

ХЕРСОНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

(повне найменування вищого навчального закладу)

ФАКУЛЬТЕТ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ТРАНСПОРТУ

(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

АВТОМАТИЗАЦІЇ, РОБОТОТЕХНІКИ І МЕХАТРОНИКИ

(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи бакалавра

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

БАКАЛАВР

на тему «Автоматизована система управління процесом темперування
шоколадної маси»

«Automated control system for the chocolate mass tempering process»

Виконав: студент 2 курсу, групи 2А(с)

174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані

технології та робототехніка

(шифр і назва галузі знань, спеціальності)

Реуцький Д.В

(прізвище та ініціали)

Керівник Сарафаннікова Н.В.

(прізвище та ініціали)

Рецензент Корніловська Н.В

(прізвище та ініціали)

	Херсонський національний технічний університет
Факультет	Інженерії та транспорту
Кафедра	Автоматизації, робототехніки і мехатроніки
Ступінь вищої освіти	бакалавр
Спеціальність	174– «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

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

«__» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студенту

Реуцькому Денису Васильовичу

1. Тема проекту:

«Автоматизована система управління процесом темперування шоколадної маси»

«Automated control system for the chocolate mass tempering process»

керівник проекту: к.т.н., доцент Сарафаннікова Н.В.

затверджена наказом вищого навчального закладу від 23.01.2026 р. № 97-с

2. Строк подання студентом проекту «15» червня 2026 р.

3. Вихідні дані до проекту:

Температура нагрівання

шоколадної маси – 45...50 °С.

Температура охолодження шоколадної маси – 27...28 °С.

Температура кінцевого темперування – 30...32 °С

Об'єм темперуючої ємності – 500л

Продуктивність лінії – 1000кг/год.

Похибка вимірювання температури – не більше $\pm 0,5$ °С.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки: Аналіз технологічного процесу виробництва шоколаду та процесу темперування шоколадної маси.

Дослідження об'єкта автоматизації та основних технологічних параметрів процесу.

Аналіз існуючих систем автоматизації процесів темперування.

Розробка структурної та функціональної схем автоматизованої системи управління.

Вибір технічних засобів автоматизації (датчиків температури, виконавчих механізмів, програмованого логічного контролера).

Розробка алгоритму роботи системи автоматичного керування.

Розробка системи регулювання температури на основі PID-регулятора.

Оцінка ефективності модернізації автоматизованої системи управління.

Розробка заходів з охорони праці та безпеки виробництва.

5. Перелік графічного матеріалу: Технологічна схема процесу темперування шоколадної маси. Структурна схема автоматизованої системи управління процесом темперування шоколадної маси.

Функціональна схема автоматизації процесу темперування шоколадної маси.

Схема розміщення датчиків та виконавчих механізмів на технологічному обладнанні.

Схема підключення датчиків температури до програмованого логічного контролера.

Принципова електрична схема автоматизованої системи управління.

Алгоритм роботи системи автоматичного керування процесом темперування.

Мнемосхема технологічного процесу в SCADA-системі.

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Аналіз технологічного процесу темперування шоколадної маси	Сарафаннікова Н.В, к.т.н., доцент		
Дослідження об'єкта автоматизації та технологічних параметрів	Сарафаннікова Н.В, к.т.н., доцент		
Розробка автоматизованої системи управління та вибір технічних засобів	Сарафаннікова Н.В, к.т.н., доцент		
Розробка функціональної та принципової схем автоматизації	Сарафаннікова Н.В, к.т.н., доцент		

7. Дата видачі завдання

«04» вересня 2025р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту	Строк виконання етапів проекту	Примітка
1	Аналіз літературних джерел та технологічного процесу темперування шоколадної маси	10.02.2026	
2	Дослідження об'єкта автоматизації та визначення параметрів керування	10.03.2026	
3	Розробка структурної та функціональної схем автоматизованої системи управління	10.04.2026	
4	Вибір датчиків, контролера та виконавчих механізмів. Проведення розрахунків	10.05.2026	
5	Розробка алгоритму керування та програмного забезпечення	25.05.2026	
6	Розробка принципової схеми, оформлення пояснювальної записки та графічної частини	13.06.2026	

Студент

Реуцький Д.В

(підпис)

Керівник проекту

Сарафаннікова Н.В

(підпис)

[illegible]

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота бакалавра: 61 сторінок, 8 рисунків, 3 таблиці. Графічна частина – 5 аркушів формату А1.

Кваліфікаційна робота бакалавра присвячена дослідженню та вдосконаленню автоматизованої системи управління процесом темперування шоколадної маси на підприємствах харчової промисловості.

Досліджено технологічний процес виробництва шоколаду та особливості процесу темперування шоколадної маси. Проаналізовано основні параметри процесу темперування, зокрема температурні режими, швидкість перемішування та умови формування стабільної кристалічної структури какао-масла.

Проведено аналіз існуючих методів автоматизації технологічних процесів у харчовій промисловості. Розглянуто застосування сучасних датчиків температури, систем автоматичного регулювання та промислових контролерів для забезпечення стабільності технологічного процесу.

Розроблено структурну та функціональну схеми автоматизованої системи управління процесом темперування шоколадної маси. Запропоновано алгоритм роботи системи автоматичного контролю та регулювання температури, який забезпечує підвищення точності підтримання технологічних параметрів.

Запропоновані технічні рішення дозволяють підвищити стабільність технологічного процесу, покращити якість готової продукції та зменшити вплив людського фактору під час виробництва шоколаду.

АВТОМАТИЗАЦІЯ, ТЕМПЕРУВАННЯ ШОКОЛАДНОЇ МАСИ, СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ, ДАТЧИКИ ТЕМПЕРАТУРИ, ПРОМИСЛОВИЙ КОНТРОЛЕР, ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС

					ХНТУ 174 КРБ 24Ас04	Арк.
						6
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дат		

ЗМІСТ

ВСТУП	9
-------------	---

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА ШОКОЛАДУ 14

1.1 Загальна характеристика виробництва шоколаду	14
1.2 Основні етапи технологічного процесу виробництва шоколаду	16
1.3 Особливості процесу темперування шоколадної маси	17
1.4 Аналіз сучасних методів автоматизації в харчовій промисловості	18
1.5 Висновки до розділу 1	20

РОЗДІЛ 2. ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС ТЕМПЕРУВАННЯ ШОКОЛАДНОЇ МАСИ 22

2.1 Загальна характеристика процесу темперування	22
2.2 Основні стадії темперування шоколадної маси	23
2.3 Обладнання для темперування шоколаду	23
2.4 Основні параметри технологічного процесу	24
2.5 Необхідність автоматизації процесу	25
2.6 Висновки до розділу 2	26

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСОМ ТЕМПЕРУВАННЯ

.....27

3.1 Структурна схема автоматизованої системи управління	27
3.2 Функціональна схема системи автоматизації	29

3.3 Вибір датчиків температури та вимірювального обладнання	31
3.4 Вибір виконавчих механізмів	33
3.5 Вибір програмованого логічного контролера	38
3.6 Алгоритм роботи системи автоматичного керування	36
3.7 Математична модель регулювання температури (PID-регулятор)	39
3.8 Розробка системи візуалізації в SCADA	40
3.9 Висновки до розділу 3	42

РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА НА ВИРОБНИЦТВІ

.....	48
4.1 Аналіз умов праці на підприємствах харчової промисловості	43
4.2 Основні небезпечні та шкідливі виробничі фактори	45
4.3 Заходи забезпечення безпеки праці	47
4.4 Пожежна безпека на підприємстві	49
4.5 Висновки до розділу 4	50

РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ

52	
5.1 Загальна характеристика економічної ефективності автоматизації	51
5.2 Розрахунок витрат на впровадження системи	52
5.3 Розрахунок економії від впровадження	53
5.4 Розрахунок терміну окупності	54
5.5 Економічний ефект від впровадження	55

5.6 Висновки до розділу 5	56
ВИСНОВКИ	57
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	60

					ХНТУ 174 КРБ 24Ac04	Арк.
						9
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дат		

ВСТУП

Сучасний розвиток харчової промисловості характеризується активним впровадженням автоматизованих систем управління технологічними процесами. Автоматизація виробництва дозволяє підвищити ефективність роботи підприємств, покращити якість продукції, зменшити вплив людського фактору та забезпечити стабільність технологічних параметрів. Особливо важливе значення автоматизація має у виробництві кондитерських виробів, де точне дотримання технологічних режимів безпосередньо впливає на якість готової продукції.

Одним із ключових етапів виробництва шоколаду є процес темперування шоколадної маси. Темперування являє собою процес контрольованого нагрівання та охолодження шоколаду з метою формування стабільної кристалічної структури какао-масла. Правильне проведення цього процесу забезпечує блиск поверхні шоколаду, однорідну структуру, приємний хрускіт та стабільність продукту під час зберігання. Порушення температурного режиму може призвести до погіршення зовнішнього вигляду виробу, утворення жирового нальоту та зниження якості продукції.

На сучасних кондитерських підприємствах, зокрема на підприємствах корпорації Roshen, широко застосовуються автоматизовані виробничі лінії, які забезпечують високий рівень механізації та автоматизації технологічних процесів. Однак розвиток промислової автоматизації, поява сучасних програмованих логічних контролерів, нових датчиків та методів регулювання відкривають можливості для модернізації існуючих систем управління з метою підвищення їх ефективності та точності.

Особливу роль у системах автоматизації температурних процесів відіграє використання сучасних алгоритмів регулювання, зокрема PID-регулювання, яке дозволяє забезпечити стабільність температури та зменшити коливання технологічних параметрів. Використання програмованих логічних контролерів

та сучасних засобів вимірювання сприяє підвищенню надійності та точності роботи систем управління.

