

Заклад вищої освіти «Подільський державний університет»  
Факультет енергетики та інформаційних технологій  
Кафедра електротехніки, електромеханіки і електротехнологій

## **КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

на тему:

### **РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ ТА ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯМ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА КИСЛОМОЛОЧНОЇ ПРОДУКЦІЇ**

Виконав:

здобувач вищої освіти денної форми  
навчання освітнього ступеня «Магістр»,  
освітньо-професійної програми  
«Електроенергетика, електротехніка та  
електромеханіка» спеціальності 141  
«Електроенергетика, електротехніка та  
електромеханіка»

\_\_\_\_\_ Віталій БОЯРСЬКИЙ

Керівник: канд. техн. наук, доцент

\_\_\_\_\_ Ігор ГАРАСИМЧУК

Оцінка захисту:

Національна шкала \_\_\_\_\_

Кількість балів \_\_\_\_\_ Шкала ECTS \_\_\_\_\_

Допускається до захисту:

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

Гарант освітньої програми

«Електроенергетика,  
електротехніка та електромеханіка»  
спеціальності 141 «Електроенергетика,  
електротехніка та електромеханіка»

кандидат технічних наук, доцент \_\_\_\_\_ Павло ПОТАПСЬКИЙ

м. Кам'янець-Подільський, 2025р.

## РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота викладена на 63 сторінках, містить 32 ілюстрації, 8 таблиць, додатки та список із 20 використаних джерел.

Метою роботи є розробка, моделювання та дослідження автоматизованої системи керування технологічними процесами виробництва кисломолочного сиру для підвищення якості продукції, забезпечення стабільності технологічних режимів та оптимізації роботи обладнання.

Для досягнення мети застосовано методи системного аналізу, теорії автоматичного керування (для синтезу ПІД-регуляторів із використанням частотних критеріїв) та математичного моделювання в середовищі Matlab/Simulink. Апаратна реалізація АСК орієнтована на використання промислового програмованого логічного контролера (ПЛК) Siemens SIMATIC S7-1500 та високоточних датчиків температури, рівня й рН.

В результаті досліджень розроблено структурну схему АСК, синтезовано ефективні алгоритми керування ключовими процесами (дозування закваски, термообробка), що дозволило мінімізувати час регулювання та перерегулювання. Новизна роботи полягає у створенні комплексної динамічної моделі підсистеми дозування закваски та інтеграції її в єдину автоматизовану систему, цінність якої для виробництва полягає у зниженні собівартості та підвищенні стабільності якості готового продукту.

Розроблена АСК рекомендована до впровадження на підприємствах молочної промисловості з метою модернізації існуючих технологічних ліній і забезпечення високої точності дотримання рецептури. Впровадження системи дозволить зменшити енергоспоживання та мінімізувати відсоток бракованої продукції.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на розробку адаптивних алгоритмів керування для компенсації коливань якості вхідної сировини та інтеграцію АСК з виробничими системами планування (MES/ERP) для оптимізації бізнес-процесів.

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ,  
КИСЛОМОЛОЧНИЙ СИР, ПЛК, ПІД-РЕГУЛЯТОР, МОДЕЛЮВАННЯ,  
ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС, ДОЗУВАННЯ.

**ЗМІСТ**

ВСТУП .....	5
РОЗДІЛ 1 РЕЛЕВАНТНІСТЬ ТА ОПИС ВИРОБНИЧОГО ОБ'ЄКТА.....	9
1.1 Значущість випуску кисломолочного сиру .....	9
1.2 Схема обладнання для отримання кисломолочного сиру.....	10
РОЗДІЛ 2 КЕРУЮЧІ ЗВ'ЯЗКИ ТА ЇХНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ.....	13
2.1 Регулювання температурного режиму.....	13
2.2 Обладнання для контролю наповнення резервуару на етапі сквашування .....	14
2.3 Контур управління показником кислотності .....	15
2.4 Система управління процесами видалення вологи та охолодження.....	16
РОЗДІЛ 3 ПІДБІР АПАРАТУРИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТА ВИКОНАВЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ.....	19
3.1 Добір сенсорів.....	19
3.1.1 Температурний сенсор.....	19
3.1.2 Засіб вимірювання рівня.....	20
3.1.3 Вимірювальний засіб для об'ємної витрати.....	21
3.1.4 Датчик (Інклінометр) .....	22
3.1.5 РН-метр.....	23
3.2 Пускові механізми (Приводи).....	25
3.2.1 Електромагнітний клапан.....	25
3.2.2 Електричні механізми керування .....	26
3.3 Визначення програмованого логічного контролера.....	28

РОЗДІЛ 4 ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ ВНЕСЕННЯ МОЛОЧНОЇ ЗАКВАСКИ.....	33
4.1 Створення моделі підсистеми дозування заставки як керованого об'єкта	33
4.2 Математичний опис етапу заквашувального заповнення резервуару .....	34
4.3 Окреслення загальної схеми системи керування.....	36
4.4 Калібрування регуляторів .....	37
4.5 Моделювання запровадження закваски у молочну основу .....	46
4.6 Висновки після проведення аналітичного огляду та створення моделі....	48
РОЗДІЛ 5 СТВОРЕННЯ МЕХАНІЗМІВ ВЗАЄМОДІЇ МІЖ КОРИСТУВАЧЕМ ТА ОБЛАДНАННЯМ .....	50
5.1 Основні принципи людино-машинного інтерфейсу .....	50
5.2 Вибір програмного забезпечення .....	51
5.3 Етапи створення та калібрування інтерфейсу.....	52
ВИСНОВКИ.....	59
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	61

## ВСТУП

### Актуальність теми

Виробництво кисломолочного сиру традиційно займає ключове місце в структурі молочної промисловості України, що підтверджується стабільним попитом споживачів та значним експортним потенціалом. Цей продукт є цінним джерелом білка, кальцію та інших мікроелементів, що формує його високу соціальну значущість.

Проте, сучасні економічні реалії та зростаюча конкуренція на глобальному ринку вимагають від вітчизняних виробників переходу до індустрії 4.0, що передбачає впровадження високоточних та гнучких систем керування. Існуючі виробничі лінії, особливо на малих та середніх підприємствах, часто використовують застарілі або частково автоматизовані системи, які не здатні забезпечити:

Високу стабільність якості: Незначні відхилення в технологічних параметрах (температура, час коагуляції, дозування закваски) безпосередньо впливають на консистенцію, смак та термін зберігання кінцевого продукту, призводячи до виробничого браку.

Енергоефективність: Неоптимальні режими роботи обладнання, особливо під час термообробки згустку (ТОЗ) та охолодження, спричиняють необґрунтовані витрати енергоресурсів, що прямо впливає на собівартість продукції.

Ефективність використання сировини: Неточне дозування заквасок та ферментів може призвести до перевитрат дорогої сировини або до незадовільного виходу готового продукту.

Наукова актуальність дослідження полягає у необхідності розробки та апробації комплексної математичної моделі ключових етапів процесу (зокрема, підсистеми дозування закваски та температурного режиму ТОЗ) як об'єктів керування. Це дозволяє здійснити синтез оптимальних алгоритмів керування з використанням методів класичної та сучасної теорії

автоматичного керування (наприклад, розробка та налаштування ПД-регуляторів з доведеним запасом стійкості).

Практична актуальність зумовлена потребою впровадження надійних та гнучких АСК на базі сучасних Програмованих Логічних Контролерів (ПЛК). Розробка такого рішення забезпечує перехід до високоавтоматизованого виробництва, що дозволяє швидко адаптувати технологічні режими до змін якості вхідної сировини та вимог ринку, водночас мінімізуючи вплив людського фактора.

Таким чином, розробка, моделювання та дослідження автоматизованої системи керування технологічними процесами виробництва кисломолочного сиру є своєчасним і обґрунтованим науково-технічним завданням, спрямованим на забезпечення конкурентоспроможності галузі через підвищення якості продукції та оптимізацію виробничих витрат.

Мета досліджень:

Розробка, моделювання та дослідження автоматизованої системи керування технологічними процесами виробництва кисломолочного сиру з метою підвищення якості продукції, забезпечення стабільності технологічних режимів та оптимізації роботи обладнання.

Завдання досліджень:

1. Провести аналіз та опис технологічної схеми виробництва кисломолочного сиру, визначивши ключові етапи процесу (коагуляція, термообробка, зневоднення та охолодження).

2. Визначити керуючі зв'язки та сформулювати перелік регулюючих завдань для системи автоматизації.

3. Здійснити підбір необхідної апаратури автоматизації та виконавчих елементів, включаючи датчики (температури, рівня, рН), виконавчі механізми (клапани, електродвигуни) та Програмований Логічний Контролер (ПЛК).

4. Створити математичну модель підсистеми дозування молочної закваски як керованого об'єкта.

5. Розробити загальну структурну схему системи керування (зокрема, з використанням методу паралельної корекції) та провести калібрування регуляторів (ПД-регуляторів) для забезпечення необхідного запасу стійкості.

6. Створити допоміжний вузол для узгодження заданих значень і провести імітаційне відпрацювання функціонування системи в середовищі Matlab/Simulink.

7. Розробити механізми взаємодії між користувачем та обладнанням, створивши візуалізацію технологічного процесу (людина-машинний інтерфейс – НМІ) у програмному середовищі TIA Portal.

Об'єкт досліджень: Технологічний процес виробництва кисломолочного сиру на промисловій лінії, що включає три ключові етапи: коагуляцію (заквашування), обробку згустку в термічному апараті ТОЗ та фінальне зневоднення з охолодженням продукту.

Предмет досліджень: Автоматизована система керування (АСК) технологічною лінією виробництва кисломолочного сиру, її структурні схеми, алгоритми керування, принципи функціонування регулюючих контурів (температури, рівня, кислотності, дозування) та технічні засоби автоматизації.

Методи досліджень

Для виконання роботи було використано такі методи:

1. Системний аналіз – для визначення керуючих параметрів та зв'язків, а також для формування регулюючих завдань та розробки загальної концепції автоматизації.

2. Методи теорії автоматичного керування – для синтезу та налаштування коефіцієнтів ПД-регуляторів із застосуванням частотних критеріїв (наприклад, ЛАЧХ) для забезпечення необхідного запасу стійкості.

3. Математичне та імітаційне моделювання – для формалізації моделі керованого об'єкта (підсистеми дозування закваски) та проведення симуляції перехідних процесів у програмному середовищі Matlab/Simulink.

4. Аналіз технічних характеристик та порівняння – для обґрунтованого вибору первинних вимірювальних приладів, виконавчих механізмів та програмованих логічних контролерів.

5. Графічні методи – для розробки функціональних і структурних схем керування та візуалізації інтерфейсу "Людина-Машина" НМІ.

## РОЗДІЛ 1 РЕЛЕВАНТНІСТЬ ТА ОПИС ВИРОБНИЧОГО ОБ'ЄКТА

### 1.1 Значущість випуску кисломолочного сиру

Сектор, що займається виробництвом кисломолочного сиру, займає вагоме місце у харчовій індустрії України, демонструючи істотний потенціал для експансії та генерування прибутку для бізнесів. На території Східної Європи та в країнах колишнього СРСР кисломолочний сир має шалену популярність у всіх прошарках населення. Головною причиною цього є, передусім, його корисність для здоров'я людей, окрім того, він пропонує широку палітру смакових опцій.

Згідно з останніми даними, отриманими від МСМП (Міжнародна спілка молочної індустрії), щорічний обсяг випуску сирів збільшується приблизно на два-три відсотки, що прямо вказує на високі перспективи цієї галузі на ринку [1]. Більше того, якщо брати до уваги інші виробничі напрямки, виготовлення сиру вважається екологічно більш дружнім. Впровадження сучасних технологічних рішень робить процес створення сиру дедалі безпечнішим для довкілля, водночас гарантуючи стабільність виходу готової продукції.

Глибоке дослідження та аналіз цього виробничого сегменту дають змогу краще усвідомити поточні тенденції та розкрити нові можливості. Вивчення вимог кінцевих споживачів до якості продукту є надзвичайно важливим – це слугуватиме запорукою успішної реалізації [2].

Оскільки сироваріння є фінансово привабливою діяльністю і здатне підтримати економіку держави, у нинішніх умовах цілком обґрунтованим є пошук різних підходів до модернізації технологічних ліній для цього продукту, включно з удосконаленням енерговикористання [3].

## 1.2 Схема обладнання для отримання кисломолочного сиру.

Технологічна лінія, що проектується для випуску кисломолочного сиру, має три ключові етапи.

Перший етап – це процес коагуляції (заквашування). Спершу молоко надходить по трубах до спеціальної ємності для сквашування через пристрої управління потоком з електроприводом, після чого додається закваска у кількості, що не перевищує п'ять відсотків від загальної маси молока. Дотримання точних пропорцій є критичним для отримання сиру з високими якісними характеристиками та привабливим смаком. Для активації процесу згортання запускається електродвигун. Щоб стимулювати сквашування, молочну суміш разом із закваскою піддають багаторазовим циклам охолодження та нагрівання (для цього застосовується подача гарячої або холодної рідини, якою маніпулюють за допомогою електромагнітних клапанів). Щойно досягається встановлена температура – 24–28 °С у теплу пору року або 26–30 °С у холодну – розпочинається безпосередньо процес сквашування. Перемішування вихідної сировини виконується під час заповнення резервуару та повторно через п'ятнадцять хвилин. Як тільки рівень кислотності (рН) суміші сягає позначки 4,5–4,6, вважається, що згусток сформувався. Далі він прямує до апарата ТОЗ [1].

Другий етап – це обробка згустку в апараті ТОЗ. Після перекачування згустку до ТОЗ, у сорокову частину першого сектора подається гаряча вода. Вона спершу прогріває сировину, яка опинилася у другому секторі, потім відбувається певне вистоювання згустку, слідом за чим здійснюється охолодження. Для цього у третій сектор подають холодну речовину. Регуляція подачі як води, так і сировини виконується за допомогою електроклапанів [1].

Фінальний, третій етап – це зневоднення сиру та його охолодження. Після термічної дії в ТОЗ згусток направляється до агрегату видалення рідини. Цей механізм включає барабан, резервуар для збору сироватки,

охолоджувальний пристрій, шнековий механізм, оснащений двома електродвигунами, інклінометр та електроклапан для надходження охолоджувальної води. Спочатку у барабані сировина відділяється від рідкої фракції [4]. Для контролю кількості рідини у сирній масі змінюють кут нахилу барабана. Надлишкова сироватка стікає у накопичувач. Після цієї операції майже готовий сир переміщується до охолоджувача. Тут, шляхом введення охолодженої води, встановлюється необхідна температура кінцевого продукту. Досягнувши заданого температурного режиму, готовий сир надходить на конвеєр для подальшого фасування [1].

