfort V21, яке входить до складу TIA Portal V21.

Основні екрани операторської панелі:

1. Головний технологічний екран – забезпечує загальний огляд стану системи в реальному часі.

На ньому відображаються:

- поточний рівень молока в накопичувальному резервуарі (LE2-a);
- тиск у трубопроводі (PIT1-a);
- витрата молока (FIT1-a);
- температура молока (TE1-a);
- стан насоса (увімкнено/вимкнено) та частота обертання двигуна;
- стан запірних пневматичних клапанів;
- поточні значення технологічних уставок.

					АтаБС-002.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

2. Екран керування – призначений для оперативного керування системою. Містить кнопки запуску та зупинки, вибір режиму роботи (Автоматичний / Ручний), задання уставки тиску та кнопки підтвердження аварій.

3. Екран тривоги і аварій – відображає список активних та архівних повідомлень з часовою позначкою (захист від сухого ходу, перевищення тиску, висока температура тощо).

4. Екран трендів – графічне відображення динаміки основних параметрів (тиск, рівень, витрата) за вибраний період.

5. Сервісний екран – доступ до параметрів ПД-регулятора, калібрування датчиків та діагностики системи.

Обмін даними між контролером SIMATIC S7-300 CPU 315-2 PN/DP та панеллю TP700 Comfort реалізований через промислову мережу PROFINET. Усі змінні HMI прив'язані до тегів контролера, що забезпечує швидке оновлення інформації в реальному часі.

Для зручності оператора застосовано кольорове кодування стану обладнання (зелений – норма, жовтий – попередження, червоний – аварійний стан) та систему рівнів доступу.

Висновки: у підрозділі розроблено програмне забезпечення верхнього рівня системи автоматизації. На базі панелі оператора SIMATIC TP700 Comfort у середовищі WinCC Comfort V21 створено сучасний, ергономічний та інформативний людино-машинний інтерфейс. Розроблений HMI забезпечує ефективний моніторинг технологічних параметрів, оперативне керування, швидке реагування на аварійні ситуації та аналіз трендів. Інтеграція з контролером по мережі PROFINET забезпечила надійний обмін даними в реальному часі [20].

					АтаБС-002.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						33
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## РОЗДІЛ 6

# ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ

### 6.1 Математичний опис та визначення передавальної функції об'єкта автоматизації

Для оцінки якості роботи і розрахунку оптимальних параметрів ПІД-регулятора необхідно мати математичну модель об'єкта керування. У контурі стабілізації тиску об'єктом є комплексний вузол, що включає частотний перетворювач SINAMICS G120C, асинхронний електродвигун, відцентровий насос ОНЦ-6,3/20 і нагнітальний трубопровід із давачем тиску PI2794. Регульованою величиною є надлишковий тиск молока перед дозатором, керуючим впливом – частота напруги живлення двигуна.

З погляду динаміки об'єкт є статичним з властивістю самовирівнювання та інерційним, оскільки зміна частоти не може миттєво змінити тиск через механічну інерцію ротора насоса і гідродинамічний опір стовпа рідини в трубі.

Крім того, об'єкту притаманне чисте запізнення, зумовлене часом поширення хвилі тиску по трубопроводу і затримкою аналогового модуля контролера.

Для визначення параметрів математичної моделі використовується метод зняття кривої розгону. У ручному режимі керування на вхід частотного перетворювача подається ступінчасте збурення – стрибок частоти, наприклад з 30 до 40 Гц, і за допомогою трендів на панелі оператора фіксується графік зміни тиску до виходу системи на новий усталений рівень. Отримана крива розгону має класичну S-подібну форму, що дозволяє апроксимувати об'єкт інерційною ланкою першого порядку з чистим запізненням.

					АтаБС-002.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						34
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Передавальна функція об'єкта у просторі Лапласа має вигляд (6.1):

$$W_o(s) = \frac{K_o}{T_o s + 1} \cdot e^{(-\tau s)}, \quad (6.1)$$

де  $K_o$  – коефіцієнт передачі об'єкта (6.2);

$T_o s$  – стала часу;

$e^{(-\tau s)}$  – час чистого запізнення.

$$K_o = \frac{\Delta P}{\Delta f}, \quad (6.2)$$

де  $\Delta P$  – приріст тиску в усталеному стані, МПа;

$\Delta f$  – величина ступінчастого збурення частоти, Гц.

