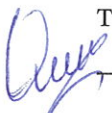


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
Факультет комп'ютерно-інтегрованих технологій, мехатроніки і робототехніки
Кафедра робототехніки, електроенергетики та автоматизації
ім. проф. Б.Б. Самотокіна

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи магістра
на тему: «Автоматизована система управління технологічним
процесом подачі та змішування компонентів морозива»

Виконав студент 2 курсу, групи АТ-29м
спеціальності 174 “Автоматизація,
комп'ютерно-інтегровані технології
та робототехніка”


Оришук Олег Олександрович

(прізвище та ініціали студента)


Керівник: к.т.н., доц. Ткачук А.Г.

(науковий ступінь, вчене звання, посада,
прізвище та ініціали)


Рецензент: к.т.н., доц., Чепюк Л.О.

(науковий ступінь, вчене звання, посада,
прізвище та ініціали)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”
Факультет комп’ютерно-інтегрованих технологій, мехатроніки і робототехніки
Кафедра робототехніки, електроенергетики та автоматизації
ім. проф. Б.Б. Самотокіна

Спеціальність 174 “Автоматизація, комп’ютерно-інтегровані технології та робототехніка”

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри робототехніки,
електроенергетики та автоматизації
ім. проф. Б.Б. Самотокіна
к.т.н., доц. Громовий О.А.

« 17 » грудня 2025р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу магістра

Студент Орищук Олег Олександрович

1. Тема роботи: Автоматизована система управління технологічним процесом подачі та змішування компонентів морозива

2. Термін здачі закінченої роботи на кафедру «3» грудня 2025 р.

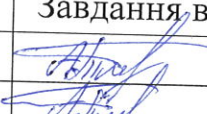
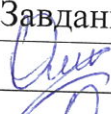
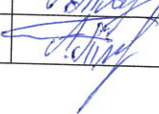
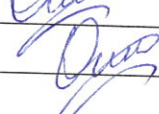
3. Вихідні дані до роботи: матеріали звіту про переддипломну практику, технологічна схема подачі та змішування компонентів морозива, рецептура суміші та властивості її компонентів, вимоги до точності дозування, температури й тривалості змішування, засоби вимірювання технологічних параметрів, виконавчі механізми подачі та змішування, програмований логічний контролер, вимоги до інтерфейсу оператора, надійності, безпеки та санітарно-гігієнічних умов роботи системи.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які підлягають розробці): технічне завдання, аналіз технологічного процесу подачі та змішування компонентів морозива й існуючих систем керування, розробка структурної та функціональної схем системи, вибір засобів вимірювання, виконавчих механізмів і програмно-технічного комплексу, розробка математичних моделей та алгоритмів керування, моделювання й аналіз ефективності системи, програмна реалізація на контролері,

розробка інтерфейсу оператора, забезпечення надійності та безпеки, техніко-економічне обґрунтування.

5. Перелік презентативного матеріалу (з точним визначенням обов'язкових слайдів/креслень): технологічна схема подачі та змішування компонентів морозива, структурна схема системи керування, функціональна схема автоматизації, блок-схема алгоритму керування, математичні моделі процесів дозування та змішування, результати моделювання, екранні форми інтерфейсу оператора, результати техніко-економічного обґрунтування.

6. Консультанти з кваліфікаційної роботи магістра із зазначенням розділів роботи, що їх стосуються

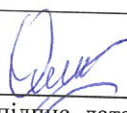
Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1, 2, 3	Ткачук А.Г.		
4,5	Ткачук А.Г.		

7. Дата видачі завдання 22.09.2025

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Підготувати звіт про переддипломну практику	1 тиждень	Виконано
2.	Збір та аналіз джерел за темою роботи, огляд існуючих систем	1 тиждень	Виконано
3.	Вибір і обґрунтування технічних та програмних засобів	2 тиждень	Виконано
4.	Розробка структурної, функціональної та блок-схеми	3 тиждень	Виконано
5.	Аналіз отриманих результатів	1 тиждень	Виконано
6.	Оформлення пояснювальної записки та презентаційного матеріалу	4 тиждень	Виконано

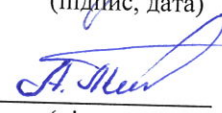
Студент


(підпис, дата)

О.О. Орищук

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи


(підпис, дата)

А.Г. Ткачук

(прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

ВСТУП

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ПОДАЧІ ТА ЗМІШУВАННЯ КОМПОНЕНТІВ МОРОЗИВА

- 1.1. Загальна характеристика технологічного процесу виробництва морозива
- 1.2. Склад і властивості основних компонентів морозива
- 1.3. Технологічні параметри процесу подачі компонентів
- 1.4. Процес змішування суміші морозива та вимоги до її якості
- 1.5. Аналіз існуючих способів і систем керування процесом подачі та змішування
- 1.6. Обґрунтування необхідності автоматизації технологічного процесу

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА СТРУКТУРИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

- 2.1. Функціональна схема автоматизованої системи керування процесом
- 2.2. Вибір та обґрунтування засобів вимірювання технологічних параметрів
- 2.3. Вибір виконавчих механізмів системи керування
- 2.4. Вибір програмно-технічного комплексу керування
- 2.5. Розробка алгоритму керування подачею та змішуванням компонентів морозива

РОЗДІЛ 3. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

- 3.1. Математична модель процесу дозування компонентів
- 3.2. Математична модель процесу змішування суміші морозива
- 3.3. Алгоритм автоматичного керування
- 3.4. Моделювання автоматизованої системи керування
- 3.5. Аналіз результатів моделювання та оцінка ефективності системи

РОЗДІЛ 4. ПРОЄКТНА ТА ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ

- 4.1. Реалізація алгоритмів керування на програмованому логічному контролері
- 4.2. Розробка системи візуалізації та інтерфейсу оператора
- 4.3. Забезпечення надійності, безпеки та санітарно-гігієнічних вимог
- 4.4. Техніко-економічне обґрунтування впровадження автоматизованої системи

ВИСНОВКИ

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

ВСТУП

Харчова промисловість є однією з провідних галузей економіки, що забезпечує населення продуктами повсякденного споживання та безпосередньо впливає на рівень продовольчої безпеки держави. Серед широкого асортименту харчових продуктів особливе місце займає морозиво, яке характеризується складною рецептурою, багатокomпонентним складом та підвищеними вимогами до якості й стабільності технологічних параметрів на всіх етапах виробництва.

Технологічний процес виробництва морозива передбачає точне дозування та змішування молочних і немолочних компонентів, стабілізаторів, цукрів, ароматичних і функціональних добавок. Відхилення у співвідношенні компонентів або порушення режимів змішування негативно впливають на фізико-хімічні та органолептичні властивості готового продукту, зокрема консистенцію, структуру, смак і стабільність під час зберігання.

У традиційних виробничих лініях значна частина операцій керування процесом подачі та змішування компонентів здійснюється з використанням напіваавтоматичних або ручних методів, що обумовлює високий вплив людського фактору, зниження повторюваності результатів і збільшення втрат сировини. За умов зростання вимог до якості продукції, енергоефективності та санітарно-гігієнічних норм актуальним є впровадження сучасних автоматизованих систем керування технологічними процесами.

Розвиток мікропроцесорної техніки, програмованих логічних контролерів, засобів вимірювання та систем візуалізації створює передумови для побудови ефективних автоматизованих систем керування технологічними процесами подачі та змішування компонентів морозива. Такі системи дозволяють забезпечити високу точність дозування, стабільність технологічних режимів, зменшити вплив людського фактору та підвищити загальну ефективність виробництва.

У зв'язку з цим розробка автоматизованої системи керування технологічним процесом подачі та змішування компонентів морозива є актуальним науково-технічним завданням, що має важливе практичне значення для підприємств харчової промисловості.

Метою магістерської роботи є розробка автоматизованої системи керування технологічним процесом подачі та змішування компонентів морозива, яка забезпечує підвищення точності дозування, стабільності якості суміші та ефективності виробничого процесу.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно розв'язати такі **завдання:**

- проаналізувати технологічний процес подачі та змішування компонентів морозива;
- дослідити властивості основних компонентів і їх вплив на параметри процесу;
- визначити основні технологічні параметри та режими керування процесом;
- проаналізувати існуючі системи керування процесами дозування та змішування;
- розробити структуру автоматизованої системи керування;
- обґрунтувати вибір засобів вимірювання, виконавчих механізмів і програмно-технічних засобів;
- розробити алгоритм автоматичного керування процесом;
- виконати математичне моделювання системи керування та оцінити її ефективність;
- провести техніко-економічну оцінку впровадження запропонованої системи.

Об'єкт дослідження - технологічний процес подачі та змішування компонентів у виробництві морозива.

Предмет дослідження - методи, алгоритми та технічні засоби автоматизованого керування процесом подачі та змішування компонентів морозива.

Наукова новизна роботи полягає в:

- розробці структурної схеми автоматизованої системи керування процесом подачі та змішування компонентів морозива з урахуванням особливостей харчового виробництва;
- удосконаленні алгоритму керування дозуванням компонентів, що забезпечує підвищення точності та стабільності технологічного процесу;
- застосуванні математичного моделювання для аналізу динамічних характеристик процесу змішування та оцінки ефективності системи керування.

Практичне значення результатів дослідницької роботи полягає в можливості використання розробленої автоматизованої системи керування на підприємствах з виробництва морозива та інших харчових продуктів зі схожими технологічними процесами. Запропоновані технічні рішення можуть бути використані при модернізації чинних виробничих ліній, що дозволить:

- підвищити якість і стабільність готової продукції;
- зменшити втрати сировини;
- знизити вплив людського фактору;
- підвищити енергоефективність та продуктивність виробництва.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ПОДАЧІ ТА ЗМІШУВАННЯ КОМПОНЕНТІВ МОРОЗИВА

1.1. Загальна характеристика технологічного процесу виробництва морозива.

Виробництво морозива належить до багатостадійних технологічних процесів харчової промисловості та характеризується складною рецептурою і підвищеними вимогами до стабільності якості готового продукту. Основними етапами є підготовка сировини, дозування і подача компонентів, змішування, пастеризація, гомогенізація, охолодження, фризерування та фасування.

Ключовою стадією, що визначає фізико-хімічні й органолептичні властивості морозива, є процес подачі та змішування компонентів. Саме на цьому етапі формується склад суміші, від якого залежить структура, консистенція, смак і стабільність продукту під час зберігання.

Технологічний процес подачі компонентів передбачає транспортування та дозування молочної сировини, води, цукрів, жирів, стабілізаторів та ароматичних добавок у змішувальну ємність. Процес здійснюється з використанням насосного та дозувального обладнання, яке повинно забезпечувати точність і повторюваність рецептури.

1.2. Склад і властивості основних компонентів морозива

До основних компонентів морозива належать молоко або молочні продукти, вершки, цукор, вода, стабілізатори, емульгатори та смакові добавки. Кожен із компонентів має специфічні фізико-хімічні властивості, що впливають на перебіг технологічного процесу.

Молочна сировина визначає харчову цінність і смакові характеристики продукту. Жирова фаза впливає на структуру та пластичність морозива, а цукри виконують не лише підсолоджувальну функцію, але й регулюють

температуру замерзання суміші. Стабілізатори та емульгатори забезпечують однорідність суміші, перешкоджають кристалізації льоду та розшаруванню.

Значною проблемою є зміна властивостей сировини в процесі зберігання, зокрема в'язкості та густини, що ускладнює точне дозування компонентів і потребує застосування систем автоматичного коригування режимів подачі.

1.3. Технологічні параметри процесу подачі компонентів

Процес подачі компонентів у виробництві морозива є одним із ключових етапів, що визначає точність дотримання рецептури та стабільність властивостей майбутньої суміші. Для транспортування рідких компонентів, таких як молоко, вершки та вода, у технологічних лініях застосовуються харчові насоси, зокрема відцентрові або шестеренні, які забезпечують безперервну та регульовану подачу сировини до змішувальної ємності. Регулювання витрати компонентів здійснюється шляхом зміни продуктивності насосів, що, у свою чергу, дозволяє підтримувати задані співвідношення складових відповідно до рецептури.



Рисунок 1.2. Харчові насоси

Відцентрові та шестеренні насоси — це два основні типи харчових насосів, що відрізняються принципом дії: відцентрові використовують силу обертового колеса для перекачування низьков'язких рідин (вода, молоко) зі стабільною продуктивністю, тоді як шестеренні (зубчасті) захоплюють і переміщують рідину між зубцями, ідеально підходять для в'язких, густих продуктів (сироп, шоколад, креми), забезпечуючи точне дозування та постійну подачу.

Для забезпечення точності дозування та контролю технологічних параметрів процесу подачі використовуються спеціалізовані дозувальні пристрої та вимірювальні засоби. Сухі компоненти подаються за допомогою шнекових або вагових дозаторів, які працюють у поєднанні з тензометричними датчиками маси, тоді як витрата рідких компонентів контролюється витратомірами та датчиками тиску.

Ваговий дозатор — автоматичний прилад, призначений для автоматичного дозування необхідної маси або обсягу сипучих твердих матеріалів, паст, рідин або газів.

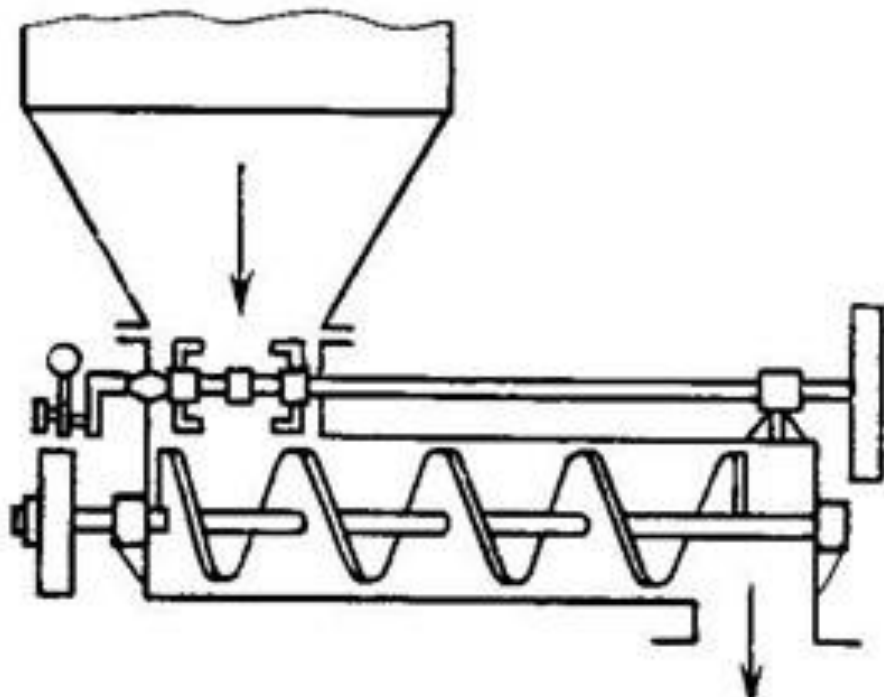


Рисунок 1.3. Ваговий дозатор

Ваговий дозатор – це пристрій, який миттєво здійснює зважування і видає точні порції продуктів. Тому, головною характеристикою такого зважувального приладу є точність. Адже саме від неї залежить дозування, і витрати на виробництво продукції, що випускається, а також її якість.