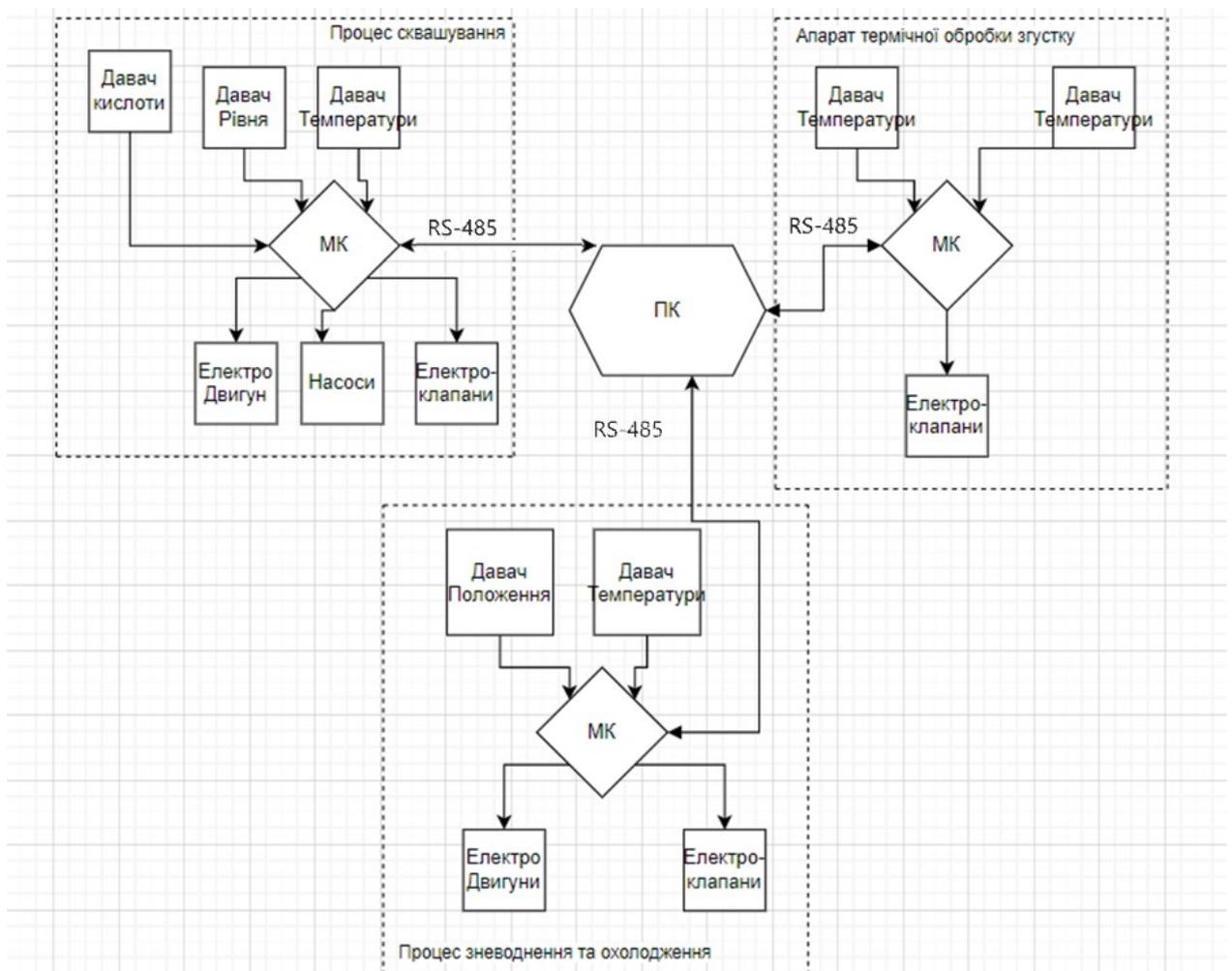


Рис. 1.1 - Структурна схема

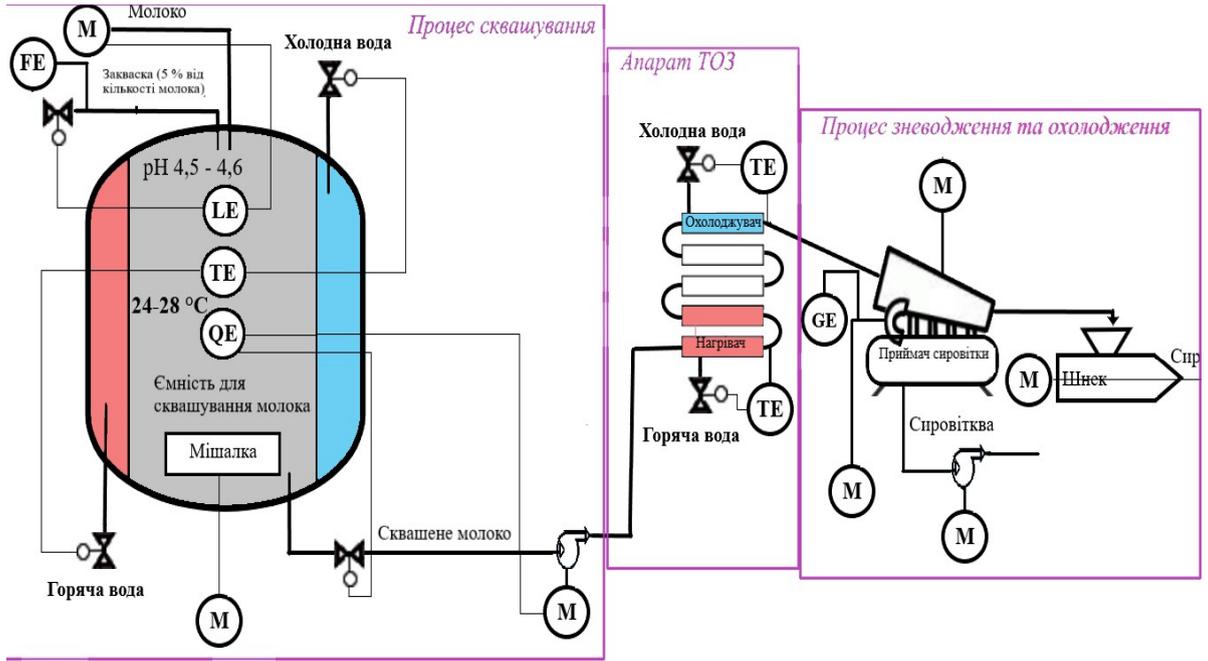


Рис. 1.2 - Схема технологічного процесу

## РОЗДІЛ 2 КЕРУЮЧІ ЗВ'ЯЗКИ ТА ЇХНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Спираючись на структурну діаграму і графік циклу виробництва, ми визначаємо необхідні регулюючі завдання. Серед домінантних виділяють наступні:

1. Моніторинг температурних значень на відтинках виробництва сиру;
2. Регулювання параметрів кислотності;
3. Пильна увага до стадій введення стартової культури та надходження сировини молочної;
4. Фіксація інформації про рівень наповнення ємності, де відбувається згортання (коагуляція);
5. Контроль роботи електродвигунів та електромагнітних клапанів;
6. Диригування етапами видалення надлишку рідини та охолодження сирної основи.

Оперуючи цим вичерпним переліком завдань, ми можемо розпочати розробку самих регулюючих ланок (контурів).

### 2.1 Регулювання температурного режиму

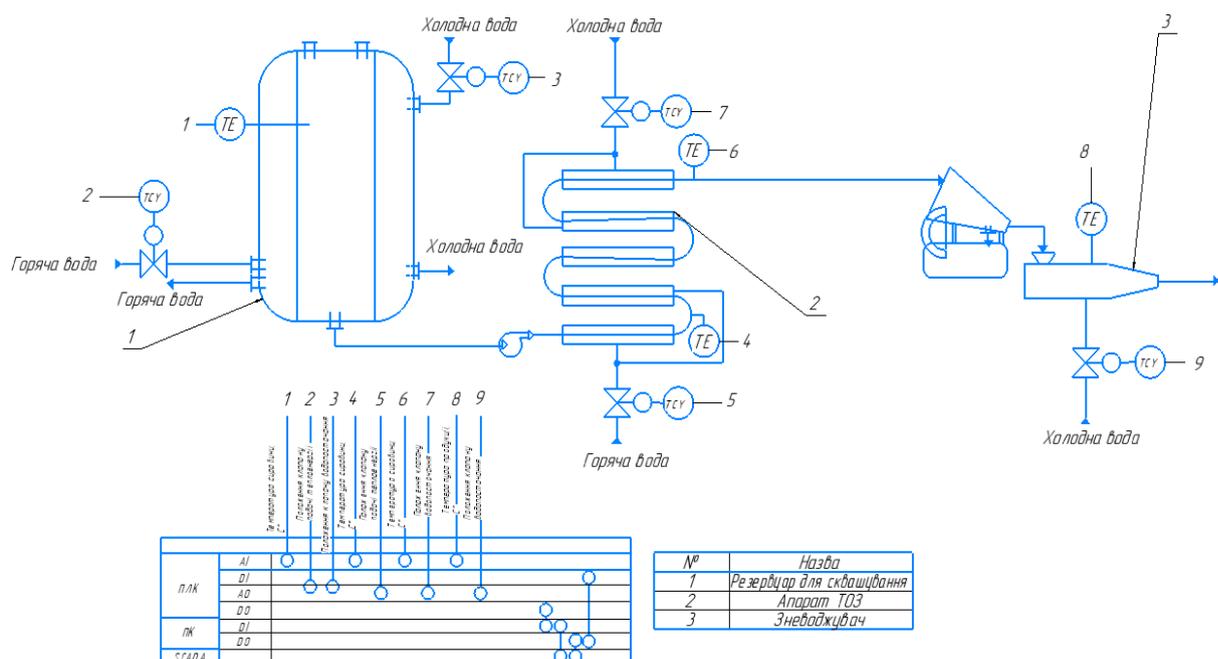


Рис. 2.1 - Схема блоків для контролю температури

Основна мета цієї системи полягає у підтримці незмінної температури на всіх етапах виробництва кисломолочного сиру [5]. Температурний контроль здійснюється завдяки електромагнітним засувкам, маркованим як ТСУ. Вони монтуються на трубах, якими подається молоко, закваска, гаряча й холодна вода, а також на лінії, через яку відводиться сироватка. Для забезпечення зворотного зв'язку застосовуються відповідні датчики температури. Програмований логічний контролер (ПЛК) у центрі керування постійно зчитує інформацію з цих сенсорів та, відповідно до встановлених критеріїв, формує команди на вмикання чи вимкання клапанів.

## 2.2 Обладнання для контролю наповнення резервуару на етапі сквашування

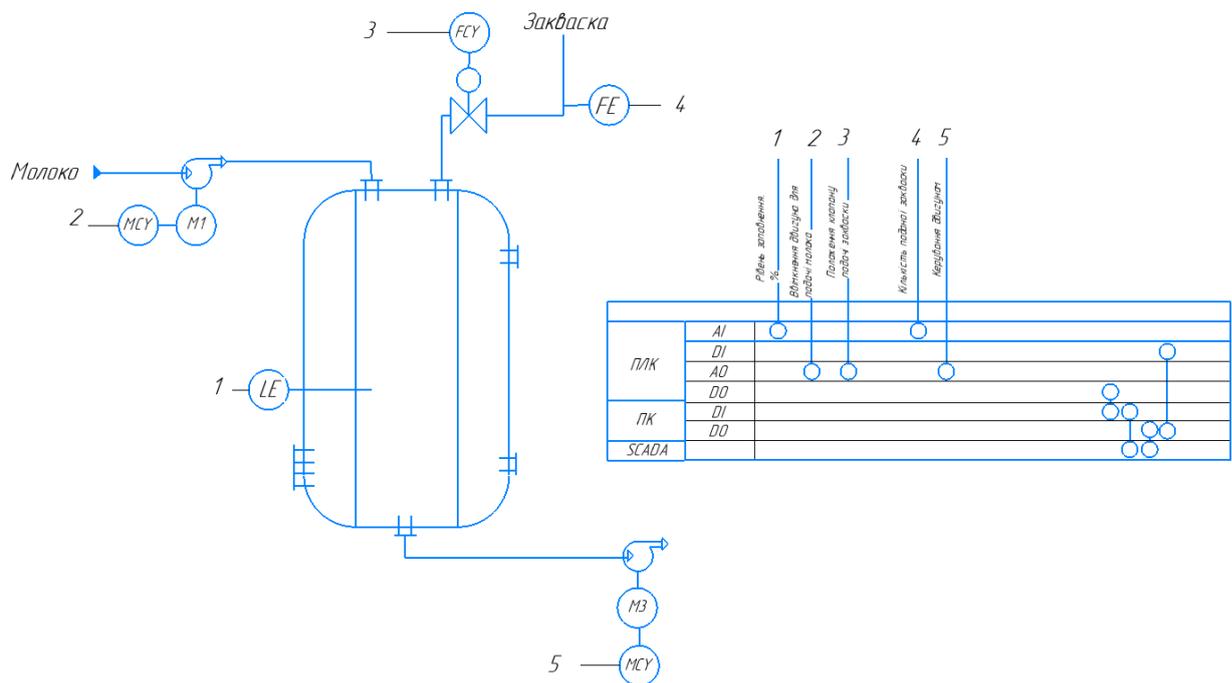


Рис. 2.2 - Ілюстрація контуру регулювання процесу сквашування, що функціонує на засадах зворотного зв'язку.

У межах цього регуляційного контуру внесення ініціюючої культури (закваски) у ферментаційний чан здійснюється через електромагнітне

управління запірними елементами FCY [6]. Наповнення молочною сировиною організовано механізмом, де насос приводиться в дію двигуном, паралельно здійснюючи моніторинг досягнення встановленої позначки заповнення. Для фіксації обсягу доданої закваски задіяно первинний датчик FE, тоді як датчик рівня LE формує зворотний сигнал, а рушій M3 транспортує вихідну речовину до апарату термічної обробки (ТОЗ).

### 2.3 Контур управління показником кислотності

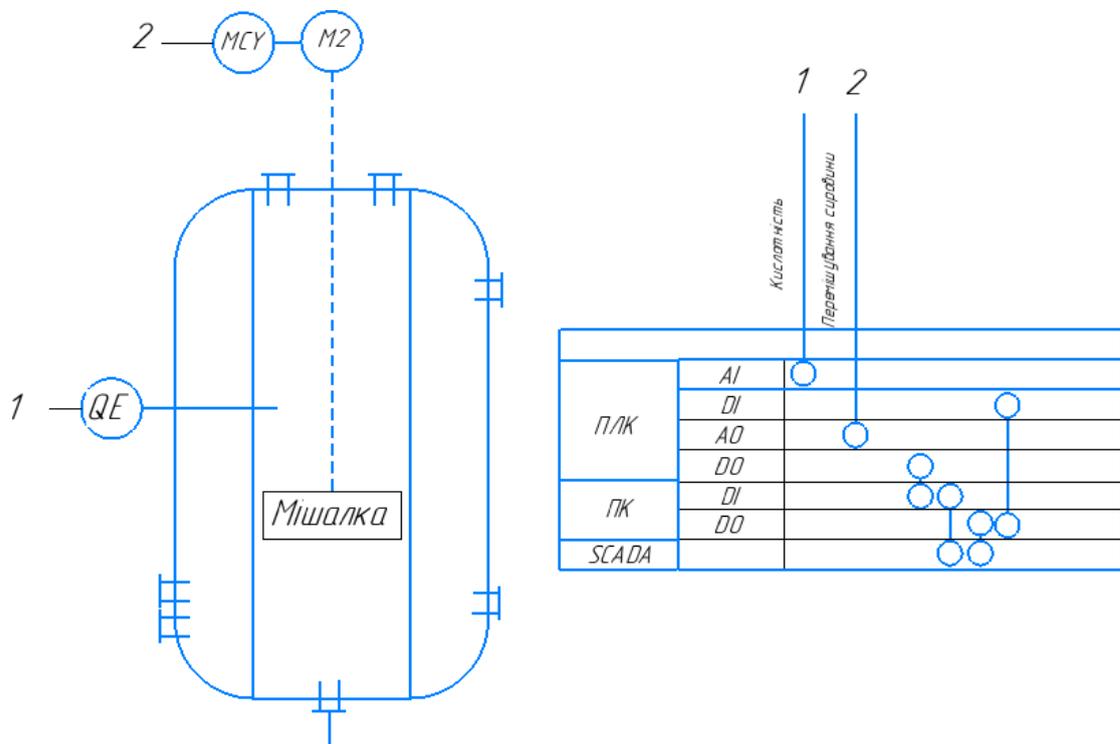


Рис. 2.3 - Пристрій для контролю рН середовища

Дана апаратура слугує для фіксації та підтримання заданого рівня кислотності вихідної сировини. Коли датчик рН (QE) реєструє, що рівень сягнув встановленої позначки у 4,5 одиниць рН, надсилається сигнал на активацію електроприводу M2. Цей, у свою чергу, приводить до дії мішалку, що забезпечує гомогенність отриманої суміші.

## 2.4 Система управління процесами видалення вологи та охолодження

У межах цього контуру здійснюється регулювання кута нахилу циліндричного барабана з метою доведення вмісту вологи в сировині до точно визначеного значення. Електропривід М4 відповідає за управління даним етапом [7]. Обертальний рух на сам барабан безпосередньо передає електромотор М5. Паралельно, електропривід М6 забезпечує функціонування шнекового механізму, необхідного для безперервного перемішування сирної маси усередині охолоджувального блоку.

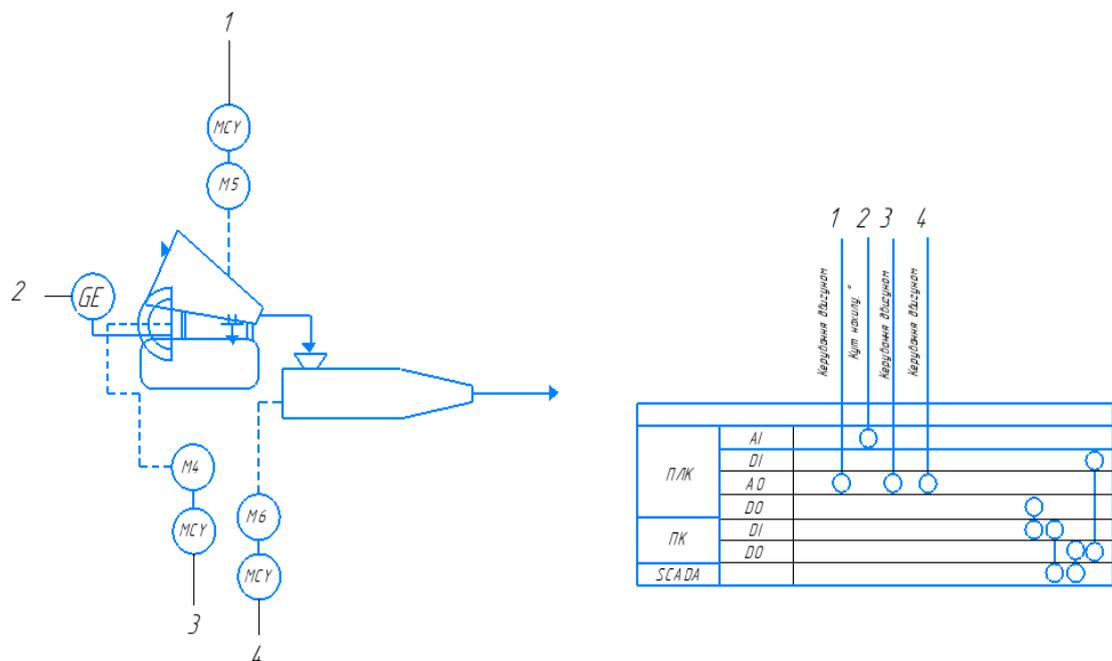


Рис. 2.4 - Схема контуру керування процесом зневоднення

Виходячи з представлених схем керування, розроблено первинний задум щодо автоматизації. Додатково, сформовано перелік усіх вхідних сигналів, що потрапляють до цієї системи (як зазначено у Таблиці 2.1), а також перелік вихідних сигналів відповідно (див. Таблицю 2.2) [1].

