Міністерство освіти і науки України
Західноукраїнський національний університет
Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем

МУЛЬКО ДМИТРО МИКОЛАЙОВИЧ

МІКРОКОНТРОЛЕРНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ З ВИГОТОВЛЕННЯ КОНДИТЕРСЬКИХ ХЛІБОБУЛОЧНИХ ВИРОБІВ/ MICROCONTROLLER MANAGEMENT SYSTEM FOR THE PRODUCTION OF CONFECTIONERY AND BAKERY PRODUCTS

спеціальність: 174 — Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

освітньо-професійна програма - Автоматизація та програма комп'ютерно-інтегровані технології

Магістерська робота

Виконав студент групи АКІТм-21
Д.М. Мулько
_____
Науковий керівник:
к.т.н., доц. Гуменний П.В.
_____

Магістерську роботу допущено до захисту:
;____;_____2025р.
Завідувач кафедри
_____ А.І. Сегін

Тернопіль 2025

Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем
Освітній ступінь "магістр"
спеціальність: 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка
освітньо-професійна програма – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

"ЗАТВЕРДЖУЮ"
Завідувач кафедри СКС
_____ А.І.Сегін
"____"_____20__ р.

З А В Д А Н Н Я
НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ
Мулька Дмитра Миколайовича
(прізвище, ім'я по-батькові)

1. Тема випускної кваліфікаційної роботи
Мікроконтролерна система управління з виготовлення кондитерських хлібобулочних виробів/ Microcontrollermanagement system for the production of confectionery and bakery products
керівник роботи__к.т.н.,Гуменний П.В.

затверджені наказом по університету від 28 листопада 2024р. №938

2. Строк подання студентом закінченої випускної кваліфікаційної роботи 1 грудня 2025р.

3. Вихідні дані до випускної кваліфікаційної роботи:
1.Аналіз технологічного процесу виготовлення кондитерських хлібобулочних виробів
1.1. Аналіз архітектури кондитерської лінії з виготовлення хлібобулочних виробів
1.2.Принципи функціонування комплексів автоматизованих ліній з виготовлення кондитерських хлібобулочних виробів
2. Технічні засоби забезпечення автоматизованої системи з виготовлення кондитерських хлібобулочних виробів.
2.1.Дослідження апаратних пристроїв для автоматизованої системи з виготовлення кондитерських хлібобулочних виробів.
2.2. Дослідження алгоритмів та пристроїв систем управління кондитерською лінією з виготовлення хлібулочних виробів

4. 4. Основні питання, які потрібно розробити:
1. Аналіз принципів автоматизованого керування кондитерською лінією з виготовлення хлібобулочних виробів
2. Характеристика автоматизованих схем кондитерських хлібобулочних ліній

3. Розробка блок схеми моделі системи керування кондитерською хлібобулочною лінією.
4. Модернізація мікроконтролера автоматизованої системи керування хлібопекарським виробництвом

5. Перелік графічного матеріалу:

1. Simulink модель системи керування перехідними процесами у хлібопекарській печі.

6. Консультанти розділів випускної кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1	П.В. Гуменний к.т.н., доцент, доцент кафедри СКС		
2	П.В. Гуменний к.т.н., доцент, доцент кафедри СКС		
3	П.В. Гуменний к.т.н., доцент, доцент кафедри СКС		

7. Дата видачі завдання 2 грудня 2024р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ КОНФІГУРАЦІЇ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ЙОГО ДИНАМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ		
2	ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ, ПРИЗНАЧЕНІ ДЛЯ КОНТРОЛЮ, ОБЛІКУ, РЕЄСТРАЦІЇ ТА РЕГУЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ КОНДИТЕРСЬКОГО ХЛІБОПЕКАРСЬКОГО ВИРОБНИЦТВА.		
3	УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ ВИГОТОВЛЕННЯ ХЛІБОБУЛОЧНИХ ВИРОБІВ		

Студент _____ Дмитро МУЛЬКО
(підпис)

Керівник роботи _____ к.т.н., доц. Петро ГУМЕННИЙ
(підпис)

АНОТАЦІЯ

Мулько Д. М. Мікроконтролерна система управління з виготовлення кондитерських хлібобулочних виробів. – Рукопис.

Дослідження на здобуття освітнього ступеня «магістр» за спеціальністю 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка», освітньо-професійна програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» – Західноукраїнський національний університет. Тернопіль, 2025.

У роботі розкрито принципи побудови та функціонування мікроконтролерної системи управління технологічними процесами виготовлення кондитерських та хлібобулочних виробів. Розглянуто структуру виробничого процессу. Проаналізовано можливості застосування сучасних мікроконтролерів, сенсорних модулів, виконавчих механізмів і засобів інтелектуального керування для забезпечення стабільної якості продукції. Розроблено алгоритми автоматизованого керування та наведено модель програмно-апаратної системи реалізації.

ANOTATION

Mulko D. M. Microcontroller Control System for Confectionery and Bakery Products Manufacturing. – Manuscript.

Research for obtaining the educational degree "Master" in specialty 174 "Automation, Computer-Integrated Technologies and Robotics", educational-professional program "Automation and Computer-Integrated Technologies" – West Ukrainian National University. Ternopil, 2025.

The work reveals the principles of construction and operation of a microcontroller control system for technological processes of confectionery and bakery products manufacturing. The structure of the production process is examined. The possibilities of applying modern microcontrollers, sensor modules, actuating mechanisms, and intelligent control means to ensure stable product quality are analyzed. Algorithms for automated control are developed, and a model of the hardware-software system implementation is presented.

ЗМІСТ

ВСТУП……. 8
1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ КОНФІГУРАЦІЇ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ЙОГО ДИНАМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ……..……...…… 11
1.1 Дослідження технологічного регламенту виготовлення кондитерських і хлібобулочних виробів…… 11
1.2 Аналіз принципів функціонування комплексів автоматизованих ліній з виготовлення кондитерських хлібобулочних виробів …….. 18
1.3 Аналіз обладнання для виготовлення кондитерських хлібобулочних виробів ……..……... 25
2. ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ, ПРИЗНАЧЕНІ ДЛЯ КОНТРОЛЮ, ОБЛІКУ, РЕЄСТРАЦІЇ ТА РЕГУЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ КОНДИТЕРСЬКОГО ХЛІБОПЕКАРСЬКОГО ВИРОБНИЦТВА.……. 36
2.1 Дослідження роботи контролера MicroPC 6040 лінії виготовлення кондитерських хлібобулочних виробів …..……... 36
2.2 Аналіз та вибір пристроїв для вимірів і контролю регульованих параметрів…….……. 46
2.3 Аналіз станів автоматизованих систем управління хлібопекарським виробництвом …….. 58
3. УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ ВИГОТОВЛЕННЯ ХЛІБОБУЛОЧНИХ ВИРОБІВ ……. 62
3.1 Технологічний процес систем автоматизованого регулювання параметрами випікання кондитерських хлібобулочних виробів 62
3.2 Реалізація Simulink моделі системи керування температурними режимами …….. 68
3.3 Модернізація автоматизованої мікроконтролерної системи керування хлібобулочним виробництвом ..……. 73
ВИСНОВКИ ……..…. 80

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ…….. 82
ДОДАТОК А…….. 87

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ

АСУ –автоматизована система управління

МК – мікроконтролер

АЦП-аналого-цифровий перетворювач

СКД- система контролю доступу

СВУД- системи віддаленого контролю і управління доступу

ІЧ- інфрачервоний

ВСТУП

Актуальність теми. Інтенсифікація виробництва в умовах сучасного ринку безпосередньо пов'язана з впровадженням автоматизованих систем керування, які виступають ключовим фактором для реалізації збільшення операційної діяльності, та забезпечення покращених умов праці, а також гарантії стабільної якості та розширення асортименту продукції. Особливої значущості автоматизація набуває в кондитерській та хлібопекарній галузях, де технологічні процеси характеризуються значною складністю та ресурсомісткістю, що обумовлює потребу в розробці цілісних автоматизованих рішень для підприємств цього профілю.

Сучасне хлібопекарне виробництво все частіше базується на повністю автоматизованих технологічних комплексах. Наприклад, сучасні пекарські печі функціонують як автономні об'єкти, де усі стадії випікання відбуваються без безпосередньої участі оператора, роль якого зводиться до введення вихідних параметрів. Автоматизовані системи керування таких печей забезпечують безперервний контроль та точне регулювання ключових технологічних змінних: температури в робочій камері, тяги в топковому просторі та швидкості руху конвеєрної стрічки. Таке підвищення рівня контролю безпосередньо впливає на якість готової продукції. Отже, впровадження прогресивних автоматизованих рішень забезпечує не лише підвищення якості виробів та продуктивності праці, але й досягнення значної економії сировинних та матеріальних ресурсів.

Мета та завдання дослідження. Метою даної роботи є проектування та наукове обґрунтування автоматизованої системи керування технологічним процесом виробництва кондитерських хлібобулочних виробів.

Для досягнення поставленої мети сформульовано наступний комплекс завдань:

1) Провести аналіз технологічних особливостей виробництва кондитерських хлібобулочних виробів.

2) Систематизувати та класифікувати основне технологічне обладнання, задіяне у виробничому циклі.

3) Дослідити принципи функціонування, структурну організацію та взаємодію комплексів технологічного обладнання.

4) Проаналізувати архітектурні та програмні рішення, що застосовуються в сучасному технологічному обладнанні.

5) Дослідити номенклатуру, характеристики та принципи інтеграції давачів і виконавчих механізмів в системі автоматизації.

6) Створити імітаційну модель системи керування в середовищі Simulink для верифікації її ефективності.

7) Запропонувати та дослідити шлях модернізації мікроконтролера MicroPC6040 шляхом інтеграції в його структуру паралельного аналого-цифрового перетворювача (АЦП), побудованого на основі полів Галуа.

Об'єкт дослідження – технологічні процеси керування роботою автоматизованої системи виробництва кондитерських хлібобулочних виробів.

Предмет дослідження – система автоматизованого керування, її програмне та апаратне забезпечення, орієнтовані на автоматизацію виготовлення кондитерських хлібобулочних виробів.

Методи дослідження. У роботі застосовано комплекс наукових методів, зокрема:

1. Методи теорії автоматичного керування – для синтезу систем регулювання.
2. Імітаційне моделювання – для побудови віртуальних моделей та перевірки їх адекватності.
3. Методи нечіткої логіки та кінематичного аналізу – для розробки інтелектуальних алгоритмів керування технологічними операціями.
4. Сучасні методології проектування програмного забезпечення та апаратних платформ – для оцінки ефективності запропонованих рішень.

Для реалізації комп'ютерного моделювання використано апарат теорії імітаційного моделювання в інтегрованому середовищі Matlab/Simulink. Візуалізація та аналіз отриманих даних проводилися за допомогою інструментарію MS Excel та MatCad.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що вперше запропоновано вдосконалення мікроконтролерної системи керування хлібобулочним виробництвом шляхом впровадження паралельного аналого-цифрового перетворювача, реалізованого в базисах Галуа. Це рішення дозволяє досягти суттєвого підвищення швидкодії обробки аналогових сигналів та розширити функціональні можливості системи за рахунок реалізації механізму корекції одиночних помилок, що виникають під час аналого-цифрового перетворення, на основі використання рекурентних кодових послідовностей Галуа.

Практичне значення отриманих результатів полягає у розробці комплексу структурних, алгоритмічних та апаратних рішень, готових до впровадження при створенні та модернізації автоматизованих систем виробництва кондитерських хлібобулочних виробів. Ці розробки забезпечують підвищення ефективності, надійності та точності управління виробничими процесами.

Апробації. Мулько Д.М. Автоматизована система управління технологічним процесом виробництва хлібобулочних виробів/Д.М. Мулько В.Р. Білявський К.Р. Войтович, П.В. Гуменний// АКІТ-2025.-Тернопіль.-с.62-67.

Гуменний П.В. Комп'ютерно-інтегрована мікроконтролерна система управління з виготовлення хлібобулочних виробів з використанням графічного інтерфейсу операційної системи WINDOWS/ П.В. Гуменний, Д.М. Мулько, В.Р. Білявський // ІІ Всеукраїнська науковопрактична конференція “Інноваційні підходи до розвитку технологій та економіки”.- Свалява.- 2025.- с.106-110.

1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ КОНФІГУРАЦІЇ ОБ’ЄКТА КЕРУВАННЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ЙОГО ДИНАМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ

1.1 Дослідження технологічного регламенту виготовлення кондитерських і хлібобулочних виробів

Продукція хлібопекарської галузі належить до критично важливих товарів соціального призначення, що володіє значним потенціалом для підтримання та поліпшення стану здоров'я населення. У зв'язку з цим пріоритетним завданням виробників хлібної продукції стає стабільне функціонування виробничих потужностей та гарантоване постачання різним категоріям громадян виробів, параметри яких максимально задовольняють очікування кінцевих споживачів.

Галузь випікання хліба «становить один із ключових сегментів харчового виробництва, забезпечуючи громадян товарами першорядної важливості, які традиційно асоціюються з життям та матеріальним благополуччям. Постійна увага до діяльності галузевих підприємств та строгий контроль вартості продукції спричинили істотне погіршення прибутковості виробництва та інших параметрів результативності функціонування» [1].

Великі виробничі комплекси з випікання хліба, що виконують стратегічну місію забезпечення населення базовим продуктом харчування, протягом останньої чверті століття демонструють скорочення обсягів випуску приблизно в п'ять разів. Це супроводжується «зменшенням кількості працівників та зниженням показників прибутковості з діапазону 12,7-15,0 відсотків у дев'яностих роках минулого століття до мінімальних 0,6-2,3 відсотків у період 2015-2025 років, що критично обмежує перспективи подальшого розвитку. Подібні результати господарської діяльності зумовлені суворим регулюванням цінової політики на 70-80 відсотків хлібної продукції, трансформацією ринкової ситуації, збільшенням видатків на матеріальне та

енергетичне забезпечення, нестабільністю параметрів якості вихідної сировини (передусім борошняної продукції), недостатньо швидким упровадженням сучасного обладнання та автоматизованих виробничих процесів. Результативний прогрес підприємств хлібопекарської сфери, їхня здатність конкурувати на ринку можливі виключно за умови застосування інноваційних виробничих методик, заснованих на використанні новітнього апаратного забезпечення та програмних рішень, що уможливлюють створення продукції вищої якості у більших обсягах при зменшених витратах ресурсів» [2].

Застосування сучасних печей для випікання дає можливість повної автоматизації виробничих об'єктів, де технологічні операції здійснюватимуться без залучення персоналу, а працівник лише встановлює початкові параметри випікання та контролює коректність роботи устаткування. Автоматизовані комплекси керування пекарськими печами забезпечують безупинний моніторинг та прецизійне налаштування експлуатаційних характеристик обладнання, зокрема теплового режиму в робочій камері, тяги в топковому просторі, а також темпу переміщення стрічкового транспортера через пекарську камеру, що гарантує високі якісні показники виготовленої продукції. Істотне значення має також ефективна економія газового палива під час експлуатації печей, оскільки вартість газу демонструє стійку тенденцію до зростання, внаслідок чого вона формує значну частку у механізмі формування вартості хлібобулочної продукції.

Виготовлення кондитерської хлібної продукції на сучасних виробничих майданчиках зазвичай реалізується через потоково-механізовані комплекси, що інтегрують різноманітні машини та виробниче устаткування в єдині технологічні процеси. Технологія створення кондитерських хлібних виробів являє собою взаємопов'язану систему операційних процедур та перетворень, призначених для переробки вихідної сировини у фінальну продукцію. Виробничий цикл відзначається суттєвим обсягом продуктових потоків, що розгалужуються та зливаються, за структурною організацією

характеризується високою складністю, обмеженою непередбачуваністю, автономним характером варіювання параметрів, що дозволяє розглядати його як взаємопов'язану та взаємозалежну систему.

Виробничий процес намагаються організовувати за найбільш ефективним сценарієм, враховуючи можливі відхилення та спираючись переважно на логічний підхід і накопичений практичний досвід, при цьому важливу роль відіграє професійна інтуїція розробників технологій та експлуатаційного персоналу.

Технологічний цикл виготовлення хліба та кондитерської продукції як комплексна система об'єднує сукупність послідовних фізичних, структурних, колоїдних, біохімічних, мікробіологічних та інших процесів і трансформацій, що відбуваються при перетворенні сировинних матеріалів на хлібобулочні та кондитерські вироби.

Сучасна галузь випікання оснащується найефективнішим устаткуванням та прогресивними технологічними рішеннями, що базуються на потужній виробничій інфраструктурі.

Виробництво здійснюється безперервним способом, тобто технологічний процес характеризується постійною структурою трудових операцій, на робочих місцях повторюються ідентичні процедури, пов'язані з виготовленням однотипної продукції із застосуванням спеціалізованого апаратного та програмного забезпечення. Для такого виробництва типовими є значні виробничі масштаби, обмежений асортимент продукції, високий рівень механізації та автоматизації, а перетворення сировини на готові вироби відбувається в єдиному безперервному циклі. Така організація виробничого циклу уможливлює створення виробництва із завершеним технологічним ланцюгом - від приймання сировинних матеріалів до відправлення готової продукції. На виробництві функціонує єдина система забезпечення якості та контролю протягом усього технологічного ланцюга від якості сировини, що підготовлена до переробки, до якості фінальної продукції.

Загальна конфігурація виробництва (цехові підрозділи, виробничі ділянки для виготовлення продукції, складські приміщення, лабораторні комплекси, ремонтні майстерні) та їх масштаб і склад формують виробничу структуру підприємства. Базовим найменшим структурним елементом виробництва є виробнича ділянка. Розрізняють такі категорії цехів: обслуговуючий, основний, допоміжний.

Допоміжні цехові підрозділи і виробничі ділянки здійснюють діяльність, що сприяє формуванню умов для нормального ефективного функціонування виробництва.

Основний цех являє собою виробничий підрозділ, в якому реалізується технологічний цикл переробки, що забезпечує трансформацію вихідної сировини у фінальну продукцію (борошняної маси - у тістову заготовку, тістової заготовки - у готовий хлібний виріб), що визначає головне функціональне призначення виробничого комплексу.

Вся структурна організація виробництва, включаючи виробничі відділення на заводському майданчику, характеризується тісними взаємозв'язками. Сировинний матеріал трансформується у готовий продукт шляхом етапної послідовної передачі з однієї виробничої зони на наступну. Продуктивність визначається значною кількістю здійснених операцій у виробничому циклі.

Технологічний цикл «створення хлібобулочної продукції охоплює наступні ключові етапи та операційні процедури: підготовку сировинних матеріалів до виробництва, дозування рецептурних складових, замішування, процес бродіння та обробку тістової маси; формування заготовок, розстоювання та гідротермічну обробку тістових напівфабрикатів; випікання, охолодження й упаковування кондитерських хлібних виробів. Основні процедури технологічного виробництва кондитерської хлібної продукції представлено на рисунку 1.1.» [4].

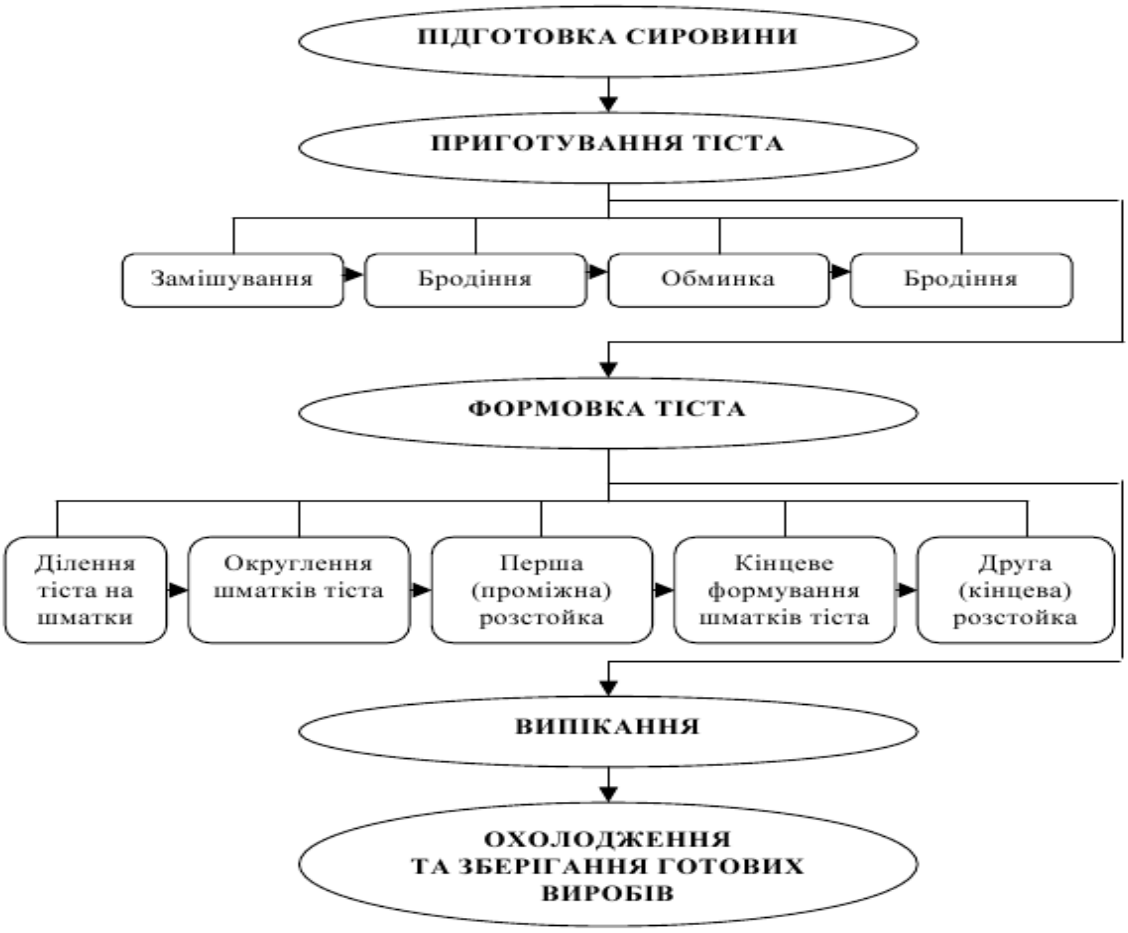


Рисунок 1.1 − Технологічний цикл виготовлення кондитерських хлібних виробів

На підприємстві пекарського профілю виробництво найчастіше зорієнтоване на випуск широкої номенклатури кондитерських хлібних виробів відповідно до потреб споживачів. Тому хлібну продукцію виробляють із використанням універсального устаткування, що забезпечує оперативну зміну типу продукції, що випускається, та швидке регулювання характеристик технологічного циклу.

Підготовка сировинних матеріалів до виробництва полягає у зберіганні, змішуванні, аерації, просіюванні та дозуванні борошняної продукції, підготовці питної води, приготуванні й температурній обробці розчинів солі і цукру, дріжджового розщину.

Приготування тістової маси полягає у дозуванні та змішуванні рецептурних інгредієнтів. У процесі змішування тістова маса відбувається

інтенсивна механічна дія, внаслідок чого в структурі суміші активно змішуються дрібні повітряні порожнини. Одночасно волога виробництва гідролітичне розм'якшення сухих компонентів, що погіршує формування еластичного, пористого клейковинного каркаса майбутнього тіста. Тривалість такої стадії може змінюватися від однієї до двох хвилин, а оптимальний температурний інтервал підтримується в межах 28–30 °С. . Процес «бродіння тістової маси зумовлений активною життєдіяльністю дріжджових культур, а також молочнокислих та інших видів корисної мікрофлори. Упродовж цієї стадії в тісті розгортаються складні мікробіологічні й ферментативні реакції, які поступово змінюють його реологічні та фізичні властивості. Внаслідок інтенсивної газоутворювальної діяльності мікроорганізмів у тій формі формується розгалужена капілярно-пориста система, стабілізована пружно-пластичним клейковинним каркасом. Пори заповнюються газовою сумішшю, що включає вуглекислий газ, водяну пару, літні спиртові фракції та інші характерні продукти біохімічного розщеплення субстратів. Паралельно відбувається накопичення спеціальних ароматичних і смакових речовин, які згодом заповнюють органолептичні параметри та якість готових хлібобулочних виробів»[5].

