

Міністерство освіти і науки України
Луцький національний технічний університет
Факультет комп'ютерних та інформаційних технологій
Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «МАГІСТР»**

на тему

**РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ
КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ ВИРОБНИЦТВА
СУЩЕНИХ ОВОЧІВ**

**DEVELOPMENT AND RESEARCH OF AN AUTOMATED CONTROL
SYSTEM FOR THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF DRIED VEGETABLE
PRODUCTION**

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

(шифр і назва спеціальності)

освітня програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти
групи АВм-21

Соботович Михайло Ігорович _____
(підпис)

Керівник: к.т.н., доцент

Решетило Олександр Миколайович

(підпис)

Кваліфікаційну роботу

допущено до захисту

«__» грудня 2025 р.

Гарант освітньої програми:

к.т.н., Гуменюк Павло Олександрович

(підпис)

Луцьк – 2025 року

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет: комп'ютерних та інформаційних технологій

Кафедра: автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Ступінь вищої освіти: магістр

Галузь знань: 17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації

Спеціальність: 174 Автоматизація комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніка

Освітня програма: «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри,

_____ д.т.н., Повстяной О. Ю.

«___» _____ 2025 року

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ДРУГОГО (МАГІСТЕРСЬКОГО) РІВНЯ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Соботовичу Михайлу Ігоровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка та дослідження автоматизованої системи керування технологічним виробництвом сушених овочів

керівник роботи: к. т. н., доцент, Решетило Олександр Миколайович

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від «27» червня 2025 року № 304/01-02

2. Строк подання здобувачем роботи: 12.12.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи технологічний процес виробництва сушених овочів.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1 Стан питання і завдання досліджень. 2 Аналіз технологічного процесу як об'єкта керування. 3 Обґрунтування вибору функціональної схеми автоматизації. 4 Обґрунтування вибору технічних засобів автоматизації. 5 Спеціальна частина. 6 Обґрунтування вибору і опис принципів схем автоматизації. 7 Програма функціонування мікроконтролера. 8 Розрахунок економічної ефективності системи автоматизації, що проектується. Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу

1 Схема функціональна – формат А1. 2 Схема електрична принципова – формат А1. 3 Блок-а програми функціонування контролера – формат А1. 4 Структурна схема програми функціонування контролера – формат А1. 5 Стратегія в SCADA-системі AdamView – формат А1.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Теоретична частина</i>	<i>Решетило О. М.</i>		
<i>Аналітична частина</i>	<i>Решетило О. М.</i>		
<i>Рекомендаційна частина</i>	<i>Решетило О. М.</i>		
<i>Нормоконтроль</i>	<i>Лапченко Ю. С.</i>		
<i>Гарант ОПП</i>	<i>Гуменюк П. О.</i>		
<i>Показник запозичень тексту</i>		_____ %	
<i>Академічна добросесність</i>	<i>Федік Л. Ю.</i>		

7. Дата видачі завдання 28.06.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	<i>Вибір теми кваліфікаційної роботи</i>	<i>до 27.06.2025 р.</i>	
2.	<i>Стан питання і завдання досліджень</i>	<i>до 02.09.2025 р.</i>	
3.	<i>Аналіз технологічного процесу як об'єкта керування</i>	<i>до 20.09.2025 р.</i>	
4.	<i>Обґрунтування вибору функціональної схеми автоматизації</i>	<i>до 01.10.2025 р.</i>	
5.	<i>Обґрунтування вибору технічних засобів автоматизації</i>	<i>до 05.10.2025 р.</i>	
6.	<i>Розрахунок та вибір типу регулятора автоматизованої системи керування температурою в прес-екструдері</i>	<i>до 07.10.2025 р.</i>	
7.	<i>Обґрунтування вибору і опис принципів схем автоматизації</i>	<i>до 10.10.2025 р.</i>	
8.	<i>Програма функціонування мікроконтролера</i>	<i>до 10.10.2025 р.</i>	
9.	<i>Розрахунок економічної ефективності системи автоматизації, що проектується</i>	<i>до 20.10.2025 р.</i>	
10.	<i>Оформлення пояснювальної записки</i>	<i>до 01.11.2025 р.</i>	
11.	<i>Інструментальна перевірка і експертне оцінювання рівня унікальності тексту</i>	<i>до 05.12.2025 р.</i>	
12.	<i>Представлення роботи до захисту</i>	<i>до 14.12.2025 р.</i>	

Здобувач вищої освіти

_____ (підпис)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Соботович М. І.

_____ (прізвище та ініціали)

Решетило О. М.

_____ (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Соботович М. І. Розробка та дослідження автоматизованої системи керування технологічним процесом виробництва сушених овочів. Рукопис.

Кваліфікаційна робота магістра ОП «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка». Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2025.

Кваліфікаційна робота магістра складається з вступу, восьми розділів, висновків, переліку використаних джерел та додатків.

Кваліфікаційна робота присвячена проектуванню автоматизованої системи керування технологічним процесом виробництва сушених овочів. Проведено аналіз технологічного процесу, як об'єкта керування, та визначено задачі досліджень. Розроблено функціональну схему автоматизації, вибрано технічні засоби автоматизації та промисловий контролер. Розроблено принципову електричну схему з'єднання модулів контролера з датчиками та виконавчими механізмами. Проведено теоретичні дослідження впливу технологічних параметрів на якість сушіння овочів і визначено основні технологічні параметри, що впливають на якість сушіння овочів. Проведено розрахунок та вибір типу регулятора автоматизованої системи керування температурою в сушарці. Для керування автоматизованою системою з робочого місця оператора ЕОМ в середовищі AdamView розроблена стратегія. Проведено розрахунок економічної ефективності доцільності впровадження розробленої автоматизованої системи керування.

Об'єм графічної частини магістерської роботи складає 5 листів формату А1 (840 × 594 мм). Обсяг пояснювальної записки становить 82 друковані сторінки.

Магістерська робота містить 7 рисунків, 18 таблиць. Використано 25 літературних джерел та інформація з глобальної мережі Інтернет.

Ключові слова: автоматизована, система, керування, технологічний, процес, виробництво, сушіння, овочі, контролер, програма, економічна ефективність.

ANNOTATION

Sobotovych M. Development and research of an automated control system for the technological process of dried vegetable production. Manuscript.

Qualification work of the master of OP «Automation and computer-integrated technologies» specialty 174 «Automation, computer-integrated technologies and robotics». Lutsk National Technical University. Lutsk, 2025.

The master's thesis consists of an introduction, eight chapters, conclusions, a list of sources used, and appendices.

The qualification work is devoted to the design of an automated control system for the technological process of dried vegetable production. The technological process as a control object was analyzed, and research tasks were defined. A functional automation scheme was developed, technical means of automation and an industrial controller were selected. A schematic electrical diagram of the connection of controller modules with sensors and actuators was developed. Theoretical studies of the influence of technological parameters on the quality of vegetable drying were conducted and the main technological parameters that affect the quality of vegetable drying were determined. The type of regulator for the automated temperature control system in the dryer was calculated and selected. A strategy was developed to control the automated system from the operator's workstation in the AdamView environment. The economic efficiency of the feasibility of implementing the developed automated control system was calculated.

The volume of the graphic part of the master's work is 5 sheets of A1 format (840 × 594 mm). The volume of the explanatory note is 82 printed pages.

The master's thesis contains 7 figures, 18 tables. 21 literary sources and information from the global Internet were used.

Key words: automated, system, control, technological, process, production, drying, vegetables, controller, program, economic efficiency.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1 СТАН ПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	11
1.1 Характеристика сировини та напівфабрикатів	11
1.2 Опис технологічного процесу	11
1.3 Стадії технологічного процесу	12
1.4 Будова і принцип роботи лінії	12
1.5 Характеристика комплексів устаткування	14
1.6 Карта технологічного процесу виробництва сушених овочів	15
1.7 Завдання автоматизації технологічного процесу виробництва сушених овочів	15
Висновки до розділу 1 та задачі досліджень	17
РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ЯК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ.....	18
Висновок до розділу 2.....	19
РОЗДІЛ 3 ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ.....	20
Висновок до розділу 3.....	25
РОЗДІЛ 4 ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ.....	26
4.1 Обґрунтування вибору датчиків.....	26
4.2 Обґрунтування вибору виконавчих механізмів та регулюючих органів	26
4.3 Обґрунтування вибору контролера	27
4.4 Розрахунок та вибір джерела живлення автоматизованої системи керування	28

Висновки до розділу 4.....	29
РОЗДІЛ 5 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ НА ЯКІСТЬ СУШІННЯ ОВОЧІВ ТА РОЗРАХУНОК РЕГУЛЯТОРА ТЕМПЕРАТУРИ	31
5.1 Дослідження впливу технологічних параметрів на якість сушіння овочів	31
5.2 Розробка коду програмного забезпечення для відтворення графіків за розглянутими моделями	34
5.3 Висновки та практичні рекомендації	36
5.4 Розрахунок та вибір типу регулятора автоматизованої системи керування температурою в сушарці технологічного процесу виробництва сушених овочів	37
Висновки до розділу 5.....	39
РОЗДІЛ 6 ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ І ОПИС ПРИНЦИПОВИХ СХЕМ АВТОМАТИЗАЦІЇ	41
Висновок до розділу 6.....	43
РОЗДІЛ 7 ПРОГРАМА ФУНКЦІОНУВАННЯ КОНТРОЛЕРА.....	44
7.1 Розробка алгоритмів керування	44
7.2 Розробка структурної схеми алгоритму обробки даних програмного забезпечення вищого рівня автоматизованої системи ...	46
7.3 Розробка програми функціонування контролера	47
Висновок до розділу 7	50
РОЗДІЛ 8 РОЗРАХУНОК ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ, ЩО ПРОЕКТУЄТЬСЯ..	51
8.1 Розрахунок капітальних затрат на автоматизацію	51
8.2 Розрахунок експлуатаційних затрат	53
Висновок до розділу 8.....	54
ВИСНОВКИ.....	55
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	60
ДОДАТКИ.....	63

ВСТУП

Актуальність теми.

У сучасних умовах розвитку харчової промисловості особливу увагу приділяють підвищенню ефективності виробництва, якості готової продукції та енергозбереженню. Виробництво сушених овочів є технологічно складним процесом, що включає декілька етапів – миття, подрібнення, бланшування, сушіння, охолодження та пакування. Найбільш енергоємною і критичною з точки зору якості продукції є операція сушіння, оскільки від точності підтримання температури, вологості та швидкості повітряного потоку залежить кінцевий результат.

Традиційні системи керування сушильними установками часто мають низький рівень автоматизації та потребують постійного контролю з боку оператора. Це призводить до людського фактору, перевитрат енергії, нестабільної якості продукції та втрати частини корисних речовин у процесі сушіння.

Розробка автоматизованої системи керування (АСК) технологічним процесом сушіння овочів дає можливість:

- забезпечити точне регулювання параметрів процесу в реальному часі (температури, вологості, швидкості циркуляції повітря);
- підвищити стабільність та повторюваність якості готових сушених овочів;
- оптимізувати енергоспоживання за рахунок адаптивного керування нагрівом і вентиляцією;
- зменшити втрати сировини та часу при переході між режимами сушіння;
- створити умови для дистанційного моніторингу та діагностики обладнання за допомогою сучасних SCADA- або IoT-рішень.

Крім того, автоматизація процесу сушіння овочів сприяє екологічній безпеці виробництва, оскільки дозволяє знизити обсяги споживаної електроенергії та тепла, зменшуючи викиди в атмосферу.

Отже, актуальність розробки та дослідження автоматизованої системи керування технологічним процесом виробництва сушених овочів полягає у

необхідності підвищення ефективності та конкурентоспроможності харчової промисловості, забезпечення стабільної якості продукції, раціонального використання енергоресурсів і впровадження сучасних інформаційних технологій у виробництво.

Мета кваліфікаційної роботи – розробка автоматизованої системи керування технологічним процесом виробництва гранульованого комбікорму, яка забезпечує підвищення ефективності, стабільності та якості виробництва за рахунок оптимізації режимів роботи обладнання та зменшення впливу людського фактору.

Об'єкт дослідження – технологічний процес виробництва сушених овочів.

Предмет дослідження – створення ефективної, надійної та енергозберігаючої системи, яка забезпечує стабільну якість продукції за рахунок оптимального керування параметрами процесу сушіння.

Методи досліджень – опис, аналогія, порівняння, аналіз, синтез, системний підхід.

Задачі дослідження.

Основними завданнями, що визначають досягнення поставленої мети, є:

1. Аналіз технологічного процесу сушіння овочів та визначення основних факторів, що впливають на якість готової продукції.

2. Розробка структури автоматизованої системи керування, яка включає вимірювальні, керуючі та виконавчі пристрої, а також засоби збору та обробки інформації.

3. Створення алгоритмів керування, що забезпечують підтримання оптимальних температурно-вологісних режимів залежно від виду овочів і стадії процесу сушіння.

4. Впровадження системи моніторингу та візуалізації параметрів процесу з можливістю дистанційного контролю через інтерфейс SCADA або локальну мережу.

5. Підвищення рівня автоматизації за рахунок використання сучасних мікропроцесорних контролерів та сенсорних систем.

6. Зниження енерговитрат і мінімізація впливу людського фактору на результати виробництва.

Джерела інформаційної бази досліджень – відомості про технологічний процес виробництва сушених овочів.

Таким чином, основна мета розробки полягає у побудові інтегрованої автоматизованої системи, яка забезпечує раціональне керування технологічним процесом сушіння овочів, гарантує високу якість кінцевої продукції, підвищує продуктивність обладнання та зменшує витрати на енергоресурси.

