

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Західноукраїнський національний університет
Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем

ЗЬОМКО Володимир Андрійович

**Автоматизована система керування технологічним
процесом шокової заморозки харчової продукції /**
Automated Control System for the Technological Process of
Shock Freezing of Food Products

спеціальність: 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані
технології та робототехніка
освітньо-професійна програма – Автоматизація та комп'ютерно-
інтегровані технології

Кваліфікаційна робота

Виконав студент групи АКІТ – 42/1
В.А. Зьомко

Науковий керівник
к.т.н., доцент Н.Г.Яцків

Кваліфікаційну роботу допущено
до захисту:

« ____ » _____ 2026 р.

Завідувач кафедри

_____ А.І.Сегін

ТЕРНОПІЛЬ – 2026

АНОТАЦІЯ

Зьомко В.А. Автоматизована система керування технологічним процесом шокової заморозки харчової продукції. – Рукопис.

Дослідження на здобуття освітнього ступеня «бакалавр» за спеціальністю 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка», освітньо-професійна (наукова) програма. – Західноукраїнський національний університет, Тернопіль, 2026.

У роботі розроблено модель об'єкта керування системи шокової заморозки та побудовано математичну модель об'єкта керування для дослідження динамічних характеристик системи. Побудовано функціональну та структурну схеми системи керування установкою шокової заморозки, які включають датчики температури, тиску та вологості, програмований логічний контролер, виконавчі механізми та операторський інтерфейс. Розроблено програмний засіб для автоматизованого керування процесом шокової заморозки.

ANNOTATION

Ziomko V.A. Automated Control System for the Technological Process of Shock Freezing of Food Products. - Manuscript.

Doctoral studies for the education level «Bachelor'» with the title 174 "Automation, Computer-Integrated Technologies and Robotics". – West Ukrainian National University, Ternopil, 2026.

The work evelops a control object model for a shock freezing system and constructs a mathematical model of the control object for investigating the dynamic characteristics of the system. Functional and structural diagrams of the control system for a shock freezing installation have been developed, incorporating temperature, pressure, and humidity sensors, a programmable logic controller, actuators, and an operator interface. A software application for automated control of the shock freezing process has been developed.

Західноукраїнський національний університет
Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем
Освітній ступінь "бакалавр"
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 КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ
ЗЬОМКО Володимир Андрійович**

_____ (прізвище, ім'я по-батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи

_____ Автоматизована система керування технологічним процесом шокової
заморозки харчової продукції / Automated Control System for the Technological
Process of Shock Freezing of Food Products. _____

_____ керівник роботи _____ к.т.н., доцент Н.Г.Яцків
затверджені наказом по університету від 01 грудня 2025 р. № 894 _____

2. Строк подання студентом закінченої кваліфікаційної роботи

25 травня 2026р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи:

- _____ 1. Технологічний процес шокової заморозки. _____
- _____ 2. Будова та характеристики холодильних установок. _____
- _____ 3. Принцип дії та будова систем керування процесом шокової заморозки. _____
- _____ 4. Існуючі автоматизовані системи керування технологічним процесом шокової
заморозки. _____

4. Основні питання, які потрібно розробити

- _____ 1. Аналіз об'єкта автоматизації та її складових. _____
- _____ 2. Розробка схеми автоматизованої системи контролю швидкої заморозки. _____
- _____ 3. Реалізація системи шокової заморозки. _____

5. Перелік графічного матеріалу у роботі

- _____ 1. Схема автоматичної системи шокового заморожування. _____
- _____ 2. Схема автоматизованої системи контролю шокового заморожування. _____
- _____ 3. Схема управління для шокової морозилки. _____

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1	Н.Г. Яцків к.т.н., доцент, доцент кафедри СКС		
2	Н.Г. Яцків к.т.н., доцент, доцент кафедри СКС		
3	Н.Г. Яцків к.т.н., доцент, доцент кафедри СКС		

7. Дата видачі завдання 01 грудня 2025р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назви етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Проведення аналізу технологічного процесу та визначення об'єкта автоматизації	01.12.2025р. – 15.01.2026р.	
2	Проектування автоматизованої системи керування процесом шоккової заморозки	16.01.2026р. – 15.03.2026р.	
3	Реалізація автоматизованої системи керування процесом шоккової заморозки	16.03.2026р. – 30.04.2026р.	
4	Остаточне оформлення та подача кваліфікаційної роботи на перевірку щодо плагіату	01.05. 2026р. – 25.05.2026р.	

Студент

(підпис)

В.А. Зьомко

Керівник роботи

(підпис)

к.т.н., доцент Н.Г. Яцків

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	5
ВСТУП.....	6
1. АНАЛІЗ ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ ТА ЇЇ СКЛАДОВИХ	9
1.1 Дослідження процесу швидкої заморозки	9
1.2 Технологічне обладнання систем швидкої заморозки	13
1.3 Існуючі системи швидкої заморозки	15
2. РОЗРОБКА СХЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ШВИДКОЇ ЗАМОРОЗКИ	20
2.1 Принцип роботи типової схеми автоматизованої системи контролю швидкої заморозки	20
2.2 Побудова автоматизованої системи контролю	23
2.3 Схема управління для шокової морозилки	28
2.4 Обґрунтування вибору технічних засобів автоматизації	30
3. РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ ШОКОВОЇ ЗАМОРОЗКИ	37
3.1 Модель об'єкта керування	37
3.2 Математична модель об'єкта керування	44
3.3 Розробка програмного засобу для керування технологічним процесом.....	49
ВИСНОВКИ.....	52
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	54

					ДП.АКІТ.11149121.00.00.000ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Зьомко В.А.			Автоматизована система керування технологічним процесом шокової заморозки харчової продукції / Automated Control System for the Technological Process of Shock Freezing of Food Products	Лім.	Арк.	Акрушіє
Перевір.		Яцків Н.Г.					4	56
Консульт.		Яцків Н.Г.				ЗУНУ.ФКІТ.АКІТ-42/1		
Н. Контр.		Заставний О.М.						
Затверд.		Сегін А.І.						

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ВМ – виконавчий механізм;

ГІС – графічний інтерфейс системи;

ДТ – датчик температури;

ДТс – датчик тиску;

ДВ – датчик вологості;

ЕРК – електронний розширювальний клапан;

ІО – інформаційне забезпечення;

КВПіА – контрольно-вимірювальні прилади та автоматика.

					ДП.АКІТ.11149121.00.00.000ПЗ	Арк.
						5
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

ВСТУП

Актуальність теми. У сучасних умовах розвитку харчової промисловості особливої ваги набувають технології збереження якості продукції при тривалому зберіганні та транспортуванні. Одним із найбільш ефективних методів консервування харчових продуктів є швидка (шокова) заморозка, яка забезпечує інтенсивне зниження температури та мінімізує утворення великих кристалів льоду в структурі продукту. Саме швидкість проходження температурної зони кристалізації визначає ступінь збереження фізико-хімічних та органолептичних характеристик продукції. Нестабільність температурних режимів, затримки в керуванні або нерівномірність охолодження можуть призводити до погіршення якості, втрати маси та зниження споживчих властивостей продуктів[1].

Сучасні вимоги до енергоефективності виробничих процесів зумовлюють необхідність оптимізації роботи холодильного обладнання, яке належить до найбільш енергоємних систем підприємств харчової галузі. Нераціональне керування компресорними установками, вентиляторами та системами відтайки спричиняє підвищене споживання електроенергії, збільшення навантаження на обладнання та скорочення його експлуатаційного ресурсу. Використання автоматизованих систем керування дозволяє забезпечити точне регулювання температурних і тискових параметрів, реалізувати адаптивні алгоритми роботи та знизити енергетичні витрати без погіршення технологічних показників процесу.

Додатковим фактором актуальності є зростання вимог до безпечності харчових продуктів та забезпечення простежуваності виробничих процесів відповідно до міжнародних стандартів якості. Контроль температури повітря в камері, температури ядра продукту, параметрів холодильного контуру та фіксація технологічних режимів у режимі реального часу є необхідними умовами для гарантування відповідності нормативним вимогам. Реалізація таких функцій можлива лише за умови впровадження програмно-технічних комплексів на базі сучасних контролерів та систем диспетчеризації[2].

Таким чином, розроблення автоматизованої системи керування технологічним процесом швидкої заморозки є науково та практично

					ДП.АКІТ.11149121.00.00.000ПЗ	Арк.
						6
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

обґрунтованим завданням, спрямованим на підвищення якості продукції, зниження енерговитрат, забезпечення безпечності виробництва та підвищення надійності експлуатації холодильного обладнання. Впровадження таких систем відповідає сучасним тенденціям цифровізації промисловості та створює передумови для інтеграції технологічного обладнання в єдині інформаційно-керуючі середовища підприємства.

Мета кваліфікаційної роботи: розробка та обґрунтування структури автоматизованої системи керування технологічним процесом швидкої заморозки харчової продукції шляхом побудови функціональної та структурно-функціональної схем, які відображають взаємозв'язки між об'єктом керування, вимірювальними елементами, виконавчими механізмами, програмованим логічним контролером та системою диспетчеризації.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

- Дослідити технологічний процес швидкої заморозки харчової продукції та визначити його основні параметри як об'єкта автоматизації.
- Проаналізувати технологічне обладнання та основні компоненти систем швидкої заморозки.
- Проаналізувати існуючі системи швидкої заморозки та сучасні підходи до їх автоматизації.
- Дослідити принцип роботи типової автоматизованої системи контролю швидкої заморозки.
- Розробити структуру автоматизованої системи контролю процесу швидкої заморозки.
- Розробити схему управління установкою шокової заморозки.
- Обґрунтувати вибір технічних засобів автоматизації для реалізації системи керування.
- Розробити модель об'єкта керування системи шокової заморозки.
- Побудувати математичну модель об'єкта керування для дослідження динамічних характеристик системи.

					ДП.АКІТ.11149121.00.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		7

– Розробити програмний засіб для автоматизованого керування процесом шокової заморозки.

У межах поставленої мети передбачається сформувані цілісну архітектуру PLC/SCADA-рішення, що забезпечує реалізацію контурів регулювання температури та тиску, алгоритмів керування режимами швидкої заморозки, логіки захистів і аварійних блокувань, а також інформаційний обмін між польовим рівнем і верхнім рівнем візуалізації. Особлива увага приділяється графічному та структурному відображенню сигналів AI/DI/AO/DO, функціональних блоків регулювання (TIC, PIC, логіка режимів, керування відтайкою) та їх інтеграції у єдину систему.

Об’єкт дослідження - технологічний процес шокової заморозки харчової продукції.

Предмет дослідження - автоматизована система керування технологічним процесом шокової заморозки, методи контролю температурних режимів та програмно-технічні засоби автоматизації.

Методи дослідження – методи аналізу технологічних процесів, методи математичного моделювання, методи класичної теорії автоматичного управління, методи комп’ютерного моделювання та програмної реалізації систем автоматизації.

Практичне значення отриманих результатів полягає у розробці структури автоматизованої системи керування процесом шокової заморозки, програмного засобу для контролю технологічних параметрів та можливості подальшої інтеграції розроблених рішень із реальним промисловим обладнанням.

Публікації та апробація. Зьомко В, Стефурак Н., Кузик В. Схема автоматизованої системи контролю швидкої заморозки Збірник матеріалів всеукраїнської науково-практичної конференції «Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології» (АКІТ - 2026), Тернопіль, 2026. С.144-148.

					ДП.АКІТ.11149121.00.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		8

1. АНАЛІЗ ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ ТА ЇЇ СКЛАДОВИХ

1.1 Дослідження процесу швидкої заморозки

Технологія шокової заморозки належить до високоефективних методів консервування харчової продукції, що забезпечують швидке зниження температури продукту до значень, за яких припиняються мікробіологічні та біохімічні процеси, відповідальні за погіршення його якості. Основною особливістю цього технологічного процесу є інтенсивне проходження температурної зони кристалізації вологи, яка для більшості харчових продуктів знаходиться в інтервалі від мінус одного до мінус п'яти градусів Цельсія. Саме в цьому діапазоні відбувається активне утворення кристалів льоду, розміри яких безпосередньо впливають на збереження клітинної структури продукту, його текстуру, соковитість та органолептичні характеристики після розморожування.

На відміну від традиційного заморожування, при якому охолодження відбувається поступово, шокова заморозка передбачає використання значно нижчих температур теплоносія, зазвичай у межах від мінус тридцяти до мінус сорока градусів Цельсія, а також високої швидкості циркуляції охолодженого повітря. За таких умов інтенсивність тепловідведення суттєво зростає, що дозволяє скоротити тривалість проходження критичної температурної зони та забезпечити формування дрібнодисперсної кристалічної структури льоду. Це особливо важливо для продукції з високим вмістом вологи, зокрема м'ясних, рибних, овочевих і напівфабрикатних виробів, де механічне руйнування клітин при повільному заморожуванні призводить до значних втрат якості.