Для отримання виробів високої якості застосовується двостадійний метод приготування тістової маси. Першою стадією передбачається приготування опарної заготовки з суміші дріжджової суспензії, частини води й 40-70 відсотків борошна, передбаченого рецептурою. Після ферментації опари відбувається друга стадія: дозують решту інгредієнтів, знову перемішують і піддають бродінню, отримуючи готове тісто. Такий метод вимагає меншої витрати дріжджів і дозволяє краще враховувати хлібопекарські характеристики борошна. Тривалість бродіння опарної заготовки – 2-4 години, тістової маси – 1-2 години за того ж температурного режиму. Густина тіста змінюється від 1200 до 500 кг/м³ наприкінці бродіння.

За безопарного методу тісто замішують в один прийом з усієї сировини (за винятком жирових, цукрових, яєчних компонентів, які додають наприкінці бродіння). Тривалість бродіння досягає 2,5 години.

Формування тістової маси здійснюється за рахунок механічної обробки тістових напівфабрикатів з метою надання їм певної конфігурації (кулястої, циліндричної, сигароподібної). Округлення порцій тіста необхідне для інтенсивного їх перемішування у всьому об'ємі, згладжування нерівностей і створення плівки на поверхні заготовки. Плівка формується з шару підсушеного тіста і перешкоджає виходу газових сполук під час попереднього розстоювання, а також забезпечує рівномірну пористість м'якушки під час випікання.

Вистоювання полягає у «витримуванні тістових напівфабрикатів після формування в камерах протягом 20-50 хвилин за температури 30-34 градуси Цельсія та відносної вологості повітряного середовища 60-75 відсотків. Протягом попереднього вистоювання відбувається ослаблення внутрішньої напруги, яка виникла в тісті під час розподілу на порції, і відновлення частково зруйнованих ланок клейковинного структурного каркаса тістової маси. Протягом остаточного вистоювання відбувається бродіння тіста в кожній тістовій заготовці, яке необхідне для насичення вуглекислим газом, видаленим під час формування. Протягом вистоювання формується пориста структура м'якушки, об'єм збільшується в 1,4-1,5 разу. У результаті інтенсивного газоутворення щільність тістової маси знижується приблизно на 30–40 %. Тістові заготовки отримують рівномірну, гладку та пружну поверхню, що негативно про оптимально сформовану структуру. Щоб уникнути розривів під час випікання, на верхній поверхні роблять надрізи» [6].

Гідротермічна обробка полягає в обробці тістових напівфабрикатів, що знаходяться в пекарній камері, за допомогою зволожувального пристрою водяною парою за температури 100-160 градусів Цельсія та відносної вологості 70-85 відсотків протягом 2-3 хвилин.

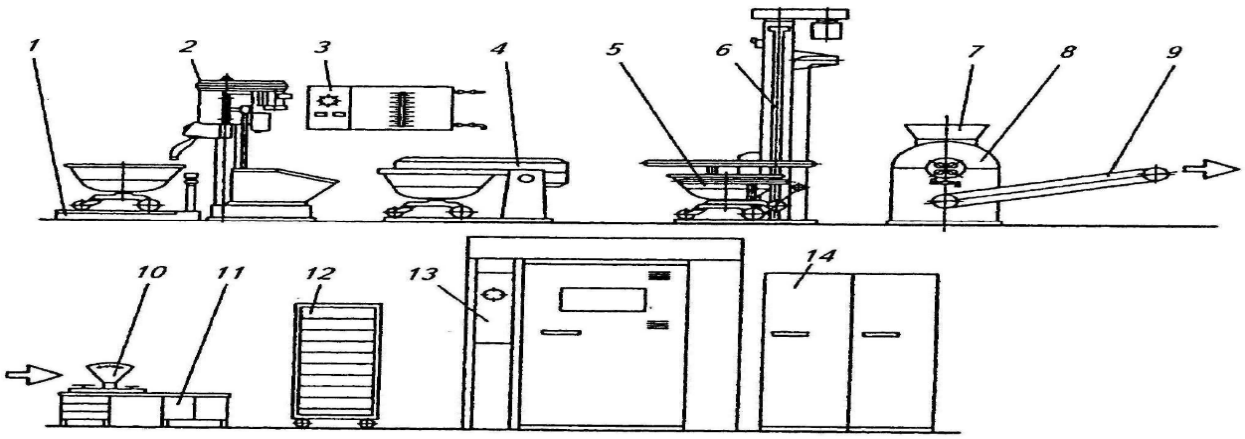
Випікання хлібної продукції проводиться в умовах змінного температурного режиму печі від 250 до 150 градусів Цельсія при зниженій вологості повітряного середовища протягом 10-60 хвилин залежно від рецептури й маси порцій хлібних виробів.

Охолодження і упаковування хлібобулочної продукції. Випечені вироби вивантажують із форм на конвеєрну систему або стіл і охолоджують шляхом обдування повітрям із температурою 20 градусів Цельсія. Готова продукція вручну викладається у лотки з подальшим їх завантаженням на вагонетки і перевантаженням у спеціалізовані автомобільні фургони.

1.2 Аналіз принципів функціонування комплексів автоматизованих ліній з виготовлення кондитерських хлібобулочних виробів

Технологічна схема створення хлібної продукції охоплює наступні етапи: зберігання і підготовка сировинних матеріалів до виробництва, приготування та обробка тістової маси, випікання та зберігання хлібних виробів. Схема реалізує технологічні процеси виробництва кондитерської хлібної продукції на сучасному хлібопекарському підприємстві (рисунок 1.2).

Технологічний процес «починається з завантаження мішка борошна вручну у завантажувальну воронку просіювача (2). Просіяне борошно надходить у зважувальну діжу (5), встановлену на платформних вагах (1) типу ПВН-500 (вантажопідйомність до 500 кг). Конструкція вагів обладнана похилим під'їздом (600х750 мм) для зручного переміщення діж. Після досягнення заданої маси борошна, з дозатора (3) у діжу автоматично подаються відмірені порції рідких інгредієнтів, причому вода попередньо підігрівається до заданої температури. Далі діжа перекачується на платформу тістомісильного апарата (4), обладнаного місильним органом з планетарним рухом, де відбувається заміс тіста.



1 – платформні вагові пристрої; 2 – просіювальний апарат; 3 – дозуючий пристрій для води; 4 – тістомісильний агрегат; 5 – підкатна діжа; 6 – діжоперекидальний механізм; 7 – завантажувальна воронка; 8 – тістоподільний апарат; 9 – конвеєрна система; 10 – контрольні вагові пристрої; 11 – виробничий стіл; 12 – стелажний візок; 13 – хлібопекарська піч; 14 – розстоювальна шафа

Рисунок 1.2 – Лінія процесу виготовлення хліба

Після завершення замісу, діжоперекидальний механізм (6) піднімає та перевертає діжу, вивантажуючи готове тісто у завантажувальну воронку тістоподільного апарата (8). Подільник тіста формує окремі шматки, які потрапляють на стрічковий конвеєр (9), а звідти — у форми на піддонах стелажного візка (12). Два такі візки по черзі направляються в розстоювальну шафу (14). Через те, що тривалість випікання (12-18 хвилин) менша за час розстоювання (~40 хвилин), один візок після розстоювання завантажується в піч (13), а другий займає його місце після випікання першої партії. Для виробництва подових видів хліба або булочно-кондитерських виробів технологічна лінія доповнюється округлювальними, закатними або збивальними машинами» [7].

На рисунку 1.3 представлено машинно-апаратурну схему комплексу малої потужності, призначеного для випуску батонів (0,45 кг) та рогаликів (0,09-0,16 кг)

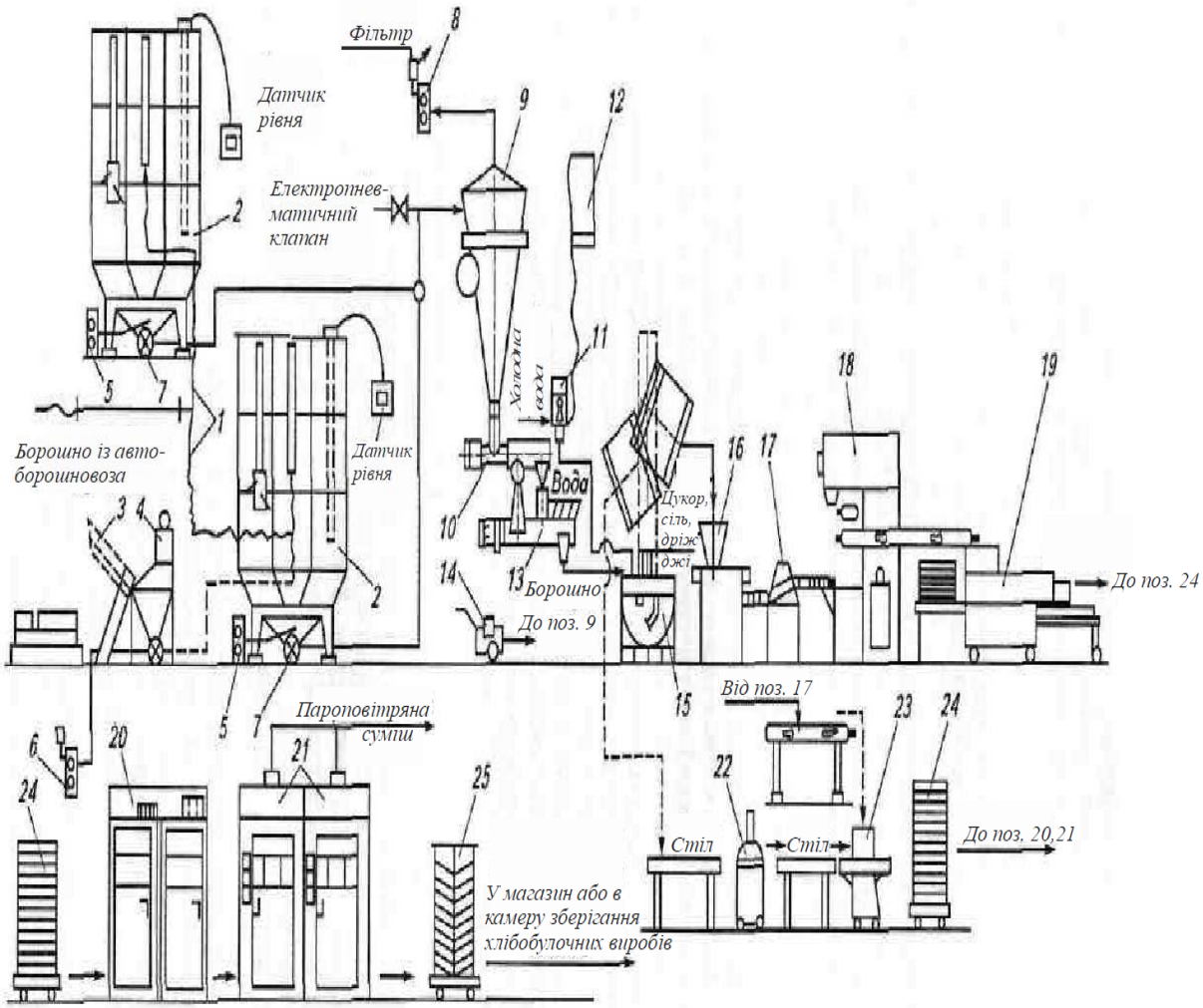


Рисунок 1.3−Схема технологічного обладнання з виготовлення хлібної продукції

До складу «технологічного комплексу (рисунок 1.3) інтегровано низку обладнання та комунікаційних елементів, серед яких: розвантажувальний рукав – 1; бункери для безтарного довготривалого зберігання борошна – 2; механізми для піднімання мішків – 3 і вивантаження борошна – 4; компресор для аерації сировини – 5; компресор 6, що забезпечує транспортування борошна до бункерів; продуктопроводи з лопатевими вузлами – 7 для забезпечення розвантаження ємностей 2; бункер-автоборошномір – 9; дозатор-просіювач – 10 (ВК-1007); бойлер – 12 (У21-ХБВ-150) для нагрівання води; автоматичний пристрій контролю подачі та температури води – 11 («Дозатерм-15»); компресор – 14; тістомісильна машина – 15 (ХПО/3 або А2-ХТЗ-6) із чотирма діжами Т1-ХТ2-Д та

діжоперекидачем А2-ХП2-Д; тістоділильна машина – 16 (А2-ХПО/5); тістоокруглювальна машина – 17 (А2-ХПО/6); шафа попереднього вистоювання – 20 (ИЕТ-75-И1); тістоформувальні машини – 19 (ХПО/9) для батонів і 23 (А2-ХПО/7) для рогаликів; шафа остаточного вистоювання – 18 (ИЕТ-76-И1); ротаційна електропіч – 21 (ИЕТ-74-И1). Також використовують десять контейнерів 25 з відповідним комплектом лотків і три візки У21-ХТЛ для їх розміщення.

Експлуатація комплексу здійснюється зміною із п’яти операторів. Борошно, що надходить у мішках, через розвантажувальний рукав 1 подається до безтарного бункера 2. Далі, завдяки розрідженню, сформованому вакуум-компресором 8, сировина транспортується у бункер-автоборошномір 9, де автоматизовано відмірюється необхідна доза. Після досягнення встановленого значення подача борошна припиняється. Надалі порціонована маса проходить просіювання через агрегат 10, розташований безпосередньо під бункером 9, та через поворотний шнек 13 потрапляє до діжі тістомісильної машини 15.

Розчини солі та дріжджова емульсія формуються окремо у спеціалізованих установках і зберігаються в ізольованих резервуарах до моменту використання. Автоматичний дозатор-регулятор температури води 11 забезпечує нагрівання та подачу рідини відповідно до заданих параметрів, після чого вода надходить у діжу. Замішування тіста відбувається у тістомісильному агрегаті 15. Після завершення процесу діжа переміщується підіймачем до завантажувальної зони тістоділильної машини 16, де тістова маса порціонується до необхідної маси заготовок. Наступний етап передбачає округлення заготовок у машині 17 та подання їх у шафу попереднього вистоювання 18, експлуатаційні умови якої стабілізовані за вологістю та температурою.

Конструктивно 18 оснащена колисковим конвеєром, кожна колиска якого містить вісім посадкових місць для заготовок. Після відповідної витримки заготовки батонів транспортуються стрічковим конвеєром до

формувальної машини 19, а рогаликові – до машини спеціалізованого формування 23. Сформовані вироби автоматично розміщуються на перфорованих листах із жолобами, що подаються механізованим ланцюговим конвеєром з магазину тістоформувальних агрегатів.

Після викладання листи вручну завантажують у контейнери 24 на ходовій платформі. Контейнери переміщуються до шафи остаточного вистоювання 20, розміщеної поряд із ротаційними електропечами 21. Конструктивні можливості шафи забезпечують витримку чотирьох контейнерів одночасно, що дозволяє встановлювати тривалість вистоювання удвічі більшою за час випікання. Крім зазначеного обладнання, у виробничому процесі застосовуються бойлер 12 для водопідготовки та автоклав 22 для виготовлення начинки рогаликів»[8].

На рисунку 1.4 представлено машинно-апаратурну схему лінії виробництва житнього хліба на мало потужному хлібозаводі.

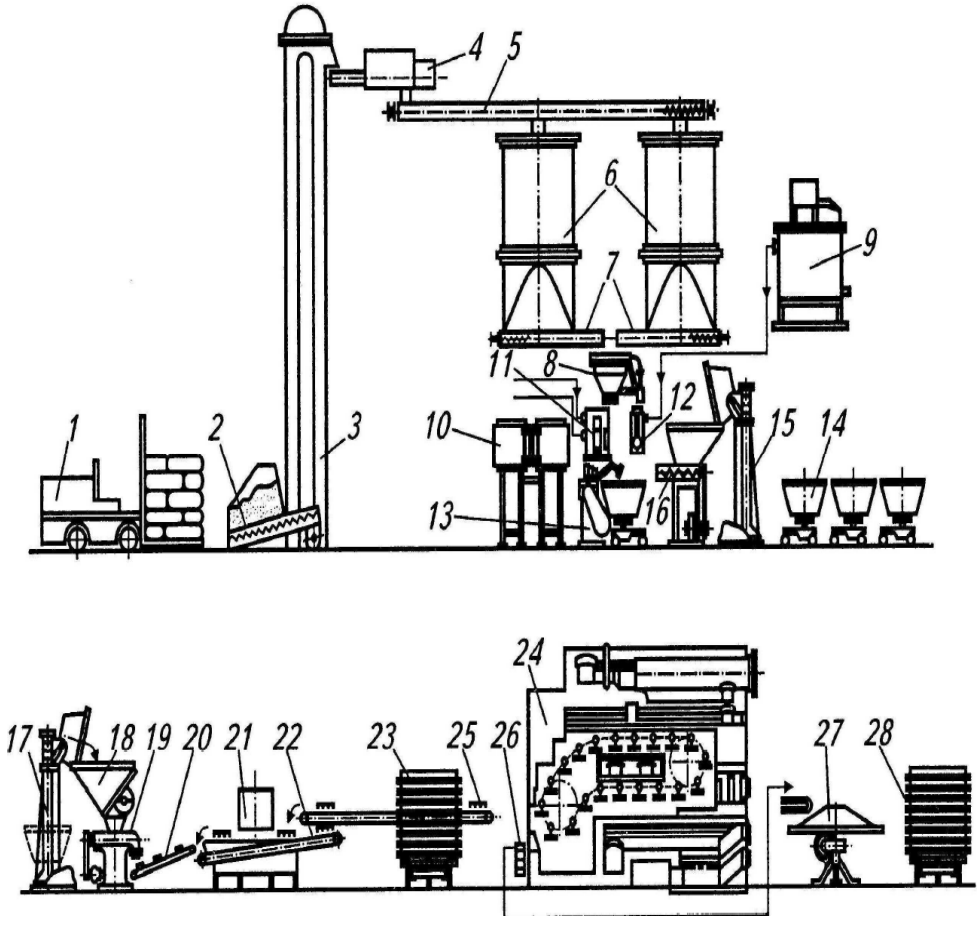


Рисунок 1.4−Машинно схема виробництва житнього хліба

Технологічний ланцюг виробництва хліба на міні-пекарні починається з підготовки основної сировини. Зберігання борошна організовано на тарному складі, де воно знаходиться в мішках, складених у штабелі. Для подальшого транспортування застосовується автозавантажувач моделі 4015М, який доставляє борошно до пропорційного борошнозмішувача МС-2. На цьому етапі здійснюється важлива операція змішування різних партій продукту для досягнення стабільного кваліметричного рівня. Далі за допомогою норії механічного типу І-10 сировина піднімається на верхні яруси, де потрапляє в просіювач ПБ-1,5 для очищення від сторонніх включень, включно з феромагнітними домішками.

Просіяне борошно розподільним шнеком направляється до виробничих бункерів ХЕ-63В, які виконують функцію буферної ємності і забезпечують зберігання від зміни до доби. Безпосередньо перед подачею у виробництво живильні шнеки транспортують борошно до автоборошноміра Ш2-ХДА для точного дозування.

Дозоване борошно надходить у підкатну діжу Т1-ХТД, встановлену на тістомісильній машині ХСР 3/2, а звідти самопливом переміщується в бачок постійного рівня. Одночасно з цим дозатори рідини Ш2-ХДБ забезпечують подачу води та інших рідких інгредієнтів згідно з рецептурою безпосередньо в діжу тістомісильного апарату. Після замішування першої фази, яка відома як закваска, діжа відкочується для попередньої ферментації. Коли закваска досягає необхідної стадії зрілості, підйомний перекидач А2-ХПД вивантажує її в спеціальний дозатор. У цьому дозаторі відбувається розподіл маси: приблизно одна третина спрямовується в одну діжу для процесу відновлення закваски, а дві третини використовуються для основного замішування тіста. Після інтенсивного замішування тісто знову проходить стадію вибродження прямо в діжі.

Дозріле тісто потрапляє під дію діжоперекидача, який вивантажує його в приймальну воронку сучасної тістоділильної машини «Кузбасс-М». Відділені шматки тіста транспортерною стрічкою подаються до апарату для

змащування форм, де вони акуратно розміщуються у підготовлені металеві форми. Заповнені форми по конвеєру подаються на спеціальний візок, який завантажують у камеру остаточного розстоювання. Після досягнення тістом необхідного об'єму та структури форми направляються в тунельну піч типу ФТЛ-2 для випікання. Після завершення термічної обробки готова продукція автоматично вибивається з форм на транспортер, а порожні форми по зворотному конвеєрі повертаються на початок циклу для повторного використання. Готовий хліб потрапляє на циркуляційний стіл типу Х-ХГ, де проводиться його технологічний огляд, відбраковка та подальше укладання в лотки контейнерів ХКЛ-18 або на візки. Візки з готовою продукцією спрямовуються до відділення для поступового остигання, а згодом — до експедиційного вузла для фінального завантаження в автомобілі.

На рисунку 1.5 наведено загальний вигляд виробничої лінії такої міні-пекарні «А» включає обладнання, що серійно випускається авторитетними закордонними виробниками, серед яких німецькі компанії «Діосна», «Вернер» та «Пфляйдерер», а також італійські фірми «Полін» та «Есмах»

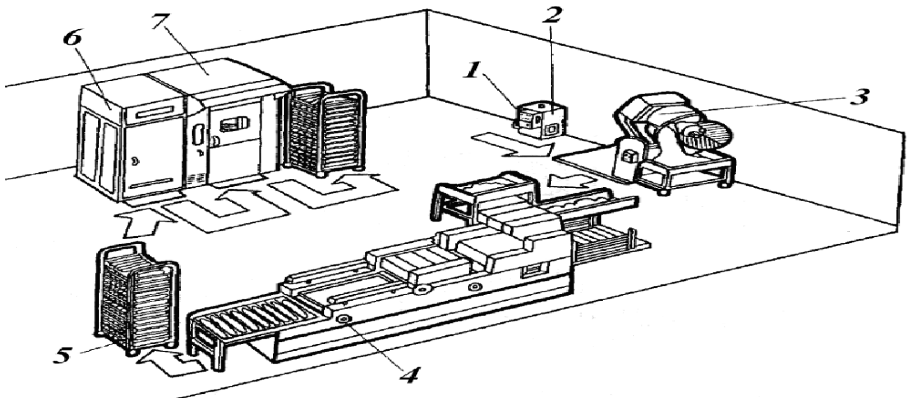


Рисунок 1.5− Загальний вигляд міні-пекарні

Автоматизований комплекс «функціонує за таким принципом: мішок з борошном вручну завантажується у завантажувальну воронку просіювального апарата, звідки очищене борошно надходить у діжу, встановлену на платформних вагах. Після зважування необхідної дози борошна (2) в діжу автоматично подаються відмірені порції рідких інгредієнтів, зокрема вода, попередньо підігріта до заданої температури (1).

Далі діжа (3) переміщується на платформу тістомісильного апарата з планетарним місильним органом для замісу тіста. Після замішування діжоперекидальний механізм вивантажує тісто у завантажувальну воронку тістоподільного аппарата (4). Подільник формує окремі шматки тіста, які потрапляють на стрічковий конвеєр, а з нього — у форми на піддонах стелажного візка (5) . Візки направляються до розстоювальної шафи (6), а після підйому — у піч (7), причому через різницю в часі між розстоюванням та випіканням використовується два візки по черзі. Для виробництва подових видів хліба чи булочних виробів лінія доповнюється округлювальними, закатними або збивальними машинами. Механізовані засоби виробництва поділяються на обладнання для транспортування та зберігання сировини, для її підготовки та дозування, для приготування тіста, для його обробки, для розстоювання та безпосередньо для випікання. Інший приклад — міні-пекарня, загальний вигляд якої включає дозатори рідин і борошна, тістомісильну машину з діжорозвантажувачем, стіл для бродіння, комплект машин для поділу та формування заготовок, візок, вистоювальну шафу та етажерну піч. Її продуктивність становить 200-600 кг за зміну, що забезпечує до 2000 осіб, а для обслуговування достатньо майстра та трьох робітників» [9].