Додатково в системі встановлюються датчики температури та рівня, що забезпечують безпечну та стабільну роботу обладнання і створюють передумови для подальшої автоматизації процесу подачі компонентів. Основними параметрами процесу подачі компонентів є витрата, маса, об'єм, температура та час подачі. Витрата компонентів є визначальним показником, оскільки від неї залежить точність дотримання рецептури суміші морозива.



Рисунок 1.4. Датчик температури

Процес подачі може здійснюватися у безперервному або порційному режимі. Безперервний режим забезпечує високу продуктивність, проте вимагає складніших систем керування. Порційний режим дозволяє досягти більшої точності дозування, але знижує продуктивність лінії.

Особливістю подачі компонентів у виробництві морозива є необхідність підтримання температурного режиму для збереження властивостей сировини, що накладає додаткові вимоги до системи керування.

Наведені в таблиці 1.1 технологічні параметри визначають умови стабільної роботи процесу подачі компонентів морозива. Найбільш критичними з точки зору забезпечення якості готової суміші є витрата компонентів, температура та точність дозування, що обумовлює необхідність їх безперервного автоматичного контролю.

Таблиця 1.1.

Основні технологічні параметри подачі компонентів

№	Найменування параметра	Одиниця вимірювання	Типовий діапазон значень	Засоби контролю / вимірювання	Вплив на технологічний процес
1	Витрата рідких компонентів (молоко, вершки, вода)	л/год	200–3000	Витратоміри (масові, електромагнітні)	Забезпечує точність рецептури та стабільність складу суміші
2	Витрата сухих компонентів (цукор, стабілізатори)	кг/год	20–500	Вагові дозатори	Впливає на консистенцію та смак готового продукту
3	Маса	кг	5–500	Тензодатчики,	Забезпечує

	дозованої порції			вагові системи	повторюваність рецептури
4	Температура компонентів	°C	4–60	Температурні датчики (Pt100, термопари)	Впливає на в'язкість та змішуваність суміші
5	Рівень компонентів у ємностях	% або мм	10–100	Датчики рівня (ультразвукові, ємнісні)	Запобігає переповненню або роботі «на сухо»
6	Тиск у трубопроводах	МПа	0,1–0,6	Датчики тиску	Забезпечує стабільну роботу насосів
7	Час подачі компонентів	с	10–600	Таймери PLC	Визначає тривалість циклу дозування
8	Швидкість обертання насосів	об/хв	500–3000	Частотні перетворювачі	Регулює інтенсивність подачі
9	В'язкість суміші	Па·с	0,01–5	Розрахунково або лабораторно	Впливає на рівномірність змішування
10	Допустиме відхилення дозування	%	±0,5–2	Система контролю PLC	Визначає точність процесу

На рисунку 1.5. наведено функціональну схему процесу подачі та змішування компонентів морозива. Система включає джерела сировини, засоби подачі та дозування, вимірювальні прилади, змішувальну ємність і

автоматизовану систему керування на базі програмованого логічного контролера. Керування процесом здійснюється за сигналами датчиків витрати, рівня та температури з можливістю коригування режимів у реальному часі через панель оператора.

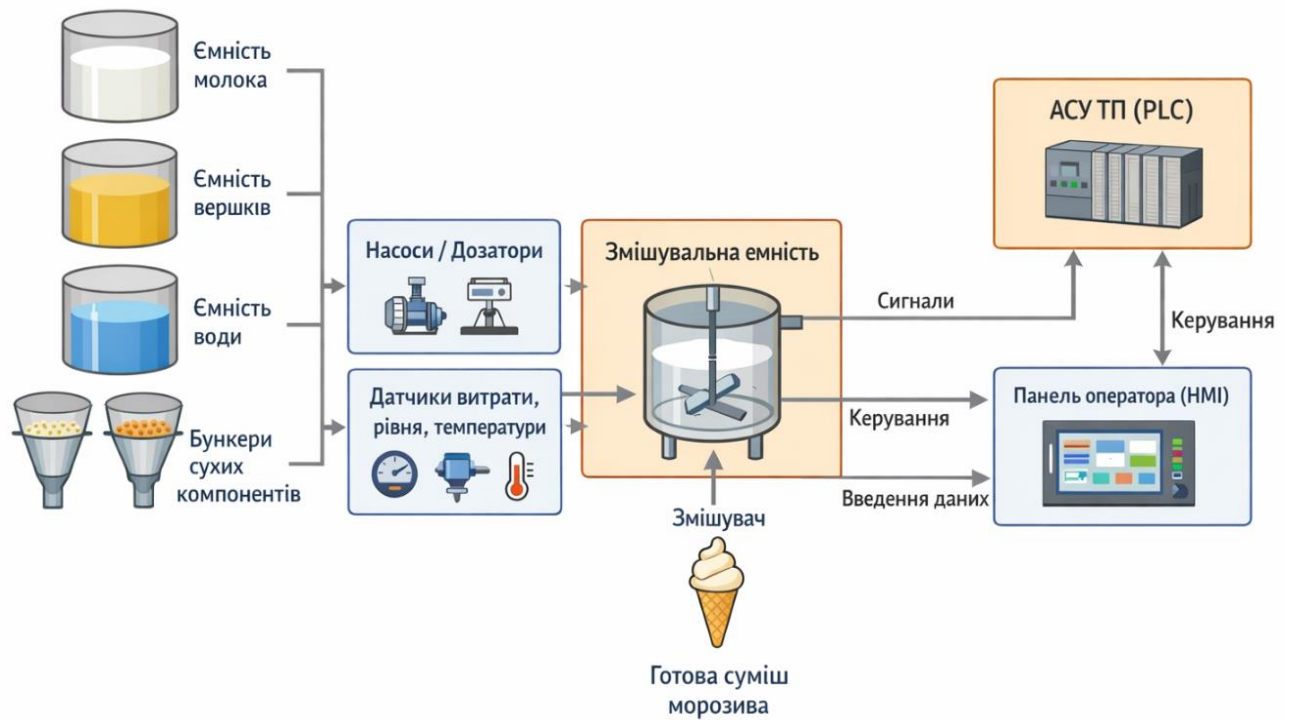


Рисунок 1.5. Функціональна схема процесу подачі та змішування компонентів морозива

1.4. Процес змішування суміші морозива та вимоги до її якості

Процес змішування суміші морозива здійснюється у спеціалізованих змішувальних ємностях, обладнаних механічними мішалками, конструкція яких обирається з урахуванням фізико-хімічних властивостей суміші. У технологічних лініях виробництва морозива найчастіше застосовуються лопатеві або турбінні мішалки, що забезпечують інтенсивний рух рідини та рівномірний розподіл як рідких, так і сухих компонентів у всьому об'ємі ємності. Для приводу мішалки використовуються асинхронні електродвигуни з частотним керуванням, які дозволяють плавно змінювати швидкість обертання залежно від етапу технологічного процесу.

Контроль швидкості обертання мішалки здійснюється за допомогою частотного перетворювача, сигнали з якого передаються до програмованого логічного контролера. Такий підхід забезпечує підтримання оптимальних режимів змішування, зменшує механічні навантаження на обладнання та сприяє досягненню необхідної однорідності суміші. Регулювання швидкості мішалки в автоматичному режимі створює умови для стабільності технологічного процесу та підвищення якості готової суміші морозива. Процес змішування суміші морозива має забезпечити рівномірний розподіл усіх компонентів у заданому співвідношенні. Якість змішування оцінюється за показниками однорідності, стабільності та відсутності механічних включень.

На ефективність змішування впливають конструкція змішувача, швидкість обертання мішалки, тривалість процесу та фізичні властивості компонентів. Недостатній час змішування призводить до неоднорідності суміші, тоді як надмірне перемішування може викликати піноутворення та небажані структурні зміни.

Вимоги до якості суміші визначаються галузевими стандартами та технічними умовами, що обумовлює необхідність точного контролю параметрів процесу.

Таблиця 1.2.

Основні технологічні параметри процесу змішування суміші морозива

№	Найменування параметра	Одиниця вимірювання	Типовий діапазон значень	Засоби контролю/ вимірювання	Вплив на якість суміші
1	Швидкість обертання мішалки	об/хв	50–300	Датчик частоти обертання	Впливає на рівномірність змішування та структуру суміші

2	Тривалість змішування	хв	5–30	Таймер PLC	Визначає повноту розподілу компонентів
3	Температура суміші	°C	4–12	Температурні датчики	Впливає на в'язкість та однорідність суміші
4	В'язкість суміші	Па·с	0,1–3	В'язкомір, лабораторні виміри	Визначає стабільність суміші та структуру готового продукту
5	Однорідність суміші	% (гомогенність)	≥95	Лабораторний контроль, оптичні методи	Гарантує стабільність смаку та текстури морозива
6	Об'єм суміші у змішувальній ємності	л	100–2000	Датчики рівня	Забезпечує правильну роботу змішувача та дозування наступних компонентів
7	Кількість циклів змішування	раз	1–3	PLC, алгоритм керування	Забезпечує досягнення потрібної структури та

					гомогенності
8	Контроль піноутворення	бал	0–3	Візуальний або датчики піни	Впливає на текстуру та повітряний склад морозива

Таблиця 1.2 демонструє основні параметри, що контролюються під час змішування суміші морозива. Особлива увага приділяється швидкості обертання мішалки, тривалості змішування та температурі суміші, оскільки вони безпосередньо впливають на однорідність, текстуру та стабільність готового продукту. Визначення цих параметрів та їх автоматичний контроль дозволяє забезпечити повторюваність технологічного процесу та високу якість продукції.

1.5. Аналіз існуючих способів і систем керування процесом подачі та змішування

У сучасному виробництві морозива для реалізації процесів подачі та змішування компонентів застосовується різноманітне технологічне обладнання, яке відрізняється за принципом дії, рівнем автоматизації та точністю керування.

Для подачі рідких компонентів (молоко, вершки, вода) найчастіше використовуються відцентрові або шестеренні харчові насоси, виготовлені з нержавіючої сталі та придатні для роботи з в'язкими середовищами. Регулювання витрати в таких системах здійснюється шляхом зміни частоти обертання електродвигуна за допомогою частотних перетворювачів.

Подача сухих компонентів (цукор, стабілізатори, сухе молоко) реалізується за допомогою шнекових або вагових дозаторів, що дозволяють забезпечити високу точність дозування та повторюваність рецептури.

Контроль маси компонентів здійснюється за допомогою тензометричних датчиків.



Рисунок 1.6. Тензометричний датчик

Змішування компонентів суміші морозива здійснюється у вертикальних або горизонтальних змішувальних ємностях, обладнаних лопатевими або турбінними мішалками. Швидкість обертання мішалки регулюється частотними перетворювачами, що дозволяє адаптувати режим змішування до фізико-хімічних властивостей суміші.



Рисунок 1.7. Вертикальні змішувальні ємності

Механічне змішування застосовується для перемішування сировини. Воно здійснюється мішалками різних конструкцій, із яких найширше використовуються лопатеві та пропелерні.

Лопатеві мішалки найпростіші за конструкцією. Це плоскі лопаті, встановлені на валу (вертикальному) під кутом або перпендикулярно до напрямку руху. Кількість лопатей та їх конфігурація може бути різною і визначається конструкцією апарату і властивостями продукту. Лопаті можуть бути згруповані у вигляді рами, і мати складну конфігурацію руху. Лопатеві мішалки використовують для перемішування малов'язких рідин.

Пропелерні мішалки використовують для перемішування помірно в'язких рідин. Основним робочим елементом є гвинт (пропелер), насаджений на вертикальну, похилу вісь.

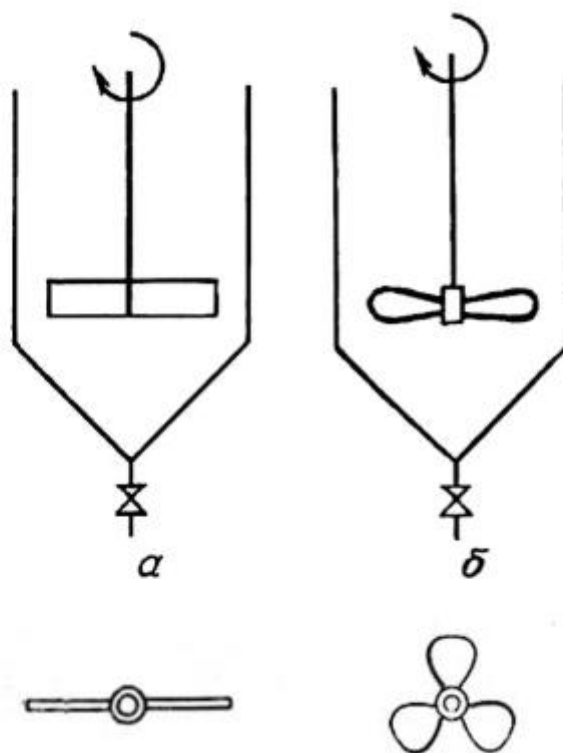


Рисунок 1.8. Типи механічних мішалок: *а)* — лопатева, *б)* — пропелерна

Керування роботою насосів, дозаторів та змішувального обладнання у сучасних системах здійснюється на базі програмованих логічних контролерів

(PLC), які забезпечують обробку сигналів від датчиків витрати, рівня та температури. Для взаємодії оператора з технологічною системою застосовуються панелі оператора (HMI), що дозволяють задавати рецептури, контролювати параметри процесу та здійснювати архівацію даних.

Панель оператора є складовою частиною верхнього рівня автоматизованої системи керування технологічним процесом подачі та змішування компонентів морозива та призначена для забезпечення взаємодії оператора з системою. За допомогою панелі оператора здійснюється візуалізація основних технологічних параметрів, задання режимів роботи, контроль стану обладнання та оперативне реагування на відхилення у процесі.



Рисунок 1.9. Панель оператора

На екрані панелі оператора відображаються ключові параметри технологічного процесу, зокрема рівень заповнення змішувальної ємності, температура суміші, швидкість обертання мішалки, а також стан насосів і дозувальних пристроїв. Параметри подаються у зручному для сприйняття вигляді з використанням фізичних одиниць вимірювання та відсоткових

значень, що забезпечує наочність і спрощує контроль процесу в реальному часі.

Візуалізація параметрів у відсотках і фізичних одиницях вимірювання забезпечує зручність контролю процесу та оперативне прийняття рішень оператором.

Панель оператора дозволяє працювати у різних режимах, зокрема автоматичному та напіваавтоматичному. В автоматичному режимі система керування виконує технологічний цикл відповідно до заданої рецептури без безпосереднього втручання оператора, тоді як у напіваавтоматичному режимі оператор має можливість запускати окремі етапи процесу або коригувати параметри в допустимих межах. У разі виникнення аварійних ситуацій панель оператора забезпечує відображення попереджувальних та аварійних повідомлень, що дозволяє своєчасно вжити необхідних заходів.