Фізична сутність процесу шокової заморозки полягає у відведенні теплової енергії від поверхневих шарів продукту до навколишнього охолодженого середовища та подальшому поширенні фронту заморожування в напрямку до внутрішніх шарів. На початковому етапі відбувається зниження температури поверхні продукту до точки замерзання, після чого розпочинається фазовий перехід вологи з рідкого стану у твердий. У цей період значна частина теплоти відводиться у вигляді прихованої теплоти кристалізації, що визначає найбільшу

					ДП.АКІТ.11149121.00.00.000ПЗ	Арк.
						9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

тривалість технологічного циклу. Після завершення фазового переходу температура продукту продовжує знижуватися до рівня зберігання, який для більшості харчових продуктів становить мінус вісімнадцять градусів Цельсія.

Ефективність процесу значною мірою залежить від організації теплообміну в камері заморожування. Для цього використовуються випарники з примусовою циркуляцією повітря, що формують рівномірний розподіл температурного поля по всьому об'єму робочої камери. Вентилятори забезпечують необхідну швидкість руху повітря, а холодильний контур підтримує стабільну температуру випарника. Важливим фактором є правильне розміщення продукції, оскільки надмірна щільність завантаження погіршує аеродинамічні умови та збільшує нерівномірність охолодження.

Технологічний процес шокової заморозки характеризується наявністю декількох послідовних режимів функціонування. Перший етап пов'язаний із попереднім охолодженням камери до робочого температурного рівня, що дозволяє підготувати обладнання до завантаження продукції. Після цього реалізується режим інтенсивного заморожування, під час якого холодильна система працює з максимальною холодопродуктивністю. Завершальна стадія полягає у стабілізації температури продукту та переході до режиму зберігання або вивантаження продукції.

З позиції автоматизації процес шокової заморозки є багатопараметричним об'єктом керування, у якому взаємопов'язаними є температурні, тискові та часові характеристики. Основними контрольованими параметрами виступають температура повітря в камері, температура ядра продукту, тиск у холодильному контурі, а також стан допоміжних елементів системи. Збурюючими впливами є маса продукту, його початкова температура, вологість, частота відкривання дверей камери та зміна теплового навантаження. Саме тому забезпечення стабільності процесу потребує застосування автоматизованих систем керування, здатних у реальному часі адаптувати режими роботи холодильного обладнання до змінних умов.

Важливою особливістю технології є необхідність періодичного проведення відтайки випарника. У процесі роботи на поверхні теплообмінника накопичується

					ДП.АКІТ.11149121.00.00.000ПЗ	Арк.
						10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

іній, який погіршує коефіцієнт теплопередачі та збільшує аеродинамічний опір. Це знижує ефективність теплообміну та призводить до зростання енергетичних витрат. Тому система управління повинна передбачати автоматичне переключення в режим відтайки за часовими або температурними критеріями.

Таким чином, технологія шокової заморозки являє собою складний теплотехнічний процес, у якому поєднуються інтенсивні явища теплообміну, фазового переходу та динамічного регулювання параметрів холодильного обладнання. Її ефективне функціонування безпосередньо залежить від точності підтримання технологічних режимів, що визначає доцільність використання сучасних автоматизованих систем контролю та керування.

Процес заморожування харчової продукції є складним теплофізичним явищем, що супроводжується зниженням температури продукту, фазовим переходом вологи з рідкого стану у твердий та зміною теплофізичних характеристик матеріалу впродовж технологічного циклу. Особливістю харчових продуктів як об'єкта охолодження є їх багатокomпонентна структура, яка включає вільну та зв'язану вологу, органічні речовини, білки, жири, вуглеводи та мінеральні компоненти, кожен з яких по-різному реагує на зміну температурного режиму.

На початковому етапі заморожування відбувається охолодження продукту від початкової температури до температури початку кристалізації. У цей період теплота відводиться переважно у вигляді чутливої теплоти, а температура продукту змінюється відповідно до його теплоємності. Після досягнення температури замерзання розпочинається фазовий перехід, під час якого значна частина води переходить у кристалічний стан. Саме цей етап є найбільш енергомістким, оскільки супроводжується виділенням прихованої теплоти кристалізації, через що швидкість зниження температури тимчасово зменшується.

Температурний інтервал від мінус одного до мінус п'яти градусів Цельсія вважається критичною зоною заморожування, оскільки саме в цьому діапазоні формується основна маса кристалів льоду. Якщо відведення теплоти відбувається повільно, у структурі продукту утворюються великі міжклітинні кристали, які руйнують клітинні мембрани та призводять до втрати внутрішньоклітинної

					ДП.АКІТ.11149121.00.00.000ПЗ	Арк.
						11
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

вологи після розморожування. При інтенсивному відведенні теплоти, характерному для шокового заморожування, формуються дрібнодисперсні кристали, що рівномірно розподіляються в об'ємі тканин і забезпечують краще збереження структури продукту.

Після завершення основної фази кристалізації температура продукту продовжує знижуватися до значення, необхідного для зберігання. Для більшості харчових продуктів нормативною температурою завершення технологічного циклу є мінус вісімнадцять градусів Цельсія в геометричному центрі продукту. Досягнення цього значення свідчить про завершення активної стадії заморожування та можливість переведення продукції у режим тривалого зберігання.

Теплообмін під час заморожування описується законом теплопровідності, згідно з яким інтенсивність теплового потоку пропорційна градієнту температури між поверхнею продукту та охолоджувальним середовищем. Основне рівняння теплопровідності має вигляд:

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx}$$

де: q — густина теплового потоку,

λ — коефіцієнт теплопровідності продукту,

$\frac{dT}{dx}$ — температурний градієнт.

У випадку шокового заморожування значне збільшення температурного перепаду між поверхнею продукту та охолодженим повітрям суттєво підвищує тепловий потік, що скорочує тривалість заморожування.

Додатковим фактором, який впливає на швидкість процесу, є коефіцієнт тепловіддачі між поверхнею продукту та повітряним потоком. Його значення залежить від швидкості циркуляції повітря, геометрії продукту та умов обтікання. Зі збільшенням швидкості повітря зростає інтенсивність конвективного теплообміну, що особливо важливо у промислових морозильних камерах.

У реальних умовах заморожування теплофізичні параметри продукту змінюються в процесі охолодження, оскільки теплопровідність, теплоємність та

					ДП.АКІТ.11149121.00.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		12

густина залежать від температури та ступеня кристалізації вологи. Це ускладнює математичний опис процесу та потребує використання спрощених моделей або експериментальних коефіцієнтів при побудові систем автоматичного керування.

Таким чином, фізичні основи процесу заморожування визначають критичні технологічні параметри, які повинні враховуватися під час розроблення автоматизованої системи контролю. Саме температура повітря, температура ядра продукту, швидкість теплообміну та стабільність холодильного режиму стають основними керованими величинами у системі шокового заморожування.

1.2 Технологічне обладнання систем швидкої заморозки

Технологічне обладнання систем швидкої заморозки формується як комплекс взаємопов'язаних теплотехнічних, холодильних та керуючих елементів, спільна робота яких забезпечує реалізацію процесу інтенсивного охолодження харчової продукції до температури тривалого зберігання. Конструктивна побудова таких систем визначається необхідністю створення стабільного температурного середовища, забезпечення інтенсивного теплообміну та підтримання заданих параметрів холодильного циклу в умовах змінного теплового навантаження.

Основним технологічним вузлом установки є камера швидкої заморозки, яка являє собою теплоізований робочий об'єм із герметичною конструкцією та мінімальними тепловими втратами через огорожувальні поверхні. У середині камери розміщується продукція, що підлягає заморожуванню, а також випарний теплообмінник і система циркуляції повітря. Теплоізоляційні властивості конструкції мають принципове значення, оскільки навіть незначні втрати холоду призводять до зростання енергетичного навантаження на холодильну систему та збільшення тривалості технологічного циклу.

У межах камери основним теплообмінним елементом виступає випарник, через який проходить холодоагент у фазі кипіння. Саме в цьому вузлі відбувається відбір теплоти від повітряного середовища, яке в подальшому контактує з поверхнею продукту. Ефективність роботи випарника визначається

					ДП.АКІТ.11149121.00.00.000ПЗ	Арк.
						13
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

площею теплообмінної поверхні, температурою кипіння холодоагенту та станом оребрення теплообмінника. У процесі тривалої експлуатації на поверхні випарника формується шар інею, що знижує коефіцієнт теплопередачі та потребує реалізації автоматизованого циклу відтайки.

Система циркуляції повітря формується вентиляторами, які забезпечують примусове переміщення охолодженого повітря через випарник та рівномірний розподіл температурного поля в межах робочого об'єму. Завдяки створенню стабільного аеродинамічного потоку підвищується коефіцієнт конвективного теплообміну між поверхнею продукту та охолоджувальним середовищем. У сучасних установках швидкість обертання вентиляторів може змінюватися за допомогою частотного регулювання, що дозволяє адаптувати інтенсивність теплообміну до окремих фаз технологічного циклу.

Холодильний контур установки включає компресор, конденсатор, ресивер, фільтрувальні елементи та розширювальний пристрій. Компресор виконує функцію стискання холодоагенту та формування необхідного перепаду тиску для циркуляції в системі. Його режим роботи безпосередньо впливає на холодопродуктивність установки, тому компресор є одним із ключових об'єктів автоматичного керування. Після стискання холодоагент надходить до конденсатора, де віддає тепло в навколишнє середовище та переходить у рідкий стан. Далі через електронний розширювальний клапан або інший регулювальний орган холодоагент подається у випарник, де відбувається його дроселювання та кипіння.

Важливою складовою системи є вузол відтайки випарника, який забезпечує періодичне видалення льоду з поверхні теплообмінника. У промислових установках можуть застосовуватись електричні нагрівальні елементи або система гарячого газу. Автоматизоване керування цим вузлом дозволяє своєчасно відновлювати ефективність теплообміну без суттєвого порушення технологічного режиму заморожування.

Для забезпечення контролю технологічних параметрів система оснащується вимірювальними засобами, що охоплюють датчики температури повітря в камері, температури ядра продукту, датчики тиску в магістралях холодильного контуру,

					ДП.АКІТ.11149121.00.00.000ПЗ	Арк.
						14
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

а також допоміжні сенсори стану дверей, вентиляторів та вологості середовища. Інформація від цих елементів надходить до програмованого логічного контролера, який виконує функції аналізу поточного стану системи, формування керуючих сигналів і реалізації алгоритмів регулювання.

Програмований логічний контролер є центральним елементом автоматизованої системи керування, оскільки саме в ньому реалізується логіка функціонування установки. На основі сигналів від датчиків контролер формує команди на запуск компресора, регулювання положення клапана, керування вентиляторами та включення циклу відтайки. Верхній рівень системи представлений операторською панеллю та SCADA-середовищем, які забезпечують візуалізацію параметрів, зміну уставок, архівування технологічної інформації та реєстрацію аварійних станів.

Таким чином, технологічне обладнання систем швидкої заморозки являє собою інтегровану технічну систему, в якій холодильні елементи, вимірювальні пристрої та програмно-керуючі засоби функціонують як єдиний комплекс. Саме така побудова забезпечує стабільність технологічного процесу, високу якість замороженої продукції та можливість ефективної автоматизації виробництва.

1.3 Існуючі системи швидкої заморозки

Камерні системи швидкої заморозки є одним із найпоширеніших технологічних рішень у підприємствах харчової промисловості. Принцип їх роботи ґрунтується на інтенсивному охолодженні продукції потоком холодного повітря, яке циркулює через випарник холодильного агрегату. Повітря, охолоджене до температури приблизно $-30 \dots -40$ °С, подається вентиляторами у робочий об'єм камери, де відбувається відведення теплоти від поверхні продукту(рисунок 1.3).

					ДП.АКІТ.11149121.00.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		15



Рисунок 1.3 - Камерна система шоквої заморозки (Blast Freezer)

Головною перевагою камерних систем є універсальність застосування, оскільки вони дозволяють заморожувати різні види продукції — м'ясо, рибу, овочі, напівфабрикати та готові страви. Продукція розміщується на стелажах або спеціальних візках, що забезпечує зручність завантаження та вивантаження. Інтенсивна циркуляція повітря забезпечує рівномірність температурного поля та скорочує тривалість проходження критичної зони кристалізації.

У сучасних установках даного типу широко застосовуються автоматизовані системи керування на базі PLC-контролерів, які забезпечують підтримання температури, керування компресорами, вентиляторами та системами відтайки. Завдяки датчикам температури та тиску система може автоматично регулювати режим роботи обладнання та забезпечувати відповідність вимогам стандартів безпеки харчових продуктів.

Недоліком камерних систем є обмежена продуктивність у порівнянні з безперервними технологічними лініями, а також необхідність періодичного відкривання камери для завантаження продукції, що може спричиняти додаткові теплові втрати.

Тунельна система швидкої заморозки (IQF – Individual Quick Freezing) часто застосовуються в галузі. Тунельні установки швидкої заморозки застосовуються у високопродуктивних харчових виробництвах, де необхідна безперервна обробка значних обсягів продукції. У таких системах продукт

					ДП.АКІТ.11149121.00.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		16

переміщується через морозильний тунель на конвеєрній стрічці, тоді як охолоджене повітря з високою швидкістю подається через випарники, що створює інтенсивний теплообмін.