Коефіцієнт передачі визначається як відношення приросту тиску в усталеному стані до величини ступінчастого збурення частоти:

$$W_o(c) = \frac{2,4}{0,015c + 1} \cdot e^{-0,35c}.$$

За результатами розрахунків для даної ділянки отримано:

$$K_o = 0,015 \text{ МПа/Гц}, \quad T_o = 2,4 \text{ с}, \quad \tau = 0,35 \text{ с}.$$

Підставляючи числові значення, отримуємо остаточний вигляд передавальної функції:

Отримана модель є основою для подальшого моделювання замкненого контуру регулювання і розрахунку оптимальних коефіцієнтів ПІД-регулятора.

## 6.2 Розрахунок параметрів ПІД-регулятора

Для розрахунку оптимальних коефіцієнтів програмного ПІД-регулятора використовується метод Зіглера-Нікольса, адаптований для об'єктів з чистим запізненням. Вихідними даними є параметри передавальної функції, отримані в пункті 6.1:

					АтаБС-002.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						35
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$T_{\text{демп}} = 0,5; T_{\text{я}} = 2.$$

Розрахункові формули для ПІД-регулятора за методом Зіглера-Нікольса мають вигляд (6.3):

$$K_{\text{стр}} = \frac{K_o \cdot \tau}{1,2 \cdot T_o} \quad (6.3)$$

Підставляючи числові значення, отримуємо:

$$K_{\text{стр}} = \frac{0,015 \cdot 0,35}{1,2 \cdot 2,4} = \frac{0,00525}{2,88} \approx 548,$$

$$T_{\text{я}} = 2 \cdot 0,35 = 0,7 \text{ с},$$

$$T_{\text{демп}} = 0,5 \cdot 0,35 = 0,175 \text{ с}.$$

Отримані значення є початковими і вносяться до блока FB41 CONT C як стартові коефіцієнти.

Під час пусконаладжувальних робіт на реальному об'єкті ці значення уточнюються методом послідовного наближення: спочатку вимикаються інтегральна і диференціальна складові, підбирається пропорційний коефіцієнт за мінімумом коливань тиску, після чого поступово вводиться інтегральна складова для усунення статичної помилки і диференціальна для пришвидшення реакції на різкі збурення від циклічного відбору молока фасувальним автоматом.

### **6.3 Моделювання перехідного процесу в системі автоматичного регулювання**

Для перевірки якості роботи замкненого контуру регулювання тиску виконано комп'ютерне моделювання в середовищі MATLAB Simulink.

					АтаБС-002.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						36
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Структурна схема моделі включає блок передавальної функції об'єкта з параметрами  $W_o(s)$ , блок транспортного запізнення і стандартний блок ПІД-регулятора з розрахованими коефіцієнтами.

На рисунку 6.1 наведено результати математичного моделювання контуру автоматичного регулювання тиску ділянки подачі молока, виконаного в середовищі MATLAB Simulink. Моделювання проводилось з метою перевірки працездатності розробленої системи керування та оцінки її динамічних характеристик.

Структурна схема моделі включає джерело задавального сигналу, суматор, ПІД-регулятор, модель об'єкта керування у вигляді інерційної ланки першого порядку з запізненням та блок відображення результатів.

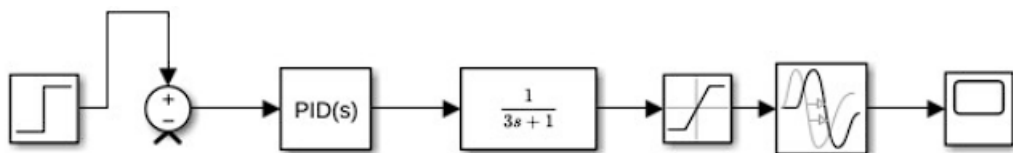


Рисунок 6.1 – Структурна схема моделі контуру автоматичного регулювання тиску в MATLAB Simulink

Під час моделювання на вхід системи подавався ступінчастий сигнал завдання тиску величиною 0,3 МПа. Результати моделювання наведені на рисунку 6.2.