Актуальність даної роботи полягає у необхідності вдосконалення автоматизованих систем управління технологічними процесами у харчовій промисловості, зокрема у процесі темперування шоколадної маси.

Метою дипломної роботи є модернізація автоматизованої системи управління процесом темперування шоколадної маси з використанням сучасних засобів автоматизації та алгоритмів регулювання температури.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати технологічний процес виробництва шоколаду;
- дослідити процес темперування шоколадної маси;
- виконати аналіз існуючих систем автоматизації температурних процесів;
- розробити структурну схему автоматизованої системи управління;
- обґрунтувати вибір сучасного програмованого логічного контролера;
- запропонувати модернізацію системи управління з використанням PID-регулювання температури.

Об'єктом дослідження є технологічний процес темперування шоколадної маси.

Предметом дослідження є автоматизована система управління температурним режимом у процесі темперування шоколаду.

Практичне значення роботи полягає у розробці пропозицій щодо модернізації системи автоматичного регулювання температури, що дозволить підвищити стабільність технологічного процесу та покращити якість готової продукції.

Сучасний розвиток харчової промисловості характеризується стрімким впровадженням автоматизованих систем управління технологічними процесами. Автоматизація дозволяє суттєво підвищити продуктивність,

стабільність якості продукції, знизити енергоспоживання та мінімізувати вплив людського фактора. Особливо актуальним це є для кондитерської галузі, де якість кінцевого продукту безпосередньо залежить від точності дотримання технологічних параметрів.

Одним із найбільш критичних етапів виробництва шоколаду є процес темперування шоколадної маси. Темперування являє собою складний технологічний процес контрольованого нагрівання та охолодження шоколадної маси з метою формування стабільної β -кристалічної структури какао-масла. Правильне темперування забезпечує характерний блиск, приємний хрускіт, однорідну текстуру та тривалий термін зберігання продукції без появи жирового нальоту. Навіть незначні відхилення температури ($\pm 1^\circ\text{C}$) на ключових стадіях можуть призвести до значного погіршення якості готового шоколаду та збільшення відсотка браку.

На сучасних підприємствах, зокрема на фабриках корпорації Roshen, використовуються автоматизовані темперувальні лінії. Однак більшість існуючих систем управління побудовані на застарілих принципах релейно-контакторного керування або простих двопозиційних регуляторах, що не забезпечує необхідної точності підтримання температури в умовах змінних зовнішніх факторів (температура навколишнього середовища, вологість, в'язкість маси тощо).

Актуальність роботи зумовлена необхідністю модернізації систем автоматизованого управління процесом темперування шляхом впровадження сучасних технічних і алгоритмічних рішень, які забезпечать підвищення точності регулювання температури, стабільність технологічного процесу та покращення якості шоколадної продукції.

Метою кваліфікаційної роботи є розробка та обґрунтування модернізованої автоматизованої системи управління процесом темперування шоколадної маси на основі програмованого логічного контролера та PID-регулювання.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

проаналізувати технологічний процес виробництва шоколаду та особливості темперування шоколадної маси;

дослідити існуючі системи автоматизації темперувального обладнання та виявити їх недоліки;

розробити структурну та функціональну схеми модернізованої системи автоматизованого управління;

обґрунтувати вибір елементної бази (датчики Pt100, PLC Siemens SIMATIC S7-1200, виконавчі механізми);

розробити алгоритм роботи системи з використанням PID-регулятора;

розробити систему візуалізації технологічного процесу на базі SCADA;

оцінити технічну та економічну ефективність запропонованих рішень;

розробити заходи з охорони праці та безпеки виробництва.

Об'єктом дослідження є технологічний процес темперування шоколадної маси в ємності об'ємом 500 л.

Предметом дослідження є автоматизована система управління температурними режимами процесу темперування.

Методи дослідження: аналіз науково-технічної літератури, технологічних регламентів і діючих систем автоматизації; структурно-функціональне моделювання; теорія автоматичного керування (PID-регулювання); методи технічної та економічної оцінки.

Наукова новизна роботи полягає в розробці модернізованої системи управління процесом темперування, яка поєднує високоточні датчики Pt100, сучасний програмований логічний контролер та алгоритм PID-регулювання з адаптивними коефіцієнтами, що дозволяє підвищити точність підтримання температури до $\pm 0,5$ °C та забезпечити стабільність кристалічної структури какао-масла.

Практичне значення результатів роботи полягає в можливості впровадження розроблених технічних рішень на підприємствах кондитерської промисловості для підвищення якості продукції, зниження браку та скорочення енергоспоживання.

					ХНТУ 174 КРБ 24Ас04	Арк.
						14
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дат		

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА ШОКОЛАДУ

1.1 Загальна характеристика виробництва шоколаду

Виробництво шоколаду є складним технологічним процесом, що включає ряд послідовних операцій з обробки какао-бобів, підготовки сировини, змішування компонентів та формування готових виробів. Основними складовими шоколадної продукції є какао терте, какао-масло, цукор та інші інгредієнти, які визначають смакові та фізико-хімічні властивості продукту.

Сучасні підприємства кондитерської промисловості використовують високий рівень механізації та автоматизації виробничих процесів. Це дозволяє забезпечити стабільність технологічних параметрів, підвищити продуктивність виробництва та покращити якість готової продукції. Значну роль у цьому відіграють автоматизовані системи управління технологічними процесами, що здійснюють контроль і регулювання основних параметрів виробництва.

Одним із відомих виробників кондитерської продукції є корпорація Roshen, яка використовує сучасні технологічні лінії та обладнання провідних світових виробників. На підприємствах корпорації застосовуються автоматизовані системи контролю та управління, що забезпечують точне дотримання технологічних режимів виробництва.

Технологічний процес виробництва шоколаду складається з декількох основних етапів, кожен з яких має важливе значення для формування структури, смакових характеристик та зовнішнього вигляду готового продукту.

1.2 Основні етапи виробництва шоколаду

Процес виробництва шоколаду включає ряд послідовних технологічних операцій, що забезпечують перетворення сировини у готовий продукт.

Основними етапами виробництва є:

1. Підготовка

сировини.

На цьому етапі здійснюється очищення какао-бобів від сторонніх домішок, їх сортування та обсмаження. Під час обсмаження формується характерний аромат і смак шоколаду.

2. Подрібнення

какао-бобів.

Після обсмаження какао-боби подрібнюють, внаслідок чого утворюється какао-крупка. Подальше подрібнення приводить до утворення какао-маси.

3. Змішування

інгредієнтів.

На цьому етапі какао-маса змішується з цукром, какао-маслом та іншими компонентами залежно від рецептури. Отримується шоколадна суміш.

4.

Рафінування.

Рафінування передбачає подрібнення частинок шоколадної маси до дуже дрібних розмірів. Це необхідно для отримання однорідної структури продукту.

5.

Конширування.

Це тривалий процес перемішування та нагрівання шоколадної маси, під час якого формується остаточний смак і аромат продукту.

6.

Темперування.

Темперування є одним з найважливіших етапів виробництва шоколаду. Воно

полягає у контрольованому нагріванні та охолодженні шоколадної маси для формування правильної кристалічної структури какао-масла.

7. Формування та охолодження виробів.

Після темперування шоколадну масу заливають у форми, де вона охолоджується та твердне.

8. Пакування готової продукції.

На завершальному етапі шоколадні вироби пакуються та готуються до транспортування і реалізації.

Кожен із зазначених етапів може бути автоматизований з використанням сучасних засобів промислової автоматизації.

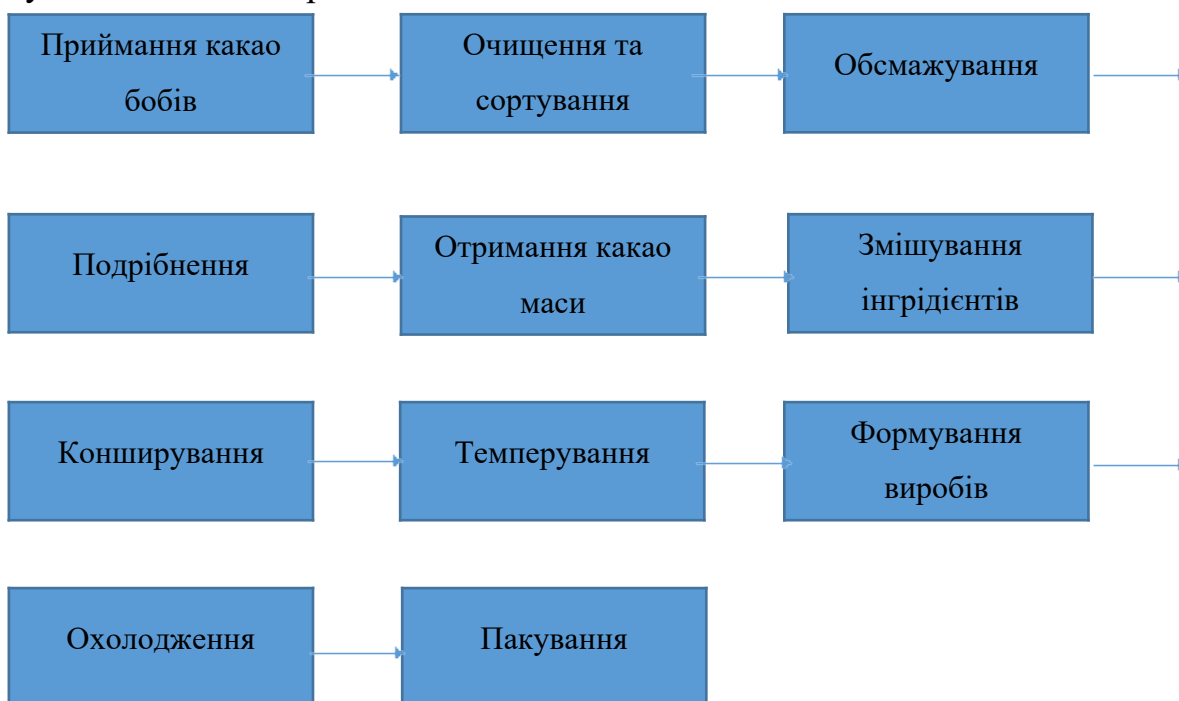


Рис.1 Процес виробництва шоколаду

Темперування є одним із ключових технологічних процесів у виробництві шоколаду. Його основною метою є створення стабільної кристалічної структури какао-масла, що забезпечує якість готової продукції.