Процес заморожування в тунелі має більш складну структуру керування, оскільки необхідно синхронізувати роботу холодильного обладнання з рухом транспортної системи. Технологічний цикл включає контроль температури повітря, швидкості конвеєра та часу перебування продукції у зоні охолодження.

Автоматизація таких установок зазвичай базується на системах PLC/SCADA, які виконують регулювання температури, керування циклами охолодження та відтайки, а також здійснюють моніторинг стану обладнання. У наукових дослідженнях зазначається, що система керування тунельною морозильною установкою повинна поєднувати температурне регулювання з часовим керуванням технологічного циклу, що забезпечує оптимальну тривалість заморожування для конкретного типу продукції.

Основною перевагою тунельних систем є висока продуктивність і можливість інтеграції у потокові технологічні лінії. Разом з тим вони характеризуються складнішою конструкцією та більш високими вимогами до автоматизованого керування.



Рисунок 1.4 - Спіральна система заморозки (Spiral Freezer)

Спіральні морозильні установки є сучасним різновидом безперервних систем швидкої заморозки, які широко використовуються у виробництві м'ясних напівфабрикатів, рибної продукції, хлібобулочних виробів та готових страв. У

					ДП.АКІТ.11149121.00.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		17

таких системах продукція переміщується по конвеєрній стрічці, що закручується у вигляді спіралі навколо вертикального барабана.

Подібна конструкція дозволяє значно збільшити довжину траєкторії руху продукту в обмеженому об'ємі камери, що забезпечує триваліший контакт із холодним повітрям та ефективне заморожування. Система циркуляції повітря в таких установках формує спрямований потік через теплообмінники, що дозволяє підтримувати стабільний температурний режим по всій висоті спіралі.

Керування спіральними морозильними установками здійснюється за допомогою PLC-контролерів та операторських панелей, які дозволяють задавати швидкість руху конвеєра, керувати режимами відтайки, регулювати роботу вентиляторів і здійснювати діагностику стану системи. Контролер також приймає сигнали від датчиків безпеки та формує аварійні повідомлення у разі порушення роботи обладнання.

Перевагою таких систем є висока компактність при значній продуктивності, проте вони характеризуються складнішою механічною конструкцією та більшою вартістю обладнання.



Рисунок 1.5 - Спіральні морозильні установки

Проведений аналіз існуючих технологічних рішень показує, що системи шокової заморозки можуть реалізовуватися у вигляді камерних, тунельних або спіральних установок, які відрізняються принципом організації

					ДП.АКІТ.11149121.00.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		18

процесу теплообміну, продуктивністю та рівнем автоматизації. Камерні установки є універсальними та відносно простими у реалізації, тунельні системи забезпечують безперервність технологічного процесу, а спіральні морозильні установки поєднують високу продуктивність із компактністю конструкції. У всіх розглянутих варіантах ключову роль відіграє автоматизована система керування, що забезпечує стабільність температурного режиму, оптимізацію енергоспоживання та підвищення якості замороженої продукції.

					ДП.АКІТ.11149121.00.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		19

2 РОЗРОБКА СХЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ШВИДКОЇ ЗАМОРОЗКИ

2.1 Принцип роботи типової схеми автоматизованої системи контролю швидкої заморозки

Типова схема автоматизованої системи контролю швидкої заморозки харчової продукції реалізує ієрархічну структуру керування, що охоплює польовий рівень вимірювання параметрів, рівень програмованого логічного контролера та рівень диспетчеризації й візуалізації. Принцип її роботи ґрунтується на безперервному вимірюванні технологічних параметрів процесу, їх обробці в контролері та формуванні керуючих впливів на виконавчі механізми з метою підтримання заданих температурних і тискових режимів.

На польовому рівні встановлюються датчики температури повітря в камері, температури ядра продукту, тиску всмоктування та нагнітання в холодильному контурі, відносної вологості, а також дискретні датчики стану дверей і зворотного зв'язку вентиляторів. Ці вимірювальні пристрої формують аналогові та дискретні сигнали, які надходять на входи програмованого логічного контролера. Таким чином забезпечується отримання об'єктивної інформації про поточний стан технологічного процесу та холодильного обладнання[3].

У контролері реалізуються алгоритми регулювання та логіки керування. Основним контуром є регулювання температури повітря в камері, яке здійснюється шляхом керування компресором, електронним розширювальним клапаном та вентиляторами випарника. Порівняння поточного значення температури з уставкою дозволяє формувати керуючий сигнал відповідно до заданого алгоритму, зокрема пропорційно-інтегрально-диференційного регулювання або ступінчастого керування. Додатково реалізується контроль температури ядра продукту, що визначає завершення фази інтенсивної заморозки та перехід у режим стабілізації або зберігання.

					ДП.АКІТ.11149121.00.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		20

Паралельно функціонує контур захисту за тиском, у межах якого аналізуються показники датчиків всмоктування та нагнітання. У разі перевищення допустимих меж формуються сигнали блокування компресора та індикації аварії. Аналогічним чином здійснюється контроль справності датчиків, роботи вентиляторів і стану дверей камери. Це забезпечує підвищення надійності експлуатації та запобігає пошкодженню обладнання.

Окремий алгоритм реалізує цикл відтайки випарника. Контролер, на підставі часових інтервалів або температурних критеріїв, ініціює включення нагрівальних елементів або подачу гарячого газу, тимчасово відключаючи компресор та вентилятори відповідно до заданої послідовності. Після завершення відтайки система повертається до основного режиму заморожування[4].

На верхньому рівні система HMI та SCADA забезпечує відображення технологічних параметрів у режимі реального часу, введення уставок, вибір режимів роботи та архівування даних. Передача інформації між контролером і диспетчерським рівнем здійснюється через стандартні промислові протоколи зв'язку. Це дозволяє здійснювати моніторинг процесу, аналізувати динаміку температурних режимів, формувати звіти та забезпечувати простежуваність виробничих циклів.

Таким чином, принцип роботи типової автоматизованої схеми(рис.1) швидкої заморозки полягає у замкненому циклі вимірювання, обробки та керування, що забезпечує стабільність технологічних параметрів, оптимізацію енергоспоживання та дотримання вимог безпеки й якості харчової продукції.

На схемі (рисунок 2.1) автоматичної системи шокового заморожування використано умовні позначення, що відображають функціональне призначення елементів системи відповідно до загальноприйнятої практики автоматизації технологічних процесів. Центральним елементом об'єкта керування є камера шокового заморожування, в межах якої розміщено випарник із вентиляторамі циркуляції повітря та технологічний простір для розміщення продукції. Цей вузол є безпосереднім об'єктом регулювання, оскільки саме в ньому формується необхідний температурний режим[5].

					ДП.АКІТ.11149121.00.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		21

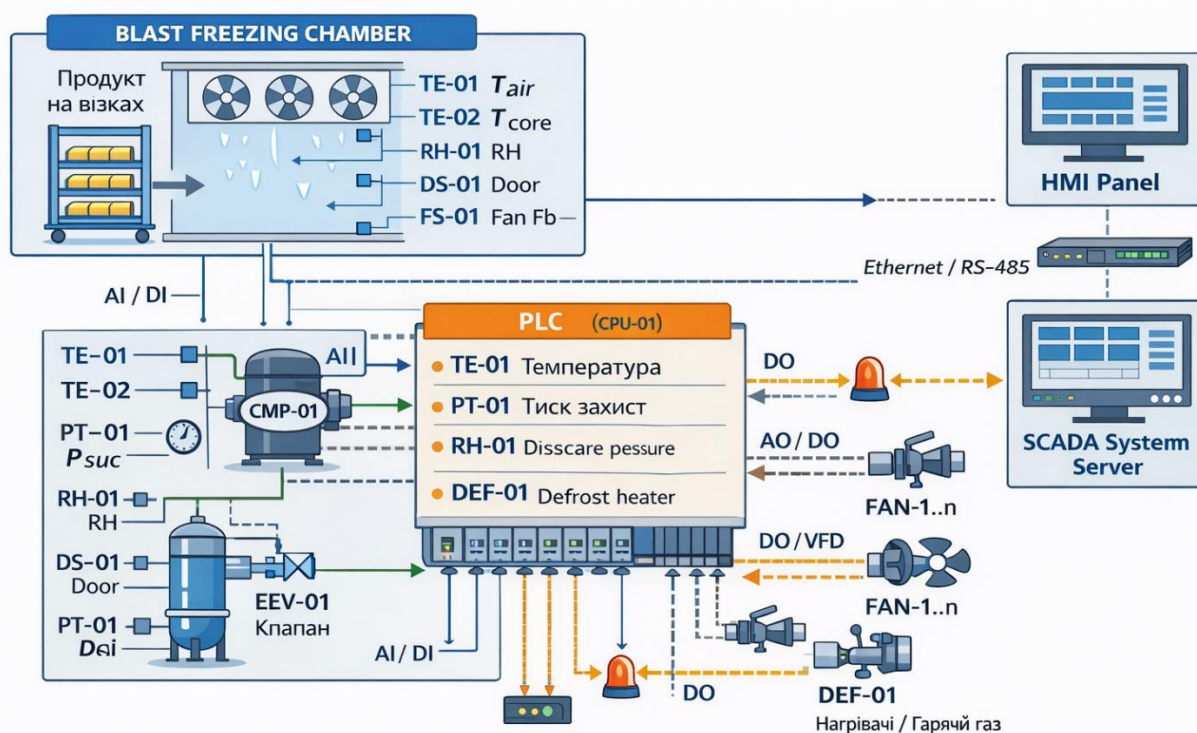


Рисунок 2.1 – Схема автоматичної системи шокowego заморожування

Позначення TE-01 використовується для ідентифікації датчика температури повітря в камері, який формує аналоговий сигнал, пропорційний поточному значенню температури. Позначення TE-02 відповідає датчику температури ядра продукту, що дозволяє контролювати внутрішній тепловий стан продукції та визначати момент завершення фази інтенсивного заморожування. Маркування PT-01 і PT-02 застосовується для датчиків тиску у всмоктувальній та нагнітальній лініях холодильного контуру відповідно, що забезпечує контроль робочих параметрів компресорної установки. Позначення RH-01 використовується для датчика відносної вологості повітря в камері, тоді як DS-01 ідентифікує дискретний датчик стану дверей, а FS-01 — сигнал зворотного зв'язку від вентиляторів.

Компресор холодильного контуру позначено як CMP-01, що вказує на його приналежність до першого агрегату системи стиснення холодоагенту. Електронний розширювальний клапан має позначення EEV-01 і виконує функцію дозування холодоагенту перед випарником. Вузол відтайки позначається як DEF-

01 і охоплює нагрівальні елементи або систему подачі гарячого газу, призначені для видалення інію з поверхні теплообмінника.

Програмований логічний контролер позначено як PLC (CPU-01), що відображає його роль як центрального керуючого пристрою системи. У його структурі реалізуються функціональні блоки керування, зокрема температурний регулятор, що може позначатися як ТІС-01, та контур контролю тиску, який відповідає позначенню РІС-01. Логіка керування режимами роботи, включаючи попереднє охолодження, інтенсивне заморожування та режим зберігання, реалізується програмними модулями контролера.

Позначення АІ та ДІ застосовуються для ідентифікації аналогових і дискретних входів контролера, через які надходять сигнали від датчиків, тоді як АО та ДО використовуються для позначення аналогових і дискретних виходів, що формують керуючі впливи на виконавчі механізми. На верхньому рівні системи розміщено HMI-панель та SCADA-сервер, які забезпечують візуалізацію параметрів, введення уставок та архівування даних.

Таким чином, система позначень на схемі відображає функціональну структуру автоматизованої системи керування шоким заморожуванням, дозволяючи чітко ідентифікувати вимірювальні, керуючі та виконавчі елементи, а також їх взаємозв'язки в межах

2.2 Побудова автоматизованої системи контролю

Побудова схеми автоматизованої системи контролю швидкої заморозки здійснюється на основі аналізу технологічного процесу як об'єкта керування, визначення контрольованих параметрів, формування контурів регулювання та інтеграції апаратних і програмних засобів у єдину ієрархічну структуру. Основною передумовою розроблення схеми є встановлення причинно-наслідкових зв'язків між зміною температури в камері, параметрами холодильного контуру та станом продукції, що дозволяє сформувати адекватну модель керування.

					ДП.АКІТ.11149121.00.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		23

На першому етапі визначається структура об'єкта контролю, до складу якого входять камера швидкої заморозки, випарник із системою циркуляції повітря, компресорна частина холодильного контуру, розширювальний пристрій та вузол відтайки. Для кожного з цих елементів встановлюються параметри, що підлягають вимірюванню та регулюванню. Ключовими величинами є температура повітря в камері, температура ядра продукту, тиск у всмоктувальній і нагнітальній магістралях, а також допоміжні параметри, пов'язані з безпекою експлуатації.

На другому етапі формується польовий рівень системи, який охоплює вимірювальні перетворювачі та виконавчі механізми. Датчики температури, тиску, вологості та дискретні сенсори стану формують інформаційний потік до програмованого логічного контролера. Виконавчі елементи, зокрема компресор, електронний розширювальний клапан, вентилятори та нагрівальні пристрої відтайки, реалізують керуючі впливи, сформовані системою управління. На схемі ці зв'язки відображаються через канали аналогових і дискретних сигналів, що забезпечують замкненість контурів регулювання. Схема автоматизованої системи контролю приведена на рисунку 2.2.