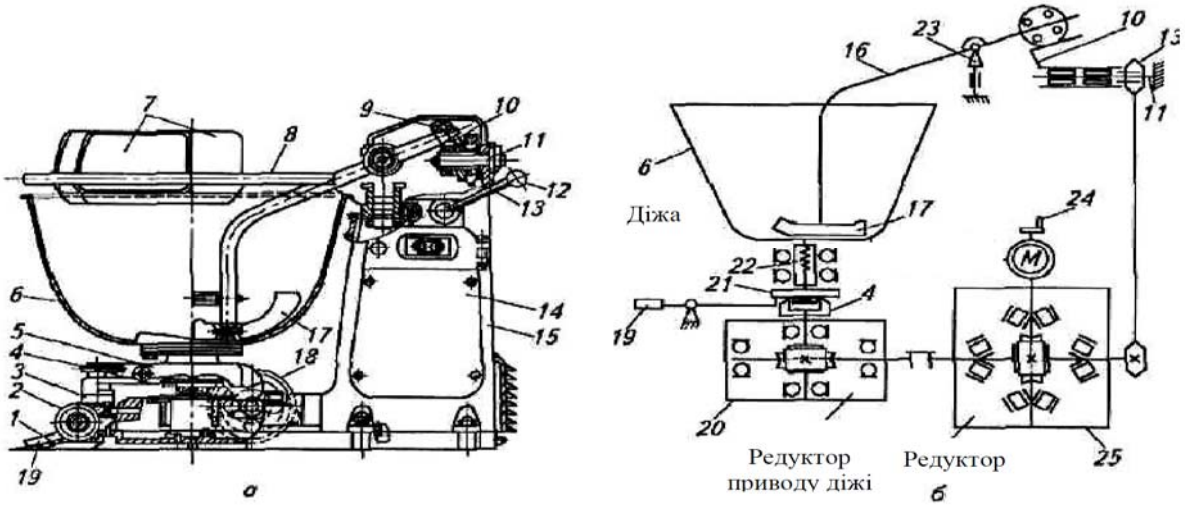
1.3. Аналіз обладнання для виготовлення кондитерських хлібобулочних виробів

Дослідження роботи автоматизованих лінійних комплексів для виробництва булочно-кондитерської продукції засвідчило, що застосування технологічного устаткування для приготування тіста, його розділення, округлення, закатування та випічки забезпечує умови для отримання високоякісних виробів.

Тістомісильна машина ТММ-1М (рисунок 1.6) використовується для замісу тіста «різноманітної густоти і складається з: фундаментальної плити 1,

рухомого візка 3, захисного кожуха 5, пересувної діжі 6, електричного двигуна 14, корпусу станини 15, робочого важеля 16 з лопаттю для місіння 17 та передавальних механізмів. Черв'ячний редуктор 25 закріплюється на фундаментальній плиті 1, причому його черв'ячний вал з'єднується через муфту з валом електричного двигуна 14. Вал черв'ячного колеса забезпечує передачу руху одночасно у двох напрямках.

Зірочка ланцюгової передачі встановлена на шліцах одного з кінців вала. Втулково-роликовий ланцюг забезпечує обертальний рух зірочки 13, розміщеної на циліндричній шийці кривошипного механізму 10, який базується на стаціонарній осі 11. Протилежний кінець вала черв'ячного колеса через проміжний валик транслює обертання до другого черв'ячного редуктора 20, встановленого на фундаментальній плиті 1.



а) б)

а- пристрій, б-функціональна схема.

Рисунок 1.6 – Машина тістомісильна ТММ-1М

Ротація діжі 6 від другого редуктора реалізується за допомогою диска 4 з центральним квадратним отвором, куди входить квадратний виступ цапфи діжі 21. Під впливом пружини 22 виступ цапфи заходить у дисковий отвір. При монтажі та розвантаженні діжі педаль 19 підводить квадратну частину цапфи.

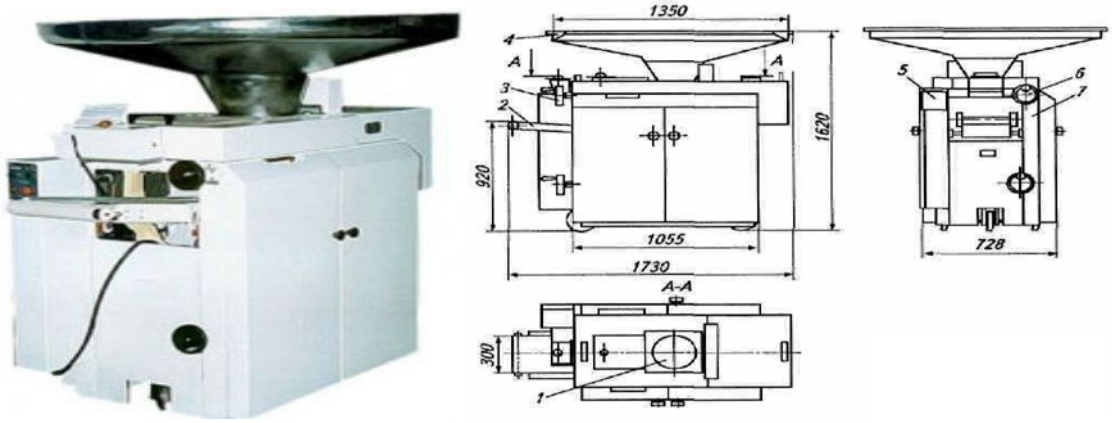
Передача руху робочому важелю 16 з лопаттю для місіння 17 від кривошипа 10 відбувається через кульовий сферичний підшипник 9. Його внутрішня обойма напресована на торець короткого плеча важеля 16, тоді як зовнішня розташована в кривошипному отворі 10. Сферичне потовщення розділяє важіль 16 на дві частини: коротку пряму та подовжену, вигнуту під 118° і оснащену місильною лопаттю 17. При роботі плечі важеля 16 формують конічні траєкторії. Вершини цих конусів співпадають з точкою опори важеля, якою виступає шарнір 23 – центр обертання. Для оптимального перемішування тістової маси вісь ротації лопаті 17 має зміщення відносно осі обертання діжі» [10].

У комплектацію машини входять три змінні діжі. Візок 3 з діжею закріплюється на фундаментальній плиті за допомогою трьох циліндричних штирів, що входять у спеціалізовані отвори візкового корпусу. Візок 3 оснащений трьома поворотними колесами 18 і 2. Для запобігання переміщенню діжі при транспортуванні візка виробничим цехом, у його корпусі вбудовано спеціальний фіксуючий механізм, що після повороту діжі на заданий кут утримує її у стаціонарному стані. Щоб місильний важіль не перешкоджав встановленню та зніманню діжі, його піднімають вручну маховиком 24, змонтованим на валу електромотора 14. Доступ до маховика забезпечується через дверцята на боковій стінці порожнистого корпусу станини.

Для запобігання виплескуванню тістової маси з діжі в процесі замісу передбачені захисні заслінки 7. Каркасна конструкція із заслінками шарнірно з'єднана важелем 8 зі станиною 15. Управління заслінками (підйом і опускання) здійснюється вручну спеціальною рукояткою 12. Під час замішування заслінки опускаються донизу, щільно охоплюючи діжу. Машина обладнана блокувальною системою, яка деактивує привідний механізм при підйомі захисної огорожі та за відсутності візка з діжею на станині й фундаментальній плиті.

Тістоділильний агрегат А2-ХПО/5 (рисунок 1.7) застосовується для об'ємного порціонування тістової маси з пшеничного борошна на заготовки масою від 0,09 до 0,9 кг, що дозволяє отримати штучні вироби із заданими ваговими параметрами.

У конструктивному плані агрегат включає такі основні функціональні елементи: опорна станина 7, механізм для поділу 1, завантажувальна воронка 4 для сировинного матеріалу, транспортерна стрічка 2, механізм припудрювання борошном 3, панель управління 5, комплексна мастильна система, а також силовий привід із передавальними механізмами.



а б

а- загальний вигляд пристрою, б- габаритні розміри пристрою,

Рисунок 1.7 – Машина тістоділильна А2-ХПО/5

Процес порціонування розпочинається з надходження тіста із завантажувальної воронки 4. Нагнітальний поршневий механізм забезпечує примусове транспортування тістової маси до камери поділу 1, де відбувається її відрізання за допомогою ножа-заслінки. При зворотному переміщенні нагнітального поршня тістова маса заповнює дозувальну кишеню на рухомій платформі механізму дозування, що супроводжується переміщенням дозувального поршня. Опускання платформи призводить до відсікання тістової заготовки певної маси, яка далі виштовхується дозувальним поршнем на транспортерну стрічку 2.

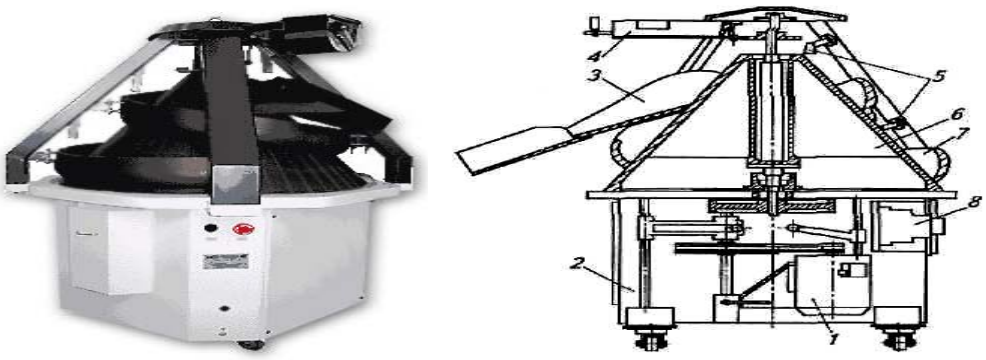
Коригування маси тістових заготовок відбувається через зміну амплітуди руху дозувального поршня за допомогою регулювального

пристрою 6. Це забезпечує можливість оперативного налаштування об'єму тіста, що нагнітається поршнем до дозувальної кишені, визначаючи таким чином бажану масу штучної продукції.

З метою запобігання прилипання тіста до транспортерної стрічки 2 використовується механізм припудрювання борошном 3, який з певною періодичністю розподіляє борошно по її робочій поверхні. Стабільна робота поділювального механізму 1 гарантується мастильною системою, що складається з: резервуара для мастила, плунжерного насосного агрегату, мережі мастилопроводів та ємності для накопичення використаного мастильного матеріалу.

Виробнича потужність обладнання регулюється (має три ступені) через установку шківів з різними діаметральними розмірами. Силовий привід головного робочого вузла забезпечується електромотором з потужністю 1,1 кВт. Привід транспортерної стрічки здійснює окремий електромотор потужністю 0,37 кВт через клинопасовий та ланцюговий передавальні механізми. Електротехнічне оснащення агрегату забезпечує централізоване керування електроприводами, попередження про критичний рівень мастила та аварійне вимкнення електроприводу при зніманні захисних конструкцій.

Тістоокруглювальний агрегат А2-ХПО/6 (рисунок 1.8) використовується для формування сферичної форми порціонованих заготовок з пшеничного тіста масою 0,09...0,9 кг. Конструкція включає корпусну частину 2, силовий привід 1, конічний елемент 6, спіральний механізм 7, пару пристроїв для підсипання борошна 4, повітродувну систему 5, жолоб 3, електротехнічне обладнання 8. Корпусна частина 2 містить базову платформу, несучий каркас, чотири поворотні опорні колеса. Силовий привід 1 містить електромотор, двоступеневу клинопасову трансмісію, проміжну опорну конструкцію, вал з закріпленим чавунним конусом, зовнішня поверхня якого має поздовжні рифлені канавки [11].



1 – силовий привід; 2 – корпусна частина; 3 – жолоб; 4 – пристрої підсипання борошна; 5 – повітродувна система; 6 – конічний елемент; 7 – спіральний механізм; 8 – електротехнічне обладнання

Рисунок 1.8 – Тістоокруглювальний агрегат А2-ХПО/6

Спіральний механізм 7 складається з семи секційних елементів, до останнього шарнірно приєднано жолоб 3, який може займати дві позиції: при нижній позиції тістова заготовка переміщується по жолобу, при верхній – проходить під ним без контакту. Секційні елементи формують два спіральні канали. Звідки з першого спірального каналу, сформованого трьома секціями, тістові шматки переміщуються до другого каналу. Робочі площини секцій мають фторопластове лакове покриття. Кожен секційний елемент фіксується до каркасу парою гвинтів і оснащений чотирма установочними гвинтами для коригування розташування секцій.

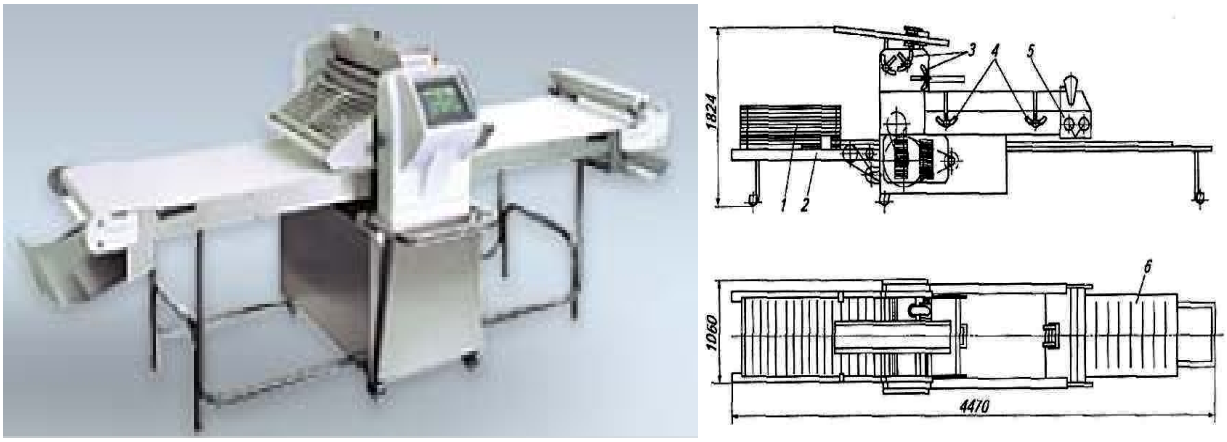
Пристрій підсипання борошна 4 включає корпусну оболонку та сито. Сито з дротяної сітки здійснює горизонтальний зворотно-поступальний рух. Один пристрій підсипання борошна 4 встановлено над зоною вивантаження тістових заготовок, другий – під кутом 90° щодо першого. Повітродувна система 5 складається з вентиляційного механізму (двигун з крильчатим колесом), нагрівального елемента, повітропроводів і сопел, змонтованих на каркасі над спіральним механізмом. Електротехнічне обладнання 8 забезпечує контроль роботи силового приводу машини та вентилятора, активацію нагрівальних елементів під час обдування заготовок.

При функціонуванні агрегату тістові шматки від поділювальної машини надходять на нижній рівень спірального механізму 7. Під впливом

ротації конічного елемента 6 заготовки піднімаються вздовж спіралі, набуваючи сферичної конфігурації, і через жолоб 3 транспортуються на конвеєр для подальшої подачі до камери попереднього розстоювання.

Пристрої підсипання борошна 4 та повітродувна система 5 запобігають потенційному прилипанню тіста до спірального механізму 7 і конічного елемента 6. Застосування одного чи обох пристроїв 4, а також повітродувної системи 5 з підігріванням або без нього визначається технологічними вимогами. Інтенсивність подачі борошна для припудрювання налаштовується вручну через зміну амплітуди коливального руху сита.

Тістозакатний агрегат ХПО/9 для батонних виробів [12] застосовується для формоутворення тістових заготовок при виробництві батонів вагою 450 г з подальшим їх розміщенням на профільовані металеві лотки для наступного розстоювання та випікання. Агрегат ХПО/9 (рисунок 1.9) включає такі ключові вузли: розкочувальний механізм із синхронізаційним посадочним пристроєм, крокувальний транспортер 2 з транспортером для листів 1 та приймальний транспортер 6 для тістових заготовок.



1 – транспортер для листів; 2 – крокувальний транспортер; 3, 4 – регулювальні рукоятки; 5 – поворотні заслінкові механізми; 6 – приймальний транспортер.

Рисунок 1.9 – Тістозакатний агрегат ХПО/9 для батонних виробів

Розкочувальний механізм містить пару стрічкових транспортерів для приймання тістових заготовок та їх подачі на попередню формовку, верхню

та нижню пари розкочувальних валів, верхній і нижній стрічкові транспортери попередньої формовки заготовок та стрічковий транспортер фінального формування з формувальною платформою. Транспортери оснащені суцільними тканинними стрічками без швів. Ширина стрічки транспортера приймання тістових заготовок становить 240 мм, інших транспортерів – 600 мм. Проміжок між розкочувальними валами та транспортерами попередньої формовки налаштовується вручну за допомогою трьох спеціалізованих рукояток 3, а розташування формувальної платформи відносно транспортера фінального формування – за допомогою двох рукояток 4.

Механізм розміщення тістових заготовок на металеві листи 1 включає дві пари поворотних заслінкових механізмів 5. Перша пара активується під впливом ваги тістових заготовок, друга – через мотор-редуктор. Механізм розміщення синхронізований з приводом транспортера подачі листів 1. Транспортер подачі листів 1 являє собою ланцюговий транспортер, сформований двома валами зі зірочками, між якими натягнуто пару нескінченних ланцюгів. На ланцюгах змонтовані захватні елементи для переміщення листів. Рух робочого органу транспортера, де розташовуються листи, має переривчастий характер. Транспортування відбувається на відстань кроку, що відповідає кроку розміщення тістових заготовок на листі.

Принцип функціонування агрегату наступний. Тістові заготовки з камери попереднього розстоювання надходять на стрічку транспортера 2, далі через транспортер подачі – у проміжок між розкочувальними валами пристрою попередньої формовки. Тістовий пласт, потрапляючи між верхнім та нижнім транспортерами, проходить попереднє формування у циліндричну рулонну форму. Надання заготовці фінальної конфігурації відбувається між верхньою гілкою транспортера фінального формування та формувальною платформою. Сформована заготовка розміщується механізмом викладання у комірки лотка, після чого автоматично здійснюється переміщення лотка на крок комірки. Завантаження порожніх лотків у транспортер 1 та

вивантаження лотків, наповнених тістовими заготовками, виконуються вручну.

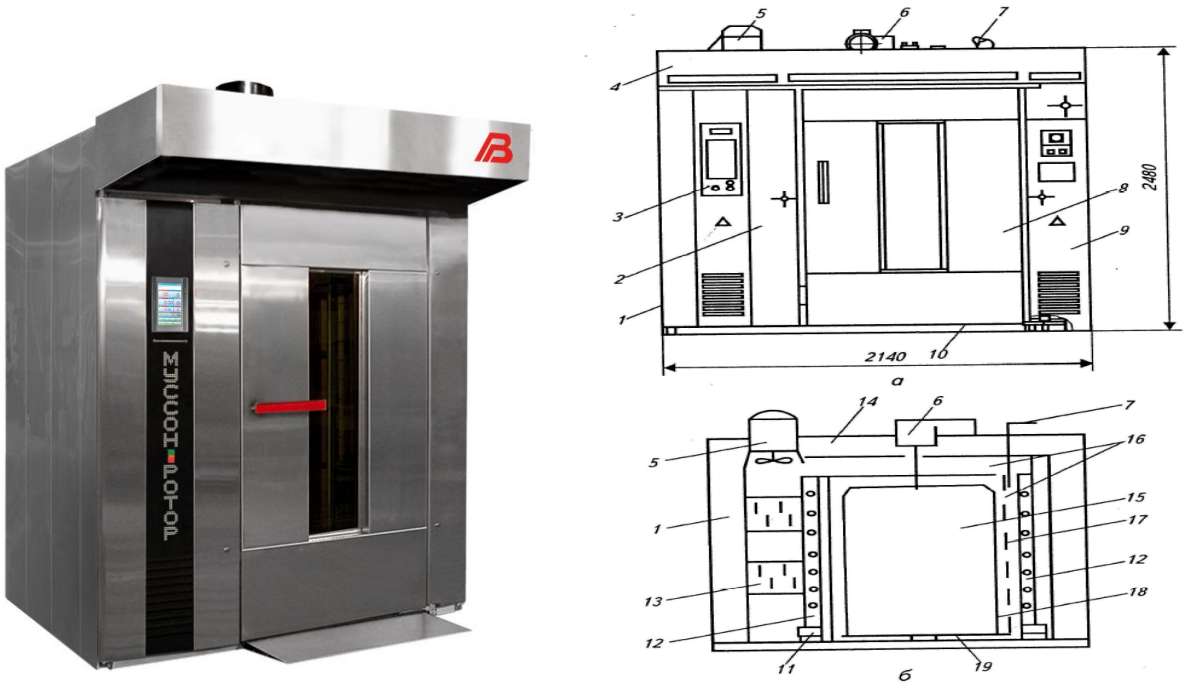
Електрична ротаційна конвективна піч «Муссон-ротор 99К» (рисунок 1.10) [13] застосовується для випікання різноманітного асортименту хлібобулочної та борошняної кондитерської продукції на хлібопекарських підприємствах та пекарнях. Конструкція печі включає несучий каркас 1 з двошаровою теплоізоляційною системою, обшитий панелями, всередині якого розташовані випікальна камера, камера теплообмінного апарату з блоками трубчастих електричних нагрівальних елементів (тен), контур (канали) примусового повітрообігу 16, парогенераційні пристрої 12, системи парового зволоження, панелі електротехнічного оснащення 2 та 9.

Піч оснащена системою управління на базі мікропроцесорного контролера 3, що гарантує відтворення всіх технологічних параметрів процесу випікання в автоматизованому режимі. Повітрообіг випікальної камери забезпечується вентилятором 5, змонтованим на покрівлі печі та призначеним для виведення парової фази та природного повітрообміну.

Всередині випікальної камери встановлена обертова платформа 19 з рамковою конструкцією 18, яка передає на платформу обертальний рух від силового приводу. Привідний механізм обертання платформи розміщений на покрівлі печі 14 та включає мотор-редуктор, зубчасту трансмісію, запобіжну муфту, привідний вал, закріплений у підшипниковому вузлі. Випікальна камера обладнана чотирма освітлювальними лампами та зачиняється дверцятами 8 з оглядовим вікном для моніторингу процесу випікання. Позиціонування дверцят відносно дверного отвору коригується як по вертикалі та горизонталі, так і за рівнем щільності притискання дверей. За панелями 2 та 9 локалізовані відсіки силового електротехнічного оснащення та панель мікропроцесорного контролера 3 управління піччю. У верхніх зонах відсіків за панелями 2, 9 встановлено по одному компактному вентилятору для охолодження електричних приладів. Зверху на козирку 4

печі змонтовано додатковий вентилятор із патрубками для відведення розігрітого повітря з-під козирка до витяжної вентиляційної системи.

Випікання хлібобулочної та кондитерської продукції здійснюється в касетах хлібних форм або на подових листах, завантажених на стелажний візок. Стелажний візок закочується до камери на платформу. Для полегшення закочування стелажного візка до випікальної камери піч оснащена пандусом 10. Повітря випікальної камери відсмоктується вентилятором 5 через камеру теплообмінного апарату з блоками тенів 13 та підігрівається. Розігріте повітря нагнітається горизонтальним та вертикальним повітропроводом 16 через щілини жалюзійних заслінок 17 у випікальну камеру.