Застосування панелі оператора у складі автоматизованої системи керування сприяє підвищенню зручності експлуатації обладнання, зменшенню впливу людського фактору та забезпеченню стабільності технологічного процесу подачі та змішування компонентів морозива.

На підприємствах харчової промисловості застосовуються ручні, напіваавтоматичні та автоматизовані системи керування процесом подачі та змішування компонентів. Ручні системи характеризуються низькою точністю та високою залежністю від оператора.

Напіваавтоматичні системи дозволяють автоматизувати окремі операції, проте не забезпечують комплексного контролю процесу. Найбільш ефективними є автоматизовані системи керування, побудовані на базі програмованих логічних контролерів із використанням датчиків витрати, рівня та температури.

Такі системи забезпечують реалізацію складних алгоритмів керування, можливість архівування даних та інтеграцію з верхнім рівнем управління виробництвом.

1.6. Обґрунтування необхідності автоматизації технологічного процесу

Аналіз технологічного процесу подачі та змішування компонентів морозива, а також застосовуваного обладнання показав, що навіть за наявності сучасних насосів, дозаторів і змішувальних установок стабільність технологічних параметрів значною мірою залежить від дій оператора. У разі відсутності автоматизованої системи керування контроль витрати компонентів, тривалості та інтенсивності змішування здійснюється переважно вручну або з використанням локальних регуляторів, що не забезпечує достатньої точності та повторюваності режимів. Це призводить до можливих відхилень у складі суміші, коливань її фізико-хімічних властивостей і, як наслідок, нестабільної якості готового продукту.

Впровадження автоматизованої системи керування технологічним процесом подачі та змішування компонентів морозива дозволяє забезпечити безперервний контроль і регулювання основних параметрів у реальному часі, зменшити вплив людського фактору та підвищити надійність роботи обладнання. Автоматизація створює умови для точного дотримання рецептури, оптимізації режимів змішування та зниження виробничих втрат, що обґрунтовує доцільність розробки і впровадження автоматизованої системи управління технологічним процесом та визначає напрям подальших досліджень, викладених у наступному розділі роботи.

Необхідність автоматизації процесу подачі та змішування компонентів морозива зумовлена зростанням вимог до якості продукції, ефективності використання сировини та зниженням впливу людського фактору. Автоматизація дозволяє забезпечити стабільність технологічних параметрів, підвищити точність дозування та зменшити втрати.

Крім того, впровадження автоматизованої системи керування створює умови для модернізації виробництва, підвищення його конкурентоспроможності та відповідності сучасним стандартам харчової безпеки.

Висновки до розділу 1

У розділі 1 проведено аналіз технологічного процесу подачі та змішування компонентів морозива як одного з визначальних етапів виробництва, що безпосередньо впливає на якість готової продукції. Розглянуто особливості технології виробництва морозива, склад і властивості основних компонентів, а також вимоги до формування однорідної суміші.

У результаті дослідження технологічних параметрів процесу подачі встановлено, що точність дозування, стабільність витрат і температурних режимів є критичними для дотримання рецептури. Хоча застосування насосів, дозаторів і вимірювальних засобів дозволяє реалізувати процес подачі компонентів, за відсутності автоматизованої системи керування підтримання заданих параметрів значною мірою залежить від дій оператора.

Аналіз процесу змішування показав, що тип мішалки, режими її роботи та тривалість змішування суттєво впливають на однорідність, в'язкість і стабільність суміші морозива. Існуюче змішувальне обладнання забезпечує необхідну інтенсивність процесу, проте без автоматичного регулювання не гарантує стабільної якості продукції.

На підставі виконаного аналізу обґрунтовано необхідність упровадження автоматизованої системи керування технологічним процесом подачі та змішування компонентів морозива. Така система дозволить зменшити вплив людського фактору, забезпечити безперервний контроль основних параметрів і створити передумови для підвищення ефективності та якості виробництва, що є підґрунтям для подальшого проєктування автоматизованої системи управління технологічним процесом у наступному розділі роботи.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА СТРУКТУРИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

2.1. Функціональна структура автоматизованої системи керування технологічним процесом

Автоматизована система керування технологічним процесом подачі та змішування компонентів морозива призначена для забезпечення стабільного та керованого протікання технологічних операцій відповідно до заданої рецептури. Основною метою розробки структури АСУ ТП є централізований контроль і регулювання параметрів процесу, зменшення впливу людського фактору та підвищення якості готової суміші.

Функціональна структура АСУ ТП включає технологічний об'єкт керування, вимірювальні засоби, виконавчі механізми, програмований логічний контролер та систему візуалізації. Об'єктом керування є процес подачі рідких і сухих компонентів та їх подальше змішування у змішувальній ємності. Вимірювальні засоби забезпечують зчитування параметрів витрати, температури, рівня та швидкості обертання мішалки, а виконавчі механізми реалізують регульовальні дії відповідно до команд системи керування.

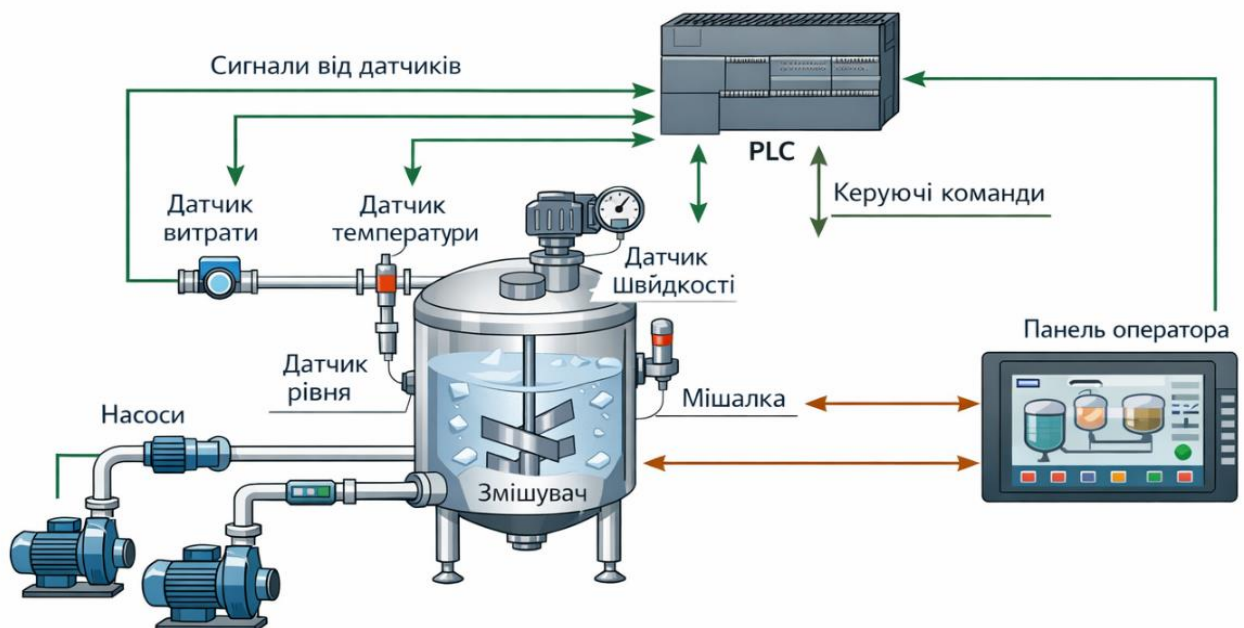


Рисунок 2.1. Функціональна схема автоматизованої системи керування процесом подачі та змішування компонентів морозива

Керування процесом здійснюється за замкненими та розімкненими контурами, що дозволяє забезпечити підтримання заданих режимів у реальному часі. Оператор взаємодіє з системою через панель оператора, на якій відображаються поточні параметри та стан обладнання.

2.2. Вибір технічних засобів автоматизації

Для реалізації автоматизованої системи керування доцільним є використання програмованого логічного контролера середнього класу, який забезпечує необхідну кількість входів і виходів, високу надійність та можливість масштабування. PLC виконує функції збору даних з датчиків, обробки сигналів та формування керуючих впливів на виконавчі механізми.

Як вимірювальні засоби у системі застосовуються датчики витрати рідких компонентів, тензOMETричні датчики маси для дозування сухих компонентів, датчики температури та рівня. Для керування насосами та приводом мішалки використовуються частотні перетворювачі, що дозволяють плавно регулювати продуктивність та швидкість обертання відповідно до заданих алгоритмів.

Таблиця 2.1.

Склад технічних засобів автоматизованої системи керування технологічним процесом подачі та змішування компонентів морозива

№	Найменування елемента	Тип / приклад виконання	Основне призначення
1	Програмований логічний контролер (PLC)	Siemens S7-1200 / Schneider M221	Центральний елемент керування, збір і обробка сигналів, реалізація алгоритмів АСУ ТП
2	Панель оператора (HMI)	Siemens KTP700 / Weintek	Візуалізація технологічного процесу,

			задання параметрів, контроль стану системи
3	Датчик витрати рідких компонентів	Електромагнітний витратомір	Вимірювання та контроль витрати молока, вершків, води
4	Датчик температури	Термоперетворювач опору (Pt100)	Контроль температурного режиму компонентів і суміші
5	Датчик рівня	Ємнісний / поплавковий	Контроль рівня сировини в ємностях та змішувальному резервуарі
6	Датчик швидкості обертання	Індуктивний / енкодер	Контроль швидкості обертання мішалки
7	Насос подачі компонентів	Відцентровий харчовий насос	Подача рідких компонентів у змішувальну ємність
8	Дозатор сухих компонентів	Шнековий / ваговий	Дозування цукру та стабілізаторів
9	Електропривід мішалки	Асинхронний двигун з ЧП	Забезпечення процесу змішування
10	Частотний перетворювач	ABB / Schneider Electric	Регулювання продуктивності насосів і швидкості мішалки
11	Аварійні та сигнальні пристрої	Світлова та звукова сигналізація	Інформування оператора про аварійні стани

У таблиці 2.1 наведено склад основних технічних засобів автоматизованої системи керування технологічним процесом подачі та змішування компонентів морозива. До складу системи входять програмований логічний контролер та панель оператора, які забезпечують централізоване керування технологічним процесом, візуалізацію параметрів і взаємодію оператора з системою. Вибір PLC середнього класу обумовлений необхідністю обробки аналогових і дискретних сигналів, реалізації алгоритмів керування та можливістю подальшого розширення системи.

Вимірювальні засоби, представлені датчиками витрати, температури, рівня та швидкості обертання, забезпечують безперервний контроль основних технологічних параметрів процесу. Виконавчі механізми, зокрема харчові насоси, дозатори та електропривід мішалки з частотним перетворювачем, реалізують керуючі дії відповідно до сигналів контролера. Використання частотних перетворювачів дозволяє плавно регулювати продуктивність обладнання та оптимізувати режими роботи.

Застосування зазначених технічних засобів у складі АСУ ТП забезпечує підвищення стабільності технологічного процесу, точність дотримання рецептури та надійність функціонування обладнання, а також створює умови для зменшення впливу людського фактору і підвищення ефективності виробництва морозива.

Для візуалізації процесу та задання рецептури застосовується панель оператора, яка забезпечує зручний інтерфейс взаємодії оператора з системою, відображення аварійних повідомлень та архівацію основних параметрів.

На структурній схемі автоматизованої системи керування технологічним процесом подачі та змішування компонентів морозива показано ієрархічну організацію системи за трирівневим принципом. Нижній рівень утворюють первинні вимірювальні перетворювачі та виконавчі механізми, зокрема датчики витрати, температури, рівня, швидкості обертання, а також насоси, дозатори та електропривід мішалки, які безпосередньо взаємодіють з технологічним об'єктом.



Рисунок 2.2. Структурна схема АСУ ТП

Середній рівень представлений програмованим логічним контролером, який здійснює збір і обробку сигналів від датчиків, формування керуючих впливів та реалізацію алгоритмів керування відповідно до заданої рецептури. Верхній рівень включає панель оператора та робоче місце оператора, що забезпечують візуалізацію технологічного процесу, введення параметрів, контроль стану обладнання та взаємодію людини з автоматизованою системою керування.

2.3. Структура інформаційних і керуючих потоків

Інформаційні потоки в АСУ ТП формуються на основі сигналів, що надходять від датчиків технологічних параметрів. Отримана інформація передається до програмованого логічного контролера, де здійснюється її обробка та аналіз відповідно до заданих алгоритмів керування.

Керуючі потоки формуються PLC та передаються на виконавчі механізми, зокрема на насоси, дозатори та електропривід мішалки. Таким чином забезпечується синхронна робота всіх елементів системи та дотримання встановлених технологічних режимів.

Зворотний зв'язок дозволяє оперативно коригувати режими роботи обладнання у разі відхилення параметрів від заданих значень, що є необхідною умовою стабільності технологічного процесу.

У таблиці 2.2 наведено відповідність сигналів програмованого логічного контролера елементам автоматизованої системи керування технологічним процесом подачі та змішування компонентів морозива. Взаємозв'язок між вимірювальними приладами, виконавчими механізмами та контролером, а також їх функціональне призначення у складі системи наведено на функціональній схемі АСУ ТП (рисунок 2.1). Запропонована структура сигналів забезпечує реалізацію керування об'єктом відповідно до вимог технологічного процесу.

Таблиця 2.2.

Відповідність сигналів програмованого логічного контролера
автоматизованої системи керування

№	Позначення сигналу PLC	Тип сигналу	Джерело / приймач сигналу	Призначення сигналу
1	AI1	Аналоговий вхід	Датчик витрати рідких компонентів	Вимірювання та контроль витрати молока, вершків або води
2	AI2	Аналоговий вхід	Датчик температури (Pt100)	Контроль температури суміші в змішувальній ємності
3	AI3	Аналоговий вхід	Датчик рівня	Контроль рівня суміші в резервуарі

4	AI4	Аналоговий вхід	Датчик швидкості обертання	Контроль швидкості обертання мішалки
5	DI1	Дискретний вхід	Кінцевий вимикач / датчик рівня MIN	Захист від роботи обладнання при мінімальному рівні
6	DI2	Дискретний вхід	Кнопка «Пуск»	Запуск технологічного циклу
7	DI3	Дискретний вхід	Кнопка «Стоп»	Зупинка технологічного процесу
8	DI4	Дискретний вхід	Аварійна кнопка	Аварійна зупинка системи
9	DO1	Дискретний вихід	Насос подачі компонентів	Пуск/зупинка насоса
10	DO2	Дискретний вихід	Дозатор сухих компонентів	Керування роботою дозатора
11	DO3	Дискретний вихід	Мішалка	Увімкнення/вимкнення мішалки
12	AO1	Аналоговий вихід	Частотний перетворювач насоса	Регулювання продуктивності насоса
13	AO2	Аналоговий вихід	Частотний перетворювач мішалки	Регулювання швидкості обертання мішалки

- Аналогові входи (AI) використовуються для зчитування основних технологічних параметрів процесу.
- Дискретні входи (DI) забезпечують керування режимами роботи та аварійний захист.
- Дискретні виходи (DO) реалізують керування виконавчими механізмами.

- Аналогові виходи (АО) застосовуються для плавного регулювання швидкості насосів і мішалки.