Наступним етапом є побудова рівня керування, центром якого виступає програмований логічний контролер. У його структурі реалізуються алгоритми регулювання температури повітря в камері, логіка перемикання режимів роботи та захисні функції. Температурний контур регулювання базується на порівнянні виміряного значення з уставкою та формуванні відповідного керуючого сигналу для компресора й регулювального клапана. Паралельно здійснюється контроль граничних значень тиску, що дозволяє реалізувати функції аварійного блокування. У межах програмної реалізації передбачаються механізми діагностики відмов датчиків та контроль справності виконавчих пристроїв.

Завершальним етапом побудови є інтеграція системи в інформаційне середовище підприємства через рівень візуалізації та диспетчеризації. НМІ-панель забезпечує локальне керування та відображення параметрів, тоді як SCADA-система реалізує архівування даних, формування звітів та віддалений моніторинг. На схемі цей рівень відображається як окремий функціональний

					ДП.АКІТ.11149121.00.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		24

блок, пов'язаний із контролером каналами промислового зв'язку.

Таким чином, побудова схеми автоматизованої системи контролю швидкої заморозки полягає у послідовному формуванні багаторівневої структури, що об'єднує вимірювальні засоби, виконавчі механізми, програмні алгоритми та інформаційні підсистеми. Отримана схема відображає функціональні зв'язки між елементами системи та забезпечує основу для подальшої реалізації програмного забезпечення, налаштування регуляторів і проведення техніко-економічного аналізу ефективності впровадження.

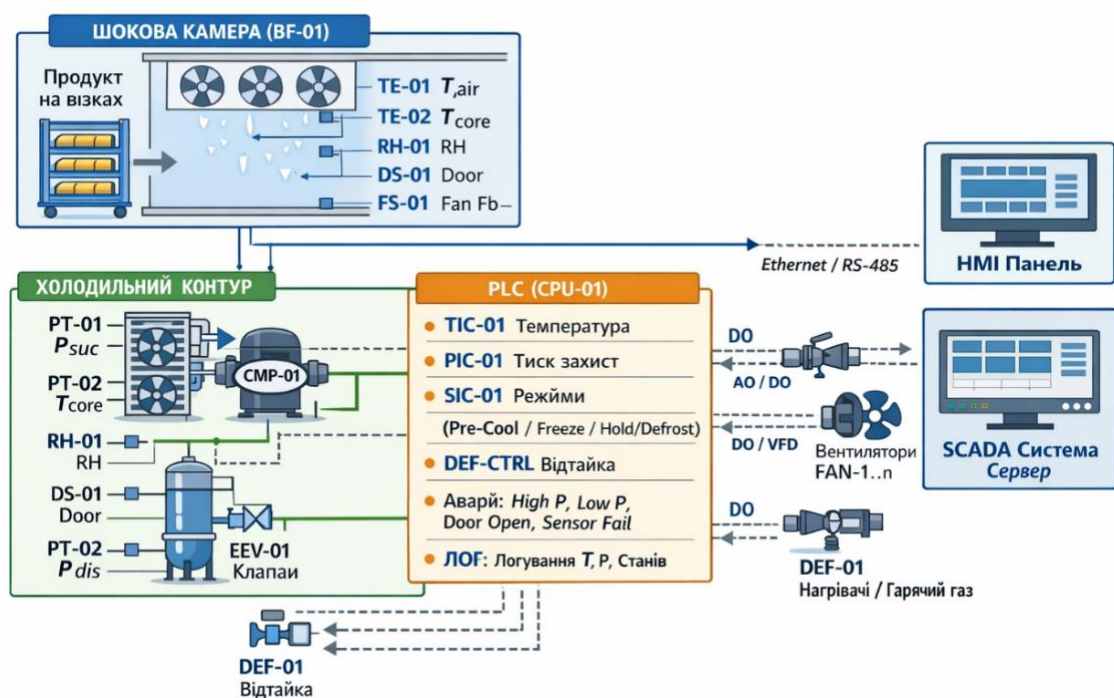


Рисунок 2.2 – Схема автоматизованої системи контролю шокового заморожування

Камера шокової заморозки BF-01 - це технологічний об'єкт керування, у якому відбувається інтенсивний теплообмін між продуктом і холодним повітрям. Всередині розміщуються візки/лотки з продукцією, а також випарник і вентилятори, що формують циркуляцію та рівномірність температурного поля.

Випарник EV-01 - теплообмінник, у якому холодоагент кипить і відбирає тепло з повітря камери. Стан випарника впливає на швидкість заморозки та на стабільність температури; обмерзання випарника прямо погіршує теплообмін,

тому вузол пов'язаний із циклом відтайки.

Вентилятори FAN-1...n (можливо з VFD) забезпечують примусову циркуляцію повітря через випарник і по об'єму камери. У системі автоматизації можуть керуватись дискретно (ON/OFF) або плавно через частотний перетворювач (VFD), що дає можливість адаптувати швидкість потоку під режим (pre-cool / freeze / hold) і оптимізувати енергоспоживання.

TE-01 вимірює температуру повітря в камері (основна керована величина для контуру регулювання). TE-02 вимірює температуру ядра продукту (критерій технологічної готовності — досягнення, наприклад, -18°C у центрі). Сукупно вони дозволяють розділяти “керування середовищем” і “контроль якості заморожування продукту”.

PT-01 контролює тиск всмоктування (P_{suc}), PT-02 — тиск нагнітання (P_{dis}) в холодильному контурі. Їх призначення — забезпечення безпечної роботи компресора і коректного режиму холодопродуктивності; ці сигнали використовуються для захистів (аварійних відключень) і, за потреби, для оптимізації циклів.

Датчик вологості RH-01 (опційно) вимірює відносну вологість у камері. У практиці може застосовуватись для оцінки умов обмерзання/усушки, а також як допоміжний параметр у звітності та контролі технологічного середовища.

Дискретний сенсор стану дверей (відкрито/закрито). Використовується для блокувань (наприклад, зупинка вентиляторів при відкритті), формування подій/аварій та контролю дисципліни технологічного процесу (вплив на температуру та енерговитрати).

Сигнал підтвердження фактичної роботи вентиляторів (тахосигнал/контакт/стан VFD) дозволяє виявляти відмови, обриви, клин, некоректний запуск і переводити систему в безпечний режим.

Компресор CMP-01, стискає холодоагент і формує необхідний перепад тисків для циклу. У системі керування може працювати ступінчасто або з частотним регулюванням; основні задачі АСУ ТП тут — стабільність режиму, захист по тиску/температурі/частоті пусків та ресурсозбереження.

Конденсатор CD-01 / відведення тепла, відводить тепло в навколишнє

					ДП.АКІТ.11149121.00.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		26

середовище. У реальних установках може мати вентилятори або водяне охолодження; параметри конденсації сильно впливають на COP і енергоспоживання.

Ресивер REC-01 та вузли підготовки (фільтр, оглядове скло), формують запас і стабілізацію подачі рідкого холодоагенту до розширювального органу, а також забезпечують діагностику стану контуру (наявність бульбашок, волога, забруднення).

Електронний розширювальний клапан EEV-01 (або соленоїд/TPV), дозує холодоагент у випарник. У PLC-логіці може керуватись як аналогово/імпульсно (AO/DO) і використовується для забезпечення стабільного кипіння та запобігання “заливанню” компресора.

Відтайка DEF-01 (нагрівачі або гарячий газ), вузол, який усуває обмерзання випарника. Алгоритм відтайки в PLC зазвичай має послідовність блокувань (вентилятори/компресор), контроль завершення (температурний/часовий) і фазу повернення до заморозки.

PLC (CPU-01) + модулі вводу/виводу, це центральний керуючий пристрій, який приймає сигнали AI/DI від датчиків та формує AO/DO на виконавчі механізми. Тут реалізуються контури регулювання (наприклад ТІС для температури), логіка режимів (SIC), захисти (PIC/аварійні умови) і ведення журналів.

Температурний контур забезпечує підтримання заданої температури повітря в камері і потрібної інтенсивності теплообміну; контур захисту по тиску забезпечує відключення/обмеження режимів при небезпечних станах; модуль керування відтайкою формує цикл очищення випарника та відновлення режиму заморозки.

HMI панель - локальний інтерфейс оператора для запуску/зупинки, вибору режимів, введення уставок, перегляду станів і аварій. Зазвичай містить екрани “Огляд”, “Режими”, “Аварії”, “Тренди”.

SCADA сервер - реалізує верхній рівень диспетчеризації: архівування параметрів, тренди, журнали подій, формування звітів (у т.ч. технологічних/контрольних), віддалений доступ і централізоване керування,

					ДП.АКІТ.11149121.00.00.000ПЗ	Арк.
						27
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

якщо на підприємстві кілька камер/ліній.

2.3 Схема управління для шокової морозилки

Промислова мережа між PLC та HMI/SCADA (Modbus RTU/TCP, Profinet, EtherNet/IP тощо). Забезпечує передачу даних у реальному часі та синхронізацію станів. Запропонована схема управління для шокової морозилки приведена на рисунку 2.3.

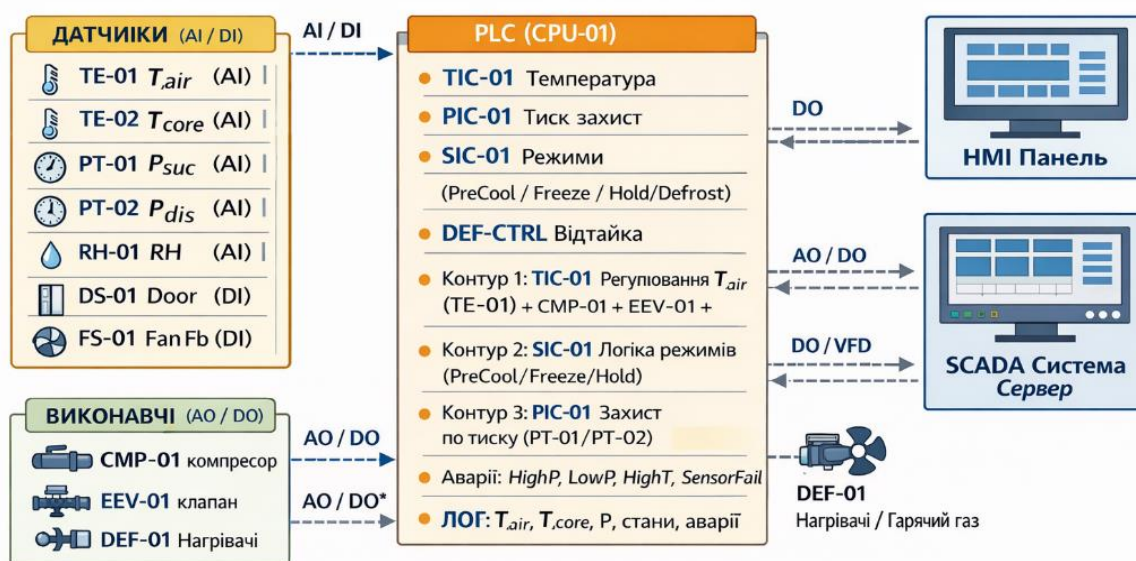


Рисунок 2.3 - Схема управління для шокової морозилки

Схема управління шоковою морозильною установкою формується як багаторівнева система автоматичного регулювання, що забезпечує підтримання заданих температурних режимів у камері заморожування та контроль параметрів холодильного контуру в умовах змінного теплового навантаження. Її структурна організація ґрунтується на принципі замкненого керування, за якого вимірювані технологічні параметри безперервно порівнюються з установленими значеннями, а сформовані відхилення використовуються для генерування керуючих впливів на виконавчі механізми.

Об'єктом керування є камера шокової заморозки з розміщеним у ній випарником і системою примусової циркуляції повітря. Керованою величиною виступає температура повітря в робочому об'ємі камери, яка визначає

інтенсивність тепловідведення від продукту. Вимірювання температури здійснюється датчиком, сигнал з якого надходить до програмованого логічного контролера. У контролері реалізується алгоритм регулювання, який формує вплив на компресорну установку та регулювальний орган подачі холодоагенту. У разі використання частотно-керованих вентиляторів додатково здійснюється регулювання швидкості повітряного потоку для забезпечення рівномірності температурного поля та оптимізації енергоспоживання.

Особливістю схеми управління є врахування температури ядра продукту як технологічного критерію завершення процесу. Показники цього датчика використовуються не для безпосереднього регулювання холодопродуктивності, а для визначення фази технологічного циклу та переходу між режимами попереднього охолодження, інтенсивної заморозки та стабілізації. Таким чином реалізується ієрархічний принцип керування, за якого контур підтримання температури повітря функціонує у межах загальної логіки технологічного процесу.

У холодильному контурі здійснюється контроль тисків у всмоктувальній та нагнітальній магістралях, що забезпечує захист компресора від роботи в недопустимих режимах. У разі перевищення граничних значень формується сигнал аварійного блокування з відключенням відповідних виконавчих механізмів. Такий підхід дозволяє поєднати функції регулювання та функції безпеки в межах єдиної системи управління.

