

Міністерство освіти і науки України
Львівський національний університет ветеринарної медицини та
біотехнологій ім. С.З.Гжицького
Факультет механіки, енергетики та інформаційних технологій
Кафедра інформаційних технологій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

першого бакалаврського рівня на тему:

**«РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ
ПАСТЕРИЗАЦІЇ МОЛОКА НА БАЗІ КОНТРОЛЕРІВ SIEMENS»**

Виконав: студент групи Акт-42сп
спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-
інтегровані технології та робототехніка»

Дробіт В.Б.

Керівник роботи:

Запорожцев С.Ю.

ЛЬВІВ-2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Освітній ступінь «Бакалавр» за спеціальністю –
174 – „Автоматизація, комп’ютерно-інтегровані технології та робототехніка”

“ЗАТВЕРДЖУЮ”
Завідувач кафедри _____
д.т.н., проф. А.М. Тригуба
“___” _____ 202_ р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу студенту
Дробіту Віталію Богдановичу

1. Тема роботи

«Розробка системи автоматизації процесу пастеризації молока на базі контролерів Siemens»

Керівник роботи: Запорожцев Сергій Юрійович, к.т.н., доцент.
затверджена наказом по університету від “25” лютого 2025 р., № 123/к-с.

2. Строк подання студентом роботи: 10.06.2025 р.

3. Початкові дані до роботи:

Технологічні вимоги та обмеження при розробці автоматики для пристроїв пастеризації; ДСТи, СНіПи; документація основних виробників ПЛК.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки:

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ

1.1 Аналіз предметної області

1.2 Технологічні основи та параметри пастеризації молока

1.3 Нормативно-санітарні вимоги до обладнання та процесу

1.4 Основні фактори, що впливають на якість пастеризованого молока

1.5 Тенденції інновацій та перспективи розвитку пастеризації

2 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ЯК ОБ’ЄКТА КЕРУВАННЯ

2.1 Опис об’єкта автоматизації

2.2 Вхідні та вихідні технологічні параметри об’єкта керування

2.3 Сучасні методи автоматизації пастеризаційного процесу

2.4 Аналіз динаміки процесу пастеризації як об’єкта керування

3 РОЗРАХУНКИ ТА ВИБІР ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ

3.1 Вибір технічних засобів автоматизації

3.2 Розробка схеми автоматизації

3.3 Формалізація алгоритма управління

3.4 Розробка програми управління

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

5 ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

ВИСНОВКИ**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):
Аналіз предметної області. Технологічна схема установки пастеризації.
Особливості процесу пастеризації. Технологічні параметри об'єкта керування.
Технічні засоби реалізації та сигнали. Схема автоматизації. Циклограма роботи
установки пастеризації. Програма управління на мові FBD. Висновки.

6. Консультанти з розділів:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1, 2, 3, 5	Запорожцев С.Ю., доцент кафедри інформаційних технологій		
4	Городецький І.М., доцент кафедри управління проектами та безпеки виробництва		

7. Дата видачі завдання ____ 202__ р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Написання першого розділу та означення головних завдань роботи	25.02 - 21.03.25	
2	Виконання другого розділу та формування початкових даних	22.03 - 11.04.25	
3.	Виконання третього розділу та узагальнення отриманих результатів роботи	12.04 - 11.05.25	
4.	Написання розділу: «Охорона праці»	12.05 - 17.05.25	
5.	Вартісне оцінення ефективності пропозицій роботи	18.05 - 23.05.25	
6.	Завершення роботи в цілому	24.05 - 10.06.25	

Студент _____ Дробіт В.Б.
 (підпис)

Керівник роботи _____ Запорожцев С.Ю.
 (підпис)

РЕФЕРАТ

УДК 681.5:637.133.3

Розробка системи автоматизації процесу пастеризації молока на базі контролерів Siemens

Дробіт В.Б. Кафедра ІТ – Дубляни, ЛНУВМБ ім.С.З. Гжицького, 2025.

Кваліфікаційна робота: 56 с. текст. част., 10 рис., 1 табл., 11 арк. ілюстраційного матеріалу, 17 джерел.

Об'єкт дослідження – управління процесом пастеризації молока.

Мета роботи – підвищення ефективності технологічного процесу пастеризації молока за рахунок автоматизації на базі контролерів Siemens.

Проведено аналіз предметної області та визначені умови і властивості процесу пастеризації. Прийнято рішення про створення системи автоматизації на основі алгоритмічного підходу. З'ясовані основні технологічні параметри об'єкту керування, визначені вхідні та вихідні сигнали, обрані технічні засоби реалізації системи. Розроблена схема автоматизації, проведена прив'язка основних сигналів до виходів мікропроцесорного комплекта, перевірена узгодженість сигналів. Розроблена циклограма роботи пастеризаційної установки, відокремлені 5 тактів роботи та умови переключення системи між ними. Обрано середовище розробки, мова програмування та здійснена реалізація розробленого алгоритма на обраній мові. Перевірена робота програми в режимі емуляції. Результати свідчать про відповідність системи вимогам. Розроблені міри по охороні праці та проведені техніко-економічні розрахунки, які показали прийнятний термін окупності системи.

Ключові слова: пастеризація молока, автоматизоване управління, мікроконтролер, алгоритмічна мова FBD.

Keywords: milk pasteurization, automated control, microcontroller, FBD algorithmic language.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ	8
1.1 Аналіз предметної області	8
1.2 Технологічні основи та параметри пастеризації молока	10
1.3 Нормативно-санітарні вимоги до обладнання та процесу	14
1.4 Основні фактори, що впливають на якість пастеризованого молока	17
1.5 Тенденції інновацій та перспективи розвитку пастеризації	20
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ЯК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ	24
2.1 Опис об'єкта автоматизації	24
2.2 Вхідні та вихідні технологічні параметри об'єкта керування	27
2.3 Сучасні методи автоматизації пастеризаційного процесу	30
2.4 Аналіз динаміки процесу пастеризації як об'єкта керування	33
РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНКИ ТА ВИБІР ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ	38
3.1 Вибір технічних засобів автоматизації	38
3.2 Розробка схеми автоматизації	41
3.3 Формалізація алгоритма управління	42
3.4 Розробка програми управління	44
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА	47
РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ	51
ВИСНОВКИ	54
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	55

ВСТУП

Сучасна харчова промисловість дедалі більше орієнтується на високі стандарти якості, безпеки та ефективності виробництва. Однією з ключових ланок у забезпеченні санітарної надійності харчових продуктів є процес термічної обробки, зокрема пастеризація. Вона виконує критично важливу функцію — знищення патогенних мікроорганізмів при збереженні максимальної харчової цінності продукту. Молоко як біологічно активна речовина є особливо вразливим до мікробіологічного псування, тому процес пастеризації є визначальним для його якості, терміну зберігання та відповідності нормативним вимогам.

З розвитком індустрії 4.0 і цифровізації харчового виробництва питання автоматизації пастеризаційного процесу набуває особливої актуальності. Відмова від ручного регулювання на користь цифрових систем керування дозволяє не лише забезпечити точне дотримання температурного режиму, але й інтегрувати систему у загальний інформаційний простір підприємства. Таким чином, автоматизація дає змогу контролювати та аналізувати процеси у реальному часі, формувати звітність, зменшувати втрати сировини, покращувати енергоефективність та знижувати вплив людського фактора.

Окремої уваги заслуговує застосування промислових програмованих логічних контролерів (ПЛК), які є надійними елементами сучасних автоматизованих систем. Серед них контролери компанії Siemens займають провідні позиції завдяки своїй гнучкості, масштабованості, підтримці сучасних стандартів інтерфейсів, зручності програмування та інтеграції у SCADA-системи. Це робить їх оптимальним вибором для впровадження в технологічні процеси середнього і великого масштабу, включно з процесами пастеризації на молочних підприємствах.

Проблематика даної роботи полягає у необхідності забезпечити безперервне і стабільне функціонування пастеризаційної установки з

урахуванням жорстких технологічних параметрів. У реальних умовах виробництва температурні коливання, затримки у спрацюванні виконавчих механізмів, а також неточності ручного контролю можуть призводити до перевитрати енергоресурсів або порушення режиму термічної обробки, що критично впливає на якість готової продукції. Саме тому постає потреба у розробці адаптивної системи керування, що буде здатна оперативно реагувати на зміну вхідних параметрів та забезпечити стійкість процесу.

Перспективність автоматизації полягає також у можливості масштабування та модернізації. Розроблена система може бути надалі розширена шляхом додавання нових каналів контролю, інтеграції із загальнозаводською ERP-системою, впровадженням віддаленого моніторингу, аналізу ефективності, впровадження енергоменеджменту тощо. Такий підхід дозволяє не лише автоматизувати один окремий технологічний етап, але й створити підґрунтя для цифрової трансформації підприємства.

Об'єктом дослідження у цій роботі є процес пастеризації молока, а предметом — система автоматизованого керування цим процесом з використанням ПЛК Siemens. Метою роботи є вибір технічного забезпечення, аналіз параметрів регулювання та створення алгоритму керування для забезпечення надійної та ефективної роботи установки.

Таким чином, дана робота націлена на один із актуальних напрямів модернізації харчової промисловості — автоматизацію критично важливих процесів з використанням сучасних цифрових рішень. Її практичне значення полягає у підвищенні стабільності виробництва, зменшенні енергоспоживання, забезпеченні високої якості продукції та адаптації виробництва до сучасних вимог до безпечності харчових продуктів.

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ

1.1 Аналіз предметної області

Молочна галузь займає ключове місце в агропромисловому комплексі багатьох країн, зокрема України, де виробництво молока є не лише традиційною складовою харчової промисловості, а й важливою частиною економіки сільських регіонів. Продукти на основі молока мають високу поживну цінність, що зумовлює їх стабільний попит серед населення. У сучасних умовах споживач дедалі більше орієнтується на безпечність і якість харчових продуктів, тому технології обробки молока постійно удосконалюються для досягнення максимальної стабільності показників та збереження корисних властивостей.

Пастеризація [1-2] як етап первинної обробки молока має вирішальне значення для забезпечення мікробіологічної безпеки. Вона дозволяє знизити загальну кількість мікроорганізмів, знищити патогенні штами, водночас не змінюючи суттєво органолептичні властивості. На відміну від стерилізації, що повністю знезаражує молоко, але порушує його структуру, пастеризація має м'якший вплив, що дозволяє зберегти смак, запах і вітамінний склад. З технологічного погляду цей процес є не лише санітарною операцією, а й критичним етапом формування якості готового продукту, що визначає термін його зберігання та можливість подальшого використання у виробництві кисломолочних товарів, сирів чи інших похідних.

Типова структура виробничого процесу в молочному цеху [3-4] передбачає послідовність етапів від приймання сировини до розливу та пакування. Спочатку здійснюється попереднє охолодження і фільтрація сирого молока, після чого воно потрапляє в резервуари з мішалками або на модулі короткочасного зберігання. Потім є пастеризація, яка зазвичай виконується у пластинчастих або трубчастих теплообмінниках з точно контрольованими температурними

параметрами. Далі йде гомогенізація, охолодження, стандартизація за жирністю, а також можливе додавання ферментів чи заквасок. Важливою умовою є безперервність процесу, дотримання санітарних норм на кожному етапі та мінімізація впливу людського чинника.

На фоні загального зростання вимог до якості харчової продукції, молочна галузь дедалі більше потребує впровадження сучасних систем автоматизації. Застаріле обладнання, неуніфіковані системи керування та відсутність централізованого моніторингу залишаються типовими проблемами невеликих та середніх молокопереробних підприємств. Проте саме ці підприємства складають значну частку ринку, і для них автоматизація є не лише інструментом зниження витрат, а й способом залишатися конкурентоспроможними.

У сучасних умовах автоматизовані системи керування поступово змінюють традиційні підходи до виробництва. Замість ручного регулювання параметрів процесу — зокрема температури пастеризації — дедалі частіше застосовуються програмовані логічні контролери (ПЛК), здатні забезпечити високу точність, відтворюваність і оперативне реагування на відхилення. Такі системи легко інтегруються з модулями візуалізації, дозволяючи оператору в реальному часі контролювати стан обладнання, отримувати попередження про критичні події та збирати статистику.