Аналогові входи PLC використовуються для приймання сигналів від датчиків витрати, температури, рівня та швидкості обертання мішалки, що дозволяє здійснювати безперервний контроль основних технологічних параметрів процесу. Отримані дані обробляються контролером і використовуються для формування керуючих впливів відповідно до алгоритму роботи системи, послідовність якого наведено на рисунку 2.3. Дискретні входи забезпечують обробку команд оператора та реалізацію функцій захисту й аварійної зупинки обладнання.

Дискретні виходи PLC призначені для керування виконавчими механізмами — насосами, дозаторами та мішалкою, тоді як аналогові виходи використовуються для плавного регулювання швидкості електроприводів через частотні перетворювачі. Такий підхід дозволяє підтримувати стабільні режими роботи та забезпечувати точне дотримання заданих технологічних параметрів.

Отже, структура сигналів, наведена в таблиці 2.2, у поєднанні з функціональною схемою системи (рисунок 2.1) та алгоритмом керування (рисунок 2.3) забезпечує комплексну реалізацію автоматизованої системи керування технологічним процесом подачі та змішування компонентів морозива.

На основі визначеної структури автоматизованої системи керування та сформованої відповідності сигналів програмованого логічного контролера елементам технологічного процесу виникає необхідність формалізації послідовності дій системи під час реалізації технологічного циклу. Для цього в наступному пункті розглядається алгоритм роботи автоматизованої системи керування, який визначає порядок виконання операцій подачі та змішування компонентів морозива, умови переходу між етапами процесу, а також дії системи у разі виникнення аварійних ситуацій.

2.4. Алгоритм роботи автоматизованої системи керування

Алгоритм роботи АСУ ТП передбачає поетапне виконання технологічного процесу відповідно до заданої рецептури. На першому етапі здійснюється перевірка готовності обладнання та наявності компонентів у ємностях. Після цього запускається процес подачі рідких і сухих компонентів із контролем витрати та маси.

Після завершення дозування система переходить до етапу змішування, під час якого автоматично встановлюється необхідна швидкість обертання мішалки та тривалість процесу. Усі параметри контролюються в реальному часі, а у разі виникнення відхилень система формує коригувальні впливи або аварійні повідомлення.

Завершальним етапом є передача готової суміші до наступної технологічної операції та підготовка системи до нового циклу роботи.

У таблиці 2.1 наведено склад основних технічних засобів автоматизованої системи керування технологічним процесом подачі та змішування компонентів морозива. Взаємозв'язок між окремими елементами системи та їх функціональне призначення у складі АСУ ТП наведено на функціональній схемі (рисунок 2.1). До складу системи входять програмований логічний контролер і панель оператора, які забезпечують централізоване керування технологічним процесом, візуалізацію поточних параметрів і взаємодію оператора з автоматизованою системою.

Вимірювальні засоби, представлені датчиками витрати, температури, рівня та швидкості обертання, забезпечують безперервний контроль основних технологічних параметрів процесу. Сигнали від датчиків надходять до PLC, де здійснюється їх обробка та формування керуючих впливів на виконавчі механізми — насоси, дозатори та електропривід мішалки з частотним перетворювачем. Принцип функціонування системи та послідовність виконання технологічних операцій відповідно до заданого алгоритму керування зображено на рисунку 2.3.

Реалізація алгоритму роботи автоматизованої системи керування, наведеного на рисунку 2.3, можлива з використанням програмованих логічних контролерів середнього класу, таких як Siemens SIMATIC S7-1200, Schneider Electric Modicon M221 або Allen-Bradley MicroLogix. Зазначені PLC забезпечують підтримку аналогових і дискретних сигналів, реалізацію послідовного керування та взаємодію з панеллю оператора, що дозволяє повністю реалізувати алгоритм подачі та змішування компонентів морозива.



Рисунок 2.3. Алгоритм роботи автоматизованої системи керування

На рисунку 2.3 - алгоритм роботи автоматизованої системи керування процесом подачі та змішування компонентів морозива. Алгоритм передбачає

послідовне виконання основних етапів технологічного циклу: запуск системи, перевірку готовності обладнання, дозування компонентів відповідно до заданої рецептури, змішування суміші та контроль основних технологічних параметрів. У разі відповідності параметрів встановленим значенням система завершує цикл роботи, а при виявленні відхилень переходить в аварійний режим із зупинкою процесу та подачею сигналу оператору.

Застосування зазначених технічних засобів у складі АСУ ТП дозволяє реалізувати автоматичне керування процесами подачі та змішування компонентів морозива, забезпечити стабільність технологічних режимів і точність дотримання рецептури. Узгоджена робота апаратних засобів і програмного забезпечення, зображена на рисунках 2.1 і 2.3, створює передумови для підвищення ефективності виробництва та зменшення впливу людського фактору.

2.5. Забезпечення надійності та безпеки функціонування АСУ ТП

Для забезпечення надійної та безпечної роботи автоматизованої системи керування передбачено використання аварійних блокувань, сигналізації та захисних алгоритмів. У разі виходу параметрів за допустимі межі система автоматично зупиняє обладнання або переводить його у безпечний режим роботи.

Застосування автоматизованої системи керування дозволяє знизити ризик аварійних ситуацій, підвищити ресурс обладнання та забезпечити стабільність технологічного процесу подачі та змішування компонентів морозива.

Надійність та безпека функціонування автоматизованої системи керування технологічним процесом подачі та змішування компонентів морозива значною мірою визначається наявністю ефективних аварійних режимів і захисних функцій. У складі розроблюваної АСУ ТП передбачено комплекс технічних і програмних засобів захисту, спрямованих на

запобігання пошкодженню обладнання, порушенню технологічного процесу та зниженню якості готової продукції.

Таблиця 2.3

Аварійні ситуації та заходи захисту в автоматизованій системі керування

№	Аварійна ситуація	Причина виникнення	Контрольований параметр / датчик	Реакція АСУ ТП	Дія оператора
1	Відсутність компоненту	Порожня ємність, відмова подачі	Датчик рівня MIN	Блокування запуску процесу, аварійне повідомлення на НМІ	Перевірити рівень сировини
2	Перевищення температури суміші	Відмова охолодження, порушення режиму	Датчик температури	Зупинка змішування, аварійна сигналізація	Усунути причину перегріву
3	Недотримання витрати компонентів	Засмічення трубопроводу, відмова насоса	Датчик витрати	Зупинка дозування, перехід у аварійний режим	Перевірити насос і трубопровід
4	Переповнення змішувальної ємності	Збій дозування, відмова датчика	Датчик рівня MAX	Негайна зупинка подачі компонентів	Перевірити систему дозування
5	Відхилення	Відмова	Датчик	Зупинка	Перевірити

	швидкості мішалки	приводу або ЧП	швидкості	мішалки, сигнал аварії	електропривід
6	Аварійна зупинка	Натискання кнопки «STOP»	Аварійна кнопка	Повна зупинка системи	Усунути аварійну ситуацію
7	Відмова зв'язку PLC– HMI	Збій комунікації	Контроль обміну даними	Перехід у безпечний режим	Перезапуск системи
8	Втрата живлення	Знеструмлен ня	Контроль напруги	Зупинка процесу, збереження стану	Перевірити електроживлен ня

Реалізація аварійних режимів і захисних функцій у складі АСУ ТП не лише забезпечує безпечну експлуатацію обладнання, а й запобігає виникненню небезпечних ситуацій. Усі аварійні стани супроводжуються відповідною індикацією на панелі оператора та блокуванням подальшого виконання технологічного циклу до усунення причин аварії.

Аварійні ситуації контролюються за допомогою вимірювальних засобів нижнього рівня, зокрема датчиків рівня, температури, витрати та швидкості обертання мішалки. Сигнали від датчиків надходять до програмованого логічного контролера, де порівнюються з допустимими значеннями. У разі перевищення встановлених меж PLC автоматично переводить систему у безпечний режим відповідно до алгоритму роботи, наведеного у пункті 2.4, та формує аварійне повідомлення для оператора.

Захисні функції передбачають блокування запуску технологічного процесу за відсутності необхідних умов, автоматичну зупинку подачі компонентів при переповненні змішувальної ємності, відключення мішалки при відхиленні швидкості обертання, а також повну аварійну зупинку

системи у разі натискання кнопки аварійного вимкнення або втрати електроживлення. Усі аварійні стани супроводжуються світловою та текстовою індикацією на панелі оператора, що забезпечує своєчасне інформування персоналу.

Таким чином, реалізована система аварійних режимів і захистів, узагальнена в таблиці 2.3, забезпечує безпечну експлуатацію обладнання, підвищує надійність автоматизованої системи керування та створює умови для стабільної роботи технологічного процесу подачі та змішування компонентів морозива.

Висновки до розділу 2

У розділі 2 розроблено структуру автоматизованої системи керування технологічним процесом подачі та змішування компонентів морозива. Запропоновано трирівневу архітектуру АСУ ТП, що включає нижній рівень із вимірювальними засобами та виконавчими механізмами, середній рівень на базі програмованого логічного контролера та верхній рівень, представлений панеллю оператора. Такий підхід забезпечує чіткий розподіл функцій керування та надійну взаємодію між усіма елементами системи.

Виконано вибір та обґрунтування складу технічних засобів автоматизації, а також визначено відповідність сигналів PLC елементам технологічного процесу. Запропонована структура аналогових і дискретних сигналів дозволяє реалізувати контроль основних технологічних параметрів, керування виконавчими механізмами та інтеграцію з панеллю оператора. Розроблений алгоритм роботи автоматизованої системи керування забезпечує послідовне виконання етапів подачі та змішування компонентів відповідно до заданої рецептури.

Особливу увагу приділено розробці аварійних режимів і захисних функцій, спрямованих на підвищення безпеки експлуатації обладнання та надійності функціонування системи. Передбачені заходи захисту дозволяють своєчасно виявляти відхилення технологічних параметрів, автоматично

переводити систему у безпечний режим та інформувати оператора про аварійні стани.

Таким чином, розроблена структура автоматизованої системи керування створює необхідні передумови для підвищення стабільності технологічного процесу, зменшення впливу людського фактора та забезпечення високої якості суміші морозива. Отримані результати є основою для подальшої реалізації та оцінки ефективності автоматизації технологічного процесу в наступних розділах дослідницької роботи.

РОЗДІЛ 3.

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

3.1. Математична модель процесу дозування компонентів

Процес подачі компонентів морозива до змішувальної ємності реалізується за допомогою насосів або дозаторів, керування якими здійснюється програмованим логічним контролером відповідно до заданої рецептури. Основним параметром, що характеризує цей процес, є витрата компонентів, яка безпосередньо впливає на склад та якість кінцевого продукту.

Математичний опис процесу подачі компонентів базується на рівнянні матеріального балансу. Зміна об'єму суміші в змішувальній ємності визначається сумарною витратою компонентів:

$$\frac{dV(t)}{dt} = \sum_{i=1}^n Q_i(t)$$

де

$V(t)$ — об'єм суміші в ємності,

$Q_i(t)$ — витрата i -го компонента,

n — кількість компонентів.

У більшості промислових систем залежність між керуючим сигналом, сформованим PLC, і витратою насоса може бути апроксимована лінійною функцією:

$$Q(t) = K_Q \cdot u(t)$$

де

K_Q — коефіцієнт підсилення дозуючого пристрою,

$u(t)$ — керуючий сигнал.

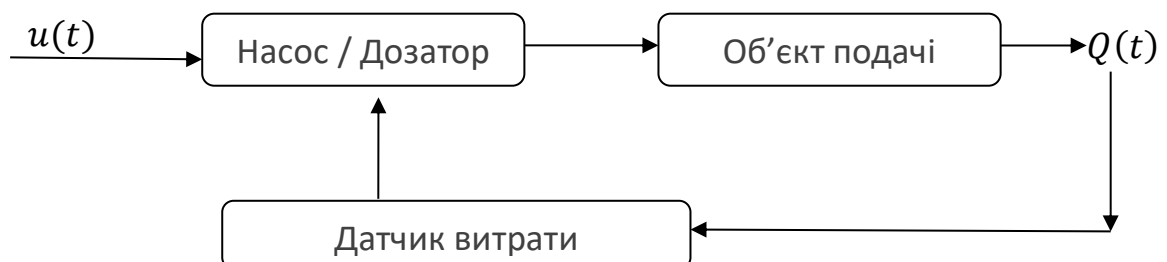


Рисунок 3.1 Структурна схема математичної моделі процесу подачі компонентів

На рисунку 3.1. показано:

- керуючий сигнал $u(t)$, сформований програмованим логічним контролером;
- виконавчий механізм (насос або дозатор);
- об'єкт керування — процес подачі компонента;
- вихідну величину — витрату компонента $Q(t)$;
- зворотний зв'язок за витратою від датчика.

На рисунку 3.1 наведено структурну схему математичної моделі процесу подачі компонентів морозива. Керуючий сигнал $u(t)$, сформований програмованим логічним контролером, надходить на виконавчий механізм — насос або дозатор, який забезпечує подачу компонента до змішувальної ємності. Процес подачі розглядається як динамічний об'єкт, вихідною величиною якого є витрата компонента $Q(t)$.