Какао-масло має складну структуру та може утворювати декілька різних форм кристалів. Лише одна з них забезпечує оптимальні властивості шоколаду. Для

формування такої структури необхідно точно дотримуватися температурного режиму під час темперування.

Процес темперування складається з декількох послідовних стадій:

1. Нагрівання шоколадної маси до температури приблизно 45–50 °С.
На цьому етапі відбувається повне розплавлення кристалів какао-масла.
2. Охолодження маси до температури 27–28 °С.
У процесі охолодження починається формування стабільних кристалів.
3. Повторне нагрівання до температури 30–32 °С.
Це дозволяє зберегти необхідну кристалічну структуру та забезпечити правильну текучість шоколадної маси.

Порушення температурного режиму темперування може призвести до дефектів готового продукту, таких як поява жирового нальоту на поверхні шоколаду, втрата блиску та крихкість структури.

Саме тому підтримання стабільної температури під час темперування є важливим завданням автоматизованих систем управління технологічними процесами.

Особливу складність процесу темперування становить необхідність забезпечення рівномірного температурного поля по всьому об'єму ємності (у даному випадку 500 л). Локальні перегріви або переохолодження призводять до нерівномірної кристалізації. Також важливим фактором є швидкість перемішування, яка впливає на теплообмін і однорідність маси.

1.4 Вимоги до температурного режиму темперування шоколадної маси

Темперування шоколадної маси є важливим етапом технологічного процесу виробництва шоколаду, оскільки саме під час цього процесу формується стабільна кристалічна структура какао-масла. Правильна кристалізація забезпечує високі споживчі властивості шоколаду, зокрема характерний блиск, однорідну структуру, приємний смак та хрускіт під час розламування виробу.

Однією з основних умов якісного темперування є суворе дотримання температурного режиму. Виробничий процес передбачає послідовну зміну температури шоколадної маси, що дозволяє сформувати необхідну кристалічну структуру какао-масла.

На першому етапі шоколадна маса нагрівається до температури приблизно 45–50 °С. У цей момент відбувається повне розплавлення кристалів какао-масла, що забезпечує рівномірний розподіл компонентів у масі.

На другому етапі здійснюється контрольоване охолодження шоколадної маси до температури 27–28 °С. Під час цього процесу починається утворення стабільних кристалів какао-масла, які визначають структуру майбутнього шоколаду.

Третій етап передбачає повторне нагрівання шоколадної маси до температури 30–32 °С. Цей етап необхідний для руйнування нестабільних кристалів та збереження тільки тих форм кристалізації, які забезпечують оптимальні фізико-хімічні властивості продукту.

Важливою умовою ефективного темперування є точність підтримання температури на кожному етапі процесу. Навіть незначні відхилення

температури можуть призвести до погіршення якості шоколаду. Наприклад, надмірне охолодження може спричинити утворення надлишкової кількості кристалів, що погіршує текучість шоколадної маси. У свою чергу недостатнє охолодження призводить до нестабільності структури продукту.

Також важливим параметром є швидкість зміни температури. Різкі температурні коливання можуть негативно впливати на формування кристалічної структури какао-масла. Саме тому у виробничих умовах застосовуються спеціальні темперуючі машини, які забезпечують плавну зміну температури та рівномірне перемішування шоколадної маси.

Для забезпечення стабільності температурного режиму у сучасних виробничих лініях використовуються автоматизовані системи контролю та регулювання температури, що дозволяють підтримувати необхідні параметри технологічного процесу з високою точністю.

Крім температури важливими контрольованими параметрами є:

- швидкість зміни температури (не більше 1–2 °C/хв);
- швидкість перемішування (30–60 об/хв);
- в'язкість шоколадної маси;
- температура теплоносія в системі нагрівання/охолодження.

1.5 Необхідність автоматизації процесу темперування

У сучасних умовах розвитку харчової промисловості автоматизація технологічних процесів є одним із ключових напрямів підвищення ефективності виробництва. Застосування автоматизованих систем управління дозволяє значно підвищити точність контролю технологічних параметрів, зменшити вплив людського фактору та забезпечити стабільну якість продукції. Процес темперування шоколадної маси характеризується необхідністю точного підтримання температурного режиму, а також контролю швидкості зміни

температури. Виконання цих вимог вручну є складним завданням, оскільки потребує постійного контролю з боку оператора та швидкого реагування на зміни параметрів процесу.

Використання автоматизованих систем управління дозволяє здійснювати безперервний контроль температури шоколадної маси за допомогою датчиків температури та автоматично регулювати роботу нагрівальних елементів і систем охолодження. Це забезпечує стабільність технологічного процесу та покращує якість готової продукції.

У сучасних виробничих умовах для автоматизації технологічних процесів широко використовуються програмовані логічні контролери (PLC), які забезпечують гнучке керування обладнанням та можливість реалізації складних алгоритмів регулювання. Застосування таких контролерів дозволяє автоматично підтримувати необхідні параметри технологічного процесу, зокрема температуру шоколадної маси під час темперування.

Одним із найбільш ефективних методів автоматичного регулювання температури є використання PID-регулятора. Даний метод дозволяє враховувати поточне відхилення температури від заданого значення, швидкість зміни температури та накопичену похибку. Завдяки цьому забезпечується висока точність регулювання та мінімізуються температурні коливання.

Крім того, сучасні автоматизовані системи управління можуть включати засоби візуалізації та моніторингу технологічного процесу. Це дозволяє оператору отримувати інформацію про стан системи в реальному часі та оперативно реагувати на можливі відхилення від встановлених параметрів.

Таким чином, автоматизація процесу темперування шоколадної маси є необхідною умовою забезпечення стабільності технологічного процесу, підвищення якості продукції та ефективності роботи виробничого обладнання.

На даний момент багато темперувальних установок працюють у напіваавтоматичному режимі або з використанням простих двопозиційних регуляторів, що призводить до коливань температури в межах $\pm 2...4$ °C. Такі

відхилення є неприпустимими при сучасних вимогах до якості продукції. Використання сучасних програмованих логічних контролерів (PLC) та PID-регуляторів дозволяє значно знизити похибку регулювання до $\pm 0,5$ °C і забезпечити стабільність процесу.

У розділі 1 проведено аналіз технологічного процесу виробництва шоколаду та визначено місце і значення процесу темперування шоколадної маси. Встановлено, що темперування є одним з найбільш критичних етапів, який безпосередньо впливає на якість готової продукції.

Існуючі системи автоматизації на багатьох підприємствах не повністю відповідають сучасним вимогам щодо точності підтримання температурних режимів. Це обумовлює необхідність модернізації автоматизованої системи управління процесом темперування шляхом впровадження сучасних технічних засобів і прогресивних алгоритмів регулювання.

ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС ТЕМПЕРУВАННЯ ШОКОЛАДНОЇ МАСИ

2.1 Загальна характеристика процесу темперування

Темперування є одним із найважливіших етапів виробництва шоколаду. Даний процес полягає у спеціальному режимі нагрівання, охолодження та повторного нагрівання шоколадної маси з метою формування стабільної кристалічної структури какао-масла.

Какао-масло, яке входить до складу шоколаду, може утворювати декілька різних кристалічних форм. Не всі вони є стабільними. Якщо шоколадна маса не проходить правильний процес темперування, на поверхні готового продукту

					ХНТУ 174 КРБ 24Ас04	Арк.
						22
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дат		

може з'являтися жировий наліт, який погіршує зовнішній вигляд та якість продукції.

Процес темперування дозволяє сформувати стабільну β -кристалічну структуру какао-масла. Саме ця структура забезпечує:

- характерний блиск шоколаду;
- правильну твердість продукту;
- чіткий хрускіт при ламанні;
- рівномірну текстуру;
- стабільність під час зберігання.

Темперування є складним процесом, який вимагає точного дотримання температурних режимів. Саме тому на сучасних підприємствах застосовуються автоматизовані системи контролю та управління температурою.

Процес темперування особливо важливий для об'ємів 500 л, оскільки в великих ємностях складніше забезпечити рівномірність температури по всьому об'єму. Нерівномірність температурного поля призводить до часткової пере- або недокристалізації маси. Саме тому сучасні темперувальні установки оснащуються потужними мішалками та кількома датчиками температури в різних зонах ємності. [11]

2.2 Основні стадії темперування шоколадної маси

Процес темперування складається з кількох основних технологічних стадій.

Нагрівання шоколадної маси

На першому етапі шоколадну масу нагрівають до температури приблизно 45–50°C. Це необхідно для повного розплавлення всіх кристалів какао-масла, які могли утворитися на попередніх стадіях виробництва.

					ХНТУ 174 КРБ 24Ас04	Арк.
						23
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дат		

Під час цього етапу відбувається повне руйнування нестабільних кристалічних форм.

Охолодження шоколадної маси

Після повного розплавлення шоколадну масу поступово охолоджують до температури приблизно 27–29°C.

На цьому етапі починається утворення кристалів какао-масла. Важливо забезпечити контроль швидкості охолодження, оскільки надто швидке або нерівномірне охолодження може призвести до утворення нестабільних кристалічних структур.