Інтеграція цифрових технологій у молочному виробництві вже сьогодні охоплює не лише контроль температури та витрат, але й аналітику якості сировини, оптимізацію енергоспоживання, віддалений доступ до параметрів системи. Це дозволяє створювати так звані «розумні» виробничі лінії, де процеси адаптуються до змін зовнішніх умов або властивостей сировини. Такі підходи не лише забезпечують сталість продукції, а й суттєво знижують втрати через нестабільність або помилки в налаштуваннях.

В процесі поступової автоматизації виробництва зростає роль не лише самих технічних засобів, а й правильного налаштування технологічних режимів відповідно до властивостей молока. Впровадження автоматизованих систем неможливе без глибокого розуміння фізичних процесів, що відбуваються під час

теплової обробки, і вимог до них з боку технологів та санітарних регламентів. Тому, незалежно від рівня технічної складності системи, ефективність пастеризації завжди залишається в центрі уваги як з боку харчової безпеки, так і з боку енергетичної доцільності.

В галузі вже склалося кілька типових схем організації пастеризаційного процесу. Деякі підприємства застосовують довготривалу низькотемпературну обробку, інші орієнтовані на швидкі режими з інтенсивним охолодженням. Вибір режиму залежить від кінцевої мети виробництва, але в будь-якому випадку центральним елементом залишається досягнення стабільної температурної кривої з мінімальними коливаннями, оскільки навіть короточасне відхилення від заданих значень може суттєво вплинути на збереження мікрофлори або викликати фізико-хімічні зміни у структурі молока.

Автоматизація в такому контексті відіграє не лише виконавчу, а й діагностичну роль. Сучасні системи дозволяють виявити нестабільність температури, затримки у циркуляції теплоносія, зміну теплового навантаження в контурі, а також сигналізувати про забруднення теплообмінників. Проте щоб система працювала ефективно, на першому плані має стояти грамотне визначення параметрів самого процесу пастеризації — з урахуванням фізики теплопередачі, теплового балансу, динаміки масообміну та інерційності системи.

Усе це підводить до необхідності детального розгляду технологічних основ пастеризації молока. Саме ці основи — вибір температурних режимів, тривалості впливу, спосіб передачі тепла — визначають не лише санітарну ефективність, а й умови, за яких можна побудувати надійну та енергоефективну систему керування. Без глибокого аналізу цих питань неможливо перейти до вибору адекватних алгоритмів автоматизації чи параметрів регуляторів.

1.2 Технологічні основи та параметри пастеризації молока

Пастеризація як метод термічної обробки молока має на меті знищення патогенних мікроорганізмів без істотного погіршення органолептичних і

поживних властивостей продукту. [1-2] Цей процес базується на контрольованому нагріванні молока до певної температури з подальшим утриманням протягом заданого часу і швидким охолодженням. Обладнання для процесу пастеризації носить назву пастеризаторів (рис.1.1). Хоча принцип пастеризації є універсальним, конкретні температурно-часові режими суттєво впливають на якість кінцевого продукту, а тому повинні точно витримуватись в умовах виробництва.



Рисунок 1.1 - Пастеризатор

У промисловості використовуються кілька стандартних режимів пастеризації, серед яких найпоширенішими є низькотемпературна пастеризація (приблизно 63–65 °C протягом 30 хвилин), високотемпературна короткочасна пастеризація (72–75 °C протягом 15–30 секунд), а також ультрапастеризація (вище 85 °C до 135 °C на час менше 5 секунд). Вибір режиму зумовлений типом продукції, логістичними умовами і вимогами до терміну зберігання. Незалежно від вибраного режиму, точне дотримання параметрів має вирішальне значення для ефективності знезараження.

Фізико-хімічна поведінка молока під час нагрівання є складною через багатокомпонентний склад системи. Молоко містить білки (в основному казеїни

та сироваткові), жири у вигляді емульсій, лактозу, мінеральні речовини, ферменти та вітаміни. При нагріванні вище 60 °C починаються процеси денатурації сироваткових білків, зокрема β -лактоглобуліну та α -лактальбуміну. Денатуровані білки можуть взаємодіяти з казеїновими міцелами, що впливає на структуру і стабільність продукту. Ультрапастеризація додатково зумовлює зміну кольору і можливу карамелізацію лактози (реакція Майяра), що знижує органолептичну цінність, якщо не контролювати процес з достатньою точністю.

З точки зору теплового балансу, передача енергії до молока є процесом з тепловою інерційністю, що залежить від властивостей матеріалу трубопроводів, густини та теплоємності молока. Середнє значення густини молока при температурі 20 °C становить приблизно $\rho \approx 1028 \text{ кг/м}^3$, а питома теплоємність — близько $c \approx 3.9 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$. Ці характеристики дозволяють оцінити необхідну теплову потужність:

$$Q = mc\Delta T,$$

де Q — кількість теплоти, що необхідна для нагріву, m — маса молока, c — питома теплоємність, ΔT — різниця температур між початковою та кінцевою.

Окрім розрахунку енергоспоживання, ці параметри критично важливі для побудови автоматизованих алгоритмів керування. Зокрема, через теплову інерцію можливе відставання температури молока від температури теплоносія, що обумовлює необхідність у передбаченні регулятором динамічної поведінки системи.

Різка зміна температурного режиму або коливання у контурі теплообміну можуть спричинити часткову коагуляцію білків, осадження кальцієвих солей та деградацію вітамінів. Ці ефекти знижують якість молока, тому основним принципом пастеризації є не просто нагрів, а саме стабільний температурний профіль — з мінімальними відхиленнями від встановленої температури у допустимому діапазоні $\pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$.

Після завершення фази нагрівання критичною є стадія охолодження молока. З точки зору технологічного процесу, вона має не менше значення, ніж

пастеризація як така, оскільки запобігає розвитку термостабільної мікрофлори, що може активізуватися в умовах повільного зниження температури. У типовому потоці молока, що проходить через пластинчастий або трубчастий теплообмінник, використовують двоступеневе охолодження — спочатку до приблизно 30 °C водою, а потім нижче 6 °C охолодженим гліколем або холодоагентом. Завдяки цьому швидко зменшується мікробіологічна активність, зберігається свіжість і подовжується термін зберігання.

Фізичні параметри охолодження, як і у фазі нагрівання, залежать від теплоємності молока, температурного градієнта та ефективності теплообмінника. Найчастіше вдаються до протитечійної схеми циркуляції, яка дозволяє досягати максимального теплового градієнта при мінімальній різниці температур між молоком і охолоджувальним агентом. Крім того, ця схема дає змогу частково використати енергію гарячого молока для підігріву нової порції, що знижує витрати тепла й підвищує енергоефективність процесу. У випадку автоматизованих установок контролер має забезпечити плавність переходів температури, аби уникнути термошоку і руйнування структури продукту.

Динаміка пастеризації вимагає врахування таких змінних як температура теплоносія, об'ємна витрата молока, тепловий опір стінок трубок, а також час перебування рідини в зоні теплового контакту. Залежно від швидкості потоку, можлива неоднорідність прогрівання, особливо у трубчастих системах без турбулізації. Внаслідок цього виникає потреба в узгодженні гідравлічної та теплової частини системи, що є важливою передумовою для стабільної автоматизації.

Технічно пастеризація реалізується через керування контуром нагріву (зазвичай паровим або гарячою водою), де регулюється температура теплоносія через пропорційно-керовані клапани або за допомогою частотного регулювання насосів. У більшості сучасних установок температура молока контролюється на вході, всередині теплообмінника і на виході, що дозволяє будувати контур із зворотним зв'язком та компенсацією відхилень у реальному часі.

Формально, тепловий режим можна подати як диференціальне рівняння першого порядку, де зміна температури молока залежить від теплообміну:

$$\frac{dT_m}{dt} = \frac{kA}{mc}(T_h - T_m),$$

де T_m — температура молока, T_h — температура теплоносія, k — коефіцієнт теплопередачі, A — площа теплообміну, m — маса молока, c — питома теплоємність. Це рівняння демонструє інерційну поведінку системи, що прямо впливає на обрану стратегію керування — вона повинна враховувати як час реагування, так і допустимі коливання навколо заданої температури.

Ще одним аспектом є зміна реологічних властивостей молока під час обробки. Наприклад, при наближенні температури до 100 °C спостерігається зростання в'язкості, яке може викликати нерівномірність потоку, особливо у вузьких каналах. Це вимагає або модифікації параметрів циркуляції, або інтеграції додаткових сенсорів витрати та тиску в систему контролю.

Таким чином, пастеризація — це не лише питання забезпечення гігієнічної безпеки, а й складна фізико-технологічна задача, де ключову роль відіграють точність, динамічність і передбачуваність процесу. Саме ці аспекти і створюють основу для подальшого формування системи автоматизованого керування, що буде розглянуто у наступних розділах.

1.3 Нормативно-санітарні вимоги до обладнання та процесу

Пастеризація молока як технологічний процес не може розглядатися поза рамками суворих нормативно-санітарних вимог, що регламентують як обладнання, так і режим роботи. Виробництво харчових продуктів, особливо молочної продукції, перебуває під пильним контролем органів державного санітарного нагляду та стандартизації, оскільки безпека кінцевого продукту безпосередньо впливає на здоров'я споживачів. [5]

Вибір матеріалів для виготовлення обладнання є одним із базових елементів дотримання санітарних норм. Перш за все, всі поверхні, які контактують з молоком, мають бути виготовлені з харчової нержавіючої сталі, що має високу корозійну стійкість і не виділяє шкідливих речовин при тривалому контакті з харчовим середовищем. Це обумовлено необхідністю запобігання хімічному забрудненню та утворенню токсичних сполук. Матеріали, які не відповідають стандартам, можуть спричинити як деградацію смакових якостей продукту, так і його токсичність. Виробники обладнання зобов'язані надавати сертифікати відповідності, що підтверджують використання дозволених матеріалів.

Гігієнічні вимоги поширюються також на конструктивні особливості обладнання. Важливо, щоб всі елементи, включно з трубопроводами, клапанами та теплообмінниками, мали гладкі поверхні без тріщин і зазорів, де могли б накопичуватися залишки продукту або розвиватися мікроорганізми. Дотримання принципів «санітарного дизайну» передбачає можливість легкого розбирання, очищення та дезінфекції без розміщення важкодоступних зон. Це необхідно для підтримки безпеки виробничого циклу і запобігання контамінації.

Облік температурних режимів є ще одним ключовим чинником. Для гарантії ефективності пастеризації необхідно вести безперервний моніторинг температури на критичних точках технологічного контуру — зазвичай це вхідна, робоча (пастеризаційна) та вихідна точки. Записи температурних даних мають вестися з достатньою частотою і точністю, що дозволяє вчасно виявляти відхилення від заданих параметрів і оперативно реагувати. Збереження таких даних регламентується стандартами, оскільки вони є доказом дотримання технологічного режиму та можуть бути предметом перевірок контролюючих органів.

Автоматизація процесу повинна інтегрувати засоби збору та архівування інформації. Сучасні системи, засновані на промислових контролерах Siemens та супутньому ПЗ SCADA, надають можливість не лише реєструвати дані в

реальному часі, але й формувати звіти, виявляти тенденції, а також вести історію подій, що сприяє якісному контролю і забезпеченню простежуваності.

Окрім безпосередніх технічних вимог, важливим аспектом є нормативи, які регулюють загальну безпеку виробничого процесу. До них належать правила експлуатації обладнання, заходи з охорони праці та протипожежної безпеки, що обов'язково враховуються під час проектування та монтажу установок. Впровадження системи НАССР (Hazard Analysis and Critical Control Points) у виробничий цикл — це додатковий рівень гарантії безпеки, який вимагає ідентифікації критичних точок контролю, що включають пастеризацію як основний етап.

Наступною складовою нормативних вимог є регламентація частоти та методів очищення обладнання, яка має проводитися відповідно до затверджених процедур і з використанням сертифікованих миючих і дезінфекційних засобів. Регулярність таких процедур безпосередньо впливає на якість кінцевого продукту і безпеку виробництва.