На основі викладеного в роботі частини матеріалу опублікована стаття в збірнику XIII Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції молодих учених та студентів «Актуальні проблеми автоматизації та управління» [1].

РОЗДІЛ 1

СТАН ПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Характеристика сировини та напівфабрикатів

«До видів продукції, що переробляються, відносяться: морква і овочі (горошок, зелень пряна, капуста білокачанна, коріння біле, цибуля, морква, буряк, цикорій, часник).

Переробка свіжих овочів на харчові концентрати дозволяє скоротити їх втрати при зберіганні, при цьому більш повно зберігається їх харчова цінність, з'являється можливість збагачення продуктів вітамінами і іншими харчовими і смаковими компонентами, створюються умови для комплексної переробки сировини з повною утилізацією відходів.

Сировину, що надійшла, зважують і піддають аналізу за наступними показниками: зовнішній вигляд, запах і смак, розмір плодів, форма, колір м'якоті, масова частка крохмалю (для картоплі), внутрішня будова плодів (баклажани), наявність пошкоджень, масова частка розчинних сухих речовин в соку по рефрактометру» [1].

1.2 Опис технологічного процесу

«Виробництво сушених овочів здійснюється на механізованих лініях, що дозволяють переходити з виробництва одного виду продукту на інший.

Основними процесами цього виробництва є миття, інспектування, калібрування, очищення, теплова обробка, різка, бланшування, сушка.

При очищенні та митті відбувається відділення домішок і видалення різних забруднень. При тепловій обробці відбуваються гідролітична дія вологи на сухі компоненти продукту і необоротні зміни білково-вуглеводного комплексу. До теплової обробки відноситься також бланшування – короткочасна теплова обробка паром (в нашому випадку), гарячою водою, гарячим розчином солі чи кислоти

овочів, картоплі і фруктів до температури 85-98 °С з негайним наступним охолодженням холодною водою.

При сушці видаляється волога і формуються такі зміни в складі і структурі продукту, які визначають його смакові і споживчі властивості» [2-4].

1.3 Стадії технологічного процесу

«Виробництво сушених овочів складається з наступних основних операцій:

- прийом і зберігання сировини;
- миття;
- інспекція;
- калібрування (при пароводотермічному способі очищення);
- очищення (паровим, пароводотермічним або лужним способом);
- обробка розчином бісульфіту натрію;
- доочистка;
- різка;
- бланшування (при паровому або лужному способах очищення);
- сушіння;
- інспекція;
- упаковка» [2-4].

1.4 Будова і принцип роботи лінії

«З овочесховища овочі по гідротранспортеру 1 надходять на ковшовий елеватор 2, а потім через проміжний бункер на автоматичні ваги 3. Далі вони прямують в бункер-накопичувач 4, а із нього – у вібраційну мийну машину 5.

Миття здійснюється у проточній воді до повного видалення забруднень; співвідношення води і овочів 3:1. Вимиті овочі інспектують, видаляючи підгнилі

та пошкоджені коренеплоди, і калібрують за трьома розмірами: дрібні – прохід через отвори розміром 60x60 мм; середні – 70 x 70 мм; великі – схід з машини.

З вібраційної мийної машини 5 вимиті овочі надходять на скребковий транспортер 6, що подає їх через турнікети 7 в парову очисну машину 8, де вони обробляється паром при тиску 0,30-0,35 МПа протягом 40-50 с. Після цього овочі надходять в барабанну мийно-очисну машину 9, куди під тиском 0,3-0,5 МПа подається вода. Тривалість витримки в ній овочів регулюється кутом нахилу барабана. Кількість повністю очищених овочів складає 97-99 %.

Очищені овочі з барабанної мийно-очисної машини 9 надходять в сульфитатор 10, де обробляються 0,1 %-им розчином бісульфіту натрію протягом 1-2 хв., а тоді висипаються на стрічку конвеєра доочистки 11, де вручну видаляють вічки, темні плями, залишки шкірки та інші дефекти.

Відходи через ґрати, що встановлені по обидві сторони стрічки конвеєра 11, поступають в гідротранспортер, з якого насосом 12 відкачуються не тільки тверді очищення, але й рідкі відходи від барабанної мийної машини 9 на ґратчастий барабан 13, що обертається. Рідкі відходи насосом 12 подаються в три послідовно з'єднаних відстійника 14, а тверді очищення йдуть в розташовану поряд бетонну ємкість 15 для використання на корм худобі.

З конвеєра доочистки 11 овочі надходять в елеваторну мийну машину 16 і скребковим транспортером 6 завантажуються в бункер овочерізки 17. Різання здійснюється на стовпчики розмірами не більше 3 x 5 x 10 мм, кубики розміром грані 9-12 мм, пластини розмірами не більше 4 x 12 x 12 мм. Під овочерізкою встановлено вібраційне сито 18 з розміром комірок 4 мм, на яких нарізані овочі промиваються водою для видалення з їх поверхні вільного крохмалю.

Нарізаний продукт надходить на лоток 19, який рівномірно розподіляє його на стрічці парового бланшувача 20. Бланшування продукту здійснюється при температурі 95-98 °С протягом 4-6 хв. Після бланшування продукт промивають холодною водою. Бланшовані овочі зсипаються на стрічку сушарки 21.

Підготовлені овочі, що надходять на першу сушильну стрічку, повинні розподілятися по всій її ширині шаром однакової товщини.

Підготовлена сировина, що надходить на верхню стрічку, переноситься при її русі в інший кінець сушарки, де пересипається на другу стрічку. З другої стрічки вона надходить на третю, а потім на четверту і п'яту стрічки. Сходом з п'ятої стрічки виходить готовий сушений продукт. Для забезпечення максимальної температури повітря над стрічками тиск пари біля входу в калорифер 22 повинен бути в межах 0,4-0,6 МПа. Повітря в калорифер 22 нагнітається вентилятором 23.

Висушені овочі з сушарки 23 надходять на стрічковий сортувальний транспортер 24, де проводиться інспекція та сортування сушеного продукту.

Відсортовані овочі, зсипаючись з транспортера, проходять магнітну загороду 25, ваги 26 і фасуються розсипом в крафт-мішки, які зашивають на машині 27.

Відсортовані овочі можуть поступати на брикетування. Брикетують сушені овочі на гідравлічних пресах. Брикети фасують в металеві банки. Тоді банки закатують на закатувальній машині та для запобігання корозії металу змащують у ванні технічним вазеліном, що підігрітий до температури 135 °С» [4].

1.5 Характеристика комплексів устаткування

«Початкові стадії технологічного процесу виробництва сушених овочів виконуються за допомогою комплексів устаткування для зберігання, транспортування та підготовки до виробництва сировини, води, солі, жиру і інших видів сировини. Для зберігання сировини використовують спеціальні сховища, холодильні камери, бурти, траншеї і т. д.

Підготовку сировини здійснюють за допомогою мийних машин, інспекційних транспортерів і устаткування для очищення і виконання допоміжних операцій.

Базовий комплекс лінії складається з овочерізок, бланшувачів, сушарок.

Наступний комплекс лінії включає устаткування для дозування і змішування рецептурних компонентів.

Завершальний комплекс устаткування лінії забезпечує упаковку, зберігання і транспортування готових виробів. Він містить фасувально-пакувальні машини та устаткування експедиції і складування готової продукції» [4].

1.6 Карта технологічного процесу виробництва сушених овочів

Основні технологічні параметри процесу виробництва сушених овочів та їх допустимі відхилення [5, 6] наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Карта технологічного процесу виробництва сушених овочів

Технологічний процес	Параметр	Межі регулювання
Очищення	Тиск пари	0,30-0,35 МПа
	Тиск води	0,30-0,5 МПа
	Час	40-50 с.
Сульфітація	Концентрація розчину бісульфіту натрію	0,1 %
	Час	1-2 хв.
Бланшування	Температура	95-98 °С
	Час	4-6 хв
Сушіння	Температура	52-70 °С
	Тиск	0,40-0,60 МПа
	Час	3-3,5 год.

1.7 Завдання автоматизації технологічного процесу виробництва сушених овочів

Система контролю та автоматизації технологічного процесу виробництва сушених овочів повинна забезпечувати: ведення процесу в оптимальних режимах, запобігання аварійних режимів і підвищення ефективності праці обслуговуючого

персоналу, підтримання технологічних параметрів у чітко регламентованому режимі.

Система повинна реалізовуватись на основі приладів, що випускаються серійно, засобів контролю та автоматизації.

Датчики і регулюючі пристрої, що безпосередньо контактують з технологічними рідинами і продуктами, повинні мати відповідний ступінь захисту від корозії.

Система автоматизації технологічного процесу виробництва сушених овочів повинна забезпечувати:

1) контроль роботи механізмів гідротранспортерів та стрічкових конвеєрів. Схема контролю повинна забезпечувати: відключення гідротранспортерів (в автоматичному режимі) при зупинці руху конвеєра або обриві його. У випадку зупинки будь-якого механізму на маршруті руху сировини всі попередні механізми повинні зупинитися одразу ж, а наступні - після обробки сировини;

2) встановлення контролю рівня в мийних очисних машинах з виводом на щит світлової сигналізації;

3) узгодження роботи гідротранспортера та стрічкових конвеєрів в часі;

4) контроль навантаження електродвигунів;

5) контроль та автоматичну стабілізацію температури бланшування;

6) контроль та регулювання тиску пари біля входу в калорифер, в очисній машині;

7) контроль та регулювання тиску води, що надходить в мийну очисну машину;

8) контроль температури в конвеєрній сушарці;

9) дистанційне управління насосами та вентилями;

10) спрацювання сигналізації при порушенні одного із параметрів та аварійне вимкнення обладнання.

Висновки до розділу 1 та задачі досліджень

Проведений аналіз технологічного процесу виробництва сушених овочів показав, що керування здійснюється з використанням морально та технічно застарілих засобів автоматизації, що не дозволяє забезпечити необхідну точність дозування компонентів та підтримання заданого значення технологічних параметрів технологічного процесу. Базова система керування має високу інерційність.

Для забезпечення високої якості сушених овочів та збільшення продуктивності лінії необхідно:

- 1) провести аналіз технологічного процесу як об'єкта керування;
- 2) розробити функціональну схему автоматизованої системи керування;
- 3) здійснити вибір датчиків, виконавчих механізмів та контролера;
- 4) розробити принципову електричну схему під'єднання датчиків та виконавчих механізмів до контролера;
- 5) розробити програмне забезпечення (віртуальну панель керування оператора);
- 6) провести розрахунки економічної ефективності впровадження розробленої автоматизованої системи керування.

РОЗДІЛ 2

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ЯК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

Аналіз технологічного процесу як об'єкта керування передбачає розгляд та оцінку його статичних та динамічних характеристик, їх залежність від зовнішніх впливів та взаємозв'язок в процесі регулювання та контролю.

Технологічний процес виробництва сушених овочів було розділено на окремі стадії, кожній з яких характерний свій набір регулюючих та контрольованих параметрів:

- приймання та зберігання сировини;
- миття;
- інспекція;
- калібрування;
- очищення;
- обробка розчином бісульфіту натрію;
- доочистка;
- різка;
- бланшування (при паровому або лужному способах очищення);
- сушіння;
- інспекція та упаковка.

Взаємодію всіх вище перерахованих параметрів приведено на рисунку 2.1.

Для того, щоб сушені овочі відповідали встановленим технологічним вимогам, потрібно чітко дотримуватись технології виробництва, температуру та часу їх обробки.

Таким чином контрольовані параметри можна організувати наступним чином.

Вхідними параметрами є: температура бланшування, тиск перегрітої пари, час миття овочів, кількість біосульфату, що подається, час бланшування та температура технічного вазеліну.

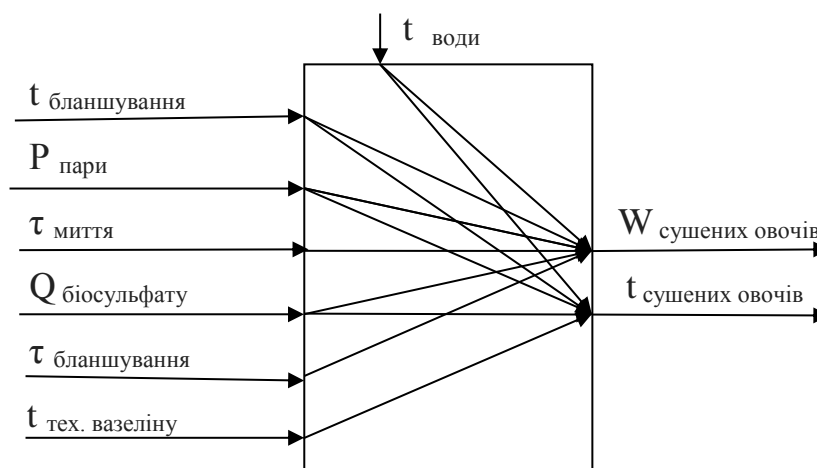


Рисунок 2.1 – Схема зв'язків між вхідними та вихідними величинами:
де T – температура, Q – витрата, τ – час, P – тиск, W – вологість

Зміна хоча б одного із вхідних параметрів на недопустиму похибку критично позначається на вихідних параметрах готового продукту (сушених овочів). Наприклад, неправильне внесення рецептури компонентів призведе до виходу продукту неналежної якості.

Вихідними параметрами є вологість та температура сушених овочів (якість готового продукту).

Збурюючим параметром є температура води.

У випадку стабілізації зазначених змінних величин забезпечується якісне виконання поставленої технологічної задачі.

Висновок до розділу 2

Проведений аналіз технологічного процесу виробництва сушених овочів, як об'єкта керування, показав, що основними технологічними параметрами, що суттєво впливають на якість сушених овочів (вологість та температуру) температура і час бланшування та тиск перегрітої пари.

