

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
Навчально-науковий інститут інформаційних технологій та робототехніки
Кафедра автоматичної, електроніки та телекомунікацій

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи

_____ магістр

(рівень вищої освіти)

на тему **Розроблення та дослідження автоматизованої системи**
забезпечення раціонального температурно-вологісного режиму
в плодоовочесховищі

Виконав: студент 2 курсу, групи 601-МЕ
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

Слинько М. О. 

Керівник Єрмілова Н.В. 

Рецензент Галай В.М.

Полтава - 2026 рік

РЕФЕРАТ

кваліфікаційної роботи магістра «Розроблення та дослідження автоматизованої системи забезпечення раціонального температурно-вологісного режиму в плодоовочесховищі»

Робота містить 87 сторінок, 59 рисунків, 2 таблиці, 25 використаних джерел літератури.

Ключові слова: мікроклімат, холодильна установка, плодоовочесховище, математична модель, автоматичне керування.

Предметом дослідження є система керування обладнанням плодоовочесховища. **Об'єктом** дослідження є процеси, що відбуваються в приміщеннях плодоовочесховищ під впливом комплексного збурювального чинника – часових внутрішніх і зовнішніх теплонадходжень.

Метою даної кваліфікаційної роботи є розроблення автоматизованої системи забезпечення раціонального температурно-вологісного режиму в плодоовочесховищі для підвищення його енергетичної і технологічної ефективності.

В роботі розроблено структуру, алгоритмічне та технічне забезпечення автоматизованої системи керування холодильним обладнанням в плодоовочесховищах. Розроблено математичні моделі окремих елементів системи – повітроохолоджувача, зволожувача повітря та холодильної камери, на базі яких створено узагальнену модель системи автоматичного керування режимами холодильного зберігання, яка дозволяє визначати температуру та вологовміст повітря в динаміці. Розроблена система дозволяє зводити до мінімуму зовнішні впливи на продукцію і компенсувати теплопритоки від самозігрівання, використовуючи мінімум енергії завдяки частотному регулюванню двигуна компресора.

Робота має практичну цінність і її результати після більш детальної доробки можуть бути розглянуті для використання в роботі вітчизняних плодоовочесховищ.

ABSTRACT

Master's qualification thesis

"Development and research of an automated system for ensuring a rational temperature and humidity regime in the fruit and vegetable warehouse"

The work contains 87 pages, 59 figures, 2 tables, 25 used literature sources.

Key words: microclimate, refrigerating plant, fruit and vegetable storage, mathematical model, automatic control.

The subject of research is the management system of fruit and vegetable storage equipment. The object of the study is the processes that take place in the premises of fruit and vegetable storages under the influence of a complex disturbing factor - temporary internal and external heat inputs.

The purpose of this qualification work is to develop an automated system for ensuring a rational temperature-humidity regime in fruit and vegetable storage to increase its energy and technological efficiency.

In the work, the structure, algorithmic and technical support of the automated control system of refrigerating equipment in fruit and vegetable warehouses is developed. Mathematical models of individual elements of the system - air cooler, air humidifier and refrigerating chamber - have been developed, on the basis of which a generalized model of the system of automatic control of refrigerating storage modes has been created, which allows determining the temperature and moisture content of the air in dynamics. The developed system allows you to minimize external influences on products and compensate for heat inflows from self-heating, using a minimum of energy thanks to the frequency control of the compressor motor.

The work has practical value and its results after more detailed refinement can be considered for use in the work of domestic food and vegetable storage facilities.

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
 Інститут Навчально-науковий інститут інформаційних технологій і
 робототехніки
 Кафедра Автоматики, електроніки та телекомунікацій
 Рівень вищої освіти Магістр
 Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри автоматичної,
 електроніки та телекомунікацій
 _____ О.В. Шефер

« 15 » вересня 2025 р.

ЗАВДАННЯ

НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Слиньку Максиму Олександровичу

1. Тема проекту (роботи) «Розроблення та дослідження автоматизованої системи забезпечення раціонального температурно-вологісного режиму в плодоовочесховищі»

керівник проекту (роботи) Єрмілова Н.В., к.т.н., доцент
 затверджена наказом вищого навчального закладу від 03.09.2025 р. № 1025-ф.а

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 22.12.2025 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Технічна документація на обладнання плодоовочесховища: компресори, вентилятори, розпилювачі, направляючі апарати, контрольно-вимірювальна апаратура. Розробити сучасну енергоефективну автоматизовану систему керування обладнанням плодоовочесховища з використанням SCADA-системи. Забезпечити перерегулювання у межах 20%, час регулювання – не більше 90 хв.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки Огляд стану галузі та аналіз існуючих систем автоматизації обладнання в овочесховищах. Аналіз засобів автоматичного керування температурно-вологісними режимами в холодильних камерах плодоовочесховищ. Постановка завдань на магістерську роботу. Опис об'єкта та методики досліджень роботи обладнання. Обґрунтування енергоефективного керування режимами холодильного зберігання продукції. Математичне моделювання динамічних режимів роботи обладнання холодильної установки. Синтез локальних систем автоматичного регулювання параметрів повітря. Розроблення функціональної схеми керування електроприводом. Розроблення структурної схеми САК. Дослідження динамічних властивостей електропривода. Розрахунок, побудова та аналіз перехідних процесів. Апаратна та програмна реалізація САК з використанням SCADA-системи. Висновки по роботі.

5. Перелік графічного матеріалу:

- 1) Актуальність теми, мета та задачі дослідження;
- 2) Схема об'єкта автоматизації;
- 3) Схема узагальненої САК обладнанням овочесховища;
- 4) Дослідження камери холодільного зберігання, повітроохолоджувача та парозолоджувача;
- 5) Дослідження САК вологістю повітря;
- 6) Побудова та дослідження САР подання холодоагенту у випарник;
- 7) Дослідження потужності компресора від змін параметрів;
- 8) Порівняння роботи нечіткої нейронної САК з ПІД-регулятором;
- 9) Схема реалізації САК технологічним мікрокліматом
- 10) Висновки.

6. Дата видачі завдання 15.09.2025 р.

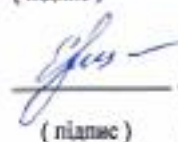
КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Пор. №	Назва етапів магістерської роботи	Термін та обсяг виконання етапів роботи		Примітка (плакати)
		Термін	Обсяг	
1	Огляд стану галузі та аналіз існуючих систем автоматизації обладнання в овочесховищах.	07.10.25	15%	Пл. 1
2	Аналіз засобів автоматичного керування режимами роботи в холодільних камерах. Постановка завдань на магістерську роботу.	21.10.25	I 25%	Пл. 2
3	Опис об'єкта та методики досліджень роботи обладнання. Обґрунтування енергоефективного керування режимами холодільного зберігання продукції.	04.11.25	40%	Пл. 4
4	Математичне моделювання динамічних режимів роботи обладнання	11.11.25	50 %	Пл. 5
5	Синтез локальних систем автоматичного регулювання параметрів повітря	18.11.25	II 60%	Пл. 6
6	Розроблення структурної схеми САК. Дослідження динамічних властивостей електропривода	25.11.25	70%	Пл. 7
7	Розрахунок, побудова та аналіз перехідних процесів. Апаратна та програмна реалізація САК з використанням SCADA-системи.	09.12.25	80%	Пл. 8, 9
8	Оформлення пояснювальної записки	22.12.25	100%	Пл. 10,11

Магістрант


 (підпис)
Слинько М.О.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи


 (підпис)
Єрмілова Н.В.
(прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

ВСТУП	8
1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	10
1.1 Стан галузі та аналіз існуючих систем автоматизації обладнання у овочесховищах.....	10
1.2 Засоби автоматичного керування температурно-вологісними режимами в холодильних камерах плодощовищ	15
1.3 Постановка завдань на магістерську роботу.....	19
Висновки до розділу.....	20
2 ДОСЛІДНА ЧАСТИНА.....	22
2.1 Режимні фактори, що впливають на втрати продукції при охолодженні та зберіганні.....	22
2.2 Опис об'єкта та методики досліджень роботи холодильної установки	23
2.3 Методика створення системи управління холодильним обладнанням овочесховищ на основі апарату нечіткої логіки	24
2.4 Обґрунтування енергоефективного керування режимами холодильного зберігання овочевої продукції.....	27
2.5 Енергетична ефективність процесу керування температурно-вологісними режимами.....	29
Висновки до розділу	32
3 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ОБЛАДНАННЯ ХОЛОДИЛЬНОЇ УСТАНОВКИ	33
3.1 Математична модель динамічних режимів холодильної камери плодощовища.....	33
3.2 Математична модель динамічних режимів повітроохолоджувача	47
3.3 Математична модель динамічних режимів парозволожувача.....	57
3.4 Синтез локальних систем автоматичного регулювання параметрів повітря в об'єктах холодильної установки	64
Висновки до розділу.....	71

4 СИНТЕЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ КЕРУВАННЯ ХОЛОДИЛЬНИМ ОБЛАДНАННЯМ В ОВОЧЕСХОВИЩАХ.....	72
4.1 Синтез нейроінформаційної експертної системи автоматичного керування холодопродуктивністю компресора.....	72
4.2 Аналіз якості функціонування САК холодопродуктивністю компресора з використанням імітаційного моделювання	78
4.3 Апаратна та програмна реалізація енергоефективного керування температурно-вологісними режимами при холодильному зберіганні рослинної продукції з використанням SCADA Трейс Моуд	80
Висновки до розділу.....	83
ВИСНОВКИ.....	84
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	85
ДОДАТКИ	88

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасною аграрною політикою в Україні визначено за доцільне зберігати плодоовочеву продукцію у місцях, де вона виробляється, що дає можливість знижувати втрати плодів та овочів. В останні роки намітився значний прогрес в автоматизації обладнання плодоовочесховищ, однак дослідження в сфері мінімізації витрат енергії на процес зберігання овочевої продукції шляхом керування ним за тепловим навантаженням є актуальними, необхідними і своєчасними.

Предметом дослідження є система керування обладнанням плодоовочесховища, яка включає компресори, вентилятори, розпилювачі, направляючі апарати, контрольно-вимірювальну апаратуру та інші додаткові засоби.

Об'єктом дослідження є процеси, що відбуваються в приміщеннях плодоовочесховищ під впливом комплексного збурювального чинника – часових внутрішніх і зовнішніх теплонадходжень.

Мета і задачі дослідження – розроблення автоматизованої системи забезпечення раціонального температурно-вологісного режиму в плодоовочесховищі для підвищення його енергетичної і технологічної ефективності.

В процесі роботи потрібно вирішити такі задачі:

– провести аналіз процесів, що відбуваються при холодильному зберіганні овочевої продукції, як об'єкта керування, визначити шляхи вдосконалення системи автоматичного керування (САК);

– експериментально дослідити режими охолодження овочевої продукції, виявити та кількісно оцінити вплив основних контрольованих параметрів (температура, вологість і швидкість руху, питомі витрати повітря) на втрати маси продукції;

- розробити математичні моделі окремих елементів та загальну математичну модель холодильної установки і камери з продуктом;
- розробити та дослідити модель теплових процесів холодильної установки для керування її режимами;
- застосувати апарат нечітких множин для створення нейромережевої системи і алгоритму керування холодильним обладнанням в овочесховищах;
- розробити автоматичну систему і комплекс технічних та програмних засобів, для забезпечення раціональних тепловологісних режимів в холодильній камері.

Методи досліджень. Для розв'язання поставлених задач у роботі застосовувалися:

- методи теорії тепломасообміну і термодинаміки, апроксимація числових даних і графічних характеристик аналітичними виразами – для побудови статичної і динамічної моделей системи створення технологічного мікроклімату в холодильних камерах (ССТМХК);
- методи оптимізації – для побудови САК ССТМХК;
- методи теорії автоматичного керування – для розробки системи автоматичного регулювання режимів роботи ССТМХК;
- методи числового моделювання на ЕОМ – для аналізу статичних і динамічних характеристик елементів ССТМХК і саме локальної системи керування в ССТМХК.

1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Стан галузі та аналіз існуючих систем автоматизації обладнання в овочесховищах

Більшість плодоовочевих сховищ України було зведено ще у 70-х роках минулого сторіччя, і сьогодні вони є як морально застарілими, так і фізично зношеними, особливо це стосується холодильного обладнання.