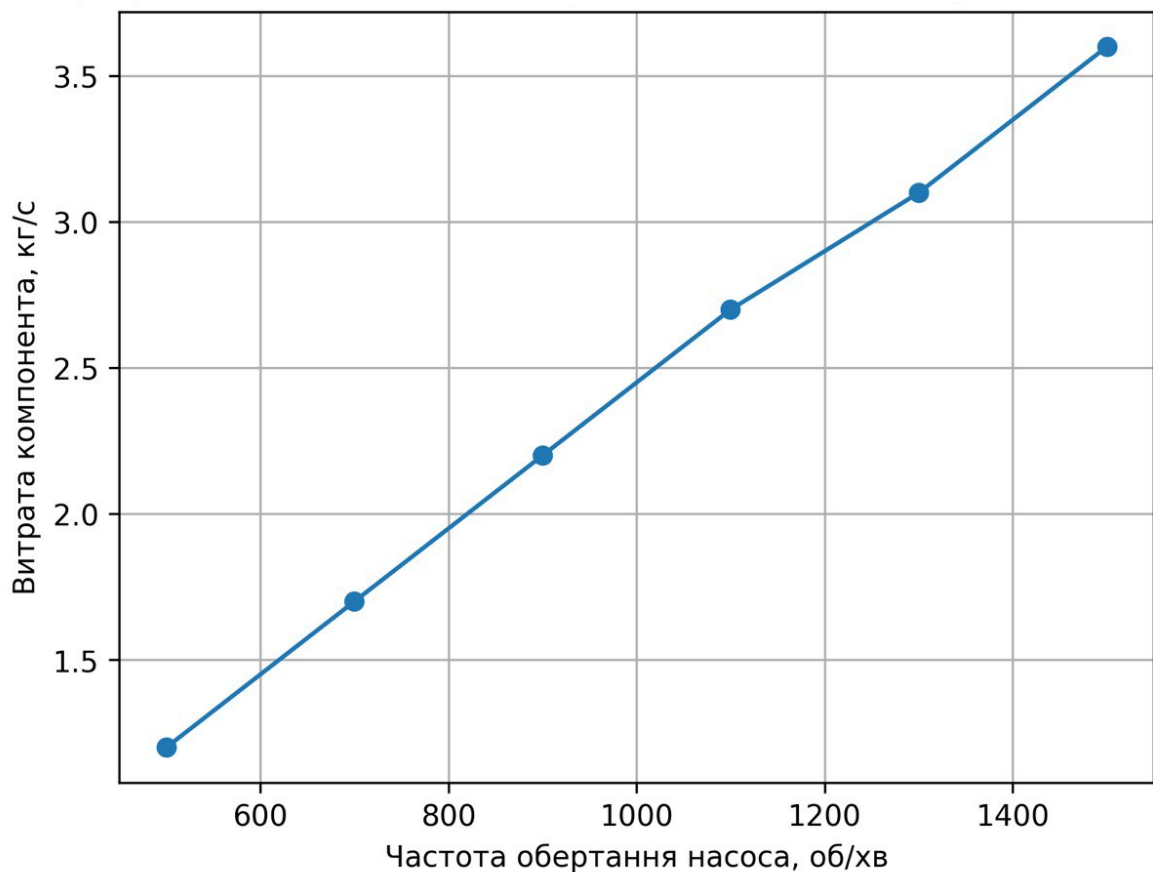


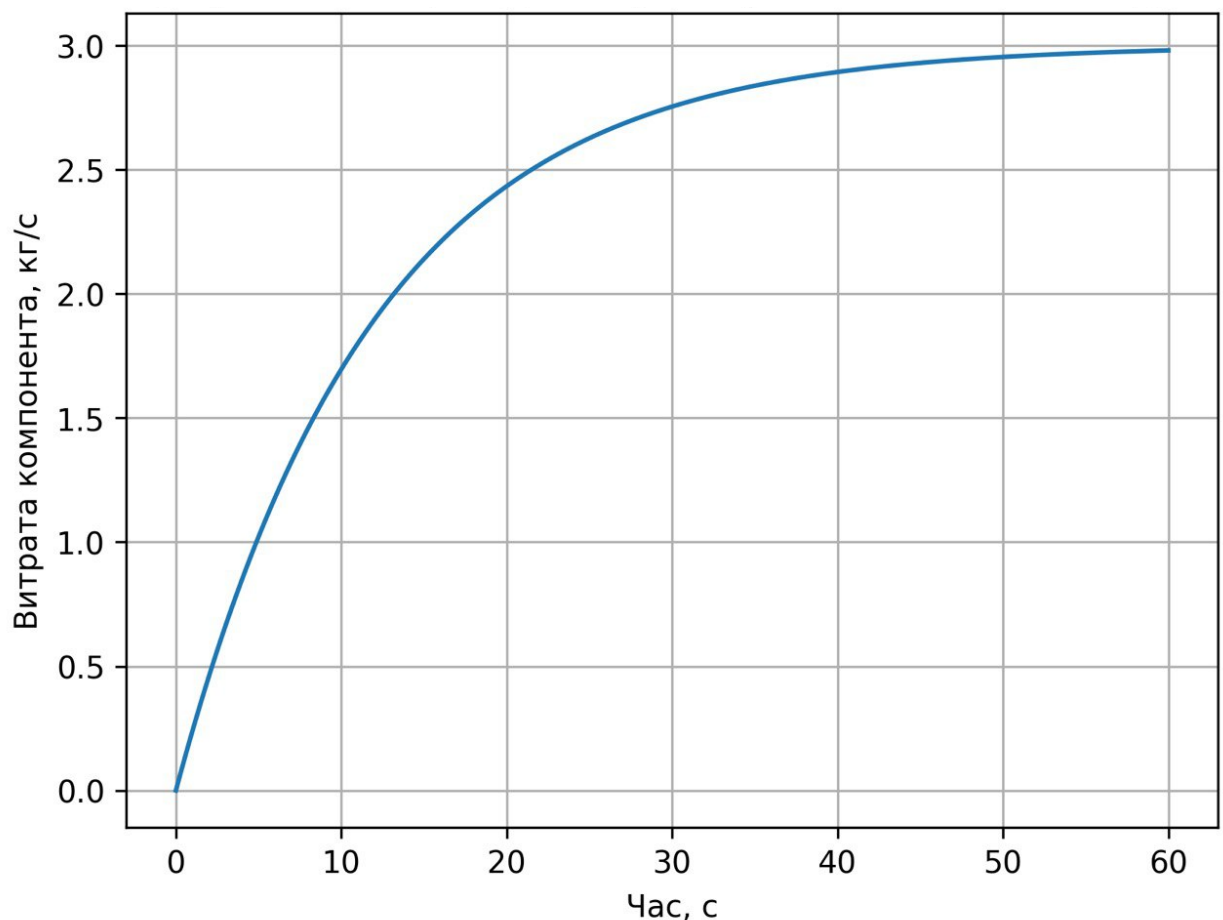
Рисунок 3.2. Залежність витрати від частоти обертання насоса

На рисунку 3.2 наведено залежність витрати компонента від частоти обертання насоса. Як видно з графіка, зі збільшенням частоти обертання привода витрата зростає майже лінійно, що відповідає фізичним закономірностям роботи відцентрових та шестеренних насосів. Отримана характеристика підтверджує коректність прийнятої математичної моделі процесу подачі та дозволяє використовувати частоту обертання двигуна як

керуючий вплив у системі автоматичного керування. Для контролю та стабілізації витрати використовується датчик витрати, сигнал з якого передається до системи керування, формуючи зворотний зв'язок. Така структура дозволяє реалізувати замкнений контур автоматичного регулювання витрати, що забезпечує точне дозування компонентів відповідно до заданої рецептури та компенсує вплив зовнішніх збурень.

Отримана модель відповідає інтегрувальній ланці, що є типовою для систем автоматичного регулювання витрати та широко використовується в АСУ ТП харчових виробництв.

Реальний процес подачі компонентів у виробництві морозива здійснюється за допомогою насосного та дозувального обладнання, яке забезпечує контрольовану та відтворювану подачу сировини до змішувальної ємності. Як правило, для транспортування рідких і в'язких компонентів (молочна основа, вершки, цукровий сироп) використовуються відцентрові або шестеренні насоси, оснащені електроприводами з частотним регулюванням. Для компонентів, що подаються у менших кількостях або потребують підвищеної точності дозування, застосовуються дозувальні насоси або об'ємні дозатори.



Графік 3.3. Перехідна характеристика системи подачі

На рисунку 3.3 наведено перехідну характеристику системи подачі компонентів у відповідь на ступінчасту зміну керуючого впливу. З графіка видно, що система має інерційний характер та поступово виходить на усталене значення витрати без коливань і перерегулювання. Час встановлення визначається параметрами привода та гідродинамічними властивостями компонента, що підтверджує адекватність прийнятої математичної моделі процесу подачі. Графік 3.3 показує динамічні властивості системи подачі та дозволяє оцінити час встановлення і стійкість процесу, що є важливим для вибору параметрів регулятора.

Витрата компонента безпосередньо залежить від частоти обертання робочої частини насоса або дозатора. За умови сталих гідравлічних характеристик трубопроводу та незначних коливань тиску, залежність між частотою обертання електродвигуна та витратою може бути апроксимована лінійною функцією. Саме це дозволяє у межах автоматизованої системи керування описувати процес подачі у вигляді лінійної динамічної моделі з коефіцієнтом підсилення, що визначається типом насоса та фізичними властивостями компонента.

Фізичні властивості сировини, зокрема густина та в'язкість, істотно впливають на реальну витрату компонентів. Зі збільшенням в'язкості зростають гідравлічні втрати в трубопроводах, що призводить до зменшення фактичної подачі при незмінній частоті обертання двигуна. Водночас густина компонента визначає масову витрату та впливає на навантаження електропривода насоса. У межах цієї роботи такі фактори враховуються узагальнено, через коефіцієнт підсилення моделі, який приймається постійним у робочому діапазоні параметрів.

Таким чином, математичне представлення процесу подачі компонентів у вигляді інтегрувальної ланки з лінійною залежністю витрати від керуючого сигналу є фізично обґрунтованим та адекватним для аналізу й синтезу автоматизованої системи керування. Запропонована модель відображає основні закономірності реального технологічного процесу та дозволяє досліджувати вплив керуючих дій на динаміку подачі компонентів морозива.

3.2. Математична модель процесу змішування суміші морозива

Процес змішування компонентів морозива здійснюється у змішувальній ємності за допомогою мішалки з електроприводом. Основним керованим параметром є швидкість обертання мішалки, яка визначає інтенсивність перемішування та рівень однорідності суміші.

Електропривод мішалки характеризується інерційністю, що враховується при математичному моделюванні. Динаміка зміни швидкості обертання може бути описана диференціальним рівнянням першого порядку:

$$T_m \frac{dn(t)}{dt} + n(t) = K_m u(t)$$

де

$n(t)$ — швидкість обертання мішалки,

T_m — стала часу привода,

K_m — коефіцієнт підсилення,

$u(t)$ — керуючий сигнал з PLC.

Запропонована модель дозволяє дослідити перехідні процеси при зміні режимів змішування та використовується для синтезу регулятора швидкості мішалки.

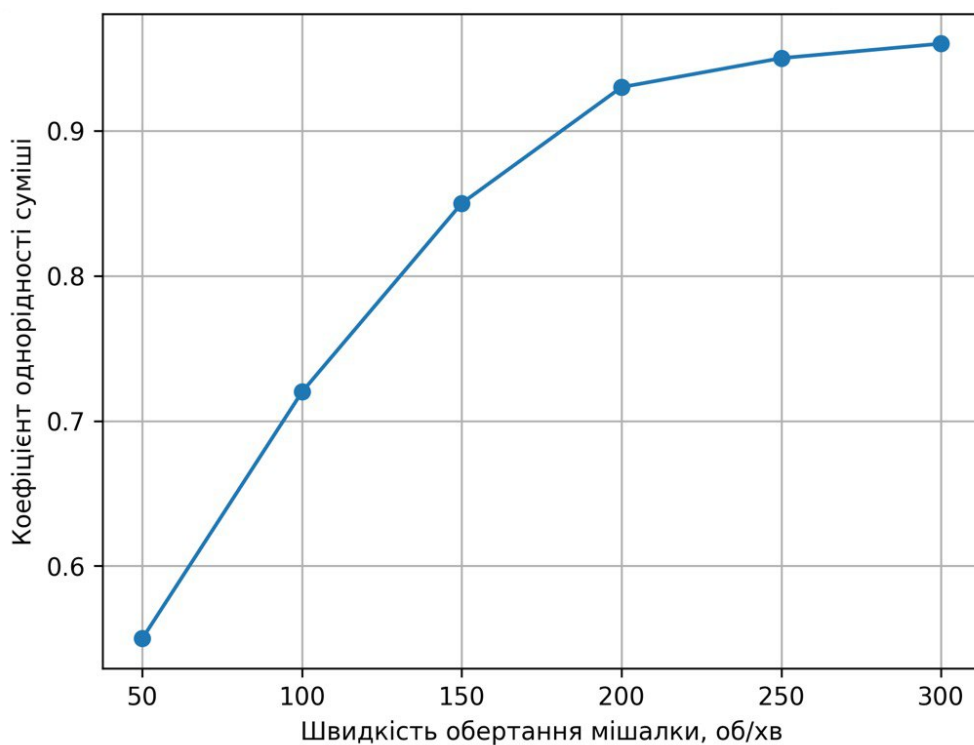


Рисунок 3.4. Вплив швидкості обертання мішалки на коефіцієнт однорідності суміші

На рисунку 3.4 наведено залежність коефіцієнта однорідності суміші від швидкості обертання мішалки. Зі збільшенням швидкості обертання спостерігається суттєве покращення якості змішування, що обумовлено інтенсифікацією гідродинамічних процесів у робочому об'ємі. При досягненні певного значення швидкості приріст коефіцієнта однорідності зменшується, що свідчить про доцільність вибору оптимального режиму роботи мішалки з урахуванням енергоспоживання.

Графік 3.4 показує, що збільшення швидкості обертання мішалки покращує однорідність суміші, але після певного значення ефект

насичується, тому автоматизована система дозволяє підтримувати оптимальний режим.

Залежно від конструктивного виконання та умов експлуатації у виробництві морозива застосовуються різні типи мішалок, які можна класифікувати за формою робочого механізму та характером руху потоку. Найбільш поширеними є пропелерні, лопатеві та турбінні мішалки. Пропелерні мішалки забезпечують інтенсивну циркуляцію суміші та застосовуються для рідких і слабков'язких компонентів, тоді як лопатеві та турбінні мішалки доцільні для більш в'язких сумішей. Вибір типу мішалки визначається фізичними властивостями суміші морозива та вимогами до ступеня її однорідності.

Швидкість обертання мішалки є одним із ключових параметрів процесу змішування, оскільки безпосередньо впливає на якість готової суміші. За недостатньої швидкості можливе нерівномірне розподілення компонентів і утворення зон застою, що негативно позначається на структурі суміші. Надмірне збільшення швидкості призводить до зайвого насичення суміші повітрям, підвищених енергетичних витрат та можливого порушення структури продукту. Тому в автоматизованій системі керування швидкість обертання мішалки підтримується в оптимальному діапазоні, визначеному експериментально або технологічними нормативами.

З енергетичної точки зору електропривод мішалки можна описати співвідношенням між потужністю, крутним моментом та кутовою швидкістю обертання. Споживана потужність привода визначається як

$$P = M \cdot \omega$$

де M — крутний момент на валу мішалки, ω — кутова швидкість обертання. Зі збільшенням в'язкості суміші зростає опір обертанню, що призводить до підвищення навантаження на електродвигун. У межах математичної моделі ці фактори враховуються через зміну параметрів інерційності та коефіцієнта підсилення привода.

Під час інтенсивного змішування також має місце тепловий вплив, зумовлений втратами енергії в електроприводі та внутрішнім тертям у суміші. Підвищення температури може негативно впливати на властивості суміші морозива, зокрема на стабільність емульсії та подальші стадії технологічного процесу. У цій роботі тепловий вплив враховується якісно: шляхом обмеження максимально допустимої швидкості обертання мішалки та введення контролю температури суміші в автоматизованій системі керування.

3.3. Алгоритм автоматичного керування

Алгоритм автоматичного керування процесом подачі та змішування компонентів морозива реалізується програмованим логічним контролером відповідно до структурної та функціональної схем, наведених у розділі 2 (рисунки 2.1 і 2.2).

На початковому етапі здійснюється запуск системи та перевірка готовності обладнання, зокрема наявності сировини, справності датчиків і виконавчих механізмів. Після підтвердження готовності відбувається поетапне дозування компонентів згідно з заданою рецептурою. Керування витратою здійснюється шляхом формування сигналів на насоси або дозатори.

Після завершення подачі компонентів система переходить до режиму змішування, у якому підтримується задана швидкість обертання мішалки. У процесі роботи здійснюється безперервний контроль основних технологічних параметрів — витрати, рівня та температури суміші. У разі виникнення відхилень або аварійних ситуацій система автоматично переходить у безпечний режим та інформує оператора.