РОЗДІЛ 3

ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

Розроблена автоматизована система керування технологічним процесом виробництва сушених овочів приведена на рисунку 3.1 і листі 1 графічної частини роботи. Вона функціонує наступним чином.

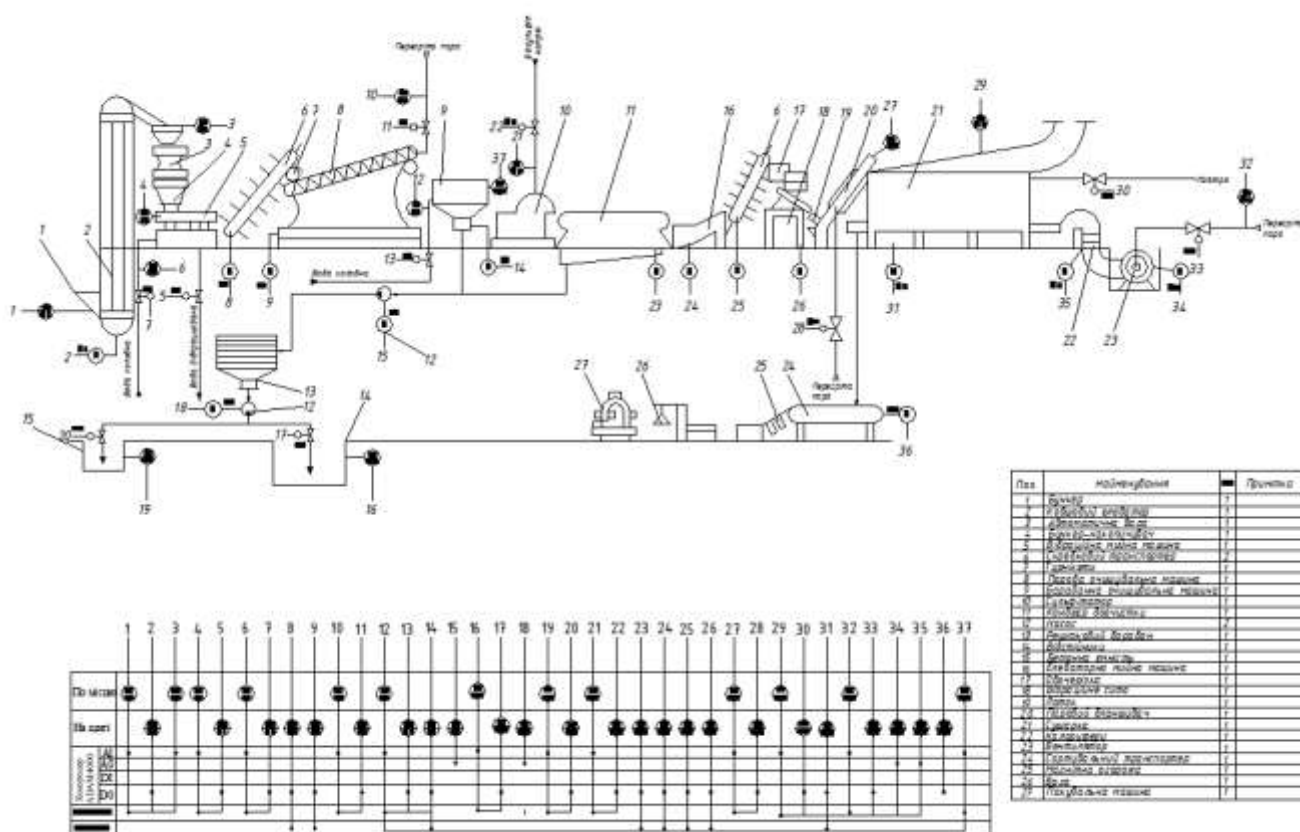


Рисунок 3.1 – Функціональна схема автоматизованої системи керування технологічним процесом виробництва сушених овочів

З овочесховища овочі потрапляють в бункер в якому відбувається регулювання рівня, сигнал про його зміну формується первинним вимірювачем рівня LE 1-1, далі сигнал підсилюється та передається за допомогою пристрою LT 1-2 на вхід модуля аналогового вводу контролера. Овочі потрапляють на ковшовий елеватор 2, який приводиться в дію пускачем NS 1-4, що подає живлення на

електродвигун. Пускач вмикається сигналом, що надходить з виходу модуля дискретного виводу контролера.

Тоді вони через проміжний бункер надходять на автоматичні ваги 3.

Далі овочі прямують в бункер-накопичувач 4, з якого у вібраційну мийну машину 5.

Миття овочів відбувається в проточній воді, рівень якої регулюється за допомогою контору регулювання рівня, сигнал про зміну формується первинним вимірювачем рівня LE 4-1, сигнал підсилюється, та за допомогою пристрою LT 4-2 передається на вхід модуля аналогового вводу контролера.

Видалення брудної води відбувається при відкритті електроклапана за допомогою пускача NS 4-4, сигнал на який надходить з виходу модуля дискретного виводу контролера.

Чиста вода надходить в мийну машину до повного видалення бруду при відкритті електроклапана за допомогою пускача NS 3-4, сигнал на який надходить з виходу модуля дискретного виводу контролера.

Співвідношення води і овочів становить 3:1. Витрата води контролюється датчиком витрати FE 3-1, сигнал з якого підсилюється та передається за допомогою пристрою FT 3-2 передається на вхід модуля аналогового вводу контролера.

Вимиті овочі інспектують, видаляючи підгнилі та пошкоджені коренеплоди, і калібрують.

З вібраційної мийної машини 5 вимиті овочі надходять на скребковий транспортер 6, що подає їх через турнікети 7 в парову очисну машину 8, яка приводиться в дії електродвигуном за допомогою пускача NS 6-1, сигнал на який надходить з виходу модуля дискретного виводу контролера. В даній машині овочі обробляються парою під тиском 0,30-0,35 МПа протягом 40-50 с.

Тиск перегрітої пари регулюється за допомогою контору регулювання тиску, сигнал про зміну формується первинним вимірювачем тиску PI 7-1, сигнал з якого підсилюється та передається за допомогою пристрою PT 7-2 передається на вхід модуля аналогового вводу контролера.

Надходження пару в машину забезпечується відкриттям електроклапана за допомогою пускача NS 7-4, сигнал на який надходить з виходу модуля дискретного виводу контролера.

Після цього овочі надходять в барабанну мийно-очисну машину 9 привід електродвигуна якої вмикається пускачем NS 8-6, сигнал на який надходить з виходу модуля дискретного виводу контролера.

Вода в машину подається під тиском 0,3-0,5 МПа.

Регулювання тиску і рівня води в машині забезпечують контори регулювання тиску та рівня, сигнал про їх зміну формується первинним вимірювачем тиску PI 8-1 та рівня LE 21-1, сигнал з них підсилюються та передаються відповідно за допомогою пристроїв PT 8-2 та LT 21-2 на входи модуля аналогового вводу контролера.

Надходження води відбувається при відкритті електроклапана за допомогою пускача NS 8-4, сигнал на який надходить з виходу модуля дискретного виводу контролера.

Тривалість витримки овочів в мийно-очисній машині регулюється кутом нахилу барабана. Якість повністю очищених овочів становить 97-99 %.

Очищені овочі з барабанної мийно-очисної машини 9 надходять в сульфитатор 10, де обробляються 0,1 %-им розчином бісульфіту натрію протягом 1-2 хвилин, витрата якого регулюється за допомогою контору регулювання витрати, сигнал про зміну формується первинним вимірювачем витрати FE 12-1, сигнал підсилюється та передається за допомогою пристрою FT 12-2 на вхід модуля аналогового вводу контролера.

Надходження розчину бісульфіту натрію забезпечує відкриття електроклапана за допомогою пускача NS 12-4, сигнал на який надходить з виходу модуля дискретного виводу контролера.

З сульфитатора овочі надходять на стрічку конвеєра доочистки 11, який приводиться в дії за допомогою електродвигуна, що вмикається пускачем NS 13-1, сигнал на який надходить з виходу модуля дискретного виводу контролера.

На конвеєрі доочистки вручну видаляють вічки, темні плями, залишки шкірки та інші дефекти овочів. Відходи через ґрати, що встановлені по обидві сторони стрічки конвеєра 11, поступають в гідротранспортер, з якого насосом 12, що приводиться в дію при вмиканні електродвигуна за допомогою пускача NS 9-1, сигнал на який надходить з виходу модуля дискретного виводу контролера, далі відкачуються не лише тверді, але й рідкі відходи від барабанної мийної машини 9 на ґратчастий барабан 13, що обертається. Рідкі відходи насосом 12 подаються в відстійник 14, за допомогою відкриття електроклапана за допомогою пускача NS 10-4, сигнал на який надходить з виходу модуля дискретного виводу контролера.

Рівень рідких відходів у відстійнику 14 регулюється за допомогою контору регулювання рівня, сигнал про зміну формується первинним вимірювачем рівня LE 10-1, сигнал підсилюється та передається за допомогою пристрою LT 10-2 на вхід модуля аналогового вводу контролера.

Тверді відходи при відкритті електроклапана за допомогою пускача NS 11-4, сигнал на який надходить з виходу модуля дискретного виводу контролера, вивантажуються в розташовану поряд бетонну ємкість 15 для використання на корм худобі. В даній ємкості також відбувається регулювання рівня за допомогою контору регулювання, сигнал про зміну формується первинним вимірювачем рівня LE 11-1, сигнал підсилюється та передається за допомогою пристрою LT 11-2 на вхід модуля аналогового вводу контролера.

З конвеєра доочистки 11 овочі надходять в елеваторну мийну машину 16 і скребковим транспортером 6 завантажуються в бункер овочерізки 17.

Під овочерізкою встановлено вібраційне сито 18, відповідно дані машини приводяться в дію за допомогою вмикання відповідних електродвигунів за допомогою пускачів NS 13-1, NS 14-1, NS 15-1, NS 16-1, сигнали на які надходять з відповідних виходів модуля дискретного виводу контролера.

Нарізані овочі надходять на лоток 19, який рівномірно розподіляє їх на стрічці парового бланшувача 20.

Бланшування овочів відбувається при температурі 95-98 °С протягом 4-6 хв.

Температура бланшування овочів регулюється за допомогою контору регулювання температури, сигнал про зміну формується первинним вимірювачем температури TE 17-1, сигнал підсилюється та передається за допомогою пристрою TT 17-2 на вхід модуля аналогового вводу контролера.

Надходження перегрітої пари в бланшувач забезпечується відкриттям електроклапана за допомогою пускача NS 17-4, сигнал на який надходить з виходу модуля дискретного виводу контролера.

Після бланшування овочі промивають холодною водою.

Бланшовані овочі поступають на стрічку сушарки 21, яка приводиться в дію електродвигуном за допомогою пускача NS 18-6, сигнал на який надходить з виходу модуля дискретного виводу контролера.

Підготовлені овочі, що надходять на першу сушильну стрічку, розподіляються по всій її ширині шаром однакової товщини.

Підготовлені овочі, що надходять на верхню стрічку, переносяться при її русі в інший кінець сушарки, де пересипається на другу стрічку.

З другої стрічки вони надходять на третю, а тоді на четверту і п'яту стрічки.

Сходом з п'ятої стрічки виходить готовий сушений продукт.

Для забезпечення максимальної температури повітря, яке надходить при відкритті електроклапана за допомогою пускача NS 18-4, сигнал на який надходить з виходу модуля дискретного виводу контролера, над стрічками тиск пари біля входу в калорифер 22 повинен бути в межах 0,4-0,6 МПа.

Повітря в калорифер 22 нагнітається вентилятором 23, які відповідно приводяться в дію вмиканням електродвигунів за допомогою пускачів NS 19-6 та NS 19-8, сигнали на які надходять з відповідних виходів модуля дискретного виводу контролера.

Температура в сушарці регулюється за допомогою контору регулювання температури, сигнал про зміну формується первинним вимірювачем температури TE 18-1, сигнал підсилюється та передається за допомогою пристрою TT 18-2 на вхід модуля аналогового вводу контролера.

Висушені овочі з сушарки 23 надходять на стрічковий сортувальний транспортер 24, де проводиться інспекція та сортування висушеного продукту. Транспортер 24 приводиться в дію електродвигуном за допомогою пускача NS 20-1, сигнал на який надходить з виходу модуля дискретного виводу контролера.

Відсортовані овочі, зсипаючись з транспортера, проходять магнітну загороду 25, ваги 26 та фасуються розсипом в крафт-мішки, які зашивають на машині 27.

Висновок до розділу 3

На основі технологічної схеми виробництва була розроблена і описана функціональна схема автоматизованої системи керування технологічним процесом виробництва сушених овочів та описано основні її функціональні підсистеми.

РОЗДІЛ 4

ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ

4.1 Обґрунтування вибору датчиків

4.1.1 Датчики вимірювання рівня

Для вимірювання рівня в бункері, вібраційній мийній машині, автоматичних вагах, барабанній очищувальній машині, бетонній ємкості та відстійниках використовується радарний датчик рівня моделі IFM LR7000, технічні характеристики якого [7] наведені в таблиці А.1 додатку А.

4.1.2 Витратомір

Для вимірювання витрати холодної води використовується витратомір моделі QF05ZAT, технічні характеристики якого [8] наведені в таблиці А.2 додатку А.

4.1.3 Датчики вимірювання тиску

Для вимірювання тиску в трубопроводах подачі пари та холодної води використовується датчик тиску моделі IFM PM1505, технічні характеристики якого [9] приведені в таблиці А.3 додатку А.