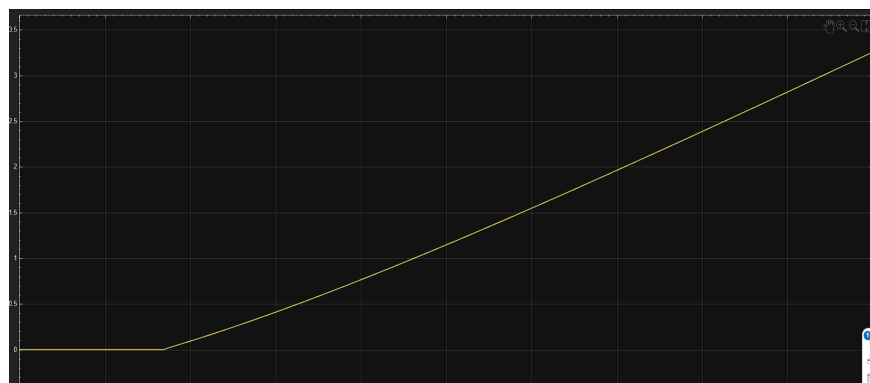


Рисунок 6.2 – перехідна характеристика системи автоматичного регулювання тиску

						АтаБС-002.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			37



## РОЗДІЛ 7

### ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ

#### 7.1 Визначення вартості технічних засобів автоматизації

Вартість усіх технічних засобів автоматизації визначена на підставі актуальних цін виробників і дистриб'юторів та зведена до таблиці 7.1.

Таблиця 7.1 – Вартість технічних засобів автоматизації

Найменування	Тип	Кіл.	Ціна, грн.	Сума, грн.
1	2	3	4	5
Давач тиску	ifm PI2794	1	8 400	8 400
Давач рівня ультразвуковий	E+H FMU30	1	12 600	12 600
Сигналізатор рівня	E+H FTL31	2	6 800	13 600
Давач температури	ifm TA2405	1	5 200	5 200
Витратомір електромагнітний	ifm SM8100	1	18 500	18 500
Частотний перетворювач	Siemens SINAMICS G120C	1	24 800	24 800
Клапан пневматичний	Alfa Laval Unique SSV	3	9 600	28 800
Блок живлення	SIMATIC PS 307	1	4 200	4 200
Центральний процесор	CPU 315-2 PN/DP	1	38 600	38 600
Панель оператора	SIMATIC TP700 Comfort	1	32 400	32 400
Шафа керування	Spacial SFX	1	8 800	8 800
Автоматичні вимикачі	Acti9 iC60N	3	680	2 040

					АтаБС-002.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						40
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1	2	3	4	5
Проміжні реле	Phoenix Contact RIF-0	6	420	2 520
Кабельна продукція	–	–	–	8 600
Всього				231 460

## 7.2 Розрахунок загальних капітальних витрат

Загальні капітальні витрати на впровадження системи автоматизації визначаються за формулою (7.1):

$$B = B_1 + B_2 + B_3 + B_4, \quad (7.1)$$

де  $B_1$  – вартість технічних засобів автоматизації, грн;

$B_2$  – транспортні витрати, грн;

$B_3$  – витрати на монтаж, грн;

$B_4$  – витрати на налагодження, грн.

Транспортні витрати становлять 15 відсотків від вартості обладнання:

$$B_2 = B_1 \cdot 0,15 = 231460 \cdot 0,15 = 34719 \text{ грн.}$$

Витрати на монтаж становлять 30 відсотків від вартості обладнання:

$$B_3 = B_1 \cdot 0,30 = 231460 \cdot 0,30 = 69438 \text{ грн.}$$

Витрати на налагодження становлять 10 відсотків від вартості обладнання:

$$B_4 = B_1 \cdot 0,10 = 231460 \cdot 0,10 = 23146 \text{ грн.}$$

Загальні капітальні витрати:

$$B = 231460 + 34719 + 69438 + 23146 = 358763 \text{ грн.}$$

Проведений розрахунок показав, що загальні капітальні витрати на впровадження розробленої автоматизованої системи керування ділянкою подачі молока становлять 358763 грн.