а – загальний вигляд; б – схема печі; 1 – несучий каркас; 2, 9 – панелі електротехнічного оснащення; 3 – контролер; 4 – козирок; 5 – вентилятор; 6 – привідний механізм; 7 – термоопір; 8 – дверцята; 10 – пандус; 11 – ванна; 12 – парогенераційний пристрій; 13 – теплообмінний апарат із тенами; 14 – покрівля; 15 – випікальна камера; 16 – повітропровід; 17 – жалюзійні заслінки; 18 – рамкова конструкція; 19 – обертова платформа

Рисунок 1.10 – Ротаційна піч «Муссон-ротор 99К»

Коригування рівномірності температурного режиму випікання проводиться зміною розмірів щілин жалюзійних заслінок. Для підвищення

інтенсивності випікання у верхній або нижній зоні випікальної камери необхідно збільшити щілини жалюзійних заслінок у цих зонах камери. Для рівномірного випікання стелажний візок здійснює обертальний рух. При випіканні продукції з високим вмістом цукрових компонентів рекомендується активувати режим реверсивного обертання стелажного візка.

Контролер управління разом із термоопором 7 (термопарою), пускорегулювальною апаратурою, блоками тенів та системою парового зволоження забезпечує функціонування печі в автоматизованому режимі за запрограмованими алгоритмами. Програмні алгоритми з параметрами нагрівання та випікання задаються через панель управління контролера.

2. ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ, ПРИЗНАЧЕНІ ДЛЯ КОНТРОЛЮ, ОБЛІКУ, РЕЄСТРАЦІЇ ТА РЕГУЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ КОНДИТЕРСЬКОГО ХЛІБОПЕКАРСЬКОГО ВИРОБНИЦТВА

2.1 Дослідження роботи контролера MicroPC 6040 лінії виготовлення кондитерських хлібобулочних виробів

Програмовані логічні контролери серії MicroPC 6040 представляють собою сучасне технічне рішення для побудови високоефективних систем автоматизованого керування технологічними процесами хлібопекарського виробництва. Дані контролери характеризуються оптимальним співвідношенням функціональних можливостей та вартості, що робить їх привабливим рішенням для підприємств малої та середньої потужності.

Контролер MicroPC 6040 виконаний у модульній архітектурі, що складається з центрального процесорного модуля та периферійних модулів введення-виведення. Конструктивно система реалізована у вигляді двох функціональних панелей. Основна панель контролера містить центральний процесорний блок, модулі пам'яті, інтерфейсні модулі та блок живлення. З'єднувальна панель забезпечує комутацію сигналів від датчиків та виконавчих механізмів до основної панелі. Габаритні параметри кожної панелі становлять 800×800×200 мм, що дозволяє розміщувати контролер у стандартних промислових шафах. Комутація між панелями здійснюється за допомогою екранованих кабелів з роз'ємними з'єднаннями типу DB-37 та DB-25, що забезпечує високу завадостійкість та можливість швидкого демонтажу обладнання при проведенні модернізації або технічного обслуговування [14].

Процесорний модуль контролера базується на 32-розрядному RISC-процесорі з тактовою частотою 200 МГц. Оперативна пам'ять становить 64 МБ SDRAM з можливістю розширення до 256 МБ. Енергонезалежна пам'ять програм реалізована на базі 4 МБ Flash-пам'яті. Час виконання логічних

операцій складає 0,1 мкс, а час виконання операцій з плаваючою комою становить 0,5 мкс. Модулі введення-виведення включають 32 канали дискретних входів напругою 24 В постійного струму та 32 канали дискретних виходів з аналогічною напругою і струмом навантаження до 0,5 А. Аналогові входи представлені 16 каналами з діапазоном 0-10 В або 4-20 мА та розрядністю АЦП 12 біт. Аналогові виходи налічують 8 каналів з аналогічним діапазоном та розрядністю ЦАП 12 біт. Система також оснащена чотирма швидкими лічильниками з частотою до 100 кГц.

Комунікаційні можливості контролера включають вбудований інтерфейс PPI для з'єднання з програматорами та операторськими панелями, інтерфейс MPI для побудови мереж з декількох контролерів, підтримку протоколу PROFIBUS-DP для інтеграції в розподілені системи керування, інтерфейс AS-i для підключення простих датчиків та виконавчих механізмів, а також Ethernet-інтерфейс для інтеграції в корпоративні мережі та системи диспетчеризації. Робочий діапазон температур становить від -10°C до +55°C при відносній вологості до 95% без конденсації. Ступінь захисту корпусу відповідає класу IP54. Живлення здійснюється від мережі 220 В змінного струму частотою 50 Гц, а споживана потужність не перевищує 150 Вт. (рисунок 2.1).

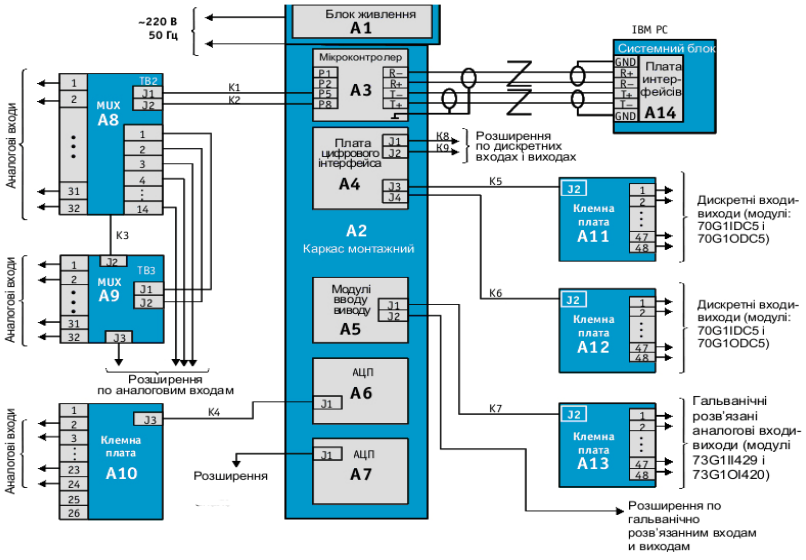


Рисунок 2.1 – Структурная схема контроллера

Система автоматизації лінії виготовлення кондитерських хлібобулочних виробів на базі контролера MicroPC 6040 має ієрархічну структуру, що включає три рівні керування. На нижньому польовому рівні розташовані первинні перетворювачі та виконавчі механізми технологічного обладнання. Датчики контролю технологічних параметрів представлені терморезистивними датчиками температури типу Pt100 для контролю температури в пекарній камері, тістомісильній машині та камері розстоювання, ємнісними датчиками рівня для контролю заповнення бункерів борошном та цукром, тензометричними датчиками для контролю ваги тістових заготовок, датчиками положення для контролю стану механізмів та позиціонування робочих органів, датчиками вологості для контролю параметрів повітря в камері розстоювання, а також датчиками швидкості обертання валів електродвигунів. На рисунку 2.2 показаний загальний вигляд вбудованого щита контролера, встановленого на робочих станціях [14].

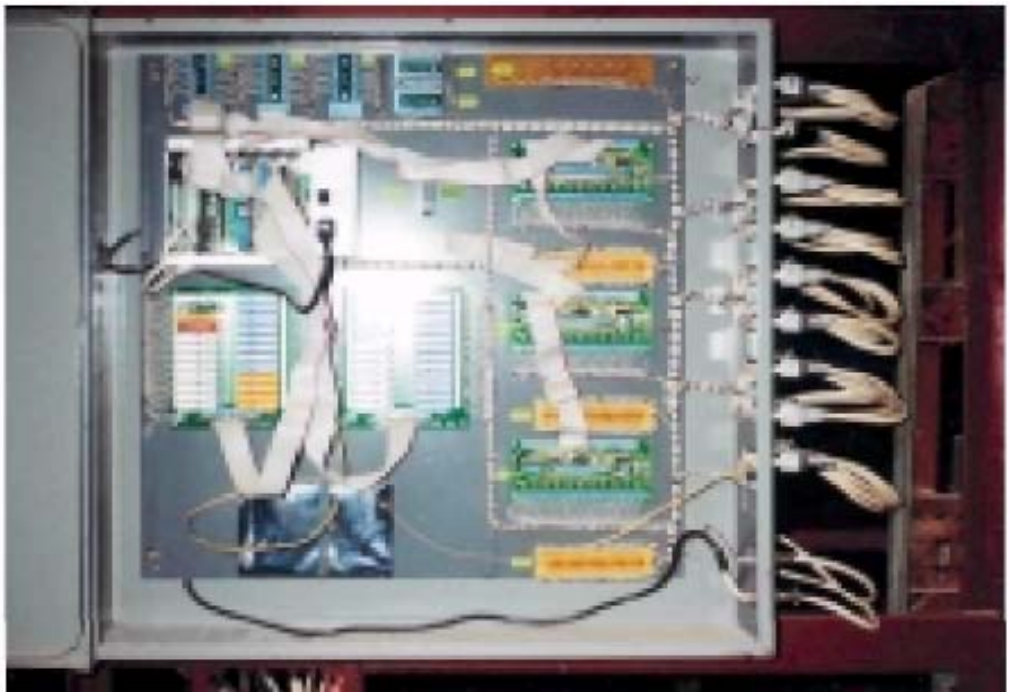


Рисунок 2.2 – Загальний вигляд щита контролера

Виконавчі механізми включають електродвигуни змінного струму з частотним регулюванням для приводу тістомісильних, тістоділильних та

тістозакатних машин, електромагнітні клапани для керування подачею води, парою та стисненим повітрям, електричні нагрівачі пекарної камери з тиристорним регулюванням потужності, пневмоциліндри для переміщення заслінок та затворів, а також сервоприводи для точного позиціонування робочих органів.

На середньому рівні розташований контролер MicroPC 6040, який виконує функції збору інформації від датчиків, обробки даних за алгоритмами керування та формування керуючих впливів на виконавчі механізми. Контролер реалізує функції технологічного керування, що включають стабілізацію температури в пекарній камері з точністю ±2°C, підтримання заданого часового циклу обробки тіста на кожній стадії технологічного процесу, синхронізацію роботи окремих машин та механізмів лінії, автоматичне дозування інгредієнтів за рецептурою, а також контроль якості виробів за зведеними параметрами, такими як температура, час обробки та вага заготовок.

Функції моніторингу та діагностики забезпечують постійний контроль справності датчиків за критерієм виходу сигналу за межі допустимого діапазону, діагностику стану виконавчих механізмів за споживаним струмом, реєстрацію подій в електронному журналі з відміткою часу, формування попереджувальних та аварійних повідомлень, а також збір статистичних даних про роботу обладнання для аналізу продуктивності. Функції захисту включають автоматичне відключення обладнання при виникненні аварійних ситуацій, блокування небезпечних режимів роботи, захист від помилкових дій оператора та резервування критичних каналів керування.

На верхньому рівні диспетчеризації розташована операторська станція на базі промислового комп'ютера з сенсорною панеллю оператора. Станція забезпечує візуалізацію технологічного процесу у вигляді мнемосхем та трендів параметрів, введення та редагування рецептур виробів, завдання режимів роботи обладнання, перегляд журналів подій та звітів про роботу

лінії, а також архівування технологічних даних для подальшого аналізу(рисунок 2.3). Зв'язок між контролером та операторською станцією здійснюється по Ethernet-мережі з використанням протоколу TCP/IP.

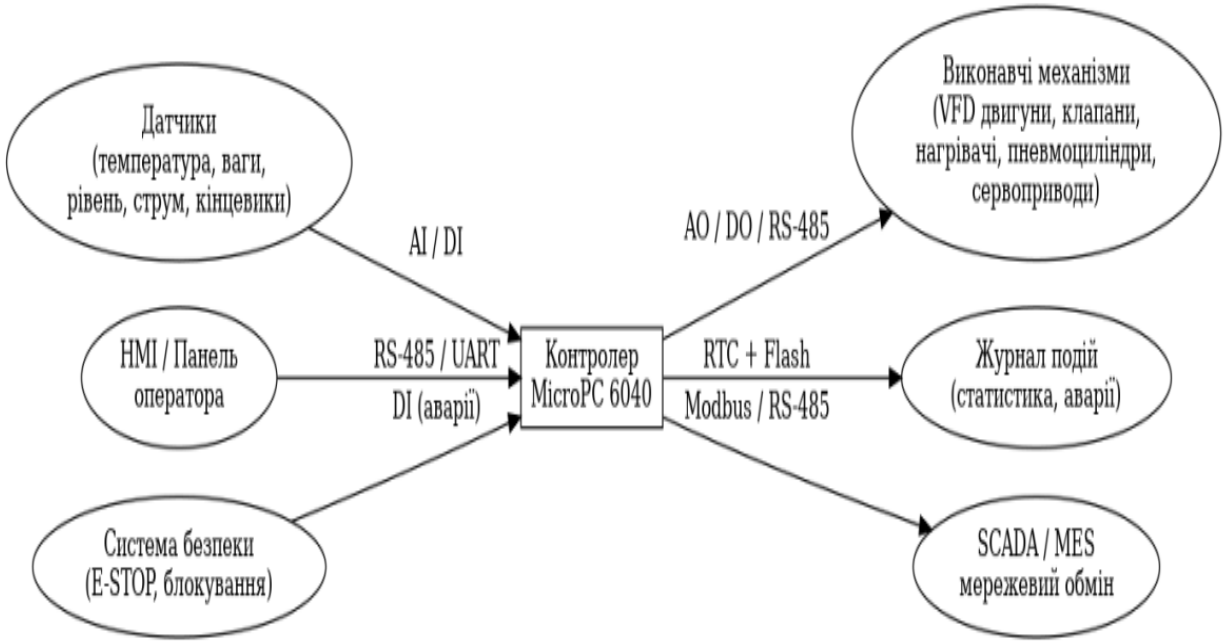


Рисунок 2.3- Функціональна схема роботи контролера MicroPC 6040 у SCADA системі пекарні

Процес замішування тіста в тістомісильній машині ТММ-1М реалізується контролером через послідовність етапів. На етапі завантаження інгредієнтів контролер керує послідовним завантаженням компонентів за рецептурою. Відкривається електромагнітний клапан подачі води, вага якої контролюється тензометричним датчиком, і при досягненні заданої ваги клапан закривається. Аналогічно дозується борошно, цукор, сіль, дріжджі та інші інгредієнти з допуском на точність дозування ±1% від заданої ваги.

На етапі замішування після завершення завантаження всіх інгредієнтів контролер виконує запуск електродвигуна обертання діжі на частоті 12 об/хв та запуск електродвигуна місильного важеля на частоті 25 об/хв. Підтримується задана швидкість обертання незалежно від навантаження за рахунок регулювання частоти живлення електродвигунів. Контролюється споживана потужність електродвигунів, оскільки зростання

потужності свідчить про формування однорідної структури тіста. Здійснюється відлік часу замішування, що становить від 8 до 12 хвилин залежно від рецептури.

На етапі вивантаження при завершенні часу замішування контролер зупиняє обертання місильного важеля та підіймає його у верхнє положення, відкочує діжу з тістом з робочої позиції та формує сигнал готовності для наступної стадії технологічного процесу. Алгоритм реалізований у вигляді послідовної функціональної схеми в середовищі програмування контролера.

Контролер забезпечує автоматичний поділ тіста на заготовки заданої маси в машині А2-ХПО/5. Алгоритм дозування передбачає, що контролер задає положення дозувального поршня в залежності від заданої маси заготовки в діапазоні від 0,09 до 0,9 кг. Нагнітальний поршень виштовхує порцію тіста в мірну кишеню, після чого ніж-відсікач відрізає порцію тіста при досягненні нижнього положення дозувального поршня. Заготовка виштовхується на транспортерну стрічку, і цикл повторюється з частотою від 40 до 60 циклів на хвилину.

Алгоритм коригування маси передбачає, що контролер періодично, кожні 10 циклів, аналізує фактичну масу заготовок за показаннями тензометричного датчика на транспортері. При відхиленні маси більше ±3% від заданої контролер автоматично коригує положення дозувального поршня. Для запобігання прилипанню тіста контролер керує механізмом підсипання борошна в циклічному режимі з тривалістю 2 секунди подачі борошна та 10 секунд паузи.

В машині А2-ХПО/6 [15] контролер реалізує керування швидкістю обертання конуса, при якому частота обертання задається в діапазоні від 200 до 250 об/хв в залежності від консистенції тіста. Керування системою підсипання борошна здійснюється таким чином, що контролер визначає необхідність використання одного або двох підсипачів в залежності від вологості тіста шляхом контролю за струмом електродвигуна. При обробці липкого тіста контролер вмикає нагрівач повітря для підсушування поверхні

заготовок. Контроль якості округлення здійснюється за часом проходження заготовки через спіраль, і при відхиленні часу більше ±10% формується попередження оператору. UML діаграма роботи контролера у машині А2-ХПО/6 представлена на рисунку 2.4.

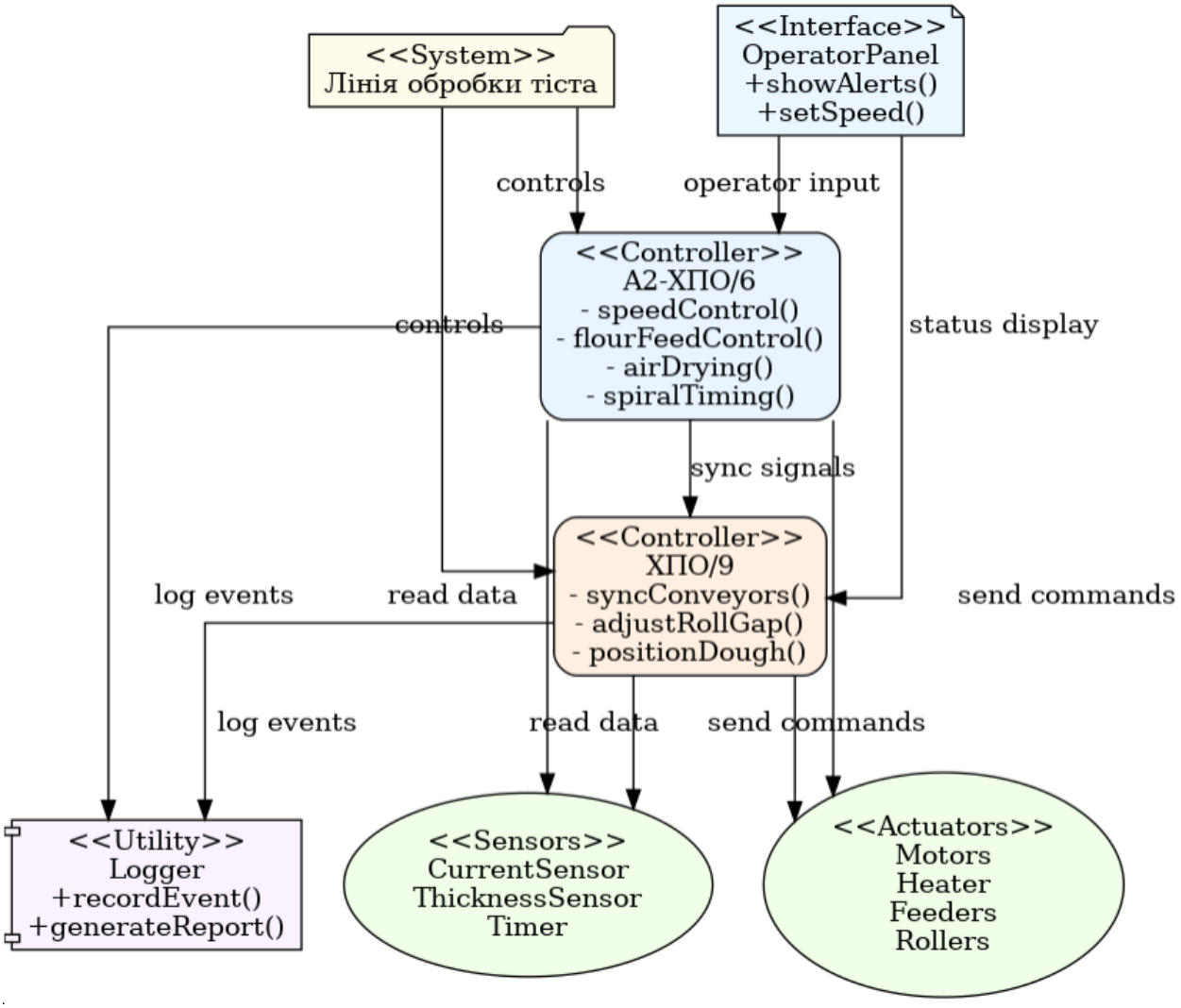


Рисунок 2.4- UML діаграма виконання технологічного процесу виготовлення тістових заготовок

Контролер машини ХПО/9 виконує синхронізацію руху транспортерів та роботи формувального механізму. Здійснюється узгодження швидкості подачі заготовок з округлювальної машини зі швидкістю приймального транспортера. На основі даних про товщину заготовки після попереднього формування контролер коригує зазор між розкочувальними валами. Забезпечується точне позиціонування заготовок на листах з похибкою не

більше ±5 мм. Переміщення листа відбувається синхронно з циклом викладання заготовок у кроковому режимі транспортера листів.

В ротаційній печі «Муссон-ротор 99К» контролер реалізує складний багатопараметричний алгоритм керування. ПІД-регулювання температури здійснюється таким чином, що контролер підтримує задану температуру в пекарній камері в діапазоні від 180 до 240°С за допомогою ПІД-регулятора з пропорційною складовою 5,0, інтегральною складовою 0,2 та диференціальною складовою 0,5. Керуючий вплив формується на тиристорні регулятори потужності електронагрівачів.

Алгоритм циркуляції повітря передбачає регулювання швидкості вентилятора в діапазоні від 50 до 100% від номінальної в залежності від стадії випікання. На початковій стадії протягом перших трьох-п'яти хвилин швидкість є максимальною для швидкого прогріву виробів. На основній стадії швидкість знижується до 70% для рівномірного пропікання. На завершальній стадії швидкість підвищується до 90% для утворення скоринки.

Керування парогенератором здійснюється в циклічному режимі. На початку випікання формується інтенсивна подача пари протягом 30 секунд. Надалі пара подається періодично по 5 секунд кожні 2 хвилини. За 5 хвилин до завершення випікання подача пари припиняється. Контролер забезпечує обертання платформи зі швидкістю від 3 до 5 об/хв для рівномірного випікання. При випіканні виробів з високим вмістом цукру активується реверсивний режим з обертанням протягом 2 хвилин за годинниковою стрілкою та 2 хвилин проти годинникової стрілки.Функціональна схема роботи контролера при управлінні ротаційною пече «Муссон-ротор 99К» представлена на рисунку 2.5 [15].

Програмне керування процесом реалізовано таким чином, що контролер зберігає в пам'яті до 50 програм випікання для різних видів виробів. Кожна програма містить температуру випікання по зонах камери (верх, низ, бокові стінки), час випікання, режим роботи вентилятора, режим парозволоження та швидкість обертання платформи. Оператор вибирає

програму через сенсорну панель, після чого контролер автоматично виконує всі етапи програми з реєстрацією фактичних параметрів в журналі подій.