4.1.4 Датчики вимірювання температури

Для вимірювання температури в паровому бланшувачі та сушарці використовується термоопір моделі Sensorshop 24, технічні характеристики якого [10] приведені в таблиці А.4 додатку А.

4.2 Обґрунтування вибору виконавчих механізмів та регулюючих органів

4.2.1 Електромагнітні клапани

Для керування подачею холодної води та скиданням відпрацьованої води, подачею перегрітої пари та біосульфату натрію використовується електромагнітний клапан Burkert моделі 00064208, технічні характеристики якого [11] приведені в таблиці А.5 додатку А.

4.2.2 Соленоїдні клапани

Для керування кількістю подачі повітря та перегрітої пари в сушарку використовується соленоїдний клапан Burkert моделі 00221605, технічні характеристики якого [12] приведені в таблиці А.6 додатку А.

4.2.3 Частотні перетворювачі

Для керування продуктивністю насосів, зокрема частотою обертання електродвигуна їх приводу використовується векторний частотний перетворювач моделі SPLC-AT20-15G/18.5P4 потужністю 15 кВт, що живиться від мережі змінного струму напругою 380 В, технічні характеристики якого [13] приведені в таблиці А.7 додатку А.

4.2.4 Пускач безконтактний реверсивний

Для керування ввімкненням електродвигунів приводів технологічного устаткування використовується безконтактний реверсивний пускач АСКО моделі ПМ 4-95, технічні характеристики якого [14] приведені в таблиці А.8 додатку А.

4.3 Обґрунтування вибору контролера

Для керування автоматизованою системою було обрано модулі вводу/виводу контролера ADAM серії 4000. Вибір типу та кількості модулів вводу/виводу здійснено на основі кількості та типу (аналогових та цифрових(дискретних)) вхідних і вихідних сигналів, які повинна забезпечити розроблена автоматизована система.

Аналіз функціональної схеми автоматизації, що наведена на листі 1 графічної частини роботи, показав, що розроблена автоматизована система керування повинна забезпечити:

- 13 аналогових вхідних сигналів;
- 4 аналогові вихідні сигнали;
- 20 дискретних (цифрових) вихідних сигналів.

Для підключення до системи керування датчиків температури (термоопорів) використовується модуль підключення термоопорів ADAM-4015-F, технічні характеристики якого [15] приведені в таблиці А.9 додатку А.

Для підключення до системи керування датчиків рівня, тиску та витратомірів використовується модуль аналогового вводу ADAM-4015-F, технічні характеристики якого [16] приведені в таблиці А.10 додатку А. Виходячи з кількості пристроїв для їх підключення використано два таких модуля.

Для підключення до системи керування безконтактних реверсивних пускачів використовується модуль дискретного вводу/виводу ADAM-4050-DE, технічні характеристики якого [17] приведені в таблиці А.11 додатку А. Виходячи з кількості пристроїв для їх підключення використано три таких модуля.

Для підключення до системи керування соленоїдних клапанів використовується модуль аналогового виводу ADAM-4024-B1E, технічні характеристики якого [18] приведені в таблиці А.12 додатку А.

Для керування системою з персонального комп'ютера та підключення системи керування до COM порту використовується модуль перетворення інтерфейсів RS-485 в RS-232 ADAM-4520-EE, технічні характеристики якого [19] приведені в таблиці А.13 додатку А.

4.4 Розрахунок та вибір джерела живлення автоматизованої системи керування

Для живлення обраних модулів вводу/виводу контролера автоматизованої системи керування необхідно провести розрахунок на підібрати блок живлення з вихідною напругою постійного струму, що становить 24 В.

Аналіз технічних характеристик модулів вводу/виводу контролера (таблиці А.9-А.13 додатку А) показав, що:

- модуль ADAM-4015-F споживає 0,6 Вт. електроенергії;
- модуль ADAM-4017-E споживає 1,3 Вт. електроенергії, а оскільки в системі керування їх два, то вони споживають 2,6 Вт.;

- модуль ADAM-4050-DE споживає 0,4 Вт. електроенергії, а оскільки в системі керування їх три, то вони споживають 1,2 Вт.;
- модуль ADAM-4024-B1E споживає 2,3 Вт. електроенергії;
- модуль ADAM-4520-EE споживає 1,2 Вт. електроенергії.

Отже, величину загальної потужності, яку споживає розроблена автоматизована система керування, можна визначити за формулою:

$$P = 0,6 + 2,6 + 1,2 + 2,3 + 1,2 = 7,9 \text{ Вт.}$$

Навантаження системи керування за струмом можна визначити за формулою:

$$I = P / U = 7,9 / 24 = 0,33 \text{ А.}$$

На основі проведеного розрахунку було обрано блок живлення Mean Well на DIN-рейку MDR-10-24 з вихідною напругою 24 В, потужність 10 Вт. та силою струм 0,42 А [20], технічні характеристики якого наведені в таблиці А.14 додатку А.

Висновки до розділу 4

Специфікація технічних засобів автоматизованої системи керування технологічним процесом виробництва сушених овочів приведена в таблиці В.1 додатку В.

В розробленій автоматизованій системі керування технологічним процесом виробництва сушених овочів:

- для вимірювання рівня в бункері, вібраційній мийній машині, автоматичних вагах, барабанній очищувальній машині, бетонній ємкості та відстійниках використовується радарний датчик рівня моделі IFM LR7000;
- для вимірювання витрати холодної води використовується витратомір моделі QF05ZAT;
- для вимірювання тиску в трубопроводах подачі пари та холодної води використовується датчик тиску моделі IFM PM1505;
- для вимірювання температури в паровому бланшувачі та сушарці використовується термоопір моделі Sensorshop 24;

– для керування подачею холодної води та скиданням відпрацьованої води, подачею перегрітої пари та біосульфату натрію використовується електромагнітний клапан Burkert моделі 00064208;

– для керування кількістю подачі повітря та перегрітої пари в сушарку використовується соленоїдний клапан Burkert моделі 00221605;

– для керування продуктивністю насосів, зокрема частотою обертання електродвигуна їх приводу використовується векторний частотний перетворювач моделі SPLC-AT20-15G/18.5P4 потужністю 15 кВт, що живиться від мережі змінного струму напругою 380 В;

– для керування ввімкненням електродвигунів приводів технологічного устаткування використовується безконтактний реверсивний пускач АСКО моделі ПМ 4-95;

– для керування автоматизованою системою було обрано модулі вводу/виводу контролера ADAM серії 4000:

– для підключення до системи керування датчиків температури (термоопорів) використовується модуль підключення термоопорів ADAM-4015-F;

– для підключення до системи керування датчиків рівня, тиску та витратомірів використовується модуль аналогового вводу ADAM-4017-E;

– для підключення до системи керування безконтактних реверсивних пускачів використовується модуль дискретного вводу/виводу ADAM-4050-DE;

– для підключення до системи керування соленоїдних клапанів використовується модуль аналогового виводу ADAM-4024-B1E;

– для керування системою з персонального комп'ютера та підключення системи керування до COM порту використовується модуль перетворення інтерфейсів RS-485 в RS-232 ADAM-4520-EE;

– на основі проведеного розрахунку для живлення обраних модулів вводу/виводу контролера автоматизованої системи керування На основі проведеного розрахунку було обрано блок живлення Mean Well на DIN-рейку MDR-10-24 з вихідною напругою 24 В, потужність 10 Вт. та силою струм 0,42 А.

РОЗДІЛ 5

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ НА ЯКІСТЬ СУШІННЯ ОВОЧІВ ТА РОЗРАХУНОК РЕГУЛЯТОРА ТЕМПЕРАТУРИ

5.1 Дослідження впливу технологічних параметрів на якість сушіння овочів

Проведено теоретичні дослідження впливу технологічних параметрів на якість сушіння овочів і визначено основні технологічні параметри, що впливають на якість сушіння овочів.

1. Температура – основний фактор, що скорочує час сушки: підвищення температури призводить до значного скорочення часу сушіння, але одночасно підвищує ризик термічної деградації кольору, каротиноїдів і вітамінів [21].

2. Товщина нарізки – товстіші шматки значно збільшують час сушіння (через більший шлях дифузії вологи); тонкі слайси висушуються швидше і дають вищу пористість, але можуть мати швидшу втрату текстури при високих температурах [22].

3. Швидкість повітря (air velocity) – підвищення швидкості зменшує зовнішній опір переносу маси і підвищує ефективну дифузію води (в досяжних межах – ефект із загасанням). Тобто швидкість допомагає скоротити час сушки, особливо коли зовнішній опір є лімітуючим [23].

4. Відносна вологість (RH) повітря – нижча RH прискорює сушіння (нижче рівноважне вологовміст), але дуже низька RH може посилювати втрати летких ароматичних сполук та жорсткість; тактика «step-down RH» (поступове зниження RH) часто дає краще поєднання швидкості та якості [24].

5. Параметри якості сушіння (колір, дегідратація) – вищі температури та триваліший час збільшують зміну кольору (ΔE) і знижують дегідратацію (погіршують пористість та структуру), тобто є компроміс між швидкістю та кінцевою якістю [25].

5.1.1 Оцінка часу сушіння при різних значеннях температури (модель: експоненційне зменшення)

Для моделі експоненційного зменшення: T вимірюється у $^{\circ}\text{C}$, оцінка часу (хв) $= 200 * \exp(-0.05*(T-40))$.

Визначаємо значення точок в інтервалі від 40 до 90 $^{\circ}\text{C}$ з кроком 10 $^{\circ}\text{C}$:

- 40 $^{\circ}\text{C}$ \rightarrow 200.0 хв.;
- 50 $^{\circ}\text{C}$ \rightarrow 121.3 хв ($\exp(-0.5)=0.60653 \rightarrow 200*0.60653$);
- 60 $^{\circ}\text{C}$ \rightarrow 73.6 хв ($\exp(-1)=0.36788$);
- 70 $^{\circ}\text{C}$ \rightarrow 44.6 хв ($\exp(-1.5)=0.22313$);
- 80 $^{\circ}\text{C}$ \rightarrow 27.1 хв ($\exp(-2)=0.13534$);
- 90 $^{\circ}\text{C}$ \rightarrow 16.4 хв ($\exp(-2.5)=0.082085$).

Коли температура підвищується з 40 до 60 $^{\circ}\text{C}$, час падає приблизно в 2,7 рази. Подальше збільшення дає ще скорочення, але при високих значеннях температури (T) якість може сильно погіршуватись [21].

5.1.2 Колір (ΔE) та дегідратація – trade-off vs температура

Для моделі колір та дегідратація були використані наступні формули:

$$\Delta E (\text{після } 1 \text{ h}) \approx 2 + 0.3 \cdot (T-40) + 0.01 \cdot (T-40)^2;$$

$$\text{Rehydration ratio (arb.)} \approx 0.9 - 0.008 \cdot (T-40).$$

Визначаємо значення точок кольору та дегідратації в інтервалі від 40 до 90 $^{\circ}\text{C}$ з кроком 10 $^{\circ}\text{C}$:

- 40 $^{\circ}\text{C}$ \rightarrow $\Delta E = 2.0$; Rehyd = 0.900;
- 50 $^{\circ}\text{C}$ \rightarrow $\Delta E = 6.0$; Rehyd = 0.820;
- 60 $^{\circ}\text{C}$ \rightarrow $\Delta E = 12.0$; Rehyd = 0.740;
- 70 $^{\circ}\text{C}$ \rightarrow $\Delta E = 20.0$; Rehyd = 0.660;
- 80 $^{\circ}\text{C}$ \rightarrow $\Delta E = 30.0$; Rehyd = 0.580;
- 90 $^{\circ}\text{C}$ \rightarrow $\Delta E = 42.0$; Rehyd = 0.500;

Аналіз графіку показує, що зі зростанням температури (T) відбувається паралельне зростання ΔE та зниження дегідратації (типовий компроміс: колір/харчова цінність \leftrightarrow швидкість) [5].

5.1.3 Ефективна дифузія вологи (D_{eff}) як функція швидкості повітря

Модель ефективної дифузії вологи (D_{eff}) як функція швидкості повітря, з насиченням реалізована за формулою:

$$D_{eff} \sim 1e-9 * (1 + 2 * (1 - \exp(-0.9 * (v-0.5))))).$$

Визначаємо значення точок кольору та дегідратії в інтервалі від 0,5 до 5 м/с з кроком зростання швидкості повітря 0,5 та 1 м/с:

- 0.5 m/s → 1.00e-9;
- 1.0 m/s → 1.72e-9;
- 2.0 m/s → 2.48e-9;
- 3.0 m/s → 2.79e-9;
- 4.0 m/s → 2.91e-9;
- 5.0 m/s → 2.97e-9.

Початкове підвищення швидкості дає помітний приріст D_{eff} (тобто відбувається швидше сушіння), але при високих швидкостях виникає додатковий ефект – вона спадає, що узгоджується з експериментами (зовнішній опір зменшується, тоді внутрішня дифузія стає лімітуючою) [23].

5.1.4 Вплив товщини овочів на їх вологість у часі

Визначаємо значення точок в інтервалі часу від 0 до 180 хв. з кроком 60 хв.:

- $t=0 \rightarrow M \approx 0.85$ (wb) для всіх товщин;
- $t=60 \text{ min} \rightarrow M \approx 0.25$ (2 mm), 0.45 (5 mm), 0.65 (10 mm);
- $t=180 \text{ min} \rightarrow M \approx 0.06$ (2 mm), 0.12 (5 mm), 0.25 (10 mm).

Тонкі слайси втрачають вологу набагато швидше: для однорідного і швидкого сушіння рекомендують стандартизувати товщину (зазвичай 2-5 мм для багатьох овочів [22]).