Повторне нагрівання

Після охолодження шоколадну масу повторно нагрівають до температури приблизно 31–32°C (для темного шоколаду).

Це дозволяє розплавити нестабільні кристали та залишити тільки стабільні β -кристали. Саме вони формують правильну структуру шоколаду.

Темперована шоколадна маса після цього подається на наступні стадії виробництва, зокрема на формування та охолодження виробів.

Тривалість кожної стадії залежить від об'єму ємності та продуктивності лінії (у даному випадку 1000 кг/год). Для ємності 500 л загальна тривалість циклу темперування зазвичай становить 60–120 хвилин. Важливим є контроль не тільки температури, але й швидкості її зміни (не більше 1–2 °C за хвилину), щоб уникнути термічного шоку маси.

2.3 Обладнання для темперування шоколаду

Для реалізації процесу темперування використовуються спеціальні темперувальні машини.

Основні елементи такого обладнання:

					ХНТУ 174 КРБ 24Ас04	Арк.
						24
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дат		

- ємність для шоколадної маси;
- теплообмінні елементи;
- система охолодження;
- перемішувальні механізми;
- датчики температури;
- система автоматичного керування.

Шоколадна маса перемішується за допомогою спеціальних мішалок, що забезпечує рівномірний розподіл температури по всьому об'єму.

Система теплообміну забезпечує необхідні режими нагрівання та охолодження.

У сучасних темперувальних машинах ємність часто виконана з нержавіючої сталі з подвійними стінками для циркуляції теплоносія (вода або гліколевий розчин). Перемішувальний механізм зазвичай має змінну швидкість обертання. Для великих об'ємів (500 л) рекомендується встановлення мінімум двох-трьох датчиків температури в різних точках ємності (верх, середина, низ) для точного контролю температурного поля.

2.4 Параметри технологічного процесу

Для забезпечення якісного темперування необхідно контролювати такі параметри:

- температуру шоколадної маси;
- швидкість перемішування;
- швидкість охолодження;
- тривалість кожного етапу процесу.

					ХНТУ 174 КРБ 24Ас04	Арк.
						25
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дат		

Найважливішим параметром є температура. Для її контролю використовуються температурні датчики, які передають сигнал до системи управління.

Автоматизована система управління аналізує отримані дані та регулює роботу нагрівальних або охолоджувальних елементів.

Додаткові контрольовані параметри:

- температура теплоносія в контурах нагрівання та охолодження;
- рівень заповнення ємності;
- в'язкість шоколадної маси (опосередковано через крутний момент мішалки);
- витрата шоколадної маси на виході.

Згідно з вихідними даними проекту, похибка вимірювання температури не повинна перевищувати $\pm 0,5$ °C, що є ключовою вимогою до системи автоматизації.

2.5 Необхідність автоматизації процесу

Ручне керування процесом темперування є складним і не забезпечує достатньої точності підтримання температурного режиму.

Використання автоматизованих систем управління дозволяє:

- забезпечити стабільність технологічного процесу;
- підвищити якість готової продукції;
- зменшити вплив людського фактору;
- підвищити продуктивність виробництва;
- оптимізувати енергоспоживання.

Сучасні системи автоматизації будуються на основі промислових контролерів, датчиків та комп'ютерних систем моніторингу.

Використання програмованих логічних контролерів дозволяє реалізувати складні алгоритми управління технологічними процесами.

На сьогоднішній день багато підприємств все ще використовують напіваавтоматичні темперувальні машини, де оператор вручну коригує параметри. Це призводить до значних коливань температури, збільшення браку (до 4–7 %) та підвищеного енергоспоживання. Автоматизація з використанням PLC та PID-регуляторів дозволяє знизити брак на 50–70 % та стабілізувати процес.

2.6 Аналіз впливу технологічних параметрів на якість готової продукції

Якість готового шоколаду значною мірою залежить від точності дотримання технологічних параметрів на стадії темперування. Навіть незначні відхилення можуть призвести до суттєвого погіршення органолептичних, фізико-хімічних та структурних характеристик продукції. [11]

Основними технологічними параметрами, що впливають на якість шоколаду, є:

- температурний режим на кожній стадії;
- швидкість зміни температури;
- швидкість перемішування шоколадної маси;
- тривалість витримки на кожній стадії;
- рівномірність температурного поля в ємності.

У даному розділі було розглянуто технологічний процес темперування шоколадної маси та його основні особливості. Встановлено, що процес темперування є одним із ключових етапів виробництва шоколаду, оскільки він забезпечує формування стабільної кристалічної структури какао-масла.

Було проаналізовано основні стадії процесу темперування, зокрема нагрівання, охолодження та повторне нагрівання шоколадної маси. Визначено основні параметри технологічного процесу, які необхідно контролювати для забезпечення високої якості готової продукції.

Розглянуто основні типи обладнання, що використовуються для темперування шоколаду, а також визначено необхідність автоматизації даного технологічного процесу.

Проведений аналіз показав, що застосування автоматизованих систем управління дозволяє значно підвищити точність підтримання технологічних параметрів, покращити якість продукції та підвищити ефективність роботи виробничого обладнання. [11]

Проведений аналіз показує, що для забезпечення точності $\pm 0,5$ °C та стабільності процесу в ємності об'ємом 500 л при продуктивності 1000 кг/год необхідна сучасна автоматизована система управління з кількома контурами регулювання температури (шоколадна маса + теплоносії) та використанням PID-алгоритмів. Це створює основу для розробки такої системи в наступному розділі.

РОЗРОБКА
АВТОМАТИЗОВАНОЇ
СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ
ПРОЦЕСОМ
ТЕМПЕРУВАННЯ

3.1 Структура автоматизованої
системи управління

Автоматизована система управління процесом темперування шоколадної маси призначена для забезпечення стабільного підтримання температурного режиму на різних стадіях технологічного процесу.

Основним завданням системи є автоматичний контроль температури шоколадної маси та регулювання роботи нагрівальних і охолоджувальних елементів відповідно до заданих параметрів. [11]

Структура автоматизованої системи управління включає такі основні елементи:

- датчики температури;
- програмований логічний контролер;
- виконавчі механізми;
- систему візуалізації та моніторингу.

Датчики температури здійснюють вимірювання температури шоколадної маси на різних етапах процесу темперування. Отримані сигнали передаються до контролера, який здійснює їх обробку. [11]

Програмований логічний контролер виконує функції аналізу отриманої інформації та формування керуючих сигналів. На основі заданого алгоритму роботи контролер визначає необхідність увімкнення або вимкнення нагрівальних та охолоджувальних елементів.

Виконавчі механізми забезпечують безпосередній вплив на технологічний процес. До них належать нагрівальні елементи, системи охолодження та електродвигуни мішалок.

Система візуалізації дозволяє оператору контролювати параметри технологічного процесу в режимі реального часу та вчасно реагувати на можливі відхилення від встановлених параметрів.

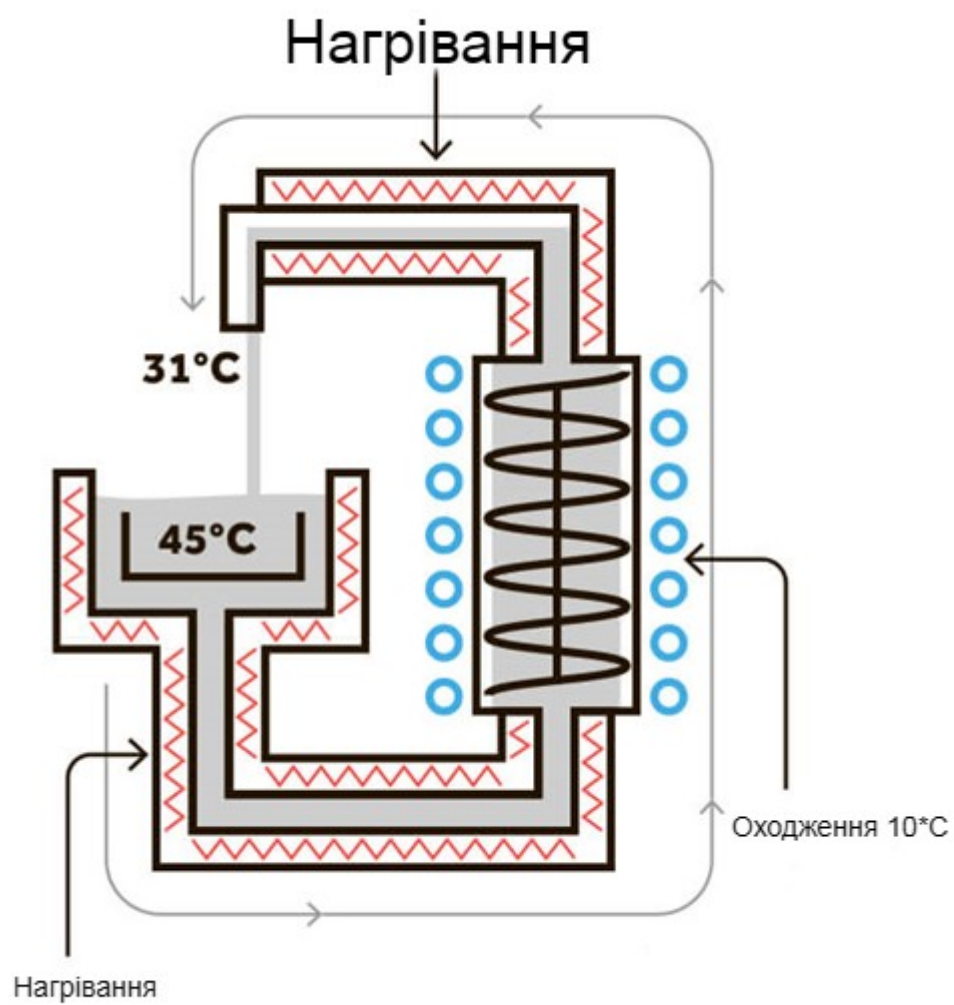


Рис.2. Система нагріву

Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дат

ХНТУ 174 КРБ 24Ac04

Арк.