Деталізований опис етапів алгоритму автоматичного керування наведено нижче. Алгоритм забезпечує послідовне виконання технологічних операцій, контроль параметрів процесу та своєчасне реагування на аварійні ситуації.

Таблиця 3.1.

Алгоритм автоматичного керування

Зміст етапу автоматичного керування	Опис етапу автоматичного керування
Етап 1. Старт системи	Початковим етапом алгоритму є запуск автоматизованої системи керування після подачі живлення або команди «Пуск» з панелі оператора. На цьому етапі PLC ініціалізує внутрішні змінні, перевіряє стан входів і виходів, а також встановлює виконавчі механізми у початкове безпечне положення. Насоси та мішалка перебувають у вимкненому стані, що унеможливорює неконтрольований запуск обладнання.
Етап 2. Перевірка готовності обладнання	На етапі перевірки готовності здійснюється контроль справності датчиків витрати, рівня та температури, а також перевіряється наявність сировини у відповідних ємностях. Додатково контролюється відсутність активних аварійних сигналів та справність електроприводів. У разі виявлення несправностей система блокує подальше виконання алгоритму та формує відповідне повідомлення для оператора на HMI.

Етап 3. Дозування компонентів	Після успішного завершення перевірки готовності система переходить до етапу дозування компонентів. PLC формує керуючі сигнали на насоси або дозатори відповідно до заданої рецептури. У процесі дозування здійснюється безперервний контроль витрати кожного компонента за сигналами датчиків витрати. Досягнення заданої кількості компонента фіксується автоматично, після чого подача припиняється та система переходить до наступного етапу алгоритму.
Етап 4. Змішування компонентів	На етапі змішування здійснюється запуск електропривода мішалки та встановлення заданої швидкості обертання. Керування швидкістю реалізується у замкненому контурі з використанням зворотного зв'язку від датчика швидкості. Тривалість змішування визначається технологічними вимогами та задається оператором або автоматично відповідно до програми. Протягом усього етапу здійснюється контроль температури суміші.
Етап 5. Контроль технологічних параметрів	Контроль технологічних параметрів здійснюється безперервно протягом усього циклу роботи системи. PLC аналізує значення витрати, рівня, температури та швидкості обертання мішалки, порівнюючи їх із заданими допустимими межами. У разі незначних відхилень виконуються коригувальні керуючі дії, що забезпечує стабільність технологічного процесу та якість суміші морозива.
Етап 6. Завершення циклу або аварійний режим	Після завершення процесу змішування система переходить у режим завершення циклу: виконавчі механізми вимикаються, результати циклу фіксуються, а оператор інформується про готовність суміші. У разі виникнення аварійної ситуації (перевищення температури, відсутність сигналу датчика, перевантаження електропривода) система негайно переходить у безпечний режим, зупиняючи обладнання та формуючи аварійне повідомлення на панелі оператора.

Перехід між окремими етапами алгоритму автоматичного керування здійснюється на основі логічних умов, що формуються програмованим логічним контролером за сигналами датчиків, станом виконавчих механізмів

та командами оператора. Застосування чітко визначених умов переходів забезпечує послідовність виконання технологічних операцій, безпечну роботу обладнання та надійність функціонування системи в цілому.

Таблиця 3.2.

Логічні умови переходів алгоритму автоматичного керування

Зміст переходу	Умови переходів
Перехід від етапу «Старт системи» до етапу «Перевірка готовності»	Здійснюється за наявності команди «Пуск» з панелі оператора та за умови відсутності активних аварійних сигналів. Усі виконавчі механізми повинні перебувати у початковому безпечному стані.
Перехід від етапу «Перевірка готовності» до етапу «Дозування компонентів»	Дозволяється у разі справності всіх датчиків, підтвердження наявності сировини у ємностях та відсутності помилок електроприводів. У разі невиконання хоча б однієї з умов система залишається у режимі очікування та інформує оператора.
Перехід від етапу «Дозування компонентів» до етапу «Змішування»	Відбувається після досягнення заданої кількості кожного компонента, що підтверджується сигналами від датчиків витрати або рівня. Після завершення дозування PLC автоматично блокує подачу компонентів та ініціює запуск мішалки.
Перехід від етапу «Змішування» до етапу «Контроль параметрів»	Здійснюється після виходу швидкості обертання мішалки на задане значення та стабілізації режиму змішування. У цей момент система переходить у режим підтримання технологічних параметрів у допустимих межах.
Перехід до етапу «Завершення циклу»	Виконується після закінчення заданого часу змішування за умови, що всі контрольовані параметри перебували в допустимих межах протягом усього циклу. Система вимикає виконавчі механізми та формує повідомлення про успішне завершення процесу.
Перехід у аварійний режим	Може бути здійснений з будь-якого етапу алгоритму у разі перевищення граничних значень температури, рівня або струму електропривода,

	втрати сигналу від датчика чи виникнення інших несправностей. У цьому випадку PLC негайно зупиняє технологічне обладнання та подає аварійний сигнал на панель оператора.
--	--

Для забезпечення гнучкості керування технологічним процесом подачі та змішування компонентів морозива автоматизована система керування передбачає декілька режимів роботи: автоматичний, ручний та налагоджувальний. Перемикання між режимами здійснюється оператором з панелі НМІ та контролюється програмованим логічним контролером з урахуванням логічних умов безпеки.

▪ *Автоматичний режим роботи*

Автоматичний режим є основним режимом функціонування системи та використовується під час штатної експлуатації технологічної установки. У цьому режимі всі етапи алгоритму керування — від запуску системи до завершення технологічного циклу — виконуються автоматично відповідно до заданої програми.

Перехід у автоматичний режим дозволяється за умови:

- відсутності активних аварійних сигналів;
- завершення ініціалізації PLC;
- підтвердження готовності обладнання та датчиків.

У автоматичному режимі PLC послідовно реалізує етапи дозування компонентів, запуск і керування мішалкою, контроль технологічних параметрів та завершення циклу. Перехід між етапами здійснюється згідно з логічними умовами алгоритму автоматизованого керування, описаними вище. У разі виникнення аварійної ситуації система автоматично переходить у безпечний стан з інформуванням оператора.

▪ *Ручний режим роботи*

Ручний режим призначений для оперативного втручання оператора у роботу системи, а також для виконання окремих технологічних операцій без автоматичного виконання повного циклу.

Перехід у ручний режим можливий лише після зупинки автоматичного циклу та за відсутності аварійних блокувань. У цьому режимі оператор отримує можливість безпосереднього керування виконавчими механізмами (насосами, мішалкою) з панелі НМІ, однак PLC продовжує здійснювати контроль граничних параметрів та забезпечує захисні функції.

Логічні умови переходу в ручний режим передбачають:

- блокування автоматичних переходів між етапами алгоритму;
- збереження активних захистів і аварійних обмежень;
- дозвіл на керування лише за умови справності відповідного обладнання.

▪ *Налагоджувальний режим роботи*

Налагоджувальний режим використовується під час пусконаладжувальних робіт, тестування обладнання та перевірки роботи датчиків і виконавчих механізмів.

Перехід у налагоджувальний режим можливий лише для авторизованого персоналу та за виконання спеціальних логічних умов, що унеможливають неконтрольований запуск технологічного процесу. У цьому режимі допускається поетапний запуск окремих вузлів системи з мінімальними швидкостями та обмеженими параметрами.

PLC у налагоджувальному режимі:

- відключає автоматичні часові переходи алгоритму;
- дозволяє тестове керування виконавчими механізмами;
- зберігає контроль аварійних сигналів і аварійний зупин.

Перехід з налагоджувального режиму в автоматичний або ручний дозволяється лише після підтвердження оператором завершення налагодження та повторної перевірки готовності системи.

Для узагальнення можливостей керування та обмежень автоматизованої системи в таблиці 3.3 наведено режими роботи, доступні функції та відповідні захисти.

Таблиця 3.3.

Режими роботи автоматизованої системи керування

Режим роботи	Доступні функції	Обмеження та захисти
Автоматичний	▪ автоматичний запуск та зупинка циклу; ▪ дозування компонентів за рецептурою; ▪ автоматичне керування швидкістю мішалки; ▪ контроль витрати, температури, рівня; ▪ автоматичне завершення циклу	▪ ручне втручання обмежене; ▪ перехід між етапами лише за логічними умовами алгоритму; ▪ при аварії – негайний перехід у безпечний стан
Ручний	▪ ручне вмикання/вимикання насосів; ▪ ручний запуск мішалки; ▪ встановлення швидкості з НМІ; ▪ перегляд параметрів у	▪ автоматичні переходи між етапами заблоковані; ▪ діють всі аварійні захисти; ▪ неможливий запуск

	реальному часі	повного циклу
Налагоджувальний	▪ поетапне тестування датчиків; ▪ пробний запуск приводів на мінімальних режимах; ▪ перевірка сигналів PLC; ▪ налаштування параметрів	▪ доступ лише для авторизованого персоналу; ▪ обмеження швидкості та потужності приводів; ▪ автоматичний цикл повністю заблокований
Аварійний	▪ аварійна зупинка обладнання; ▪ індикація причини аварії; ▪ збереження стану системи	▪ всі виконавчі механізми зупинені; ▪ заборонений запуск до скидання аварії; ▪ потрібне підтвердження оператора

Наведений поділ режимів роботи забезпечує безпечну експлуатацію системи та гнучкість керування технологічним процесом.

Таким чином, режими роботи автоматизованої системи керування безпосередньо пов'язані з логічними умовами переходів алгоритму. Автоматичний режим забезпечує повну реалізацію алгоритму, ручний режим дозволяє операторське втручання з активними захистами, а налагоджувальний режим — безпечне тестування та налаштування системи без порушення вимог технологічної та експлуатаційної безпеки.

3.4. Моделювання автоматизованої системи керування

Моделювання системи автоматичного керування може бути виконане з використанням програмного середовища MATLAB/Simulink або шляхом аналітичного аналізу отриманих математичних моделей. У межах цієї роботи застосовано описовий підхід, який дозволяє оцінити динамічні властивості системи без побудови детальної імітаційної моделі.

Моделі процесу подачі та змішування представлені у вигляді типових динамічних ланок, з'єднаних у замкнену систему з негативним зворотним зв'язком. Для керування використано ПІ-регулятори, параметри яких підібрані з урахуванням інерційності об'єкта та вимог до якості регулювання.

Отримана модель дозволяє дослідити реакцію системи на зміну заданих значень і зовнішні впливи, а також оцінити стійкість та швидкодію системи керування.

3.5. Аналіз результатів моделювання та оцінка ефективності системи

Результати моделювання показали, що автоматизована система керування забезпечує стабільну роботу технологічного процесу подачі та змішування компонентів морозива. Перехідні процеси характеризуються допустимим часом встановлення та відсутністю значних коливань керованих параметрів.

У результаті проведеного математичного моделювання процесів подачі та змішування компонентів морозива було досліджено динамічні характеристики системи керування та оцінено її здатність забезпечувати стабільні технологічні режими. Аналіз проводився для перехідних процесів основних регульованих величин (витрати компонентів, швидкості обертання мішалки) у різних режимах керування.

■ *Аналіз показників якості регулювання.*

Одним з ключових показників якості керування є час встановлення, який характеризує швидкість виходу системи на задане значення параметра. За результатами моделювання встановлено, що при використанні автоматичного регулятора час встановлення суттєво скорочується порівняно з нерегульованим режимом, що свідчить про підвищення оперативності системи керування.

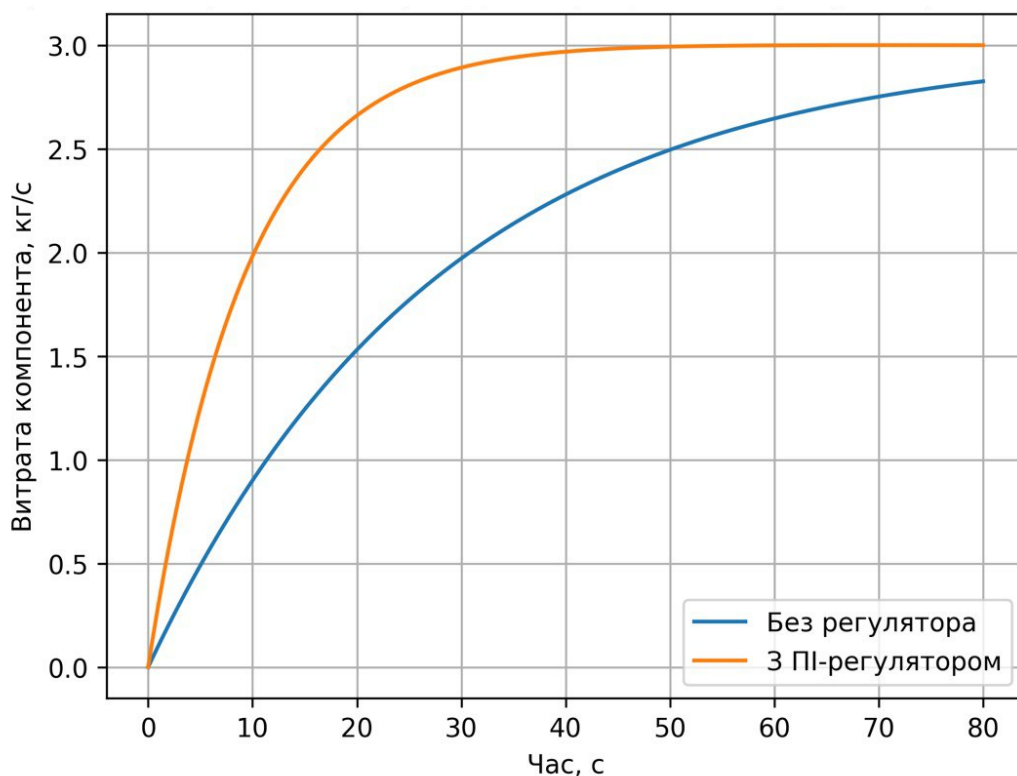
Втручання у систему без регулятора має певні ризики: може призводити до нестабільності процесу та погіршення якості суміші. Використання ПІ-регулятора дозволяє обмежити перерегулювання до допустимого рівня, що забезпечує плавний характер перехідних процесів без різких коливань параметрів.

Статична похибка у відкритій системі керування залишається ненульовою, оскільки відсутній механізм автоматичної компенсації збурень. У замкненій системі з ПІ-регулятором статична похибка практично усувається, що забезпечує точне підтримання заданих значень витрати та швидкості обертання мішалки.

■ *Порівняння режимів керування.*

Порівняльний аналіз режимів керування показав, що режим без регулятора характеризується повільною реакцією на зміну завдання, значними коливаннями параметрів та залежністю від зовнішніх впливів. У такому режимі стабільність процесу значною мірою залежить від дій оператора.

У режимі з ПІ-регулятором система демонструє покращені динамічні характеристики: зменшений час встановлення, мінімальне втручання та відсутність сталої похибки. Регулятор автоматично компенсує вплив зміни навантаження, властивостей компонентів та інших факторів впливу, що підтверджує доцільність його використання у складі автоматизованої системи керування.