5.2 Розробка коду програмного забезпечення для відтворення графіків за розглянутими моделями

Код програмного забезпечення для відтворення графіків за розглянутими в пунктах 5.1.1-5.1.4 моделями було розроблено на мові програмування Python та наведено в лістингу 5.1.

Лістинг 5.1 – Побудова графіків залежностей для чотирьох моделей

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import pandas as pd

# Temperatures
temps = np.array([40,50,60,70,80,90], dtype=float)

# Drying time model
drying_time = 200 * np.exp(-0.05*(temps-40))

# Color ( $\Delta E$ ) and Rehydration (models from text)
deltaE = 2 + 0.3*(temps-40) + 0.01*(temps-40)**2
rehyd = 0.9 - 0.008*(temps-40)

# Plot 1: Drying time vs Temp
plt.figure()
plt.plot(temps, drying_time, marker='o')
plt.title('Drying time vs Temperature')
plt.xlabel('Temperature (°C)')
plt.ylabel('Drying time (min)')
plt.grid(True)
```

```

plt.show()

# Plot 2: ΔE and Rehydration vs Temp
plt.figure()
plt.plot(temps, deltaE, marker='^', label='ΔE (1 h)')
plt.plot(temps, rehyd, marker='s', label='Rehydration ratio (arb.)')
plt.title('Color change and Rehydration vs Temperature')
plt.xlabel('Temperature (°C)')
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.show()

# Plot 3: Deff vs Air velocity
vel = np.array([0.5,1,2,3,4,5])
Deff = 1e-9 * (1 + 2*(1 - np.exp(-0.9*(vel-0.5))))
plt.figure()
plt.plot(vel, Deff, marker='d')
plt.title('Effective diffusivity vs Air velocity')
plt.xlabel('Air velocity (m/s)')
plt.ylabel('Deff (arb. scale)')
plt.grid(True)
plt.show()

# Plot 4: Moisture vs time for thicknesses (schematic)
time = np.linspace(0,300,301)
def moisture_curve(t, thickness_mm, T=60):
    Deff = 1e-8 * (T/60) * (1/(thickness_mm/2.0))
    M0 = 0.85; Me = 0.05
    return Me + (M0-Me)*np.exp(-Deff * (t+1)**0.7 * 1e6)

```

```
plt.figure()
for th in [2,5,10]:
    plt.plot(time, moisture_curve(time, th), label=f'{th} mm')
plt.title('Moisture vs Time at 60°C (schematic)')
plt.xlabel('Time (min)')
plt.ylabel('Moisture (wb)')
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.show()