					АтаБС-002.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						41
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Впровадження системи дозволить підвищити точність дозування молока, знизити вплив людського фактора на якість продукції, зменшити енергоспоживання насосного агрегата завдяки частотному регулюванню та забезпечити надійний захист обладнання від аварійних режимів роботи.

Висновки: проведено оцінку вартості технічних засобів і загальних капітальних витрат, а також розрахунок економічного ефекту від впровадження системи. Впровадження автоматизації призведе до зниження втрат продукту, підвищення точності фасування, зменшення простоїв і енерговитрат за рахунок оптимізації роботи насоса.

Розрахунки показують, що інвестиції є економічно доцільними і мають реальний термін окупності при врахуванні підвищення продуктивності і зниження експлуатаційних витрат.

					АтаБС-002.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						42
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ВИСНОВКИ

На основі проведеного аналізу технологічного процесу виробництва пастеризованого молока можна зробити наступні висновки:

1. Для забезпечення стабільної роботи ділянки подачі молока, підвищення точності дозування та покращення якості готової продукції необхідно впровадити автоматизовану систему керування, яка забезпечує автоматичне регулювання технологічних параметрів, дистанційне керування обладнанням, технологічний контроль, аварійний захист, блокування та сигналізацію.

2. Для забезпечення надійної роботи технологічного обладнання та підвищення ефективності виробничого процесу було виконано:

- аналіз технологічного процесу подачі молока як об'єкта автоматизації;
- розробку функціональної схеми автоматизації із вибором необхідних засобів вимірювання та керування;
- вибір програмованого логічного контролера, панелі оператора та виконавчих механізмів;
- розробку принципової електричної схеми підключення датчиків та виконавчих пристроїв;
- розрахунок системи автоматичного регулювання тиску в трубопроводі подачі молока та перевірку її показників якості;
- розробку алгоритму функціонування системи та програмного забезпечення контролера в середовищі TIA Portal V21;
- виконання техніко-економічного обґрунтування впровадження розробленої системи.

3. Розроблено функціональну схему автоматизації ділянки подачі молока до зважувально-фасувальної машини, яка забезпечує контроль і регулювання основних технологічних параметрів процесу.

					АтаБС-002.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						43
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4. На основі проведеного вибору технічних засобів автоматизації можна зробити наступні висновки:

- для контролю тиску в трубопроводі використовується давач тиску ifm PI2794;
- для контролю рівня молока в резервуарі використовується ультразвуковий рівнемір Endress+Hauser Prosonic FMU30;
- для аварійного контролю рівня застосовуються сигналізатори рівня Endress+Hauser Liquiphant FTL31;
- для вимірювання температури молока використовується температурний давач ifm TA2405;
- для контролю витрати молока використовується електромагнітний витратомір ifm SM8100;
- для регулювання продуктивності насосного агрегату використовується частотний перетворювач Siemens SINAMICS G120C;
- в якості виконавчих механізмів використовуються пневматичні клапани Alfa Laval Unique SSV;
- для реалізації алгоритмів керування використовується програмований логічний контролер Siemens SIMATIC S7-300 CPU 315-2 PN/DP;
- для живлення системи автоматизації використовується блок живлення Siemens SIMATIC PS 307 5A;
- для візуалізації параметрів та керування технологічним процесом використовується операторська панель Siemens TP700 Comfort.

5. Проведено розрахунок системи автоматичного регулювання тиску в трубопроводі подачі молока.

Для цього було:

- визначено математичну модель об'єкта керування;
- розраховано параметри ПІД-регулятора;
- досліджено стійкість системи автоматичного регулювання;
- побудовано перехідну характеристику системи;

										АтаБС-002.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
											44
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							

– виконано моделювання роботи системи в середовищі MATLAB Simulink;

– визначено основні показники якості регулювання, які підтвердили працездатність та стійкість розробленої системи автоматичного керування.

6. Для підключення датчиків, виконавчих механізмів, частотного перетворювача та операторської панелі до програмованого контролера розроблено принципову електричну схему автоматизації.