Поряд із загальними санітарними нормами, у різних країнах існують додаткові стандарти та гігієнічні рекомендації, що регламентують параметри пастеризації, форми документації та допустимі межі відхилень. Для прикладу, у Європейському Союзі відповідальність за безпеку харчових продуктів закріплена у регламенті ЕС No 852/2004, який визначає загальні правила гігієни харчових продуктів. В Україні діють ДСТУ, які регулюють відповідні процеси, зокрема ДСТУ 3662:2018, що встановлює вимоги до обладнання харчової промисловості. [6]

Важливо відзначити, що контроль за відповідністю параметрів пастеризації не обмежується лише температурним режимом. До критичних параметрів також належать час нагрівання, швидкість охолодження, гігієнічний стан системи подачі молока та якість очищення теплообмінників. Усі ці показники підлягають суворому документальному контролю та періодичній валідації. Впровадження електронних систем збору даних дозволяє суттєво підвищити рівень контролю якості, а також знизити ризики людської помилки.

Сучасні нормативи також вимагають, щоб процес пастеризації був прозорим для контролюючих органів. Тому всі операції з обладнанням повинні бути зареєстровані в автоматизованих системах, а протоколи і журнали повинні зберігатися у доступному для аудиту вигляді протягом встановленого періоду. Це забезпечує можливість відстежити історію виробництва і своєчасно виявити будь-які відхилення, що можуть призвести до порушень санітарних норм або якості продукту.

Особливо важливим є забезпечення безперервності технологічного процесу і уникнення так званих «мертвих зон», де молоко може застоюватися, що підвищує ризик мікробіологічного забруднення. Для цього застосовуються спеціальні конструктивні рішення, а також автоматизовані системи контролю та підтримки параметрів у заданих межах. Окрім того, вимоги нормативів передбачають регулярне калібрування вимірювальних приладів і датчиків, що гарантує точність контролю та виключає похибки, які можуть призвести до зниження ефективності пастеризації.

Підсумовуючи, нормативно-санітарні вимоги до процесу пастеризації є комплексом технічних, гігієнічних і адміністративних заходів, що разом створюють умови для виробництва безпечної, якісної молочної продукції. Впровадження цих вимог є не лише обов'язком виробника, а й гарантією довіри споживачів, що має першорядне значення для стабільності та розвитку молочної галузі. При цьому сучасні автоматизовані системи управління і контролю, зокрема на базі контролерів Siemens, відкривають нові можливості для дотримання вимог і підвищення ефективності виробництва.

1.4 Основні фактори, що впливають на якість пастеризованого молока

Розпочинаючи розгляд основних ризиків і факторів, що впливають на якість пастеризованого молока [7-8], слід усвідомлювати, що процес пастеризації є не просто нагріванням продукту, а комплексною технологічною операцією, від якої залежить не лише безпека кінцевого продукту, а й його харчова цінність та

органолептичні властивості. Основною метою пастеризації є знищення патогенних і умовно-патогенних мікроорганізмів, які можуть спричинити харчові отруєння або зіпсувати молоко. Проте недостатнє дотримання температурних режимів або часу обробки призводить до залишку живих мікробів, що ставить під загрозу санітарну безпеку продукту. З іншого боку, надмірний нагрів може погіршити поживні якості молока та змінити його смакові властивості.

Наявність патогенів у молоці після пастеризації є найгіршим сценарієм з точки зору безпеки споживача. Основною причиною цього є порушення режимів нагрівання — як температурного, так і часового параметра. Якщо температура нагріву не досягає мінімально необхідної, або тривалість обробки занадто коротка, збудники інфекцій можуть виживати, залишаючись у продукті. Такий дефект може виникати через технічні несправності обладнання, неправильно задані налаштування або людський фактор. Впровадження систем автоматичного контролю й управління з використанням ПЛК дозволяє мінімізувати ці ризики, адже забезпечує стабільність режимів і оперативне реагування на відхилення.

Водночас процес пастеризації, навіть при дотриманні всіх технологічних норм, може спричинити зміну фізико-хімічних характеристик молока. Під впливом температури відбувається денатурація білків, зокрема сироваткових, що змінює структуру молочного білка і може впливати на засвоюваність і смак. Зниження вмісту вітамінів, особливо термолабільних, таких як вітамін С та деякі вітаміни групи В, також є неминучим побічним ефектом. Однак грамотне регулювання температури і часу дозволяє мінімізувати ці втрати, зберігаючи при цьому необхідний рівень мікробіологічної безпеки.

Ризик контамінації продукту на різних етапах технологічного процесу — ще один важливий фактор, який впливає на якість пастеризованого молока. Навіть ідеально виконана пастеризація не захистить продукт, якщо після термічної обробки відбудеться повторне забруднення через забруднене обладнання, порушення гігієнічних норм або контакт з забрудненими

середовищами. Для мінімізації таких ризиків застосовують суворий контроль чистоти та стерильності обладнання, регулярне санітарне обслуговування і, в сучасних системах, автоматизований моніторинг стану виробничої лінії.

Особливу увагу слід приділяти інерційності процесу пастеризації, яка пов'язана із затримками у системі теплообміну та циркуляції молока. Затримка у досягненні необхідної температури або її підтримці протягом встановленого часу може призвести до зниження ефективності знищення мікроорганізмів. Автоматизовані системи керування повинні враховувати ці фактори, забезпечуючи точне регулювання і швидке коригування режимів.

Нарешті, слід враховувати, що якість пастеризованого молока залежить не лише від технології нагрівання, а й від початкової якості сировини. Молоко, яке містить високу концентрацію мікробіологічних або хімічних забруднень, вимагає більш жорсткого контролю та точного дотримання режимів пастеризації, і навіть у цьому випадку ризики можуть залишатися значними. Важливо, щоб система автоматизації мала можливість інтеграції з датчиками контролю якості сировини, що дозволить своєчасно виявляти і враховувати зміну її характеристик у процесі обробки.

Варто також звернути увагу на вплив мікробіологічної стабільності протягом усього виробничого циклу. Пастеризація — це лише один з етапів забезпечення безпеки молочних продуктів. Проте, якщо умови зберігання після термічної обробки не відповідають нормативам, можливе відновлення або навіть розмноження залишкових мікроорганізмів. Цей процес сприяє погіршенню органолептичних властивостей і зниженню терміну зберігання продукту. З урахуванням цього важливо, щоб система автоматизації пастеризації включала контроль не тільки температурних режимів нагріву і охолодження, але й умови подальшого зберігання та транспортування молока.

Значущим фактором є також вплив швидкості охолодження молока після нагрівання. Невідповідна швидкість охолодження може призвести до утворення осаду, зміни смакових якостей або порушення фізико-хімічної структури. Оптимальний режим охолодження повинен забезпечувати швидке зниження

температури до рівня, при якому пригнічується ріст мікроорганізмів, але при цьому не порушуються цінні якості продукту. В автоматизованих системах управління цей процес контролюється за допомогою датчиків температури та алгоритмів, які регулюють роботу охолоджуючих елементів.

З точки зору безпеки, надзвичайно важливою є надійність систем контролю температури. Помилки у вимірюваннях або збій датчиків можуть спричинити неконтрольоване відхилення параметрів і вихід продукту за межі допустимих норм. Для зменшення цих ризиків використовують резервування вимірювальних каналів, регулярне калібрування обладнання і впровадження систем діагностики несправностей. В автоматизованих установках на базі ПЛК, таких як Siemens, це реалізується через впровадження багаторівневих алгоритмів контролю зворотного зв'язку.

Окрім технологічних і санітарних аспектів, до ризиків належать також питання людського фактору. Помилки оператора, недостатня кваліфікація або недотримання процедур можуть призвести до некоректної роботи системи, порушення технологічних режимів і, відповідно, погіршення якості пастеризованого молока. Автоматизація і стандартизація процесів частково знижують цей ризик, проте вимагають додаткових заходів з навчання персоналу та впровадження систем моніторингу роботи операторів.

Враховуючи наведені фактори, створення надійної системи автоматизації пастеризаційного процесу є ключовим елементом для забезпечення стабільної якості продукту, безпеки споживачів і ефективності виробництва. Така система повинна інтегрувати функції контролю температурних режимів, часу обробки, швидкості охолодження, а також моніторингу і запобігання ризикам, що виникають у процесі виробництва.

1.5 Тенденції інновацій та перспективи розвитку пастеризації

Розвиток технологій пастеризації молока тісно пов'язаний із загальними тенденціями інновацій у харчовій промисловості та підвищенням вимог до якості

та безпеки продуктів. [9-10] В сучасних умовах, коли споживачі все більше уваги приділяють збереженню поживних речовин, натуральності та екологічності, традиційні методи пастеризації зазнають суттєвих трансформацій. Важливою складовою цих змін є інтеграція новітніх технологій, які дозволяють оптимізувати теплову обробку, знизити енергоспоживання та підвищити загальну ефективність виробничих процесів.

Одним із напрямів інновацій є застосування ультрафіолетового (УФ) опромінення як доповнення або альтернативи класичній пастеризації. УФ-опромінення дозволяє знищувати бактерії та патогени без використання високих температур, що допомагає зберегти природний склад молока, включаючи вітаміни та ферменти. Технологія є екологічно безпечною і може бути інтегрована в існуючі виробничі лінії з використанням автоматизованих систем контролю дози опромінення. Проте існують виклики, пов'язані з проникненням УФ-променів через мутні середовища та необхідністю точного регулювання експозиції, що вимагає високої точності вимірювальних приладів та адаптивних алгоритмів керування.

Ультразвукова пастеризація — це ще одна перспективна технологія, яка використовує механічні хвилі високої частоти для знищення мікроорганізмів. Такий метод менш енергоємний і швидкий у порівнянні з традиційним нагрівом, що потенційно підвищує продуктивність і зменшує вплив на якість продукту. Впровадження ультразвукової обробки вимагає ретельного проектування систем управління для забезпечення стабільності параметрів обробки, таких як інтенсивність хвиль, час впливу та температура. Автоматизація на базі сучасних контролерів дозволяє реалізувати багатофакторне регулювання, яке адаптується під різні умови виробництва.

Мембранні технології стають важливим елементом у системах очистки і сепарації молока, що доповнюють процес пастеризації. За допомогою ультрафільтрації, нанофільтрації та зворотного осмосу можливо видаляти мікроорганізми, білкові фракції та інші домішки, підвищуючи якість та безпеку кінцевого продукту. Інтеграція мембранних систем у автоматизовані лінії

вимагає комплексного підходу до контролю тиску, температури та потоків, що забезпечується сучасними ПЛК з розвиненими функціями збору і аналізу даних.

Автоматизація в цих інноваційних технологіях відіграє вирішальну роль, оскільки саме вона дозволяє забезпечити стабільність режимів, своєчасне виявлення відхилень, адаптивне управління параметрами та зменшення впливу людського фактора. Використання контролерів Siemens з їхньою архітектурою, модульністю та підтримкою протоколів зв'язку сприяє швидкій інтеграції нових методів обробки молока в існуючі виробничі системи. Впровадження SCADA/HMI рішень забезпечує зручний моніторинг і контроль в реальному часі, а також історію технологічних процесів для аналізу та оптимізації.

Загалом, перспективи розвитку пастеризації пов'язані з гармонійним поєднанням класичних теплових методів та інноваційних технологій, що підтримуються високим рівнем автоматизації. Це дозволяє не лише підвищити якість і безпеку молочної продукції, а й знизити енергоспоживання, підвищити екологічність виробництва та адаптуватися до вимог ринку, що постійно змінюються. Подальші дослідження у сфері автоматизованих систем управління дозволять розробляти більш гнучкі, надійні та ефективні рішення для пастеризаційних підприємств будь-якого масштабу.

Інноваційний розвиток у сфері пастеризації молока має не лише технологічний, а й значний економічний та екологічний вимір. Використання сучасних методів і автоматизованих систем дозволяє знизити витрати енергії та ресурсів, що є важливим аспектом для сталого виробництва. Крім того, підвищення ефективності процесів сприяє зменшенню втрат продукту і покращенню якості, що безпосередньо впливає на конкурентоспроможність підприємств молочної галузі. З екологічної точки зору, інновації допомагають мінімізувати негативний вплив на довкілля, зокрема шляхом оптимізації використання води, енергоресурсів та зменшення відходів.