# Optional: print summary table
summary = pd.DataFrame({
    'T (°C)': temps,
    'Drying time (min)': np.round(drying_time,1),
    'DeltaE (1h)': np.round(deltaE,1),
    'Rehydration': np.round(rehyd,3)
})
print(summary)
```

кінець лістингу 5.1

Запуск даного коду на виконання в середовищі Python побудує відповідні графіки для описаних вище чотирьох моделей та створить таблицю.

5.3 Висновки та практичні рекомендації

На основі проведених теоретичних досліджень можна зробити наступні висновки:

1. Оптимальне значення температури сушіння для більшості овочів становить 50-65 °С, що значно скорочує час в порівнянні із температурою 40 °С, але не викликає надмірного руйнування каротиноїдів/вітаміну С, як при 80-90 °С. При цьому потрібно підтримувати температуру нижче тієї, що викликає значне зростання ΔE [21].

2. Потрібно контролювати товщину зрізу. Стандартизовані тонкі слайси (2-5 мм) дають рівномірне сушіння і кращу дегідратацію. Для великих шматків потрібно збільшувати час і враховувати внутрішню дифузію [22].

3. Потрібно використовувати помірну швидкість повітря (1-3 м/с) для того, щоб зменшити час сушіння. Дуже високі швидкості повітря дають лише малі додаткові вигоди [23].

4. Потрібно використовувати режим зі зниженням відносної вологості RH у процесі («step-down») для кращої якості: на початку вищий RH може пом'якшувати теплове шокове ушкодження овочів, далі RH зменшується для швидкого видалення вологи [24].

5. Попередня обробка (бланшування, кислотна обробка) може зменшити потемніння та допомагає зберегти колір і вітаміни, але впливає на кінцеву структуру та дегідратацію, тому її вид підбирається експериментально для конкретного овочу [25].

5.4 Розрахунок та вибір типу регулятора автоматизованої системи керування температурою в сушарці технологічного процесу виробництва сушених овочів

5.4.1 Короткий огляд процесу

Регульована величина: температура 52-70 °С.

Маніпулятори: подача пари через клапан та частота обертання вентилятора.

Пар: 130–140 °С, тиск 0,40-0,60 МПа.

Система: калорифер + вентилятор.

I/O: ADAM 4000 (аналого-цифрові входи та виходи).

5.4.2 Рекомендований тип регулятора

Каскадна система керування (cascade):

- зовнішній контур: PID-регулятор температури;
- внутрішній контур: PI-регулятор клапана (позиції або тиску пари);
- регулятор VFD: як частина split-range або окремий контур;
- Feed-forward: компенсація змін тиску пари.

5.4.3 Масштабування сигналів

Температура 52-70 °C → 4–20 mA:

$$\Delta T = 18 \text{ }^\circ\text{C}; 16 \text{ mA} / 18 \text{ }^\circ\text{C} = 0,8889 \text{ mA}/^\circ\text{C}$$

$$I = 4 + 0,8889 \cdot (T - 52)$$

Тиск 0,40-0,60 МПа → 4–20 mA:

$$\Delta p = 0,20 \text{ МПа}; 16 \text{ mA} / 0,20 \text{ МПа} = 80 \text{ mA}/\text{МПа}$$

$$I = 4 + 80 \cdot (p - 0,40)$$

Клапан/VFD 0–100 % → 4–20 mA:

$$I = 4 + 0,16 \cdot u$$

5.4.4 Частота опитування

Температура: 5 с.

Клапан/VFD: 1-5 с.

Ієрархія: внутрішні контури швидші за зовнішній.

5.4.5 Початкові PID/PI параметри

Зовнішній контур (температура):

- $K_c = 0,5\%/^\circ\text{C}$;
- $T_i = 300 \text{ с}$;
- $T_d = 30 \text{ с}$ або $T_d = 0$ (PI).

Внутрішній контур клапана:

- $K_c = 2,0\%/error$;
- $T_i = 30\text{--}60 \text{ с.}$;
- $T_d = 0$.

5.4.6 Логіка керування

Зовнішній PID формує команду нагріву.

Split-range: клапан (0-70%), VFD (70-100%) або інша конфігурація.

Внутрішній контур стабілізує тиск або позицію.

Feed-forward компенсує падіння тиску пари.

5.4.7 Захист і безпека

Блокування по тиску $< 0,40$ МПа.

Обмеження температури.

Anti-windup у PID.

5.4.8 План налагодження

- 1) Перевірити масштабування.
- 2) Підключити ADAM → контролер → виконавчі.
- 3) Ввести стартові налаштування PID.
- 4) Провести step-test.
- 5) Налаштувати PID (Cohen–Coon або Z-N).
- 6) Увімкнути feed-forward.
- 7) Перевірити аварійні режими.

5.4.9 Висновок

Найкраще для даного технологічного процесу підходить каскадний PID-контур з внутрішнім PI-контролем клапана та можливим split-range з вентилятором. Масштабування, формули, параметри PID та план налагодження наведено вище.

Висновки до розділу 5

Проведено теоретичні дослідження впливу технологічних параметрів на якість сушіння овочів і визначено основні технологічні параметри, що впливають на якість сушіння овочів.

Розглянуті чотири моделі технологічного процесу дегідратації овочів, а саме:

1. Оцінка часу сушіння при різних значеннях температури (модель: експоненційне зменшення).

2. Колір (ΔE) та дегідратація – trade-off vs температура.
3. Ефективна дифузія вологи ($Deff$) як функція швидкості повітря.
4. Вплив товщини овочів на їх вологість у часі.

На мові програмування Python розроблено код програмного забезпечення для відтворення графіків за розглянутими моделями.

На основі проведених теоретичних досліджень можна зробити наступні висновки:

1. Оптимальне значення температури сушіння для більшості овочів становить 50-65 °C, що значно скорочує час в порівнянні із температурою 40 °C, але не викликає надмірного руйнування каротиноїдів/вітаміну C, як при 80-90 °C. При цьому потрібно підтримувати температуру нижче тієї, що викликає значне зростання ΔE .

2. Потрібно контролювати товщину зрізу. Стандартизовані тонкі слайси (2-5 мм) дають рівномірне сушіння і кращу дегідратацію. Для великих шматків потрібно збільшувати час і враховувати внутрішню дифузію.

3. Потрібно використовувати помірну швидкість повітря (1-3 м/с) для того, щоб зменшити час сушіння. Дуже високі швидкості повітря дають лише малі додаткові вигоди.

4. Потрібно використовувати режим зі зниженням відносної вологості RH у процесі («step-down») для кращої якості: на початку вищий RH може пом'якшувати теплове шокове ушкодження овочів, далі RH зменшується для швидкого видалення вологи.

5. Попередня обробка (бланшування, кислотна обробка) може зменшити потемніння та допомагає зберегти колір і вітаміни, але впливає на кінцеву структуру та дегідратацію, тому її вид підбирається експериментально для конкретного овочу.

Проведено розрахунок та вибір типу регулятора автоматизованої системи керування температурою в сушарці технологічного процесу виробництва сушених овочів. Найкраще для даного технологічного процесу підходить каскадний PID-контур з внутрішнім PI-контролем клапана та можливим split-range з вентилятором.

РОЗДІЛ 6

ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ І ОПИС ПРИНЦИПОВИХ СХЕМ АВТОМАТИЗАЦІЇ

На рисунку 6.1 та листі 2 графічної частини роботи приведено принципову електричну схему підключення датчиків та виконавчих механізмів до модулів вводу/виводу контролера ADAM серії 4000 фірми Advantech.

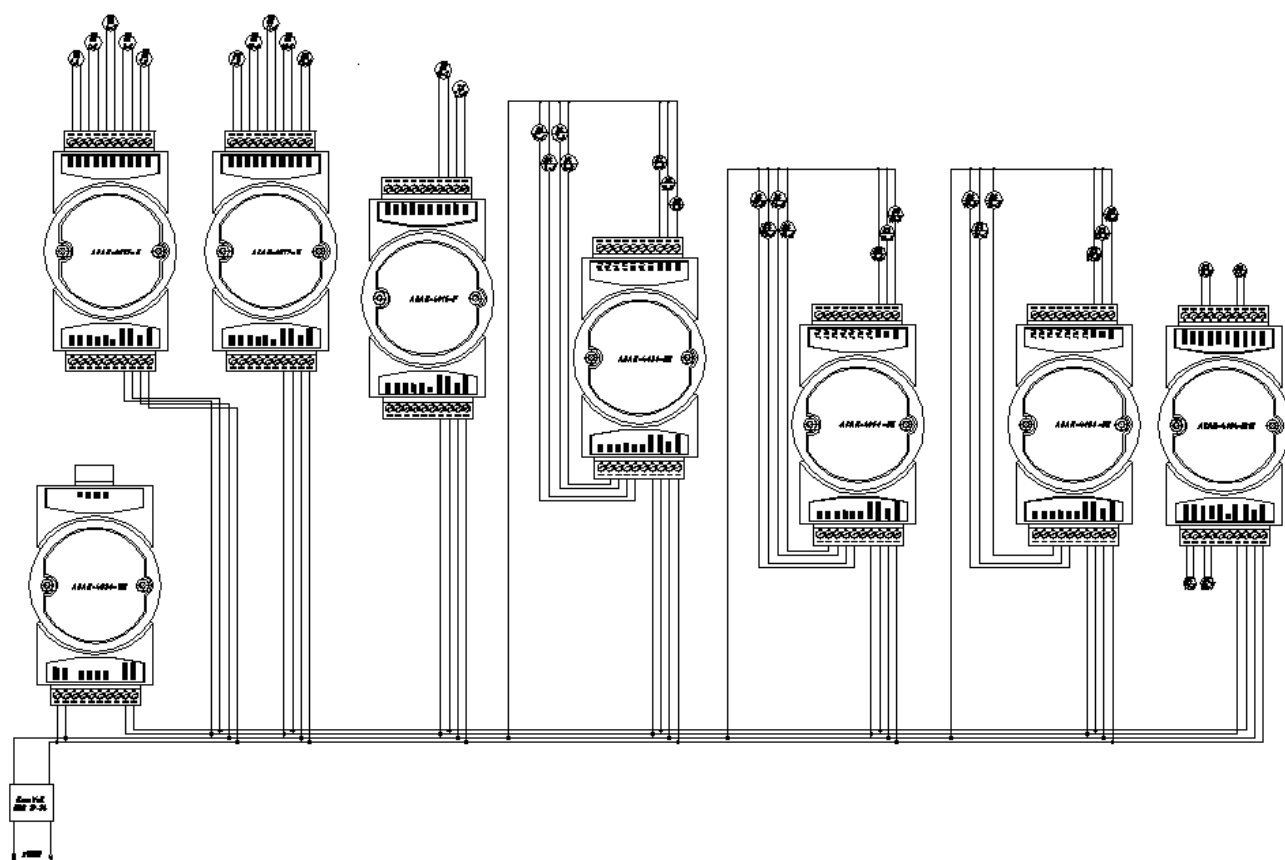


Рисунок 6.1 – Принципова електрична схема підключення датчиків та виконавчих механізмів до модулів вводу/виводу контролера ADAM серії 4000

Датчики з аналоговим вихідним сигналом підключено до 8-каналних модулів аналогового входу ADAM-4017-E.

Особливість даного модуля полягає в тому, що кожний з входів налаштовується окремо, що дає можливість підключати датчики з різними уніфікованим сигналом.

Усі дані датчики було підключено за дво провідниковою схемою за струмом загального діапазону 4-20 мА.

До трьох модулів підключено:

- датчики рівня LE 1-1, LE 2-1, LE 4-1, LE 10-1, LE 11-1 та LE 21-1;
- витратомір FE 3-1 та FE 12-1;
- датчики тиску PE 7-1 та PE 8-1.

Датчики температури TE 17-1 та TE 18-1 підключено до модуля під'єднання термоопорів ADAM-4015-F.

Пускові пристрої (пускачі безконтактні реверсивні) підключено до 16-канальних модулів дискретного вводу/виводу ADAM-4050-DE.

До модулів підключено пускачі: NS 1-3, NS 3-3, NS 4-3, NS 5-2, NS 6-2, NS 7-3, NS 8-3, NS 8-5, NS 10-3, NS 11-3, NS 12-3, NS 13-2, NS 14-2, NS 15-2, NS 16-2, NS 17-3, NS 18-3, NS 18-5, NS 19-3 та NS 20-2.

Маса усіх пристроїв підключена до провідника GND блоку живлення (Power Ground).

До пускачів NS 3-3, NS 4-3, NS 7-3, NS 8-3, NS 10-3, NS 11-3, NS 12-3, NS 17-3 підключено електромагнітні клапани 3-4, 4-4, 7-4, 8-4, 10-4, 11-4, 12-4 та 17-4 відповідно.

До виходів модуля аналогового вводу ADAM-4024-B1E підключено входи частотних перетворювачів NS 9-2 та NS 12-2, і соленоїди клапанів NS 19-5 та NS 19-7.

Усі модулі вводу/виводу контролера під'єднано до одного блока живлення моделі Mean Well MDR-10-24 з вихідною напругою 24 В потужністю 10 Вт, що в свою чергу живиться від мережі змінного струму напругою 220 В.

Для підключення до комп'ютера та керування автоматизованою системою з робочого місця оператора усі модулі вводу/виводу контролера з'єднано в одну мережу за промисловим протоколом RS-485 та з модулем перетворення інтерфейсів ADAM-4520-EE, що за протоколом RS-232 підключено до COM, або до USB порту (за допомогою спеціального додаткового перетворювача інтерфейсів COM в USB) порту комп'ютера материнської плати комп'ютера.

Висновок до розділу 6

Для автоматизованої системи керування технологічним процесом виробництва сушених овочів було розроблено принципову електричну схему підключення датчиків та виконавчих механізмів до модулів вводу/виводу контролера ADAM серії 4000.

РОЗДІЛ 7

ПРОГРАМА ФУНКЦІОНУВАННЯ КОНТРОЛЕРА

7.1 Розробка алгоритмів керування

Алгоритму керування автоматизованою системою керування технологічного процесу виробництва сушених овочів було розроблено у вигляді блок-схеми, що приведена на рисунку 7.1 та на листі 3 графічної частини роботи, і відбувається наступним чином.

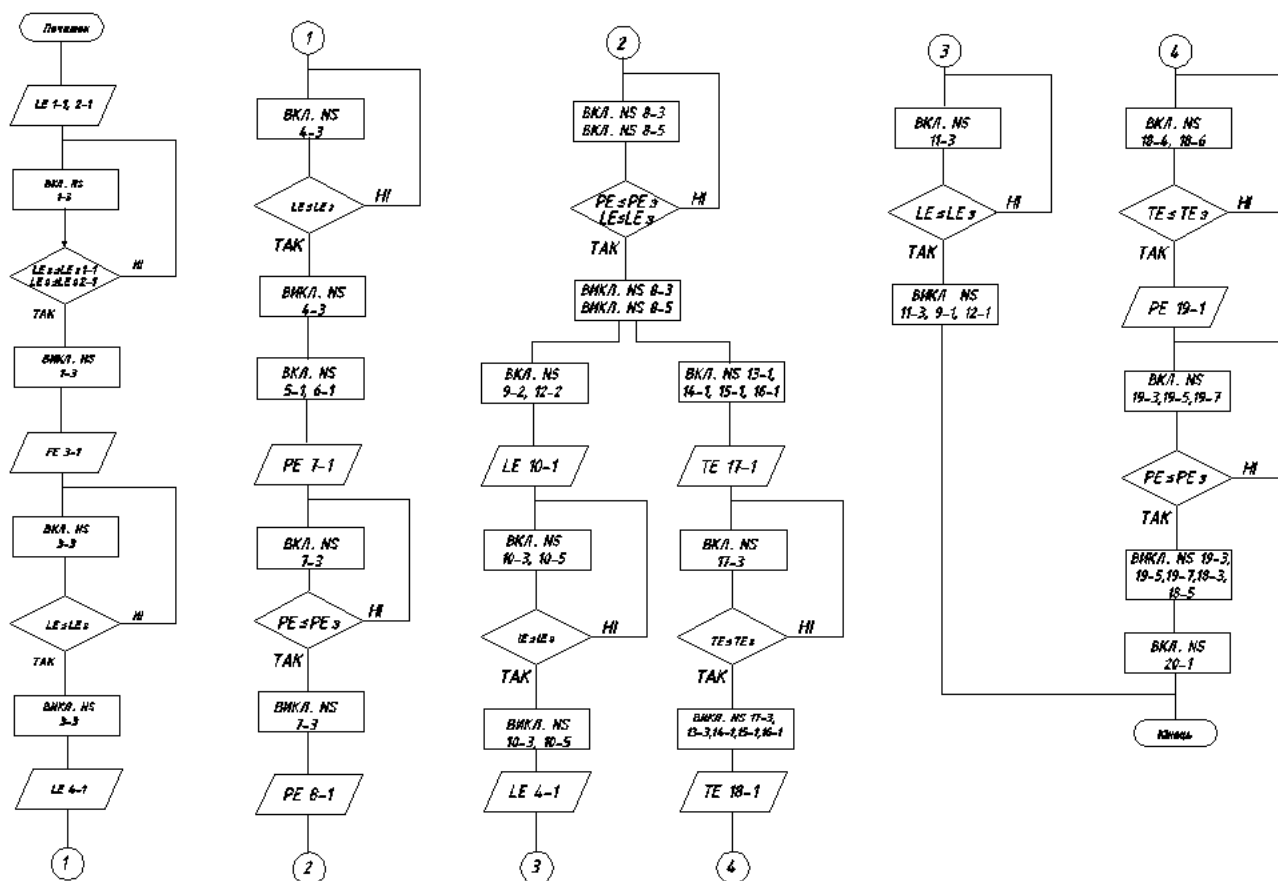


Рисунок 7.1 – Блок-схема алгоритму керування автоматизованою системою

Зчитуються дані з датчиків рівня LE 1-1 та LE 2-1 і контролер вмикає пускач NS 1-3, порівнює отримані значення із заданими і вимикає пускач NS 1-3, якщо вони рівні.

Зчитуються дані з витратоміра FE 3-1 і контролер вмикає пускач NS 3-3, порівнює отримане значення із заданим і вмикає пускач NS 3-3, якщо вони рівні.

Зчитуються дані з датчика рівня LE 4-1 і контролер вмикає пускач NS 4-3, порівнює отримане значення із заданим і вмикає пускач NS 4-3, якщо вони рівні.

Далі контролер вмикає пускачі NS 5-1 та NS 6-1.

Зчитуються дані з датчика тиску PE 7-1 і контролер вмикає пускач NS 7-3, порівнює отримане значення із заданим і вмикає пускач NS 7-3, якщо вони рівні.

Зчитуються дані з датчика тиску PE 8-1 та датчика рівня LE 21-1 і контролер вмикає пускачі NS 8-3 та NS 8-5, порівнює отримане значення із заданим і вмикає пускачі NS 1-3 та NS 8-5, якщо вони рівні.

Далі алгоритм керування розділяється на два паралельні потоки.

Контролер вмикає пускачі NS 9-2 та NS 12-2.

Зчитуються дані з датчика рівня LE 10-1 і контролер вмикає пускачі NS 10-3 та NS 10-5, порівнює отримане значення із заданим і вмикає пускачі NS 10-3 та NS 10-5, якщо вони рівні.

Зчитуються дані з датчика рівня LE 4-1 і контролер вмикає пускач NS 11-3, порівнює отримане значення із заданим і вмикає пускачі NS 11-3, NS 9-1 та NS 12-1, якщо вони рівні.

Паралельним потоком.

Контролер вмикає пускачі NS 13-1, NS 14-1, NS 15-1 та NS 16-1.

Зчитуються дані з датчика температури TE 17-1 і контролер вмикає пускач NS 17-3, порівнює отримане значення із заданим і вмикає пускачі NS 17-3, NS 13-3, NS 14-1, NS 15-1 та NS 16-1, якщо вони рівні.

Зчитуються дані з датчика температури TE 18-1 і контролер вмикає пускачі NS 18-3 та NS 18-5, порівнює отримане значення із заданим та переходить до наступного кроку вітки.

Зчитуються дані з датчика тиску PE 19-1 і контролер вмикає пускач NS 19-3, NS 19-5 та NS 19-7, порівнює отримане значення із заданим і вмикає пускачі NS 19-3, NS 19-5, NS 19-7, NS 18-3, NS 18-5 та вмикає NS 20-1, якщо вони рівні.

Далі алгоритм керування повертається на початок та працює циклічно.