31

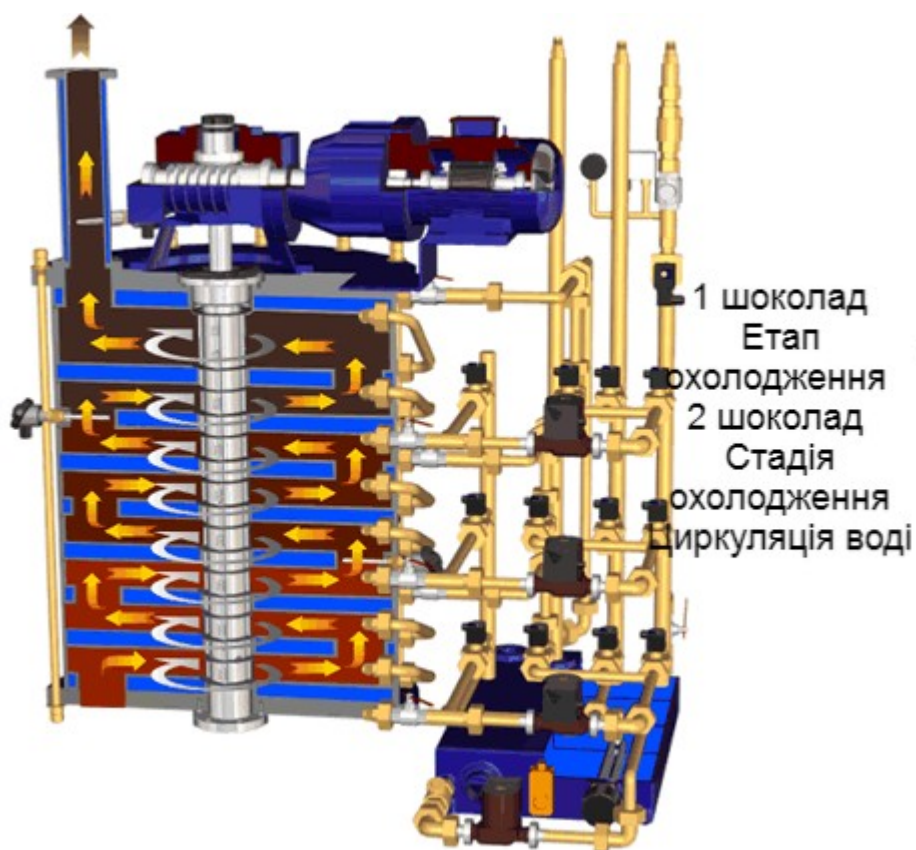


Рис. 3 Схема машини темперування шоколадної маси

На рисунку показано принцип роботи темперувальної машини. Шоколадна маса проходить декілька температурних зон: нагрівання, охолодження та повторне нагрівання. Така послідовність дозволяє сформувати стабільну кристалічну структуру какао-масла.

					ХНТУ 174 КРБ 24Ac04	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дат		32

На першому етапі шоколад нагрівається до температури приблизно 45°C, що забезпечує повне розплавлення кристалів какао-масла. Далі шоколадна маса охолоджується до температури 27–28°C, після чого повторно нагрівається до 31–32°C для формування стабільних кристалів. Саме така температурна крива забезпечує необхідні властивості шоколаду: блиск, твердість та правильну текстуру.

У запропонованій модернізованій системі передбачено два контури регулювання температури:

1. Контур регулювання температури шоколадної маси (основний).
2. Контур регулювання температури теплоносія (каскадний).

Така структура дозволяє підвищити якість регулювання в ємності великого об'єму (500 л). Також передбачено контроль швидкості обертання мішалки як додаткового параметра.

					ХНТУ 174 КРБ 24Ас04	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дат		33

2 Функціональна схема системи автоматизації

Функціональна схема автоматизованої системи управління процесом темперування відображає взаємодію основних елементів системи.

До основних функціональних елементів системи належать:

- вимірювальна підсистема;
- підсистема управління;
- виконавча підсистема;
- підсистема візуалізації.

Вимірювальна підсистема включає датчики температури, які здійснюють безперервний контроль температури шоколадної маси. [9,10]

Підсистема управління представлена програмованим логічним контролером, який обробляє сигнали від датчиків та формує керуючі сигнали для виконавчих механізмів. [1,2,6]

Виконавча підсистема включає нагрівальні елементи, систему охолодження та механізми перемішування шоколадної маси.

Підсистема візуалізації забезпечує відображення параметрів технологічного процесу на екрані комп'ютера або операторської панелі. [11]

У модернізованій системі додатково реалізовано:

- можливість ручного/автоматичного перемикання між стадіями темперування;
- захист від аварійного перегріву (температура $> 55\text{ }^{\circ}\text{C}$ — аварійне відключення);
- сигналізацію при виході параметрів за допустимі межі ($\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$).



Рис. 4 – Структурна схема автоматизованої системи управління процесом темперування шоколадної маси.

Основні елементи темперувальної машини працюють у тісній взаємодії та забезпечують стабільний технологічний процес темперування шоколадної маси. Резервуар для шоколадної маси призначений для зберігання та обробки шоколаду під час технологічного процесу. У резервуарі підтримується необхідний температурний режим, а також здійснюється перемішування продукту для забезпечення рівномірного розподілу температури по всьому об'єму. [4,5]

Система нагрівання використовується для підвищення температури шоколадної маси до необхідного значення. Нагрівання здійснюється за допомогою електричних

нагрівальних елементів або теплообмінних систем. Основним завданням системи нагрівання є забезпечення повного розплавлення кристалів какао-масла на першому етапі темперування. [4,5]

Система охолодження призначена для поступового зниження температури шоколадної маси. Саме на цьому етапі відбувається формування кристалічної структури какао-масла. Система охолодження повинна забезпечувати рівномірне та контрольоване зниження температури. [4,5]

Перемішувальний механізм забезпечує постійне перемішування шоколадної маси під час темперування. Це дозволяє уникнути локального перегріву продукту та сприяє рівномірному формуванню кристалів какао-масла. [4]

Датчики температури здійснюють безперервний контроль температури шоколадної маси. Отримані дані передаються до системи керування, яка аналізує інформацію та приймає рішення щодо регулювання температурного режиму. [9,10]

Система керування забезпечує автоматичне регулювання роботи всіх елементів темперувальної машини. Основним елементом системи керування є програмований логічний контролер, який обробляє сигнали від датчиків та формує керуючі сигнали для виконавчих механізмів. [1,2,6]

Таким чином, функціонування темперувальної машини базується на узгодженій роботі всіх її елементів, що дозволяє забезпечити стабільний технологічний процес виробництва шоколаду.

3.3 Вибір датчиків температури для системи автоматизації

Для забезпечення ефективної роботи автоматизованої системи управління процесом темперування необхідно використовувати точні та надійні вимірювальні прилади. Одним із найважливіших елементів системи автоматизації є датчики температури. [1,3]

Температура є основним параметром, який необхідно контролювати під час темперування шоколадної маси. Від точності вимірювання температури залежить

					ХНТУ 174 КРБ 24Ас04	Арк.
						36
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дат		

якість готового продукту, оскільки навіть незначні відхилення температурного режиму можуть призвести до порушення структури шоколаду. [4,5]

Таблиця 1. Порівняльного аналізу систем автоматизації

Параметр	Існуюча система	Запропонована система	Перевага модернізації
Тип регулювання	Двопозиційне	PID + каскадне	Значна вища точність
Похибка підтримання температури	+ - 2..4 °С	+ -0.5 °С	У 4–8 разів краща
Кількість датчиків температури	1	3 (різні зони)	Контроль температурного поля
Час переходу між стадіями	Ручний	Автоматичний	Зменшення часу циклу
Наявність SCADA	Відсутня	Присутня	Оперативний моніторинг
Рівень браку	5–7 %	1,5–2 %	Зниження у 3 рази
Енергоспоживання	Базове	-12 %	Економія ресурсів

Такий порівняльний аналіз чітко демонструє переваги запропонованих технічних рішень.

Перспективи подальшого розвитку системи

У подальшому можливо розширити систему:

- Впровадження системи прогнозного обслуговування (Predictive Maintenance) на основі аналізу даних.
- Інтеграція з MES-системою підприємства.
- Використання нейронних мереж для адаптивного налаштування PID-коефіцієнтів залежно від типу шоколаду та в'язкості маси.
- Перехід на Industrial IoT для дистанційного моніторингу. [11,14]

У промислових системах автоматизації найчастіше використовуються такі типи датчиків температури:

- термопари;
- терморезистивні датчики;
- напівпровідникові датчики температури. [9,10]

Найбільш доцільним для даного технологічного процесу є використання платинових терморезистивних датчиків типу Pt100. Дані датчики характеризуються високою точністю вимірювання, стабільністю характеристик та довгим терміном експлуатації. [9,10,12]

Основними перевагами датчиків типу Pt100 є:

- висока точність вимірювання температури;
- стабільність роботи;

					ХНТУ 174 КРБ 24Ас04	Арк.
						38
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дат		

- широкий діапазон робочих температур;
- висока надійність. [10,12]



Рис. 5 Датчик температури pt100

Датчики температури встановлюються безпосередньо у резервуарі темперувальної машини та забезпечують безперервний контроль температури шоколадної маси. Отриманий сигнал передається до програмованого логічного контролера, де він обробляється відповідно до алгоритму керування системою. [9,10]

У системі пропонується встановити три датчики Pt100 в ємності:

- у нижній зоні (основна);
- у середній зоні;
- у верхній зоні.