У сучасних умовах цифровізація стає ключовим фактором трансформації технологічних процесів. Інтеграція Інтернету речей (IoT), аналітики великих даних та штучного інтелекту відкриває нові горизонти для автоматизації

пастеризації. Завдяки цим технологіям з'являється можливість більш точного моніторингу параметрів, прогнозування потенційних збоїв та адаптивного керування процесом в режимі реального часу. Це не лише підвищує надійність систем, а й дозволяє швидко реагувати на зміну умов виробництва.

Проте, попри очевидні переваги, впровадження інновацій пов'язане з певними викликами. Висока вартість нового обладнання та систем управління може стати бар'єром для малих і середніх підприємств. Необхідність підготовки або перепідготовки персоналу вимагає додаткових ресурсів і часу. Також існують технічні складнощі сумісності нових технологій із наявним обладнанням і виробничими лініями. Усе це потребує комплексного підходу до планування модернізації, що враховує як технологічні, так і організаційні аспекти.

Отже, перспективи розвитку пастеризації молока тісно пов'язані із впровадженням інноваційних технологій та автоматизації, які дають змогу підвищити ефективність і якість процесу, адаптуватися до сучасних вимог ринку та сталого розвитку. У наступних розділах роботи буде розглянуто більш детально структуру системи автоматизації та особливості керування технологічним процесом, що дозволить створити комплексне уявлення про можливості реалізації сучасних рішень на базі контролерів Siemens.

РОЗДІЛ 2

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ЯК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

2.1 Опис об'єкта автоматизації

Перед визначенням основних функцій, які має виконувати розроблювана система управління, треба дослідити, як зазвичай організований технологічний процес. Будемо розглядати короточасний метод пастеризації, як найпоширеніший на виробництві. На рис.2.1 наведено технологічну схему установки короточасної пастеризації. [11]

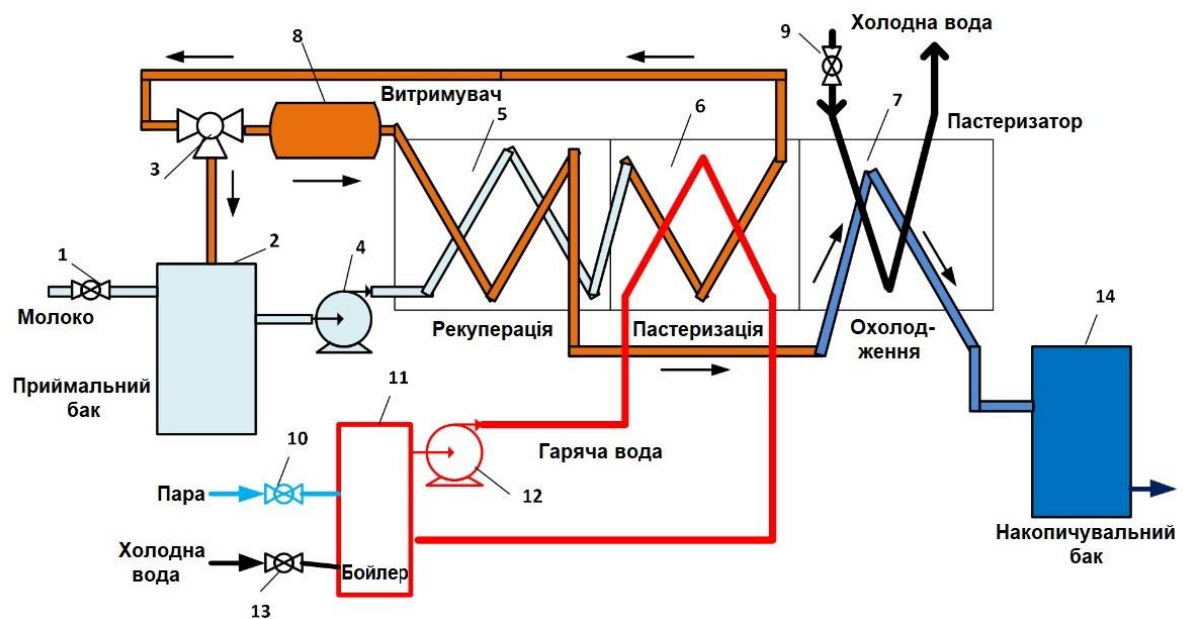


Рисунок 2.1 - Технологічна схема установки пастеризації

Установка пастеризації складається з наступних основних елементів: приймального бака 2, в який молоко подається через вентиль 1, молочного насоса 4, пластинчастого пастеризаційного пристрою, молочного витримувача 8 і електрогідравлічного перепускового клапана 3. Сам блок пастеризації складається з трьох секцій: рекуперації (теплообміну) 5, пастеризації 6 і охолодження 7.

Установка працює наступним чином. Сире молоко надходить у приймальний бак 2, звідки подається насосом 4 до секції рекуперації 5, де нагрівається до температури $+37...+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ і надходить у пастеризаційну секцію 6, де нагрівається гарячою водою до температури $+76\text{ }^{\circ}\text{C}$. З ділянки пастеризації молоко надходить на електрогідравлічний перепускний клапан 3, який, якщо молоко нагрілося до заданої температури, направляє його в витримувач 8. Якщо ж молоко не нагрівається, то надходить в приймальний бак 2 для повторної пастеризації.

Молоко тримають в витримувачі протягом 20 секунд, а потім направляють в охолоджувальну секцію - для охолодження крижаною водою, після чого воно надходить в накопичувальний бак 14. Для отримання крижаної води використовуються холодильні машини. Подача холодної води регулюється краном 9.

Гаряча вода для пастеризації нагрівається в котлі 11 парою, що надходить з парової труби, на якій встановлений електрогідравлічний клапан 10, що регулює подачу пара в залежності від температури молока.

Далі гаряча вода з котла насосом 12 подається в пастеризаційне відділення. Холодна вода надходить в котел 11 через кран 13.

Таким чином, установка пастеризації являє собою технологічну лінію по переробці молока в замкнутому потоці з автоматичним регулюванням технологічного процесу. Опишемо функції, які повинна виконувати система управління:

- запуск всієї технологічної лінії в автоматичному режимі за допомогою кнопки «ПУСК»;
- зупинка технологічної лінії після виконання всіх операцій або в результаті аварійної ситуації за допомогою кнопки «СТОП»;
- включення елементів технологічної лінії після натискання кнопки «ПУСК» відбувається в такій послідовності: відкривається впускний клапан 1 і молоко надходить в приймальний бак; відкриваються вентилі подачі пари 10 і

холодної води 13 котла; відкривається вентиль 9 для подачі крижаної води в охолоджуючу секцію пастеризатора 7;

- після заповнення приймального бака включається молочний насос 4 за сигналом датчика рівня молока, клапан 1 закривається і молоко подається на пастеризатор;

- при заповненні водою бойлера 11 і системи підігріву молока пастеризатора 6 водою (за сигналом датчика тиску води в трубопроводі гарячої води) клапан 13 закривається і включається насос гарячої води 12;

- температура в контурі гарячого водопостачання (за допомогою датчика температури води) підтримується рівною заданій температурі шляхом зміни положення клапана подачі пари 10;

- перемикання триходового клапана 3 здійснюється в залежності від температури молока, що вимірюється за допомогою датчика температури в трубопроводі пастеризаційної ділянки; коли температура молока досягає заданої, або трохи вище, клапан переходить в положення 2 (молоко в сторону витримувача); у всіх інших випадках клапан знаходиться в положенні 1 – молоко надходить назад в накопичувальний бак;

- при натисканні кнопки «СТОП» відключаються всі насоси і закриваються всі вентиля;

- після спорожнення молокоприймального бака (за сигналом датчика рівня) прилади відключаються в наступному порядку: відключається молоконасос; через 3 хвилини насос гарячої води 12 також відключається, вентиль подачі пари 10 і вентиль холодної води 9 закриваються.

Згідно з поставленим завданням, система управління повинна забезпечувати задану логіку включення і виключення елементів пастеризаційного агрегату, а також вирішувати завдання автоматичного регулювання основного параметра його роботи - температури пастеризованого молока в витримувачі. Температуру пастеризації слід підтримувати на рівні $+76 \pm 1$ °C. Датчик рівня молока виступає в ролі сигналізації, подаючи сигнали тільки при досягненні нижнього і верхнього рівнів, відповідно 0 і 2 м. Його

призначення полягає в подачі сигналу при досягненні тиску в трубопроводі 1,5 кПа.

2.2 Вхідні та вихідні технологічні параметри об'єкта керування

Спробуємо зафіксувати всі технологічні сигнали, які надходять на систему керування, а також ті, якими вона оперує, — без заглиблення в алгоритми або структурні рішення ПЛК. Мова йтиме про фізичні параметри, їхні метрологічні характеристики і часові вимоги до зчитування та реакції. Таке чітке розмежування дасть можливість інженерам з апаратури і програмістам незалежно працювати над деталізацією кожної сигнальної лінії.

Почнемо з вхідних параметрів (датчиків), що відображають реальний стан технологічного процесу. У ключовій точці пастеризаційної секції вимірюється температура молока безпосередньо в трубопроводі перед нагрівальним елементом. Точність цього вимірювання повинна бути не гірша за $\pm 0,2$ градуса Цельсія, оскільки навіть незначне відхилення від цільового значення $76\text{ }^{\circ}\text{C}$ може вплинути на мікробіологічний результат. Частота зчитування — не рідше одного разу на секунду, з максимальною затримкою передачі сигналу до контролера менше 200 мілісекунд. Аналогічні вимірювання організовують на виході із рекупераційної секції, де молоко має перед нагріванням підвищуватися до попередньо встановленої температури близько $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, а також у точці виходу з охолоджувача — там температура має бути зафіксована з точністю $\pm 0,5$ градуса при зчитуванні з такою ж частотою, що й у пастеризаційній зоні.

Рівень молока в приймальному баку фіксується двома електронними датчиками — на верхньому і нижньому рівнях. Ці датчики мають дискретний вихід, який подає сигнал на контролер лише при досягненні заданих меж (0 м та 2 м відповідно). Вони не мають плавної шкали, але забезпечують надійне спрацьовування за час не більше 100 мілісекунд від моменту досягнення рівня. Аналогічний рівневий контроль організовується в накопичувальному баку після

охолодження, що дозволяє аналізувати ефективність подачі крижаної води та своєчасно запускати або зупиняти накопичувальний насос.

Тиск у трубопроводах гарячої та холодної води контролюється окремими сенсорами, які видають аналоговий сигнал 4...20 мА. Діапазони цих датчиків охоплюють від 0 до 1,5 кПа для гарячої води й до 0,8 кПа для холодної, з точністю $\pm 1\%$ від повного діапазону. Частота зчитувань в умовах стабільного процесу може бути знижена до одного разу на п'ять секунд, але у моменти запуску або після аварійних сигналів вона збільшується до одного разу на секунду. Час від встановлення тиску до надходження відображення в ПЛК не перевищує півсекунди, а центрування даних для SCADA забезпечує вузол архівації з інтервалом у десять секунд.

Ще одним важливим вхідним показником є витрата молока. Цей параметр безпосередньо впливає на час перебування рідини в пастеризаційній секції і, отже, на біоцидну ефективність процесу. Для вимірювання використовують електромагнітні витратоміри, які видають цифровий імпульсний сигнал із частотою пропорційною швидкості потоку. Діапазон роботи приладу охоплює від 1 до 10 кубічних метрів на годину, похибка на рівні $\pm 0,5\%$, і затримка передачі інформації до блоку збору не перевищує 300 мілісекунд. Для верифікації стабільності показників дані про об'єм проходження молока автоматично архівуються із часовим штампом у SCADA-системі.