Таблиця 2.1 – Перелік сигналів, що надходять у систему

Найменування параметра, місце відбирання вимірювального імпульсу	Діапазон вимірювань	Характеристика сигналу	Регулюванн	Точка ОК	Характеристика середовища			
					Агресивне	Пожежо-вибухо	-	небезп
Кислотність сировини	1 – 4,5 рН	4 – 20 мА	+	Резервуар для сквашування	+	-	-	-
Температура сировини в резервуарі	0-100 С <sup>0</sup> +- 1 С <sup>0</sup>	4 – 20 мА	+	Резервуар для сквашування	+	-	-	-
Рівень заповнення резервуара	0-100 % +- 1%	4 – 20 мА	+	Резервуар для сквашування	+	-	-	-
Кількість поданої закваски	0 – 1000 л	4 – 20 мА	+	Резервуар для сквашування	-	-	-	-
Температура на вході в апарат ТОЗ	0-100 С <sup>0</sup> +- 1 С <sup>0</sup>	4 – 20 мА	+	Апарат ТОЗ	+	-	-	-
Температура на виході з апарату ТОЗ	0-100 С <sup>0</sup> +- 1 С <sup>0</sup>	4 – 20 мА	+	Апарат ТОЗ	+	-	-	-
Температура сиру охолоджувачі	0-100 С <sup>0</sup> +- 1 С <sup>0</sup>	4 – 20 мА	+	Зневоднювач	-	-	-	-
Давач куту нахилу	0 – 90 <sup>0</sup>	4 – 20 мА	+	Зневоднювач	-	-	-	-

Таблиця 2.2 - Таблиця вихідних сигналів

Найменування параметра, місце відбирання вимірювального імпульсу	Діапазон вимірювань	Характеристика сигналу	Регулювання	Точка ОК	Характеристика середовища		
					Агресивне	Пожежо-вибухо	небезпечне
Швидкість обертання двигуна «1»	0 - 3000 об/хв	4 – 20 мА Лог.«0» / «1».	+	Резервуар для сквашування	-	-	-
Положення клапана на трубопроводі гарячої води	0 – 100%	4 – 20 мА Лог.«0» / «1».	+	Резервуар для сквашування	-	-	-
Положення клапана на трубопроводі холодної води	0 – 100%	4 – 20 мА Лог.«0» / «1».	+	Резервуар для сквашування	-	-	-

Найменування параметра, місце відбирання вимірювального імпульсу	Діапазон вимірювань	Характеристика сигналу	Регулювання	Точка ОК	Характеристика середовища	
					Агресивне	Пожежо-вибухо-небезпечне
Швидкість обертання двигуна «2»	0 - 3000 об/хв	4 – 20 мА Лог.«0» / «1».	+	Резервуар для сквашування	-	-
Положення клапана подачі закваски	0 – 100%	4 – 20 мА Лог.«0» / «1».	+	Резервуар для сквашування	+	-
Швидкість обертання	0 - 3000 об/хв	4 – 20 мА Лог.«0» /	+	Резервуар для	-	-

## РОЗДІЛ 3 ПІДБІР АПАРАТУРИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТА ВИКОНАВЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ

### 3.1 Добір сенсорів

Грунтуючись на аналізі первинної інформації, ми переходимо до етапу вибору необхідних вимірювальних приладів для розроблюваної системи.

#### 3.1.1 Температурний сенсор

Ми провели оцінку значної кількості варіацій датчиків. Серед усіх розглянутих варіантів, найбільш оптимальним рішенням став зразок WİKA TR21-C. Ключові експлуатаційні параметри цього пристрою зафіксовані у Таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 - Параметри сенсора WİKA TR21-C

Давач	WİKA TR21-C
Робоча температура, °C	-30°C - +250°C
Точність	±0,1°C
Вологозахист, Ір	Ір69К
Вихідний сигнал	4-20 мА
Ціна, грн	8060

Цей датчик здобув значне поширення у харчовій промисловості, адже його безпосереднє призначення полягає у фіксації показників температури під час технологічних етапів, де критично важливо дотримуватися санітарних норм. [7].



Рис. 3.1 - Апарат для перетворення фірми WІКА, тип TR21-С

### 3.1.2 Засіб вимірювання рівня

Серед широкого спектра доступних датчиків рівня, було обрано безконтактний радіолокаційний прилад, а саме – модель VEGAPULS 64.

Ця модель славиться своїм дуже вузькоспрямованим променем сигналу, що дає змогу монтувати його у ємностях, обладнаних мішалками [8]. Деталі його технічних параметрів наведено у Таблиці 3.2, а його зовнішній вигляд показано на Рисунку 3.2.

Таблиця 3.2 - Технічні параметри VEGAPULS 64

Діапазон вимірювання	До 30 м
Кут променя	7°
Частота	80 ГГц
Точність	±2 мм
Ступінь захисту	IP68
Температура середовища	-40 °С - +200 °С
Тип виходу	4-20 мА / HART



Рис. 3.2 - Індикатор рівня в апараті моделі VEGAPULS 64

### 3.1.3 Вимірювальний засіб для об'ємної витрати

Було здійснено огляд низки апаратури, розробленої для фіксації об'ємної витрати. Постало питання вибору між моделями OPTIFLUX 1300 та Endress+Hauser Proline Promag 10. Технічні параметри цих пристроїв представлені у Таблиці 3.3. Через те, що рівень точності приладу Endress+Hauser Proline 10 є вищим, саме цей апарат був обраний як основний для обліку витрати [9].

Таблиця 3.3 - Технічні особливості вимірювального приладу Endress+Hauser Proline Promag 10

Характеристика	Endress+Hauser Proline Promag 10
Температура процесу	-20 – 150 °С
Діапазон	0,03-10 м <sup>3</sup> /год
Вихідні сигнали	4-20 мА/HART
Похибка	0,2%
Захист	IP67



Рис. 3.3 - Пристрій для моніторингу продуктивності від Endress+Hauser, модель Proline Promag 10

### **3.1.4 Датчик (Інклінометр)**

Проведено огляд наявних на ринку моделей нахиломірів, що дало змогу провести їх детальне порівняння. Вибір зупинився на сенсорі з лінійки F99, що виробляється компанією Pepperl+Fuchs. Деталізація робочих характеристик цих апаратів представлена нижче у Таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 - Акселерометр виробництва Pepperl+Fuchs, лінійка F99

Діапазон вимірювання	0-360 <sup>0</sup>
Похибка	□0,1 <sup>0</sup>
Матеріал корпусу	Сплав з нержавіючої сталі або алюмінієвий
Вихідний сигнал	4-20 мА або 0-10 В
Захист	IP68K

Цей пристрій може похвалитися цілком прийнятним робочим діапазоном, демонструючи стійкість до вібраційних впливів та механічних поштовхів. Крім того, він проектувався з урахуванням можливості витримувати процеси очищення, які виконуються за допомогою водоструминних апаратів високого тиску та при підвищених температурних режимах [8]. Графічне зображення його параметрів представлено на рисунку



3.4.

Рис. 3.4 – Інклінометр

### 3.1.5 рН-метр

Серед доступних рН-метрів було обрано модель рН-метр

Endress+Hauser CPS41E [10]. Характеристики цього апарату зафіксовані у Таблиці 3.5. Зображення цього рН-метра можна знайти на Рисунку 3.5.

Таблиця 3.5 - Технічна специфікація рН-метра Endress+Hauser CPS41E

Діапазон виміру	0 – 14 рН
Діапазон вимірювання температури	0-135 °С
Робочий тиск	0,8-11 бар
Вихідний сигнал	4...20 мА



Рис. 3.5 – Як виглядає рН-вимірювальний прилад

## 3.2 Пускові механізми (Приводи)

### 3.2.1 Електромагнітний клапан

Ми вже розглянули низку клапанів. Для потреб автоматизованої системи управління було прийнято рішення використати електромагнітний клапан, конкретно – модель Bürkert 2871. Ця модель була відібрана мною через такі її переваги: низький рівень шуму під час оперування, прийнятний для застосування температурний інтервал та мала маса [11]. Детальні технічні параметри цього приладу наведені у Таблиці 3.6.

Зовнішній вигляд цього елемента представлено на зображенні 3.6.

Таблиця 3.6 – Технічні дані моделі Bürkert 2871

Зусилля	2500 Н
Температурний діапазон	-10 °C - +90 °C
Споживання енергії	2 Вт
Тип керування	пропорційне
Ступінь захисту	IP65
Вага	4,25 кг



Рис. 3.6 – Діаграма роботи клапана електромагнітного типу

### 3.2.2 Електричні механізми керування

Щодо переміщення вихідної речовини та підтримання роботи змішувального агрегату в межах єдиного комплексу автоматизованого виробництва сиру, задіяні електричні двигуни типу АВВ ІЕЗ МЗВР 90S (їх зображено на схемі 3.7, а паспортні дані наведено у Таблиці 3.7). Вони мають потужність до 2,2 кВт і функціонують у парі з перетворювачем частоти АВВ АСS580 (що показано на схемі 3.8). Для виконання низки інших технологічних функцій можуть бути застосовані електричні двигуни виробництва Siemens, серії Simotics GP/SD 1LE1501 (як це показано на зображенні 3.9, повні технічні дані – у Таблиці 3.8). Потужжя цих агрегатів складає від 1,5 до 1,75 кВт, і вони зкомплектовані регулятором обертів Schneider Electric Altivar 320.



Рис. 3.7 – Зовнішній вигляд електродвигуна АВВ МЗВР 90S

Таблиця 3.7 - Специфікація електродвигуна МЗВР 90S

Коефіцієнт потужності	0,76
ККД, %	88,4%
Номінальний обертовий момент, Нм	7,7
Потужність, кВт	2,2
Маса, кг	20



Рис. 3.8 - Перетворювач частоти АВВ АС580



Рис. 3.9 – Зовнішній вигляд електродвигуна Siemens Simotics GP/SD  
1LE1001-0EB02-2FB4

Таблиця 3.8 - Специфікація Siemens Simotic GP/SD 1LE1001-0EB02-2FB4

Коефіцієнт потужності	0,86-0,90
ККД, %	87-89
Частота	50/60 Гц
Потужність, кВт	1,5-1,75
Маса, кг	13

### 3.3 Визначення програмованого логічного контролера

ПЛК, або програмований логічний контролер, виступає незамінним елементом будь-якої системи автоматизованого управління. Його першочергове завдання — гарантувати точний і безаварійний нагляд за об'єктом, яким здійснюється регулювання. Завдяки своїй адаптивній будові (модульності) та застосуванню простого програмного синтаксису, він є зручним засобом для взаємодії з широким спектром периферійних пристроїв. Впровадження цих апаратних засобів сприяє підвищенню якості кінцевої продукції при одночасному зниженні експлуатаційних витрат [9].

Обраний мною ПЛК володіє такими важливими властивостями:

1. Здатність до розгортання. Можливість комплектувати різні апаратні складові відповідно до актуальних технологічних вимог.
2. Простота кодування. Лаконічний мовний інтерфейс дає змогу будь-якому фахівцю легко реалізувати керуючі алгоритми для численних виконавчих механізмів.
3. Висока надійність. Контролери демонструють стійкість до збоїв та стабільність функціонування навіть у складних умовах, як-от підвищена температура чи вологість довкілля.
4. Універсальність застосування. Пристрій здатний координувати роботу різноманітного устаткування у межах багатьох виробничих циклів, що

обумовлює його широке розповсюдження у промисловості.

5. Режим дистанційного нагляду. Підтримка поширених протоколів зв'язку, зокрема RS-485 та Ethernet, дозволяє операторам здійснювати моніторинг та управління процесами на відстані.

6. Переваги в економіці. Інтеграція ПЛК веде до помітного зменшення загальних виробничих витрат.

Ключовим критерієм при виборі ПЛК слугує оцінка ринкової позиції виробника та актуальності конкретної моделі. Аналіз охопив пропозиції таких провідних світових компаній, як німецький гігант Siemens та японська корпорація Mitsubishi. Було встановлено, що Siemens пропонує більш розлогий вибір апаратних рішень та має програмне середовище для розробки, що є більш зрозумілим для користувача. Крім того, він виділяється високим ступенем інтеграції з обраним технологічним обладнанням та відмінними показниками енергоефективності. У підсумку, увага була зосереджена на двох ключових лінійках — Simatic S7-1200 та Simatic S7-1500. Остаточний вибір припав на модель Simatic S7-1200.

Головні позитивні моменти обраного контролера:

1. Ціновий аспект. Вартість цієї версії є достатньо зваженою на тлі конкурентів, що робить її найкращим варіантом для втілення проєктів із фінансовими обмеженнями.

2. Фізичні розміри. Компактність корпусу полегшує монтаж навіть у шафах, де спостерігається дефіцит вільного простору.

3. Програмне забезпечення. Контролер функціонує у фірмовому програмному комплексі TIA Portal, який надає розширений набір інструментів для точного калібрування виробничих процесів та скорочення часу, необхідного для їхнього запуску.

4. Енергоощадність. Завдяки оптимізованому використанню ресурсів, досягається зниження загального рівня споживання електроенергії на виробничій ділянці.

Для забезпечення потреби в енергоспоживанні на лінії виробництва



ідентифікатором 6ES7231-5PF32-0XB0; його експлуатаційні показники деталізовано у Таблиці 3.10, а візуальне представлення міститься на Рисунку 3.11. Для втілення функцій виведення було визначено модуль 6AG1232-4HD32-4XB0, параметри якого наведено у Таблиці 3.11, а його зображення – на Рисунку 3.12.

Таблиця 3.10 - Технічні аспекти модуля 6ES7231-4HF32-0XB0

Енергоспоживання	До 1,5 В
Тип вхідних сигналів	0-10 В або 4-20 мА
Кількість входів	8
Живлення	DC 24 В
Роздільна здатність	13 біт
Час вимірювання	До 200 мс

Таблиця 3.11. - Характеристики модуля 6AG1232-4HD32-4XB0

Енергоспоживання	До 1,5 В
Вхідне живлення	DC 24 В
Кількість виходів	4
Крок перетворення	14 біт ( $\pm 10$ В), 13 біт (0-20 мА)
Час встановлення	50 мс
Тип сигналу	$\pm 10$ В, 0-20 мА

Здійснили розгляд низки промислових обчислювальних пристроїв від компанії Siemens, а саме моделей SIMATIC IPC647C, SIMATIC IPC647D, а поряд з ними й SIMATIC 547D. Остаточний вердикт схилився на користь апаратної збірки SIMATIC IPC647D, що було зумовлено відчутно більшою продуктивністю його центрального процесора та відмінними показниками зручності експлуатації. Повний перелік технічних характеристик можна знайти у Таблиці 3.12



Рис. 3.11 - Вигляд модуля 6ES7231-5PF32-0XB0



Рис. 3.12 - Вигляд модуля 6AG1232-4HD32-4XB0

Таблиця 3.12 - Характеристика ПК SIMATIC IPC647D

Форм-фактор	19-дюймовий rack-формат
Процесор	Різні процесори від Intel (i3,i5,i7)
Оперативна пам'ять	DDR3 16Гб
Зберігання даних	2 слоти для SSD (підтримка RAID)
Інтерфейси	Ethernet, USB, RS-485
Функція резервного живлення	+

## РОЗДІЛ 4 ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ ВНЕСЕННЯ МОЛОЧНОЇ ЗАКВАСКИ

### 4.1 Створення моделі підсистеми дозування заставки як керованого об'єкта

Точність, з якою вноситься закваска (виражена у відсотках від загального об'єму суміші «молоко + закваска» у відповідній ємності, що належить до підсистеми «ємність для сквашування»), є визначальним фактором якості кінцевого продукту даного виробництва.

Ключовим аспектом цього етапу є вимога технологічних інструкцій щодо підтримки концентрації закваски у межах 1–5% від загальної кількості суміші; це умова є обов'язковою для досягнення найкращої якості готового товару [20].

Основна складність на даному етапі технологічного процесу криється у відсутності прямого вимірювання необхідного співвідношення компонентів у системі сквашування. Натомість, система забезпечує лише прямий моніторинг ступеня заповнення ферментаційної ємності (у відсотках від повної місткості –  $Q$ , що змінюється від 0 до 100%) та об'єму внесеної закваски (вимірюється в літрах –  $V_1$ , діапазон 0–1000 л). Регулювання параметрів у цій підсистемі здійснюється шляхом зміни: положення засувки, що подає закваску (відображається у відсотках від максимально можливої пропускної здатності клапана –  $S$ , діапазон 0–100%), та швидкості обертання двигуна  $M_1$  молочного насоса (вимірюється в обертах за хвилину –  $\omega$ , діапазон 0–3000 об/хв).

Слід зазначити, що контур зворотного зв'язку в цій системі формується на підставі даних, отриманих із датчика рівня наповнення ємності  $LE$ , тобто через показник  $Q$ .

Враховуючи вищевикладену інформацію щодо підсистеми введення закваски у молочну сировину, для подальших обчислень ми можемо

скористатися такою структурною схемою окремої підсистеми, розглянутої як об'єкт керування (рис. 4.1).