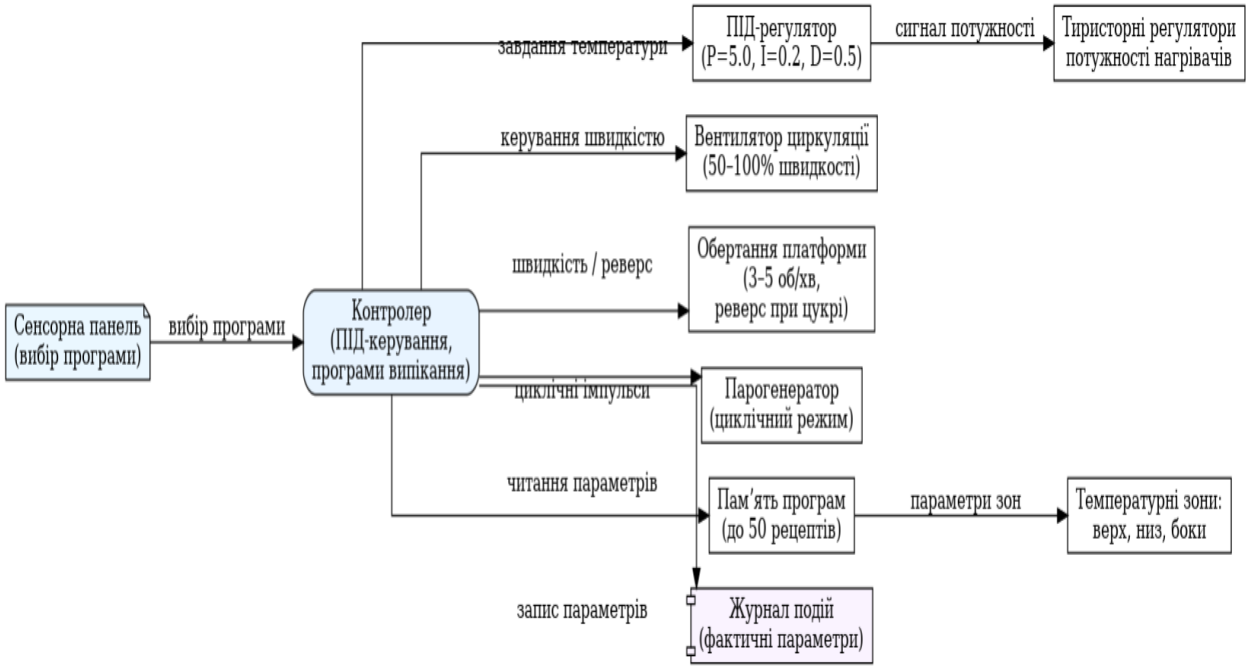


Рисунок 2.5- Функціональна схема роботи контролера при управлінні ротаційною пече «Муссон-ротор 99К»

Для оцінки ефективності роботи контролера MicroPC 6040 було проведено експериментальні дослідження на виробничій лінії виготовлення батонів нарізних масою 0,4 кг. Метою дослідження було визначення показників точності та стабільності керування технологічними параметрами процесу виготовлення кондитерських хлібобулочних виробів системою автоматизації на базі контролера MicroPC 6040. Завданнями дослідження були дослідження точності підтримання температури в пекарній камері, визначення стабільності маси тістових заготовок при автоматичному дозуванні, оцінка впливу автоматичного коригування параметрів на якість готової продукції, а також порівняння показників роботи лінії в ручному та автоматичному режимах.

Для проведення експериментальних досліджень використовувалося параметри наступного обладнання, що включало тістомісильну машину ТММ-1М, тістоділильну машину А2-ХПО/5, тістоокруглювальну машину

А2-ХПО/6, тістозакатну машину ХПО/9 та ротаційну піч «Муссон-ротор 99К». Засоби вимірювання включали термопари хромель-алюмелеві типу К з діапазоном вимірювання від 0 до 300°С класу точності 1 з похибкою ±1,5°С, електронні лабораторні ваги CAS MW-300T з межею зважування 300 г та дискретністю 0,01 г, електронний секундомір з похибкою ±0,01 с, вологомір зерна Wile-65 з діапазоном вимірювання від 5 до 45% та похибкою ±0,5%, а також цифровий мультиметр Fluke 87V для вимірювання струмів та напруг. Програмне забезпечення представлене SCADA-системою Wonderware InTouch для збору та архівування даних та програмою статистичного аналізу Microsoft Excel [16].

Для порівняння ефективності автоматичного керування необхідно здійснювати дослідження в двох режимах: ручному, коли оператор самостійно задає та коригує параметри процесу на основі візуального контролю та досвіду, та автоматичному, коли контролер MicroPC 6040 автоматично підтримує задані параметри та виконує коригування за алгоритмами (рисунок 2.6).

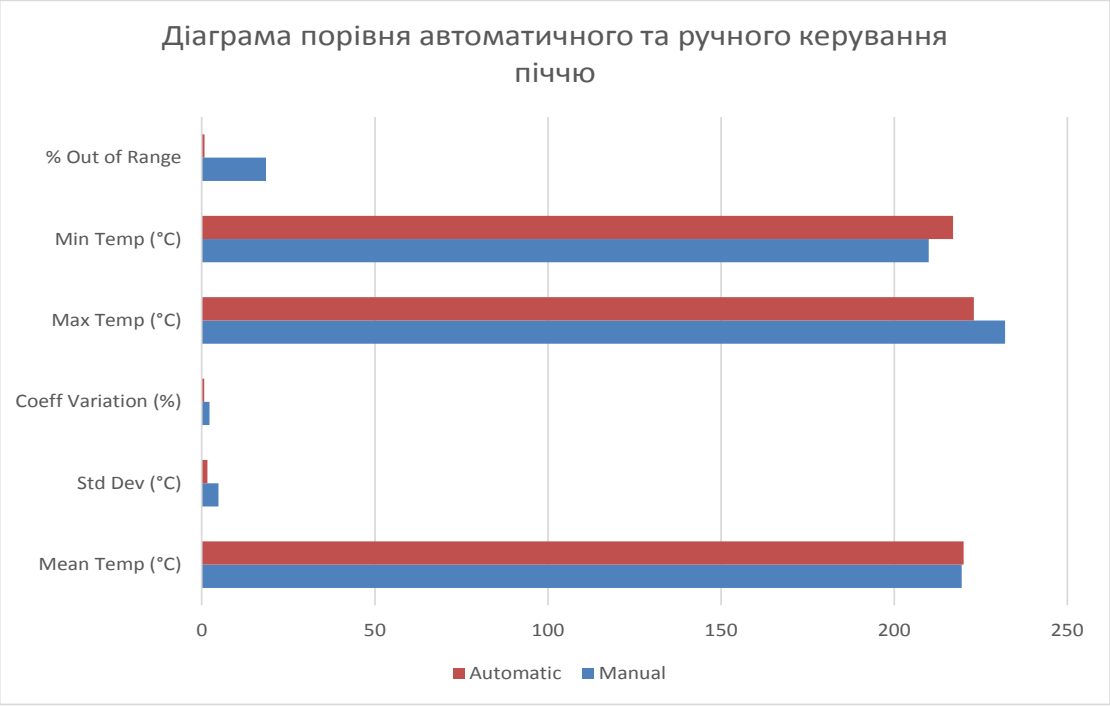


Рисунок 2.7- Діаграма порівняння параметрів ручного та автоматичного керування параметрами роторної печчі.

Методика обробки результатів передбачала визначення для кожного параметру наступних статистичних характеристик: середнього арифметичного значення, середньоквадратичного відхилення, коефіцієнта варіації, максимального та мінімального значення, а також відсотка виходу параметру за межі допустимого діапазону. Порівняння ручного та автоматичного режимів проводилося за критерієм Стьюдента[17] при рівні значущості 0,05

Результати дослідження точності підтримання температури в пекарній камері при випіканні батонів нарізних за заданої температури 220°C показали значні переваги автоматичного режиму. Середня температура в ручному режимі становила 219,5°C, тоді як в автоматичному режимі вона дорівнювала 220,1°C. Середньоквадратичне відхилення в автоматичному режимі зменшилося у 3 рази порівняно з ручним режимом, складаючи 1,6°C проти 4,8°C відповідно. Коефіцієнт варіації в автоматичному режимі склав 0,73%, що свідчить про високу стабільність підтримання температури порівняно з 2,19% в ручному режимі. Максимальна температура знизилася з 232°C до 223°C, а мінімальна підвищилася з 210°C до 217°C. Відсоток виходу температури за межі допустимого діапазону ±5°C від заданої зменшився з 18,5% до 0,8% (рисунок 2.7).

2.2 Аналіз та вибір пристроїв для вимірів і контролю регульованих параметрів

Вітчизняна приладобудівна промисловість на сьогодні характеризується високим рівнем розвитку та здатністю забезпечувати випуск широкої номенклатури засобів автоматизації, що відповідають технологічним, експлуатаційним та санітарно-гігієнічним вимогам кондитерського й хлібобулочного виробництв. Паралельно у хлібопекарній галузі здійснюється активне проєктування, розроблення та впровадження у виробничі процеси спеціалізованих вимірювальних і регулювальних

пристроїв, необхідність створення яких обумовлена специфічними фізико-хімічними характеристиками використовуваної сировини та готових продуктів [18].

Вимикач серії INNOLevel (рисунок 2.8) являє собою спеціалізований сенсорний пристрій [19] для автоматизованого моніторингу рівня заповнення бункерів сипучими інгредієнтами хлібопекарського виробництва і застосовується для контролю процесів наповнення, спорожнення або встановлення проміжних рівнів у технологічній лінії. У хлібопекарській промисловості датчик рівня сипучих речовин INNOLevel відіграє критично важливу роль при роботі з основними інгредієнтами тістових виробів, зокрема борошном пшеничним та житнім, цукром-піском, крохмалем, сухим молоком, какао-порошком, а також іншими сипучими компонентами рецептур кондитерських хлібобулочних виробів.

Рисунок 2.8 − Флажковий сенсорний пристрій контролю рівня сипучих інгредієнтів INNOLevel для хлібопекарського виробництва

Застосування вимикача INNOLevel у хлібопекарській промисловості забезпечує автоматизацію процесу подачі інгредієнтів до тістомісильних машин та дозувального обладнання, запобігаючи переповненню бункерів або їх несанкціонованому спорожненню, що могло б призвести до порушення технологічного циклу та зниження якості готової продукції. Вимикач представляє собою економічно вигідне рішення для достовірного визначення рівня заповнення бункерів борошном і характеризується низкою переваг, серед яких наявність сертифікатів ATEX для експлуатації у пилових

вибухонебезпечних умовах, що є критично важливим для борошняного виробництва через високу концентрацію борошняного пилу в робочій зоні. Додатковими перевагами є підвищений коефіцієнт корисної дії, стабільна надійність функціонування в умовах постійного контакту з абразивними борошняними частинками та універсальність застосування для різних типів сипучих інгредієнтів хлібопекарського асортименту.

Інтеграція датчика INNOLevel у систему автоматизації на базі контролера MicroPC 6040 дозволяє реалізувати інтелектуальне керування процесом завантаження інгредієнтів у тістомісильну машину ТММ-1М. Контролер отримує сигнал від датчика про поточний рівень заповнення бункера борошном та автоматично керує подачею необхідної кількості інгредієнтів за рецептурою. При досягненні мінімального рівня заповнення датчик формує сигнал тривоги на операторську станцію, попереджуючи про необхідність поповнення запасів сировини, що дозволяє уникнути простоїв виробничої лінії через відсутність інгредієнтів.

Впровадження автоматизованих систем контролю рівня у кондитерську хлібопекарську галузь суттєво залежить від коректного підбору типів сенсорних пристроїв та оптимального розміщення їх у технологічних бункерах. Датчики INNOLevel встановлюються на різних висотних рівнях для подачі борошна, забезпечуючи багаторівневий контроль: верхній датчик сигналізує про повне заповнення та запобігає переповненню, середній датчик контролює робочий запас сировини, а нижній датчик попереджує про критичне зниження рівня та необхідність термінового поповнення.

Контроль температурних параметрів борошна у бункерах здійснюється паралельно з контролем рівня за допомогою загальнотехнічних вимірювальних приладів - термометрів, які класифікуються на термометри розширення, термоелектричні перетворювачі та термоперетворювачі опору. Моніторинг температури борошна є важливим аспектом забезпечення якості хлібопекарської продукції, оскільки підвищення температури може свідчити

про початок процесів самозігрівання борошна внаслідок життєдіяльності шкідників або розвитку мікроорганізмів.

Термометри розширення базуються на використанні властивостей газоподібних і рідких речовин змінювати свій об'єм при температурних коливаннях, а твердих матеріалів - змінювати лінійні габарити. Термоелектричні перетворювачі функціонують на основі виникнення термоелектрорушійної сили в різнорідних провідниках при наявності температурного градієнта між точками їх сполучення. Інтеграція термоелектричних перетворювачів у систему автоматизації печі «Муссон-ротор 99К» дозволяє контролеру MicroPC 6040 підтримувати задані температурні режими випікання з високою точністю, що забезпечує стабільну якість готової продукції.

Резистивні температурні сенсори (рисунок 2.9) ґрунтуються на фізичному принципі зміни електричного опору металевих провідників при коливаннях температурного режиму. Для створення чутливих компонентів застосовують такі матеріали: мідні сплави, платинові елементи, нікелеві та залізні провідники. Резистивна термометрія у поєднанні з автоматизованими вимірювальними мостовими схемами демонструє виняткову прецизійність контролю температури в печах, розстійних шафах та інших технологічних зонах хлібопекарського цеху. Система характеризується стабільністю роботи та ергономічністю використання, може доповнюватися різноманітним допоміжним обладнанням для автоматизації процесу випічки. Основним недоліком таких вимірювальних систем вважається повільна реакція на температурні зміни, що потрібно враховувати при швидких режимах випікання. Серед металів для виробництва термічних резисторів у хлібопекарській галузі найширше використовуються платинові та мідні сплави [20].

Термометри на основі платини застосовуються для реєстрації температур у хлібопекарських печах у діапазоні від мінус 260 до плюс 750 градусів Цельсія, що охоплює всі режими випікання хлібобулочних виробів.

Мідні аналоги функціонують в межах від мінус 50 до плюс 200 градусів Цельсія і використовуються для контролю температури в розстійних камерах, холодильних агрегатах та зонах зберігання сировини. Конструктивна будова резистивних термометрів включає чутливий компонент та захисний корпус. Сенсорний елемент виготовляється з дротяної обмотки діаметром 0,05-0,1 міліметра для платинових варіантів та 0,08 міліметра для мідних модифікацій, яка навивається на опорний стрижень або ізоляційну пластину і розміщується всередині захисної оболонки.

Рисунок 2.9 − Резистивний температурний перетворювач

Контроль витратних характеристик рідких компонентів (молока, води, рослинних олій, яєчних меланжів, розчинів цукру) та сипучих матеріалів реалізується за допомогою спеціалізованих вимірювальних приладів. У хлібопекарській промисловості широко впроваджені витратовимірювачі диференціального та стабільного перепаду тиску, рівневого типу та електромагнітні системи для дозування інгредієнтів тіста.

Витратовимірювачі диференціального типу являють собою звужувальний елемент, інтегрований у трубопровідну систему подачі рідких компонентів на траєкторії переміщення робочої речовини. Під час транспортування молока, води або рідких жирів через трансформацію

потенціальної енергії у кінетичну форму, швидкість потоку в зоні звуження зростає. Це призводить до виникнення різниці статичних тисків перед звужувальним елементом та після нього. Різниця тисків фіксується U-подібним манометричним пристроєм, що дозволяє точно контролювати подачу рідких інгредієнтів у тістомісильні агрегати.

Ротаметричні витратовимірювачі зі стабільним перепадом тиску складаються з конусоподібної трубки, усередині якої розміщується плавучий індикатор. Робочий механізм ротаметра базується на варіації площі прохідного перерізу звужувального компонента відповідно до зміни витратних показників рідини, що транспортується до дозаторів, при вертикальному переміщенні поплавка. Коли сили, що піднімають поплавок знизу догори, урівноважуються з гравітаційною силою, спрямованою зверху донизу, індикатор припиняє рух, і його вертикальне положення відображає витратні параметри рідких компонентів для замісу тіста.

Рівневі витратовимірювачі розроблені для моніторингу витрат молочних продуктів, жирів та інших рідких інгредієнтів, що можуть містити суспензії або бути збагачені повітрям. Конструктивно представляють ємність з установленими діафрагмами, які створюють дві окремі секції. Рідкий компонент надходить у вимірювальну секцію, де встановлено вимірювальний механізм з рівневим індикатором. Зливна секція (після діафрагми) обладнана патрубком для подачі рідини до технологічного обладнання. Існує пряма залежність: зі збільшенням витрати інгредієнтів підвищується рівень у секції перед діафрагмою. Фіксація цього рівня здійснюється поплавковою рівневимірювальною системою, що забезпечує точність дозування компонентів хліба.

Електромагнітний витратовимірювач (індукційного типу) функціонує на основі взаємодії рухомого рідинного середовища з магнітним полем і є оптимальним рішенням для контролю подачі води, молока та інших електропровідних рідких компонентів у хлібопекарському виробництві. Внаслідок перетину силових ліній магнітного поля в електропровідній рідині

генерується електрорушійна сила, пропорційна швидкості переміщення рідини. Конструкція витратовимірювача (зображення 2.10) представляє фрагмент трубопровідної системи 1 з немагнітного матеріалу, облицьований зсередини електроізоляційним покриттям та розташований між магнітними полюсами електромагнітної системи 3. Орієнтація силових магнітних ліній електромагніту має перпендикулярний напрямок відносно центральної осі трубопроводу подачі рідких інгредієнтів. Такі системи забезпечують безперебійне дозування компонентів для виробництва хлібобулочних виробів з високою точністю та повторюваністю результатів [21].

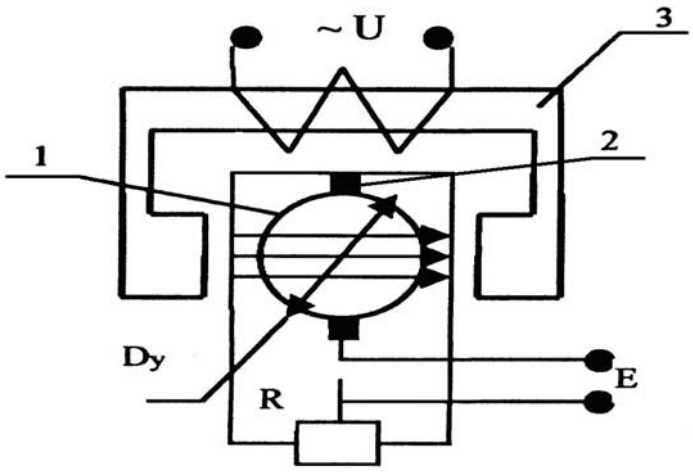


Рисунок 2.10 − Витратомір індукційний

Під час руху електропровідного рідинного середовища крізь стабільне магнітне поле в ньому, аналогічно до мобільного провідника, генерується електрорушійна сила, яку реєструють спеціальні електродні елементи 2.

Витратовимірювальні пристрої електромагнітного типу знайшли широке застосування для контролю переміщення невибухонебезпечних рідких технологічних середовищ у хлібопекарському виробництві. Зокрема, вони ефективно працюють з молочними продуктами, водою, розчинами цукрових сиропів, включаючи емульсії та суспензії з дрібнодисперсними неферомагнітними включеннями, за умови мінімальної питомої електропровідності 0,00005 См/м. Обладнання демонструє високу стійкість до засмічення частинками борошна чи інших сипучих інгредієнтів, не

створює додаткового гідравлічного опору в магістралях подачі компонентів, завдяки чому отримало масове впровадження в автоматизованих лініях виробництва хлібобулочних виробів.

Модифікацією індукційних витратовимірювальних систем є прилади з точковим сенсором швидкості потоку. Функціонування обладнання базується на методології «площа-швидкість», яка передбачає визначення усередненої швидкості переміщення рідких інгредієнтів у технологічному трубопроводі з урахуванням геометричних параметрів його поперечного перерізу.

Показник середньої швидкості встановлюється через розміщення в характерній точці поперечного перерізу технологічної магістралі 4 (зображення 2.11) на відстані 0,242R від центральної осі трубопроводу компактного швидкісного перетворювача 1. Конструкція швидкісного перетворювача включає електромагнітну котушку 3, вмонтовану в циліндричний корпус 5 з діелектричного матеріалу, у стінках якого зафіксовані металеві електродні елементи 2. Електрорушійна сила Е, що індукується в рухомому рідинному середовищі (молоці, воді, жировій емульсії) електромагнітним полем, реєструється через електродні датчики і відображає швидкість потоку інгредієнтів у зоні, що охоплює перетворювач швидкості [22].

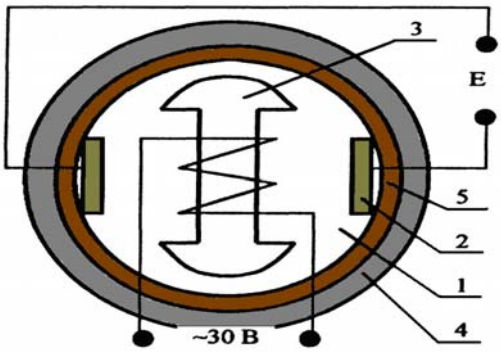


Рисунок 2.11 − Індукційний витратомір з перетворювачем швидкості

Для моніторингу споживання газоподібного палива в хлібопекарських печах застосовуються обліковувальні пристрої роторного типу (рисунок 2.12). Конструкція складається з корпусного елементу 1,

всередині якого під впливом рухомого газового потоку в метрологічній камері 2 здійснюється обертання двох ідентичних роторних елементів 3 вісімкоподібної конфігурації. Інтенсивність газового потоку визначається величиною технологічного просвіту між корпусною частиною і прямокутними площинами на торцях найбільших діаметральних зон роторів.

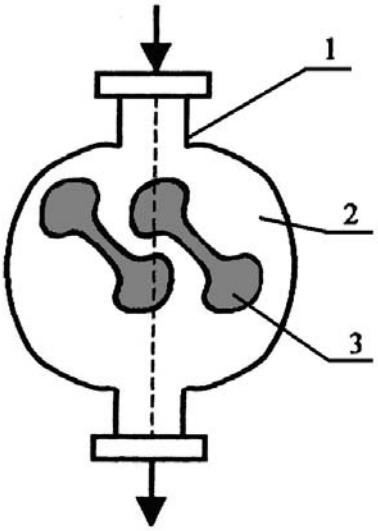


Рисунок 2.12 − Ротаційний лічильник газу

Технологічні просвіти варіюються в межах 0,04-0,1 міліметра і залежать від типорозмірних характеристик обліковувального обладнання. Синхронізоване обертання роторних елементів забезпечується двома парами ідентичних зубчастих механізмів, закріплених на обох торцях роторів за межами метрологічної камери.

Промислові газові обліковувачі ротаційного типу РГ призначені для контролю об'ємних параметрів очищеного неагресивного горючого газу в мережах низького тиску хлібопекарських підприємств при температурному режимі робочого середовища 0-50 градусів Цельсія, тиску 0,1 МПа і втратах напору на обладнанні при номінальній витраті приблизно 300 Па. Мінімальна витрата газу через обліковувач становить 10% від номінального показника, максимальна – 120% від номінального значення. Перед встановленням лічильника обов'язковою є інсталяція фільтруючого пристрою для очищення газового палива від механічних домішок.

Щільність тістових напівфабрикатів у хлібопекарській галузі є критичним якісним параметром роботи технологічних ділянок, що безпосередньо впливає на пористість, об'єм та органолептичні властивості готових виробів. При виробництві хлібобулочної продукції використовуються такі типи густиномірів: поплавкові системи, гідростатичні вимірювачі, радіоізотопні аналізатори.

Поплавкові густиновимірювальні системи базуються на принципі Архімеда і застосовуються для контролю щільності опар, рідких дріжджів, молочних заквасок та цукрових сиропів. Вони класифікуються на густиноміри часткового (ареометричні) і повного (буйкові) занурення. У густиномірах повного занурення чутливий компонент розміщується в ємності з контрольованим розчином рідкого напівфабрикату, де на нього впливає виштовхувальна сила, пропорційна густині рідини з компенсацією температурних коливань. При цьому реалізується вимірювання або переміщення поплавцевого елементу, або величини виштовхувальної сили, що дозволяє точно контролювати концентрацію розчинів для замісу тіста.