У промислових холодильниках традиційно застосовували аміачні компресори, які нині в Україні не виробляються. Втрати овочів і фруктів при зберіганні без охолодження сягають значних показників: для капусти – 35-60 %, моркви – 30-40 %, фруктів і ягід – 25-30 %, винограду – 15-25 % [1].

Недосконалість технологій зберігання призводить не лише до втрат продукції, а й до зайвих витрат енергії та нераціонального використання земельних ресурсів. При цьому застосування холодильного зберігання потребує всього близько 4 % від усіх енерговитрат, необхідних для відновлення втраченої продукції.

Основними завданнями сучасної галузі зберігання плодоовочевої продукції є вдосконалення існуючих технологій, створення нових енергоощадних систем охолодження, забезпечення оптимальних параметрів мікроклімату у сховищах, а також впровадження автоматизованих систем на базі ПЛК. Для різних сезонів охолоджувальні установки мають підтримувати широкий діапазон змін температури та вологості. Система повинна забезпечувати стабільні параметри: температуру з відхиленням не більше $\pm 0,5$ °C і відносну вологість у межах 85–95 % з можливістю регулювання на 2–4 % [1].

На практиці використовуються такі системи охолодження:

1. **Батарейні** – відведення тепла за допомогою пристінних і дахових батарей;
2. **Повітряні** – охолодження за допомогою повітроохолоджувачів у самій камері або поза нею;
3. **Змішані** – поєднання обох вищеописаних методів;

4. **З позакамерним відведенням теплоти** – конструкційно здійснюється усунення зовнішніх теплопритоків.

Розглянемо ці системи (рис. 1.1).

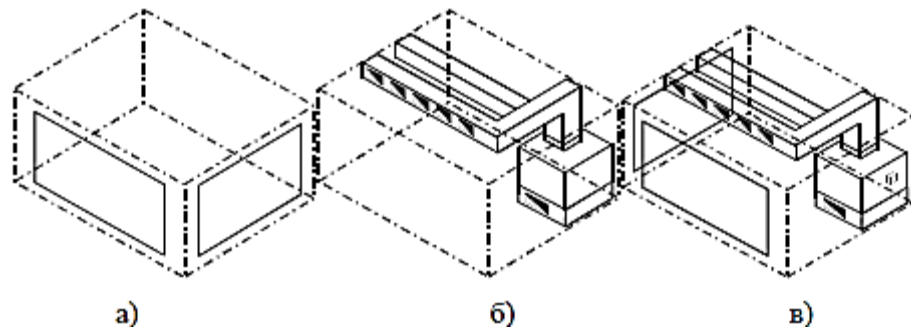


Рисунок 1.1 – Схеми систем охолодження плодоовочесховищ:

а – батарейна; б – повітряна; в – повітряно-батарейна

Батарейні системи (складаються з пристінних та дахових реберних і трубних батарей) мають істотний недолік – нерівномірний розподіл температури (різниця температур може досягати 6–8 °С), що негативно впливає на збереження продукції.

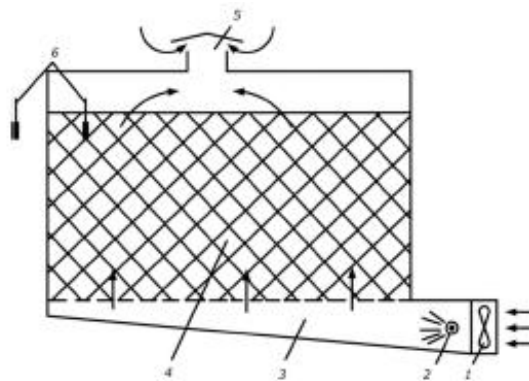


Рисунок 1.2 – Схема прямої системи активного вентилявання атмосферним повітрям: 1 – вентилятор; 2 – зволожувач; 3 – повітропровід; 4 – продукція; 5 – диференціальний терморегулятор; 6 – дефлектор

Найбільшого поширення нині набули системи з примусовою циркуляцією повітря, які забезпечують рівномірний температурний режим у камері, пришвидшують охолодження продукції та знижують енергоємність процесу. Проте циркуляція повітря спричиняє підвищене зневоднення плодів та овочів.

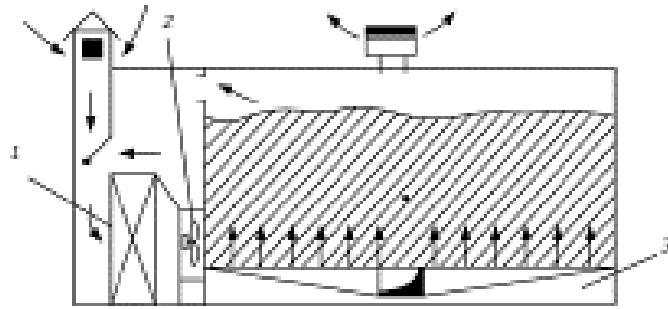


Рисунок 1.3 – Схема прямої системи активного вентиляювання при машинному охолодженні повітря: 1 – повітроохолоджувач; 2 – вентилятор; 3 – повітророзподільний канал

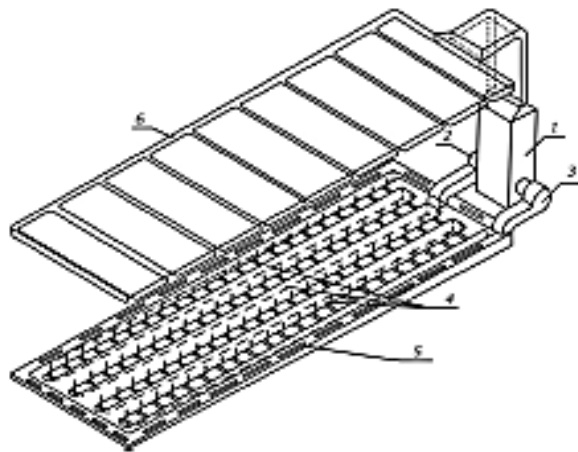


Рисунок 1.4 – Схема системи охолодження з розрізненим виведенням внутрішніх та зовнішніх теплопритоків: 1 – повітроохолоджувач; 2, 3 – відцентровий вентилятор; 4 – розподільні канали; 5 – кільцевий канал; 6 – щілинний канал

У змішаних системах поєднуються як переваги, так і недоліки батарейних та повітряних рішень. Для підвищення рівномірності параметрів мікроклімату застосовується інтенсивніша циркуляція повітря, що водночас збільшує енерговитрати і масові втрати продукції.

Активне вентиляювання передбачає примусову подачу повітря з визначеними параметрами температури, вологості й швидкості в товщу продукції. Воно дозволяє ефективно відводити теплоту самозігрівання та зволожувати повітря, однак сучасні системи автоматичного регулювання мають суттєвий недолік – контроль температури здійснюється лише в одній точці

камери. Це призводить до нерівномірності температурного поля та унеможливорює повне усунення джерел самозігрівання. Тому постає потреба у створенні систем автоматичного моніторингу та локального регулювання температури.

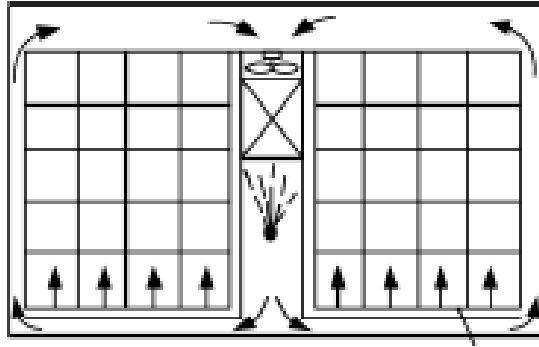


Рисунок 1.5 – Схема машинного охолодження з активним вентиляванням

Повітряні системи з рециркуляцією повітря широко застосовуються у холодильниках для фруктів і овочів. Вони працюють за принципом подачі охолодженого та, за необхідності, зволоженого повітря через канали зверху в камеру, після чого воно проходить крізь міжштабельні простори і продукти. Такий спосіб підвищує інтенсивність тепло- і масообміну, але також зумовлює втрати вологи й додаткові витрати енергії.

Для запобігання пересушуванню продукції застосовуються різні методи зволоження:

- аерозольне зрошення водою за допомогою форсунок або дискових розпилювачів;
- подача перегрітої водяної пари (110–125 °С), що є енергоємним варіантом;
- використання повітря з високим вологовмістом (зовнішнього або рециркуляційного).

Найперспективнішими вважають дискові (ротаційні) розпилювачі, які забезпечують ефективне зволоження при менших енерговитратах.

Ефективнішим рішенням вважається використання дискового розпилювача води, конструктивно оснащеного вентилятором, закріпленим на валу привода

диска. Це забезпечує формування циркуляційного потоку аерозольно-повітряно-водяної суміші.

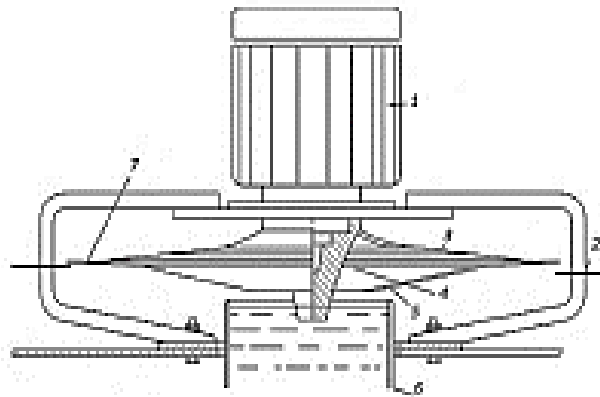


Рисунок 1.6 – Структура дискового (ротаційного) зволожувача повітря:

- а) 1 – привідний електродвигун; 2 – днище повітроводу; 3 – диск; 4 – повітрозабірний конус; 5 – водозбірна лійка; 6 – бак для води; 7 – направляючий апарат

Потужність такого приводу коливається у межах від 450 до 750 Вт. Продуктивність розпилювачів даного типу становить 6–15 кг/год води, перетвореної у дрібнодисперсний аерозоль. Автоматизоване керування роботою зволожувача реалізовано за двопозиційним принципом – шляхом періодичного вмикання та вимикання електродвигуна. Функцію вимірювання та регулювання вологості виконує регулятор на основі волосяного гігрометра. Забезпечувана точність підтримання відносної вологості становить $\pm 2\%$, що повністю відповідає встановленим технологічним нормам.

У системах активного вентилявання зволоження повітря здійснюється за допомогою повітророзподільних каналів, заповнених на висоту 0,1 м водою або розсолем (рис. 1.7).

Таким чином, удосконалення систем охолодження та управління мікрокліматом у сховищах є ключовою умовою зниження втрат плодоовочевої продукції та підвищення енергоефективності технологій її зберігання.

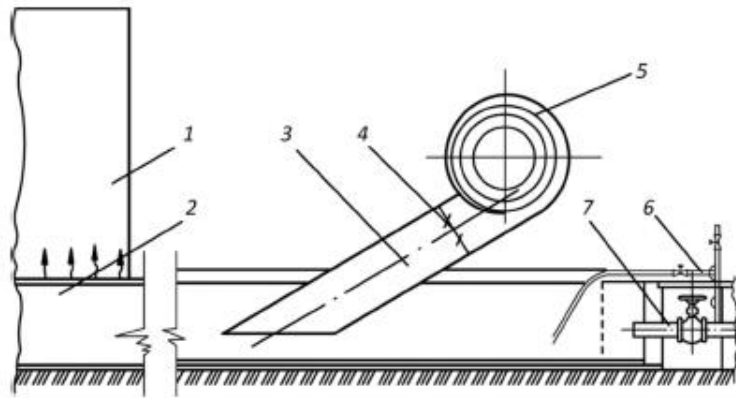


Рисунок 1.7 – Структура зволоження повітря у вентиляційному каналі:

1 – сховище; 2 – вентиляційний канал; 3 – патрубок вентилятора;
4 – регулюючий апарат патрубку; 5 – відцентровий вентилятор; 6, 7 – патрубок
подання води в вентиляційний канал

1.2 Засоби автоматичного управління температурно-вологісними режимами в холодильних камерах плодоовочесховищ

Ефективність роботи обладнання сховищ, яка визначається рівнем збереження продукції та питомими енергетичними витратами на підтримання оптимальних режимів, значною мірою залежить від якості систем автоматичного керування (САК) температурою та вологістю повітря [2]. На сьогодні у вітчизняних холодильних камерах невеликої місткості (до 500 т) САК здебільшого побудовані на базі термостатів. Такі системи прості у використанні та відзначаються надійністю, проте мають характерні недоліки релейного регулювання.