7.2 Розробка структурної схеми алгоритму обробки даних програмного забезпечення вищого рівня автоматизованої системи керування

На основі розробленої блок-схем, що приведена на рисунку 7.1, була розроблена структурна схема алгоритму керування для програмного забезпечення вищого рівня автоматизованої системи (мнемосхеми стратегії (алгоритму обробки даних), що буде розроблена на базі SCADA-системі AdamView), яка приведена на рисунку 7.2 та листі 4 графічної частини роботи.

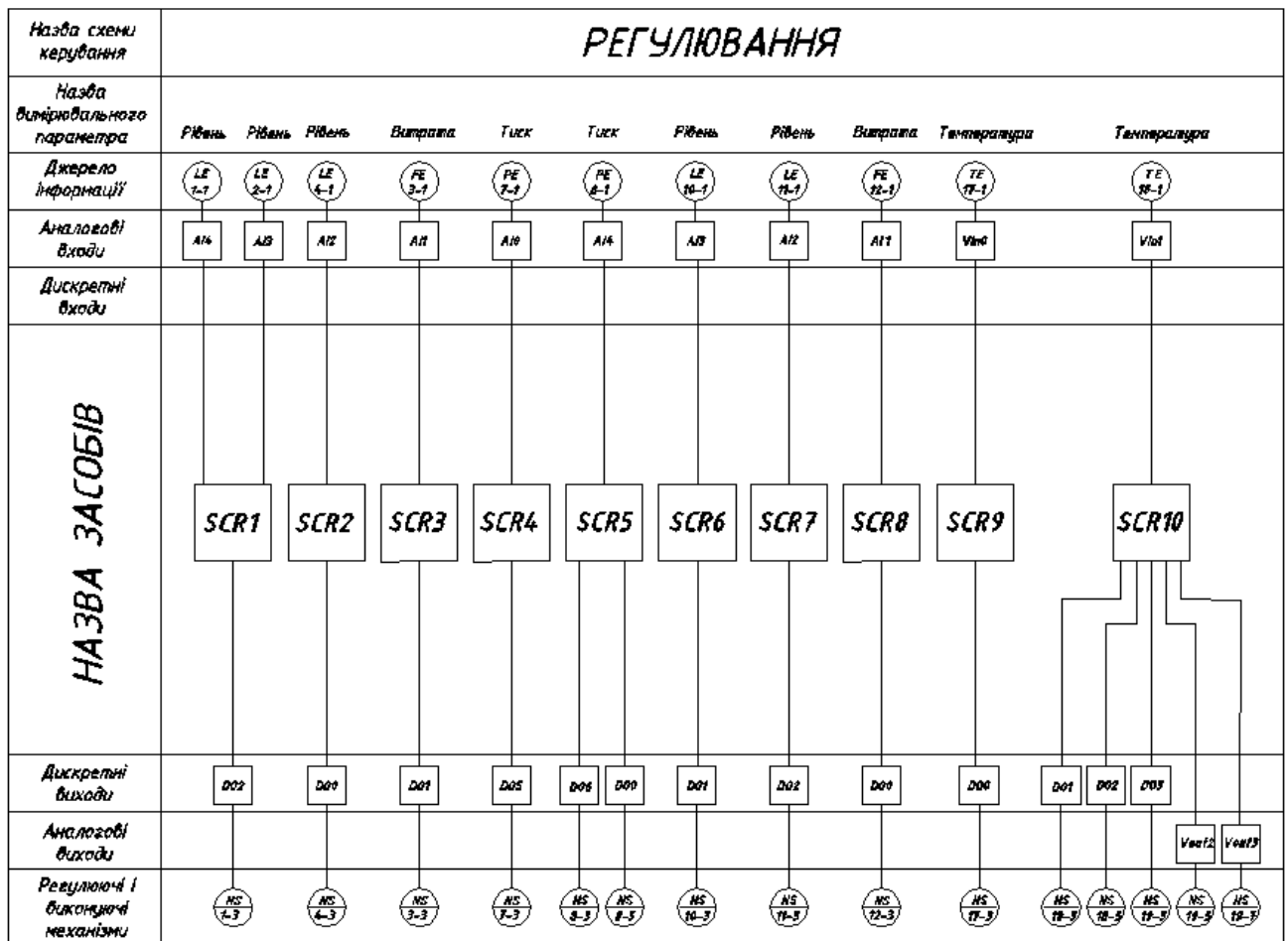


Рисунок 7.2 – Структурна схема алгоритму керування для програмного забезпечення вищого рівня автоматизованої системи

Дані з датчиків, що підключені до аналогових входів модуля аналогового вводу контролера передаються на блоки SCR1-SCR10,

обробляються у відповідності із розробленими алгоритмами, на відповідних виходах формуються сигнали, що передаються на задані канали аналогових та дискретних модулів виводу контролера та на відповідні виконавчі механізми.

7.3 Розробка програми функціонування контролера

На основі розробленої структурної схеми алгоритму обробки даних програмного забезпечення вищого рівня автоматизованої системи, що приведена на рисунку 7.2, в додатку AdamView була розроблена стратегія, що приведена на листі 5 графічної частини роботи.

В додатку «Встановлення пристроїв» встановлено доступ до пристроїв вводу/виводу, а саме: модуля підключення термоопорів ADAM-4015, двох модулів аналогового вводу ADAM-4017, трьох модулів дискретного вводу/виводу ADAM-4050 та модуля аналогового виводу ADAM-4024.

Розроблені мнемосхема стратегії (алгоритм обробки даних) приведена на рисунку 7.3, а віртуальна панель керування оператора – на рисунку 7.4.

Зчитані з датчиків рівня LE 1-1 (блок аналогового вводу AI1) та LE 2-1 (блок аналогового вводу AI2) обробляються у відповідності із програмою, що розроблена на мові Basic Script, лістинг якої приведено в додатку С.1 та описана в блоці SCR1. Вихідний сигнал передається на виконавчий механізм NS 1-3 (блок дискретного виводу DO1).

Зчитані з датчика рівня LE 4-1 (блок аналогового вводу AI3) обробляються у відповідності із програмою, що розроблена на мові Basic Script, лістинг якої приведено в додатку С.2 та описана в блоці SCR2. Вихідний сигнал передається на виконавчий механізм NS 4-3 (блок дискретного виводу DO2).

Зчитані з витратоміра FE 3-1 (блок аналогового вводу AI4) обробляються у відповідності із програмою, що розроблена на мові Basic Script, лістинг якої приведено в додатку С.3 та описана в блоці SCR3. Вихідний сигнал передається на виконавчий механізм NS 3-3 (блок дискретного виводу DO3).

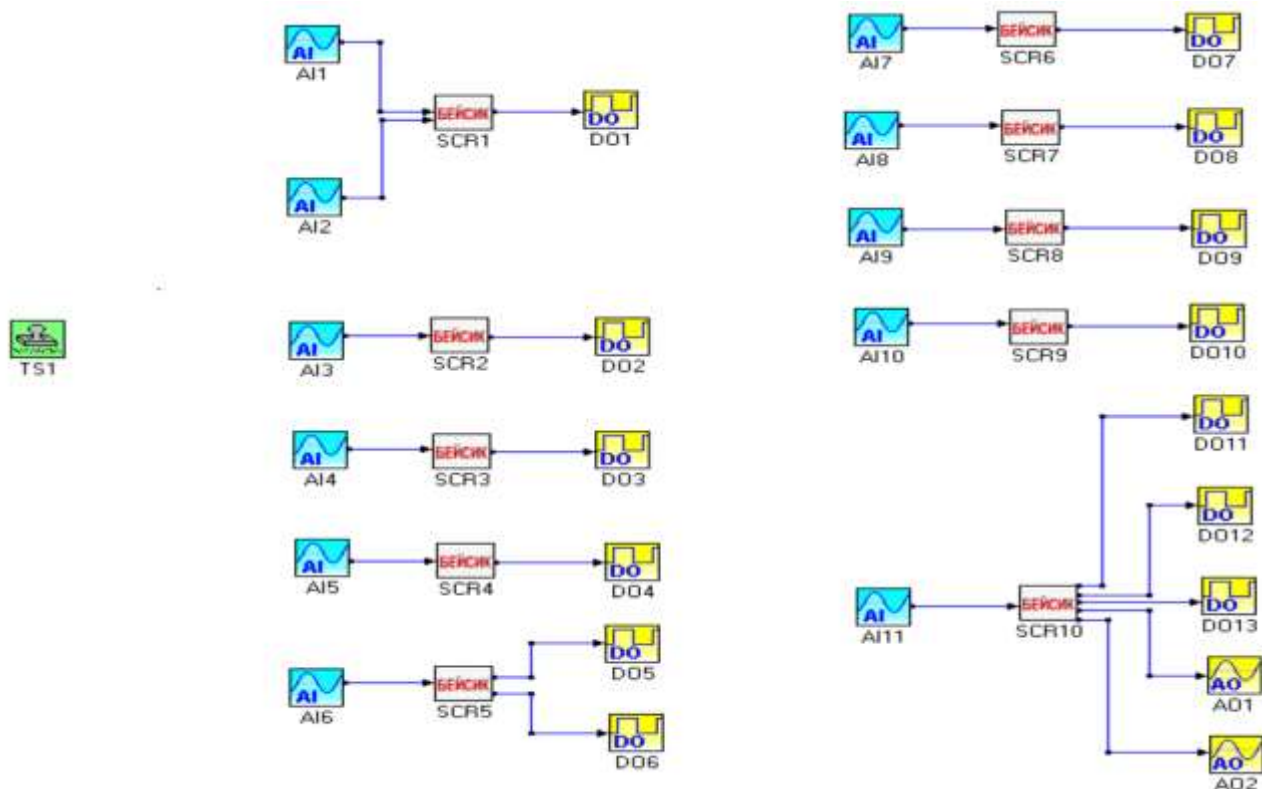


Рисунок 7.3 – Мнемосхема (алгоритм обробки даних)



Рисунок 7.4 – Віртуальна панель керування оператора

Зчитані з датчика тиску PE 7-1 (блок аналогового вводу AI5) обробляються у відповідності із програмою, що розроблена на мові Basic Script, лістинг якої приведено в додатку С.4 та описана в блоці SCR4. Вихідний сигнал передається на виконавчий механізм NS 7-3 (блок дискретного виводу DO4).

Зчитані з датчика тиску PE 8-1 (блок аналогового вводу AI6) обробляються у відповідності із програмою, що розроблена на мові Basic Script, лістинг якої приведено в додатку С.5 та описана в блоці SCR5. Вихідні сигнали передаються на виконавчі механізми NS 8-3 (блок дискретного виводу DO5) та NS 8-5 (блок дискретного виводу DO6).

Зчитані з датчика рівня LE 10-1 (блок аналогового вводу AI7) обробляються у відповідності із програмою, що розроблена на мові Basic Script, лістинг якої приведено в додатку С.6 та описана в блоці SCR6. Вихідний сигнал передається на виконавчий механізм NS 10-3 (блок дискретного виводу DO7).

Зчитані з датчика рівня LE 11-1 (блок аналогового вводу AI8) обробляються у відповідності із програмою, що розроблена на мові Basic Script, лістинг якої приведено в додатку С.7 та описана в блоці SCR7. Вихідний сигнал передається на виконавчий механізм NS 11-3 (блок дискретного виводу DO8).

Зчитані з витратоміра FE 12-1 (блок аналогового вводу AI9) обробляються у відповідності із програмою, що розроблена на мові Basic Script, лістинг якої приведено в додатку С.8 та описана в блоці SCR8. Вихідний сигнал передається на виконавчий механізм NS 12-3 (блок дискретного виводу DO9).

Зчитані з датчика температури TE 17-1 (блок аналогового вводу AI10) обробляються у відповідності із програмою, що розроблена на мові Basic Script, лістинг якої приведено в додатку С.9 та описана в блоці SCR9. Вихідний сигнал передається на виконавчий механізм NS 17-3 (блок дискретного виводу DO10).

Зчитані з датчика температури TE 18-1 (блок аналогового вводу AI11) обробляються у відповідності із програмою, що розроблена на мові Basic Script, лістинг якої приведено в додатку С.10 та описана в блоці SCR10. Вихідні сигнали передаються на виконавчі механізми NS 18-3 (блок дискретного виводу DO11), NS 18-5 (блок дискретного виводу DO12), NS 19-3 (блок дискретного виводу DO13), NS 19-5 (блок аналогового виводу AO1) та NS 19-7 (блок аналогового виводу AO2).

Висновок до розділу 7

Для керування автоматизованою системою з робочого місця оператора ЕОМ було розроблено алгоритми, на основі яких побудовані блок-схема алгоритму керування, структурна схема програми функціонування контролера та в середовищі AdamView – стратегія, що містить одну мнемосхему та одну віртуальну панель керування оператора.

РОЗДІЛ 8

РОЗРАХУНОК ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ, ЩО ПРОЕКТУЄТЬСЯ

8.1 Розрахунок капітальних затрат на автоматизацію

Для визначення доцільності впровадження розробленої автоматизації системи технологічного процесу виробництва сушених овочів проведено розрахунок економічної ефективності.

Було розраховано капітальні затрати на придбання, транспортування і монтаж технічних засобів автоматизації автоматизованої системи керування.

Капітальні затрати на автоматизацію включають вартість технічних засобів автоматизації (датчиків та виконавчих механізмів, модулів вводу/виводу та перетворення інтерфейсу), їх монтажу, налагодження та транспортні витрати.

Вартість технічних засобів автоматизації було визначено на основі актуальних на даний момент часу цін [7-20], а підсумок їх розрахунку приведено в таблиці 8.1.

Таблиця 8.1 – Розрахунок вартості технічних засобів автоматизації розробленої системи керування

№ з/п	Назва приладу	Тип	Кількість	Вартість одиниці, грн.	Загальна вартість, грн.
1	2	3	4	5	6
1.	Ультразвуковий датчик рівня	IFM LR7000	6	23069	138414,00
2.	Витратомір	QF05ZAT	1	700	700,00
3.	Датчик тиску	IFM PM1505	2	28539	57078,00
4.	Термоопір	Sensor-shop 24	2	3800	7600,00
5.	Електромагнітний клапан	Burkert 00064208	8	5894	47152,00
6.	Соленоїдний клапан	Burkert 00221605	2	4505	9010,00

Продовження таблиці 8.1

1	2	3	4	5	6
7.	Векторний перетворювач частоти	SPLC-AT20-15G/18.5 P4	2	21879	43758,00
8.	Пускач безконтактний реверсивний	АСКО ПМ 4-95	20	2154,67	43093,40
9.	Модуль аналогового вводу	ADAM-4017-E	2	8859,50	17719,00
10.	Модуль підключення термоопорів	ADAM-4015-F	1	17372,50	17372,50
11.	Модуль аналогового виводу	ADAM-4024-B1E	1	13260	13260,00
12.	Модуль дискретного вводу/	ADAM-4050-DE	3	4732	14196,00
13.	Модуль перетворення інтерфейсів	ADAM-4520-EE	1	4437,30	4437,30
14.	Блок живлення	Mean Well MDR-10-24	1	622,38	622,38
	Всього				364524,40

Отже, аналіз даних, наведених в таблиці 8.1, показав, що вартість технічних засобів автоматизації розробленої системи керування становить $B_3 = 364524,40$ грн.

Приймаємо, що транспортно-заготівельні витрати становлять 25% від вартості технічних засобів автоматизації.

Приймаємо, що витрати на монтаж системи автоматизації становлять 45% від вартості технічних засобів автоматизації..

Приймаємо, що вартість налагодження апаратури становить 10% від вартості технічних засобів автоматизації..

Загальна вартість впровадження розробленої автоматизованої системи керування визначається за формулою (8.1):

$$B = B_3 + B_{тр} + B_M + B_H, \quad (8.1)$$

де B_3 – загальна вартість технічних засобів автоматизації,

$B_{тр}$ – транспортні витрати,

B_m – витрати на монтаж розробленої автоматизованої системи керування,

B_n – витрати на налагодження розробленої автоматизованої системи керування.

Тому, загальна вартість впровадження розробленої автоматизованої системи керування становить:

$$B = 364524,40 + 91131,10 + 164035,98 + 36452,44 = 656143,92 \text{ грн.}$$

8.2 Розрахунок експлуатаційних затрат

Експлуатаційні витрати пов'язані із функціонуванням нових основних фондів, що вводяться в експлуатацію при впровадженні розробленої автоматизованої системи керування.

Приймаємо, що витрати на утримання обладнання, включають затрати на основну та додаткову заробітну плату черговим слюсарям КВП і А, відрахування на соціальне страхування, затрати на електроенергію, матеріали та амортизацію приладів складає 25% від вартості технічних засобів автоматизації:

$$\sum Z = BB_n \cdot 0,25.$$

$$\sum Z = 364524,40 \cdot 0,25 = 91131,10 \text{ грн.}$$

Приймаємо, що витрати на поточний ремонт, ремонт технічних засобів автоматизації входять основна і додаткова заробітні плати ремонтникам, відрахування на соціальне страхування, вартість запасних частин і матеріалів, затрати на електроенергію, необхідну для ремонту складають 2,5% від вартості технічних засобів автоматизації:

$$Z_n = BB_n \cdot 0,025.$$

$$Z_n = 364524,40 \cdot 0,025 = 9113,11 \text{ грн.}$$

Приймаємо, що відрахування на амортизацію визначаються за балансовою вартістю основних фондів технічних засобів автоматизації, які приймають участь в амортизації, та норм амортизації становлять 24% від вартості технічних засобів

автоматизації:

$$A_e = BB_n \cdot 0,24.$$

$$A_e = 364524,40 \cdot 0,24 = 87485,86 \text{ грн.}$$

Отже, експлуатаційні витрати на автоматизацію технологічного процесу виробництва сушених овочів становлять:

$$Z_e = \sum (Z + Z_n + A_e);$$

$$Z_e = 91131,10 + 9113,11 + 87485,86 = 187730,07 \text{ грн.}$$

Висновок до розділу 8

Розрахунок економічної ефективності впровадження розробленої автоматизованої системи керування технологічним процесом виробництва сушених овочів показав, що для її впровадження необхідно придбати технічних засобів автоматизації на суму, що становить 364524,40 грн. Капітальні затрати на автоматизацію та монтаж розробленої автоматизованої системи керування складають 656143,92 грн., а експлуатаційні витрати – 187730,07 грн.

ВИСНОВКИ

В даному проекті була розроблена та досліджена автоматизована система керування технологічним процесом виробництва сушених овочів.

Було проведено аналіз технологічного процесу як об'єкта керування, який показав, що виробництво сушених овочів є технологічно складним процесом, що включає декілька етапів – миття, подрібнення, бланшування, сушіння, охолодження та пакування. Найбільш енергоємною і критичною з точки зору якості продукції є операція сушіння, оскільки від точності підтримання температури, вологості та швидкості повітряного потоку залежить кінцевий результат. Традиційні системи керування сушильними установками часто мають низький рівень автоматизації та потребують постійного контролю з боку оператора. Це призводить до людського фактору, перевитрат енергії, нестабільної якості продукції та втрати частини корисних речовин у процесі сушіння.

Розроблена карта технологічного процесу та вимоги до системи автоматизації.

Проведений аналіз технологічного процесу виробництва сушених овочів, як об'єкта керування, показав, що основними технологічними параметрами, що суттєво впливають на якість сушених овочів (вологість та температуру) температура і час бланшування та тиск перегрітої пари.