Вихідні параметри системи керування відображають ту частину технологічного процесу, за яку контролер відповідає безпосередньо, перетворюючи цифрові або аналогові сигнали в дію механічних або гідравлічних пристроїв. У загальному вигляді це насоси, що створюють необхідні циркуляційні потоки, та клапани, які регулюють пропускну здатність контуру. Незалежно від конкретної конструкції, для кожного виконавчого елемента необхідно визначити тип сигналу, часові характеристики й точність позиціонування, адже від швидкості та плавності їхньої реакції залежить стабільність температурного режиму та безперебійність процесу пастеризації.

Насоси, що рухають молоко чи теплоносії, зазвичай отримують команду вмикання та вимикання, іноді доповнену регулюванням частоти обертання. Спрацювання такого виконавчого пристрою вимагає часу від декількох сотень мілісекунд до однієї секунди, аби досягнути робочого режиму. Для узгодження реакції контролера з динамікою системи необхідно, щоб після подачі команди нею враховувалася затримка виходу на повну потужність, оскільки різка зміна витратної характеристики може спричинити коливання тиску або температури. Аналогова або імпульсна природа сигналу у цьому разі не настільки критична, як точність моменту його подачі та можливість відстежити стан насоса — активний чи в стані очікування.

Клапани, які регулюють надходження гарячої та холодної води в теплообмінні секції, бувають як дискретними з двома положеннями (відкрито—закрито), так і пропорційними з проміжними позиціями. У першому випадку час спрацювання має бути достатньо коротким (порядку 200–300 мілісекунд) для запобігання значних коливань температурного профілю, тоді як у випадку пропорційного клапана важлива плавність переходу між крайніми станами. Плавна зміна відкриття забезпечує коректне дозування теплової енергії та запобігає гідравлічним ударам. Для обох типів виконавчих механізмів критичною є можливість зворотного зв'язку — контролер повинен отримувати підтвердження про фактичний стан (статичне чи динамічне), аби коригувати свої дії в реальному часі.

Важливим параметром є також синхронність роботи насосів та клапанів. Наприклад, включення циркуляційного насоса без одночасного відкривання клапана холодної води при охолодженні призведе до збільшення гідравлічного опору та можливого перегріву теплообмінника. Тому система керування повинна забезпечувати короткі затримки між подачею команд на різні виконавчі пристрої — у межах 100–200 мілісекунд, а також вбудовані перевірки виконання команд (наприклад, за сигналами з лінії блокувань чи моніторингу струму живлення).

Крім того, архівація та моніторинг стану виконавчих елементів є невід'ємною частиною вихідних параметрів. Хоча це технічно не є «виходом» у

класичному розумінні, запис інформації про послідовність та час увімкнення насосів, про відкриття клапанів і ступінь їхнього відкриття дає змогу відтворити хронологію процесу, провести верифікацію коректності роботи й виявити аномалії. Зазначені дані передаються в SCADA-систему з інтервалом, оптимальним для аналізу трендів (наприклад, раз на десять секунд), але наявність буферизації і можливість детального логування кожної дії є критично важливою для забезпечення збереження якості та перевірки відповідності встановленим нормам.

2.3 Сучасні методи автоматизації пастеризаційного процесу

Автоматизація пастеризаційного процесу на сучасному молокопереробному підприємстві базується на впровадженні інтегрованих апаратно-програмних рішень, що поєднують точність контролю, безперервність запису технологічних параметрів та гнучкість в управлінні. Враховуючи високу чутливість молока до коливань температури, зокрема на етапах нагріву, витримки й охолодження, автоматизація має забезпечувати швидку реакцію системи на зміну умов і гарантовану стабільність параметрів. [12-14]

У контексті європейських стандартів харчової безпеки, провідне місце серед апаратних засобів керування займають програмовані логічні контролери Siemens, зокрема серії S7-1200 і S7-1500. [15-16] Їх застосування у харчовій промисловості виправдане високою точністю обробки аналогових сигналів, розширеними можливостями конфігурування каналів збору даних і сумісністю з широким спектром промислових датчиків. Сучасні ПЛК цієї серії підтримують побудову децентралізованої структури з підключенням модулів через мережу PROFINET, що дозволяє легко масштабувати систему під конкретну технологічну лінію.

Особливу роль у забезпеченні ефективності займає розробка системи в середовищі TIA Portal. Це дозволяє поєднати програмування ПЛК, налаштування HMI-панелей і зв'язок з SCADA-рівнем у єдиному проектному середовищі, що

значно скорочує час розробки й мінімізує помилки синхронізації між компонентами. TIA Portal також підтримує моделювання процесу в режимі емуляції, що дає змогу перевірити логіку програми ще до фактичного запуску на обладнанні. Такий підхід особливо актуальний для об'єктів харчової промисловості, де простої технологічної лінії призводять до втрат продукції та порушення санітарних норм.

Для візуалізації та управління технологічним процесом в умовах реального часу використовуються HMI-панелі Siemens Comfort або Basic-серії. Їхнє графічне середовище дозволяє не тільки оперативно змінювати уставки, але й виводити актуальну інформацію про стан обладнання, аварійні повідомлення та тренди змін температури. Це суттєво спрощує роботу обслуговуючого персоналу, оскільки в одному вікні оператор отримує всю необхідну інформацію для прийняття рішень. Сучасні панелі підтримують функції логування даних та експорту журналів на зовнішні носії, що дозволяє дублювати збереження даних навіть у разі відмови центральної SCADA-системи.

Архітектура збору й обробки даних у сучасних пастеризаційних установках побудована за принципом централізованого SCADA-контролю, який взаємодіє з кількома ПЛК через відкриті промислові протоколи, зокрема OPC UA. На відміну від застарілих протоколів, таких як Modbus або Profibus, OPC UA не лише забезпечує безпечну передачу даних через TCP/IP, але й дозволяє формувати ієрархічні моделі об'єктів, що відповідають реальній структурі технологічної установки. Це спрощує масштабування системи, а також підключення зовнішніх аналітичних модулів, таких як MES-системи або хмарні сервіси моніторингу.

Важливим елементом сучасної автоматизованої системи пастеризації є забезпечення повного циклу архівації технологічних даних. Збереження інформації про температурні профілі, витрати теплоносія, швидкість потоку продукту через теплообмінники, а також сигнали аварій чи збоїв дозволяє не лише підтримувати процес під контролем, а й реалізовувати функції валідації, аудитів і ретроспективного аналізу. Дані архівуються з урахуванням часових

міток і уніфікованої структури тегів, що забезпечує їхню цілісність при передачі між компонентами системи.

З технічного погляду, процес архівації реалізується на SCADA-рівні за допомогою спеціалізованих серверів збору та обробки даних. Вони можуть бути інтегровані у внутрішню мережу підприємства, або, за необхідності, виведені у хмарні сервіси з підтримкою IoT-інтерфейсів. Такий підхід дозволяє аналізувати тенденції роботи обладнання з будь-якого місця, де є доступ до захищеного каналу зв'язку. Водночас резервне копіювання архівів на локальні сервери підприємства гарантує незалежність від зовнішніх каналів при збоях у мережі.

В останні роки дедалі більшого значення набуває впровадження цифрових тіней процесів, коли SCADA-система паралельно веде цифрову модель роботи технологічної лінії. На основі накопичених архівів така модель дозволяє прогнозувати поведінку об'єкта при зміні вхідних параметрів або умов навколишнього середовища. Наприклад, на основі температури вхідного молока, яке подається на пастеризатор, система може розрахувати очікуваний профіль нагріву й адаптувати алгоритм управління в реальному часі, щоб уникнути перенагріву чи перевитрати енергії.

Ще одним принциповим аспектом сучасної автоматизації є побудова системи з урахуванням відмовостійкості. У випадку з пастеризаційним обладнанням це означає наявність резервних каналів зв'язку між ПЛК та SCADA, дублювання критичних датчиків (наприклад, температурних) і використання модулів збереження стану у разі короткочасного знеструмлення. У складніших системах можливе навіть застосування кластерів SCADA-серверів з автоматичним перемиканням на резерв у разі відмови головного вузла. Таке рішення підвищує надійність і гарантує безперервність виробничого процесу.

Безпека передачі даних також є важливим напрямом. Промислові системи автоматизації дедалі частіше піддаються ризикам кібератак, особливо у випадку інтеграції з корпоративними ERP-системами або підключення до інтернету. Тому системи автоматизації, що базуються на сучасних протоколах типу OPC UA, повинні реалізовувати шифрування трафіку, автентифікацію користувачів і

контроль прав доступу на кожному рівні. Внутрішня сегментація мережі на ізольовані підмережі, VPN-доступи для обслуговуючого персоналу та регулярний аудит логів дозволяють суттєво знизити ризики несанкціонованого втручання.

Таким чином, автоматизація сучасними методами процесу пастеризації мусить виконуватись комплексно, з урахуванням багатьох аспектів.

2.4 Аналіз динаміки процесу пастеризації як об'єкта керування

Процес пастеризації молока характеризується складною динамікою, що обумовлена тепловими та гідравлічними явищами, які відбуваються у теплообмінних системах. З позиції автоматизації, пастеризатор розглядається як об'єкт із запізненням, інерційністю, можливими збуреннями, а також нелінійною передатною характеристикою у певних діапазонах роботи. Це накладає низку обмежень і вимог до побудови ефективної системи керування.

Ключовим фактором є теплове накопичення — маса молока та матеріал стінок теплообмінника мають теплову інерцію, яка не дозволяє системі миттєво реагувати на зміну температури або витрати енергоносія. Тому навіть за швидкої дії регулятора відгук системи матиме певне відставання. Це відставання необхідно враховувати під час налаштування контурів керування, зокрема при виборі параметрів ПД-регулятора, щоб уникнути коливань або повільної реакції на збурення.

Збурення в системі можуть бути як внутрішніми, так і зовнішніми. Внутрішні зумовлені, наприклад, коливанням температури або тиску пари, яка подається у теплообмінник, а зовнішні — зміною температури вхідного молока або його витрати. При цьому характер зміни температури на виході значною мірою залежить від типу теплообмінника та способу подачі продукту: ламінарна або турбулентна течія, наявність багатосекційного підігріву, наявність попередніх етапів підігріву через рекуперацію.

Іншою важливою характеристикою є наявність взаємозалежних контурів. Наприклад, контур регулювання температури пастеризації може бути пов'язаний із контуром регулювання витрати пари. Це означає, що зміна одного параметра впливає на динаміку іншого, що ускладнює стабілізацію процесу при простому каскадному управлінні. Такі взаємодії потребують або координованого управління, або впровадження узгоджених алгоритмів керування на основі математичних моделей об'єкта.

У пастеризаційних установках, особливо безперервної дії, часто реалізуються багатоконтурні схеми, де один контур керує температурою у секції попереднього підігріву, інший — у секції пастеризації, а ще один відповідає за охолодження. Між цими зонами існує теплообмін, тому стабілізація одного параметра може змінювати умови в інших частинах установки. Це ще раз підкреслює складність динаміки і потребу в точному погодженні регуляторів.

В процесі пастеризації мають місце різні перехідні режими, які виникають під час запуску обладнання, зміни потужності джерела тепла, перемикання між циклами роботи або зміни продуктивності. Ці стани суттєво впливають на якість регулювання, оскільки в них зростає ймовірність відхилення температури від заданих значень. Система автоматичного керування повинна не тільки стабілізувати параметри під час усталеного режиму, а й ефективно реагувати на будь-які динамічні зміни.

Запуск пастеризатора зазвичай пов'язаний з холодним станом обладнання, тобто із значним тепловим розривом між теплоносієм і продуктом. Такий режим характеризується максимальною тепловою потужністю на вході, швидким наростанням температури та великим ризиком перегріву, якщо керування не буде своєчасним. Це вимагає реалізації фазового або ступінчастого підводу енергії та врахування теплової ємності системи при формуванні алгоритмів управління.

Охолодження після пастеризації, зокрема при використанні пластинчастих теплообмінників, також створює динамічно складні умови. В момент зниження температури важливо підтримати достатній перепад температур між продуктом

та охолоджувальним агентом без створення різких теплових ударів або конденсації в непередбачуваних зонах. Тому контур охолодження часто потребує незалежного, але синхронізованого керування, що вимагає аналізу взаємозв'язків між вихідними та проміжними температурами.