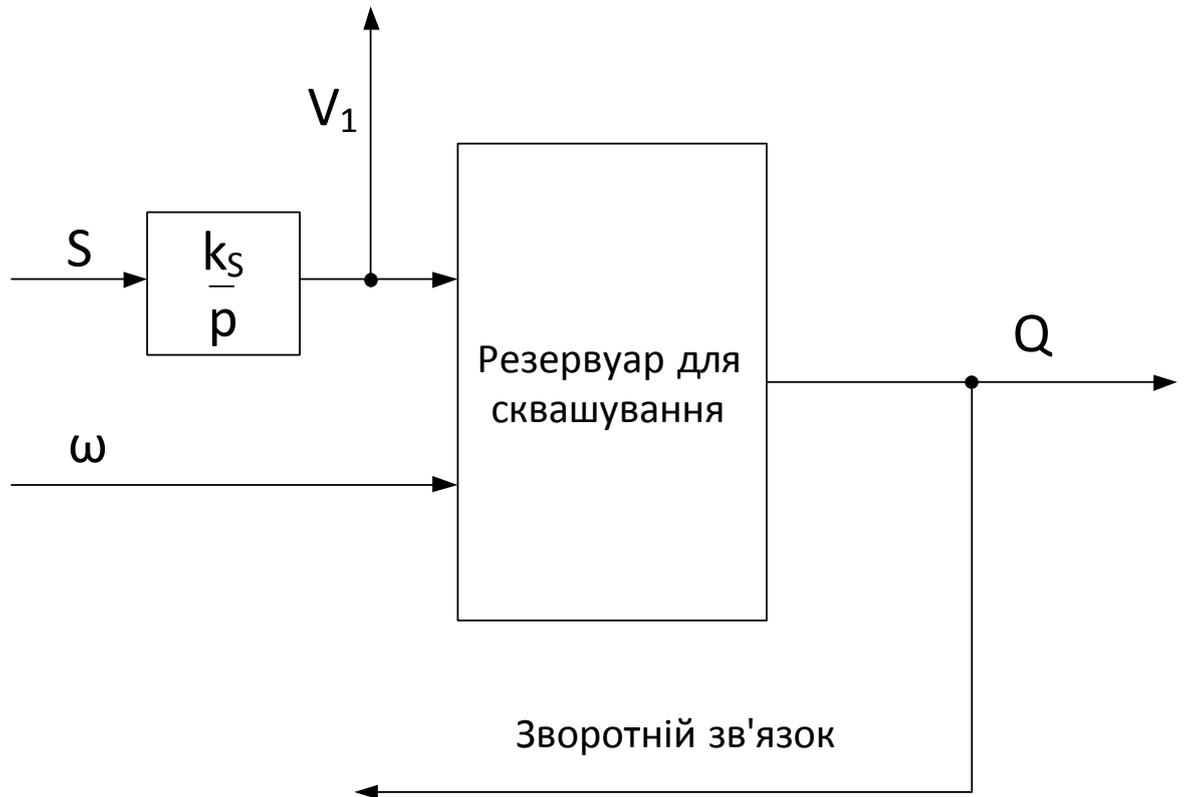


Рис. 4.1 – Схема структурна об'єкта керування

Зв'язок передавальний типу  $k_s/p$  характеризує кумулятивну (інтегральну) реакцію між показниками  $S$  та  $V_1$ . При цьому показник  $V_1$  може бути вилучений (переданий у зворотні зв'язки, що відрізняються від інших) з контрольованого об'єкта з метою подальшого застосування його для коригування відповідних величин.

## 4.2 Математичний опис етапу заквашувального заповнення резервуару

Сам процес наповнення визначеної посудини є складеним: остаточне значення  $Q$  формується як сума надходження об'ємів закваски та молока, співвіднесена із загальною місткістю резервуару. Розглянемо наповнення ємності кожним компонентом цієї суміші окремо [19].

Надходження об'єму закваски прямо корелює зі зміною  $V_1$  та може бути

виражене як ланка, що не має інерції, з коефіцієнтом передачі  $k_1$ .

Стосовно надходження молока, необхідно врахувати такі моменти цього етапу:

Мотор М1 демонструє певну реакцію на зміну швидкості обертання, що спричинена частотним керуванням. Це проектується у вигляді інерційної ланки початкового порядку, яка має часову константу  $T_1$  (яку можливо встановити шляхом експериментів);

1) Обсяг доданого молока являє собою сукупну інтегровану величину, отже, вихідну ланку необхідно доповнити відповідним інтегратором.

Враховуючи вищезазначені характеристики, ці елементи цілком можливо згрупувати у структурну діаграму регульованого об'єкта, яку ілюструє нижченаведений малюнок (рис. 4.2).

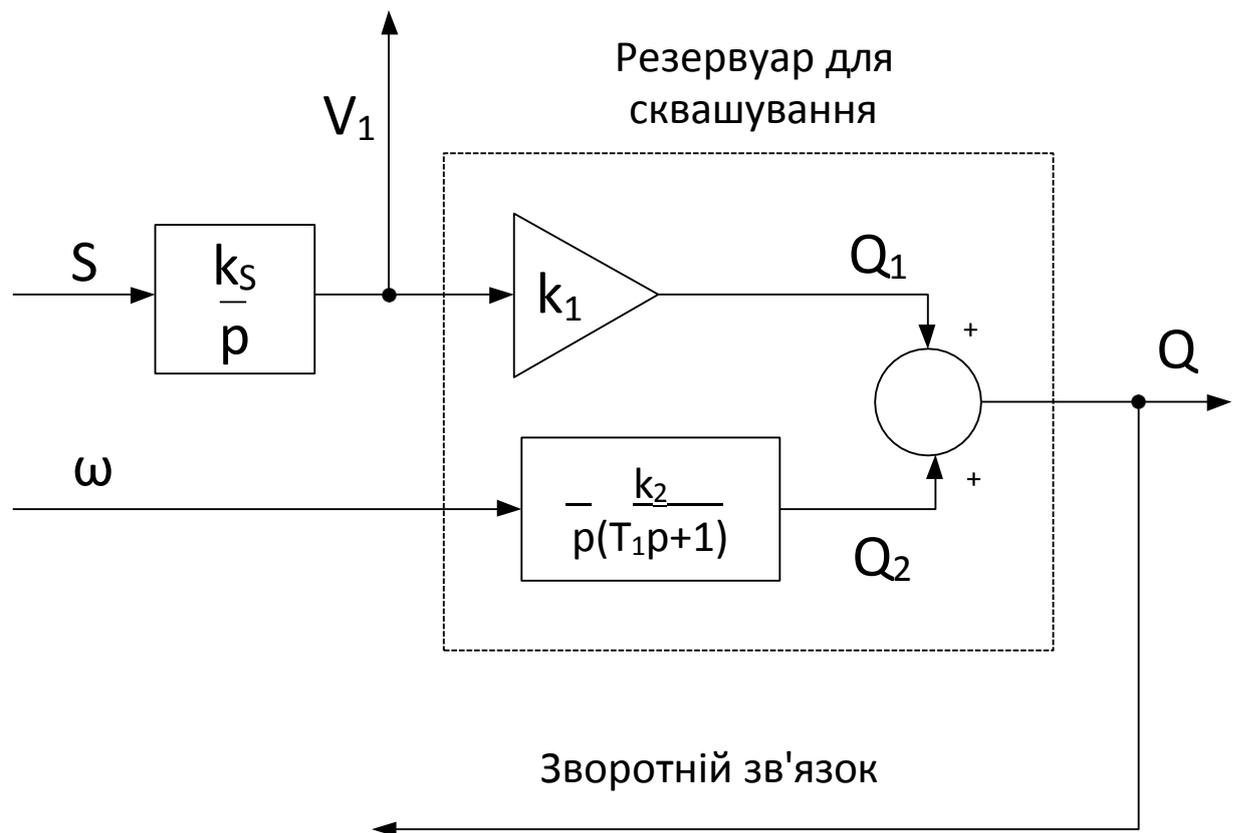


Рис. 4.2 – Схематичне зображення оновленої функціональної структури системи керування (де  $Q_1$  позначає кількість закваски, а  $Q_2$  – обсяг молока)

### 4.3 Окреслення загальної схеми системи керування

З огляду на те, що величини компонентів  $Q_1$  та  $Q_2$  не перебувають у прямому функціональному співвідношенні у загальній суміші  $Q$ , застосовувати модель керування, що ґрунтується на поетапному виправленні відхилень, не буде найкращим вибором.

Натомість, у подібних обставинах видається доцільнішим впровадити спосіб паралельної корекції. Це означає залучення додаткового блоку з метою модифікації цільових показників (уставок) у відповідних регуляторних петлях. Такий підхід дає змогу покращити функціонування усієї системи керування через виконання трьох послідовних етапів:

- Спочатку здійснюється первинне вирівнювання (калібрування) контуру, який відповідає за дозування закваски та який функціонує самостійно;

- Далі проводиться первинне вирівнювання (калібрування) петлі, призначеної для подачі молока, що оперує незалежно;

- Нарешті, виконується калібрування програмної частини, себто ланки, покликаної вносити корективи до заданих параметрів, з метою досягнення одночасного наповнення резервуару необхідними складниками.

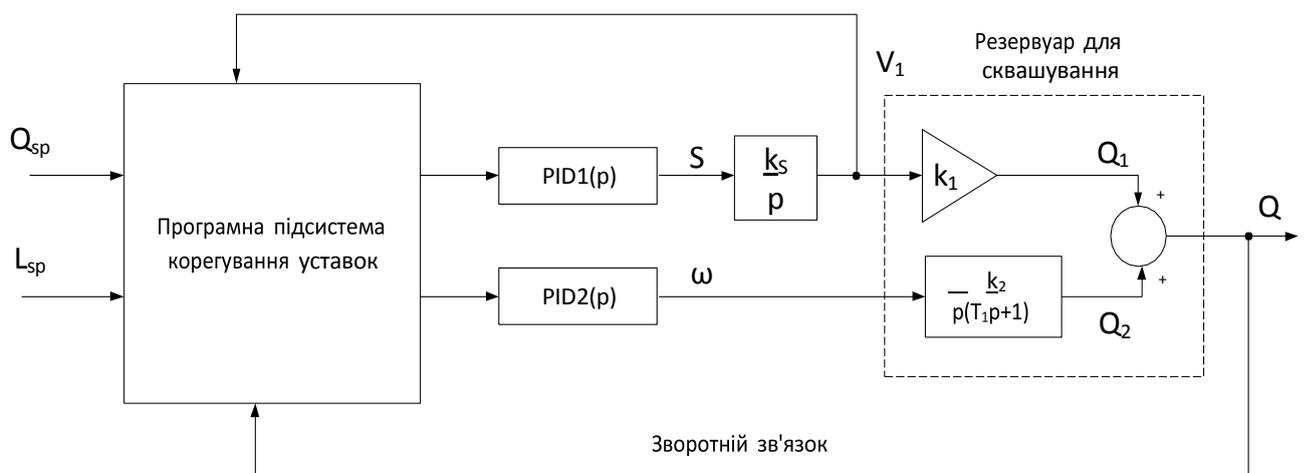


Рис. 4.3 - Схематична ілюстрація системи моніторингу обсягів дозування закваски для молока та самої закваски у ферментаційному резервуарі

( $Q_{sp}$  - цільовий показник заповнення ферментаційного резервуару, у межах від 0 до 100%;  $L_{sp}$  - бажана частка закваски у загальній суміші, діапазон 1% – 5%).

Як видно із наведеної структурної схеми, у контурах регулювання параметрів  $Q1$  та  $Q2$  застосовуються ПІД-регулятори. Вони являють собою апаратне втілення найпоширеніших (пропорційно-інтегрально-диференціальних) методів керування, які за потреби завжди можна спростити відповідно до поточних вимог.

#### 4.4 Калібрування регуляторів

Для початкового налаштування ПІД-регуляторів під кожен відповідну змінну ( $Q1$  та  $Q2$ ) достатньо встановити такі значення їхніх коефіцієнтів, аби в замкненому контурі «регулятор + відповідна складова об'єкта управління» виконувалися наступні дві умови [16]:

- 1) Необхідний запас стійкості (виміряний у логарифмічному масштабі) для відповідного контуру слід підтримувати в межах 6-20 дБ;
- 2) Схил логарифмічної амплітудно-частотної характеристики (ЛАЧХ) на частоті зрізу повинен становити приблизно 20 дБ/декаду (це забезпечить стабільність системи без надмірної аперіодичності).

Немає потреби враховувати додаткові вимоги при розрахунку коефіцієнтів регуляторів, оскільки досягнення потрібних фазових запасів стійкості буде реалізовано у програмному модулі корекції заданих значень для кожного окремого розімкненого контуру [18].

А) Проведемо оцінку величин коефіцієнтів підсилення  $k_S$  та  $k_1$ . Значення  $k_S$  обчислюється виходячи з того, що при повному відкритті електромагнітного клапана FCY (100%) 3000 літрів стартової культури потрапляють у резервуар приблизно за одну годину. Отже,  $k_S = 3000[\text{л}]/3600[\text{сек}] = 0.833(\text{л}/\text{сек})$ . Параметр  $k_1$  розраховується, виходячи з Condition, що загальний об'єм ферментаційного бака дорівнює 10000 л:

$$k_1 = (1/10000[\text{л}]) \cdot 100[\%] = 0.01(\%/сек).$$

Б) Оцінимо коефіцієнт підсилення  $k_2$  та часову сталу  $T_2$ . Значення  $k_2$  виводиться з того, що при максимальних обертах молочного насоса (до 3000 об/хв) досягається найшвидший темп наповнення ферментаційного резервуара молоком, при цьому при відповідній швидкості повне заповнення резервуару лише...

Часову сталу  $T_2$  можна приблизно визначити емпірично: необхідно зафіксувати час, за який двигун М1 досягає своєї максимальної продуктивності, і розділити це значення на 2.72. У нашому випадку  $T_2 = 10[\text{сек}]/2.72 = 3.676(\text{сек})$ .

В) Калібрування регуляторів у контурах контролю подачі закваски та введення молока. Збудуємо асимптотичну логарифмічну амплітудно-частотну характеристику (ЛАЧХ) ПІД-регулятора. Для цього скористаємося його загальною передавальною функцією у такому вигляді:

$$W_{PID}(p) = k_p \left( 1 + \frac{1}{T_i p} + T_d p \right) = \frac{k_p}{T_i} \frac{1 + T_i p + T_i T_d p^2}{p}$$

Здійснюючи перетворення Фур'є стосовно виразу (4.1), наведеного раніше, нам стає можливим вивести формулу для АЧХ наступним чином:

$$W_{PID}(p) = \frac{k_p}{T_i} \frac{\sqrt{T_i^2 \omega^2 + (1 - T_i T_d \omega^2)^2}}{\omega}$$

Ось як виглядатиме вираз для амплітудно-частотної характеристики:

$$L_{PID}(\omega) = 20 \lg \frac{k_p}{T_i} + 20 \lg \sqrt{T_i^2 \omega^2 + (1 - T_i T_d \omega^2)^2} - 20 \lg \omega$$

Сконструюємо наближену амплітудно-частотну характеристику (АЧХ), зазначену у формулі (4.3), беручи до уваги межові частотні випадки ( $\omega \rightarrow 0$  та  $\omega \rightarrow \infty$ ). При цьому для високочастотної області відповідний математичний вираз виглядатиме наступним чином

$$L_{PID}^{HF}(\omega) = 20\lg \frac{k_p}{T_i} + 40\lg(\sqrt{T_d T_i} \omega) - 20\lg \omega$$

а для низькочастотної складової маємо

$$L_{PID}^{LF}(\omega) = 20\lg \frac{k_p}{T_i} - 20\lg \omega$$

Обчислена асимптотична амплітудно-частотна характеристика, разом із визначеною частотою зрізу, показана на малюнку 4.4.

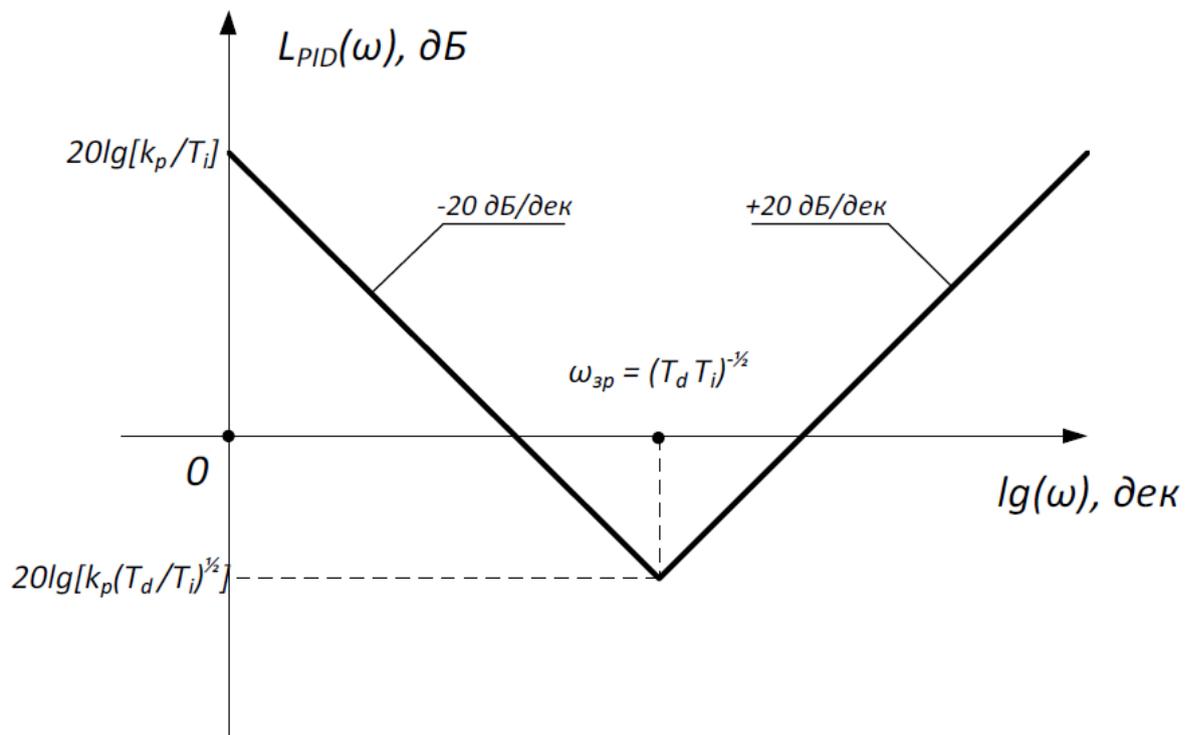


Рис. 4.4 - Графік амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) ПІД-регулятора

Параметри передавальних функцій, що відповідають ланкам регуляторів у контурах подачі закваски та подачі молока, слід підібрати так, щоб у розімкненому стані для цих контурів амплітудний запас стійкості знаходився в діапазоні від 6 до 20 децибел.