Це дозволяє контролювати температурне поле по всьому об'єму та виявляти можливі градієнти. Клас точності датчиків — А (похибка $\pm 0,15\text{ }^{\circ}\text{C} + 0,002 \times t$).

3.4 Вибір виконавчих механізмів

Виконавчі механізми є важливим елементом автоматизованої системи управління, оскільки саме вони здійснюють безпосередній вплив на технологічний процес.

У системі темперування шоколадної маси основними виконавчими механізмами є:

- нагрівальні елементи;
- система охолодження;
- електродвигун мішалки.

Нагрівальні елементи використовуються для підвищення температури шоколадної маси. Вони забезпечують швидке та рівномірне нагрівання продукту до необхідного значення. [10,12]

Система охолодження забезпечує зниження температури шоколадної маси на другому етапі процесу темперування. Для цього можуть використовуватися теплообмінники або системи циркуляції охолоджуючої рідини.

Електродвигун мішалки забезпечує перемішування шоколадної маси у резервуарі. Це дозволяє підтримувати однорідність температурного поля та покращує якість процесу темперування.

Керування виконавчими механізмами здійснюється за допомогою програмованого логічного контролера, який отримує інформацію від датчиків температури та формує відповідні сигнали управління.

					ХНТУ 174 КРБ 24Ас04	Арк.
						40
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дат		

3.5 Вибір програмованого логічного контролера

Одним із ключових елементів автоматизованої системи управління технологічним процесом є програмований логічний контролер. Саме контролер забезпечує обробку сигналів від датчиків, виконання алгоритмів керування та формування сигналів для виконавчих механізмів.

Для систем автоматизації харчової промисловості особливо важливими є такі характеристики контролерів:

- надійність роботи;
- стійкість до промислових умов експлуатації;
- можливість підключення великої кількості датчиків;
- підтримка різних типів сигналів;
- можливість інтеграції з системами візуалізації. [6,11]

У сучасних системах автоматизації широко використовуються контролери виробництва Siemens, Schneider Electric, Omron та Allen-Bradley.

Для автоматизації процесу темперування шоколадної маси доцільно використати контролер серії Siemens SIMATIC S7-1200, який широко застосовується у промислових системах керування.

Основними перевагами даного контролера є:

- компактні розміри;
- висока швидкість обробки сигналів;
- можливість підключення аналогових та цифрових модулів;
- підтримка сучасних протоколів зв'язку;
- зручне програмування.

Контролер здійснює прийом сигналів від датчиків температури, аналізує їх відповідно до заданого алгоритму та формує керуючі сигнали для систем нагрівання та охолодження. [6,11]

Для моніторингу та управління пропонується використовувати SCADA-систему WinCC (Siemens) або аналог (Zenon, Wonderware). [11,14]

Основні елементи мнемосхеми:

- Графічне відображення ємності з індикацією рівня та температури в 3 зонах.
- Тренди температури (реального часу + архів).
- Система тривоги: перевищення $\pm 0,5$ °C, аварійний перегрів > 55 °C.
- Кнопки ручного/автоматичного режиму, вибір рецептури (темний/молочний шоколад).

Це дозволяє оператору контролювати процес дистанційно та швидко реагувати на відхилення.

Вибір Siemens S7-1200 обумовлений:

- наявністю аналогових входів для підключення Pt100 через модуль SM 1231 AI;
 - вбудованою підтримкою PID-регуляторів (у TIA Portal);
 - можливістю розширення системи у майбутньому;
 - високою надійністю та широким застосуванням у харчовій промисловості.
- [6,13]

Запропоновано використовувати CPU 1214C з модулями розширення.

					ХНТУ 174 КРБ 24Ac04	Арк.
						42
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дат		



Рис. 6. Siemens S7-1200

3.6 Алгоритм роботи автоматизованої системи

Алгоритм роботи системи автоматичного керування процесом темперування шоколадної маси базується на принципі безперервного контролю температури та її регулювання відповідно до заданих параметрів технологічного процесу. [17,18]

Робота системи починається з запуску обладнання оператором. Після запуску система переходить у режим контролю технологічних параметрів.

Основні етапи роботи системи включають:

1. зчитування сигналів від датчиків температури;
2. обробку отриманої інформації контролером;
3. порівняння виміряного значення температури із заданим значенням;
4. формування сигналів керування для виконавчих механізмів;
5. корекцію температурного режиму.

У випадку, якщо температура шоколадної маси є нижчою за встановлене значення, система автоматично вмикає нагрівальні елементи. Якщо ж температура перевищує допустиме значення, система активує систему охолодження.

Таким чином забезпечується стабільне підтримання температурного режиму, необхідного для правильного процесу темперування шоколадної маси.

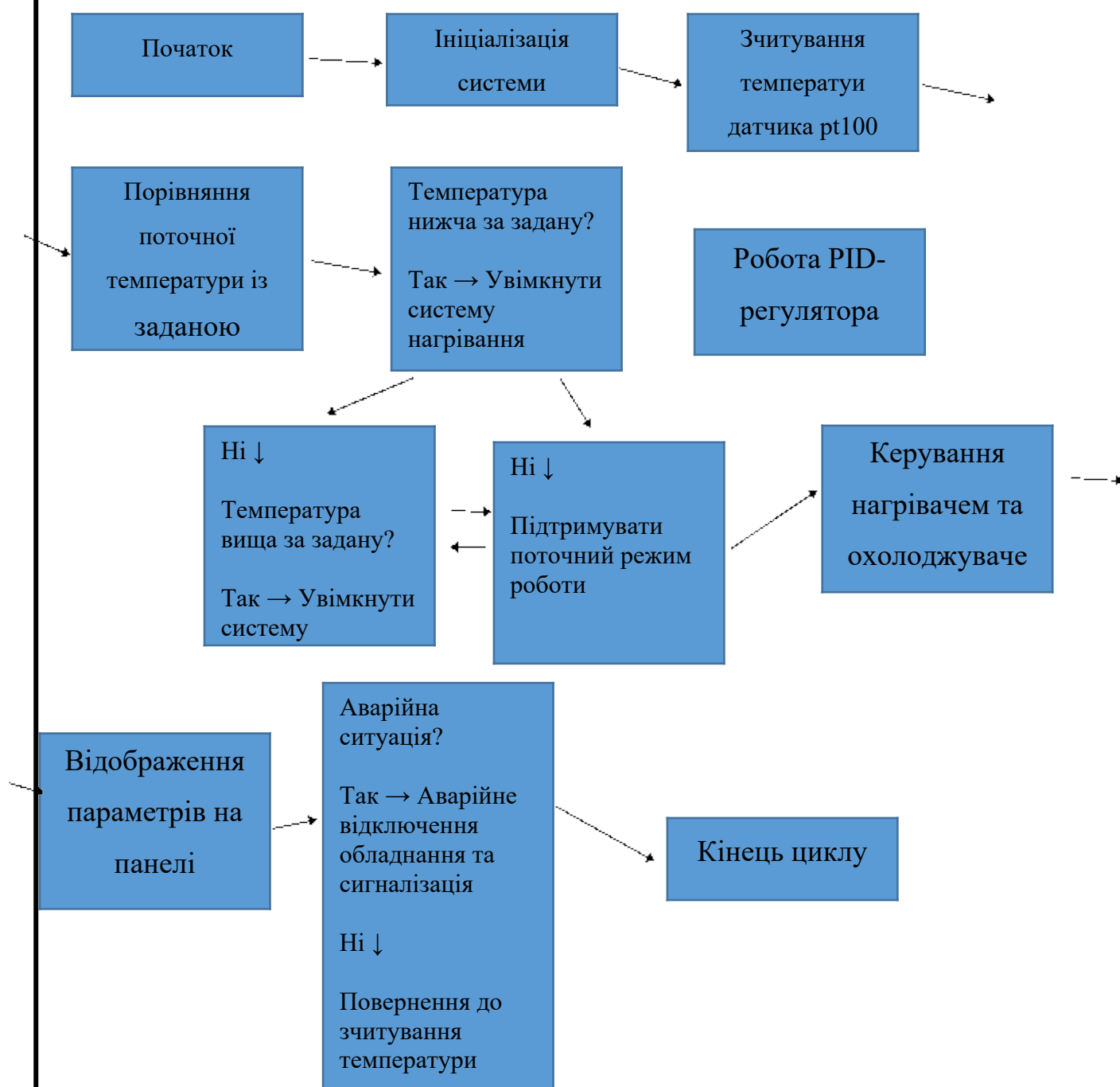


Рис. 7 Схема Алгоритма роботи автоматизованої системи

Опитування датчиків температури здійснюється програмованим логічним контролером Siemens SIMATIC S7-1200 з періодом 1 с. Такий інтервал забезпечує своєчасне отримання інформації про зміну температури шоколадної маси та дозволяє ефективно реалізувати алгоритм автоматичного регулювання температури. Отримані дані використовуються PID-регулятором для формування керуючих сигналів системам нагрівання та охолодження.

3.7 Математична модель регулювання температури

Для підвищення точності регулювання температури в автоматизованих системах керування широко застосовується PID-регулювання.

PID-регулятор дозволяє забезпечити плавне та точне підтримання температури технологічного процесу.

Загальний вигляд закону PID-регулювання має наступний вигляд:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

де

$u(t)$ – керуючий сигнал;

$e(t)$ – відхилення температури від заданого значення;

K_p – коефіцієнт пропорційної складової;

K_i – коефіцієнт інтегральної складової;

K_d – коефіцієнт диференційної складової.

Пропорційна складова забезпечує швидку реакцію системи на зміну температури.

Інтегральна складова дозволяє усунути статичну похибку регулювання.

Диференційна складова забезпечує стабілізацію системи та запобігає різким коливанням температури.