Керування в них здійснюється шляхом періодичного вмикання та вимикання компресора й вентилятора, що спричиняє значні коливання температури в камері. Як уже зазначалося вище, саме перепади температури завдають більших втрат продукції, ніж просто її підвищений рівень.

У більш сучасних системах контроль температури кипіння холодоагенту, а отже, й температури у камері, забезпечується за рахунок регулювання продуктивності компресора. Це дозволяє не лише стабілізувати температуру, а й

підтримувати оптимальний температурний напір $\Delta t = t_0 - t_k$ (дод. В), від якого залежать енергетичні втрати циклу.

Особливістю автоматизованих систем кондиціонування повітря у сховищах є необхідність перебудови схеми його обробки при зміні тепловологісного балансу. Це реалізується шляхом увімкнення відповідного технологічного обладнання. Для цього розробляються спеціальні вузли для автоматичного переходу від одного регулювального органу до іншого з можливістю плавного керування контрольованим параметром та корекцією налаштувань системи.

Під час розроблення високоточних систем регулювання температурно-вологісних режимів у сільськогосподарських об'єктах автоматизації застосовують автономні взаємопов'язані системи керування.

Основна ідея автономного керування зводиться до того, що за допомогою корекцій, які компенсують взаємодію між регуляторами, складну багатопараметричну систему розділяють на кілька простіших незалежних систем лише з однією керованою величиною.

У результаті досягається повна компенсація внутрішніх зв'язків між параметрами регулювання та забезпечується вибіркова інваріантність до збурень, що передаються через перехресні канали. На практиці в сільському господарстві для підтримання температурно-вологісних режимів найбільшого поширення набули автономні системи, які мають з прями компенсуючи зв'язки [3].

В АСР (автоматичній системі регулювання) параметрів повітря традиційно використовують загальнопромислові П-, ПІ- і ПІД- регулятори, що реалізують відповідно типові П-, ПІ- і ПІД- закони керування. При проектуванні таких АСР не завжди враховують динамічні властивості об'єкту, що знижує показники якості регулювання.

З метою розробки АСР терморегулювання повітря на виході теплообмінного апарату, що враховує статичні та динамічні властивості устаткування кондиціонерів в роботі, обґрунтовується вибір закону керування. Для цього визначають середньоквадратичну похибку регулювання при

використанні вказаних регуляторів. Результати обчислень, виконані в роботах [4, 7], показали, що для П-, ПІ- і ПІД- регуляторів вона складає відповідно $392.95 \cdot 10^{-3}$, $5.309 \cdot 10^{-3}$ та $164.223 \cdot 10^{-3}$ кДж/кг.

Беручи до уваги коливання керованих параметрів при введенні інтегральної складової в П-закон регулювання, а також погіршення динамічних характеристик через можливу втрату стійкості, використання ПІ-регулятора тут є небажаним.

При застосуванні ПІД-регулятора додавання похідної до П-закону регулювання лише незначно покращує якість процесу, проте ускладнює схему. Тому вважаємо найбільш доцільним використання системи з П-законом регулювання, за умови допустимості статичної похибки. Водночас релейні та ПІ-регулятори не завжди здатні компенсувати збурення за умов невизначеності, спричинених різкими змінами параметрів довкілля як упродовж доби, так і сезонно при періодичних коливаннях навантаження.

На сучасному етапі відомо, що сезонні коливання параметрів зовнішнього повітря в періоди «осінь–зима–весна» спричиняють виражену нестационарність та нелінійність у роботі технологічного обладнання плодоовочевих сховищ. Це істотно ускладнює вибір оптимального закону регулювання й визначення параметрів регуляторів. Крім того, на конструктивні та теплофізичні характеристики холодильних камер безперервно впливають різноманітні збурення: зміна маси й об'єму продукції при завантаженні, варіації площі теплообміну та інші фактори, що формують умови невизначеності. Внаслідок цього навіть найефективніший ПІ-закон регулювання в таких умовах не забезпечує достатньої компенсації збурень.

З огляду на це, під час розроблення оптимальної системи керування, орієнтованої на стабілізацію температурного режиму камери за критерієм регулювання потужності, доцільно відмовитися від відомих традиційних підходів і застосовувати інтелектуальні методи [4]. Вони забезпечують гнучку адаптацію до змін внутрішніх параметрів об'єкта та можливих зовнішніх збурень у широкому діапазоні їх варіацій. Лінгвістичний підхід до керування

параметрами мікроклімату та опалення вже знаходить застосування. В роботах науковців доведена висока ефективність нечіткої САК калорифером, та кондиціонером.

Відомі позитивні спроби застосування систем керування параметрами мікроклімату з нечіткою логікою [9]. Така автоматизована система здійснює вимірювання температури повітря в приміщенні та автоматично визначає оптимальний режим роботи й необхідну холодопродуктивність компресора. При цьому задане значення температури постійно уточнюється відповідно до поточних показників температури та вологості повітря в камері. У порівнянні з ПД-регулюванням амплітуда коливань температури значно зменшується.

Використання нечітких логічних регуляторів у системах керування мікрокліматом забезпечує: відсутність значних та різких перепадів температури, підтримання допустимої швидкості руху повітря, встановлення потрібної холодопродуктивності, вибір режиму роботи залежно від температури й вологості, мінімальний час виходу на задані умови та зниження енергоспоживання на 20–40 %.

Отже, результати аналізу причин зниження ефективності роботи регульованих систем холодопостачання камер плодоовочесховищ дають можливість визначити такі ключові напрями удосконалення керування режимами функціонування холодильного обладнання з метою забезпечення стабільних та нормативних температурно-вологісних умов зберігання:

- запровадження безперервних алгоритмів замість позиційних у процесі керування роботою холодильних установок;
- застосування в управлінні такого параметра об'єкта, який найбільш повно відображає теплове навантаження та може бути виміряний автоматизованими засобами;
- перехід від традиційних САР мікрокліматичних параметрів сховищ до сучасних інтелектуальних систем на базі нечіткої логіки, що може забезпечити зниження енергоспоживання до 20 %;

– використання комплексних динамічних моделей, побудованих за детерміністичними підходами та ідентифікованих за результатами експериментальних досліджень;

– створення високопродуктивних експертних систем, які базуються на нечітких нейронних мережах.

1.3 Постановка завдань на магістерську роботу

Магістерська робота спрямована на виконання основного завдання досліджень: автоматизації процесу керування холодильною установкою плодоовочесховища з машинною системою холодозабезпечення і загальнообмінною системою повітряного холодопостачання, які забезпечують регламентовані температурно-вологісні параметри середовища камери.

Задача і сутність енергоефективного керування обладнанням холодильної установки є забезпечення рівності між кількістю холоду, що який виробляється компресорно-конденсаторним агрегатом (ККА) і його споживанням камерою з продукцією (навантаженням на випарник повітроохолоджувача). Необхідно, щоб регламентовані параметри повітряного середовища камери, які забезпечують оптимальне протікання процесу зберігання продукції і нормовану схоронність при цьому, підтримувалися на заданому значенні.

Для реалізації загального завдання досліджень необхідно вирішити такі часткові задачі:

— провести аналіз технологічного процесу холодильного зберігання, математичного опису тепломасообмінних процесів;

— провести системний аналіз об'єкта автоматизації;

— проаналізувати вплив режимних параметрів (технологічного мікроклімату) холодильної установки на об'єкт зберігання і обґрунтувати (визначити) показник який найбільш інформаційно відтворює технологічні і енергетичні характеристики об'єкту керування (теплове навантаження об'єкту для вибору каналів керування);

— провести дослідження математичних моделей динамічних режимів і визначити адекватність моделей;

— створити удосконалену систему (нейроінформаційну) та провести порівняльний аналіз із традиційною статичною моделлю.

Висновки до розділу

1. Збереження овочів, фруктів і плодів пов'язане із їх втратами. Втрати вологи і маси (сухої) знаходяться в прямій залежності від тепловологовиділень продукту, пов'язаним з процесами дихання і випаровування і відповідно від зовнішніх теплопритоків до охолоджуючого повітря. Тому найважливішою вимогою до охолоджуючих систем овочесховищ є швидке охолодження і підтримка рівномірного за об'ємом і стабільного в часі температурно-вологісного режиму в усій масі зберігаємої продукції.

2. На холодильниках сучасних плодоовочесховищ найбільше розповсюдження отримала повітряна система охолодження з загальнообмінною системою вентиляції, яка залишається перспективною і на найближчий час. Автоматизовані установки безпосереднього охолодження повітря з повітроохолоджувачем (випарник з примусовим рухом повітря), враховуючи значну теплову інерційність об'єктів охолодження використовують двопозиційне регулювання температури повітря, способом "пуск–зупинка" компресора.

3. В більшості випадків системи автоматичного регулювання параметрів в холодильних камерах розроблені без урахування взаємних впливів технологічних параметрів, недостатньо обґрунтовані структури і закони регулювання окремих елементів обладнання, а також місце установки датчиків температури і вологості повітря. Використання в якості регулюємого параметра – "середньої" температури повітря при встановленні датчика в геометричному центрі камери призводить до великих коливань температури ($\pm 2.5 \dots 3^\circ\text{C}$), що, у свою чергу, збільшує втрати продукту. В загальному випадку питання регулювання параметрів мікроклімату сховищ до сих пір не отримали повного рішення.

4. Однією із науково-технічних задач при оптимізації роботи систем охолодження овочесховищ є створення нових способів керування, основаних на енергозберігаючих принципах, комплексних (системних) дослідженнях тепломасообмінних процесів у сховищах з машинною системою охолодження.

5. Існуючі методи математичного опису окремих елементів холодильної установки без урахування їх взаємозв'язку між собою в загальному контурі установки не дозволяють врахувати специфіку конструктивних особливостей, які визначають ефективність роботи системи керування, енерговитрати і схоронність охолоджуємого продукту. Таким чином досліджується не вся холодильна установка, а тільки окремі апарати, що не дає можливості синтезувати систему автоматичного керування режимами роботи всього обладнання. Все це вказує на нераціональність використання відомих молей окремих ланок без їх зв'язку між собою необхідність створення комплексної математичної моделі холодильної установки.

6. Практична експлуатація холодильних установок плодоовочесховищ відбувається при неповній інформації про стан об'єкта керування, що ускладнює застосування класичних методів оптимального керування. Разом з тим, в наш час створена можливість організації іншого підходу до синтезу системи автоматизації керування температурно-вологісними режимами холодильних установок, який полягає у використанні теорії нечіткої логіки для вирішення наукової задачі автоматизації керування процесом холодильного зберігання овочевої продукції в умовах часткової невизначеності цього процесу і створенні інтелектуальних систем керування.

2 ДОСЛІДНА ЧАСТИНА

2.1 Режимні фактори, що впливають на втрати продукції при охолодженні та зберіганні

Щоб зменшити втрати продукції під час зберігання, необхідно підтримувати стабільний температурно-вологісний режим у сховищі. Енергоефективність може бути підвищена за рахунок узгодження теплового навантаження від охолоджуваних продуктів із зовнішніми теплонадходженнями та холодопродуктивністю холодильного обладнання. Значні добові й сезонні коливання теплового навантаження створюють труднощі при виборі потужності холодильних установок, які, як правило, проєктуються на максимальні теплопритоки. Це дозволяє одночасно зменшити втрати продукції (що виникають через нестабільність режимних параметрів у сховищі) та оптимізувати енергоспоживання, оскільки наявні методики й моделі роботи систем охолодження орієнтовані здебільшого на незмінне навантаження. Задачі зниження втрат продукції та втрат енергії розв'язуються система підтримки прийняття рішень (СППР) на основі комп'ютерних процедур діагностики стану середовища, продукту зберігання і енергоспоживання. Основним інструментом, що забезпечує процедуру СППР, є прогнозування втрат маси продуктом при різних умовах зберігання.