Особливої уваги заслуговує динаміка системи при змінних витратах молока. У промислових умовах споживання продукту не завжди є сталим, що викликає флуктуації в тепловому навантаженні. В таких випадках змінюється час перебування молока в теплообміннику, що впливає на тривалість термічної обробки. З точки зору керування це є критичним, оскільки навіть при стабільній температурі нагріву недостатній час пастеризації може призвести до незнищення патогенних мікроорганізмів. Таким чином, система має або адаптувати потужність нагріву під зміну витрати, або вживати заходів щодо стабілізації швидкості потоку.

Ще один аспект — це гістерезис і запізнення в роботі виконавчих механізмів. Наприклад, регулюючі клапани чи насоси мають власну динаміку відкриття-закриття або нарощування швидкості, що додає інерції до всієї системи. У випадку електромагнітних клапанів можлива ще й пульсація потоку при частотному перемиканні. Це потребує передбачення дій керуючої системи не лише на основі поточного стану, а й на основі прогнозу динаміки — через моделі чи логіку випереджаючого регулювання.

Загалом, для адекватного опису динаміки процесу пастеризації в автоматизованій системі доцільно використовувати або емпіричні, або напівемпіричні моделі. У найпростішому випадку це можуть бути передатні функції другого порядку з запізненням, у складніших випадках — багатозв'язні моделі або системи диференціальних рівнянь.

Побудова математичної моделі процесу пастеризації потребує врахування ключових динамічних характеристик — таких як запізнення, інерційність, нестабільність теплообміну та змінність фізичних параметрів продукту. Основу такого моделювання часто становить спрощена система рівнянь теплового балансу, яка описує зміну температури в часі для кожного елемента

пастеризаційної установки. Ці рівняння включають змінні, що враховують об'єм продукту, теплову потужність джерела, тепловтрати, швидкість потоку та теплофізичні властивості молока.

Прикладом простої динамічної моделі може слугувати ланка з запізненням першого або другого порядку, що апроксимує поведінку температури на виході в залежності від керуючого впливу. У реальній системі найчастіше спостерігається комбінація декількох таких ланок: одна моделює інерцію теплообмінника, інша — поведінку продукту, ще одна — реакцію виконавчого пристрою (наприклад, клапана чи нагрівача). Врахування цієї багатоланковості дозволяє точніше передбачати поведінку системи при збуреннях та налаштовувати регулятори для більш ефективної роботи.

З іншого боку, математичні моделі можуть втрачати актуальність при зміні умов виробництва — наприклад, при зміні виду молока, його температури на вході, ступеня очищення теплообмінників тощо. Тому в промислових умовах зростає потреба у використанні адаптивних моделей, які здатні самостійно коригувати свої параметри за результатами поточних вимірювань. Такі моделі можуть використовуватися не лише для прогнозу температури, а й для оцінки залишкового часу пастеризації або для виявлення аномалій у роботі обладнання.

У контексті керування, динаміка об'єкта відіграє ключову роль при виборі типу регулятора. Якщо система є надто інерційною, прості пропорційні регулятори можуть виявитися недостатньо ефективними — виникатиме значне відхилення або коливання навколо заданого значення. У таких випадках доцільним стає використання ПІ або ПІД-регуляторів, які дозволяють враховувати не лише поточне відхилення, а й його зміну та накопичення в часі. В деяких випадках, особливо при змінних режимах роботи, перевагу можуть мати регулятори зі змінною структурою або з логікою нечіткого керування.

Вищевикладене для узагальнення та візуалізації ключових параметрів, що впливають на динаміку процесу пастеризації, разом з їхнім впливом на систему керування, доцільно звести до табличного вигляду (табл.2.1).

Таблиця 2.1 - Основні динамічні характеристики процесу пастеризації

Характеристика	Причина виникнення	Прояв у системі	Вплив на керування
Інерційність	Наявність теплоємності у молоці та обладнанні	Затримка росту температури при нагріві	Потреба в інтегральному компоненті регулятора
Запізнення (мертвий час)	Відстань між датчиками і зоною нагріву	Відставання реакції регулятора	Обмежує швидкість реакції, ускладнює налаштування
Змінність вхідних параметрів	Різна температура та склад молока на вході	Зміна динаміки протягом зміни партій	Вимагає адаптивного або робастного регулювання
Нелінійність	Залежність теплообміну від температури	Непропорційна реакція на управляючий сигнал	Потреба в більш складних регуляторах або лінеаризації
Нестабільність теплообміну	Забруднення теплообмінника, коливання витрати	Порушення стабільності температури	Необхідність періодичної перенастройки або самоідентифікації

З урахуванням усіх наведених аспектів можна зробити висновок, що процес пастеризації має складну динамічну природу, що потребує ретельного аналізу та відповідного проєктування автоматизованої системи керування. Ефективне управління можливе лише за умови точного уявлення про реакції об'єкта на збурення, вміння передбачати його поведінку та адаптувати регуляторні дії відповідно до змін середовища. Це, у свою чергу, підвищує не лише енергоефективність і надійність виробництва, а й гарантує дотримання стандартів якості кінцевого продукту.

РОЗДІЛ 3

РОЗРАХУНКИ ТА ВИБІР ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ

3.1 Вибір технічних засобів автоматизації

З проведеного аналізу випливає, що програмований логічний контролер (ПЛК) повинен мати три дискретних входи:

- 1) кнопка «Пуск»;
- 2) кнопка «Стоп»;
- 3) контакти датчика тиску гарячої води.

Крім того, нам будуть потрібні аналогові входи:

- 1) датчик температури молока (4...20 мА);
- 2) датчик рівня молока в приймальній ємності (4...20 мА або 0...10 В).

Необхідна кількість дискретних виходів ПЛК:

- 1) триходовий перепускний клапан молока;
- 2) клапан подачі молока в приймальний бак;
- 3) клапан подачі води в бойлер;
- 4) клапан подачі холодної води в охолоджувальну секцію;
- 5) магнітний пускач молочного насоса;
- 6) магнітний пускач насоса гарячої води;
- 7) живлення клапана пари.

Необхідний ПЛК також повинен мати один аналоговий вихід (4...20 мА або 0...10 В) для управління вентилем подачі пари в бойлер.

Таким чином, необхідний ПЛК з двома аналоговими входами, трьома цифровими входами і шістьма цифровими виходами і одним аналоговим виходом.

Зупинимось на сімействі ПЛК LOGO! [17], тому що нам не потрібні занадто якісні та швидкі обчислення, коли треба застосовувати більш коштовне

обладнання та програмне забезпечення (наприклад, ПЛК S7-1200 або S7-1500 з середовищем TIA Portal). Обмежимося більш доступним варіантом.

Вибираємо в якості основного модульний блок 6ED1052-1HB00-0BA6 (рис.3.1), блок розширення цифрових виходів 6ED1055-1HB00-0BA0 (рис.3.2), блок розширення з аналоговими виходами 6ED1055-1MM00-0BA1 та блок розширення з аналоговими входами 6ED1055-1MM00-0BA0. Таким чином, всього ми маємо 12 дискретних входів, 8 цифрових виходів, два аналогових входи і два аналогових виходи.



Рисунок 3.1 - Зовнішній вигляд ПЛК LOGO 6ED1052-1HB00-0BA6



Рисунок 3.2 - Зовнішній вигляд блока розширення 6ED1055-1HB00-0BA0

Аналогові модулі розширення входів і виходів (рис. 3.3) мають або два входи з можливістю підключення 0...10 В або 4...20 мА постійного струму, або два аналогових виходи, які мають діапазон 0...10 В.

Для живлення ПЛК ми будемо використовувати блок живлення ABL7RM2401 компанії Schneider electric потужністю 30 Вт (рис. 3.4).



Рисунок 3.3 - Зовнішній вигляд блоків розширення 6ED1055-1MM00-0BA1 та 6ED1055-1MM00-0BA0



Рисунок 3.4 - Зовнішній вигляд блока живлення ABL7RM2401

3.2 Розробка схеми автоматизації

На рис. 3.5 показана розроблена схема автоматизації процесу пастеризації МОЛОКА.

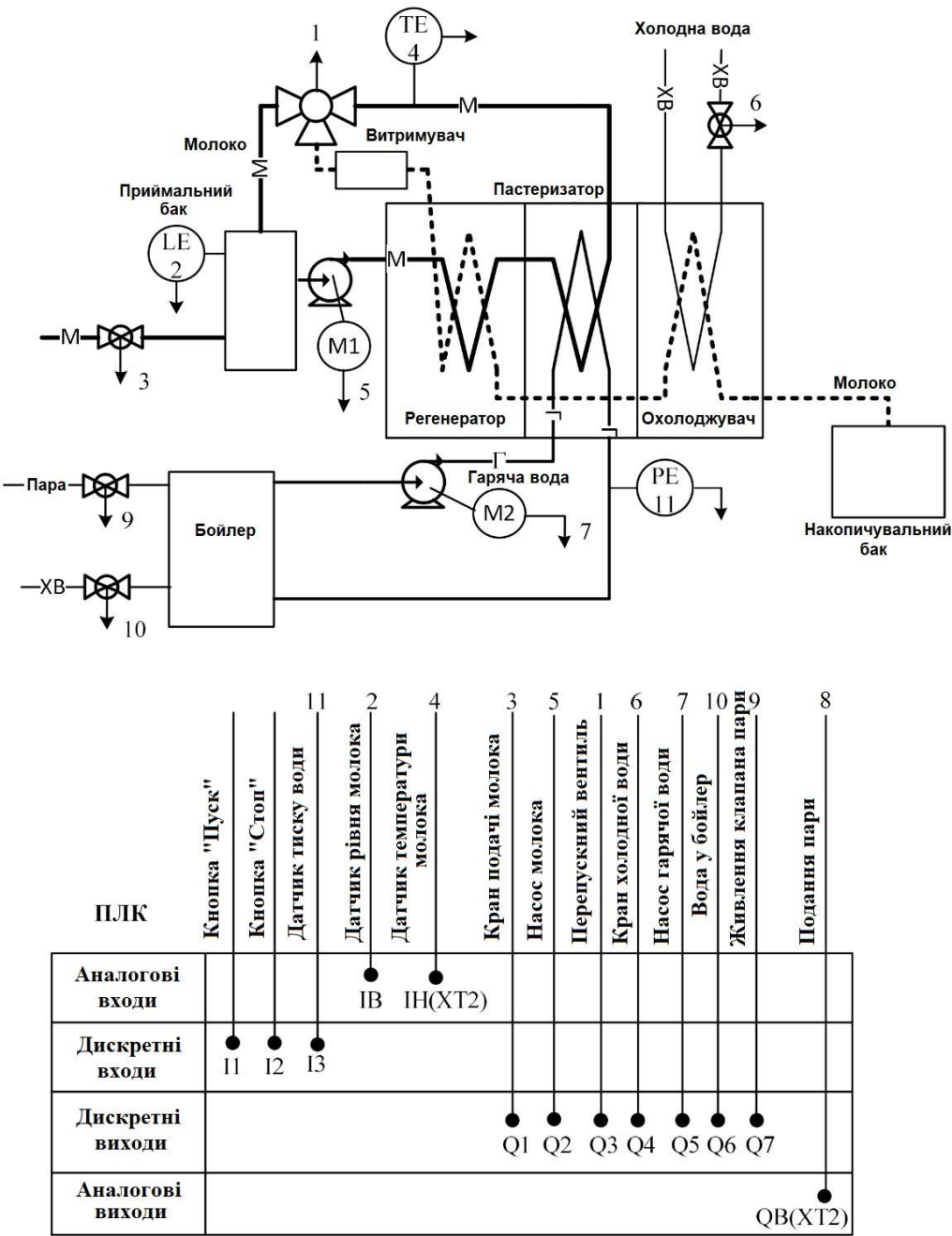


Рисунок 3.5 - Схема автоматизації процесу пастеризації молока

В зв'язку з тим, що датчик температури молока має вихідний сигнал у вигляді постійного струму 4...20 мА, він мусить підключатись до аналогового входу блоку розширення 6ED1055-1MM00-0BA0. Інший аналоговий сигнал від датчика рівня молока, так як це постійна напруга 0...10 В, надходить на інший вхід цього блоку. Один з аналогових виходів блоку LOGO 6ED1055-1MM00-0BA1 служить для подачі керуючого сигналу на паровий клапан.