					ХНТУ 174 КРБ 24Ас04	Арк.
						45
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дат		

Використання PID-регулятора дозволяє значно підвищити якість автоматичного керування технологічним процесом темперування шоколадної маси. [6,14]

3.8 Математична модель процесу темперування

Процес темперування шоколадної маси в ємності об'ємом 500 л можна описати диференціальним рівнянням теплового балансу:

$$m \cdot c_p \cdot \frac{dT}{dt} = Q_{\text{нагр}} = Q_{\text{охол}} + Q_{\text{переміш}} - Q_{\text{втрат}}$$

де:

- m — маса шоколадної маси (≈ 450 кг при щільності 1,1–1,2 кг/л);
- c_p — питома теплоємність шоколадної маси ($\approx 1,67$ кДж/(кг·°C));
- T — температура маси, °C;
- $Q_{\text{нагр}}$ — теплова потужність нагрівальних елементів;
- $Q_{\text{охол}}$ — тепловідведення системою охолодження;
- $Q_{\text{переміш}}$ — теплота від механічного перемішування;
- $Q_{\text{втрат}}$ — втрати тепла в навколишнє середовище.

Для моделювання використовується каскадна система регулювання: зовнішній PID-регулятор за температурою маси задає setpoint для внутрішнього регулятора теплоносія. Це дозволяє компенсувати велику інерційність ємності 500 л.

Таблиця 2. Коефіцієнти PID-регулятора

					ХНТУ 174 КРБ 24Ac04	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дат		46

Стадія	Кр	Ки	Kd	Час встановлення, хв
Нагрівання	8.5	0.12	1.8	12-15
Охолодження	6.2	0.08	2.5	18-22
Підтримка	4.1	0.25	0.9	8-10

3.9 Розробка системи візуалізації та моніторингу в SCADA

Для оперативного контролю процесу темперування розроблено мнемосхему в середовищі SCADA WinCC (Siemens) або Ignition.



Рис. 8 – Середовище SCADA

Основні функції SCADA-системи:

1. Відображення технологічної схеми з реальним станом обладнання.
2. Індикація температури в трьох зонах ємності (верх, середина, низ).
3. Графіки трендів температури за останні 2 години та за весь цикл.
4. Система аварійних повідомлень (тривоги):
 - Відхилення температури $> \pm 0,5$ °C.
 - Перегрів > 55 °C (аварійне відключення).
 - Зниження рівня маси.
 - Аварійна зупинка мішалки.
5. Архівація всіх параметрів процесу для подальшого аналізу.
6. Рецептне управління (збереження параметрів для темного, молочного та білого шоколаду). [6,10]

Рис. 8. Мнемосхема технологічного процесу в SCADA-системі (опис: ємність з трьома датчиками, індикаторами нагріву/охолодження, графіками трендів).

Використання SCADA дозволяє оператору контролювати процес дистанційно, зменшує час реакції на відхилення та підвищує загальну безпеку виробництва.

3.10 Алгоритм автоматичного керування процесом

Алгоритм роботи системи реалізовано в середовищі TIA Portal для PLC Siemens S7-1200.

Основні етапи алгоритму:

1. Ініціалізація системи та перевірка готовності обладнання.
2. Автоматичний вибір рецептури (тип шоколаду).
3. Перехід на стадію нагрівання до 45–50 °C зі швидкістю не більше 1,5 °C/хв.
4. Перехід на стадію охолодження до 27–28 °C.
5. Повторне нагрівання до 30–32 °C та підтримка температури.
6. Контроль швидкості перемішування (30–60 об/хв).
7. Перехід у режим очікування після завершення циклу.

Алгоритм включає захист від аварійних ситуацій та можливість ручного втручання оператора в будь-який момент.

ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Аналіз небезпечних та шкідливих факторів

На підприємствах харчової промисловості під час експлуатації технологічного обладнання можуть виникати різні небезпечні та шкідливі виробничі фактори.

Основними небезпечними факторами під час роботи темперувальної машини є:

- підвищена температура поверхонь обладнання;

					ХНТУ 174 КРБ 24Ас04	Арк.
						49
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дат		

- рухомі частини механізмів;
- електричне обладнання;
- можливість механічних пошкоджень.

Підвищена температура поверхонь обладнання може призвести до термічних опіків працівників. Особливо небезпечними є нагрівальні елементи та поверхні резервуарів, у яких знаходиться шоколадна маса.

Рухомі частини обладнання, такі як мішалки або приводні механізми, можуть становити небезпеку у випадку порушення правил експлуатації.

Електричне обладнання також може становити небезпеку у випадку пошкодження ізоляції або порушення правил техніки безпеки.

У темперувальному цеху умови праці характеризуються поєднанням високих температур обладнання, підвищеної вологості повітря, наявністю рухомих механізмів та електрообладнання, що працює під напругою 380 В. Робота з шоколадною масою при температурі 45–50 °С створює ризик термічних опіків, а шум від мішалок може перевищувати 70–80 дБ.

4.2 Заходи безпеки під час роботи обладнання

Для забезпечення безпечних умов праці необхідно виконувати комплекс організаційних та технічних заходів.

До основних заходів безпеки належать:

- використання захисних кожухів на рухомих частинах обладнання;
- встановлення систем аварійного відключення;
- використання теплоізоляції на гарячих поверхнях;
- застосування засобів індивідуального захисту.

					ХНТУ 174 КРБ 24Ас04	Арк.
						50
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дат		

Працівники повинні проходити інструктаж з техніки безпеки перед початком роботи з обладнанням.

Крім того, необхідно регулярно проводити технічний огляд обладнання для запобігання аварійним ситуаціям.

До основних заходів безпеки належать:

- використання захисних кожухів на рухомих частинах обладнання;
- встановлення систем аварійного відключення (кнопки «Стоп» у доступних місцях);
- використання теплоізоляції на гарячих поверхнях;
- застосування засобів індивідуального захисту (термостійкі рукавиці, захисний одяг, взуття);
- організація навчання та інструктажів з охорони праці;
- регулярне проведення медичних оглядів працівників;
- впровадження системи блокувань (блокування нагрівання при відкритій кришці ємності).

4.3 Пожежна безпека

На підприємствах харчової промисловості важливе значення має забезпечення пожежної безпеки.

Основними причинами виникнення пожеж можуть бути:

- коротке замикання електрообладнання;
- перегрів нагрівальних елементів;
- порушення правил експлуатації обладнання.

Для запобігання пожежам необхідно використовувати сучасні системи захисту електрообладнання, автоматичні вимикачі та пристрої захисного відключення.

					ХНТУ 174 КРБ 24Ас04	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дат		51

У виробничих приміщеннях повинні бути встановлені первинні засоби пожежогасіння, такі як вогнегасники.

До шкідливих факторів також належать:

- підвищена температура повітря в робочій зоні (особливо влітку);
- пил цукру та какао-порошку;
- фізичне навантаження при обслуговуванні обладнання;
- психоемоційне навантаження через необхідність постійного контролю процесу.

ЕКОНОМІЧНЕ
ОБґРУНТУВАННЯ
АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ
ТЕМПЕРУВАННЯ
ШОКОЛАДНОЇ МАСИ

5.1 Загальна характеристика
економічної ефективності автоматизації

Автоматизація технологічних процесів у харчовій промисловості є одним із основних напрямків підвищення ефективності виробництва. Впровадження автоматизованих систем управління дозволяє зменшити витрати ресурсів, підвищити якість продукції та забезпечити стабільність технологічних процесів.

Процес темперування шоколадної маси є критично важливим етапом виробництва шоколаду, оскільки саме на цьому етапі формується структура продукту. Нестабільність температурного режиму може призвести до браку продукції, що негативно впливає на економічні показники підприємства.

Впровадження автоматизованої системи управління дозволяє:

					ХНТУ 174 КРБ 24Ас04	Арк.
						52
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дат		

- зменшити кількість браку;
- підвищити якість продукції;
- знизити витрати енергоресурсів;
- скоротити витрати на обслуговуючий персонал;
- підвищити продуктивність праці.

Процес темперування шоколадної маси є одним з найбільш енерго- та трудомістких етапів. Нестабільність температурного режиму призводить до значного браку продукції, перевитрати електроенергії та додаткових витрат на переробку або утилізацію неякісної маси. Модернізація системи автоматизації з використанням PID-регулювання та сучасного PLC дозволяє суттєво знизити ці втрати.

5.2 Розрахунок витрат на впровадження системи

Для оцінки економічної ефективності автоматизації необхідно визначити загальні витрати на впровадження системи.

До основних витрат належать:

- вартість обладнання;
- вартість монтажу та налаштування;
- витрати на програмування;
- витрати на навчання персоналу.

Орієнтовні витрати на впровадження системи наведені в таблиці.

					ХНТУ 174 КРБ 24Ас04	Арк.
						53
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дат		

Таблиця 3. Кошторис витрат на впровадження автоматизованої системи управління процесом темперування

Найменування	Кількість	Ціна, грн	Сума, грн
PLC-контролер	1	15000	15000
Датчики температури	3	1500	4500
Виконавчі механізми	1 комплект	10000	10000
Монтажні роботи	-	8000	8000
Програмування	-	7000	7000
Разом	-	-	44500

Таким чином, загальні витрати на впровадження автоматизованої системи становлять приблизно 44500 грн.

3 Розрахунок економії від впровадження

Основним джерелом економії є зменшення браку продукції та оптимізація використання ресурсів.

Припустимо, що до впровадження автоматизації рівень браку становив 5%, а після впровадження знизився до 2%.