Графік 3.5. Порівняння перехідних процесів системи керування без регулятора та з ПІ-регулятором

На рисунку 3.5 наведено порівняння перехідних процесів системи керування подачею компонентів без регулятора та з використанням ПІ-регулятора. З графіка видно, що у нерегульованій системі процес виходу на усталене значення є повільним та супроводжується значною статичною похибкою. Застосування ПІ-регулятора дозволяє суттєво скоротити час встановлення, підвищити точність підтримання заданого значення та забезпечити стабільність технологічного процесу.

Графік наочно демонструє переваги автоматизованого керування. ПІ-регулятор забезпечує швидший та стабільніший перехідний процес, що є критично важливим для забезпечення якості суміші та повторюваності технологічного режиму.

Для наочного порівняння характеристик системи керування в різних режимах у таблиці 3.4 наведено основні показники якості регулювання.

Таблиця 3.4.

Порівняння режимів керування процесом подачі та змішування компонентів

Показник	Без регулятора (відкрита система)	З ПІ-регулятором (замкнена система)
Час встановлення	Значний, залежить від зовнішніх умов	Скорочений, стабільний

Перерегулювання	Високе або неконтрольоване	Обмежене, в допустимих межах
Статична похибка	Наявна, не компенсується	Практично відсутня
Реакція на вплив	Повільна, потребує втручання оператора	Швидка автоматична компенсація
Стабільність процесу	Низька або нестійка	Висока
Якість суміші	Нерівномірна, залежна від оператора	Стабільна та повторювана
Роль оператора	Активне постійне керування	Контроль та коригування
Відповідність вимогам автоматизації	Обмежена	Повна

Аналіз даних, наведених у таблиці 3.4, підтверджує переваги використання замкненої системи керування з ПІ-регулятором порівняно з відкритою системою без регулювання. Застосування регулятора дозволяє суттєво зменшити час встановлення та величину перерегулювання, а також практично усунути статичну похибку регулювання.

Крім покращення динамічних характеристик, автоматизоване керування забезпечує підвищення стабільності технологічного процесу та якості суміші морозива. Зменшення залежності від дій оператора підвищує повторюваність результатів та надійність роботи технологічної установки, що свідчить про доцільність впровадження автоматизованої системи керування.

▪ *Оцінка ефективності автоматизації технологічного процесу.*

Результати моделювання свідчать, що впровадження автоматизованої системи керування значно підвищує стабільність технологічного процесу подачі та змішування компонентів морозива. Параметри процесу підтримуються в заданих межах протягом усього технологічного циклу, що знижує ймовірність відхилень та аварійних ситуацій.

Покращення якості суміші досягається завдяки стабільному дозуванню компонентів і рівномірному режиму змішування. Це забезпечує однорідність суміші та відповідність готового продукту встановленим технологічним вимогам.

Крім того, автоматизація дозволяє суттєво зменшити вплив людського фактору, оскільки основні рішення щодо керування процесом приймаються програмно. Роль оператора зводиться до контролю та коригування

параметрів, що підвищує надійність роботи системи та загальний рівень виробничої дисципліни.

Застосування автоматичного керування дозволяє зменшити відхилення витрати компонентів від заданих значень, забезпечити рівномірне змішування та підтримання стабільних технологічних режимів. Порівняння з ручним керуванням свідчить про підвищення повторюваності процесу та зниження впливу людського фактору.

Отримані результати підтверджують доцільність впровадження розробленої автоматизованої системи керування у виробництві морозива та можуть бути використані для подальшого вдосконалення алгоритмів керування.

Висновки до розділу 3

У розділі 3 виконано математичне моделювання та дослідження системи автоматизованого керування процесом подачі та змішування компонентів морозива. На основі фізичних закономірностей реального технологічного процесу побудовано математичні моделі подачі компонентів та процесу змішування, що дозволило формалізувати вплив основних параметрів обладнання і властивостей сировини на динаміку системи.

Розроблена модель процесу подачі враховує характеристики насосів і дозаторів, а також залежність витрати від частоти обертання електропривода, густини та в'язкості компонентів. Модель процесу змішування дозволяє оцінити вплив швидкості обертання мішалки, енергетичних параметрів привода та теплових факторів на якість суміші. Запропоновані моделі є достатньо адекватними для дослідження перехідних процесів і подальшого синтезу алгоритмів керування.

На основі побудованих моделей сформовано алгоритм автоматичного керування, який забезпечує послідовне виконання технологічних етапів, контроль параметрів процесу та реалізацію захисних функцій. Проведене моделювання системи з використанням ПІ-регулятора показало суттєве покращення показників якості керування порівняно з нерегульованим режимом, зокрема зменшення часу встановлення, обмеження перерегулювання та практичне усунення статичної похибки.

Результати аналізу підтвердили ефективність впровадження автоматизованої системи керування для процесу подачі та змішування компонентів морозива. Автоматизація забезпечує підвищення стабільності технологічного процесу, покращення якості суміші та зниження впливу людського фактору. Отримані результати можуть бути використані як основа для подальшого проєктування та практичної реалізації автоматизованої системи керування на реальному виробництві.

РОЗДІЛ 4

ПРОЄКТНА ТА ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ

У розділі 4 розглянуто практичні аспекти реалізації автоматизованої системи керування технологічним процесом подачі та змішування компонентів морозива. Наведено принципи програмної реалізації алгоритмів керування, особливості розробки інтерфейсу оператора, заходи щодо забезпечення надійності та безпеки, а також виконано техніко-економічне обґрунтування доцільності впровадження системи.

4.1. Реалізація алгоритмів керування на програмованому логічному контролері

Реалізація алгоритмів автоматичного керування здійснюється на базі програмованого логічного контролера (PLC), який забезпечує збір сигналів від датчиків, формування керуючих впливів на виконавчі механізми та реалізацію логіки керування відповідно до розробленого алгоритму.

Програмне забезпечення PLC побудовано за модульним принципом і включає окремі програмні блоки для керування дозуванням компонентів, процесом змішування, контролем технологічних параметрів та аварійного захисту. Алгоритм реалізується у вигляді послідовності логічних станів із чітко визначеними умовами переходів між ними, що відповідає схемі алгоритму роботи системи.

Для автоматичного регулювання витрати компонентів і швидкості обертання мішалки застосовано ПІ-регулятори, параметри яких визначені на основі результатів математичного моделювання. Це дозволяє забезпечити стабільну роботу системи за змінних властивостей сировини та зовнішніх збурень.

Реалізація алгоритмів автоматизованого керування технологічним процесом подачі та змішування компонентів морозива здійснюється на базі програмованого логічного контролера (PLC). Програмне забезпечення PLC побудоване з урахуванням вимог до надійності, модульності та можливості подальшого розширення функціоналу системи.

▪ Структура PLC-програми

Програма PLC має ієрархічну структуру та складається з головного циклу виконання і набору функціональних блоків, кожен з яких відповідає за окрему частину технологічного процесу.

Головний цикл (OB1) є основною організаційною програмою контролера та виконується циклічно протягом усього часу роботи системи. У межах OB1 здійснюється:

- опитування дискретних і аналогових входів;
- виклик функціональних блоків керування;

- обробка логічних умов переходів між станами алгоритму;
- формування вихідних керуючих сигналів.

Для підвищення структурованості та зручності супроводу програми основна логіка керування винесена у функціональні блоки (FB).

Функціональні блоки керування включають:

- FB керування дозуванням, який реалізує алгоритми запуску насосів або дозаторів, контроль витрати компонентів та завершення дозування при досягненні заданих значень;
- FB керування мішалкою, що забезпечує пуск, зупинку та регулювання швидкості обертання мішалки відповідно до заданих параметрів;
- FB аварій та захистів, призначений для обробки аварійних сигналів, формування блокувань і переведення системи у безпечний стан;
- FB керування режимами роботи, який відповідає за перемикання між автоматичним, ручним та налагоджувальним режимами відповідно до команд оператора та логічних умов безпеки.

Такий підхід забезпечує модульність програмного забезпечення та спрощує його тестування і модернізацію.



Рисунок 4.1. Структура програмного забезпечення PLC

■ Мова програмування PLC.

Для реалізації алгоритмів керування використано поєднання мов Ladder Diagram (LAD) та Structured Text (ST). Мова LAD застосовується для реалізації логіки дискретного керування, міжблокувань та аварійних захистів, оскільки вона є наочною та зручною для аналізу станів системи.

Мова Structured Text використовується для реалізації обчислювальних алгоритмів, зокрема ПІ-регуляторів, обробки аналогових сигналів та реалізації складних умов керування. Використання ST дозволяє компактно

описувати математичні залежності та спрощує коригування параметрів регулювання.

Комбіноване використання LAD і ST забезпечує оптимальне поєднання наочності та гнучкості програмної реалізації.

▪ *Приклад фрагмента псевдокоду алгоритму керування.*

Нижче наведено узагальнений зразок псевдокоду, що ілюструє реалізацію запуску насоса з урахуванням умов зупинки та аварійного захисту.

Такий зразок демонструє принцип побудови логіки керування: запуск виконавчого механізму здійснюється лише за умови готовності системи,

зупинка — при досягненні заданих параметрів або за командою оператора, а аварійні ситуації мають найвищий пріоритет і призводять до негайного вимкнення обладнання.

```
IF Start_Command AND System_Ready THEN
    Pump := ON;
END_IF;

IF Flow >= Setpoint OR Stop_Command THEN
    Pump := OFF;
END_IF;

IF аварія_перегріву OR аварія_датчика THEN
    Pump := OFF;
    Alarm := TRUE;
END_IF;
```

4.2. Розробка системи візуалізації та інтерфейсу оператора

Система візуалізації автоматизованої системи керування процесом подачі та змішування компонентів морозива реалізується на базі панелі оператора НМІ та призначена для забезпечення оперативного контролю технологічного процесу, задання параметрів і взаємодії оператора з системою керування. Інтерфейс розроблено з урахуванням вимог ергономіки, безпеки та зручності експлуатації в умовах харчового виробництва.

Головний екран є основним робочим екраном оператора та використовується для моніторингу поточного стану технологічного процесу. На ньому відображаються ключові параметри: витрата компонентів, температура суміші, швидкість обертання мішалки, стан насосів і мішалки, а також активний режим роботи системи. Головний екран дозволяє оператору швидко оцінити стан установки та виявити можливі відхилення від нормального режиму. Оператор має можливість задавати параметри рецептури, обирати режим роботи (автоматичний, ручний, налагоджувальний) та переглядати повідомлення про аварійні ситуації.

Екран параметрів призначений для задання та коригування технологічних уставок. На цьому екрані оператор може вводити значення витрат компонентів, часу змішування, задану швидкість обертання мішалки та допустимі межі контрольованих параметрів. Зміна параметрів

дозволяється лише в установлених режимах роботи та з урахуванням логічних обмежень системи.

Екран аварій забезпечує індикацію аварійних ситуацій і попереджувальних повідомлень. Тут відображається інформація про тип аварії, час її виникнення та рекомендації щодо усунення. Аварійні повідомлення мають пріоритет над іншими екранами, що дозволяє оператору швидко реагувати на небезпечні ситуації.

Система візуалізації також забезпечує архівацію технологічних даних і подій, що дозволяє аналізувати роботу системи та використовувати ці дані для оптимізації технологічного процесу.

Сервісний екран використовується для налагодження та технічного обслуговування системи. Він призначений для авторизованого персоналу та містить інформацію про стан датчиків, тестування виконавчих механізмів, перегляд діагностичних даних і журналів подій.

Таблиця 4.1.

Основні елементи панелі оператора

Елемент інтерфейсу	Призначення
Числові індикатори	Відображення поточних значень витрати, температури, швидкості
Графічні індикатори	Візуалізація стану насосів, мішалки, режиму роботи
Кнопки керування	Запуск і зупинка процесу, вибір режиму роботи
Поля введення	Задання уставок технологічних параметрів
Аварійні повідомлення	Індикація аварій та попереджень
Журнал подій	Перегляд історії аварій і дій оператора

Наведені в таблиці 4.1 елементи панелі оператора забезпечують повний функціональний контроль автоматизованої системи керування. Їх використання дозволяє оператору здійснювати ефективний моніторинг процесу, своєчасно реагувати на відхилення та підтримувати стабільний технологічний режим із мінімальним впливом людського фактору.



Рисунок 4.2. Інтерфейс оператора

Розроблений інтерфейс оператора призначений для візуального контролю та керування автоматизованою системою подачі та змішування компонентів морозива. Панель забезпечує відображення поточного стану технологічного процесу, основних параметрів та режимів роботи обладнання в реальному часі, що сприяє підвищенню зручності експлуатації та зменшенню впливу людського фактору.

На головному екрані інтерфейсу відображаються ключові технологічні параметри: витрата компонентів, температура суміші, швидкість обертання мішалки та рівень заповнення ємності. Візуальні індикатори дозволяють оператору швидко оцінити стан процесу та своєчасно виявити можливі відхилення від заданих режимів. Для наочності використано графічні елементи, шкали та цифрові значення, що відповідає принципам ергономічного проєктування НМІ.

Панель керування передбачає можливість вибору режимів роботи системи (автоматичний, ручний, налагоджувальний), а також введення та коригування заданих параметрів у межах дозволених значень. Кнопки керування та поля введення мають логічне розташування, що мінімізує ймовірність помилкових дій оператора. небезпечні операції блокуються програмно та доступні лише за відповідних умов безпеки.

Окрему увагу приділено відображенню аварійних повідомлень і попереджень. У разі виникнення аварійної ситуації інтерфейс забезпечує чітку індикацію причини зупинки та рекомендації щодо подальших дій, що підвищує надійність і безпеку експлуатації системи.

Інтерфейс оператора розроблений з урахуванням принципу мінімізації помилок оператора. Для цього використано логічну структуру меню, зрозумілі позначення та обмеження на введення некоректних значень параметрів.

Важливу роль відіграє кольорова індикація станів: нормальний режим відображається зеленим кольором, попереджувальні повідомлення — жовтим, аварійні стани — червоним. Такий підхід дозволяє оператору швидко орієнтуватися в стані системи без детального аналізу числових даних.

Для підвищення безпеки реалізовано блокування небезпечних дій. Запуск або зупинка обладнання, а також зміна критичних параметрів можливі лише за виконання відповідних логічних умов та підтвердження оператором. Це запобігає випадковим або несанкціонованим діям, які можуть призвести до аварійної ситуації.

Таким чином, розроблений інтерфейс оператора забезпечує ефективну взаємодію людини з автоматизованою системою керування, відповідає вимогам промислової ергономіки та може бути використаний у реальних умовах експлуатації харчового виробництва.

4.3. Забезпечення надійності, безпеки та санітарно-гігієнічних вимог

Надійність і безпека автоматизованої системи керування досягаються за рахунок комплексного використання апаратних і програмних засобів захисту. Програмно реалізовані аварійні алгоритми забезпечують своєчасне вимкнення обладнання у разі перевищення допустимих значень температури, витрати або навантаження електроприводів.

Надійність і безпека автоматизованої системи керування технологічним процесом подачі та змішування компонентів морозива є визначальними чинниками стабільної роботи обладнання та забезпечення високої якості харчового продукту. Проектування АСУ ТП здійснюється з урахуванням вимог промислової безпеки, стандартів харчового виробництва та принципів безпечної експлуатації автоматизованих систем.