Проведений аналіз літературних джерел [2,7] дає змогу аргументовано стверджувати, що основні втрати продукції при зберіганні за допомогою холодильного обладнання зумовлені порушенням технологічних регламентів, причиною яких є коливання теплопритоків. Опубліковані методи розрахунків втрати маси (усушка) не враховують певних чинників, зокрема не-стаціонарність процесу, а тому їх використання для одержання інформації про стан продукту не може забезпечити потрібної точності. Поточні витрати енергії не контролюються. Практично регулюються тільки середньо-об'ємні значення температури або вологості повітря у приміщенні зберігання, що призводить до підвищення коливань цих параметрів і відповідно втрат продукту. З огляду на значну кількість та складність зв'язків у системі "сховище-продукт-холодильна

машина", цю систему можна розглядати як об'єкт із зосередженими параметрами які на вході стабілізуються, а на виході контролюються, даючи змогу одержати інтегральні характеристики процесів (нагрівання, охолодження, зволоження), а перехідні процеси описати системою звичайних диференціальних рівнянь, тобто представити детермінованою математичною моделлю, при якій вплив випадкових значень збурень можна визначити за зміненням вихідних параметрів у реальному часі, та за їх значеннями коригувати керуючі дії.

2.2 Опис об'єкта та методики досліджень роботи холодильної установки

Об'єктом керування виступає холодильна установка для зберігання плодоовочевої продукції, яка є складною технічною системою та включає камеру холодильного зберігання. У ній розташовано сам охолоджений продукт, а також обладнання для підтримання необхідних параметрів: повітроохолоджувачі трубчасто-оребреного типу 5MBV30-1-2-020, компресорно-конденсаторний агрегат (ККА) типу MBV20x2-2-2 з компресором 5ПБ20-2-024 та електричний зволожувач повітря.

Будівля плодоовочесховища складається з окремих камер для зберігання продуктів та машинного відділення з холодильним обладнанням (рис. 2.1). У камері 1 розташовано продукцію (фрукти чи овочі, розміщені у контейнерах), продукція сформована в штабелі 2 з технологічними проходами для персоналу та транспорту. Камера не є герметичною, а тиск у ній відповідає атмосферному.

Приміщення обладнане системою охолодження та розподілу повітря 3 для підтримання низької температури. Повітроохолоджувач разом із вбудованими вентиляторами підключений до ККА 4, розміщеного поза цією камерою. Вологість повітря регулюється за допомогою парозволожувача 5, що подає пару вприскуванням в об'єм камери. Відведення талої води з поверхні повітроохолоджувача здійснюється через піддон 6.

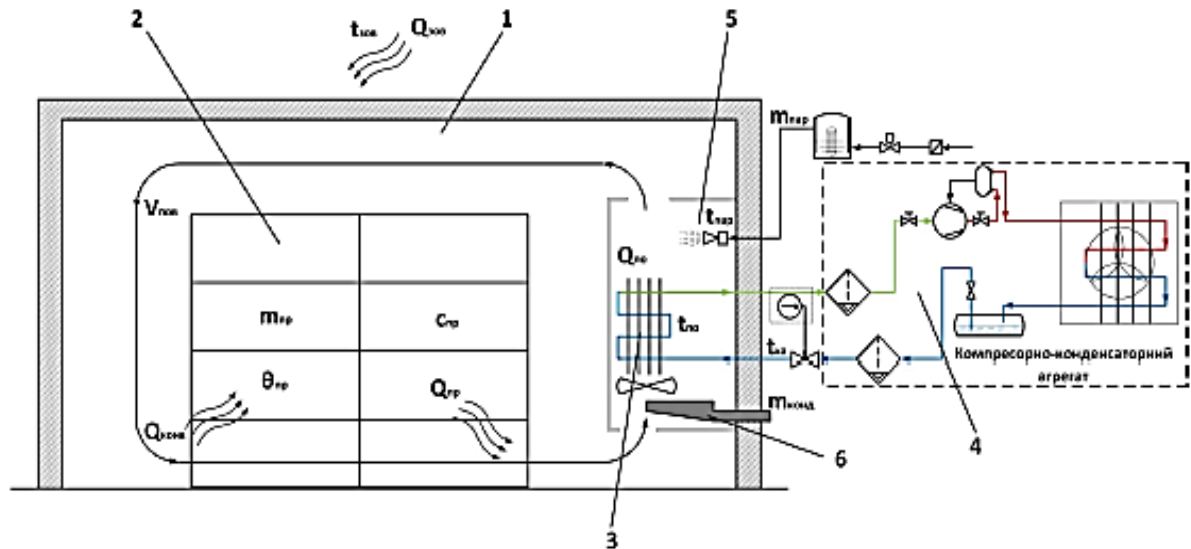


Рисунок 2.1- Схема холодильної установки

Дослідження температурно-вологісних режимів холодильної камери виконувались при наявності впливу зовнішніх факторів – збурень у вигляді добової зміни температури повітря, вологості повітря і сонячної інсоляції. Ці параметри контролювали вимірами зовнішньої температури і вологості поряд з будівлею (верхнього покриття).

2.3 Методика створення системи управління холодильним обладнанням овочесховищ на основі апарату нечіткої логіки

Задача забезпечення мінімальних втрат продукції, вирішується шляхом регулювання температурного та вологісного режиму в межах, обумовлених нормативними матеріалами на зберігання продукції. Виходячи з умов енергозбереження та ефективного використання електричної енергії необхідне часове (на протязі часу) узгодження теплового навантаження на охолоджуючі прилади (які зумовлено внутрішніми і зовнішніми теплопритоками з холодопродуктивністю ККА. Значна добова та сезонна нерівномірність теплового навантаження на холодильну камеру і відповідно на ККА, "пікові сплески" теплових надходжень при відкриванні дверей, поточне розвантаження сховища практично виключають використання традиційних способів регулювання параметрів повітря, для забезпечення нормованого рівня зберігання продукції [2].

Одним з ефективних напрямів рішення задач керування об'єктами з нелінійними багатопараметричними характеристиками в умовах повної або часткової невизначеності є використання апарату нечіткої логіки з нейромережевою адаптацією [10].

Переваги застосування нечіткої логіки та нейронних мереж:

- здатність ефективно працювати в умовах невизначеності щодо властивостей вхідних сигналів;
- висока надійність роботи при значній кількості вхідних змінних порівняно з відомими традиційними системами.

Недоліки нейронних мереж:

- значна тривалість процесу навчання;
- складність у дослідженні структури вже «навченої» мережі, що унеможлиблює її оптимізацію;
- відсутність можливості використання апріорних знань для прискорення навчання.

Недоліки роботи систем на основі нечіткої логіки:

- відсутність механізму автоматичного здобуття нових знань у процесі роботи;
- необхідність поділу універсальних множин на «підобласті», що обмежує кількість можливих вхідних параметрів.

Щоб підвищити ефективність роботи систем та об'єктів управління нам необхідно усунути зазначені недоліки. Це можливо реалізувати шляхом побудови гібридних нейронних мереж, у яких висновки формуються на базі системи нечіткої логіки, а функції належності можуть адаптуватися алгоритмами навчання цих нейронних мереж. Такі системи здатні не лише враховувати апріорні знання, але й набувати нових у процесі роботи.

Інакше кажучи, нечітка нейронна мережа являє собою нейронну структуру з чітко визначеними сигналами, ваговими коефіцієнтами та активаційною функцією, в якій для інтеграції елементів застосовуються t -норми або деякі інші

операції [11, 12]. З огляду на це, системи регулювання температурно-вологісних режимів у холодильних камерах плодоовочесховищ доцільно розглядати як такі, що функціонують в умовах невизначеності та нечіткої інформації.

Тому для синтезу енергоефективної САК доцільним є створення продукційної моделі, яка відображує процес зберігання продукції у холодильній камері плодоовочесховищ із використанням апарату адаптивної мережі нечіткого виводу ANFIS. Для створення такої моделі доцільно використати нейронні мережі для отримання лінгвістичної бази основних позицій для нечіткої логіки на базі регресивної залежності керувальних параметрів від збурень (t_z) і керуючих дій. Для розробки ЕС режиму роботи холодильної установки використовується статична модель, яку можна отримати числовим факторним експериментом на основі регресивної статичної характеристики об'єкта. Для отримання статичної моделі було визначено групу факторів, що більше за всіх впливають на режим роботи холодильної установки, та встановлено рівні їх варіювання (табл. 2.1). В матрицю планування були внесені: витрати повітря, температура повітря на виході з камери та зовнішня температура повітря, внутрішні теплові навантаження (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Фактори, що впливають на режим роботи холодильної установки

№	Фактори	Позначення	Рівні варіювання
1	Витрати повітря, кг/с	X1	0,1...1,7
2	Температура повітря на виході з камери, °C	X2	1...9
3	Температура зовнішнього повітря, °C	X3	1... 25
4	Внутрішні теплові навантаження, Вт	X4	100... 1500

2.4 Обґрунтування енергоефективного керування режимами холодильного зберігання овочевої продукції.

Як відомо з літератури, холодильна установка підбирається та проектується на максимальну холодопродуктивність Q_{0MAX} залежно від теплового навантаження на повітроохолоджувач Q_{no} (які розраховуються на максимальні річні теплопритоки): $Q_{0MAX} = (1,1 \dots 1,2) \cdot Q_{noMAX}$. Але на поточних змінних (добових, сезонних) режимах холодильна установка виробляє, а об'єкт споживає, значно менше холоду, тобто $Q_0 \leq Q_{0MAX}$. З точки зору максимальної енергетичної ефективності (економічності), задача автоматичного регулювання мікрокліматичних параметрів у сховищах зводиться до підтримання холодопродуктивності на рівні, що дорівнює фактичному навантаженню на повітроохолоджувачі. Таким чином, сутність енергоефективного керування зводиться до наступного:

1. Підтримання стабільної температури повітря на вході в камеру – здійснюється автоматичним регулюванням подачі холодоагенту у випарник за допомогою терморегулювального клапана, керованого сигналом від датчика температури повітря на виході з повітроохолоджувача.

2. Керування холодопродуктивністю компресора – відбувається залежно від температури повітря, що виходить із камери (контроль за допомогою датчика на вході повітроохолоджувача), шляхом регулювання об'ємної подачі холодоагенту через зміну частоти обертання вала компресора.

3. Моніторинг (поточна ідентифікація) стану об'єкта. Він здійснюється за параметрами:

- інтенсивність зменшення маси;
- різниця вологовмісту повітря на вході і виході повітроохолоджувача.

Функціональна схема САК приведена на рис. 2.2, а структура запропонованої системи керування режимами для холодильного зберігання продукції показана на рис. 2.3.

САК режимом холодильного зберігання, що пропонується в роботі, ґрунтується на енергоощадному принципі, за яким подача холоду узгоджується

з актуальними потребами камери. Іншими словами, у разі зростання теплових надходжень (наприклад, добових коливань) пропорційно збільшується й обсяг виробленого холоду.

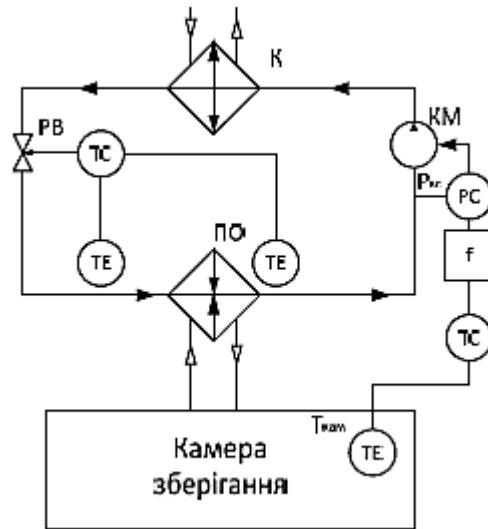


Рисунок 2.2 – Зображення функціональної схеми узагальненої моделі САК при холодильному зберіганні продукції

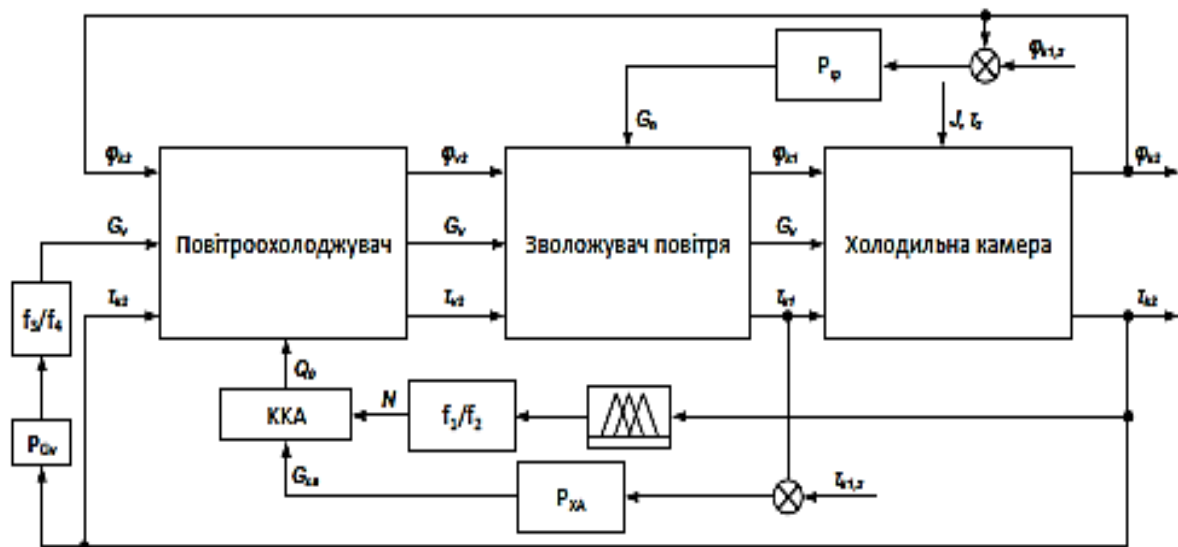


Рисунок 2.3 - Схема узагальненої САК холодильного обладнання в овочесховищі з використанням нечіткого регулятора: P_{Gv} – регулятор витрат повітря повітроохолоджувача; P_{XA} – регулятор подання (рідкого) холодоагенту у повітроохолоджувач; P_{ϕ} – регулятор повітрозволожувача.