Стосовно контуру дозування скислого молока, модель керованого об'єкта можна виразити як інтегрувальний елемент із передавальною

$$W_3(p) = \frac{k_1 k_s}{p}$$

функцією

Тоді асимптотична ЛАЧХ відповідного розімкненого контуру керування матиме вигляд наведений на рисунку нижче (рис. 4.5).

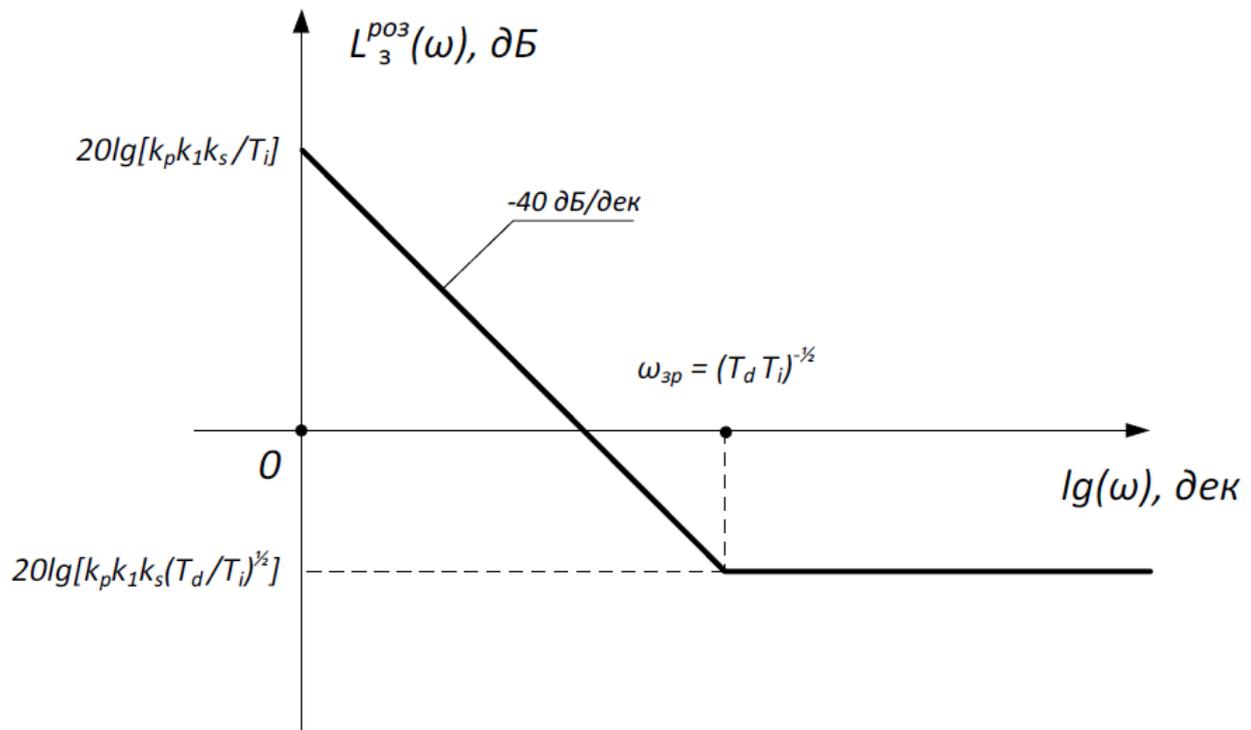


Рис. 4.5 - Наближена АЧХ контуру управління дозуванням закваски у розімкненому стані

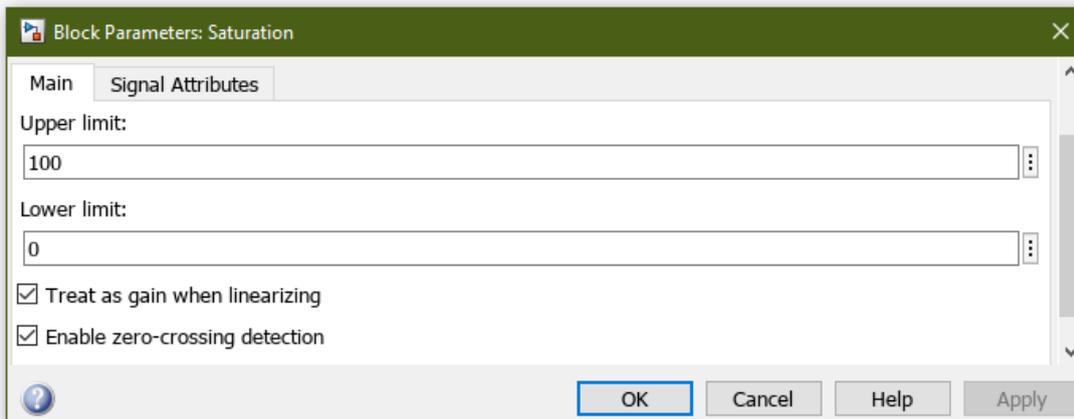
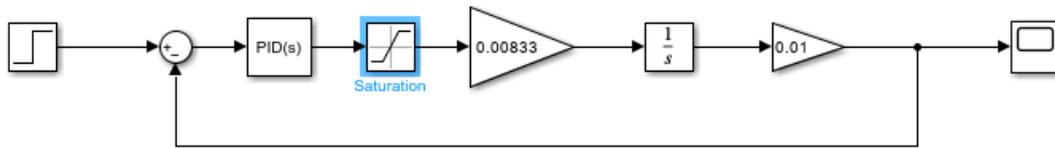
Підбір значень коефіцієнтів регулятора, щоб гарантувати заданий запас стійкості по амплітуді у межах від 6 до 20 децибел, умовою якого має бути

$$20\lg[k_p k_1 k_s \sqrt{T_d / T_i}] \geq 20$$

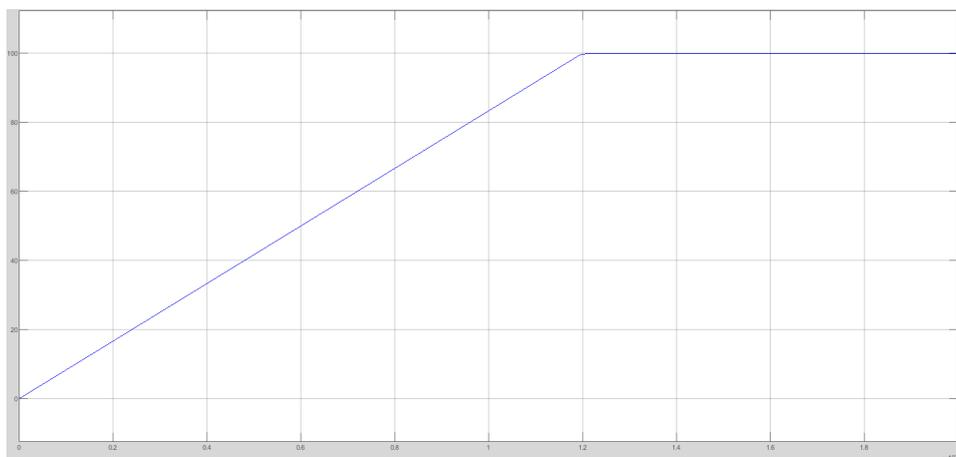
Для досягнення граничної простоти у наведеному виразі, а також максимально спростити відбір потрібних значень коефіцієнтів регулятора, доцільно прийняти  $T_i = 0$ , враховуючи при цьому, що усі змінні є дійсними

та виключно додатніми числами. Це виглядає так:

$$k_p k_1 k_s \sqrt{T_d} \geq 10 \sqrt{T_i}$$



Отже, можна легко налаштувати потрібний регулятор, спершу спростивши його будову до схеми ПД-регулятора, що дає змогу охопити досить великий спектр значень відповідних пропорційних та диференціальних коефіцієнтів. Завдяки цьому, зміна стану в замкненому контурі системи подачі закваски набуде такої динаміки, як це ілюструє наступний графік (рисунок 4.6). Заповнення резервуару,  $Q_1$  (%)



Час,  $t$  (сек)

Рис. 4.6 - Перехідний процес у контурі регулювання дозування закваски (параметри ПД-регулятора:

Пропорційний=100, Інтегральний=0, Диференціальний=10,  
Фільтр=100)

Щодо підсистеми подачі молока, об'єкт управління цілком можна представити як типовий інтегратор, зважаючи на певну затримку, що виникає при наростанні швидкості двигуна помпи, що подає молоко, відтак його передатна функція виглядає так:

$$W_M(p) = \frac{k_2}{p(T_1 p + 1)}$$

ЛАЧХ цієї ланки відповідає наступному виразу:

$$L_M(\omega) = 20 \lg k_2 - 20 \lg \sqrt{1 + (T_1 \omega)^2} - 20 \lg \omega$$

Відповідно асимптотична ЛАЧХ ланки об'єкта керування матиме вигляд наведений на рисунку нижче (рис.4.7).

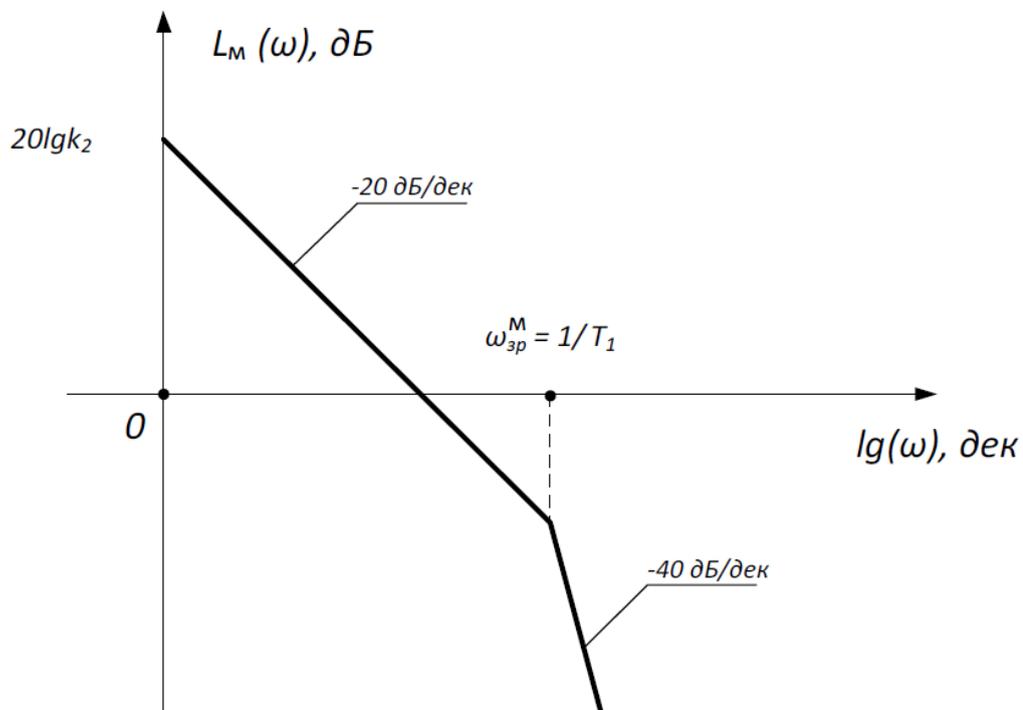


Рис. 4.7 – Гранична частотна характеристика (ГЧХ) керуючого об'єкта у системі регулювання подачі молока.

Найвищу динамічну стійкість замкненого контуру управління

забезпечить встановлення таких граничних значень параметрів ПІД-регулятора (максимально подовжити горизонтальну частину ГЧХ):

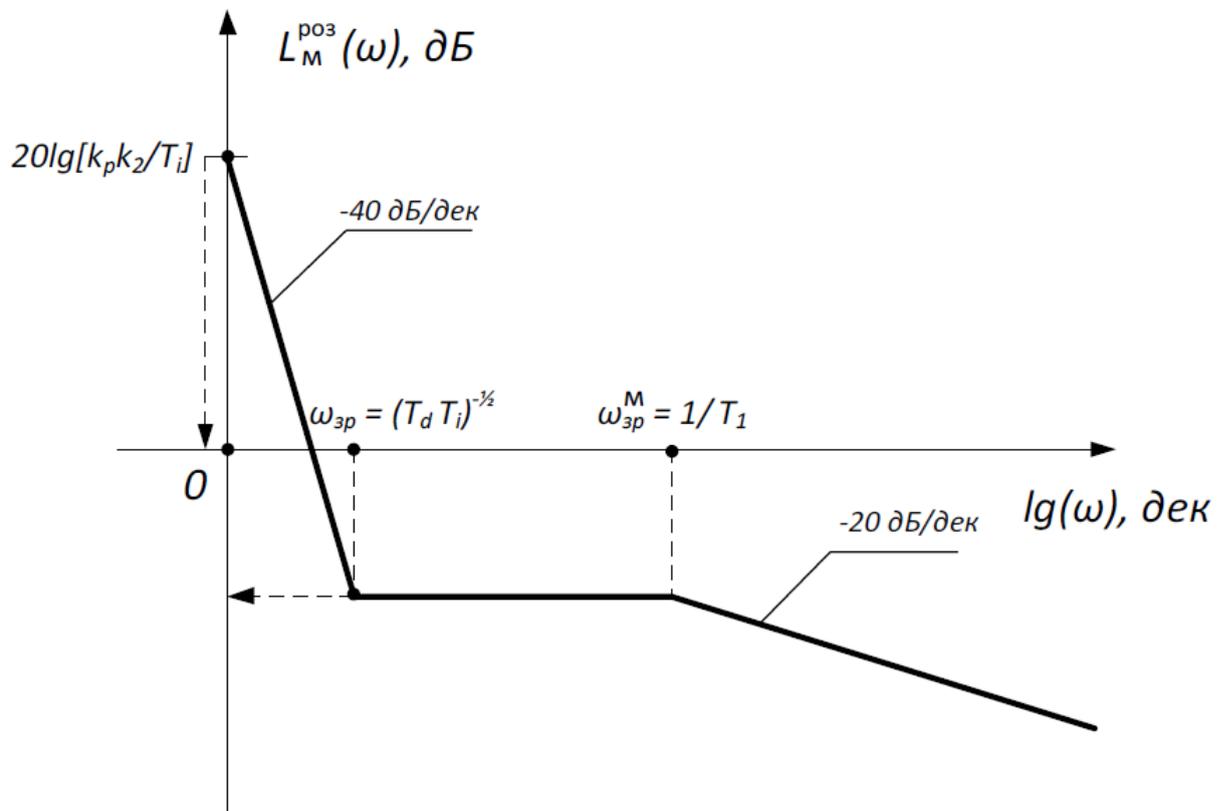
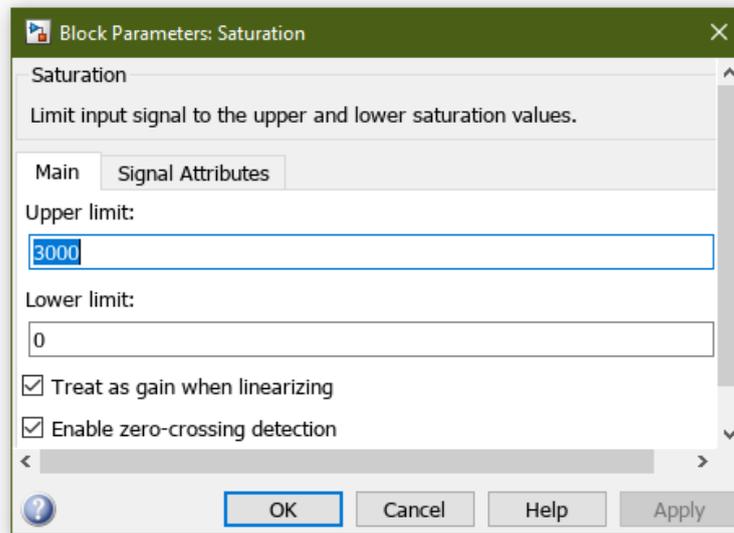
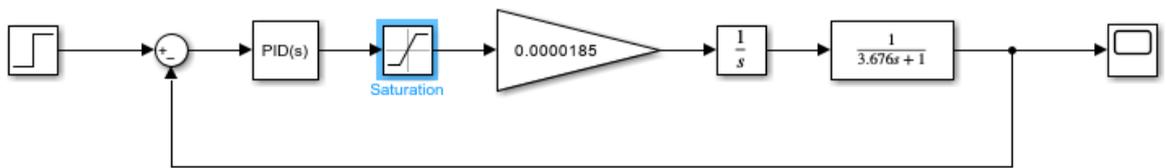
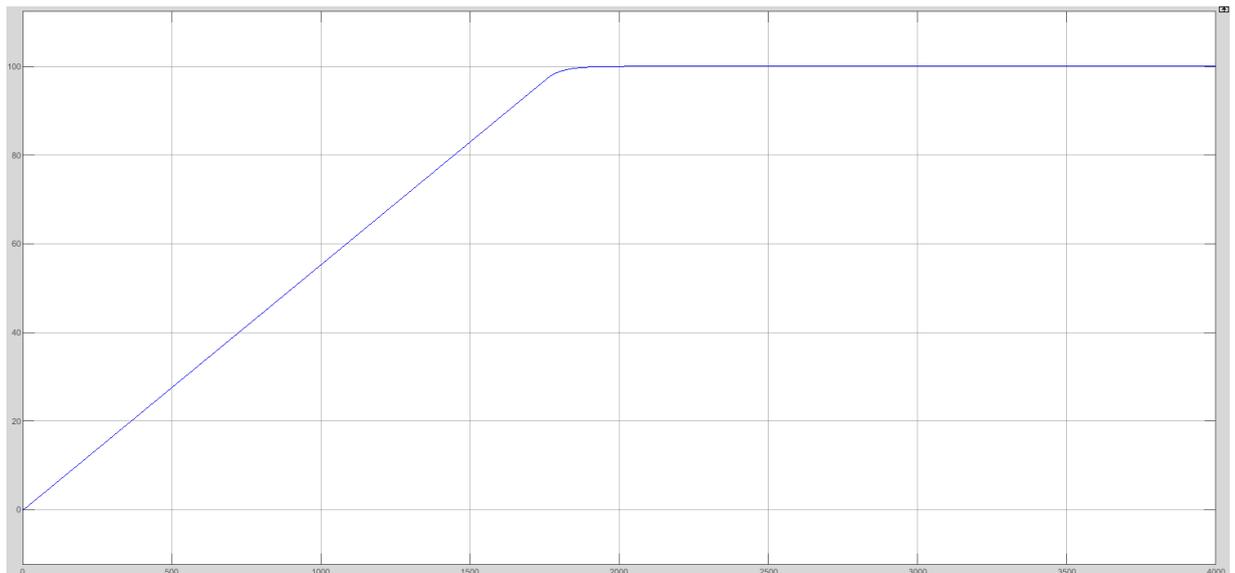