Окремий алгоритмічний модуль реалізує цикл відтайки випарника, який періодично активується для усунення льодоутворення на теплообмінних поверхнях. Під час відтайки здійснюється тимчасова зміна конфігурації керування з відключенням компресора та вентиляторів відповідно до технологічної послідовності. Після завершення циклу система автоматично повертається до режиму заморожування.

Верхній рівень управління представлений системою візуалізації, яка забезпечує відображення параметрів у реальному часі, введення уставок та реєстрацію історії процесу. Обмін даними між рівнями здійснюється через промислові комунікаційні інтерфейси, що забезпечує цілісність інформаційного

					ДП.АКІТ.11149121.00.00.000ПЗ	Арк.
						29
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

простору та можливість інтеграції установки в загальну систему керування підприємства.

Таким чином, схема управління шоковою морозильною установкою являє собою функціонально завершену автоматизовану систему, у якій поєднуються контури регулювання температури, логіка технологічних режимів, захисні механізми та засоби інформаційного контролю. Реалізація такої структури забезпечує стабільність процесу заморожування, збереження якості продукції та ефективну експлуатацію холодильного обладнання.

2.4 Обґрунтування вибору технічних засобів автоматизації

Датчики температури є одним із ключових елементів системи автоматичного контролю шокової заморозки. Найбільш поширеними у промислових холодильних установках є платинові термоперетворювачі опору типу РТ100, які характеризуються високою точністю, стабільністю показників та широким діапазоном вимірювання температур.

Основним призначенням температурного датчика є вимірювання температури повітря у морозильній камері, а також температури всередині продукту, що заморожується. Отримані дані передаються до контролера системи керування, де вони використовуються для формування сигналу зворотного зв'язку та подальшого регулювання режиму роботи холодильного обладнання.

У системах шокової заморозки зазвичай використовують декілька датчиків температури (рисунок 2.4):

- датчик температури повітря в камері;
- датчик температури випарника;
- датчик температури ядра продукту.

Завдяки цим вимірюванням контролер може визначити момент завершення процесу заморожування та оптимізувати енергоспоживання системи.

					ДП.АКІТ.11149121.00.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		30

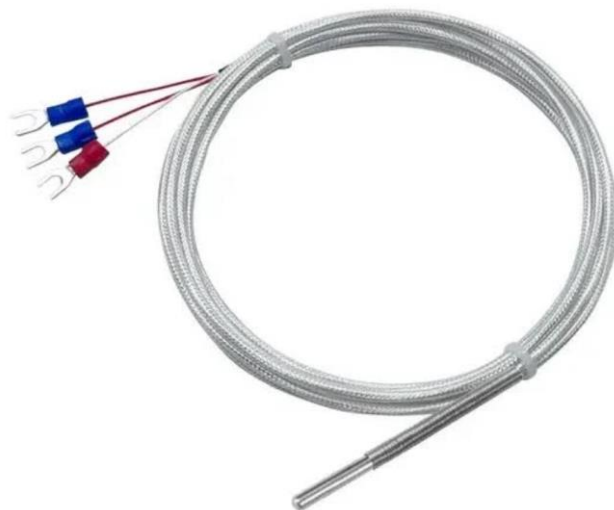


Рисунок 2.4 - Датчик температури (PT100)

Програмований логічний контролер є центральним елементом системи керування шоковою морозильною установкою. Він виконує функцію обробки сигналів від датчиків, реалізації алгоритмів керування та формування команд для виконавчих механізмів.

Контролер отримує інформацію від датчиків температури, тиску, стану дверей камери та інших технологічних параметрів. На основі цих даних у контролері реалізується алгоритм керування, який визначає режим роботи компресора, вентиляторів, електронного розширювального клапана та системи відтаювання.

PLC забезпечує виконання таких функцій:

- підтримання заданої температури у морозильній камері;
- контроль параметрів холодильного контуру;
- керування режимами заморожування;
- аварійний захист обладнання;
- обмін даними із системою диспетчеризації.

Використання PLC (рисунок 2.5) значно підвищує надійність та гнучкість системи керування технологічним процесом.

					ДП.АКІТ.11149121.00.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		31



Рисунок 2.5 - Програмований логічний контролер (PLC)

Датчики тиску (рисунок 2.6) використовуються для контролю параметрів холодильного контуру. У системах шокової заморозки важливо контролювати:

- тиск на стороні всмоктування компресора;
- тиск на стороні нагнітання;
- тиск холодоагенту після конденсатора.

Отримані значення використовуються контролером для визначення ефективності роботи холодильного циклу та забезпечення безпечної експлуатації установки. У разі перевищення допустимих значень тиску система може автоматично відключити компресор або перевести установку в аварійний режим.

Крім функції захисту обладнання, дані з датчиків тиску дозволяють оптимізувати роботу системи та підвищити її енергоефективність.



Рисунок 2.6 - Датчик тиску холодоагенту

					ДП.АКІТ.11149121.00.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		32

Панель оператора (HMI — Human Machine Interface) призначена для взаємодії оператора з автоматизованою системою керування. За допомогою панелі оператор може контролювати технологічний процес та задавати необхідні параметри роботи системи.

На екрані панелі відображаються основні параметри процесу:

- температура камери;
- температура продукту;
- тиск холодоагенту;
- стан компресора;
- стан вентиляторів;
- режим роботи системи.

Крім функції моніторингу, панель оператора (рисунок 2.7) дозволяє задавати технологічні програми заморожування для різних типів продукції, запускати або зупиняти процес заморожування, а також переглядати повідомлення про аварійні ситуації.



Рисунок 2.7 - Панель оператора (HMI)

У системі швидкої заморозки контроль вологості є важливим, оскільки надмірна вологість призводить до інтенсивного обмерзання випарника. Датчик вологості (рисунок 2.8) дозволяє контролювати психрометричний стан повітря у морозильній камері та оптимізувати цикли відтаювання.

Типовий промисловий приклад: Danfoss HMM humidity transmitter

					ДП.АКІТ.11149121.00.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		33



Рисунок 2.8 - Датчик вологості повітря

Частотний перетворювач (рисунок 2.9) потрібний для плавного керування швидкістю вентиляторів випарника. Це дозволяє:

- змінювати інтенсивність повітряного потоку;
- зменшувати енергоспоживання;
- уникати теплових ударів для продукту.

Типовий варіант: Siemens SINAMICS V20



Рисунок 2.9 - Частотний перетворювач для вентиляторів

Електронний розширювальний клапан (рисунок 2.10) регулює подачу холодоагенту до випарника.

Його функція:

					ДП.АКІТ.11149121.00.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		34

- стабілізація температури випаровування;
- підвищення ефективності холодильного циклу;
- підтримання оптимального перегріву.

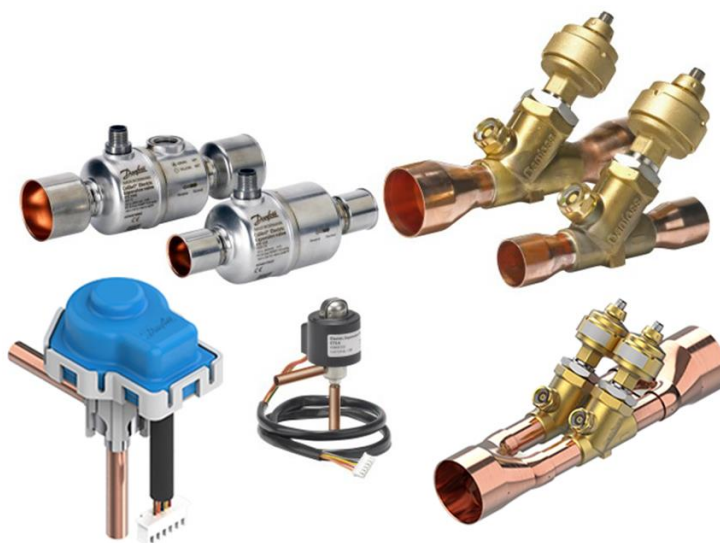


Рисунок 2.10 - Електронний розширювальний клапан

Типовий компонент для зв'язку : Danfoss ETS 6

GSM / Ethernet модуль для SCADA (рисунок 2.11) Дає можливість:

- віддаленого моніторингу;
- журналювання;
- аварійних повідомлень.

Типовий варіант: Siemens LOGO! CMR2020



Рисунок 2.11 - GSM / Ethernet модуль для SCADA

					ДП.АКІТ.11149121.00.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		35

У побудованій функціональній схемі, що на рисунку 2.12, центральним елементом є PLC, а також верхній рівень HMI / Ethernet-GSM / диспетчеризація. Саме в ці вузли і вбудовується програмна частина. Програмне забезпечення відповідає логіці керуючого рівня і може бути реалізоване у двох варіантах



Рисунок 2.12 – Типова функціональна схема

Створена програма використовується як верхній програмний рівень, тобто як HMI/SCADA-подібний застосунок. Безпосереднє низькорівневе керування виконує PLC, а розроблена програма забезпечує відображення параметрів, введення уставок, вибір програм заморозки, журналювання, збереження рецептів у JSON та віддалений моніторинг. Вона підключається до PLC через Ethernet/IP

Датчики температури, вологості й тиску передають сигнали на PLC. PLC обробляє ці сигнали згідно з логікою програми та формує команди на компресор, частотний перетворювач вентиляторів, електронний розширювальний клапан, соленоїдний клапан і систему відтаювання. HMI-вікно, яке було реалізоване на Python, підключене до цього PLC як операторський інтерфейс. Тобто сама програма в схемі буде розташована між оператором і контролером, а частина її логіки продубльована або перенесена у PLC.

3. РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ ШОКОВОЇ ЗАМОРОЗКИ

3.1 Модель об'єкта керування

Система шоккової заморозки з позицій класичної теорії автоматичного управління розглядається як динамічний об'єкт із замкненим контуром регулювання, у якому основною керованою величиною є температура повітря в робочому об'ємі морозильної камери, а технологічно значущою вихідною координатою — температура в центрі продукту. Метою керування є забезпечення заданого температурного режиму заморожування при наявності змінних теплових навантажень, інерційності теплообміну та зовнішніх збурень.

У найпростішому наближенні об'єкт керування може бути представлений як тепловий апарат із зосередженими параметрами, в якому зміна температури в камері визначається балансом між холодопродуктивністю холодильного контуру та сумарним тепловим припливом від продукту, огорожувальних конструкцій, зовнішнього середовища і експлуатаційних впливів. У такому разі динаміка температури камери може бути описана рівнянням першого порядку

$$T \frac{d\theta(t)}{dt} + \theta(t) = ku(t) + f(t),$$

де $\theta(t)$ — відхилення температури повітря в камері від усталеного значення, $u(t)$ — керуючий вплив, пов'язаний із продуктивністю холодильної системи, $f(t)$ — узагальнений збурюючий вплив, T — стала часу об'єкта, k — коефіцієнт передачі.

У операторній формі передавальна функція об'єкта набуває вигляду

$$W_0(s) = \frac{\Theta(s)}{U(s)} = \frac{k}{Ts + 1}.$$

Однак для реальної системи шоккової заморозки така модель є спрощеною, оскільки процес характеризується наявністю транспортного запізнення, пов'язаного з інерційністю теплообміну між випарником, повітряним

					ДП.АКІТ.11149121.00.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		37

середовищем і продукцією. Тому більш адекватною є модель типу інерційної ланки із запізненням

$$W_0(s) = \frac{ke^{-\tau s}}{Ts + 1},$$

де τ — час запізнення, який відображає затримку реакції температури камери на зміну керуючого впливу.

У структурі класичної системи автоматичного регулювання задавальний вплив $r(t)$ відповідає заданій температурі в камері, вимірювальний елемент формує сигнал зворотного зв'язку $y(t)$, а регулятор виробляє керуючу дію на виконавчі механізми холодильного контуру. Похибка регулювання визначається різницею

$$e(t) = r(t) - y(t).$$

Саме на основі цієї похибки формується сигнал керування. У більшості технічних рішень для температурних процесів застосовується ПІ або ПІД-регулятор. Його закон у часовій області має вигляд

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

де K_p — коефіцієнт пропорційної складової, K_i — коефіцієнт інтегральної складової, K_d — коефіцієнт диференціальної складової.

У операторній формі передавальна функція ПІД-регулятора записується як

$$W_r(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s.$$

Для теплових об'єктів, до яких належить і камера шокової заморозки, на практиці часто достатньо ПІ-регулятора, оскільки диференціальна складова є чутливою до шумів вимірювання температури. У такому випадку

$$W_r(s) = K_p + \frac{K_i}{s}.$$

Замкнена система регулювання описується передавальною функцією

$$W_{cl}(s) = \frac{W_r(s)W_0(s)}{1 + W_r(s)W_0(s)W_m(s)},$$

					ДП.АКІТ.11149121.00.00.000ПЗ	Арк.
						38
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

де $W_m(s)$ — передавальна функція вимірювального каналу. Якщо датчик температури можна вважати безінерційним або малоінерційним, то приймають $W_m(s) \approx 1$. Тоді

$$W_{cl}(s) = \frac{W_r(s)W_o(s)}{1 + W_r(s)W_o(s)}.$$

З точки зору класичної ТАУ система шоквої заморозки належить до систем автоматичного регулювання із негативним зворотним зв'язком. Така структура забезпечує зменшення похибки при зміні навантаження та підвищує точність підтримання температурного режиму. Разом з тим об'єкт має суттєву інерційність і запізнення, що ускладнює забезпечення високої швидкодії без погіршення запасів стійкості.