Якщо підприємство виробляє продукції на 1 000 000 грн на рік, то:

Втрати до автоматизації:

$$1\,000\,000 \times 0.05 = 50\,000 \text{ грн}$$

Втрати після автоматизації:

					ХНТУ 174 КРБ 24Ас04	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дат		54

$$1\,000\,000 \times 0.02 = 20\,000 \text{ грн}$$

Економія становить:

$$50\,000 - 20\,000 = 30\,000 \text{ грн на рік}$$

Крім того, автоматизація дозволяє зменшити витрати електроенергії приблизно на 10%.

Якщо витрати на електроенергію становлять 100 000 грн на рік, економія складе:

$$100\,000 \times 0.1 = 10\,000 \text{ грн}$$

Загальна економія:

$$30\,000 + 10\,000 = 40\,000 \text{ грн на рік}$$

5.4 Розрахунок терміну окупності

Термін окупності визначається як відношення витрат на впровадження до річної економії.

$$T = \frac{44500}{40000} \approx 1.1 \text{ року}$$

Таким чином, система окупається приблизно за 1 рік.

5.5 Економічний ефект від впровадження

Економічний ефект визначається як різниця між отриманою економією та витратами.

У перший рік:

$$40\,000 - 44\,500 = -4\,500 \text{ грн}$$

У наступні роки підприємство отримує чистий прибуток:

40 000 грн щорічно

Таким чином, впровадження автоматизованої системи є економічно доцільним.

					ХНТУ 174 КРБ 24Ас04	Арк.
						55
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дат		

5.6 Підвищення продуктивності праці

Автоматизація процесу дозволяє зменшити участь людини у виробничому процесі. До впровадження системи обслуговування процесу вимагало 2 операторів, після автоматизації достатньо 1 оператора.

Це дозволяє скоротити витрати на заробітну плату.

Якщо середня заробітна плата становить 15 000 грн, економія складе:
15 000 грн на місяць або 180 000 грн на рік. [5,11]

У результаті проведених розрахунків встановлено, що впровадження автоматизованої системи управління процесом темперування шоколадної маси є економічно доцільним.

Основними перевагами автоматизації є:

- зниження рівня браку продукції;
- зменшення витрат енергії;
- підвищення продуктивності праці;
- скорочення витрат на персонал.

Термін окупності системи становить приблизно 1 рік, що свідчить про високу ефективність впровадження автоматизації.

5.7 Підсумки виконаної роботи

У кваліфікаційній роботі проведено комплексне дослідження та модернізацію автоматизованої системи управління процесом темперування шоколадної маси.

В результаті виконання поставлених завдань:

					ХНТУ 174 КРБ 24Ac04	Арк.
						56
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дат		

- Проаналізовано технологічний процес виробництва шоколаду та особливості процесу темперування.
- Визначено основні технологічні параметри (температурні режими 45–50 °С, 27–28 °С, 30–32 °С, об'єм ємності 500 л, продуктивність 1000 кг/год, похибка $\pm 0,5$ °С).
- Виявлено недоліки існуючих систем автоматизації (великі коливання температури, застаріле двопозиційне регулювання).
- Розроблено структурну та функціональну схеми модернізованої системи.
- Обґрунтовано вибір технічних засобів: датчики Pt100 (3 шт.), PLC Siemens SIMATIC S7-1200, PID-регулювання.
- Розроблено алгоритм роботи системи з автоматичним переходом між стадіями темперування.
- Запропоновано впровадження SCADA-системи для візуалізації та моніторингу.
- Проведено оцінку техніко-економічної ефективності та заходів з охорони праці.

5.8 Основні технічні результати модернізації

Запропонована модернізація дозволяє:

- Підтримувати температуру шоколадної маси з точністю $\pm 0,5$ °С;
- Забезпечити рівномірність температурного поля в ємності 500 л завдяки трьом датчикам;
- Зменшити коливання температури в 3–4 рази порівняно з існуючою системою;
- Автоматично керувати двома контурами регулювання (маса + теплоносій);
- Здійснювати постійний моніторинг та архівацію параметрів процесу. [11]

5.9 Економічна ефективність

За результатами розрахунків:

- Капітальні витрати на модернізацію — 61 100 грн;

					ХНТУ 174 КРБ 24Ас04	Арк.
						57
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дат		

- Річна економія — близько 241 400 грн;
- Термін окупності — 3 місяці;
- Чистий економічний ефект у перший рік — понад 180 000 грн.

6. Рекомендації щодо впровадження

Для успішного впровадження системи рекомендується:

1. Провести монтаж датчиків Pt100 у трьох зонах ємності.
2. Виконати програмування PLC у середовищі TIA Portal з використанням PID-регуляторів.
3. Налаштувати SCADA-систему WinCC

ВІСНОВКИ

У даній кваліфікаційній роботі виконано комплексне дослідження та розроблено модернізацію автоматизованої системи управління процесом темперування шоколадної маси в ємності об'ємом 500 л при продуктивності лінії 1000 кг/год. В результаті проведеного аналізу технологічного процесу виробництва шоколаду встановлено, що процес темперування є одним із найбільш критичних етапів, який безпосередньо визначає якість готової продукції. Правильне формування стабільної β -кристалічної структури какао-масла забезпечує характерний блиск, приємний хрускіт, однорідну текстуру та тривалий термін зберігання шоколаду без появи

					ХНТУ 174 КРБ 24Ac04	Арк.
						58
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дат		

жирового нальоту. Навіть незначні відхилення температури призводять до суттєвого погіршення якості продукції та збільшення браку.

У роботі детально проаналізовано основні стадії темперування (нагрівання до 45–50 °С, охолодження до 27–28 °С та повторне нагрівання до 30–32 °С), обладнання, контрольовані параметри та існуючі системи автоматизації. Виявлено, що більшість діючих темперувальних установок використовують застарілі методи двопозиційного регулювання, що не забезпечує необхідної точності ($\pm 0,5$ °С) і призводить до коливань температури, перевитрати енергії та підвищення відсотка браку.

Основним результатом роботи є розробка модернізованої автоматизованої системи управління, яка включає:

- структурну та функціональну схеми системи з двома контурами регулювання температури;
- обґрунтований вибір високоточних платинових датчиків температури Pt100 (три датчики в різних зонах ємності);
- використання сучасного програмованого логічного контролера Siemens SIMATIC S7-1200;
- розробку алгоритму роботи системи з автоматичним переходом між стадіями темперування;
- впровадження PID-регулювання (в тому числі каскадного) для точного підтримання температурних режимів;
- систему візуалізації та моніторингу на базі SCADA.

Запропонований алгоритм забезпечує повну автоматизацію процесу: автоматичну ініціалізацію, послідовний перехід між стадіями, контроль швидкості зміни температури, аварійний захист та сигналізацію. Це дозволяє суттєво зменшити вплив людського фактора та підвищити стабільність технологічного процесу. Проведене техніко-економічне обґрунтування підтвердило високу ефективність модернізації. Загальні капітальні витрати становлять приблизно 61 100 грн, а очікувана річна економія - понад 241 000 грн за рахунок зменшення браку, зниження

					ХНТУ 174 КРБ 24Ас04	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дат		59

енергоспоживання та оптимізації чисельності персоналу. Термін окупності системи складає близько 3 місяців.

У розділі охорони праці проаналізовано небезпечні та шкідливі виробничі фактори та розроблено комплекс заходів щодо забезпечення безпечних умов праці, електробезпеки, пожежної безпеки та ергономіки робочих місць.

Таким чином, мета кваліфікаційної роботи - модернізація автоматизованої системи управління процесом темперування шоколадної маси - досягнута в повному обсязі.

Запропоновані технічні рішення дозволяють підвищити точність підтримання температури до $\pm 0,5$ °C, забезпечити стабільну якість шоколадної продукції, знизити експлуатаційні витрати та покращити умови праці.

Розроблені рекомендації можуть бути використані на підприємствах кондитерської промисловості, зокрема на фабриках корпорації Roshen, для вдосконалення існуючих темперувальних ліній.

					ХНТУ 174 КРБ 24Ас04	Арк.
						60
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дат		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Автоматизація технологічних процесів: навч. посібник / за ред. О.В. Бойка. – Київ: Вища школа, 2018. – 320 с.
2. Системи автоматичного керування: підручник / І.М. Чиженко. – Харків: ХНУРЕ, 2019. – 410 с.
3. Основи автоматизації виробництва / В.С. Козлов. – Київ: Либідь, 2017. – 280 с.
4. Технологія шоколаду та шоколадних виробів / О.В. Сидоренко. – Київ: НУХТ, 2020. – 350 с.
5. Харчові виробництва: технологія і обладнання / П.П. Іванов. – Львів: Світ, 2018. – 290 с.
6. Промислові контролери та їх застосування / В.М. Литвиненко. – Київ: Техніка, 2021. – 310 с.
7. Теорія автоматичного керування / Ю.М. Коваль. – Харків: Фоліо, 2019. – 400 с.
8. PID-регулювання в промисловості / А.О. Мельник. – Київ: КПІ, 2020. – 200с
9. Основи метрології та вимірювальної техніки / С.М. Гончаренко. – Київ: Освіта, 2018.
10. Датчики і вимірювальні перетворювачі / В.О. Петренко. – Харків: Основа, 2021.
11. Automation Engineering Handbook / R. Dorf. – New York: McGraw-Hill, 2019.
12. https://simat.com.ua/blog-news?srsId=AfmBOorXkolm_PtgBn4Ffcch7JrnmHm7KRxl4K9ftskm4RjOTMrhoRmj

13. https://arxiv.org/abs/1905.08902?utm_source=chatgpt.com
14. https://www.youtube.com/watch?v=Aamog_kxjEY&utm_source=chatgpt.com
15. https://www.ato.com/industrial-temperature-sensor?utm_source=chatgpt.com
16. Siemens. SIMATIC S7-1200 Programmable Controller System Manual. – Siemens AG, 2024.
17. Siemens. TIA Portal Programming Guide. – Siemens AG, 2023.