Рис. 4.8 – Графік частотної характеристики ланцюга автоматичного керування (ЛАЧХ) відкритого контуру для операції наливання молока

Як наслідок, у замкненій підсистемі для регулювання дозування молока, може спостерігатися такий перехідний процес (див. рис. 4.9).



### Заповнення резервуару, $Q_2$ (%)



Час,  $t$  (сек)

Рис. 4.9 - Хід реагування регулятора у ланцюгу контролю заповнення молока (параметри PID-блоку: Рівень=1000, Інт=0.001, Диф=100, Попереднє згладжування=100)

Г) Створення допоміжного вузла для узгодження заданих значень. Зв'язування вже відкаліброваних контурів регулювання для порціонування закваски та заповнення ємності для сквашування молока виконується у

модулі узгодження та коригування відповідних цільових значень. Структурна схема цього модуля синхронізації у взаємозв'язку з раніше налаштованими контурами регулювання, змодельована у середовищі Matlab/Simulink, представлена на рис. 4.10.

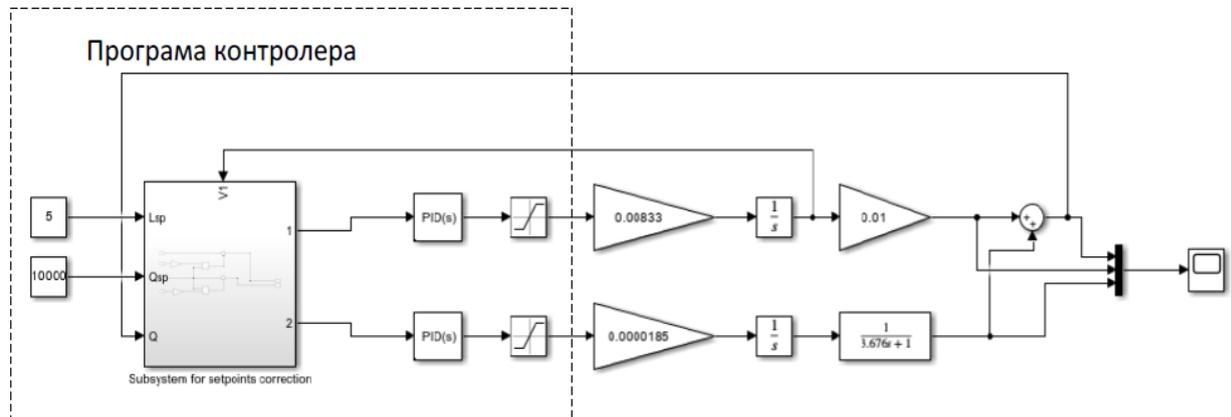


Рис. 4.10 - Схема системи, що керує внесенням закваски та заповненням чану для сквашування, розроблена у Matlab/Simulink

Як видно зі схеми, для роботи всієї системи ключовими є такі первинні задані параметри:

- $L_{sp}$  – бажана частка внесення закваски у загальній масі суміші, діапазон якої перебуває у межах 1–5%;
- $Q_{sp}$  – потрібний обсяг, яким має бути заповнено резервуар для ферментації, виміряний у літрах.

Щодо блоку, який займається узгодженням та фіналізацією уставок для контурів регулювання, він приймає на вхід, окрім згаданих вище основних цільових величин, поточний об'єм доданої рідини ( $V1$ ) та фактичний рівень наповнення ємності для сквашування ( $Q=Q1+Q2$ ).

Найбільш безпосередливий спосіб генерації керуючих імпульсів, а саме імпульсів з номерами 1 та 2, які надходять до відповідних ланок регулювання, полягає у простій трансформації вихідних основних уставок  $L_{sp}$  та  $Q_{sp}$ , беручи за основу інформацію, отриману через ланцюги зворотного зв'язку.

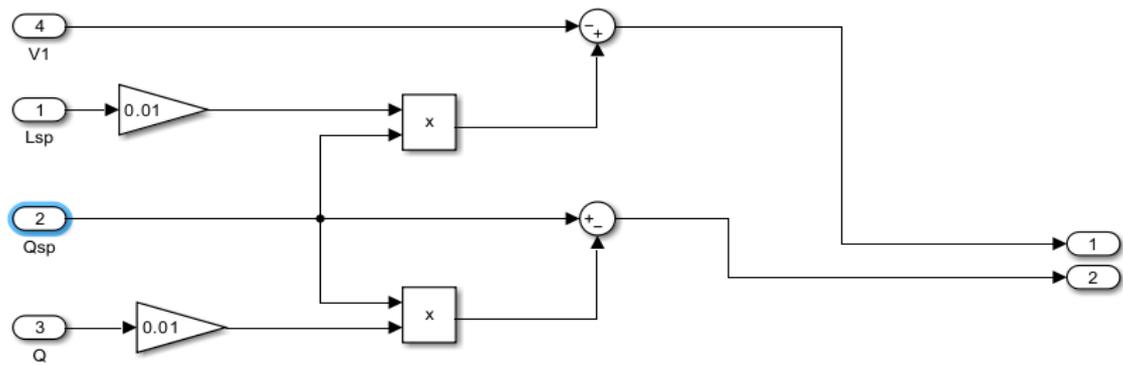


Рис. 4.11 – Діаграма розрахунку потрібних значень уставок для контурів  $L_{sp}$  та  $Q_{sp}$ , базована на зворотному зв'язку, отриманому в точці синхронізації, та їх подальшого коригування.

#### 4.5 Моделювання запровадження закваски у молочну основу

Грунтуючись на передумовах та розрахунках, зроблених стосовно системи автоматичного контролю, зокрема:

- точні числові значення та архітектура налаштувань контролерів у петлях, які відповідають за порційне дозування складника та заповнення резервуару для сквашування молоком (див. рис. 4.6, 4.9);

- схема апаратної реалізації системи управління, оформлена як конфігурація з паралельним механізмом корекції та додатковим блоком для узгодження та калібрування встановлених параметрів (див. рис. 4.10);

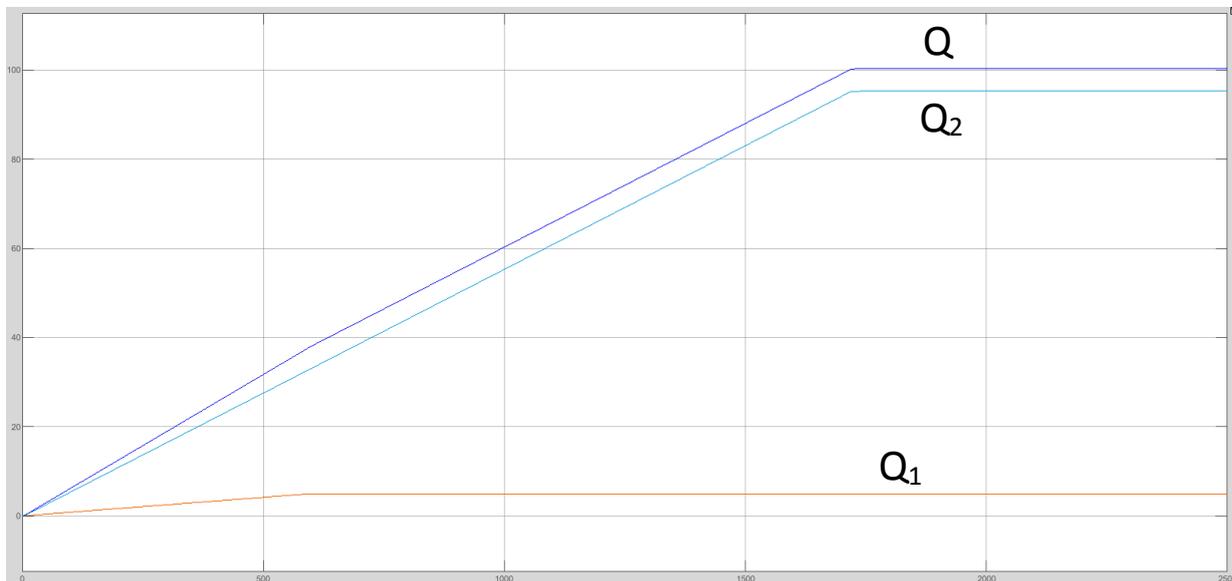
- послідовність кроків для формування імпульсів управління для відповідних контурів регулювання (див. рис. 4.11);

- бажані кінцеві показники для всієї системи як єдиного цілого (див. рис. 4.10),

було розпочато імітаційне відпрацювання функціонування системи. Особлива увага зосереджувалася на моніторингу ключових метрик: як змінюються у часі загальний рівень заповнення ємності для сквашування ( $Q$ ) та об'єми його складових ( $Q_1$  та  $Q_2$ ); які сигнали надходять на регулятор обертів електроприводу молочного насоса, а також які трансформації

відбуваються у робочому стані дозувального обладнання для закваски. Графічне відображення залежностей цих величин від часу наведено нижче на рис. 4.12, 4.13, 4.14.

Відсоток заповнення, %



Час, сек

Рис. 4.12 - Схематичне зображення динаміки заповнення силосної ємності, що охоплює як сукупний обсяг, так і його складові частини: Q, Q<sub>1</sub> та Q<sub>2</sub>.

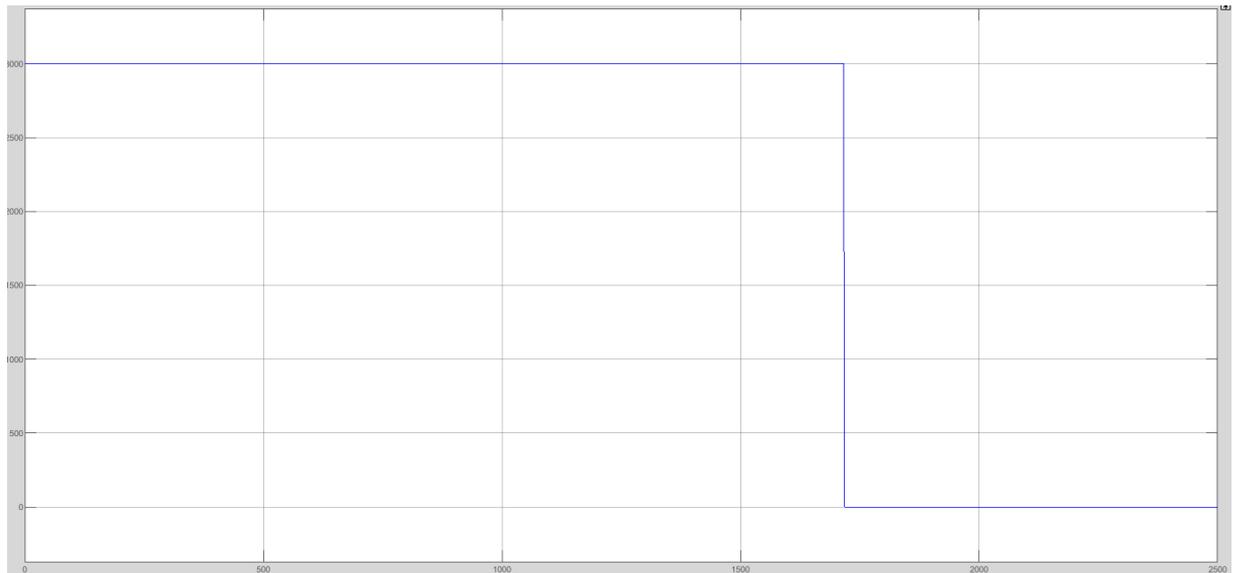
Ступінь прочинення вентиля подачі закваски



Час, сек

Рис. 4.13 - Часовий графік зміни стану клапану для дозування закваски

## Швидкість обертання двигуна, об/хв



Час, сек

Рис. 4.14 - Графік зміни кутової швидкості насосного вузла в часовому розрізі, задіяного у процесі заповнення резервуара молоком.

#### 4.6 Висновки після проведення аналітичного огляду та створення моделі

Підсумовуючи результати проведеного аналітичного опрацювання даних та змодельованих процесів, можна виділити низку тез, які можуть бути цінними у процесі практичного конструювання подібних систем або при їх експлуатації [15]:

- Наведений перелік кроків, необхідних для формалізації та аргументації структури та компонентного складу систем, подібних до тієї, що розглядалася у цій роботі, спроможний стати міцним фундаментом для деталізації відповідного функціонального блоку та взаємозв'язків у загальній архітектурі керування;

- Забезпечення необхідної якості та стабільності функціонування системи керування доцільно здійснювати, спираючись на логарифмічні частотні характеристики (ЛФЧХ) відповідних незамкнених контурів регулювання. Це зумовлено тим, що їхнє формування не є складним

завданням, а також вони дають чітку візуалізацію для подальшого математичного обґрунтування [13];

- Реалізація паралельного методу коригування у механізмах автоматичного регулювання може бути суттєво спрощена, якщо у початковій частині відповідної системи додати спеціальний блок для синхронізації та узгодження заданих величин для контурів керування, які не мають прямого взаємного впливу через петлю зворотного зв'язку (на відміну від систем, де корекція відбувається послідовно);

- Застосування підходу, представленого у цій публікації, для синтезу та точного налаштування регуляторів, за умови виконання додаткових глибоких математичних викладень, може призвести до формування перехідних процесів із максимально можливою швидкістю відгуку та відмінними показниками якості (наприклад, відхилення від заданого значення, як у бік недотягу, так і перетягу, не перевищує 1%).

## РОЗДІЛ 5 СТВОРЕННЯ МЕХАНІЗМІВ ВЗАЄМОДІЇ МІЖ КОРИСТУВАЧЕМ ТА ОБЛАДНАННЯМ

### 5.1 Основні принципи людино-машинного інтерфейсу

Інтерфейс "Людина-Машина" (скорочено НМІ) слугує точкою з'єднання між особою, яка керує певним процесом, та автоматизованою системою. Через НМІ оператори отримують спроможність переглядати стан, здійснювати контроль та вносити зміни до робочих режимів устаткування чи послідовностей виробничих операцій, використовуючи при цьому графічні та текстові методи подачі даних. Як правило, такі системи вбудовуються у пультові панелі й можуть виготовлятися провідними світовими виробниками, наприклад, Siemens чи Mitsubishi.

Ключові переваги інтеграції НМІ-панелей полягають у суттєвому спрощенні обміну інформацією між людиною та автоматизованим комплексом, а також у можливості спостерігати за виробничими процесами з віддалених локацій. Окрім того, вони забезпечують миттєвий доступ до критично важливих даних, що дає змогу персоналу оперативно відреагувати на будь-які непередбачені ситуації, які можуть виникнути під час роботи системи.