Виберемо автоматичні вимикачі, що мають входити в електричну схему. Номінальний струм I двигунів насосів визначається як

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos \varphi} = \frac{2000}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,8} = 3,8 \text{ А} ,$$

де P - потужність двигунів, Вт; U_n - лінійна напруга, В; $\cos \varphi$ - коефіцієнт потужності.

Так як автоматичні вимикачі служать тільки для захисту від коротких замикань, то виберемо автоматичні вимикачі фірми іЕК, зовнішній вигляд яких показаний на рис.3.6. На тій же ілюстрації показаний зовнішній вигляд кнопок управління «Пуск» і «Стоп».



Рисунок 3.6 - Зовнішній вигляд автоматичних вимикачів і кнопок

3.3 Формалізація алгоритма управління

Як було розглянуто вище, система управління пастеризатором повинна вирішувати завдання пуску і відключення технологічного обладнання, а також

завдання автоматичного регулювання температури молока. Спочатку формалізуємо процес нормального запуску і зупинки пастеризатора. Для цього побудуємо циклограму нормальної роботи пастеризаційної установки.

Циклограма - це графічне зображення послідовності станів технологічного обладнання при циклічному інтервалі його роботи. Циклограма складається з таких елементів: цикл — інтервал часу, при якому зберігається стан системи управління; період включення - інтервал часу включеного стану пристрою (логічна одиниця його змінної), що зображується горизонтальною лінією в лінії; період вимкнення — інтервал часу вимкненого стану пристрою (логічний нуль його змінної), що зображується відсутністю горизонтальної лінії в лінії; Вплив одного апарату на інший, причина зміни стану апарату, зображується тонкою вертикальною лінією, спрямованої від початку або кінця періоду включення однієї змінної до початку циклу включення або виключення іншої змінної.

На рис.3.7 показана циклограма нормальної роботи пастеризаційної установки.



Рисунок 3.7 - Циклограма роботи пастеризаційної установки

Згідно з вимогами поставленого завдання, процес запуску пастеризатора починається з натискання кнопки SB1, яка є першим циклом системи управління. На цьому циклі спрацьовують клапан заливки молока в накопичувальний бак K3,

клапан для заливки холодної води в котел K10 і клапан для запуску холодної води в охолоджуючу секцію пастеризатора K6.

Другий цикл роботи системи ініціюється спрацюванням датчика рівня молока при заповненні накопичувального бака. В цей момент включається мотор молочного насоса M1 і включається система подачі пари в котел (вентиль K9).

Третій такт відбувається при заповненні бойлера холодною водою. При цьому спрацює датчик тиску води, закривається вентиль K10, включається мотор насоса гарячої води M2.

Четвертий такт відбувається при спустошенні резервуара для зберігання молока. Датчик рівня молока змінює свій стан з логічного 1 на логічний 0, молочний насос відключається і запускається таймер затримки часу.

Через заданий проміжок часу T1 проводиться останній, п'ятий цикл роботи системи управління: насос гарячої води M2, клапан подачі пари K9 і клапан подачі холодної води в охолоджувальну секцію K6 відключаються.

3.4 Розробка програми управління

На рис. 3.8 представлена розроблена програма для ПЛК LOGO! мовою функціональних логічних блоків FBD в системі програмування LOGOSoft Comfort, в якій реалізовано управління процесом пастеризації молока.

Сигнал на кожен цифровий вихід (Q1...Q7) живиться від свого логічного блоку I. Сигнал від кнопки «СТОП» (I2) подається на один з входів цих блоків I через інвертор NI (B012). Якщо ця кнопка розімкнута, то на всі блоки I подається логічна одиниця, якщо кнопка SB2 замкнена, то на всі блоки I подається логічний нуль, і всі включені вентиля відключаються. Таким чином, здійснюється аварійна зупинка пастеризатора.

При натисканні кнопки «ПУСК» (I1) RS-тригер B001 встановлюється на логічну одиницю, яка згідно з циклограмою подається на блоки I виходів Q1, Q4 і Q6. Включаються вентиля K3, K6 і K10.

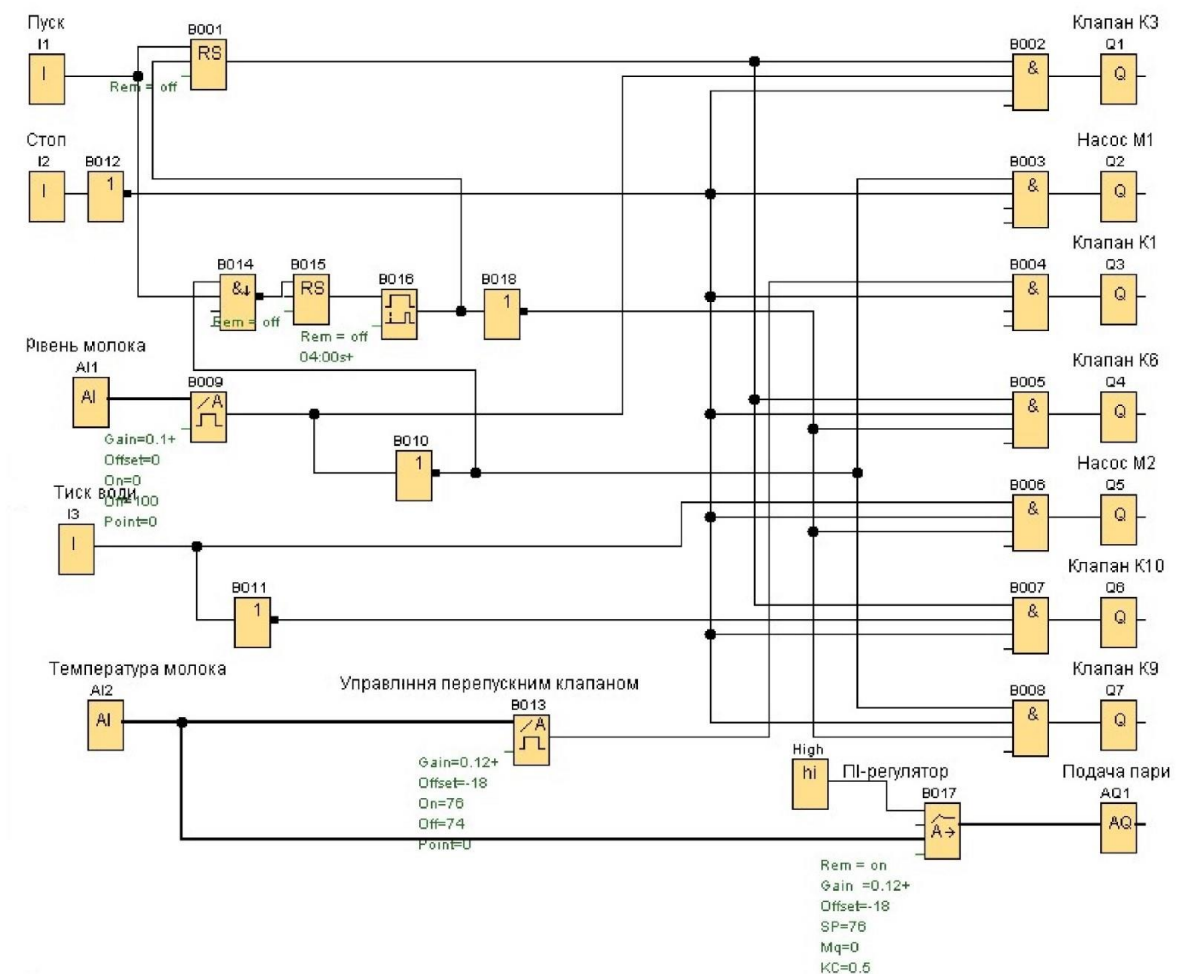


Рисунок 3.8 - FBD-програма управління пастеризатором молока

На другий вхід блоку I (В007) клапана К10 подається інвертований сигнал від датчика тиску води (вхід І3). При спрацьовуванні цього датчика клапан К10 закривається.

Аналоговий сигнал від датчика рівня молока (вхід AI1) подається на вхід блоку “Аналоговий пороговий перемикач” (B009). Одиниця на виході цього блоку з'являється при заповненні бака на максимальну висоту, а при спустошенні бака (сигнал на вході - 0) одиниця на виході замінюється логічним нулем.

При заповненні приймального бака, одиниця з виходу блоку В009 подається через інвертор В010 в блок І клапана К3, і той закривається. При цьому запускається електродвигун насоса М1 (вихід Q2) і подається живлення на привід клапана К10 (Q7).

Для визначення моменту спорожнення приймального бака (цикл 4 на рис. 3.7) використовуємо блок «І з фронтальним керуванням» (B014). Імпульс, що з'явився в результаті переходу з логічної 1 в логічну 0, реєструється за допомогою RS-тригера B015. Одиниця з виходу цього тригера надходить на таймер затримки включення B016. Після заданої затримки часу виконується цикл 5 циклограми. Логічний нуль з виходу інвертора B018 надходить на блоки І клапанів K6, K9 і насоса M2.

Для управління перепускним клапаном K1 використовується блок «Аналоговий пороговий вимикач» B013. Коли температура сягає $+76^{\circ}\text{C}$, на виході цього блока з'являється логічна одиниця, а при зниженні нижче $+75^{\circ}\text{C}$ скидається до логічного нуля.

Регулювання температури молока здійснюється за допомогою блоку П-регулятора B017 в режимі автоматичного вибору параметрів регулятора. Для цих цілей на вхід «А/М» цього блоку подається логічна одиниця.

Таким чином, розроблена програма повністю виконує алгоритм роботи пастеризатора для відповідного технологічного процесу.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

Охорона праці та забезпечення екологічної безпеки в процесі розробки й експлуатації систем автоматизації технологічного обладнання, зокрема пастеризаційної установки, є важливою складовою інженерної діяльності. В умовах сучасного виробництва акцент робиться не лише на ефективності та надійності обладнання, але й на забезпеченні безпечних умов праці персоналу та мінімізації впливу на навколишнє середовище. Це вимагає врахування низки факторів ще на етапі проєктування, а також дотримання відповідних вимог під час експлуатації.

Процес пастеризації молока, хоча й не належить до категорії надзвичайно небезпечних виробничих процесів, має певні технологічні особливості, які створюють потенційні ризики для працівників. Передусім це пов'язано з роботою з гарячими рідинами, високими температурами, тиском, наявністю електрообладнання та автоматизованих елементів керування. Особливу увагу слід приділяти питанням герметичності трубопроводів, справності теплообмінників, клапанів і насосів, а також стану теплоізоляції, яка запобігає випадковому контакту з гарячими поверхнями.

Робота обладнання в автоматичному режимі знижує ймовірність виникнення аварійних ситуацій, пов'язаних з людським фактором. Водночас автоматизація вимагає чіткої організації технічного обслуговування та періодичних перевірок стану обладнання, зокрема датчиків тиску і температури, виконавчих механізмів, електроприводів і засобів сигналізації. Електрична частина установки має бути виконана відповідно до стандартів електробезпеки, з урахуванням захисту від короткого замикання, перевантаження, втрати фази. Контрольні та силові кола повинні бути фізично розділені, а монтаж — здійснений з дотриманням кольорового маркування проводів і кабелів.

У зоні обслуговування пастеризаційної установки має бути забезпечена належна вентиляція, яка дозволяє уникати накопичення теплого вологого повітря, запобігає утворенню конденсату та сприяє зниженню температурного навантаження на персонал. Вентиляційні системи повинні бути спроектовані з урахуванням об'єму приміщення, потужності обладнання, інтенсивності тепловиділення. У разі використання парових систем для нагрівання, слід передбачити контроль вологості повітря, аби уникнути надмірного зволоження приміщення, яке сприяє утворенню корозії на обладнанні та створює сприятливе середовище для розвитку мікроорганізмів.