2.5 Енергетична ефективність процесу керування температурно-вологісними режимами

Критерієм, що визначає енергоємність процесу холодильного зберігання продукції, можуть бути питомі витрати енергії, які визначаються співвідношенням:

$$e = \frac{N_k \cdot \tau_{ox}}{G_{np} - \Delta G} \rightarrow \min, \quad (2.1)$$

де N_k – потужність компресора, кВт; τ_{ox} – час охолодження, год; G_{np} – маса продукції в камері (на початку зберігання), т; ΔG – втрати продукції в камері за час τ_{ox} , т. Вони складають орієнтовно ($3 \leq \Delta G \leq 6$) %. Потужність на валу компресора в загальному вигляді можна визначити зі співвідношення:

$$N_k = \frac{\xi \cdot Q_o}{\left(\frac{T_o}{T_{kx}} + b \cdot t_o \right) \cdot \eta_{мех} \frac{q_o}{l_o}}, \quad (2.2)$$

де ξ – коефіцієнт, що враховує втрати при транспортуванні холоду; Q_o – навантаження на повітроохолоджувач (випарник), Вт; T_o , t_o – температури кипіння (в °К і °С) холодоагенту; T_{kx} – температура конденсації холодоагенту, °К; b – постійний коефіцієнт, для фреонових компресорів він рівний $b=0,0025$; q_o – холодопродуктивність 1 кг холодоагенту; l_o – теоретична робота стискання за цикл.

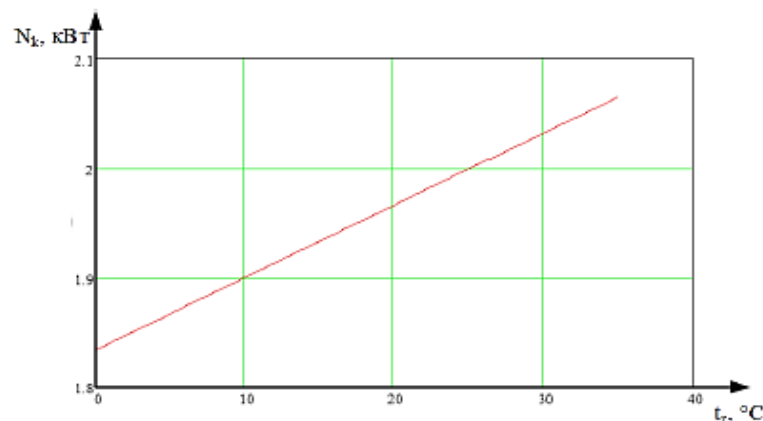


Рисунок 2.4 – Залежність потужності на валу компресора від зміни температури зовнішнього повітря

На рис. 2.4 зображено залежність потужності компресора від зміни температури зовнішнього повітря. Графік зміни потужності у часі при зміні теплового навантаження приведений на рис. 2.5.

Використання температури повітря на вході в повітроохолоджувач ("вихід" повітря з камери) дозволяє враховувати зміну теплових надходжень до камери і змінювати потужність компресора у відповідності до теплопритоків, як зовнішніх так і внутрішніх (тепловиділення). На основі аналізу узагальненої статичної характеристики, що пов'язує холодопродуктивність ККА з питомою холодопродуктивністю (об'ємною) та об'ємною витратою холодильного агенту, величина якої зв'язана з конструктивними особливостями компресора, проаналізовано можливі способи регулювання.

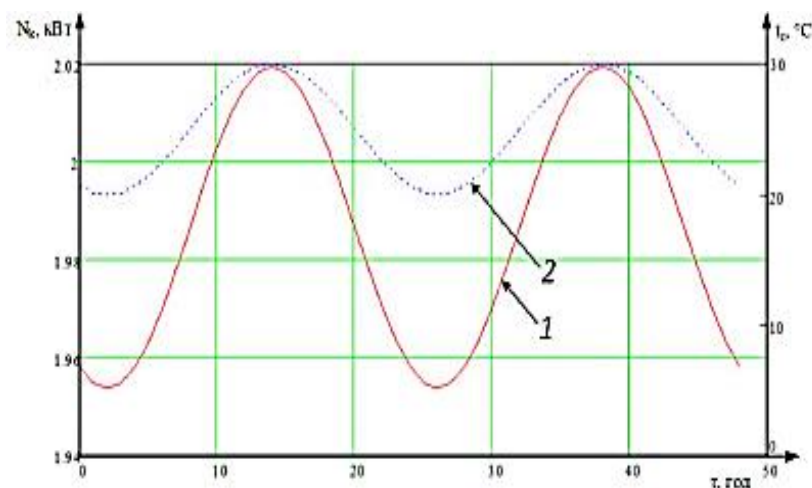


Рисунок 2.5 – Залежність потужності компресора (1) від зміни температури зовнішнього повітря (2) в часі

Величина холодопродуктивності компресора визначається відомим співвідношенням :

$$Q_0 = \left[V_{\text{ц}} \cdot Z \cdot \lambda \cdot n \frac{\tau_p}{\tau_{\text{ц}}} \right] \cdot q_v, \quad (2.3)$$

де $V_{\text{ц}}$ – робочий об'єм циліндрів компресора, м^3 ; Z – кількість циліндрів; λ – коефіцієнт подачі компресора; n – частота обертання валу компресора; τ_p –

циклічна тривалість роботи компресора; $\tau_{ц}$ – період циклу; q_v – питома холодопродуктивність холодильного агента, кДж/м³.

Основні способи регулювання холодопродуктивності, які мають практичну реалізацію:

- зміна коефіцієнта робочого часу – часу роботи компресора (двопозиційне регулювання температури в камері «вмикання – вимикання»);
- зміна частоти обертання валу компресора.

Розглянемо найбільш розповсюджений спосіб регулювання температури в камері «пуск-зупинка» компресора по сигналу датчика температури в камері (рис. 2.6). Аналіз процесу регулювання температури повітря в камері охолодження в середовищі «CoolPack» при постійному значенні холодопродуктивності компресора і при зміні холодопродуктивності пропорційно величині теплопритоків дозволив визначити наступне:

- при регулюванні температури в камері двопозиційним способом із зміною кількості холодильного агента в холодильній установці потужність компресора (споживана) зменшується, при цьому різниця збільшується при збільшенні теплового навантаження;
- холодопродуктивність – витрачена теплова енергія на охолодження продукту практично однакова для обох способів регулювання.

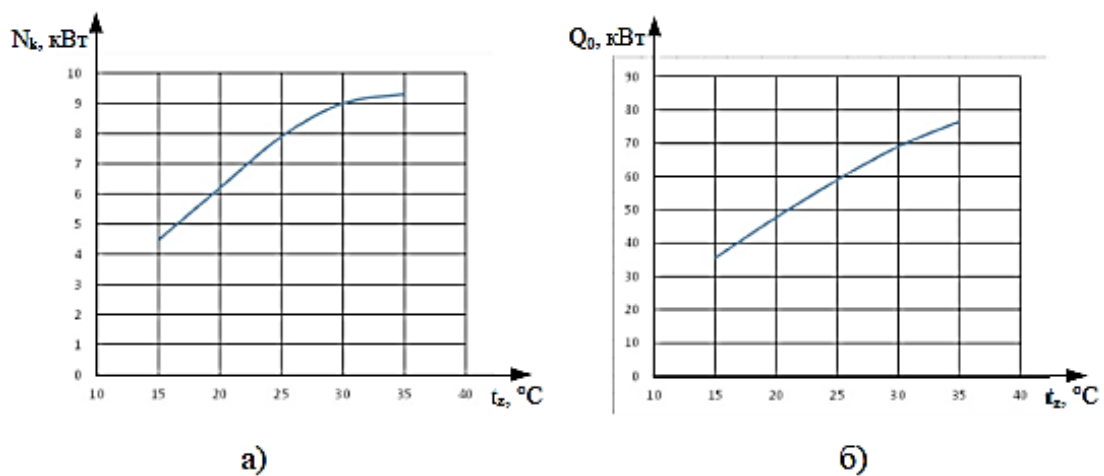


Рисунок 2.6 - Залежність потужності на валу компресора від зовнішньої температури повітря (а) та холодильної потужності повітроохолоджувача від зовнішньої температури повітря (б)

Останнє положення пояснюється самою сутністю двопозиційного регулювання – при зменшенні витрат холодильного агенту збільшується час роботи компресора та енергія залишається незмінною так як $N \cdot \tau_p = const$. Можна зробити висновок, що для більш ефективного керування компресорною установкою необхідно застосовувати безперервне регулювання кількості холодоагенту в контурі холодильної машини в функції температури на виході камери.

Висновки до розділу

1. Найбільш інформативним параметром, який характеризує стан об'єкта (інтенсивність тепловиділень продукту і зовнішніх теплопритоків в камеру), є температура повітря на "виході камери" або вході в повітроохолоджувач. І саме цей параметр визначаємо як регульовану величину.

2. Регулюючими параметрами доцільно прийняти: витрати повітря і холодильного агенту, за умов стабілізації температури на вході в камеру, бо в цьому випадку збільшення витрат повітря призводить до пропорційного збільшення "кількості холоду".

3. За умови стабілізації температури повітря на виході з системи повітроохолодження холодопродуктивність ККА доцільно змінювати у функції температури повітря на її вході. Це дозволить регулювати холодопродуктивність компресора у повній відповідності до теплових надходжень в камеру або навантаженню на випарник повітроохолоджувача.

4. Для синтезу безперервної багатоконтурної САК температурно-вологісними режимами визначаємо статичну математичну модель залежності потужності компресора (відповідно до його холодопродуктивності) від параметрів: t_{k2} , t_{v2} , G_v . Отримана математична модель може бути використана для розробки навчаємої адаптивної ЕС.

5. Для дослідження динаміки САК необхідно визначити також й динамічні характеристики об'єкту керування (всіх його елементів, що входять в контур САК).

3 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ОБЛАДНАННЯ ХОЛОДИЛЬНОЇ УСТАНОВКИ

3.1 Математична модель динамічних режимів холодильної камери плодовоовочесховища

Для побудови систем автоматичного керування температурно-вологісними режимами необхідно мати математичні моделі, що описують динаміку процесів у складових елементах обладнання, в приміщенні та в продукції, яка охолоджується чи зберігається (з урахуванням тепловиділення під час відтаювання повітроохолоджувачів). Такі моделі повинні максимально точно відтворювати фізичну природу явищ, головним чином процесів тепло- і масообміну, враховувати основні взаємозв'язки між параметрами та дією збурювальних факторів як зовнішнього, так і внутрішнього походження, що спричиняють зміни температурно-вологісних умов і, відповідно, суттєві втрати продукції, які відбуваються в обладнанні, штабелях або насипах продукції та в камері. Водночас вони мають враховувати основні взаємозв'язки між параметрами та дією збурювальних факторів як зовнішнього, так і внутрішнього походження, що спричиняють зміни температурно-вологісних умов і, відповідно, втрати продукції. З літератури відомо ряд математичних і структурних схем моделей [8, 14] технологічних процесів кондиціонування мікроклімату та процесів тепло- і масообміну при взаємодії кондиційованого повітря з рослинною – "дихаючою" продукцією. На основі даної інформації і накопиченого досвіду в цьому розділі розроблено ряд моделей і структурних схем моделей тепло- та масообмінних процесів при охолодженні та зберіганні плодовоовочевої продукції з використанням штучного або природного холоду. В даному дослідженні моделі основних елементів (сховище з продуктом, повітроохолоджувач, зволожувач) (рис. 3.1), які містять інформацію про раніше не враховані фактори та враховують теплофізичні та масообмінні властивості об'єкта, повітря, будівлі, розглянуті в деякому наближенні, представлені як ряд об'єктів із зосередженими параметрами.