На основі технологічної схеми виробництва була розроблена і описана функціональна схема автоматизованої системи керування технологічним процесом виробництва сушених овочів та описано основні її функціональні підсистеми.

Розроблена специфікація технічних засобів автоматизованої системи керування.

Проведено вибір датчиків, виконавчих механізмів та модулів контролера. Проведено розрахунок та вибір блока живлення автоматизованої системи керування.

В розробленій автоматизованій системі керування технологічним процесом виробництва сушених овочів:

- для вимірювання рівня в бункері, вібраційній мийній машині, автоматичних вагах, барабанній очищувальній машині, бетонній ємкості та відстійниках використовується радарний датчик рівня моделі IFM LR7000;
- для вимірювання витрати холодної води використовується витратомір моделі QF05ZAT;
- для вимірювання тиску в трубопроводах подачі пари та холодної води використовується датчик тиску моделі IFM PM1505;
- для вимірювання температури в паровому бланшувачі та сушарці використовується термоопір моделі Sensorshop 24;
- для керування подачею холодної води та скиданням відпрацьованої води, подачею перегрітої пари та біосульфату натрію використовується електромагнітний клапан Burkert моделі 00064208;
- для керування кількістю подачі повітря та перегрітої пари в сушарку використовується соленоїдний клапан Burkert моделі 00221605;
- для керування продуктивністю насосів, зокрема частотою обертання електродвигуна їх приводу використовується векторний частотний перетворювач моделі SPLC-AT20-15G/18.5P4 потужністю 15 кВт, що живиться від мережі змінного струму напругою 380 В;
- для керування ввімкненням електродвигунів приводів технологічного устаткування використовується безконтактний реверсивний пускач АСКО моделі ПМ 4-95;
- для керування автоматизованою системою було обрано модулі вводу/виводу контролера ADAM серії 4000;
- для підключення до системи керування датчиків температури (термоопорів) використовується модуль підключення термоопорів ADAM-4015-F;
- для підключення до системи керування датчиків рівня, тиску та витратомірів використовується модуль аналогового вводу ADAM-4017-E;
- для підключення до системи керування безконтактних реверсивних пускачів використовується модуль дискретного вводу/виводу ADAM-4050-DE;

– для підключення до системи керування соленоїдних клапанів використовується модуль аналогового виводу ADAM-4024-B1E;

– для керування системою з персонального комп'ютера та підключення системи керування до COM порту використовується модуль перетворення інтерфейсів RS-485 в RS-232 ADAM-4520-EE;

– на основі проведеного розрахунку для живлення обраних модулів вводу/виводу контролера автоматизованої системи керування. На основі проведеного розрахунку було обрано блок живлення Mean Well на DIN-рейку MDR-10-24 з вихідною напругою 24 В, потужність 10 Вт. та силою струм 0,42 А.

Проведено теоретичні дослідження впливу технологічних параметрів на якість сушіння овочів і визначено основні технологічні параметри, що впливають на якість сушіння овочів.

Розглянуті чотири моделі технологічного процесу дегідратації овочів, а саме:

1. Оцінка часу сушіння при різних значеннях температури (модель: експоненційне зменшення).

2. Колір (ΔE) та дегідратація – trade-off vs температура.

3. Ефективна дифузія вологи (D_{eff}) як функція швидкості повітря.

4. Вплив товщини овочів на їх вологість у часі.

На мові програмування Python розроблено код програмного забезпечення для відтворення графіків за розглянутими моделями.

На основі проведених теоретичних досліджень можна зробити наступні висновки:

1. Оптимальне значення температури сушіння для більшості овочів становить 50-65 °C, що значно скорочує час в порівнянні із температурою 40 °C, але не викликає надмірного руйнування каротиноїдів/вітаміну С, як при 80-90 °C. При цьому потрібно підтримувати температуру нижче тієї, що викликає значне зростання ΔE .

2. Потрібно контролювати товщину зрізу. Стандартизовані тонкі слайси (2-5 мм) дають рівномірне сушіння і кращу дегідратацію. Для великих шматків потрібно збільшувати час і враховувати внутрішню дифузію.

3. Потрібно використовувати помірну швидкість повітря (1-3 м/с) для того, щоб зменшити час сушіння. Дуже високі швидкості повітря дають лише малі додаткові вигоди.

4. Потрібно використовувати режим зі зниженням відносної вологості RH у процесі («step-down») для кращої якості: на початку вищий RH може пом'якшувати теплове шокове ушкодження овочів, далі RH зменшується для швидкого видалення вологи.

5. Попередня обробка (бланшування, кислотна обробка) може зменшити потемніння та допомагає зберегти колір і вітаміни, але впливає на кінцеву структуру та дегідратацію, тому її вид підбирається експериментально для конкретного овочу.

Проведено розрахунок та вибір типу регулятора автоматизованої системи керування температурою в сушарці технологічного процесу виробництва сушених овочів. Найкраще для даного технологічного процесу підходить каскадний PID-контур з внутрішнім PI-контролем клапана та можливим split-range з вентилятором.

Розроблено принципову електричну схему підключення датчиків та виконавчих механізмів до модулів вводу/виводу контролера ADAM серії 4000.

Для керування автоматизованою системою з робочого місця оператора ЕОМ розроблено алгоритми, на основі яких побудовані блок-схема алгоритму керування, структурна схема програми функціонування контролера та в середовищі AdamView – стратегія, що містить одну мнемосхему та одну віртуальну панель керування оператора.

Розрахунок економічної ефективності впровадження розробленої автоматизованої системи керування технологічним процесом виробництва сушених овочів показав, що для її впровадження необхідно придбати технічних засобів автоматизації на суму, що становить 364524,40 грн. Капітальні затрати на автоматизацію та монтаж розробленої автоматизованої системи керування складають 656143,92 грн., а експлуатаційні витрати – 187730,07 грн.

Розробка даної автоматизованої системи керування технологічним процесом сушіння овочів дасть можливість:

- забезпечити точне регулювання параметрів процесу в реальному часі (температури, вологості, швидкості циркуляції повітря);
- підвищити стабільність та повторюваність якості готових сушених овочів;
- оптимізувати енергоспоживання за рахунок адаптивного керування нагрівом і вентиляцією;
- зменшити втрати сировини та часу при переході між режимами сушіння;
- створити умови для дистанційного моніторингу та діагностики обладнання за допомогою сучасних SCADA- або IoT-рішень.

Крім того, автоматизація процесу сушіння овочів сприяє екологічній безпеці виробництва, оскільки дозволяє знизити обсяги споживаної електроенергії та тепла, зменшуючи викиди в атмосферу.

На основі матеріалів першого та другого розділів даної кваліфікаційної роботи у збірнику XIII Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції молодих учених та студентів «Актуальні проблеми автоматизації та управління» опублікована стаття «Аналіз технологічного процесу виробництва сушених овочів як об'єкта керування» [1].

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Решетило О. М., Соботович М. І. Аналіз технологічного процесу виробництва сушених овочів як об'єкта керування. *Актуальні проблеми автоматизації та управління*: матер. XIII-ої Міжнар. наук.-практ. інтернет-конф. (м. Луцьк, 28 лист. 2025 р.). Вип. 13. Луцьк: ЛНТУ, 2025. С. 64-69.
2. Сушіння овочів та фруктів. URL: <https://bmholod.com.ua/solution/liniyi-pererobky/sushinna-ovoshchey-ta-fruktiv/> (дата звертання: 02.09.2025).
3. Виробництво сушених овочів і фруктів. URL: <https://www.erdkraft.com.ua/virobnitstvo/> (дата звертання: 02.09.2025).
4. Технологія зберігання і переробки сільськогосподарської продукції. URL: <https://surl.li/zlpzfp> (дата звертання: 02.09.2025).
5. Технологічне обладнання виробництва сушених продуктів. URL: <http://www.tsatu.edu.ua/ophv/wp-content/uploads/sites/13/tema-12.-tehnolohichne-obladnannja-vyrobnuctva-sushenyh-produktiv.pdf> (дата звертання: 02.09.2025).
6. Формування якості сушених фруктів і овочів в процесі виробництва. URL: https://pidru4niki.com/14111023/tovarovnavstvo/formuvannya_yakosti_sushenih_frukti_v_ovochiv_protseji_virobnitstva (дата звертання: 02.09.2025).
7. Радарний датчик рівня IFM LR7000. URL: <https://peko.com.ua/process-sensors/level-sensors/ifm-lr7000> (дата звернення: 10.11.2025).
8. Витратомір QF05ZAT URL: <https://agro-teh.com.ua/ua/p413677901-datchik-rashoda-vyazkih.html> (дата звернення: 10.11.2025).
9. Датчик тиску IFM PM1505 URL: <https://peko.com.ua/process-sensors/pressure-sensors/ifm-pm1505> (дата звернення: 10.11.2025).
10. Вгвинчуваний датчик температури Sensorshop 24 URL: https://pragmatic.com.ua/sensorshop_efmt (дата звернення: 10.11.2025).
11. Електромагнітний клапан Burkert 00064208. URL: <https://trade-control.com.ua/ua/products/burkert-00064208> (дата звернення: 10.11.2025).

12. Соленоїдний клапан Burkert 00221605. URL: <https://trade-control.com.ua/ua/00221605> (дата звернення: 10.11.2025).

13. Векторний перетворювач частоти 15 кВт 380В (SPLC-AT20-15G/18.5P4) URL: <https://spc.com.ua/products/nietz-splc-at20-15g-4-vector-frequency-inverter-15kw-3phase-380v-ip20> (дата звернення: 10.11.2025).

14. Магнітний пускач АСКО ПМ 4-95 220В URL: https://amperok.com.ua/magn%D1%96tnij_puskach_asko_pm_4_95_220_v_a0040010015 (дата звернення: 10.11.2025).

15. Модуль аналогового вводу ADAM-4017-E. URL: <https://www.proxis.ua/ru/product/8-ch-analog-input-module-advantech-ADAM-4017/> (дата звернення: 10.11.2025).

16. Модуль дискретного вводу/виводу ADAM-4050. URL: <https://www.proxis.ua/uk/product/digital-io-module-advantech-ADAM-4050/> (дата звернення: 10.11.2025).

17. Модуль аналогового виводу ADAM-4024. URL: <https://www.proxis.ua/ru/product/ADAM-4024/> (дата звернення: 10.11.2025).

18. Модуль аналогового виводу ADAM-4015-F. URL: <https://www.proxis.ua/ru/product/ADAM-4016/> (дата звернення: 10.11.2025).

19. Модуль RS232/485 ADAM-4520. URL: <https://www.proxis.ua/ru/product/ADAM-4520/> (дата звернення: 10.11.2025).

20. Блок живлення Mean Well на DIN-рейку MDR-10-24, Напруга 24 В, Потужність 10 Вт, Струм 0,42 А. URL: <https://discon.ua/ua/istochniki-pitanya/istochnik-pitaniya-mdr-10-24> (дата звернення: 10.11.2025).

21. Effect of temperature and air velocity on drying kinetics, antioxidant capacity, total phenolic content, colour, texture and microstructure of apple (var. Granny Smith) slices. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0308814611014622> (дата звернення: 14.11.2025).

22. Effect of hot air temperature and slice thickness on the drying kinetics and quality of Hani. URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-024-81053-2> (дата звернення: 14.11.2025).

23. Effect of Drying Air Velocity on Drying Kinetics of Tomato Slices in a Forced-Convective Solar Tunnel Dryer. URL: <https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=92849> (дата звернення: 14.11.2025).

24. The influence mechanism and control strategy of relative humidity on hot air drying of fruits and vegetables. URL: https://www.researchgate.net/publication/353213276_The_influence_mechanism_and_control_strategy_of_relative_humidity_on_hot_air_drying_of_fruits_and_vegetables_a_review (дата звернення: 14.11.2025).

25. Effect of air drying temperature on the quality of rehydrated dried red bell pepper. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0260877407003652> (дата звернення: 14.11.2025).