Якщо розглядати не лише температуру повітря в камері, а й температуру ядра продукту, то система набуває двоконтурного або каскадного характеру. Внутрішній контур забезпечує стабілізацію температури повітря, тоді як зовнішній технологічний контур опосередковано контролює динаміку охолодження продукту. У такому разі температура ядра продукту може розглядатися як вихідна координата другого порядку, динаміка якої описується додатковою інерційною ланкою

$$W_p(s) = \frac{k_p}{T_p s + 1},$$

де T_p — теплова інерційність продукту, яка, як правило, значно перевищує інерційність повітряного середовища камери. Сукупна передавальна функція каналу від керуючої дії до температури ядра продукту тоді може бути представлена як послідовне з'єднання двох ланок:

$$W_{\Sigma}(s) = W_o(s) \cdot W_p(s),$$

Це означає, що повна система має вищий порядок, а її перехідний процес є більш повільним. Саме тому регулятор зазвичай налаштовується за температурою повітря в камері, а температура продукту використовується як критерій завершення циклу заморожування.

					ДП.АКІТ.11149121.00.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		39

Збуреннями в такій системі виступають маса і початкова температура продукту, частота відкривання дверей, температура зовнішнього середовища, обмерзання випарника, зміна інтенсивності повітряного потоку та коливання параметрів холодильного контуру. З позицій ТАУ ці фактори діють як зовнішні впливи на вхід або на стан об'єкта і викликають відхилення вихідної координати від заданого значення. Завдання системи автоматичного регулювання полягає у компенсації цих впливів із мінімальною статичною і динамічною похибкою.

Стійкість системи керування оцінюється за характеристичним рівнянням замкненої системи

$$1 + W_r(s)W_o(s) = 0.$$

Для аналізу стійкості та якості регулювання можуть застосовуватися критерії Гурвіца, Найквіста, Михайлова, а також часові показники якості перехідного процесу, зокрема час регулювання, перерегулювання та статична похибка. Для системи шокової заморозки важливо забезпечити аперіодичний або слабо коливальний характер перехідного процесу, оскільки температурні коливання негативно впливають на якість продукції та енергоефективність.

Отже, з позицій класичної теорії автоматичного управління система шокової заморозки може бути представлена як замкнена система автоматичного регулювання температури з негативним зворотним зв'язком, інерційним об'єктом керування та наявністю транспортного запізнення. Основу її математичної моделі становлять передавальні функції регулятора, холодильного контуру та теплового об'єкта, а метою синтезу є забезпечення стійкого й точного підтримання температурного режиму в умовах дії зовнішніх збурень і змінних технологічних навантажень.

Структурна схема системи автоматичного регулювання температури шокової морозильної установки формується відповідно до класичних принципів побудови замкнених систем керування та відображає взаємозв'язок між задавальним впливом, регулятором, виконавчими механізмами, об'єктом керування та каналом зворотного зв'язку. Основною метою такої системи є підтримання заданої температури повітря в робочому об'ємі морозильної камери

					ДП.АКІТ.11149121.00.00.000ПЗ	Арк.
						40
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

на рівні, необхідному для забезпечення інтенсивного та стабільного процесу швидкої заморозки харчової продукції.

У структурному відношенні система складається із задавального пристрою, який формує сигнал уставки температури, сумуючого елемента, у якому визначається похибка регулювання, регулятора, виконавчого органу, холодильної установки як силової частини, об'єкта керування у вигляді морозильної камери та вимірювального елемента, що забезпечує зворотний зв'язок за температурою. У класичному вигляді така система є одноконтурною системою автоматичного регулювання з негативним зворотним зв'язком.

На вхід системи подається задавальний сигнал $r(t)$, який відповідає бажаному значенню температури в камері заморожування. Цей сигнал надходить на суматор, де порівнюється з фактичним значенням температури $y(t)$, отриманим через канал зворотного зв'язку. У результаті формується сигнал похибки

$$e(t)=r(t)-y(t),$$

який надалі подається на вхід регулятора. Фізичний зміст цієї величини полягає у відображенні ступеня відхилення поточної температури від заданого значення. Саме вона є основою для формування коригувального керуючого впливу.

Регулятор у такій системі виконує функцію перетворення сигналу похибки у керуючий сигнал $u(t)$, який надходить на виконавчі пристрої холодильного контуру. Залежно від вимог до якості регулювання та характеру динаміки об'єкта, у схемі може використовуватися двопозиційний, пропорційно-інтегральний або пропорційно-інтегрально-диференціальний закон керування. Для теплових об'єктів, які мають значну інерційність і відносно повільну динаміку, доцільним є використання ПІ-регулятора, що забезпечує усунення статичної похибки без надмірної чутливості до шумів вимірювання. Передавальна функція такого регулятора описується виразом

$$W_r(s) = K_p + \frac{K_i}{s} .$$

Керуючий сигнал регулятора надходить до виконавчого механізму, функцію якого в системі шокової заморозки можуть виконувати компресор,

					ДП.АКІТ.11149121.00.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		41

електронний розширювальний клапан, система керування вентиляторами випарника або їх комбінація. У загальному випадку виконавчий орган перетворює електричний або цифровий сигнал регулятора на фізичний вплив, що змінює холодопродуктивність установки. Якщо врахувати динамічні властивості виконавчого механізму, його можна описати передавальною функцією першого порядку:

$$W_a(s) = \frac{k_a}{T_a s + 1},$$

де k_a є коефіцієнтом передачі виконавчої ланки, а T_a — її стала часу.

Після виконавчого механізму керуючий вплив передається на холодильний агрегат і морозильну камеру, які спільно утворюють об'єкт керування. У межах структурної схеми цей об'єкт розглядається як інерційна ланка з можливим транспортним запізненням, оскільки зміна режиму роботи компресора або клапана не призводить до миттєвої зміни температури повітря в камері. Інерційність обумовлена тепловою ємністю повітря, продукції, конструктивних елементів камери та динамікою процесу теплообміну. Тому об'єкт можна подати передавальною функцією виду:

$$W_a(s) = \frac{k_0 e^{-\tau s}}{T_0 s + 1},$$

де k_0 — коефіцієнт передачі об'єкта, T_0 — стала часу теплового процесу, а τ — час транспортного запізнення.

Вихідною координатою системи є температура повітря в камері, яка вимірюється датчиком температури. Вимірювальний елемент виконує функцію зворотного зв'язку, перетворюючи фізичну величину у сигнал, придатний для подальшого порівняння на вході системи. У більшості випадків динаміка вимірювального каналу є значно швидшою порівняно з динамікою теплового об'єкта, тому його передавальна функція може бути подана як безінерційна або близька до одиниці:

$$W_m(s) \approx 1.$$

Тоді замкнена передавальна функція системи автоматичного регулювання температури записується у вигляді

					ДП.АКІТ.11149121.00.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		42

$$W_{cl}(s) = \frac{W_r(s)W_aW_o(s)}{1 + W_r(s)W_a(s)W_o(s)W_m(s)}$$

Якщо врахувати, що $W_m(s) \approx 1$, то цей вираз спрощується до стандартної форми замкненої системи з негативним зворотним зв'язком.

Суттєвою особливістю шокової морозильної установки є наявність збурюючих впливів, які діють безпосередньо на об'єкт керування. До них належать теплота, внесена разом із продуктом, відкривання дверей камери, зміна температури навколишнього середовища, обмерзання випарника, нерівномірність циркуляції повітря та коливання параметрів холодоагенту. У структурній схемі ці впливи позначаються як збурюючий сигнал $f(t)$, що додається до входу або до виходу об'єкта. Саме наявність таких збурень зумовлює потребу у замкненій системі керування, здатній автоматично компенсувати їх дію.

Якщо у системі додатково використовується датчик температури ядра продукту, то структура САР може бути розширена до дворівневої або каскадної. У такому випадку внутрішній контур підтримує температуру повітря в камері, а зовнішній рівень контролює досягнення необхідної температури всередині продукту та визначає момент переходу між режимами попереднього охолодження, активної заморозки та стабілізації. Проте основний контур регулювання в класичному розумінні залишається одноконтурною системою стабілізації температури повітря.

Отже, структурна схема САР температури шокової морозильної установки, що на рисунку 3.1, являє собою замкнену систему автоматичного регулювання з негативним зворотним зв'язком, у якій регулятор формує керуючий вплив на холодильне обладнання на основі різниці між заданою та фактичною температурою. Така структура забезпечує стабільність температурного режиму, зменшення впливу зовнішніх збурень та створює основу для подальшого аналізу стійкості, синтезу параметрів регулятора і дослідження якості перехідних процесів.

					ДП.АКІТ.11149121.00.00.000ПЗ	Арк.
						43
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

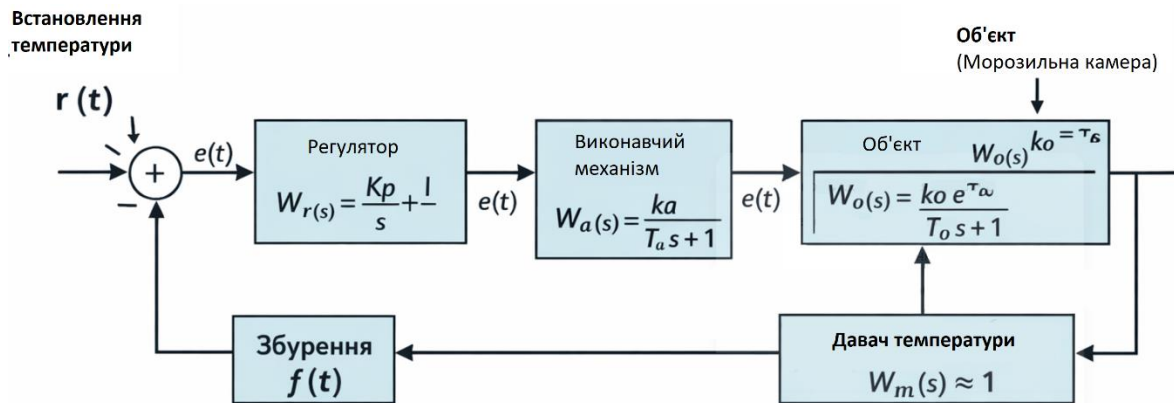


Рисунок 3.1 - Структурна схема САР температури шоккової морозильної установки

Дослідження стійкості системи автоматичного регулювання температури шоккової морозильної установки

Для оцінювання працездатності та коректності синтезованої системи керування було проведено дослідження її стійкості на основі типової математичної моделі замкненої системи автоматичного регулювання температури. У межах дослідження система розглядалася як сукупність ПІ-регулятора, виконавчої ланки, об'єкта керування у вигляді інерційної теплотехнічної ланки із запізненням та каналу зворотного зв'язку. Такий підхід відповідає класичним положенням теорії автоматичного управління і дозволяє виконати аналіз розташування полюсів замкненої системи, оцінити характер перехідного процесу та дослідити частотні властивості розімкненого контуру.

3.2 Математична модель об'єкта керування

Математична модель об'єкта керування була прийнята у вигляді інерційної ланки першого порядку із транспортним запізненням. Виконавчий механізм також описувався аперіодичною ланкою першого порядку. Для регулятора було обрано ПІ-закон керування, який є доцільним для теплових об'єктів із значною інерційністю, оскільки забезпечує усунення статичної похибки без надмірної чутливості до шумів вимірювання. Запізнення у системі апроксимувалося

наближенням Паде першого порядку, що зробило можливим дослідження системи у частотній області та визначення коренів характеристичного рівняння.

У результаті моделювання було розглянуто два варіанти налаштування регулятора. Перший варіант відповідає помірному, практично придатному налаштуванню, при якому коефіцієнти регулятора вибрані з урахуванням інерційності об'єкта та необхідності забезпечення запасу стійкості. Другий варіант відповідає більш агресивному налаштуванню, при якому посилення регулятора навмисно збільшене для демонстрації межі втрати стійкості.

Аналіз коренів характеристичного рівняння показав, що для робочого варіанта налаштування всі полюси замкненої системи розташовані в лівій півплощині комплексної площини. Це означає, що система є асимптотично стійкою, а всі перехідні складові з часом затухають. Для даного випадку було отримано один дійсний полюс із достатньо великим від'ємним значенням, ще один повільніший дійсний полюс та комплексно-спряжену пару з від'ємною дійсною частиною. Така картина є характерною для стійких теплових систем із помірною коливальністю та свідчить про затухаючий характер перехідного процесу.

Для агресивного налаштування регулятора ситуація змінюється. У цьому випадку одна комплексно-спряжена пара коренів переходить у праву півплощину, тобто її дійсна частина стає додатною. Це є прямою ознакою нестійкості замкненої системи. Фізично такий результат означає, що навіть невелике відхилення температури від заданого значення викликатиме не затухаючі, а наростаючі коливання, що робить експлуатацію системи неприйнятною.