Найчастіше застосовуються варіанти НМІ-панелей, оснащені сенсорними дисплеями для нагляду та управління технологічними лініями. Це значно полегшує взаємодію персоналу з апаратурою та зменшує потребу у великій кількості фізичних кнопок та перемикачів.

Підсумовуючи, панелі НМІ є невід'ємною частиною сучасного виробничого середовища, оскільки вони надають операторам можливість контролювати та керувати функціоналом технічних засобів, тим самим гарантуючи високий рівень ефективності та безпеки експлуатації промислових об'єктів [1].

## 5.2 Вибір програмного забезпечення

Перед початком процесу розробки системи взаємодії для керуючого персоналу, першочерговим кроком є визначення програмного комплексу, який буде залучений для виконання поставлених завдань. Було здійснено аналіз низки доступних рішень, а саме:

1. TIA Portal;
2. SCADA KVisionOPC;
3. Rapid SCADA.

З огляду на те, що для цього проєкту було обрано апаратне забезпечення (комп'ютери, програмовані логічні контролери та допоміжне обладнання) від компанії Siemens, остаточне рішення схилилося на користь TIA Portal. Цей інструментарій має низку вагомих позитивних аспектів [6][12]:

1. Комплексна підтримка апаратури Siemens. Сумісність з усім спектром пристроїв Siemens, включаючи контролери, додаткові модулі та різноманітні панелі оператора, забезпечує раціональність роботи на об'єктах, де використовується обладнання цієї корпорації.

2. Функціонал для віддаленого моніторингу. Можливість спостерігати та налаштовувати автоматизовані установки з віддаленої точки дозволяє швидко втрутитися у процес у разі аварійних обставин. Крім того, передбачена опція дистанційного оновлення програмних версій.

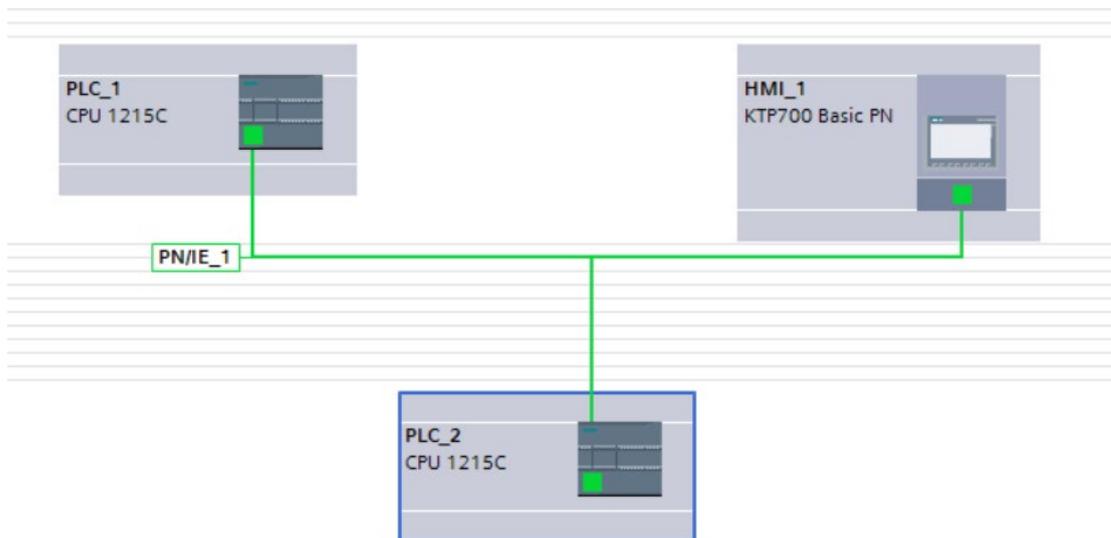
3. Набір інструментів для аналізу інформації та формування звітів. Розширені можливості зі зведення та дослідження отриманих даних дозволяють користувачам ефективно здійснювати керівництво всією вертикаллю виробничої автоматизації.

4. Інтуїтивно зрозумілий та зручний графічний інтерфейс. Навіть фахівцям, які нещодавно почали працювати з програмуванням систем автоматизації, буде досить просто і швидко опанувати переважну частину функціоналу TIA Portal.

5. Висока швидкість проведення конфігурацій. Завдяки здатності розробляти та верифікувати проекти в активному режимі, існує можливість гнучко адаптувати автоматизовану установку безпосередньо під час виконання робочих операцій.

### 5.3 Етапи створення та калібрування інтерфейсу

Після детального ознайомлення з програмним продуктом, можна переходити до стадії розробки НМІ. Насамперед, у бібліотеці програмного середовища необхідно вибрати відповідний ПЛК (зокрема, модель CPU 1215C) та операторську панель КРТ 700 Basic PN, а також встановити між ними зв'язок для комунікації. Далі створюється необхідна кількість екранів візуалізації, кожен з яких відповідатиме конкретному етапу технологічного циклу. Заплановано розробити загалом 10 екранів, що відображено на схемі



5.2.

Рис. 5.1 - Поєднання обох PLC з НМІ-панеллю

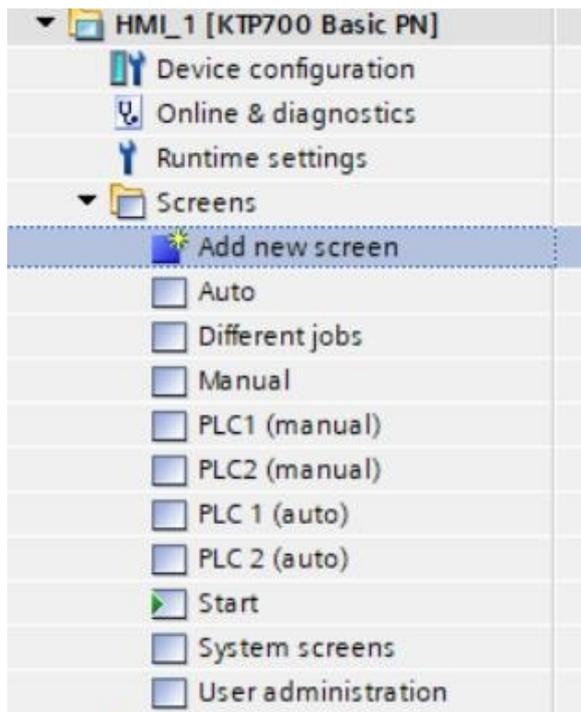


Рис. 5.2 - Список екранів

Опісля цього етапу, що стосується формування інтерфейсу, ми переходимо до імплементації потрібного функціоналу на кожному з розроблених екранів. Стартуємо з головного (початкового) екрану, який візуально зображений на малюнку 5.3.

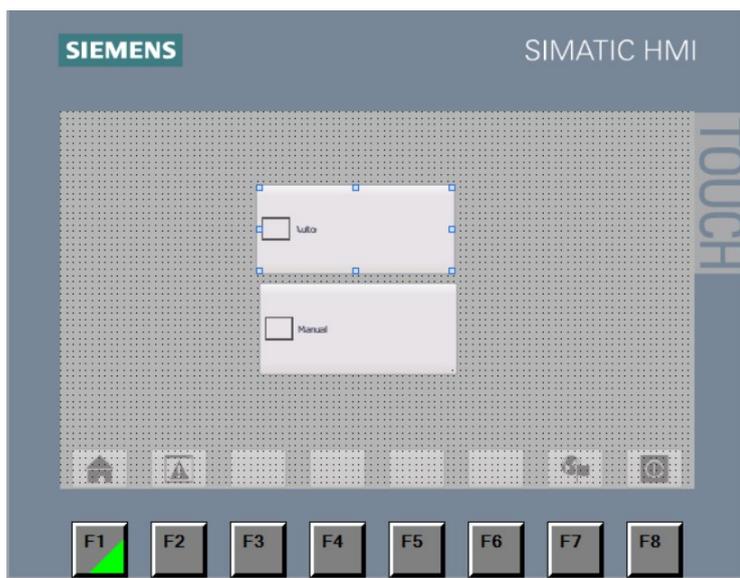


Рис. 5.3 – Початковий екран

На головному дисплеї системи, оператор отримує змогу визначитися із робочим режимом функціонування обладнаної автоматизованої лінії. Доступні опції – це або повна автоматизація (позначена як "Auto"), або керування вручну (позначене як "Manual"). Щойно режим буде узгоджено, система переведе оператора до вікна, де обирається контролер (ПЛК), як це показано на ілюстрації 5.4.

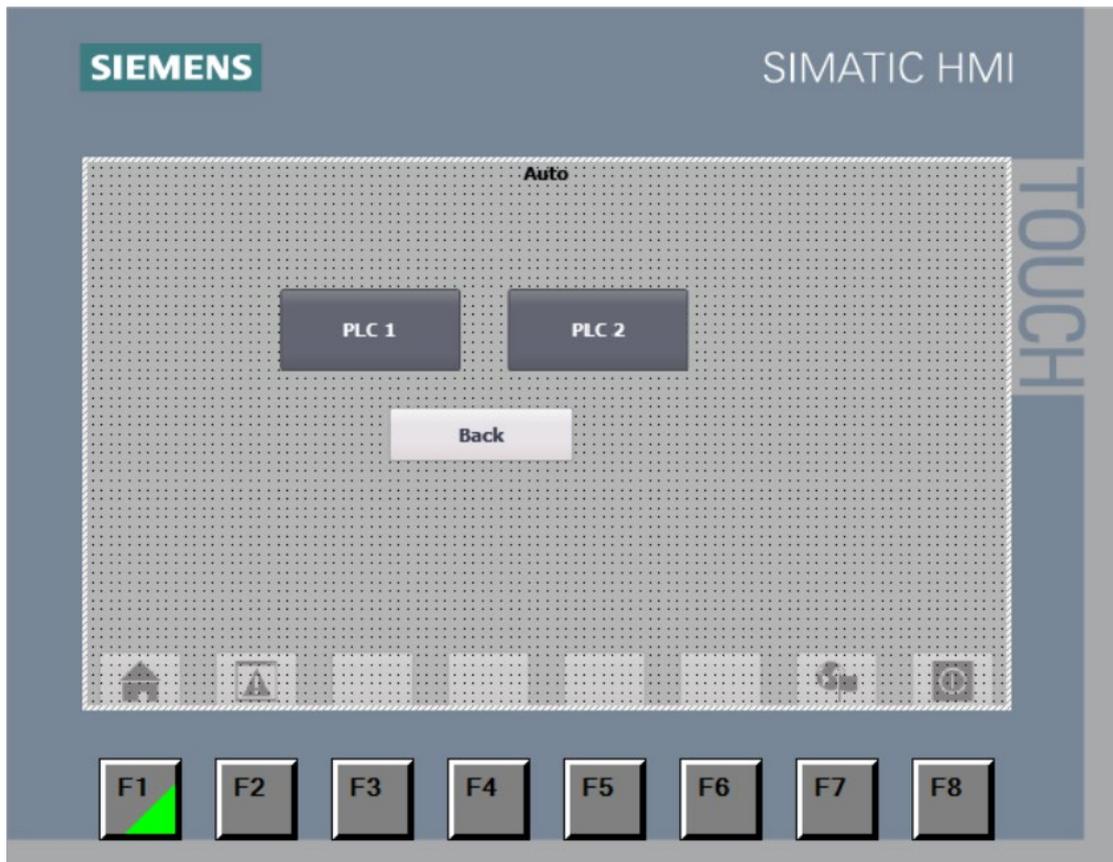


Рис. 5.4 - Вибір PLC1 або PLC2

Надається опція для того, аби особа, яка користується системою, самостійно обрав, який саме із двох доступних програмованих логічних контролерів (ПЛК) він бажає моніторити. Якщо ж вибір буде зупинено на ПЛК1 (зображення якого представлено на малюнку 5.5), то надалі з'явиться можливість спостерігати за змінами у часовому вимірі таких параметрів, як рівень наповненості резервуару, кількість доданої стартової культури, а також дані щодо температурного режиму і показників кислотності всієї

отриманої суміші.

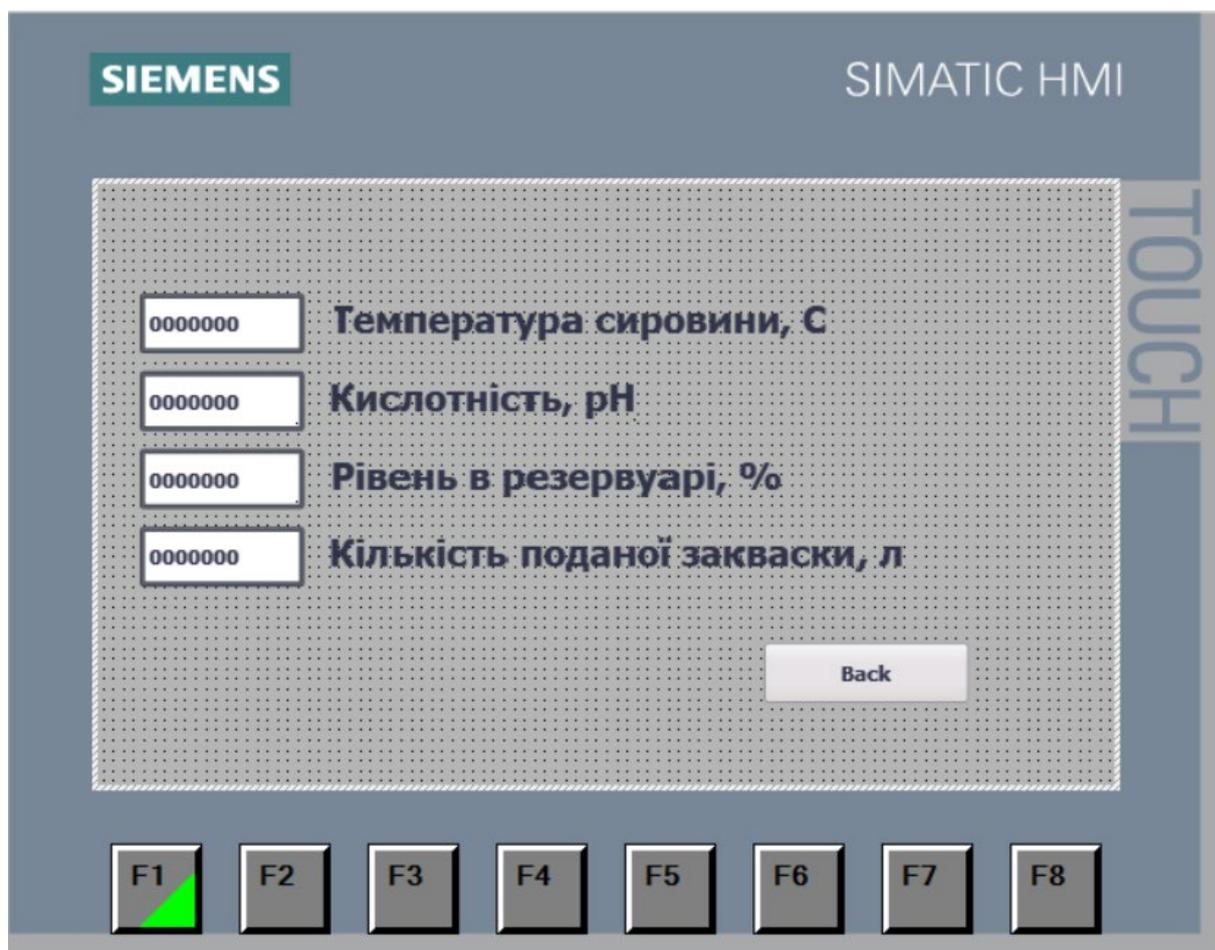


Рис. 5.5 - Автоматичний режим. Параметри на екрані PLC1

Обираючи модель PLC2 (як показано на Схемі 5.6), апаратне забезпечення дає користувачеві спроможність спостерігати за показниками температури, як до, так і по завершенню стадії теплової дії над продуктовою масою, одночасно надаючи змогу бачити поточні величини кута нахилу барабана й температури готового виробу.