Гідростатичні густиновимірювачі ґрунтуються на залежності гідростатичного тиску p стовпа рідини висотою H від густини рідини q, що виражається співвідношенням $p = qgH$. Вони класифікуються на прилади безпосереднього вимірювання тиску рідини (мембранні, сильфонні конструкції) і прилади непрямого вимірювання тиску (пневмометричні, гідропневмометричні системи).

Для забезпечення точності показань гідростатичних густиномірів при контролі рівня рідини або тиску застосовується диференціальна методологія, тобто здійснюється вимірювання тиску рідкого напівфабрикату на двох різних рівнях. Гідростатичні густиновимірювачі використовуються в хлібопекарському виробництві для контролю густини в'язких опар, забруднених рідких дріжджів, розчинів що кристалізуються (цукрові сиропи) і агресивних рідин у закритих бродильних чанах і відкритих технологічних резервуарах.

У мембранному густиновимірювачі (рисунок 2.17) із замкнутим об'ємом еталонної рідини вимірюється різниця гідростатичних тисків постійних по висоті стовпців досліджуваного рідкого напівфабрикату і еталонної рідини. Така система забезпечує високоточний контроль щільності опар, рідких заквасок та інших технологічних розчинів, що є критичним для підтримання стабільної якості хлібобулочних виробів та оптимізації витрат сировини на хлібопекарських підприємствах [23].

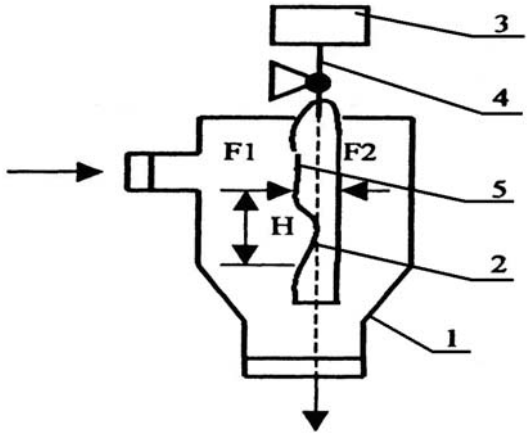


Рисунок 2.17 − Мембранний густиновимірювач

Під час проходження вимірюваного розчину через корпус пристрою **1** на мембрану *5* діють два протилежно спрямовані зусилля - F□ та *F*□**.** Зусилля *F*□ передається на мембрану за допомогою пружного роздільника ***2***, який взаємодіє з еталонною рідиною. Таким чином, результуюча сила, що прикладається до мембрани, визначається рівнянням:

$$F\square - F\square = H \cdot S\square \cdot (q_e - q) \qquad (2.1)$$

або, в скороченому вигляді,

$$\Delta F = H \cdot S\square \cdot \Delta q, \qquad (2.2)$$

де q_e і q — густини еталонної та досліджуваної рідин відповідно.

Оскільки параметри H**,** S□ і q_e мають сталі значення, величина зміни сили *ΔF* спричиняє мікропереміщення мембрани 5. Це переміщення через систему важеля 4 впливає на компенсаційний перетворювач 3, вихідний сигнал якого пропорційний різниці густин і може використовуватися як вимірювальна характеристика щільності розчину. На основі виразу 2.2. в

залежності розраховано параметр ΔF від густини q, що представлено на рисунку 2.13.

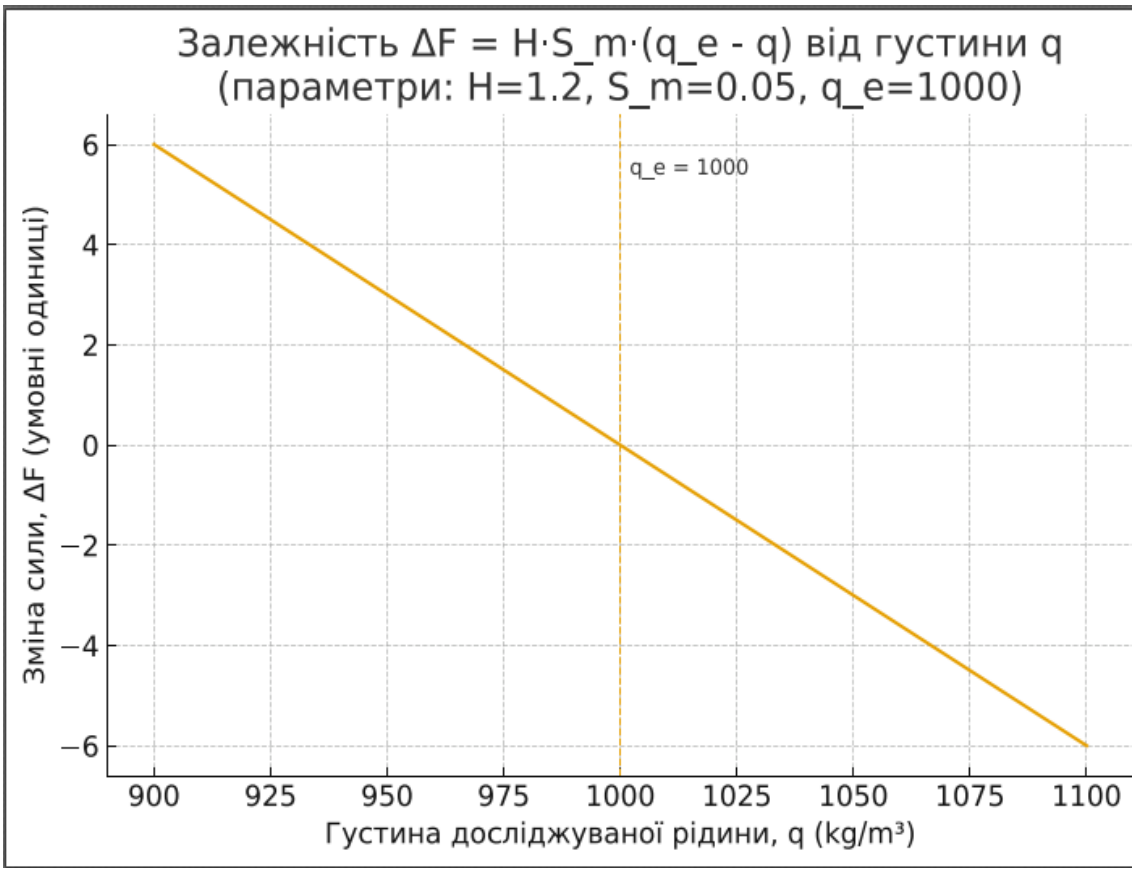


Рисунок 2.13- Розрахунок параметр ΔF від густини q

Побудований графік залежності зміни сили ΔF від густини досліджуваної рідини q демонструє лінійну обернену залежність між цими параметрами. Із збільшенням густини вимірюваного середовища сила, що діє на мембрану приладу, зменшується. Це пояснюється тим, що при підвищенні густини q різниця між нею та густиною еталонної рідини $\mathbf{q_e}$ зменшується, відповідно зменшується і різниця тисків на обидві сторони мембрани.

Таким чином, величина $\Delta F = H \cdot S \square \cdot (q_e - q)$ може бути використана як інформативний параметр для непрямого визначення густини розчину**.** Отримана лінійна характеристика свідчить про стабільність та високу чутливість компенсаційного перетворювача, що дозволяє використовувати дану залежність для калібрування та подальшого автоматизованого вимірювання фізико-хімічних властивостей рідин.

2.3 Аналіз станів автоматизованих систем управління хлібопекарським виробництвом

Удосконалення систем автоматизованого керування хлібопекарським виробництвом становить пріоритетний напрямок розвитку галузі. Підвищення ефективності випуску хлібобулочної продукції через впровадження інноваційних автоматизованих комплексів керування забезпечує прогрес методів комп'ютерно-інтегрованого візуального представлення технологічних процесів. Оператор хлібопекарської лінії, реагуючи на штатні та позаштатні ситуації під час випікання, має можливість попередити передаварійні та аварійні стани печей, тістомісильного обладнання та бродильних камер, використовуючи сучасні методи діагностики. Це особливо актуально для стратегічних підприємств харчової промисловості, до яких належить хлібопекарне виробництво.

Реалізація контролю на основі параметрів технологічного процесу випікання у своїй основі здійснює вимірювання показників температури печей, вологості тіста, тривалості бродіння відносно їх статистичних характеристик та повністю відображає стан технологічного процесу у форматі таблиці параметрів, відібраних оператором з визначеного набору даних, отриманих від температурних датчиків, вологомірів та виконавчих механізмів дозаторів. Сформований масив групи виміряних та обчислених технологічних даних режимів випікання відображає тренди на графіках реєстрації зазначених виміряних параметрів температури, вологості тіста та розрахованих статистичних характеристик якості продукції.

Однак даний метод має певні обмеження, що звужує функціональні можливості та демонструє низьку інформативність для оператора хлібопекарської лінії, оскільки виявлення окремих технологічних параметрів випікання та віртуальних розрахункових показників відбувається фрагментарно на моніторі оператора і не дозволяє виконувати комплексну ідентифікацію стану технологічного процесу виробництва хліба на

зазначеному об'єкті контролю. При високій складності хлібопекарського обладнання та значній кількості контрольованих параметрів печей, тістомісів, розстійних шаф та розрахункових технологічних показників відображається низький коефіцієнт ефективності та ймовірність суттєвої появи помилкових дій оператора при ідентифікації стану технологічного процесу випікання: "аварія печі", "нормальний режим", "прогноз відхилення якості".

Провівши аналіз архітектур та основних функцій систем моніторингу хлібопекарського обладнання у роботах [24] на основі високоточних вимірювальних приладів та дослідивши особливості взаємодії оператор – система моніторингу хлібопекарської лінії у складних системах керування, можна зробити наступні висновки:

1. Зростання складності технології виробництва хлібобулочних виробів дозволяє збільшити роль мікропроцесорних засобів автоматизації печей, що призводить відповідно до збільшення об'ємів інформаційних потоків від датчиків температури, вологості, густини тіста, що спричиняє небезпеку виникнення нештатних або аварійних станів контрольованого хлібопекарського обладнання.

2. Звідси зростає роль та відповідальність операторів хлібопекарських ліній до забезпечення швидкої суб'єктивної реакції на відхилення параметрів випікання від норми та швидкого прийняття правильних рішень по їх ліквідації для запобігання браку продукції. Розроблено детальну блок-схему алгоритму автоматизованої системи випікання хліба, яка відображає повний технологічний цикл - від ініціалізації до завершення процесу виробництва (рисунок 2.15).

У структурі системи передбачено послідовність основних етапів, що забезпечують безперервний контроль і керування технологічними параметрами. На етапі ініціалізації здійснюється запуск системи, перевірка працездатності датчиків та завантаження рецептури виробу. Далі відбувається вимірювання основних параметрів, таких як температура печі,

вологість тіста, час бродіння та густина суміші. Отримані дані надходять на етап аналізу, де виконуються розрахунки статистичних характеристик, визначення кореляційних залежностей і проведення кластерного аналізу для виявлення можливих відхилень у технологічному процесі.

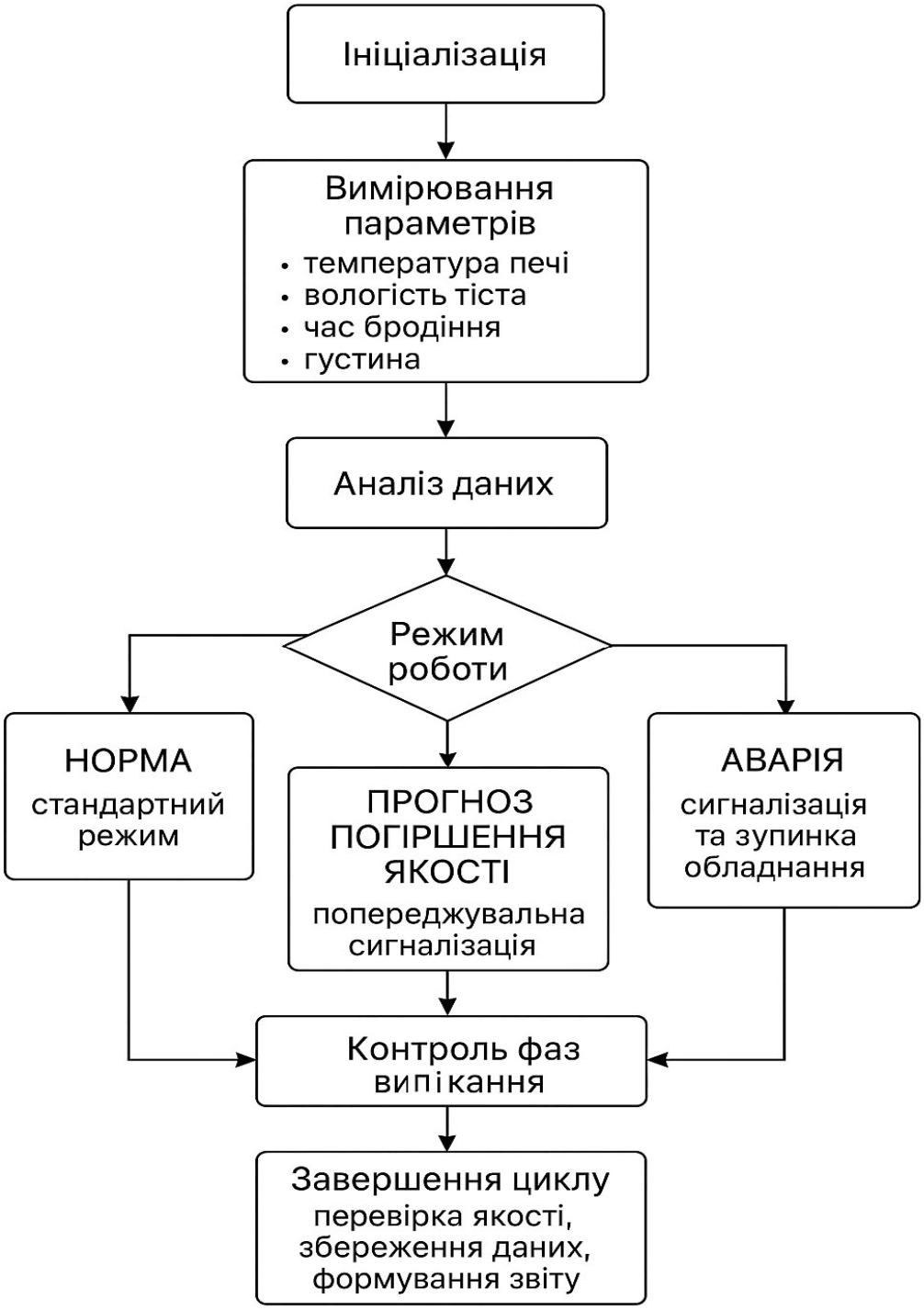


Рисунок 2.16- Блок-схему алгоритму автоматизованої системи випікання хліба

Система передбачає три режими роботи: нормальний режим (Норма), у якому здійснюється стабільний моніторинг усіх параметрів; режим прогнозу погіршення якості, який забезпечує попереджувальну сигналізацію при виявленні тенденцій до відхилень і дозволяє виконати корекцію процесу; та аварійний режим, що супроводжується критичною сигналізацією й автоматичною зупинкою обладнання для запобігання пошкодженню системи або втраті продукції.

Особливу увагу приділено контролю фаз випікання, який охоплює три основні стадії: бродіння (з підтриманням температури 28–32 °C і відносної вологості 75–80%), випікання (при температурі 180–250 °C) та охолодження готових виробів. На завершальному етапі алгоритм виконує перевірку якості отриманого продукту, збереження зібраних даних і формування підсумкового звіту. Розроблена блок-схема відображає повну логіку автоматизованого керування процесом випікання хлібобулочних виробів, забезпечуючи адаптивність системи, її надійність та можливість прогнозування стану технологічного процесу в реальному часі.

3. УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ ВИГОТОВЛЕННЯ ХЛІБОБУЛОЧНИХ ВИРОБІВ

3.1 Технологічний процес систем автоматизованого регулювання параметрами випікання кондитерських хлібобулочних виробів

Для керування процесом випікання хлібобулочних та кондитерських виробів в автоматизованих системах застосовуються спеціалізовані регулятори, сконфігуровані на реалізацію певних законів керування [24]. Серед них ключову роль відіграє ПІД-регулятор, основна перевага якого полягає в оптимізації впливу на технологічний процес. Це досягається завдяки аналізу не тільки поточної величини відхилення параметра, але й швидкості його зміни.

Ефективність системи підтверджується, коли фронт зміни контрольованого параметра має крутіший характер, ніж сигнал, що подається на виконавчий механізм – у такому разі система функціонує в межах допустимих норм. У ситуації стабілізації регульованої величини активується пропорційна складова впливу регулятора. При цьому, значна дія за передуванням у певних умовах може істотно покращити якісні показники перехідних режимів. Саме цим обумовлено використання ПІД-закону регулювання для контролю температурного режиму у печах.

Впровадження ПІД-алгоритмів у виробничі системи автоматизації дозволяє реалізувати комплексний підхід, при якому регулятор одночасно враховує взаємодію всіх своїх складових. Функціональність подібних пристроїв часто ґрунтується на використанні механізму пружного зворотного зв’язку.

Використання регуляторів, що мають елементи передування, дозволяє значно підвищити швидкість реакції системи на зовнішні та внутрішні збурення. Це особливо актуально для технологічних об'єктів з високою

інерційністю та значними часовими затримками, що призводить до наближення їх стану до квазістаціонарного.

Характеристики технологічних схем, що застосовуються для випікання хлібобулочних і кондитерських виробів, можуть мати суттєві відмінності, що, в свою чергу, обумовлює різні підходи до побудови систем керування. Незважаючи на це, у більшості випадків у цих схемах можна виділити окремі модулі, що виконують типовий набір функцій, а засади їх автоматизації мають багато спільного. Для наочності, на рисунку 3.8 представлено структурну схему системи автоматичного керування температурою в печі для випікання кондитерсько-хлібобулочної продукції.

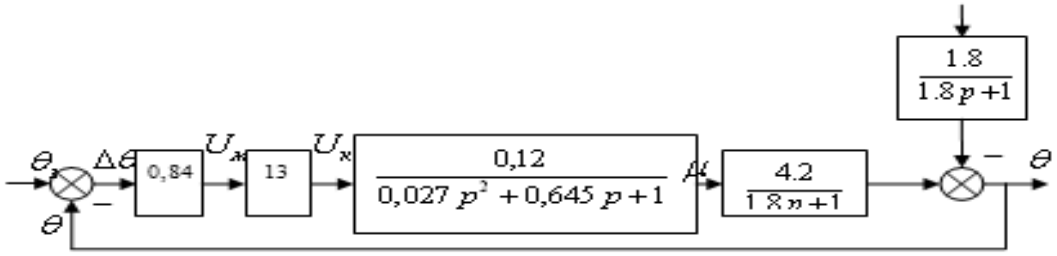


Рисунок 3.8 − Структурна схема системи, призначена для автоматичного підтримання температурних режимів у печі

Для декомпозиції та аналізу системи, а саме для виведення передаточних функцій, що описують реакцію на задаючі сигнали та непередбачені збурення, застосовується метод еквівалентних перетворень структурних схем. Ключовий перший крок цієї трансформації полягає у знаходженні передаточної функції відкритого контуру керування. Оскільки всі компоненти представленої структурної схеми з'єднані послідовно (каскадно), обчислення передаточної функції розімкненої системи виконується на основі наступної формули [24]:

$$W(p) = W_{рег}(p) \cdot W_o(p) = \left(W_м(p) W_п(p) W_{др}(p)\right) \cdot W_o(p) \qquad (3.1)$$

звідси

$W_{рег}(p) = W_{м}(p)W_{п}(p)W_{др}(p)$ -застосовувані функції для заданого передаточного регулятора;

$W_{о}(p)$ - передаточні функція об’єкта регулювання

Спираючись на формулу (3.1), динаміка відкритого контуру (розімкненої системи) обчислюється за допомогою аналітичного співвідношення:

$$W(p) = \left(0{,}84 \cdot 13 \cdot \frac{0{,}12}{0{,}027p^2 + 0{,}645p + 1}\right) \cdot \frac{4.2}{1.8p + 1} = \frac{5{,}5037}{0{,}0486p^3 + 1{,}188p^2 + 2{,}445p + 1} \quad (3.2)$$

Далі, передавальна функція замкненого контуру для каналу керуючої дії (задаючого впливу) при одиничному зворотному зв'язку встановлюється, виходячи з уже знайденої функції відкритої системи, відповідно до формули:

$$W_{з}(p) = \frac{W(p)}{1 - (-1) \cdot W(p)W_{зз}(p)} = \frac{W(p)}{1 + W(p)} = \frac{\dfrac{5{,}5037}{0{,}0486p^3 + 1{,}188p^2 + 2{,}445p + 1}}{1 + \dfrac{5{,}5037}{0{,}0486p^3 + 1{,}188p^2 + 2{,}445p + 1}} = \frac{5{,}5037}{0{,}0486p^3 + 1{,}188p^2 + 2{,}445p + 6{,}5037} \quad (3.3)$$

Аналогічно, передавальна функція системи для каналу зовнішнього збурення (збурюючого впливу) визначається за виразом:

$$W_{f}(p) = \frac{W_{of}(p)}{1 + W(p)} = \frac{-\dfrac{1.8}{1.8p + 1}}{1 + \left(0{,}84 \cdot 13 \cdot \dfrac{0{,}12}{0{,}027p^2 + 0{,}645p + 1}\right) \cdot \dfrac{4.2}{1.8p + 1}} =$$

$$= \frac{-\dfrac{1.8}{1.8p + 1}}{1 + \dfrac{0{,}84 \cdot 13 \cdot 0{,}12}{0{,}027p^2 + 0{,}645p + 1} \cdot \dfrac{4.2}{1.8p + 1}} = \frac{-\dfrac{1.8}{1.8p + 1}}{1 + \dfrac{1.3104 \cdot 4.2}{(0{,}027p^2 + 0{,}645p + 1)(1.8p + 1)}} =$$

$$= \frac{-\dfrac{1.8}{1.8p + 1}}{\dfrac{(0{,}027p^2 + 0{,}645p + 1)(1.8p + 1) + 5.5037}{(0{,}027p^2 + 0{,}645p + 1)(1.8p + 1)}} = \frac{-1.8(0{,}027p^2 + 0{,}645p + 1)}{(0{,}027p^2 + 0{,}645p + 1)(1.8p + 1) + 5.5037} = \quad (3.4)$$

$$= \frac{-0.0486p^2 - 1.161p - 1.8}{0.0486p^3 + 1.188p^2 + 2.445p + 6.5037}$$

де $W_{of}(p)$ - представляє динамічний оператор впливу збурення безпосередньо на об'єкт керування.