Результати аналізу підтверджуються перехідними характеристиками замкненої системи, що на рисунку 3.2. Для стійкого налаштування перехідний процес має затухаючий характер і приводить систему до нового усталеного стану. Для агресивного варіанта спостерігається зростання коливань, що узгоджується з положенням полюсів у правій півплощині. Відповідний графік перехідної характеристики наведено у файлі:

					ДП.АКІТ.11149121.00.00.000ПЗ	Арк.
						45
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		



Рисунок 3.2 – Графік перехідних характеристик замкненої системи

Додатково стійкість системи була досліджена за допомогою частотних характеристик розімкненого контуру(рисунок 3.3).

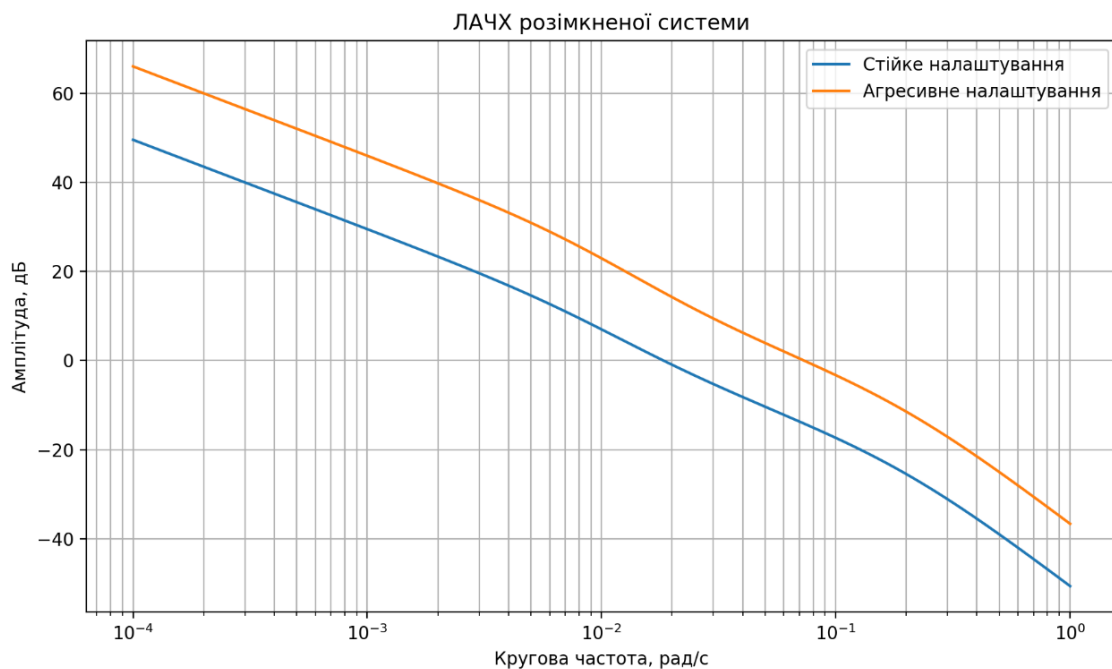


Рисунок 3.3 – ЛФЧХ розімкненої системи

Логарифмічна амплітудно-частотна характеристика дозволяє оцінити зміну коефіцієнта підсилення системи залежно від частоти, а логарифмічна фазо-частотна характеристика — фазове запізнення(рисунок 3.4), що вноситься

					ДП.АКІТ.11149121.00.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		46

ланками системи. Для стійкого налаштування форма частотних характеристик свідчить про наявність прийнятного запасу стійкості, тоді як у разі агресивного регулювання частотні криві наближаються до критичних значень, що вказує на небезпеку самозбудження.

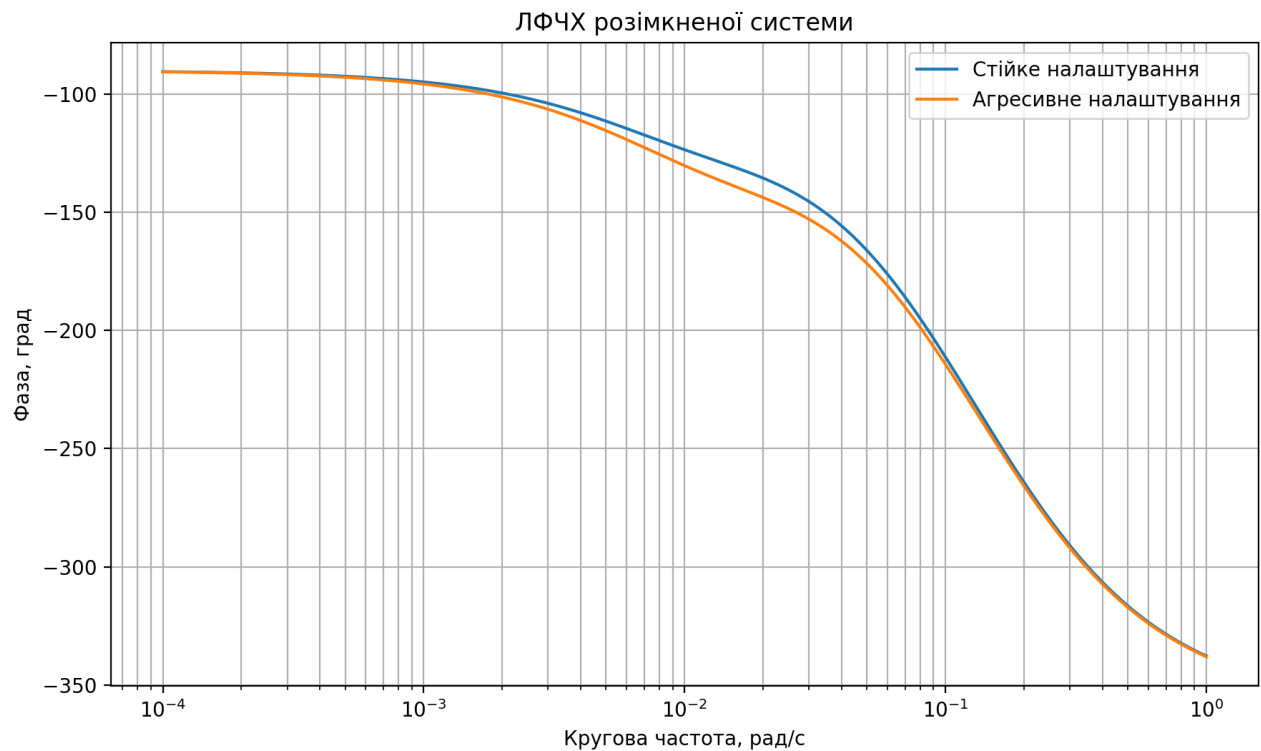


Рисунок 3.4 – ЛФЧХ розімкненої системи

Ще одним інструментом оцінювання стала крива Найквіста розімкненого контуру. Відомо, що для системи з негативним зворотним зв'язком стійкість визначається поведінкою амплітудно-фазової характеристики відносно критичної точки $(-1;j0)(-1; j0)(-1;j0)$. Для робочого налаштування траєкторія не створює умов для втрати стійкості, тоді як при агресивному налаштуванні спостерігається небезпечне зближення з критичною областю. Відповідний графік наведено на рисунку 3.5.

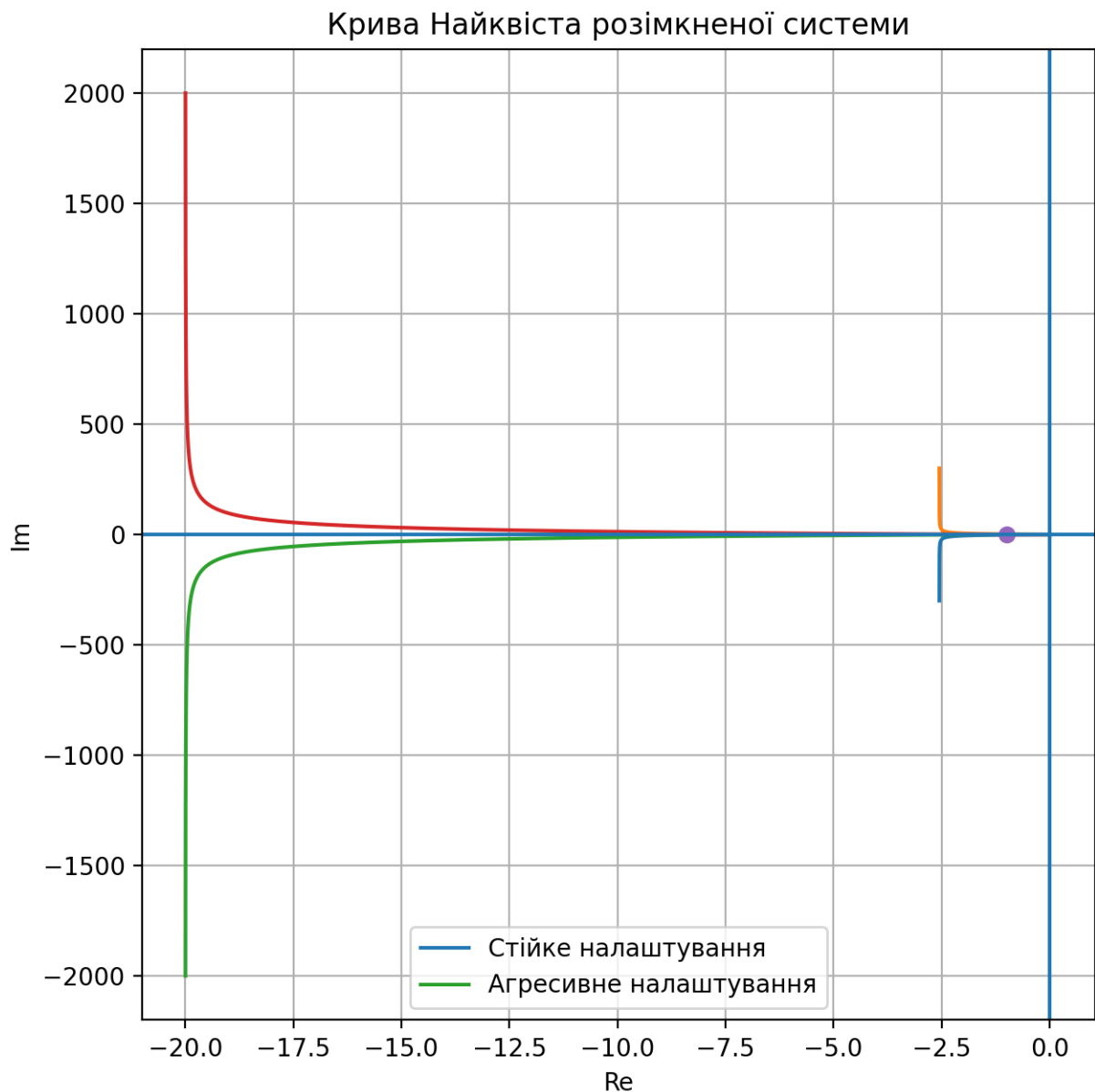


Рисунок 3.5 – Крива Найквіста розімкненої системи

Числові значення полюсів системи також були збережені окремо, що дозволяє безпосередньо використовувати їх у пояснювальній записці під час аналізу стійкості. Файл із переліком коренів характеристичного рівняння доступний тут: [полюси системи](#).

Отже, проведене дослідження показало, що система автоматичного регулювання температури шоквої морозильної установки за помірного налаштування ПІ-регулятора є стійкою, а її перехідний процес має затухаючий характер. Збільшення коефіцієнтів регулятора призводить до переходу частини коренів характеристичного рівняння у праву півплощину, що супроводжується втратою стійкості та виникненням наростаючих коливань. Це підтверджує

					ДП.АКІТ.11149121.00.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		48

необхідність обґрунтованого вибору параметрів регулятора з урахуванням інерційності та запізнення об'єкта керування.

Проведений аналіз стійкості підтвердив можливість побудови працездатної системи автоматичного регулювання температури шокової морозильної установки на основі ПІ-регулятора. Для раціонально вибраних параметрів система залишається асимптотично стійкою, забезпечує вихід на усталений режим без розбігання та має прийнятні динамічні властивості. Отримані результати можуть бути використані як основа для подальшого синтезу регулятора та оптимізації якості керування.

Можу ще побудувати кореневий годограф і написати підрозділ «Якість перехідного процесу» з часом регулювання, перерегулюванням і статичною похибкою.

3.3 Розробка програмного засобу для керування технологічним процесом

Розроблене програмне забезпечення призначене для реалізації функцій автоматизованого керування технологічним процесом шокової заморозки харчової продукції. Програмний продукт виконує задачі збору та обробки даних від вимірювальних пристроїв, формування керуючих впливів на виконавчі механізми, підтримання заданих технологічних режимів, а також забезпечує взаємодію оператора із системою.