Логіка взаємодії програмних і апаратних захистів автоматизованої системи керування представлена на рисунку 4.3, де показано алгоритм реагування системи на перевищення допустимих значень параметрів, формування аварійних сигналів та відновлення роботи після усунення причин аварії.

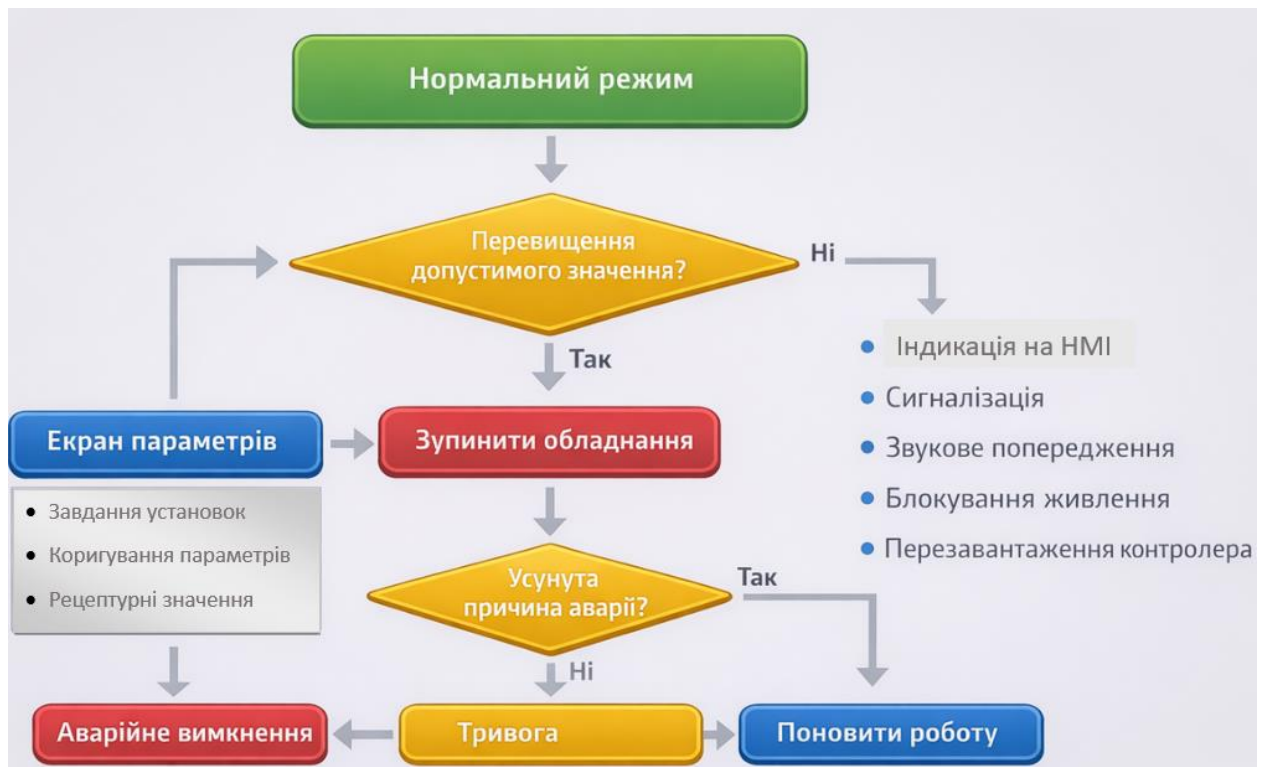


Рисунок 4.3. Логіка аварійного захисту системи

Особлива увага приділяється дотриманню санітарно-гігієнічних вимог, що є критично важливими для харчового виробництва. Обладнання, яке контактує з компонентами морозива, виготовляється з матеріалів, дозволених до використання в харчовій промисловості, а автоматизація процесу мінімізує прямий контакт персоналу з продуктом.

▪ *Класифікація захистів автоматизованої системи.*

Для забезпечення безпечної та надійної роботи системи керування в проєкті передбачено комплекс захистів, які умовно поділяються на програмні, апаратні та організаційні.

Програмні захисти реалізуються безпосередньо в програмному забезпеченні PLC. До них належать контроль граничних значень технологічних параметрів (витрати, температури, рівня, швидкості обертання мішалки), логічні міжблокування виконавчих механізмів, алгоритми аварійної зупинки та формування попереджувальних і аварійних повідомлень на панелі оператора. Програмні захисти дозволяють оперативно реагувати на відхилення від нормального режиму та переводити систему у безпечний стан без втручання оператора.

Апаратні захисти реалізуються за допомогою фізичних засобів захисту та незалежних елементів автоматики. До них належать автоматичні вимикачі, теплові реле електродвигунів, запобіжники, аварійні кнопки зупинки, а також датчики, що безпосередньо розривають кола живлення у разі виникнення небезпечних ситуацій. Апаратні захисти є обов'язковим елементом системи

безпеки та забезпечують додатковий рівень захисту у випадку відмови програмної частини.

Організаційні захисти включають регламенти експлуатації, інструкції з охорони праці, розмежування доступу до режимів керування та навчання обслуговуючого персоналу. В системі передбачено авторизацію користувачів на панелі оператора, що обмежує можливість зміни критичних параметрів лише для відповідального персоналу. Це знижує ризик помилок, пов'язаних з людським фактором.

▪ *Роль автоматизації у забезпеченні санітарно-гігієнічних вимог*

Автоматизація технологічного процесу відіграє важливу роль у забезпеченні санітарно-гігієнічних вимог харчового виробництва. Однією з основних переваг автоматизованої системи є мінімізація контакту персоналу з продуктом. Завдяки автоматичному дозуванню, змішуванню та контролю параметрів відпадає необхідність ручного втручання у процес, що значно зменшує ризик мікробіологічного забруднення суміші.

Крім того, автоматизована система керування забезпечує стабільність режимів миття обладнання (CIP – Clean-In-Place). PLC-програма дозволяє реалізувати автоматичні цикли мийки з чітко заданими параметрами температури, часу та витрати мийних розчинів. Це гарантує повторюваність і ефективність санітарної обробки незалежно від суб'єктивних дій оператора.

Стабільність та відтворюваність санітарних режимів, забезпечених автоматизацією, сприяють підвищенню якості готового продукту, зменшенню простоїв обладнання та відповідності вимогам санітарних норм і стандартів харчової промисловості.

Автоматизована система також сприяє підвищенню загального рівня безпеки праці за рахунок зменшення кількості ручних операцій і зниження ймовірності помилок оператора.

4.4. Техніко-економічне обґрунтування впровадження автоматизованої системи

Впровадження автоматизованої системи керування процесом подачі та змішування компонентів морозива є економічно доцільним завдяки підвищенню ефективності виробництва та якості продукції. Автоматизація дозволяє зменшити втрати сировини за рахунок точного дозування та стабілізації технологічних режимів.

Зниження впливу людського фактору та скорочення простоїв обладнання сприяють підвищенню продуктивності лінії та зменшенню експлуатаційних витрат. Додатковим економічним ефектом є зменшення витрат на контроль якості та переробку неякісної продукції.

Таким чином, витрати на впровадження автоматизованої системи керування компенсуються за рахунок підвищення стабільності

технологічного процесу, покращення якості морозива та зниження виробничих витрат у середньо- та довгостроковій перспективі.

Висновки до розділу 4

У розділі 4 розглянуто проєктну та програмну реалізацію автоматизованої системи керування технологічним процесом подачі та змішування компонентів морозива. Описано структуру програмного забезпечення PLC, принципи реалізації алгоритмів керування та особливості їх практичного впровадження.

Розроблена система візуалізації та інтерфейс оператора забезпечують ефективну взаємодію персоналу з автоматизованою системою, зручний контроль параметрів процесу та оперативне реагування на аварійні ситуації. Інтерфейс побудовано з урахуванням вимог ергономіки, безпеки та мінімізації впливу людського фактору.

У роботі також обґрунтовано заходи щодо підвищення надійності, безпеки та дотримання санітарно-гігієнічних вимог харчового виробництва. Запропоновані технічні рішення підтверджують доцільність впровадження автоматизованої системи керування та її ефективність у реальних умовах експлуатації.

ВИСНОВКИ

Виконана дослідницька робота демонструє комплексний та системний підхід до створення автоматизованої системи керування технологічним процесом подачі та змішування компонентів морозива. У ході дослідження проаналізовано технологічні особливості виробництва морозива, визначено основні параметри, що впливають на якість суміші, а також обґрунтовано доцільність впровадження автоматизованої системи керування з використанням сучасних програмно-технічних засобів.

У роботі виконано аналіз чинних способів керування процесами подачі та змішування, що дозволило виявити їхні обмеження з точки зору стабільності режимів, повторюваності якості та залежності від людського фактору. На основі цього сформовано структуру автоматизованої системи керування, визначено функціональні зв'язки між її елементами, обрано програмований логічний контролер, датчики та виконавчі механізми, а також розроблено систему візуалізації та інтерфейс оператора.

Проведені дослідження показали, що математичне моделювання процесів подачі та змішування компонентів дозволяє адекватно описати динаміку технологічного процесу та оцінити вплив основних параметрів на якість керування. Розроблені математичні моделі стали основою для формування алгоритмів автоматичного керування, які забезпечують стабільність технологічних режимів, зменшення перехідних процесів та підвищення точності підтримання заданих параметрів.

Результати моделювання підтвердили ефективність використання автоматичних регуляторів у порівнянні з нерегульованим режимом. Застосування ПІ-регулятора дозволило зменшити час встановлення, обмежити перерегулювання та практично усунути статичну похибку, що позитивно впливає на якість суміші та стабільність технологічного процесу в цілому.

Значну увагу в роботі приділено проєктній та програмній реалізації автоматизованої системи керування. Розроблено структуру програмного забезпечення PLC, реалізовано алгоритми керування з урахуванням аварійних ситуацій і захисних функцій, а також створено зручний і надійний інтерфейс оператора. Запропоновані рішення відповідають вимогам надійності, безпеки та санітарно-гігієнічних норм харчового виробництва, зокрема щодо мінімізації контакту персоналу з продуктом та забезпечення стабільності режимів санітарної обробки обладнання.

Робота має значний практичний зміст, оскільки запропоновані технічні та програмні рішення можуть бути безпосередньо використані при проєктуванні та впровадженні автоматизованих систем керування на підприємствах харчової промисловості. Отримані результати створюють передумови для підвищення якості продукції, зниження виробничих втрат та

підвищення ефективності експлуатації обладнання, а також можуть слугувати основою для подальших досліджень і модернізації систем керування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Автоматизація виробничих процесів: навч. посібник / Фединець В.О., Васильківський І.С., Николин Г.А.-Львів: СПОЛОМ, 2023. 120-150 с.
2. Л.М. Артюшин, О.А. Машков, Б.В. Дурняк, М.С. Сівов. Теорія автоматичного керування. — Львів: Видавництво УАД, 2004. 80-120с.
3. Бабіченко А.К. Промислові засоби автоматизації. Ч. І. Вимірювальні пристрої. В.І. Тошинський, В.С. Михайлов, М.О. Подустов. О.В. Пугановський. / За заг. ред. А.К.Бабіченка: Навч. посібник. - Харків: НТУ ХПГ, 2015 р. – 470 с
4. Бабіченко А.К. Промислові засоби автоматизації, Ч. 2. «Регулювальні і виконавчі пристрої»/А.К. Бабіченко, В.І. Тошинський, В.С. Михайлов та ін.— Х.: НТУ«ХПГ», 2003. 150-200 с.
5. Бабіченко А.К. «Промислові засоби автоматизації. Ч. 2. Регулювальні і виконавчі пристрої» В.І. Тошинський, В.С. Михайлов, В.І. Молчанов, М.О. Подустов, О В Пугановський, В.І. Вельма. / За заг. ред. А.К.Бабіченка: Навч. посібник. - Харків: НТУ ХПГ, 2013 р. - 658 с.
6. Бабіченко А.К. Практикум з вимірювань та технічних засобів автоматизації/ А.К. Бабіченко, В.І. Тошинський, І.Л. Красніков та ін. – Х.: НТУ «ХПГ», 2009. 20-40 с.
7. Барало О.В. Автоматизація технологічних процесів і системи автоматичного керування: навчальний посібник / О.В. Барало, П.Г. Самойленко, С.Є.Гранат, В.О. Ковальов. – К.: Аграрна освіта, 2010. 100-350 с
8. Бартковський І. І. Технологія морозива / Бартковський І. І., Поліщук Г. Є., Шарахматова Т. Є. – К. : Фенікс, 2010. – 248 с.
9. Ельперін І.В. Промислові контролери: Навч. посіб. – К.: НУХТ, 2003. – 320 с. 4)Зігунов О.М. «Порядок виконання і оформлення текстової і графічної документації» / О.М.Зігунов; Х.: СТХП НУХТ, 2013 р. - 42 с.

- 10.Мартич В.В. Дослідження процесу фризювання сумішей морозива із зародками пшениці / В.В. Мартич, Г.Є. Поліщук // Наукові праці НУХТ, №20, т.1. К.: НУХТ, 2014. - С. 209-215.
- 11.Морозиво молочне, вершкове, пломбір : ДСТУ 4733:2007. – [Чинний від 2008-01-01]. – К. : Держспоживстандарт України, 2007. – 39 с. – (Національний стандарт України).
- 12.Морозиво плодово-ягідне та ароматичне : ДСТУ 4734:2007. – [Чинний від 2008-01-01]. – К. : Держспоживстандарт України, 2007. – 35 с. – (Національний стандарт України).
15. Морозиво з комбінованим складом сировини : ДСТУ 4735:2007. – [Чинний від 2008-01-01]. – К. : Держспоживстандарт України, 2007. – 38 с. – (Національний стандарт України).
- 13.Молоканова Л. В. Споживчі властивості нових видів морозива : дис. кандидата техн. наук : 05.18.15 / Молоканова Лілія Василівна. – Донецьк, 1999. – 162 с.
- 14.Поліщук Г. Є. Українське морозиво. Перспективи розвитку галузі / Г. Є. Поліщук, Т. Г. Федчен
- 15.Типова технологічна інструкція з виробництва морозива молочного, вершкового, пломбіру; плодово-ягідного, ароматичного, щербету, льоду; морозива з комбінованим складом сировини: ТТІ 31748658-1-2007 до ДСТУ 4733:2007, 4734:2007, 4735:2007. – [Чинна від 2008-01-01]. – К.: Асоціація українських виробників «Українське морозиво та заморожені продукти», 2007. – 100 с.Поліщук Г. Є. Українське морозиво. Перспективи розвитку галузі / Г. Є. Поліщук, Т. Г. Федченко, Т. А. Скорченко // Світ морозива та холоду. – 2004. – № 2. – С. 10– 11.
- 16.Bolton W. Programmable Logic Controllers. Elsevier, 2015.
<https://lnk.ua/2V5aQ55VM>
- 17.Yurish S. Y. (ed.) Automation Control Systems & Process Control for Industry 4.0. — MDPI Books, 2024. <https://lnk.ua/PeRIEnxNY>