Санітарно-гігієнічні вимоги також відіграють суттєву роль у функціонуванні системи пастеризації, оскільки йдеться про переробку харчового продукту — молока. Контактні поверхні, з якими взаємодіє молоко, повинні бути виготовлені з матеріалів, дозволених для харчової промисловості, зокрема нержавної сталі з високою корозійною стійкістю. Усі з'єднання мають бути виконані так, щоб унеможливити накопичення залишків продукту, що може призвести до мікробіологічного забруднення. Для цього застосовуються спеціальні фітинги, прокладки та ущільнення, які забезпечують гігієнічність з'єднань і спрощують санітарну обробку.

Особлива увага приділяється питанням персональної безпеки обслуговуючого персоналу. Робочі місця повинні бути організовані таким чином, щоб оператори мали зручний доступ до органів керування, візуального контролю параметрів і мали можливість оперативно зреагувати у разі виникнення позаштатної ситуації. Всі пульти керування мають бути чітко промарковані, з урахуванням ергономіки та принципів інтуїтивної взаємодії. При необхідності роботи у гарячій зоні повинно передбачатись використання засобів індивідуального захисту — термостійких рукавиць, окулярів, спецодягу.

Системи безпеки в автоматизованих процесах пастеризації мають функціонувати в режимі постійного моніторингу та повинні бути здатні зупинити процес у разі виявлення критичних відхилень. Це передбачає наявність аварійного вимикача живлення, функції блокування у разі перевищення

граничних значень температури або тиску, дублювання ключових датчиків, а також вбудованих діагностичних механізмів контролера, що інформують про збої або зношення елементів. Програмне забезпечення системи повинно передбачати фіксацію подій, журналювання аварійних ситуацій та попереджувальних сигналів, що дозволяє в подальшому аналізувати ефективність роботи та оперативно виявляти джерела потенційних небезпек.

Окрім безпеки персоналу, не менш важливим є вплив обладнання на навколишнє середовище. Під час пастеризації молока може утворюватись конденсат, відпрацьоване тепло, а у випадку порушення технологічного процесу — скиди непридатного продукту. З цією метою необхідно передбачити систему утилізації теплової енергії, повторного використання води в закритих контурах, а також фільтрацію відпрацьованого повітря та запобігання потраплянню залишків молока до каналізаційної системи. Комплекс таких заходів сприяє дотриманню принципів екологічно відповідального виробництва та дозволяє зменшити експлуатаційні витрати.

В контексті інтеграції автоматизованої системи керування до виробничого середовища важливо також враховувати вимоги до електромагнітної сумісності обладнання. Робота електронних компонентів контролера, частотних перетворювачів, датчиків температури та тиску повинна бути захищеною від впливу електромагнітних завад, які можуть виникати як від зовнішніх джерел, так і всередині системи. Для цього застосовуються відповідні методи екранування кабелів, заземлення, встановлення фільтрів, а також дотримання вимог до прокладання комунікацій у виробничих приміщеннях. Наявність сертифікатів відповідності устаткування чинним стандартам у сфері безпеки та сумісності є обов'язковою умовою для впровадження таких систем на харчових підприємствах.

Енергетична ефективність обладнання є ще одним із аспектів, що має як економічне, так і екологічне значення. Сучасні системи керування дозволяють оптимізувати споживання енергії, впроваджуючи режими часткового навантаження, адаптивного керування температурою та рециркуляції

теплоносія. Це сприяє зниженню експлуатаційних витрат і зменшенню викидів вуглецю, що відповідає вимогам сталого розвитку. У випадку модернізації існуючих систем доцільним є аналіз доцільності використання рекупераційних теплообмінників або відновлюваних джерел енергії для забезпечення процесів підігріву.

Таким чином, система автоматизації процесу пастеризації молока має проектуватись та впроваджуватись з урахуванням комплексу вимог до охорони праці, санітарної безпеки, енергетичної ефективності та екологічної відповідальності. Гармонійне поєднання цих складових забезпечує не лише безпечні умови праці, але й сталий розвиток виробництва, що відповідає сучасним вимогам до харчової промисловості та міжнародним стандартам якості.

РОЗДІЛ 5

ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

Впровадження автоматизованої системи керування процесом пастеризації молока на базі сучасних програмованих логічних контролерів не лише підвищує технічний рівень виробництва, але й забезпечує низку економічних переваг, що мають безпосередній вплив на загальну рентабельність підприємства. Оцінка економічної ефективності такої модернізації ґрунтується на аналізі витрат на впровадження та очікуваних результатів у вигляді підвищення продуктивності, зменшення енерговитрат, скорочення кількості браку та оптимізації витрат на обслуговування обладнання.

Одним із основних факторів економічної вигоди є зменшення обсягів неякісної продукції внаслідок стабілізації технологічного процесу. Сучасна система керування дозволяє точно підтримувати температурні режими, які є критично важливими для забезпечення мікробіологічної безпеки молока. Автоматичне коригування температури та часу витримки у пастеризаторі дає змогу уникати як недопастеризації, що може призвести до зіпсованої продукції, так і надмірного нагріву, який погіршує смакові та поживні властивості молока. Зменшення втрат продукції навіть на кілька відсотків у масштабах регулярного виробництва може призвести до суттєвої економії.

Також важливою є економія енергоресурсів. Ручне або застаріле напівавтоматичне керування часто супроводжується перевитратою електроенергії та тепла через несвоєчасне вимкнення нагрівачів або тривалу роботу насосного обладнання. Сучасна система автоматизації дозволяє оптимізувати графіки роботи основних енергоспоживаючих елементів установки, застосовувати зональне або імпульсне регулювання та забезпечувати адаптацію до фактичного обсягу виробництва. Зменшення енергоспоживання на 10–15 % є реалістичним показником для правильно налаштованої

автоматизованої системи керування пастеризацією, що безпосередньо знижує виробничі витрати.

Автоматизація процесу пастеризації молока забезпечує не лише покращення якості продукції та стабільність технологічного циклу, але й істотний економічний ефект, що проявляється у зниженні витрат на енергоресурси, зменшенні обсягів браку, підвищенні продуктивності та зменшенні витрат на обслуговування обладнання.

Для оцінки економічної ефективності системи керування виконаємо попередній розрахунок терміну її окупності.

Нехай є такі вхідні дані для розрахунку:

- вартість обладнання (контролер, датчики, виконавчі механізми, монтаж) дорівнює 80 000 грн;

- середня економія електроенергії завдяки точному регулюванню температури - 15 000 кВт·год/рік;

- тариф на електроенергію для промислових споживачів - 4,32 грн/кВт·год;

- очікуване скорочення втрат продукції (зменшення браку) - 2 000 л/рік;

- собівартість 1 літра молока - 14,00 грн/л.

Річна економія електроенергії:

$$E_1 = 15\,000 \times 4,32 = 63\,000 \text{ грн.}$$

Річна економія від зменшення втрат продукції:

$$E_2 = 2\,000 \times 14,00 = 28\,000 \text{ грн.}$$

Загальна річна економія:

$$E_{\text{заг}} = E_1 + E_2 = 63\,000 + 28\,000 = 91\,000 \text{ грн.}$$

Термін окупності системи:

$$T = 80\,000 / 91\,000 \approx 0,88 \text{ року (або } \approx 11 \text{ місяців)}$$

Отриманий результат свідчить про те, що система автоматизації окупається менш ніж за рік експлуатації. Після цього весь додатковий прибуток формує чисту економію для підприємства, що підвищує його конкурентоспроможність. Варто також враховувати нематеріальні вигоди — зменшення навантаження на персонал, зниження аварійності, стабілізацію температурного режиму, покращення якості молока, що підвищує довіру споживача до бренду.

Таким чином, автоматизована система управління пастеризацією молока є не лише технічно обґрунтованим рішенням, але й ефективним економічно. Вона дозволяє оптимізувати витрати, скоротити час виробничого циклу, мінімізувати людський фактор та забезпечити стійке функціонування технологічного процесу у відповідності до санітарно-гігієнічних норм та стандартів харчової безпеки.

ВИСНОВКИ

В процесі виконання кваліфікаційної роботи була розроблена система автоматизації процесу пастеризації молока на базі контролерів Siemens, зокрема були вирішені такі задачі:

1. Проведено аналіз предметної області та визначені умови і властивості процесу пастеризації. Прийнято рішення про створення системи автоматизації на основі алгоритмічного підходу.
2. З'ясовані основні технологічні параметри об'єкту керування, визначені вхідні та вихідні сигнали, обрані технічні засоби реалізації системи.
3. Розроблена схема автоматизації, проведена прив'язка основних сигналів до виходів мікропроцесорного комплекта, перевірена узгодженість сигналів.
4. Розроблена циклограма роботи пастеризаційної установки, відокремлені 5 тактів роботи та умови переключення системи між ними.
5. Обрано середовище розробки, мова програмування та здійснена реалізація розробленого алгоритма на обраній мові. Перевірена робота програми в режимі емуляції. Результати свідчать про відповідність системи вимогам.
6. Розроблені міри по охороні праці та навколишнього середовища.
7. Проведені техніко-економічні розрахунки, які показали прийнятний термін окупності впровадження запропонованої системи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Пастеризація. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Пастеризація>.
2. Пастеризація. Види пастеризаторів. URL: <https://ankort.com/ua/pasterizatsiya-vidy-pasterizatorov/>.
3. Технологія молока та молочних продуктів : навчальний посібник /Власенко В.В., Семко Т.В., Шаблій Л.М, Лавицький В.П. Вінницький національний аграрний університет. - Вінниця: Нілан-ЛТД, 2015. - 330 с.
4. Технологія молочних продуктів. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Технологія_молочних_продуктів.
5. Про затвердження Правил ветеринарно-санітарної експертизи молока і молочних продуктів та вимог щодо їх реалізації. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0579-04#Text>.
6. ДСТУ 3662:2018 Молоко-сировина коров'яче. Технічні умови. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=77350.
7. Чинники, що впливають на якість молока. URL: <https://kremagro.com.ua/uk/informaciya/factory-vliyayushhie-na-kachestvo-moloka>.
8. Теплова обробка молока. URL: <https://foodtechnology.pro/tehnologiya-moloka-ta-molochnih-produk/tehnologiya-pererobki-moloka/teplova-obrobka-moloka>.
9. Інноваційні технології виробництва продукції та надання послуг : конспект лекцій / С. М. Логвінков, І. М. Літвінова. – Харків : ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2021. – 95 с. URL: <https://repository.hneu.edu.ua/bitstream/123456789/26059/1/2021-Логвінков%20С%20М,%20Літвінова%20І%20М.pdf>.
10. Берник І. М., Новгородська Н. В., Соломон А. М., Овсієнко С. М., Бондар М. М. Інноваційні технології харчових виробництв: монографія. Вінниця: ФОП Кушнір Ю. В., 2022. 300 с.
11. Машкін М. І., Париш Н. М. Технологія молока і молочних продуктів: Навчальне видання. — К.: Вища освіта, 2006. — 351 с.

12. Технологія виробництва продукції тваринництва : підруч. / [Бусенко О.Т., Скоцик В.Є., Маценко М.І. та ін.] ; за ред. О.Т. Бусенка. — К. : «Агроосвіта», 2013. — 492 с.

13. Автоматизація первинної обробки молока. URL: <https://kyrator.com.ua/knigi/785-titulna2?start=7>

14. Автоматизація пастеризації молока. URL: <https://www.svaltera.ua/solutions/projects/5162.php>

15. Контролери Simatic s7-1200. URL: <https://simat.com.ua/cat-s7-1200>

16. Контролер SIMATIC — керуйте майбутнім. URL: <https://www.siemens.com/ua/uk/produkty/avtomatyzatsiya-promyslovosti/systemy-avtomatyzatsiyi/systemy-promyslovoyi-avtomatyzatsiyi-simatic/plc-kontrolery-simatic.html>

17. Логічний модуль LOGO! URL: <https://www.siemens.com/ua/uk/produkty/avtomatyzatsiya-promyslovosti/systemy-avtomatyzatsiyi/systemy-promyslovoyi-avtomatyzatsiyi-simatic/plc-kontrolery-simatic/lohichnyy-modul-logo.html>