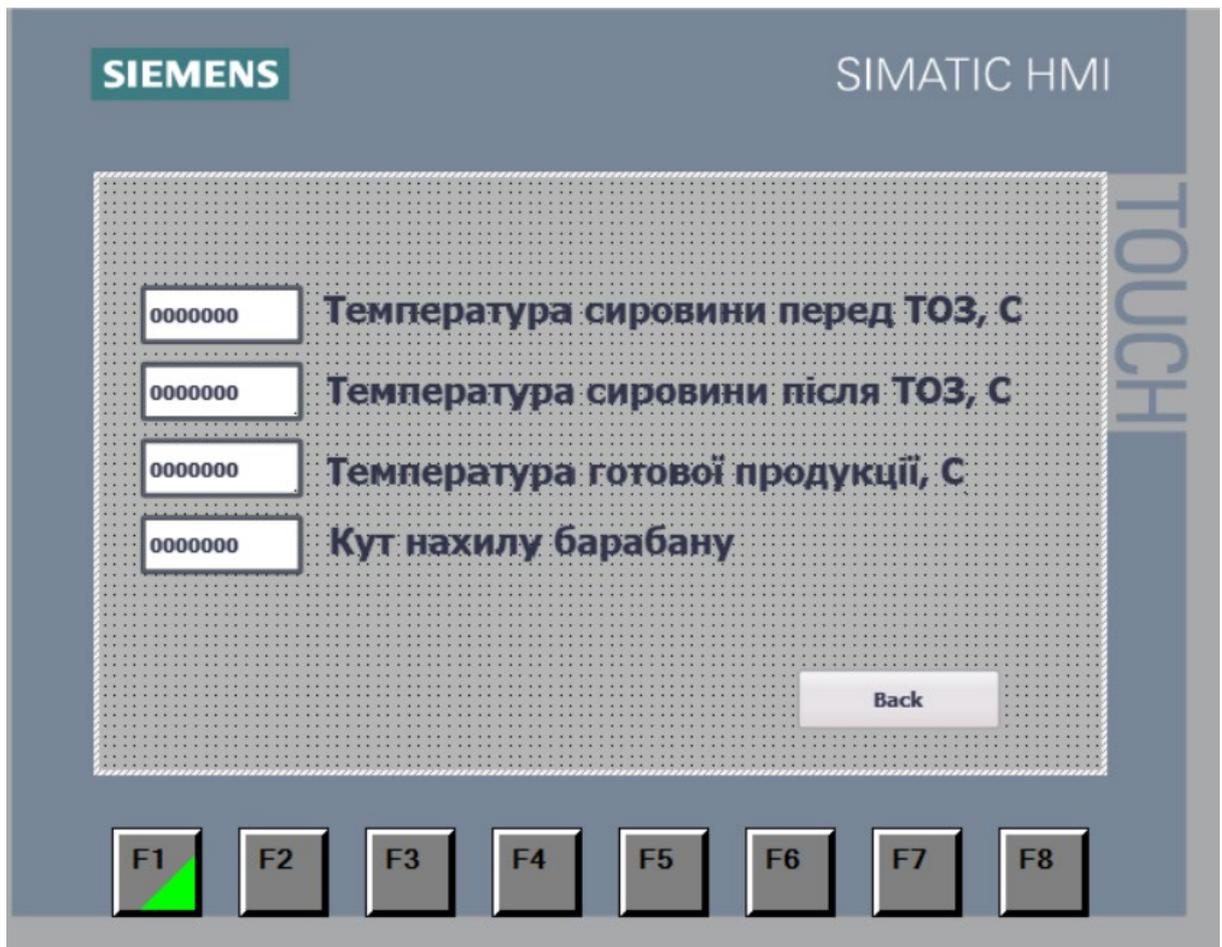


Рис.5.6 - Автоматичний режим. Параметри на екрані PLC2

Коли буде обрано ручний спосіб керування, і на дисплеї з'явиться інформація про PLC1 (як показано на схемі 5.7), оператор матиме змогу власноруч змінювати низку параметрів. Це охоплює встановлення потрібної температури для процесу сквашування. Також можна буде точно відрегулювати бажаний рівень рН вихідного матеріалу, задати максимальний обсяг, до якого слід наповнювати ємність, стежити за кількістю доданої закваски, а також розпочинати або припиняти подачу молока. Окрім того, передбачена можливість увімкнення чи вимкнення мішалки, а також регулювання подачі як охолодженої, так і теплої води. Слід згадати й функцію переміщення вже сформованого згустка у пристрій ТОЗ.

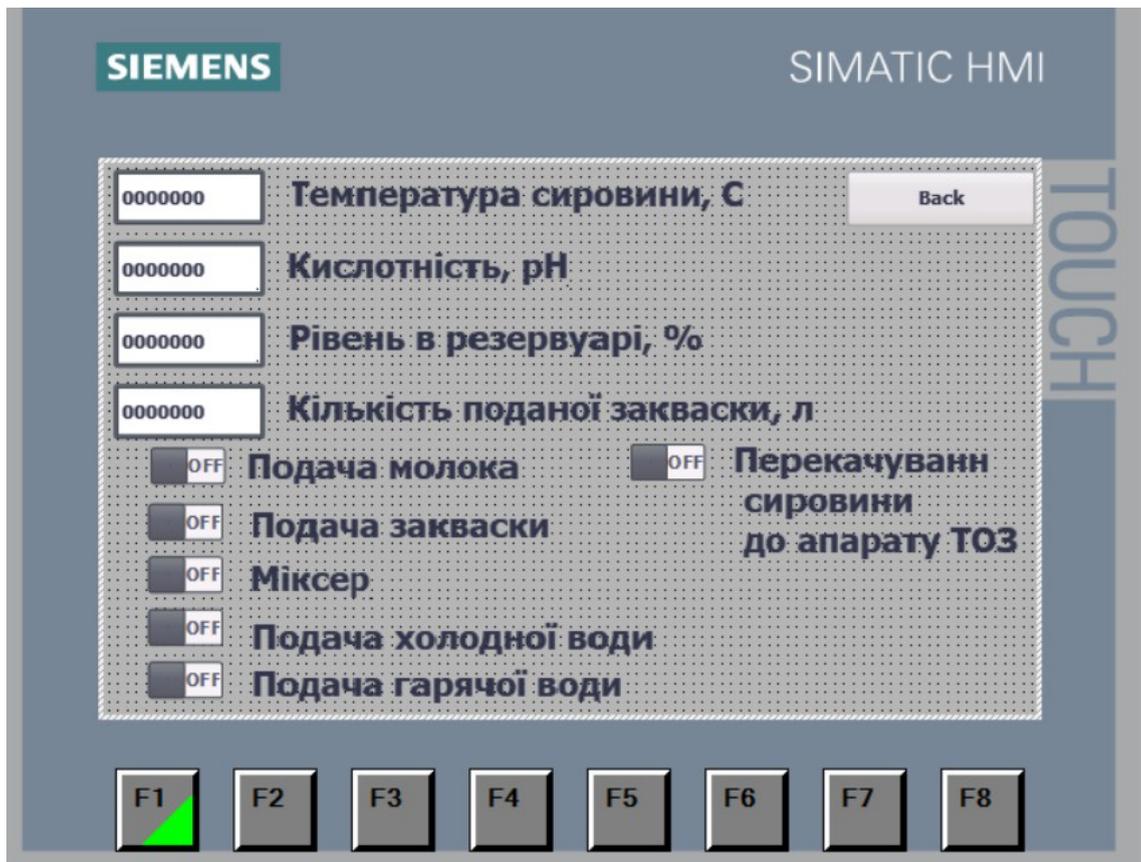


Рис. 5.7 - Параметри PLC1 в ручному режимі

У режимі ручного опрацювання, що використовує PLC2 (як це проілюстровано на рис. 5.8), працівник має можливість стежити за температурним режимом усередині апарату Т03. Такий контроль реалізується через функціонал увімкнення чи вимкнення потоку як охолоджувальної, так і теплоносії рідин. Окрім цього, передбачено маніпулювання кутом нахилу барабана, ініціювання або припинення його циклічного обертання, а також активація чи блокування роботи шнекового приводу. На додаток, користувач може змінювати рівень інтенсивності подачі охолодженої води до контуру охолодження.

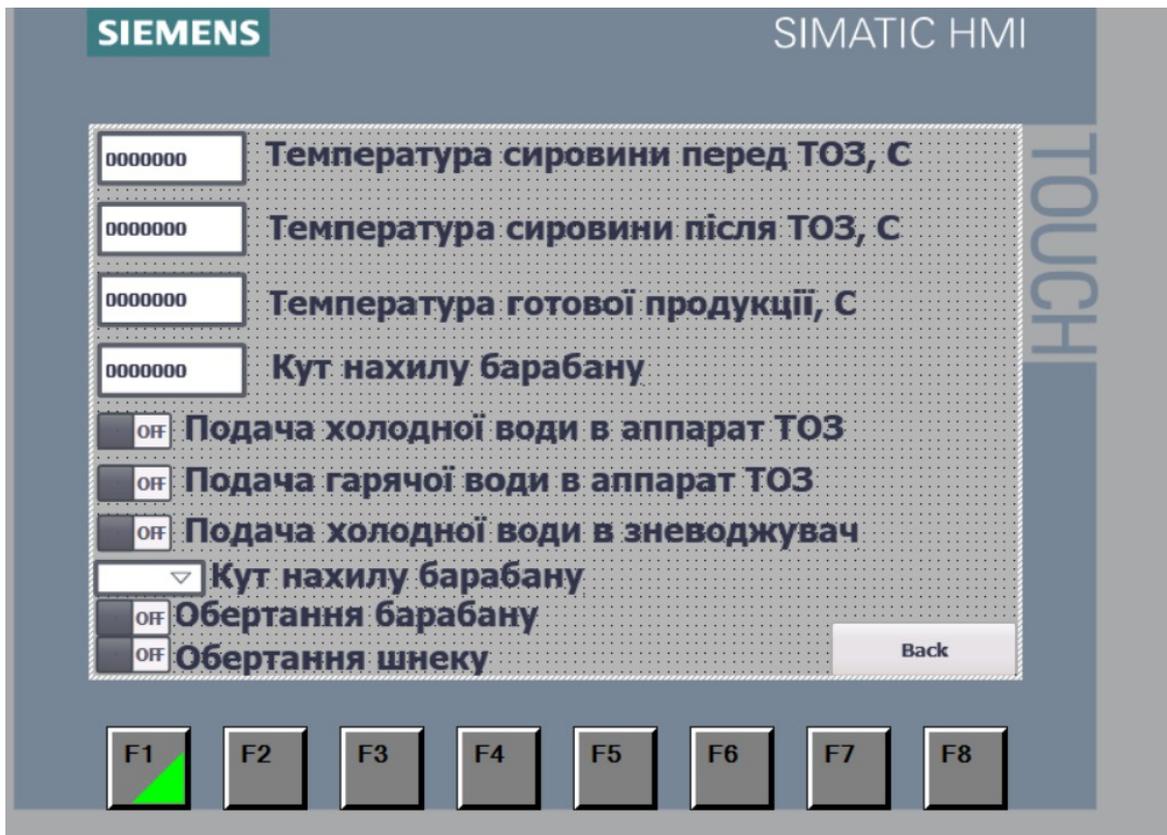


Рис. 5.8 – Параметри PLC2 в ручному режимі

## ВИСНОВКИ

1. Досягнення мети дослідження: Розроблено, змодельовано та досліджено автоматизовану систему керування (АСК) ключовими технологічними процесами виробництва кисломолочного сиру. Впровадження цієї системи дозволяє підвищити якість готової продукції за рахунок стабілізації технологічних параметрів та мінімізації впливу людського фактора, що повністю відповідає поставленій меті роботи.

2. Аналіз технологічного процесу: Проведено детальний аналіз технологічної схеми виробництва кисломолочного сиру, включаючи процеси пастеризації, коагуляції (заквашування), термообробки згустку (ТОЗ) та зневоднення. Визначено основні керуючі та регульовані змінні (температура, рівень, дозування закваски), що лягло в основу функціональних завдань системи автоматизації.

3. Вибір технічних засобів: На основі вимог до точності та надійності, здійснено підбір сучасних технічних засобів автоматизації, включаючи високоточні датчики, ефективні виконавчі механізми та Програмований Логічний Контролер (ПЛК) Siemens SIMATIC S7-1500, який забезпечує швидку та надійну обробку керуючих сигналів.

4. Створення математичної моделі та синтез регуляторів: Розроблено математичну модель підсистеми дозування закваски як об'єкта керування. На основі цієї моделі проведено синтез ПД-регуляторів для контурів керування. Методами теорії автоматичного керування (зокрема, частотними критеріями) доведено, що налаштовані коефіцієнти забезпечують необхідний запас стійкості та мінімальний час перехідного процесу.

5. Моделювання та дослідження системи: Проведено імітаційне моделювання розробленої АСК у середовищі Matlab/Simulink. Результати моделювання підтвердили високу якість регулювання (зокрема, за температурою в апараті ТОЗ), швидке відпрацювання заданих значень та

ефективне придушення технологічних збурень, що свідчить про працездатність та ефективність запропонованої структури керування.

6. Розробка інтерфейсу керування (НМІ): Створено візуалізацію технологічного процесу (НМІ) у програмному середовищі TIA Portal. Розроблений інтерфейс є інтуїтивно зрозумілим, надає оперативну інформацію про стан обладнання та забезпечує зручність роботи оператора при контролі, моніторингу та корекції параметрів виробництва.

7. Економічний та екологічний ефект: Впровадження розробленої АСК дозволить підприємству досягти економічного ефекту за рахунок оптимізації використання сировини, зниження енерговитрат (завдяки точному дотриманню температурних режимів) та зменшення відсотка браку. З екологічної точки зору, підвищення стабільності процесу сприяє більш раціональному використанню ресурсів.

Перспективи подальших досліджень: Подальша робота може бути зосереджена на інтеграції системи керування з рівнями MES/ERP для оптимізації обліку та планування, а також на впровадженні елементів адаптивного керування для компенсації можливої нестабільності якості вхідної сировини.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Шаповалов О.І., Герасимчук Н.В. Вдосконалення енергоефективності у виробничих процесах харчової промисловості. Національний університет харчових технологій. Київ : НУХТ, 2021. 312 с.
2. Мельник П.Ю., Жук О.О. Методичні рекомендації до розробки схем автоматизації. Харків : ХДУХТ, 2020. – 180 с.
3. DATASHEET Endress+Hauser Proline Promag 10. [електронний ресурс]:URL:[https://bdih-download.endress.com/files/DLA/005056A500261EDD90DF144589031139/TI01579D\\_EN\\_0222-00.pdf](https://bdih-download.endress.com/files/DLA/005056A500261EDD90DF144589031139/TI01579D_EN_0222-00.pdf) (дата звернення 13.11.2025).
4. Іваненко А.С., Левченко І.М. Основи проектування схем автоматизації технологічних процесів. Київ : НУХТ, 2021. – 215 с.
5. Harris. M., Wilson T. Trends in Dairy Fermentation Technology. International Journal of Food Microbiology. Los Angeles : Elsevier, 2020. Vol. 25, Issue 6. P. 130-140.
6. Коваленко В.І., Шепетько М.В. Застосування пінч-аналізу для оптимізації енергоспоживання на харчових підприємствах. Вісник Сумського національного аграрного університету. – Суми, 2022. – 150 с.
7. DATASHEET VEGAPULS 64. [електронний ресурс] :URL: <https://www.insatech.com/media/jkanxvy5/gse66414-en-data-sheet-vegapuls-6x-radar-sensor-for-continuous-level-measurement-of-liquids-and-bulk-solids.pdf>(дата звернення 13.11.2025).
8. DATASHEET Wika TR21-C. [електронний ресурс] : URL: [https://www.wika.ua/upload/DS\\_TE6028\\_en\\_co\\_29227.pdf](https://www.wika.ua/upload/DS_TE6028_en_co_29227.pdf) (дата звернення 13.11.2025).
9. Соколенко А.І., Українець А.І. та ін. Методи енергозбереження в харчовій промисловості. – Київ : АртЕк, 2020. – 432 с.

10. DATASHEET [електронний ресурс]:URL: [https://burkert.valmark.pl/fileadmin/user\\_upload/burkert/2016/06/DS2871-Standard- EU-EN.pdf](https://burkert.valmark.pl/fileadmin/user_upload/burkert/2016/06/DS2871-Standard- EU-EN.pdf) (дата звернення 14.11.2024).
11. Oliveira M., Santos F. Dairy Innovation in Fermented Products. Journal of Food Science. New York : Springer, 2020. Vol. 45, Issue 3. P. 150-160.
12. Слимак О.А. Удосконалення технології виробництва кисломолочного сирного десерту з додаванням шоколаду та перцю чилі: кваліфікаційна робота. Миколаївський національний аграрний університет. Миколаїв, 2021. 85 с.
13. Бабенко Т.О., Сіренко М.М. Інноваційні технології енергозбереження в молочному виробництві. Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій. Львів : ЛНУВМБ, 2020. 220 с.
14. Куликов І.В., Трофименко С.М. Використання відновлювальних джерел енергії в молочній промисловості. Харківський державний технічний університет сільського господарства. Харків : ХДТУСГ, 2020. 254 с.
15. Дерипаскін І. С. Автоматизація процесу виробництва кисломолочного сиру: робота на здобуття кваліфікаційного ступеня бакалавр : спец. 151 – автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології/наук. кер. О. Ю. Журавльов. Суми : СумДУ, 2023. 45 с.
16. Іванов Д.К., Зінченко В.В. Основи розробки програм для PLC у Tia Portal. Львів : Львівська політехніка, 2022. – 270 с.
17. Програмне забезпечення в TIA Portal: веб-сайт. URL: <https://www.siemens.com/ua/uk/produkty/avtomatyzatsiya-promyslovosti/prohramne-zabezpechennya-dlya-promyslovosti/prohramne-zabezpechennya-dlya-avtomatyzatsiyi/tia-portal/prohramne-zabezpechennya-v-tia-portal.html> (дата звернення 14.11.2025).
18. Дорошенко І.П., Коваль Л.М. Технологія виробництва кисломолочної продукції з низьким вмістом лактози. Одеська національна академія харчових технологій. Одеса : ОНАХТ, 2021. 134 с.

19. Антоненко М.І., Сидоренко Т.П., Лисенко І.В. Розробка технології кисломолочного сиру з фруктовими наповнювачами. Харківський національний технічний університет сільського господарства. Харків : ХНТУСГ, 2020. 154 с.

20. DATASHEET [електронний ресурс] : URL: [https://bdi-download.endress.com/files/DLA/005056A500261EEB83A9401FEDBBDCFE/TI0149\\_5CEN\\_0120.pdf](https://bdi-download.endress.com/files/DLA/005056A500261EEB83A9401FEDBBDCFE/TI0149_5CEN_0120.pdf) (дата звернення 14.11.2025).