Архітектурно програмне забезпечення побудоване за модульним принципом, що забезпечує його гнучкість, масштабованість та можливість подальшої інтеграції з промисловими контролерами та реальними датчиками. Основу програмної логіки складає модель керуючого ядра, яка відображає роботу PLC-контролера, а також модуль візуалізації, що виконує функції операторської панелі.

Програмна система, що на рисунку 3.6, реалізує цикл керування, у межах якого здійснюється періодичне зчитування сигналів від датчиків температури, тиску та вологості. На етапі розробки для імітації реальної роботи системи використовуються функції-заглушки, які генерують тестові значення параметрів.

					ДП.АКІТ.11149121.00.00.000ПЗ	Арк.
						49
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Це дозволяє відпрацювати алгоритми керування без підключення фізичного обладнання та провести попереднє тестування логіки системи.

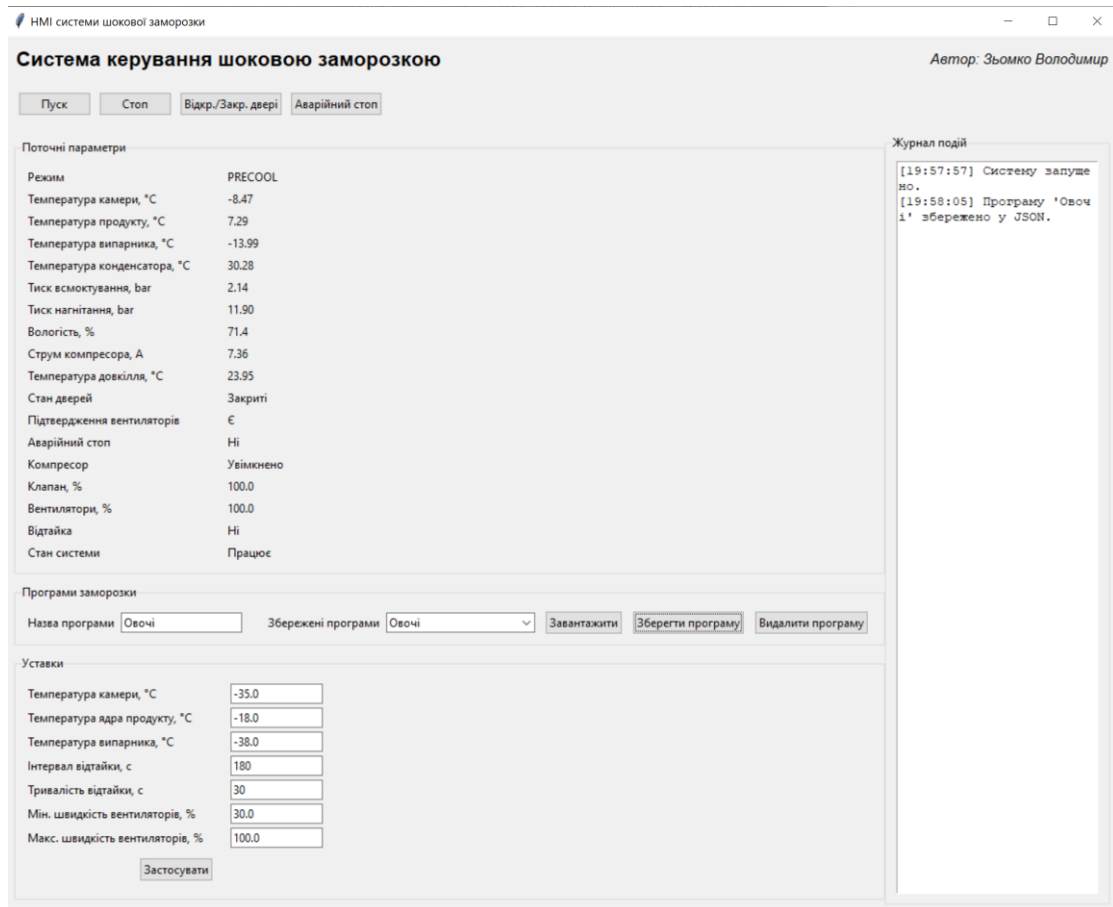


Рисунок 3.6 – Головне вікно розробленого застосунку

На основі отриманих значень параметрів формується поточний стан технологічного процесу, який визначається шляхом порівняння вимірних величин із заданими уставками. Програма підтримує декілька режимів роботи, що відповідають основним етапам процесу шокової заморозки. До них належать режим попереднього охолодження, режим інтенсивної заморозки, режим стабілізації температури та режим відтаювання. Перехід між режимами здійснюється автоматично відповідно до логіки технологічного процесу, зокрема за досягненням заданої температури або за часовими умовами.

Керуючий модуль формує сигнали управління для виконавчих механізмів, які у програмній моделі представлені як абстрактні об'єкти. До них належать компресор, вентилятори випарника, електронний розширювальний клапан та система відтаювання. На основі відхилення температури від заданого значення

					ДП.АКІТ.11149121.00.00.000ПЗ	Арк.
						50
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

визначається інтенсивність роботи холодильного обладнання. При цьому враховуються обмеження, пов'язані з безпекою та допустимими режимами експлуатації.

У програмі реалізовано механізм контролю аварійних ситуацій, який забезпечує виявлення відхилень параметрів за допустимі межі. До таких ситуацій належать перевищення тиску холодоагенту, недопустиме підвищення температури, відмова датчиків або відкриття дверей морозильної камери. У разі виникнення аварії програма формує відповідне повідомлення, змінює режим роботи системи та може блокувати виконання окремих операцій.

Окрему роль у програмному забезпеченні відіграє підсистема роботи з технологічними програмами заморожування. Користувач має можливість створювати, редагувати та зберігати набори параметрів для різних типів продукції. Кожна така програма містить уставки температури, тривалість окремих етапів процесу та додаткові параметри керування. Збереження програм здійснюється у форматі JSON, що забезпечує зручність їх редагування, перенесення та інтеграції з іншими системами.

Важливою складовою програмного продукту є модуль візуалізації, який реалізує функції операторського інтерфейсу. У графічному вікні відображаються поточні значення температури, тиску, вологості, активний режим роботи системи та стан виконавчих механізмів. Оператор має можливість змінювати уставки, запускати або зупиняти процес заморожування, обирати технологічні програми та переглядати журнал подій. Інтерфейс передбачає кнопку «Застосувати», яка забезпечує передачу нових параметрів у керуючий модуль.

Програмне забезпечення також містить засоби журналювання, що дозволяють фіксувати історію роботи системи, включаючи зміну режимів, виникнення аварій та значення контрольованих параметрів. Це створює передумови для подальшого аналізу ефективності роботи системи та оптимізації технологічного процесу.

					ДП.АКІТ.11149121.00.00.000ПЗ	Арк.
						51
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

ВИСНОВОК

У результаті виконання дослідження було проведено аналіз технологічного процесу швидкої заморозки харчової продукції та визначено його основні параметри як об'єкта автоматизації. Встановлено, що процес шокової заморозки характеризується значною тепловою інерційністю, наявністю транспортного запізнення та впливом зовнішніх збурень, що обумовлює необхідність використання автоматизованих систем регулювання температурного режиму. Також було проаналізовано технологічне обладнання систем швидкої заморозки, зокрема компресори, випарники, конденсатори, вентилятори, системи відтаювання та засоби автоматизації. У межах роботи виконано аналіз існуючих систем швидкої заморозки та сучасних підходів до їх автоматизації, що дозволило визначити основні напрями побудови ефективної системи керування.

У ході дослідження було проаналізовано принцип роботи типової автоматизованої системи контролю швидкої заморозки та на його основі розроблено структуру автоматизованої системи контролю процесу швидкої заморозки. Побудовано функціональну та структурну схеми системи керування установкою шокової заморозки, які включають датчики температури, тиску та вологості, програмований логічний контролер, виконавчі механізми та операторський інтерфейс. Також було обґрунтовано вибір технічних засобів автоматизації для реалізації системи керування з урахуванням вимог до точності, надійності та можливості інтеграції із сучасними засобами диспетчеризації та моніторингу.

У роботі розроблено модель об'єкта керування системи шокової заморозки та побудовано математичну модель об'єкта керування для дослідження динамічних характеристик системи. На основі методів класичної теорії автоматичного управління проведено дослідження стійкості системи автоматичного регулювання температури, результати якого підтвердили працездатність запропонованої структури керування. Крім того, було розроблено програмний засіб для автоматизованого керування процесом шокової заморозки, який забезпечує збір та обробку даних від датчиків, формування керуючих

					ДП.АКІТ.11149121.00.00.000ПЗ	Арк.
						52
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

впливів, підтримання технологічних режимів та обробку аварійних ситуацій. Отримані результати підтверджують можливість практичного застосування розроблених рішень для побудови сучасних автоматизованих систем керування установками шокової заморозки.

					ДП.АКІТ.11149121.00.00.000ПЗ	Арк.
						53
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Bomben J. L., Dietrich W. C., Hudson J. S., Hamilton H. K., Farkas D. F. Yields and solids loss in steam blanching, cooling and freezing vegetables // Journal of Food Science. 1975. Vol. 40, No. 4. P. 660–664. DOI: 10.1111/j.1365-2621.1975.tb00523.x.

2. Frozen vegetable production line for making frozen peas, sweet corn. URL: <https://www.taizyfoodmachine.com/frozen-peas-production-line.html> (дата звернення: 07.06.2026).

3. Galarce F., Rivera D. et al. A reduced-order framework for temperature estimation in food freezing, ArXiv, 2024.

4. Highly efficient equipment for IQF freezing berries. URL: <https://octofrost.com/food-processing-technology-berries> (дата звернення: 07.06.2026).

5. Hohl L., Swanburg J., David J., Ramsey R. Cooling of blanched vegetables and fruits for freezing // Journal of Food Science. 1947. Vol. 12. P. 484–495. DOI: 10.1111/j.1365-2621.1947.tb16442.x.

6. Huang T., Bacher P. et al. A step towards digital operations — A novel grey-box approach for modelling the heat dynamics of ULT freezing chambers, ArXiv, 2023.

7. Jagetić G., Habazin M., Špoljarić T. PLC/SCADA systems in automation control design for individual quick freezing process in cooling tunnels, Proc. Int. Conf. Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics, 2015.

8. Legeta J., Meshko R., Ryaboshchuk M. Defining ways for improving automatic technological lines for shock freezing of food products. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2025. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.347796>.

9. Modbus manual. [Електронний ресурс].- Режим доступу: <https://www.modbus.org/file/secure/modbusprotocollspecification.pdf>

10. Python Documentation. [Електронний ресурс].- Режим доступу: <https://docs.python.org/3/>

					ДП.АКІТ.11149121.00.00.000ПЗ	Арк.
						54
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

11. Бараненко М. М. Автоматизація холодильної установки, Матеріали XIII Міжнар. наук. конф., 2025.

12. Голінко І. М. Динамічна модель тепломасообміну для водяного охолоджувача промислового кондиціонера / І. М. Голінко // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. –2014, № 6. –С. 27–34.

13. Голінко І. М., Галицька І.Є. Динамічна модель теплообміну для водяного калорифера у просторі станів // Інформаційні системи, механіка та керування. Київ – 2016. № 15, – С. 83–92.

14. Гуртовенко Ю. О. Проектування холодильників. Біла Церква : Технолого-економічний коледж Білоцерківського національного аграрного університету, 2010. 124 с.

15. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. Київ: Міністерство регіонального розвитку України, 2013.

16. Зьомко В, Стефурак Н., Кузик В. Схема автоматизованої системи контролю швидкої заморозки Збірник матеріалів всеукраїнської науково-практичної конференції «Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології» (АКІТ - 2026), Тернопіль, 2026. С.144-148.

17. Камінська С. В. Сучасні технології заморожування плодово-ягідної сировини: переваги та недоліки // Ресурсо- та енергоощадні технології виробництва і пакування харчової продукції – основні засади її конкурентоздатності : матеріали IX Міжнародної спеціалізованої науково-практичної конференції (м. Київ, 10 грудня 2020 р.). Київ : НУХТ, 2020. С. 30–31.

18. Лозовський А. П., Іванов О. М. Основи холодильних технологій. Суми : Університетська книга, 2018. 280 с.

19. Масліков М. М. Холодильна технологія харчових продуктів. Київ : НУХТ, 2007. 335 с.

20. Мнацаканов Г. К. Основи проектування холодильників. Одеса : Інститут низькотемпературної техніки ОДАХ, 2004. 71 с.

21. Сімахіна Г. О., Халапсіна С. В. Підбір ефективних кріопротекторів для заморожування плодово-ягідної сировини // Ресурсо- та енергоощадні технології виробництва і пакування харчової продукції – основні засади її

					ДП.АКІТ.11149121.00.00.000ПЗ	Арк.
						55
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

конкурентоздатності : матеріали ІІІ Міжнародної спеціалізованої науково-практичної конференції (м. Київ, 9 вересня 2014 р.). Київ, 2014. С. 60–61.

22. Ткачук К. Н. Виробнича санітарія. Рівне, 2012. 443 с.

23. Хмельнюк М. Г. Холодильні установки спеціального призначення. Херсон : Грінь Д. С., 2013. 488 с.

					ДП.АКІТ.11149121.00.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		56