Формування диференціальних рівнянь руху системи здійснюється на основі фундаментального визначення передаточної функції:

$$W_з(p) = \frac{\theta(p)}{\theta_з(p)} = \frac{5{,}5037}{0{,}0486p^3 + 1{,}188p^2 + 2{,}445p + 6{,}5037}; \quad (3.4)$$

$$\theta(p)(0{,}0486p^3 + 1{,}188p^2 + 2{,}445p + 6{,}5037) = 5{,}5037\theta_з(p); \quad (3.6)$$

Таким чином, диференціальне рівняння, що описує динаміку системи за траєкторією «завдання – вихід», набуває вигляду:

$$0{,}0486\frac{d^3\theta}{dt^3} + 1{,}188\frac{d^2\theta}{dt^2} + 2{,}445\frac{d\theta}{dt} + 6{,}5037\theta = 5{,}5037\theta_з \quad (3.7)$$

На базі цього виразу рівняння статики (що описує поведінку в усталеному режимі) може бути виведено за допомогою формули:

$$6{,}5037\theta = 5{,}5037\theta_з \quad (3.8)$$

Зі співвідношення (3.8) ми отримуємо операторне диференціальне рівняння, яке моделює відгук системи у каналі «збурення – вихід»:

$$\begin{aligned} &0.0486p^3\theta(p) + 1.188p^2\theta(p) + 2.445p\cdot\theta(p) + 6.5037 = \\ &= -0.0486p^2F(p) - 1.161p\cdot F(p) - 1.8F(p) \end{aligned} \quad (3.9)$$

Застосовуючи обернене перетворення Лапласа, можна перейти до виразу у часовій області:

$$\begin{aligned} &0.0486\frac{d^3\theta}{dt^3} + 1.188\frac{d^2\theta}{dt^2} + 2.445\frac{d\theta}{dt} + 6.5037\theta = \\ &= -0.0486\frac{d^2f}{dt^2} - 1.161\frac{df}{dt} - 1.8f \end{aligned} \quad (3.10)$$

Відповідно, рівняння статики системи, але вже для каналу збурення, має наступну конфігурацію:

$$6.5037\theta = -1{,}8f \quad (3.11)$$

Під час синтезу та параметричного налаштування систем автоматичного регулювання (САР) критично важливо встановити, як конкретні параметри впливають на забезпечення її стійкості. Для визначення меж допустимих значень параметрів використовують загальновідомі критерії стійкості, зокрема метод D-розбиття.

Значення параметрів системи автоматичного регулювання необхідно контролювати з метою забезпечення її коректного функціонування, оскільки перевищення допустимих меж може призвести до втрати стійкості. Зокрема, граничне (критичне) значення коефіцієнта передачі або постійної часу, за якого система розміщується безпосередньо на межі області стійкості, визначають із застосуванням одного з найбільш поширених критеріїв аналізу - критерію Гурвіца. Для подальшої оцінки сформулюємо характеристичне рівняння системи, передаточна функція якої має такий вигляд:

$$D(p) = 0{,}0486\,p^3 + 1{,}188\,p^2 + 2{,}445\,p + 6{,}5037 \tag{3.12}$$

Спираючись на представлений поліном, складаємо визначник Гурвіца, що дозволяє дослідити стійкість у залежності від коефіцієнтів характеристичного рівняння [25]:

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} 1{,}188 & 6{,}504 & 0 \\ 0{,}0486 & 2{,}445 & 0 \\ 0 & 1{,}188 & 6{,}504 \end{vmatrix} = 1{,}188 \cdot 2{,}445 \cdot 6{,}504 - 0{,}0486 \cdot 6{,}504 \cdot 6{,}504 = 16{,}836 \tag{3.13}$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} 1{,}188 & 6{,}504 \\ 0{,}0486 & 2{,}445 \end{vmatrix} = 1{,}188 \cdot 2{,}445 - 0{,}0486 \cdot 6{,}504 = 2{,}588;$$

$$\Delta_1 = |1{,}188| = 1{,}188;$$

Оскільки головний визначник Гурвіца має додатне значення, а також усі його головні мінори є строго більшими за нуль, можна стверджувати, що система із заданими параметрами функціонує в стійкому режимі.

Для знаходження коефіцієнта передачі регулятора, що визначає амплітудно-фазові властивості системи, необхідно розглянути цей коефіцієнт як невідомий на рівні (3.15) та виконати процедуру прирівнювання головного

визначника Гурвіца до нуля. Застосування такого методу дає можливість аналітично встановити точку біфуркації — межове значення, для якої системи втрачає стійкість і переходить в режим гнізда**.**

$$W(p)=\left(0,84\cdot K_n\cdot\frac{0,12}{0,027p^2+0,645p+1}\right)\cdot\frac{4.2}{1.8p+1};$$

$$W(p)=\frac{0.4234K_n}{0,0486p^3+1,188p^2+2,445p+1} \tag{3.14}$$

Таким чином, характеристичне рівняння замкненої системи автоматичного регулювання набуває вигляду:

$$D(p)=0,0486p^3+1,188p^2+2,445p+(0,4234K_n+1) \tag{3.15}$$

Для подальшого аналізу обчислимо мінор для другого порядку визначника Гурвіца, оскільки саме він найчутливіше реагує на зміну передаточного коефіцієнта і безпосередньо пов'язаний зі знаком головного визначника ($\Delta_2=6,504\Delta_3$):

$$\Delta_2=\begin{vmatrix}1,188 & 0,4234K_n+1\\ 0,0486 & 2,445\end{vmatrix}=1,188\cdot2,445-(0,4234K_n+1)\cdot0,0486= \tag{3.16}$$

$$=2,905-0,0206K_n-0,0206=\ 2,8844-0,0206K_n\ /4.5/$$

Отримавши необхідні значення коефіцієнтів передатної функції: $\Delta_2=0$;

$2,8844-0,0206K_n^{кр}=0$;

$0,0206K_n^{кр}=2,8844$;

$K_n^{кр}=140.019$. /4.6/

Можемо стверджувати, що у випадку $K_n=140.019$, система автоматичного регулювання перебуває у граничному стані стійкості, тобто будь-яке подальше збільшення коефіцієнта передачі викличе автоколивання та перехід у нестійку область.

3.2 Реалізація Simulink моделі системи керування температурними режимами

На підприємствах хлібопекарської галузі саме пекарські печі становлять найбільшу частку загального споживання енергоресурсів, що робить питання оптимізації їх роботи особливо актуальним. Використання математично-програмної моделі в середовищі Simulink дає змогу оперативно, детально та комплексно проаналізувати характеристики функціонування печі, а також дослідити кінетику процесів випікання хлібобулочних виробів залежно від заданих експлуатаційних та технологічних умов.

З огляду на це, хлібопекарську піч можна розглядати як багатопараметричний одноємнісний технологічний об'єкт, поведінка якого визначається сукупністю теплотехнічних, фізичних та конструктивних параметрів. Параметрична схема розподілу температурних режимів наведена на рисунку 2.23. У структурі теплового об'єкта умовно виділяють дві основні теплові ємності: першу, що відповідає топковому відсіку, та другу - камері випікання, в якій безпосередньо відбувається термообробка продукції.

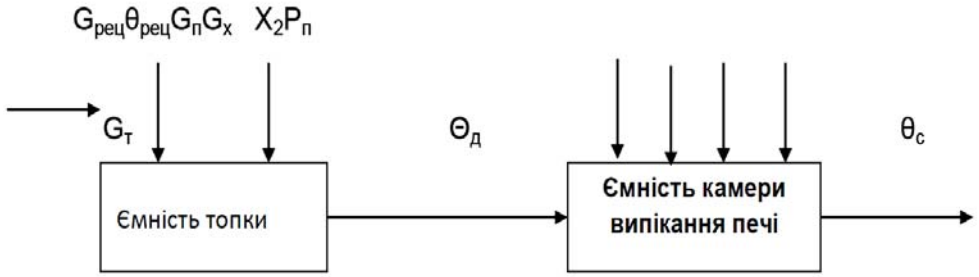


Рисунок 2.23 − Визначення параметрів печі за температурою

Для подальшого аналізу виконаємо аналітичне обчислення статичних та динамічних характеристик теплової ємності топки. У режимі усталеного функціонування процес теплообміну у топковому просторі можна описати рівнянням теплового балансу такого виду

$$Q_n - Q_c = 0, \qquad (3.17)$$

де *Qn* – величина теплового потоку, що надходить у топку печі, кВт;

Qc – потужність потоку тепла, кВт.

Опираючись на вираз (3.18), отримаємо модифіковану форму балансового рівняння:

$$Q_п = Q_х + Q_ф + Q_В + Q_{рец}, \quad (3.18)$$

де $Q_х$ – теплова енергія, генерована внаслідок хімічної реакції горіння паливної сировини (кВт);

$Q_ф$ – теплова потужність, зумовлена фізичним тепловим вмістом (ентальпією) палива, що подається (кВт);

$Q_в$ - тепло, що транспортується до камери потоками повітря (кВт);

$Q_{рец}$ - потужність рециркуляційного теплообміну (потік), що додається за рахунок зворотного перекидання (рециркуляції) димових газів (кВт).

В якості вхідних впливів для складання рівняння теплової рівноваги топки виступають такі параметри: витрата палива *Gm*, що подається у зону горіння; витрата рециркуляційних газів *Gрец*, які повертаються до топки, а також їхня початкова температура *θрец*. Зі сторони вихідного сигналу (регульованого параметра) для даної ділянки печі розглядається температура димових газів *θд*, яка характеризує теплотехнічний стан внутрішнього середовища та впливає на подальші етапи теплообміну.

Формування динамічного рівняння топки базується на положенні, що приріст температури димових газів за елементарний проміжок часу *dt* визначається як різниця між потоком теплової енергії, який надходить до топкового об'єму, та потоком теплоти, що відводиться з нього у той самий момент часу. Такий підхід дозволяє оцінити інерційні властивості системи і відобразити зміну термічного стану топки в нестаціонарних режимах.

$$T_1 \frac{d(\Delta \vartheta_\sigma)}{dt} + \Delta \vartheta_\sigma = K_{11}\Delta G_m - K_{12}\Delta G_{рец} + K_{13}\Delta G_{рец}, \quad (3.19)$$

де *K11,K12, K13* – коефіцієнти передачі печі;

T1 – параметр тепловтрати печі.

На рисунку 3.6 подано параметричну структуру камери випікання, яка розглядається як керований об'єкт за температурою θс, ^{0}С У рамках

побудованої моделі основним регулюючим впливом виступає температура димових газів $\theta д$, що відводяться після топкової секції та визначають теплову рівновагу в робочому просторі печі. Одночасно на процес підтримання температури впливає група зовнішніх збурювальних факторів, серед яких виділяються: витрата пари G_n, кг/год, показник сухості парової фази X_2;, умовна продуктивність або теплова завантаженість печі GxG_{x}Gx (кг/год), середня температура повітряного середовища всередині камери $\theta_к$, ^{0}C, а також парціальний тиск водяної пари у випікальній зоні P_n, кПа. Сукупний вплив цих факторів визначає характер перехідних процесів, що формують якість теплового режиму.

Завдяки сформульованим передумовам стає можливим перехід від просторово розподіленої математичної моделі з великою кількістю ступенів свободи до більш компактного представлення у вигляді системи зосереджених параметрів. Це, своєю чергою, підвищує ефективність чисельного аналізу, полегшує синтез системи автоматичного керування та підтримання стабільного температурного режиму в камері випікання, що пердставляється наступною рівністю [24]:

$$Q_n + Q_г + Q_c + Q_m = 0\,, \qquad (3.20)$$

де Qn – постачання тепла з парою;

$Qг$ – акумуляція тепла від нагріти тої поверхні;

Qc – тепло що постачається по теплоканалу;

Qm – теплоЮ що віддається з заготовками.

Беручи до уваги значну вологість пароповітряного середовища всередині камери, при визначенні її ефективної теплоємності допускається спрощення: густина середовища вважається еквівалентною густині пари, а значення питомої теплоємності приймається рівним питомій теплоємності водяної пари. Такий підхід дозволяє оптимізувати розрахунки та зменшити кількість параметрів, що впливають на формування теплового балансу, без суттєвої втрати точності моделювання, для питомої теплоємності пари ($\rho_c=\rho_n$, $C_c=C_n$).

$$T_1 \frac{d(\Delta\vartheta_\sigma)}{d\tau} + \Delta\vartheta_\sigma = K_{22}\Delta G_n - K_{23}\Delta G_x + K_{24}\Delta G_o - K_{25}\Delta P_n \qquad (3.21)$$

де *K21, K22 , K23 , K24 , K25* – питомі коефіцієнти;

T2 – задана постійна величина часу.

Математична модель температурного режиму хлібопекарської печі формалізується системою рівнянь, представленою у виразі (2.17):

$$\begin{cases} T_1 \frac{d(\Delta\vartheta_\sigma)}{dt} + \Delta\vartheta_\sigma = K_{11}\Delta G_m - K_{12}\Delta G_{рец} + K_{13}\Delta G_{рец} \\ T_1 \frac{d(\Delta\vartheta_\sigma)}{d\tau} + \Delta\vartheta_\sigma = K_{22}\Delta G_n - K_{23}\Delta G_x + K_{24}\Delta G_o - K_{25}\Delta P_n \end{cases} \qquad (3.22)$$

На основі цієї операторної моделі створюється структурна схема об'єкта керування (див. рис. 2.24), що є базою для імітаційного моделювання. Отримана модель уможливлює проведення комплексного аналізу як стаціонарних, так і перехідних характеристик технологічного об'єкта, дозволяючи прогнозувати його поведінку під дією різноманітних керуючих та дестабілізуючих чинників.

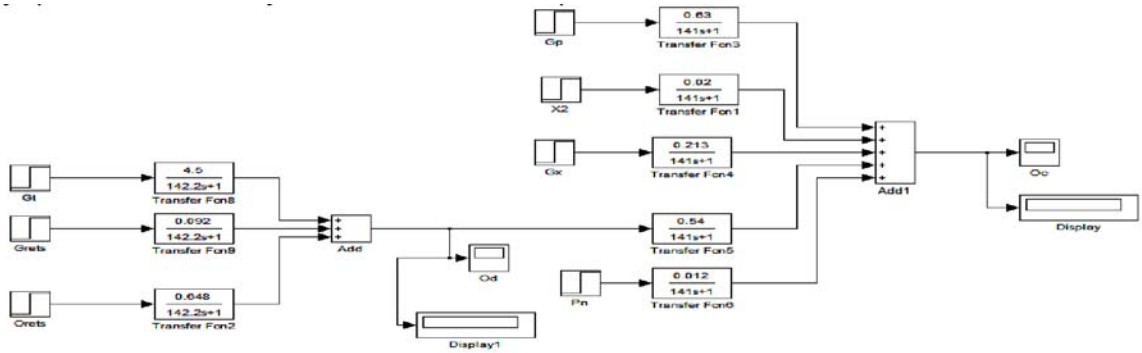


Рисунок 2.24 − Simulink схема моделі заданих температурних режимів печі

В будь-якій системі автоматичного управління необхідно обробляти не один, а сукупність сигналів, характер яких заздалегідь повністю передбачити неможливо. Тому при розробці інтелектуальних систем управління важливим етапом є проведення статистичного аналізу основних збурень і станів об’єкта, що дозволяє класифікувати їх як певний тип випадкових процесів.

Процес оцінки адекватності полягав у визначенні статистичних параметрів експериментальних даних, поданні вхідних сигналів з аналогічними характеристиками на модель та реальний об’єкт, фіксації вихідних реакцій і їх порівнянні. Порівняння виконувалось з використанням критеріїв якості ідентифікації, які відображають ступінь відповідності моделі реальному об’єкту в межах прийнятих припущень.

Для кількісної оцінки застосовано середньоквадратичний критерій, що визначає середнє значення квадрата різниці вихідних сигналів моделі і об’єкта при однакових вхідних діях [25]:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(x^{ob} - x^{\mathrm{mod}}\right)^2} \qquad (2.18)$$

На базі виведених математичних співвідношень було здійснено оцінювання критерію ідентифікації моделі. Для цієї процедури використано контрольні точки, візуалізація яких представлена на рисунку 2.25.

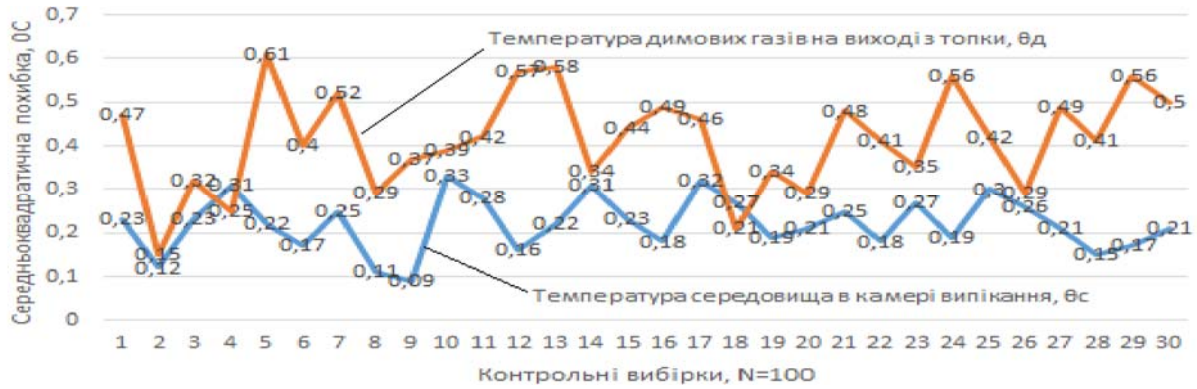


Рисунок 2.25− Визначення критерію ідентифікації заданої моделі

За підсумками обчислень, середньоквадратичне відхилення (похибка) моделювання — що являє собою розбіжність температурних значень на виході фактичного об'єкта та математичної моделі — становить менше 10 °C. Цей показник підтверджує високу ступінь відповідності (адекватності) сформованої моделі реальному тепловому режиму печі.

Таким чином, сформована математична модель температурного режиму хлібопекарської печі, базована на теплових балансах топкової зони та випікальної камери, є достовірною. Статистична обробка емпіричних

даних ключових технологічних параметрів свідчить про те, що розроблена модель достеменно відтворює поведінку досліджуваного об'єкта і, отже, придатна для подальшого системного аналізу та синтезу алгоритмів автоматичного керування.

3.3 Модернізація автоматизованої мікроконтролерної системи керування хлібобулочним виробництвом

Програмовані логічні контролери (ПЛК) серії MicroPC 6040 відіграють ключову роль у модернізації систем автоматизованого керування технологічними процесами виробництва харчової продукції (хлібобулочних та кондитерських виробів). За своєю архітектурою такі виробничі комплекси відповідають багаторівневим SCADA-системам, де визначальним чинником є прецизійне отримання та обробка аналогових сигналів із сенсорів нижнього рівня, а також генерація керуючих імпульсів для виконавчих пристроїв.

Точність та оперативність перетворення аналогових сигналів у цифрову форму, придатну для подальшої маніпуляції контролером, набувають особливого значення в аварійних або динамічних перехідних режимах. Саме тому при проектуванні або вдосконаленні мікропроцесорних засобів автоматизації рекомендовано проводити детальний аналіз характеристик аналогово-цифрових перетворювачів (АЦП), які безпосередньо впливають на ефективність функціонування системи в цілому.

Дослідження сучасних топологій одноканальних АЦП [26] свідчать про те, що найвищу швидкодію забезпечують паралельні архітектури (наприклад, flash-перетворювачі). При цьому гранична продуктивність таких структур лімітується сумарним часом затримки спрацьовування всіх елементів схеми, що визначається наступним співвідношенням:

$$T=t_К+ t_Ш+ t_Р,$$

де $t_к$, $t_ш$, $t_Р$ – часові лаги перемикання компаратора, пірамідального шифратора та тригера буферного регістра відповідно.

Слід підкреслити, що саме пірамідальний шифратор (дешифратор), особливо у разі багаторівневої організації, істотно знижує швидкодію АЦП. Його час перемикання прямо залежить від кількості послідовно з'єднаних логічних елементів, яка пропорційна розрядності, $\tau_ш - \alpha k$, де $\alpha>1$ – коефіцієнт який враховує тип шифратора.

Для підвищення надійності та оперативності автоматизованої системи керування технологічними процесами хлібобулочного виробництва рекомендовано здійснити заміну в контролері MicroPC 6040 традиційного паралельного АЦП у базисі Радемахера [27] на паралельний АЦП, побудований у базисі Галуа. Таке рішення гарантує збільшену стійкість системи до випадкових збоїв та похибок, що виникають під час процесу аналого-цифрового перетворення.

Ключовою особливістю реалізації АЦП у базисі Галуа [28] є інтеграція у матрицю пріоритетного дешифратора додаткових вентильних елементів. Вони відповідають за генерацію бітів корекції, що дозволяє виявляти та автоматично усувати одиничні помилки при перетворенні аналогових сигналів. На рисунку 3.10 наведено структурну схему паралельного аналого-цифрового перетворювача (АЦП), побудованого у базисі Галуа з реалізованим захистом від одиничних помилокУ складі схеми використовуються такі функціональні модулі:

- МПР, МК — модулі прецизійних резисторів та компараторів, що забезпечують формування та порівняння рівнів вхідного аналогового сигналу;
- $МД_{+n}$ — модуль логічних елементів, який включає інвертор і логічну схему типу «АБО», що виконує функції кодування в базисі Галуа;
- $МЛЕ_2$— модуль пріоритетного дешифратора, доповнений n бітами корекції, які реалізують механізм захисту вихідного цифрового коду від одиничних помилок під час аналого-цифрового перетворення;
- МР — модуль регістра зберігання, з якого формується та зчитується паралельний код Галуа для подальшої цифрової обробки.

Завдяки введенню додаткових логічних елементів у структуру пріоритетного дешифратора забезпечується виявлення та виправлення одиничних похибок без зниження швидкодії пристрою, що істотно підвищує надійність і точність процесу аналого-цифрового перетворення.

Така архітектура є перспективною для використання в мікропроцесорних системах керування, зокрема у складі контролерів MicroPC 6040, де потрібні висока швидкодія, стійкість до завад та коректне відтворення аналогових сигналів у цифровій формі.

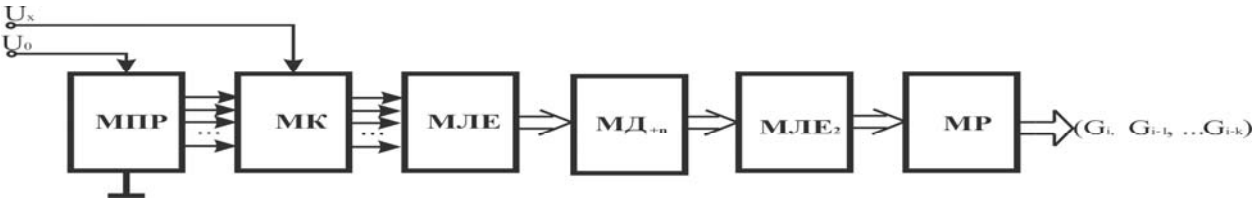


Рисунок 3.10 − Паралельний АЦП Галуа з бітами захисту від одиничних помилок

Рисунок 3.10 − Паралельний АЦП Галуа з бітами захисту від одиничних помилок

На рисунку 3.11 наведено графік функціонування основних модулів паралельного аналого-цифрового перетворювача в базисі Галуа [29]. Графічна залежність ілюструє динаміку роботи логічних елементів**,** процес виявлення та корекції одиничних похибок**,** а також послідовність формування вихідного коду в процесі аналого-цифрового перетворення.