7. Розроблено алгоритм функціонування системи керування, структуру програмного забезпечення та програму контролера в середовищі TIA Portal V21. Програмне забезпечення реалізоване на базі організаційного блоку OB1, функціонального блоку FB\_MilkSupply, блоку даних DB\_MilkSupply, функції масштабування аналогових сигналів FC\_SCALE та стандартного ПІД-регулятора FB41 CONT\_C. Розроблено також операторський інтерфейс HMI для контролю параметрів та керування технологічним процесом.

8. Результати техніко-економічного обґрунтування показали, що вартість технічних засобів автоматизації становить 231460 грн. Загальні капітальні витрати на впровадження системи автоматизації складають 358763 грн. Впровадження розробленої системи дозволить підвищити точність дозування молока, зменшити втрати сировини, скоротити енергоспоживання насосного обладнання, знизити вплив людського фактора та підвищити надійність роботи виробничої лінії.

					АтаБС-002.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						45
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Дейниченко Г. В., Дідух Г. О., Гуцуляк О. В. Технологія молока і молочних продуктів: підручник. Київ: Центр учбової літератури, 2022. 416 с.
2. Скалецький Ю. М., Романенко В. І. Технологічне обладнання підприємств молочної промисловості: навч. посіб. Київ: НУХТ, 2022. 358 с.
3. Siemens AG. SIMATIC S7-300 CPU 315-2 PN/DP. System Manual. Nuremberg: Siemens AG, 2024. 654 p.
4. Синєглазов В. М., Лорія М. Г. Автоматизація технологічних процесів харчових виробництв: підручник. Київ: Ліра-К, 2022. 344 с.
5. Пупена О. М., Ельперін І. В., Ладанюк А. П. Промислові мережі та інтеграційні технології в автоматизованих системах: навч. посіб. Київ: Ліра-К, 2023. 552 с.
6. ДСТУ 21.408:2022. Система проектної документації для будівництва. Правила виконання робочої документації автоматизації технологічних процесів. Чинний від 2023-01-01. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2022. 20 с.
7. Siemens AG. SIMATIC HMI TP700 Comfort. Operating Instructions. Nuremberg: Siemens AG, 2024. 428 p.
8. Siemens AG. PROFINET System Description. Nuremberg: Siemens AG, 2023. 312 p.
9. EHEDG. Hygienic Equipment Design Criteria. Brussels: European Hygienic Engineering & Design Group, 2023. 64 p.
10. ifm electronic GmbH. PI2794 Pressure Sensor. Technical Data Sheet. Essen: ifm electronic GmbH, 2024. 8 p.
11. Endress+Hauser AG. Prosonic FMU30. Technical Information. Reinach: Endress+Hauser AG, 2024. 52 p.
12. Endress+Hauser AG. Liquiphant FTL31. Operating Instructions. Reinach: Endress+Hauser AG, 2023. 48 p.

					АтаБС-002.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

13. ifm electronic GmbH. TA2405 Temperature Sensor. Technical Data Sheet. Essen: ifm electronic GmbH, 2024. 8 p.

14. ifm electronic GmbH. SM8100 Flow Sensor. Technical Data Sheet. Essen: ifm electronic GmbH, 2023. 12 p.

15. Alfa Laval Corporate AB. Unique SSV Single Seat Valve. Product Catalogue. Lund: Alfa Laval Corporate AB, 2024. 36 p.

16. ДСТУ 2.702:2022. Єдина система конструкторської документації. Правила виконання електричних схем. Чинний від 2023-01-01. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2022. 25 с.

17. ДСТУ ІЕС 61131-3:2022. Програмовані контролери. Частина 3. Мови програмування. Чинний від 2023-01-01. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2022. 190 с.

18. Siemens AG. Totally Integrated Automation Portal V21. Programming Manual. Nuremberg: Siemens AG, 2024. 1180 p.

19. Siemens AG. SINAMICS G120C. Operating Instructions. Nuremberg: Siemens AG, 2024. 356 p.

20. Siemens AG. WinCC Comfort V21. System Manual. Nuremberg: Siemens AG, 2024. 924 p.

					АтаБС-002.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						47
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		