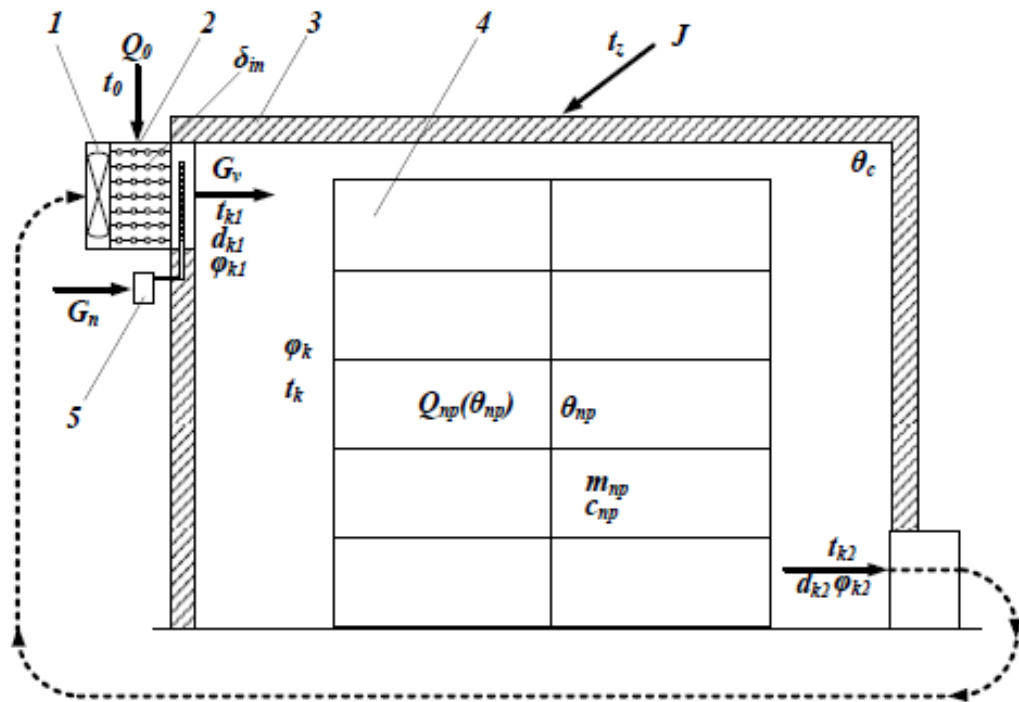


Рисунок 3.1- Технологічна схема процесу холодильного зберігання овочевої продукції: 1 – вентилятор, 2 – повітроохолоджувач, 3 – стіни камери, 4 – плодоовочева продукція, що зберігається в контейнерах, 5 – парозволожувач; t_0 – температура кипіння холодоагенту, t_k – температура повітря в камері, δ_{in} – товщина інею, Q_0 – холодопродуктивність ККА, G_v – витрати повітря, θ_{ox} – температура поверхні повітроохолоджувача, G_n – витрати пари на зволоження, d_k – вологовміст повітря в камері, ϕ_k – вологість повітря в камері, θ_c – температура огороження, θ_{np} – температура продукції, t_{k2} – температура повітря на виході з камери, ϕ_{k2} – вологість повітря на виході з камери, J – інтенсивність сонячного випромінювання, t_z – температура зовнішнього повітря.

Камера холодильного зберігання плодоовочевої продукції являє собою об'єкт, що складається з чотирьох-п'яти ланок – ємностей, кожна з яких є джерелом виділення або поглинання теплоти і вологи: огороження, продукт, що зберігається, повітря в міжштабельному просторі, повітроохолоджувач, зволожувач. Процеси в камері як об'єкті керування можна характеризувати такими основними параметрами.

Регульовані параметри: температура на виході з камери, вологість повітря на вході в камеру, температура кипіння холодоагенту, витрати холодоагенту, витрати повітря через повітроохолоджувач. Збурюючі параметри: температура поверхні огороження, тепловологовиділення продукту, інею утворення на поверхні охолоджувача. Відомо, що камери холодильного зберігання плодоовочевої продукції функціонують в умовах нестационарного температурно-вологісного режиму. Причинами порушення стаціонарних режимів зберігання продукції є сезонні і добові зміни температури зовнішнього повітря та інтенсивності сонячного випромінювання, періодичне видалення частини продукції, що зберігається, втрати холоду та надходження вологи при відкриванні дверей, позиційна САР температури холодильного агента. Коливання температури повітря в камерах призводить до виникнення теплових потоків і відведенні вологи, збільшення втрат продукції від усушки.

Для математичного опису перехідних процесів тепло- і масообміну в сховищах холодильного зберігання механізм обміну представимо повним балансом теплових і масових потоків. Теплота $Q_{пр}$, яка виділяється продуктом, частково витрачається на випаровування вологи $Q_{вип}$, частково відводиться від продукту охолоджувальним повітрям $Q_{пов}$ конвекційним шляхом та випромінюванням $Q_{л}$ до більш холодних поверхонь. Теплота, яка відводиться від продукту, дорівнює зниженню ентальпії продукту. Теплота оточуючого середовища (атмосферного повітря), яка передається поверхням огороження конвекційним шляхом та випромінюванням $Q_{з}$, витрачається на нагрівання огороження $Q_{огор}$ і передається повітрю камери конвекцією $κ$ $Q_{вн}$ та поверхням штабелів продукту випромінюванням $Q_{вн}$. Теплота, яка передана від поверхонь огороження, витрачається на нагрівання повітря та частково передається конвекцією до продукту. Волога від продукту відводиться під дією різниці парціальних тисків водяної пари в повітрі та на поверхні матеріалу та накопичується у вигляді снігової шуби на поверхні повітроохолоджувача. Таким чином реальний об'єкт керування є складним нелінійним об'єктом з

розподіленими параметрами, при цьому його динамічні властивості змінюються за часом і точний математичний опис в загальному вигляді є виключно складною задачею. Тому систему доцільно розділити на ланки, які будемо розглядати як об'єкти із зосередженими параметрами при таких загальноприйнятих припущеннях і спрощеннях. Теплофізичні параметри елементів системи та коефіцієнти тепло- і масообміну приймаємо постійними (незалежними від температури та вологості). Процеси теплообміну відбуваються за законом Ньютона, а масообміну за законом Дальтона. Поверхня масообміну набагато менша за поверхню теплообміну і її співвідношення характеризується величиною коефіцієнта ε_u (дод. В). Теплообмін випромінювання враховується ефективним коефіцієнтом теплообміну

$$\alpha' = (\alpha_k + \delta \cdot \alpha_l) , \quad (3.1)$$

де α_k , α_l – коефіцієнт теплообміну конвекцією та випромінюванням (лінеаризований); δ – ваговий коефіцієнт;

$$\alpha_l = \psi \cdot \varepsilon_{np} \cdot c_0 \cdot \left[\left(\frac{\theta_c}{100} \right)^4 - \left(\frac{\theta_{np}}{100} \right)^4 \right] , \quad (3.2)$$

де ψ – коефіцієнт опромінюваності; ε_{np} – приведений коефіцієнт чорноти поверхні стіни та продукту; c_0 – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла.

Для врахування теплового внутрішнього опору огороження вводимо коефіцієнти теплопередачі стіни:

а) зовнішній

$$\frac{1}{\alpha_{c,z}} = \frac{1}{\alpha'_z} + \sum \frac{\delta_z}{\lambda_c} , \quad (3.3)$$

б) внутрішній

$$\frac{1}{\alpha_{c,v}} = \frac{1}{\alpha'_v} + \sum \frac{\delta_v}{\lambda_c} , \quad (3.4)$$

де α_z' – коефіцієнт теплообміну із зовнішньої поверхні огороження; α_v' – коефіцієнт теплообміну із внутрішньої поверхні огороження; δ_z , δ_v – половина товщини стіни та даху; λ_c – коефіцієнт теплопровідності матеріалу стінки.

Тепловий внутрішній опір плодів враховується поправкою до коефіцієнта теплообміну між повітрям і поверхнею елементів продукту та, відповідно до [7], визначається заміною останнього на сумарний коефіцієнт теплопередачі

$$\alpha_{np} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{np}'} + \frac{R}{\psi' \cdot \lambda}} \quad (3.5)$$

де ψ' – коефіцієнт форми; R – радіус плоду. З урахуванням зроблених спрощень та припущень математичну модель представимо повними балансами теплових і вологісних потоків.

При цьому приймаємо, що камера холодильного зберігання, як об'єкт керування, складається з вищенаведених ланок: продукт, огороження, повітря в міжштабельному просторі, повітроохолоджувачі, зволожувачі.

Тепловий баланс огорожувальних конструкцій описується рівнянням

$$\sum c_c \cdot m_c \frac{dQ_c}{d\tau} = -Q_{c.s} + Q_{c.z} + Q_{c.p} \quad (3.6)$$

Тепловий баланс продукту, що зберігається, описується рівнянням

$$(m_{np} \cdot c_{np} + m_m \cdot c_m) \frac{dQ_{np}}{d\tau} = Q_{np} - Q_{sun} - Q_{np-n} \quad (3.7)$$

Тепловий баланс повітря в камері описується рівнянням

$$0.5 \cdot m_v \cdot c_p \frac{dt_{k2}}{d\tau} = Q_{c.s} + Q_{np-n} - Q_{G_2} + Q_{G_1} + Q_{G_n} \quad (3.8)$$

Повний матеріальний баланс повітря в камері описується рівнянням

$$m_{vk} \frac{dd_{k2}}{d\tau} = W_{sun} - W_{G_2} + W_{G_1} \quad (3.9)$$

В рівняннях (3.6) – (3.9) позначено:

- тепловий потік від внутрішньої поверхні до повітря в камері:

$$Q_{c.v} = \alpha'_{c.v} \cdot f_{c.v} \cdot (\theta_c - t_k); \quad (3.10)$$

- тепловий потік від зовнішнього повітря до огороження:

$$Q_{c.z} = \alpha'_{c.z} \cdot f_{c.z} \cdot (t_z - \theta_c); \quad (3.11)$$

- теплоприток від сонячного випромінювання:

$$Q_{c.p} = J \cdot F_{sv} \cdot \varphi_v; \quad (3.12)$$

- теплоприток від продукту за рахунок самозигрівання:

$$Q_{np} = m_{np} (a_1 + b_1 \cdot \theta_{np}); \quad (3.13)$$

- витрати теплоти на випаровування вологи:

$$Q_{sun} = r_0 \cdot \beta \cdot f_u \cdot \varepsilon_u \cdot (a \cdot \theta_{np} + c - b \cdot d_k); \quad (3.14)$$

- тепловий потік між продуктом і повітрям в камері:

$$Q_{np-n} = \alpha_{np} \cdot f_{np} \cdot (\theta_{np} - t_k); \quad (3.15)$$

- тепловий потік, що відводиться з повітрям камери:

$$Q_{G2} = G_v \cdot c_p \cdot t_{k2}; \quad (3.16)$$

- тепловий потік, що підводиться до камери повітрям від охолоджувача:

$$Q_{G1} = G_v \cdot c_p \cdot t_{k1}; \quad (3.17)$$

- теплота, що поступає з вологою від парогенератора (враховується тільки при зволоженні повітря паром):

$$Q_n = G_n \cdot c_n \cdot (t_n - t_k); \quad (3.18)$$

- вологоприток від продукту:

$$W_{sun} = \beta \cdot f_u \cdot \varepsilon_v \cdot (a \cdot \theta_{np} + c - b \cdot d_k); \quad (3.19)$$

- вологовідведення з повітря камери шляхом конденсації (інеюутворення) на поверхні охолоджувача (враховується при розрахунку з охолоджувачем):

$$W_{G1-2} = G_v \cdot (d_{k2} - d_{k1}), \quad (3.20)$$

Розкриваючи значення складових Q_i та W_j , які входять до рівнянь (3.6 – 3.9) після відповідних перетворень з урахуванням (3.10 – 3.20) було отримано систему рівнянь, чисельний розв'язок якої був виконаний в середовищі MathCAD, цей розв'язок ілюструють графіки залежності $t_{k2} = f_1(\tau)$, $\theta_{np} = f_2(\tau)$, $d_{k2} = f_3(\tau)$, які наведені на рис. 3.2 – 3.4.