Побудований графік відображає синхронну роботу всіх функціональних блоків системи — компараторів, дешифратора, модуля регістра та логічної схеми формування коду Галуа**.** На етапі перетворення аналоговий сигнал розподіляється між рівнями опорних напруг, що формуються модулем прецизійних резисторів, після чого цифровий результат передається через модуль контролю коректності для усунення можливих спотворень[30]**.**

Таким чином, зображений графік підтверджує ефективність запропонованої структури АЦП**,** яка поєднує високу швидкодію, точність

перетворення та підвищений рівень завадостійкості завдяки застосуванню арифметики поля Галуа та вбудованої системи бітового захисту [33]**.**

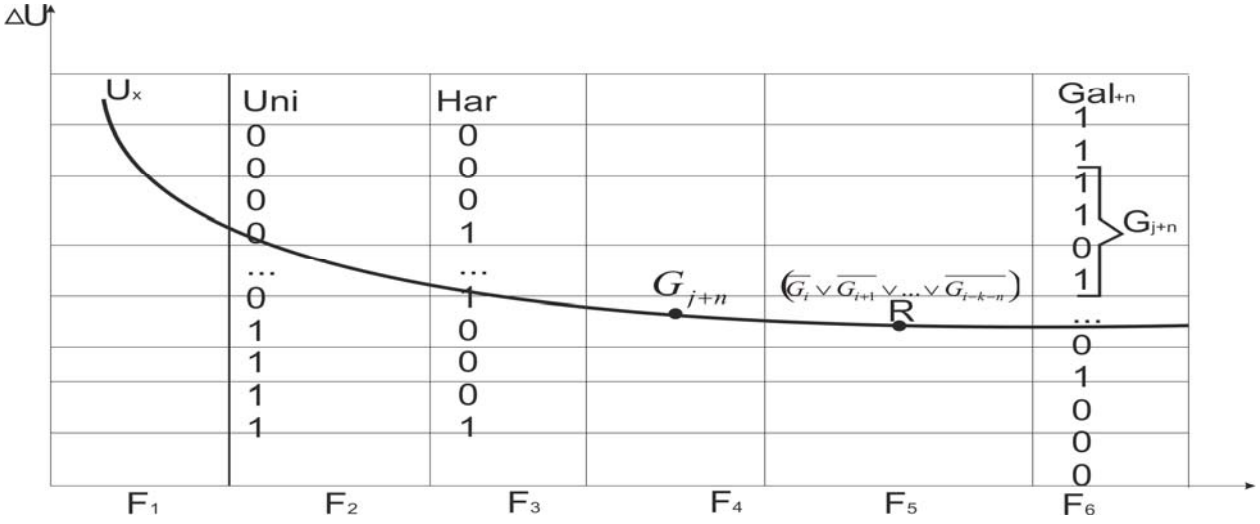


Рисунок 3.11 − Графік функціоналу АЦП Галуа паралельного типу

Часова складність функціонування паралельного аналого-цифрового перетворювача (АЦП) у базисі Галуа із використанням пріоритетного шифратора**, в** конструкцію якого додатково інтегровано логічні вентилі для забезпечення захисту від одиничних похибок**,** визначається наступним співвідношенням:

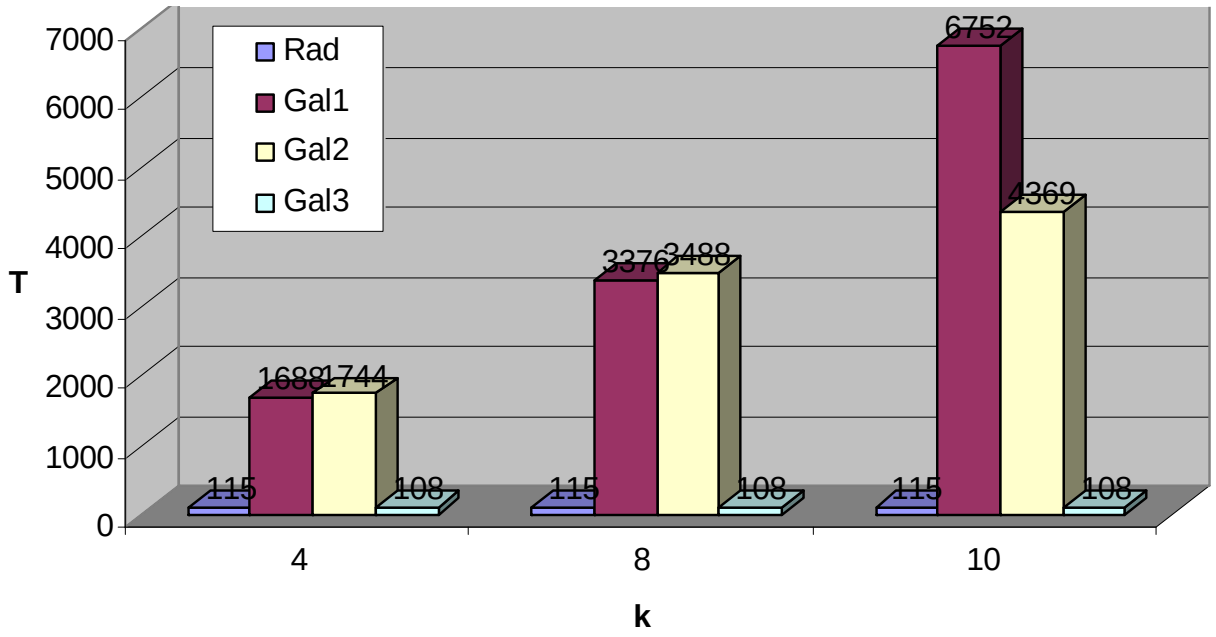
$$T_{Gal\ 3} = t_k + 4t_{ле} + t_p, \qquad (3.17)$$

t_k, $t_{ле}$, t_p - це часові затримки, що відповідають спрацюванню компаратора, логічного елемента та регістра відповідно.

Виходячи з аналітичного виразу (3.17), було виконано розрахунок показників швидкодії паралельного аналого-цифрового перетворювача, реалізованого у базисі Галуа. Отримані результати дозволили оцінити ефективність функціонування даної структури у порівнянні з традиційним паралельним АЦП, побудованим у базисі Радемахера (рисунок 3.12).

Проведений аналіз підтвердив, що використання пріоритетного шифратора з додатковими захисними вентилями у структурі АЦП Галуа забезпечує зменшення сумарних часових затримок та підвищення надійності перетворення сигналу, що позитивно впливає на загальну швидкодію системи автоматизованого керування [34].

Крім того, завдяки високому ступеню уніфікації та регулярності побудови, архітектура АЦП у базисі Галуа значно спрощує етапи мікроелектронної реалізації та інтеграції у контролер, що робить її оптимальним варіантом для оновлення та вдосконалення систем точного вимірювання і управління у виробничих процесах кондитерської та хлібопекарської промисловості.



Rad — паралельний аналого-цифровий перетворювач (АЦП) у базисі Радемахера,Gal1 — скануючий АЦП у базисі Галуа, Gal2 — скануючий АЦП у базисі Галуа зі зменшеною кількістю компараторів, Gal3 — паралельний АЦП на основі базису Галуа.

Рисунок 3.12 Залежність часової складності досліджуваних АЦП від розрядності.

Графічне представлення часової складності перетворення для вказаних АЦП, що залежить від їх розрядності, наведено на рисунку 3.12.

Зіставлення швидкодії показує, що паралельний АЦП Галуа (Gal3) перевищує аналогічний пристрій у базисі Радемахера (Rad) за показниками продуктивності. Окрім цього, структура Галуа має додаткову функцію — виявлення та корекцію одиничних помилок, що виникають у процесі

формування цифрових кодів, що значно підвищує достовірність перетворення.

Враховуючи ці фактори, рекомендується впровадження паралельного АЦП Галуа з можливістю корекції помилок у складі контролера *MicroPC 6040*. Це рішення дозволить значно покращити точність і стабільність системи автоматичного управління в умовах хлібопекарського та кондитерського виробництва.

На рисунку 3.13 представлена модернізована конфігурація контролера *MicroPC 6040*, в якій інтегровані паралельні АЦП Галуа з функціями виправлення одиничних помилок під час аналого-цифрового перетворення сигналів датчиків нижнього рівня. Така архітектура сприяє підвищенню надійності і ефективності обробки даних, що в кінцевому результаті впливає на якість управління технологічним процесом.

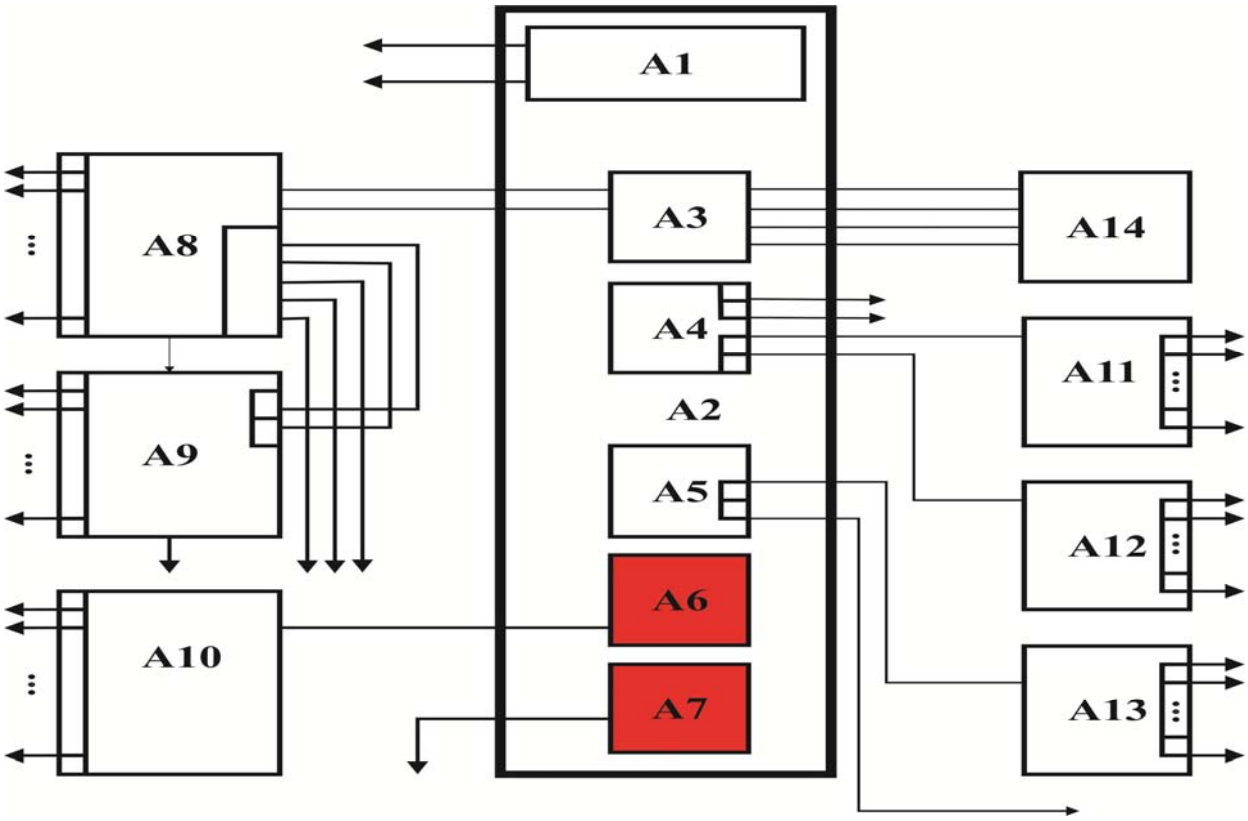


Рисунок 3.13 − Модифікований MicroPC 6040 з вбудованими АЦП Галуа паралельного типу.

Структурна схема контролера включає змінені плати АЦП: А6, А7 - плати АЦП Галуа паралельного типу. Решта компонентів схеми мікро контролера представлено у Додатку А.

Таким чином, модернізований контролер MicroPC 6040, оснащений паралельним аналого-цифровим перетворювачем на базисі Галуа, дозволяє в автоматизованій системі керування хлібобулочним виробництвом приймати та обробляти біт-орієнтовані вхідні коди безпосередньо через порти введення даних мікроконтролера. Така архітектура забезпечує реалізацію корекції одиничних помилок на етапі аналого-цифрового перетворення, що підвищує надійність цифрового представлення сигналів від датчиків нижнього рівня. Впровадження цього рішення розширює функціональні можливості контролера, забезпечуючи підвищену швидкодію та точність перетворення та подальшої обробки аналогових сигналів, що є критично важливим для стабільного управління технологічним процесом у реальному часі.

ВИСНОВКИ

У роботі здійснено аналіз сучасних автоматизованих комплексів для виробництва хлібобулочних та кондитерських виробів. Встановлено, що провідну позицію у галузі сьогодні посідають компактні виробничі лінії з повним технологічним циклом. Детально досліджено основні компоненти таких систем, зокрема: апарати для замісу тіста, обладнання для його округлення, закаточні машини та ротаційні печі.

Проаналізовано структурні особливості систем автоматичного регулювання температурного режиму пекарних камер із обґрунтуванням вибору оптимального методу керування. Доведено, що для процесів хлібопечення найбільш ефективними є двопозиційні регулятори, які забезпечують високу якість регулювання для інерційних об'єктів із мінімальним запізненням, відрізняються простотою налаштування та експлуатації.

Розкрито принципи функціонування програмованих контролерів керування хлібопекарськими лініями, здійснено порівняльний аналіз роботи температурних сенсорів та витратомірів різних речовин. Виконано технічну оцінку необхідних пристроїв із визначенням їх ключових параметрів та функціональних можливостей, що дозволило обґрунтувати вибір оптимального обладнання для автоматизації виробництва.

Запропоновано вдосконалену систему автоматизації, яка відповідає сучасним вимогам до швидкодії та функціональності, забезпечує оперативне перемикання між різними технологічними режимами та розширює спектр виконуваних операцій.

Значну увагу приділено оптимізації мікроконтролерної системи керування хлібопекарським виробництвом шляхом впровадження паралельного аналого-цифрового перетворювача (АЦП), побудованого на основі теорії полів Галуа. Впровадження даного рішення дозволило суттєво підвищити швидкість обробки аналогових сигналів та реалізувати корекцію

одиночних помилок завдяки використанню рекурентних кодових послідовностей Галуа, що значно підвищило відмовостійкість і точність системи керування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

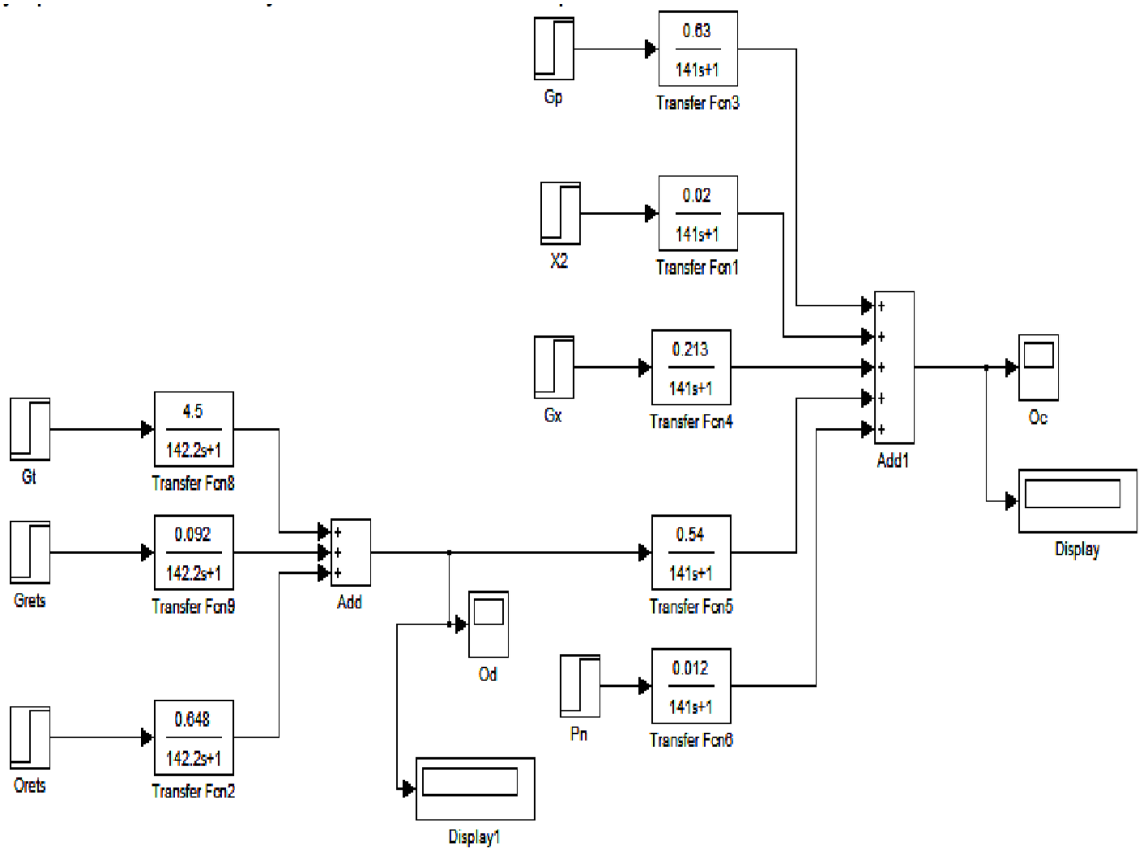
1. ДСТУ 4585:2021 Вироби хлібобулочні здобні. Загальні технічні умови. – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2021. – 28 с.
2. ДСТУ 4582:2006 Система розроблення і поставлення продукції на виробництво. Хліб та хлібобулочні вироби. Основні положення / Держспоживстандарт України. – Київ: Держспоживстандарт України, 2006. – 12 с.
3. ДСТУ 2120-93 Хлібопекарське виробництво. Терміни та визначення / Держстандарт України. – Київ: Держстандарт України, 1993. – 24 с.
4. ДСТУ 9027:2020 Системи управління якістю. Настанови щодо вхідного контролю продукції / ДП «УкрНДНЦ». – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2020. – 36 с.
5. Новікова О.В. Технологія виробництва хліба, кондитерських і макаронних виробів: навчальний посібник / О.В. Новікова. – Київ: Центр учбової літератури, 2019. – 536 с.
6. Пахомська О.В. Впровадження системи НАССР у виробництві хлібобулочних виробів / О.В. Пахомська // Наукові праці Національного університету харчових технологій. – 2019. – Т. 25, № 4. – С. 157-165.
7. Цяпенко Р.Ю. Розробка системи автоматизації процесу випікання хліба: кваліфікаційна робота бакалавра: 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології / Р.Ю. Цяпенко; наук. керівник Н.А. Заєць. – Київ: НУХТ, 2021. – 85 с.
8. Бондарєв А.М. Розробка автоматизованої системи моніторингу та управління виробничими процесами на підприємстві: кваліфікаційна робота магістра: 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології / А.М. Бондарєв; наук. керівник В.П. Сидоренко. – Харків: ХНУРЕ, 2022. – 98 с.

9. Петренко В.І. Автоматизована система керування технологічними процесами випікання хліба: дипломна робота / В.І. Петренко; наук. керівник О.М. Ковальов. – Одеса: ОНАХТ, 2020. – 112 с.
10. Автоматизація хлібопекарського виробництва: інноваційне обладнання [Електронний ресурс] // ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ. – 2022. – Режим доступу: https://harch.tech/2022/05/10/avtomatyzacija_hlibopekarskogo_vyrobnyctva_innovacijne_obladnannia/
11. Відсаджувальні машини для печива та інших кондитерських виробів [Електронний ресурс] // ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ. – 2025. – Режим доступу: https://harch.tech/2025/05/14/vidsadzhyvalni-mashyny-dlja-pechyva-ta-inshyh-kondyterskyh-vyrobiv/
12. Arduino UNO та програмовані логічні контролери [Електронний ресурс] // PromProg. – 2023. – Режим доступу: https://www.promprog.biz.ua/kor/arduino/80-arduino-uno.html
13. Програмування ПЛК у харчовій промисловості [Електронний ресурс] // Світовир. – 2024. – Режим доступу: https://svitovyr.ua/PLC/
14. Використання апаратно-програмного комплексу Arduino на уроках інформатики [Електронний ресурс] // Naurok. – 2023. – Режим доступу: https://naurok.com.ua/vikoristannya-aparatno-programnogo-komleksu-arduino-na-urokah-informatiki-233311.html
15. Виробництво хліба, кондитерських, макаронних виробів і харчових концентратів [Електронний ресурс] // ВСПХП. – 2024. – Режим доступу: https://vspkhp.com.ua/210.html
16. Rockwell Automation. Bakery Automation Solutions [Electronic resource] / Rockwell Automation. – 2024. – Access mode: https://www.rockwellautomation.com/en-us/industries/food-beverage/industrial-bakery-automation.html

17. EZSoft Inc. Advanced Bakery Control System: Bread and Muffin Production [Electronic resource] / EZSoft Inc. – 2024. – Access mode: https://ezsoft-inc.com/bread-and-muffin-bakery-control-system/
18. Sterling Systems & Controls. Food & Bakery Processing Equipment for Efficient Production [Electronic resource] / Sterling Systems & Controls, Inc. – 2024. – Access mode: https://sterlingcontrols.com/industries-applications/baking-food-processing/
19. Siemens AG. Bakery and Confectionery Industry Digital Solutions [Electronic resource] / Siemens AG. – 2024. – Access mode: https://www.siemens.com/us/en/industries/food-beverage/bakery-and-confectionery.html
20. Controllink Inc. Control Systems For The Bakery Industry [Electronic resource] / Controllink, Inc. – 2017. – Access mode: https://www.controllink.com/bakery/
21. AMF Bakery Systems. Best-in-Class Industrial Bakery Equipment [Electronic resource] / AMF Bakery Systems. – 2025. – Access mode: https://amfbakery.com/
22. Aasted. Innovative World-Class Solutions for Chocolate and Bakery [Electronic resource] / Aasted Group. – 2024. – Access mode: https://aasted.eu/
23. KPM Analytics. Over-Line Vision Process Control Bakery Production System [Electronic resource] / KPM Analytics. – 2024. – Access mode: https://www.kpmanalytics.com/products/vision/process-control-solutions-for-bakery-production
24. Banzi M. Arduino: An Open-Source Platform for Electronic Prototyping / M. Banzi, D. Cuartielles // IEEE Pervasive Computing. – 2011. – Vol. 10, No. 4. – P. 12-15.
25. Monk S. Programming Arduino: Getting Started with Sketches / Simon Monk. – 2nd ed. – New York: McGraw-Hill Education, 2016. – 192 p.

26. Николайчук Я.М. Проектування спеціалізованих комп’ютерних систем / Я.М. Николайчук, Н.Я. Возна, І.Р. Пітух / Навчальний посібник / – Тернопіль: ТзОВ «Терно-граф», 2010.–392 с.
27. Гуменний П.В. Функціональна структура спецпроцесора вертикально-інформаційної технології та його компоненти. /П.В. Гуменний, Я.М. Николайчук// Вісник національного університету "Львівська політехніка", "Комп'ютерні системи та мережі". –2012. –№745. –С.69-74.
28. Гуменний П.В. Дослідження архітектури аналого-цифрових та цифро-аналогових перетворювачів у теоретико-числовому базисі Галуа /П.В. Гуменний// Збірник матеріалів проблемно-наукової міжгалузевої конференції "Юриспруденція та проблеми інформаційного суспільства "(ЮПІС - 2011)" –Івано-Франківськ, 2011. –С.82-85.
29. Гуменний П.В. Метод побудови паралельного аналого-цифрового перетворювача у теоретико-числовому базисі Галуа з найменшим числом імпульсних компараторів /П.В. Гуменний// Вісник Хмельницького національного технічного університету. – 2013. – №4. – С.152-157.
30. Николайчук Я.М. Коди поля Галуа / Я.М. Николайчук // ТзОВ «Терног раф», – Тернопіль, –2012. –576 с.
31. Николайчук Я. М. Вертикальна інформаційна технологія в базисі Галуа – новий напрямок у розвитку комп’ютерних машин. /Я.М. Николайчук, Р.І. Король// – Львів: CCU’2000, –2000, С23-26.
32. Николайчук Я.М. Теорія джерел інформації / Я.М. Николайчук // - Тернопіль: ТНЕУ. – 2008. – 536с.
33. Патент на корисну модель. №77037 Україна, МПК H038M. Аналого-цифровий перетворювач /Я.М. Николайчук, П.В. Гуменний – опуб. 25.01.2013, бюл. №2.

34. Патент на корисну модель. №70744 Україна, МПК H038M. Аналого-цифровий перетворювач /Я.М. Николайчук, П.В. Гуменний. – опуб. 25.06.2012, бюл. №12.

ДОДАТОК А

Структурна схема моделі температурних режимів роботи хлібопекарської печі