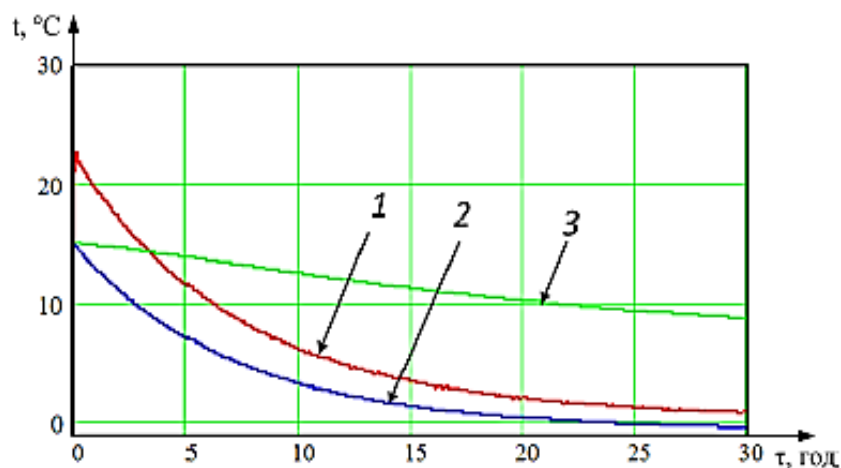


Рисунок 3.2 – Графік зміни температури повітря на виході з камери t_{k2} (1), температури покриття θ_c (3) (стіни та стеля) та температури продукту θ_{np} (2) у часі в процесі охолодження (при $G_v = 0.5$ кг/с)

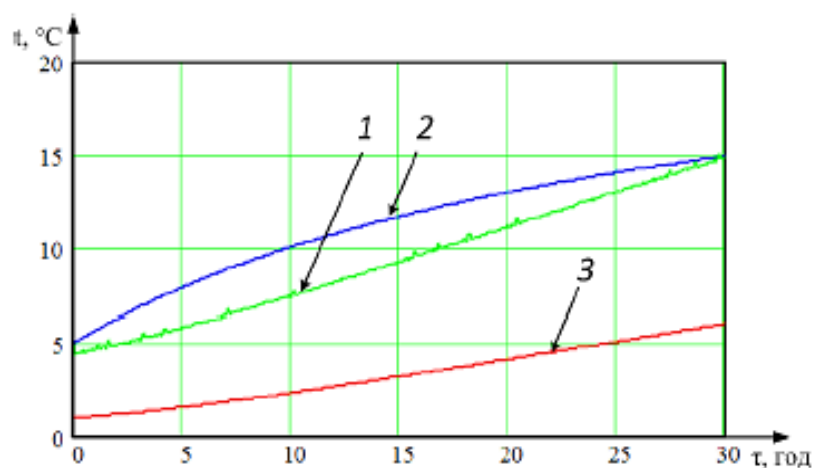


Рисунок 3.3 – Графік зміни температури повітря на виході з камери t_{k2} (1), температури покриття θ_c (3) (стіни та стеля) та температури продукту θ_{np} (2) у часі в процесі нагрівання (при $G_v = 0.01$ кг/с).

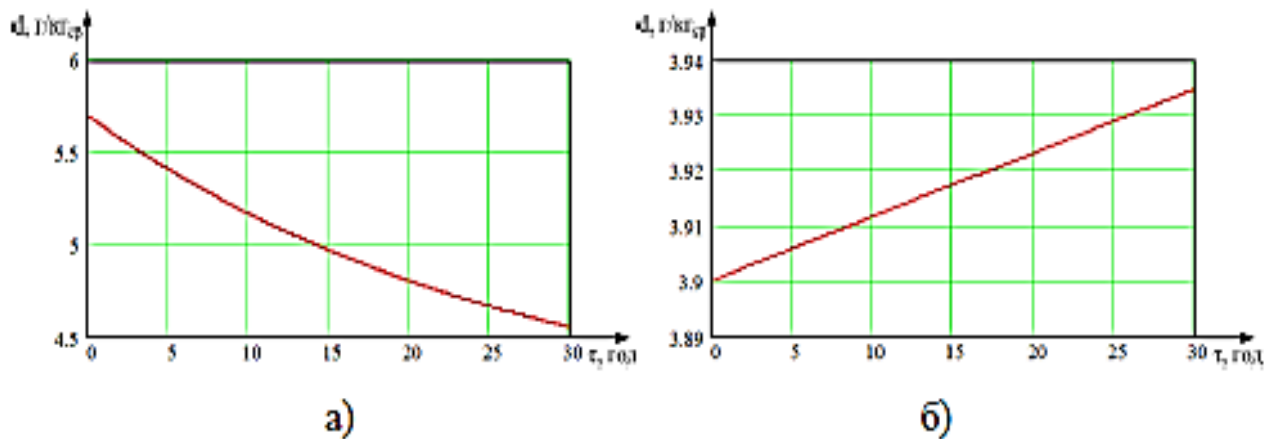


Рисунок 3.4 – Динаміка зміни вологовмісту повітря в камері в процесі охолодження (а) та нагрівання (б)

Відомо, що усушка продукту в процесі охолодження визначається виразом:

$$-G = \frac{dy}{d\tau} = r_0 \cdot \beta \cdot f_u \cdot \varepsilon \cdot (\alpha \cdot \theta_{\text{пр}} + c - b \cdot 0.5 \cdot (d_{k1} + d_{k2})) \quad (3.21)$$

Застосовуючи до вищеописаної системи рівнянь, чисельний розв'язок якої був виконаний в середовищі MathCAD, перетворення Лапласа при нульових початкових умовах, записуємо цю систему в операторній формі з врахуванням прийнятих позначень, які описують динаміку цього процесу:

$$(T_{k1} \cdot p + 1) \cdot t_{k2}(p) = \alpha_1 \cdot \theta_1(p) + b_1 \cdot \theta_{\text{пр}}(p) + c_1, \quad (3.22)$$

$$(T_{k2} \cdot p + 1) \cdot \theta_{\text{пр}}(p) = \alpha_2 \cdot d_{k2}(p) + b_2 \cdot t_{k2}(p) + c_2, \quad (3.23)$$

$$(T_{k3} \cdot p + 1) \cdot \theta_c(p) = \alpha_3 \cdot t_{k2}(p) + c_3, \quad (3.24)$$

$$(T_{k4} \cdot p + 1) \cdot d_{k2}(p) = \alpha_4 \cdot \theta_{\text{пр}}(p) + c_4. \quad (3.25)$$

Розв'язок системи рівняння (3.22) – (3.25) запишемо у вигляді передатних функцій за різними каналами, обумовлених взаємозв'язком залежних і незалежних змінних. Передатні функція по окремих каналах мають вигляд:

– температура повітря на вході в камеру:

$$W_{k1}(p) = \frac{t_{k1}(p)}{t_{k2}(p)} = k_{k1} \cdot \frac{Bk_3 \cdot p^3 + Bk_2 \cdot p^2 + Bk_1 \cdot p + 1}{Ak_4 \cdot p^4 + Ak_3 \cdot p^3 + Ak_2 \cdot p^2 + Ak_1 \cdot p + 1}, \quad (3.26)$$

де $k_{k1} = \frac{Bk_0}{Ak_0}$ – коефіцієнт передачі;

– температура повітря на виході камери – температура зовнішнього повітря (збурення):

$$W_{k2}(p) = \frac{t_{k2}(p)}{t_z(p)} = k_{k2} \cdot \frac{Ck_2 \cdot p^2 + Ck_1 \cdot p + 1}{Ak_4 \cdot p^4 + Ak_3 \cdot p^3 + Ak_2 \cdot p^2 + Ak_1 \cdot p + 1}, \quad (3.27)$$

де $k_{k2} = \frac{Ck_2}{Ak_0}$ – коефіцієнт передачі,

$$Ck_2 = \frac{-\alpha_1 \cdot c_z \cdot T_{k2} \cdot T_{k4}}{a_1 \cdot a_2 \cdot a_4 \cdot c_{3z} - a_1 \cdot c_{3z}}; \quad Ck_1 = \frac{-\alpha_1 \cdot c_z \cdot T_{k2} \cdot T_{k4}}{a_1 \cdot a_2 \cdot a_4 \cdot c_{3z} - a_1 \cdot c_{3z}};$$

$$Ck_0 = a_1 \cdot a_2 \cdot a_4 \cdot c_{3z} - a_1 \cdot c_{3z};$$

– температура повітря на виході камери – вологовміст повітря на вході в камеру:

$$W_{k3}(p) = \frac{t_{k2}(p)}{t_{k1}(p)} = k_{k3} \cdot \frac{Dk_2 \cdot p^2 + Dk_1 \cdot p + 1}{Ak_4 \cdot p^4 + Ak_3 \cdot p^3 + Ak_2 \cdot p^2 + Ak_1 \cdot p + 1}, \quad (3.28)$$

де $k_{k3} = \frac{Dk_0}{Ak_0}$ – коефіцієнт передачі; $Dk_2 = \frac{-b_1 \cdot c_{2z} \cdot T_{k3} \cdot T_{k4}}{-b_1 \cdot a_2 \cdot c_{4d} - b_1 \cdot c_{2d}};$

$$Dk_1 = \frac{-b_1 \cdot a_2 \cdot c_{4d} \cdot T_{k3} - b_1 \cdot c_{2d} \cdot T_{k4} - b_1 \cdot c_{2d} \cdot T_{k3}}{-b_1 \cdot a_2 \cdot c_{4d} - b_1 \cdot c_{2d}}; \quad Dk_0 = -b_1 \cdot a_2 \cdot c_{4d} - b_1 \cdot c_{2d};$$

– вологовміст повітря на виході камери – вологовміст повітря на вході в камеру :

$$W_{k4}(p) = \frac{d_{k2}(p)}{d_{k1}(p)} = k_{k4} \cdot \frac{Ek_3 \cdot p^3 + Ek_2 \cdot p^2 + Ek_1 \cdot p + 1}{Ak_4 \cdot p^4 + Ak_3 \cdot p^3 + Ak_2 \cdot p^2 + Ak_1 \cdot p + 1}, \quad (3.29)$$

де $k_{k4} = \frac{Ek_0}{Ak_0}$ – коефіцієнт передачі;

– вологовміст повітря на виході камери – температура повітря на вході в камеру:

$$W_{k5}(p) = \frac{d_{k2}(p)}{t_{k1}(p)} = k_{k5} \cdot \frac{Fk_2 \cdot p^2 + Fk_1 \cdot p + 1}{Ak_4 \cdot p^4 + Ak_3 \cdot p^3 + Ak_2 \cdot p^2 + Ak_1 \cdot p + 1}, \quad (3.30)$$

де $k_{k5} = \frac{Fk_0}{Ak_0}$ – коефіцієнт передачі.

Передавальні функції по каналах температура повітря на виході камери $t_{k2}(\tau)$ -витрати повітря G_v та вологовміст повітря на виході камери $d_{k2}(\tau)$ – витрати повітря, визначені шляхом графічної інтерпретації залежностей $t_{k2}(\tau) = f(G_v)$ та $d_{k2}(\tau) = f_1(G_v)$ отриманих розв'язків рівнянь мають вигляд:

$$W_{k6}(p) = \frac{t_{k2}(p)}{G_v(p)} = \frac{k_{k1}}{T_{k1} \cdot p + 1} e^{-p \cdot \tau}, \quad (3.31)$$

$$W_{k7}(p) = \frac{d_{k2}(p)}{G_v(p)} = \frac{k_{k1}}{T_{k1} \cdot p + 1} e^{-p \cdot \tau}, \quad (3.32)$$

де $T_{k1} = m_{vk}/G_v$.

Розглянемо можливість апроксимації розв'язку рівнянь (3.22) – (3.25) перехідних процесів у вигляді передавальних функцій (3.26) – (3.30) шляхом пониження порядку поліномів. Для цього оцінюємо значення порядку часу T_{k1} , T_{k2} , T_{k3} , T_{k4} . Аналіз числових значень коефіцієнтів при операторах четвертого - першого (другого) порядку виявив можливість знехтувати коефіцієнтами при операторах четвертого (p^4) і третього (p^3) порядків і з достатньою для інженерних розрахунків точністю прирівняти їх до нуля. Таким чином передатні функції рівнянь (3.22) – (3.25) можуть бути заміщені апроксимованими ланками другого порядку:

$$W(p) = \frac{k \cdot e^{-p \cdot \tau}}{T_1^2 \cdot p^2 + T_2 \cdot p + 1}. \quad (3.33)$$

Розроблена структурна схема камери холодильного зберігання овочевої продукції, як об'єкта автоматичного керування температурно-вологісними режимами (режим охолодження, режим зберігання) наведена на рис. 3.5. Залежність відносної вологості повітря від температури та вологовмісту в діапазоні зміни параметрів $t = (-2 \dots + 2)^\circ C$, $\varphi = (87 \dots 95)\%$, апроксимована лінійною залежністю:

$$\varphi = k_d \cdot d - k_t \cdot t. \quad (3.34)$$

В структурній схемі маємо чотири входи та три виходи. Вхідні параметри представлені: 1 – масовими витратами повітря G_v ; 2 – температурою повітря на вході в камеру t_{k1} ; 3 – вологовмістом повітря на вході в камеру d_{k1} ; 4 – збурювальними параметрами є температура зовнішнього повітря t_z і інтенсивність сонячного випромінювання, яка врахована в значенні умовної зовнішньої температури.

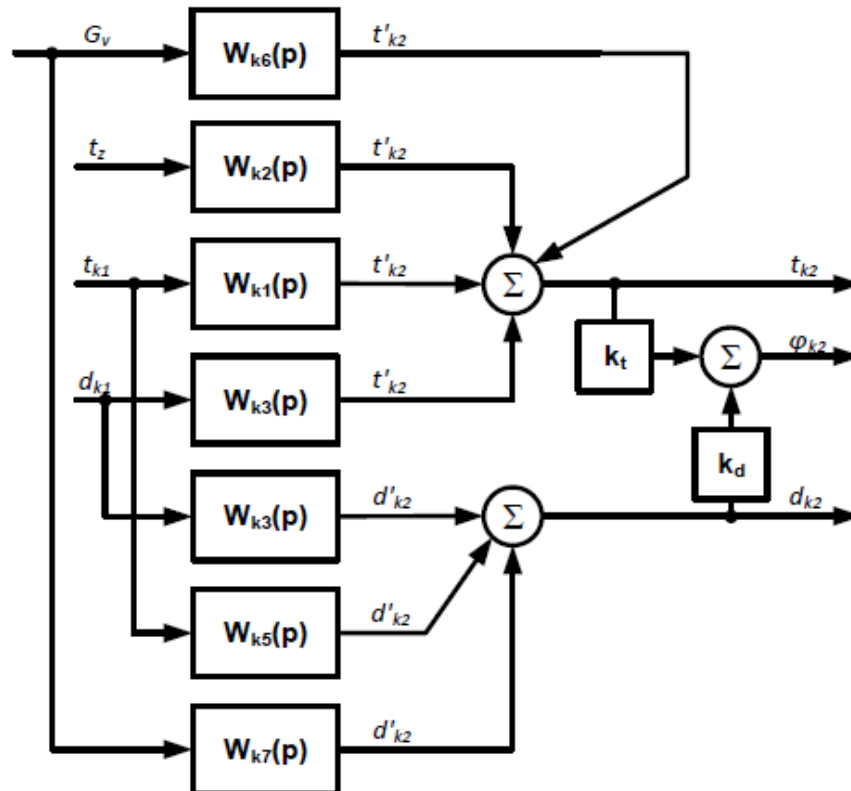


Рисунок 3.5 – Структурна схема камери холодильного зберігання плодовоовочевої продукції

Математичні моделі холодильної камери з продуктом, в які входить змінна величина витрат повітря, є нелінійними, так як містять добутки двох змінних параметрів $G_v \cdot t_{k1}$.

Для визначення перехідних процесів математична модель системи була реалізована в середовищі MATLAB/Simulink [18]. В результаті досліджень були отримані наступні характеристики змін параметрів:

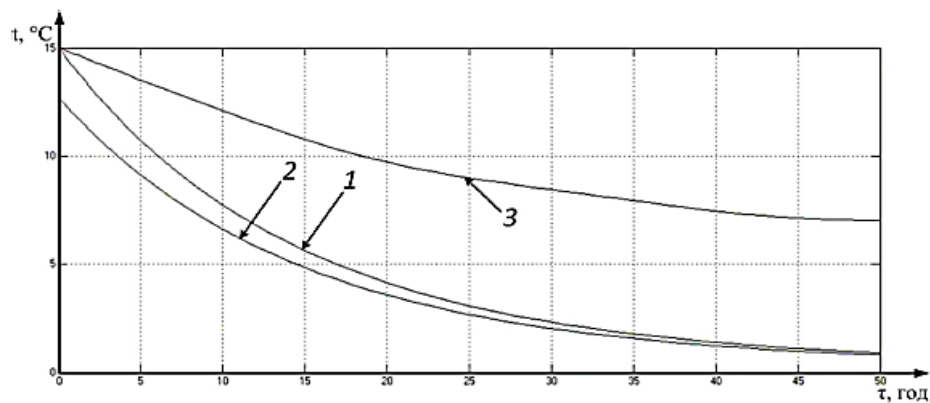


Рисунок 3.6 – Графіки зміни температури холодильної камери з продуктом зберігання в часі при охолодженні: 1 – температура продукції, 3 – температура повітря, 3 – температура огорожі (стін та даху)

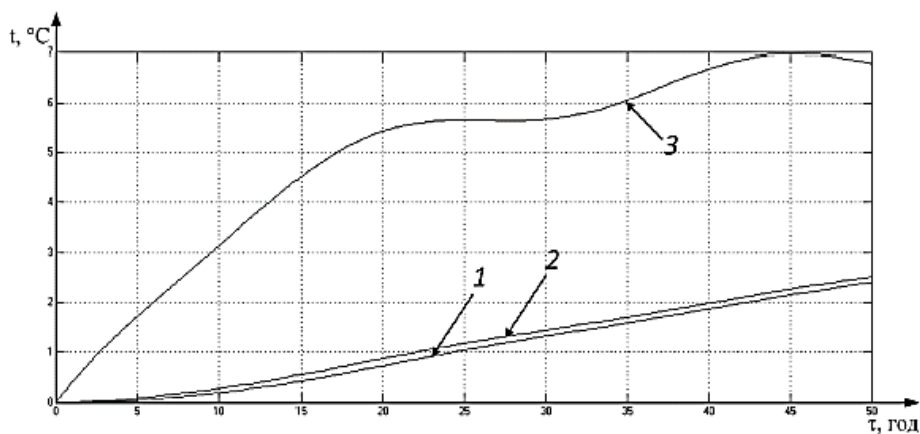


Рисунок 3.7- Графіки зміни температури холодильної камери з продуктом зберігання в часі при розігріві (вимкнена холодильна машина): 1 – температура продукції, 2 – температура повітря, 3 – температура огорожі (стін та даху)

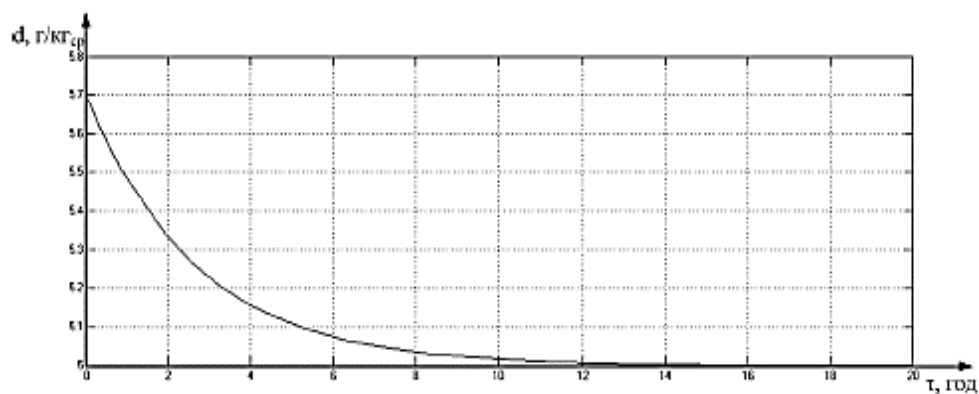


Рисунок 3.8- Графічна залежність зміни вологовмісту повітря у часі

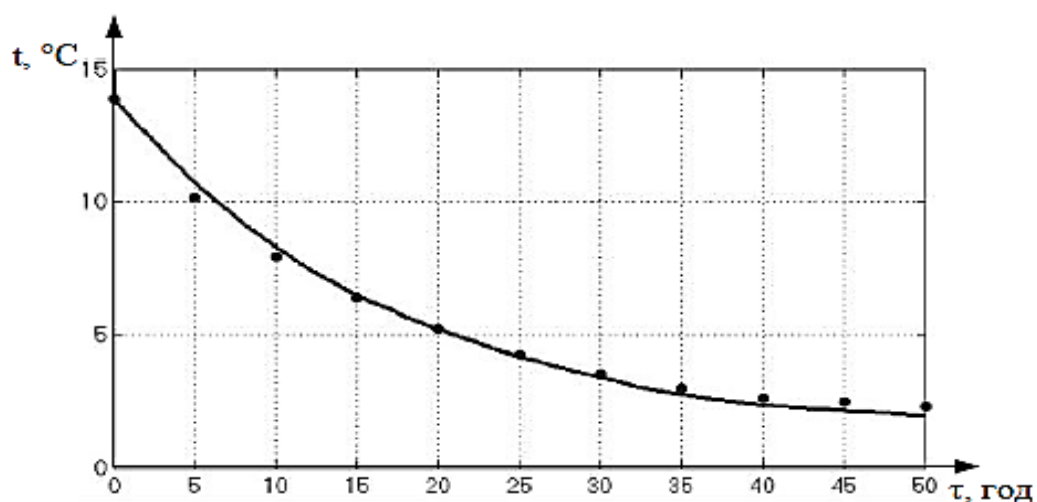


Рисунок 3.9 – Графік зміни температури повітря в холодильній камері з продуктом зберігання в часі при подачі охолодженого повітря в камеру (експериментальні дані - крапки)

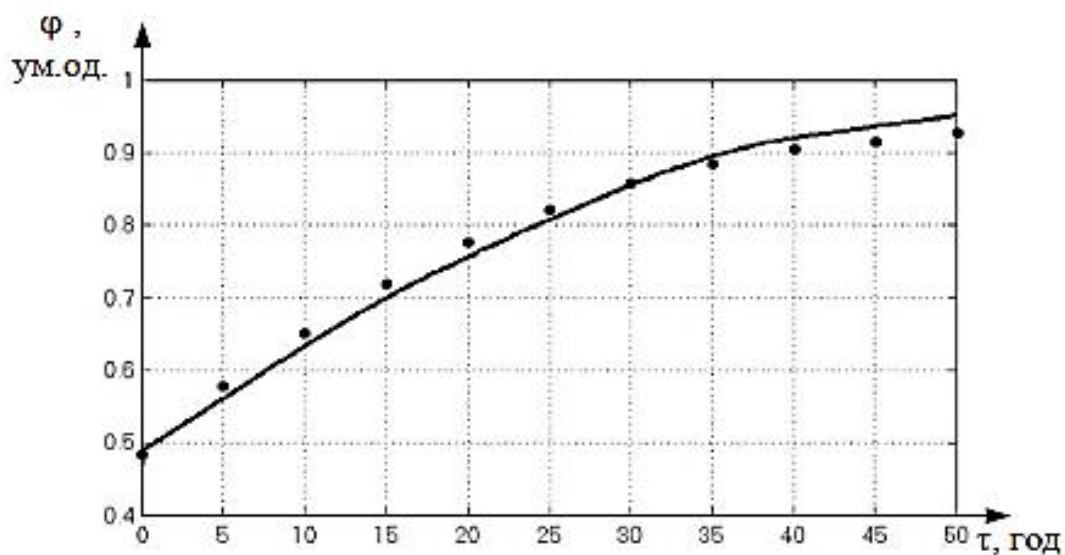


Рисунок 3.10 - Графік зміни вологості повітря в холодильній камері з продуктом зберігання в часі при подачі охолодженого повітря в камеру (експериментальні дані - крапки)

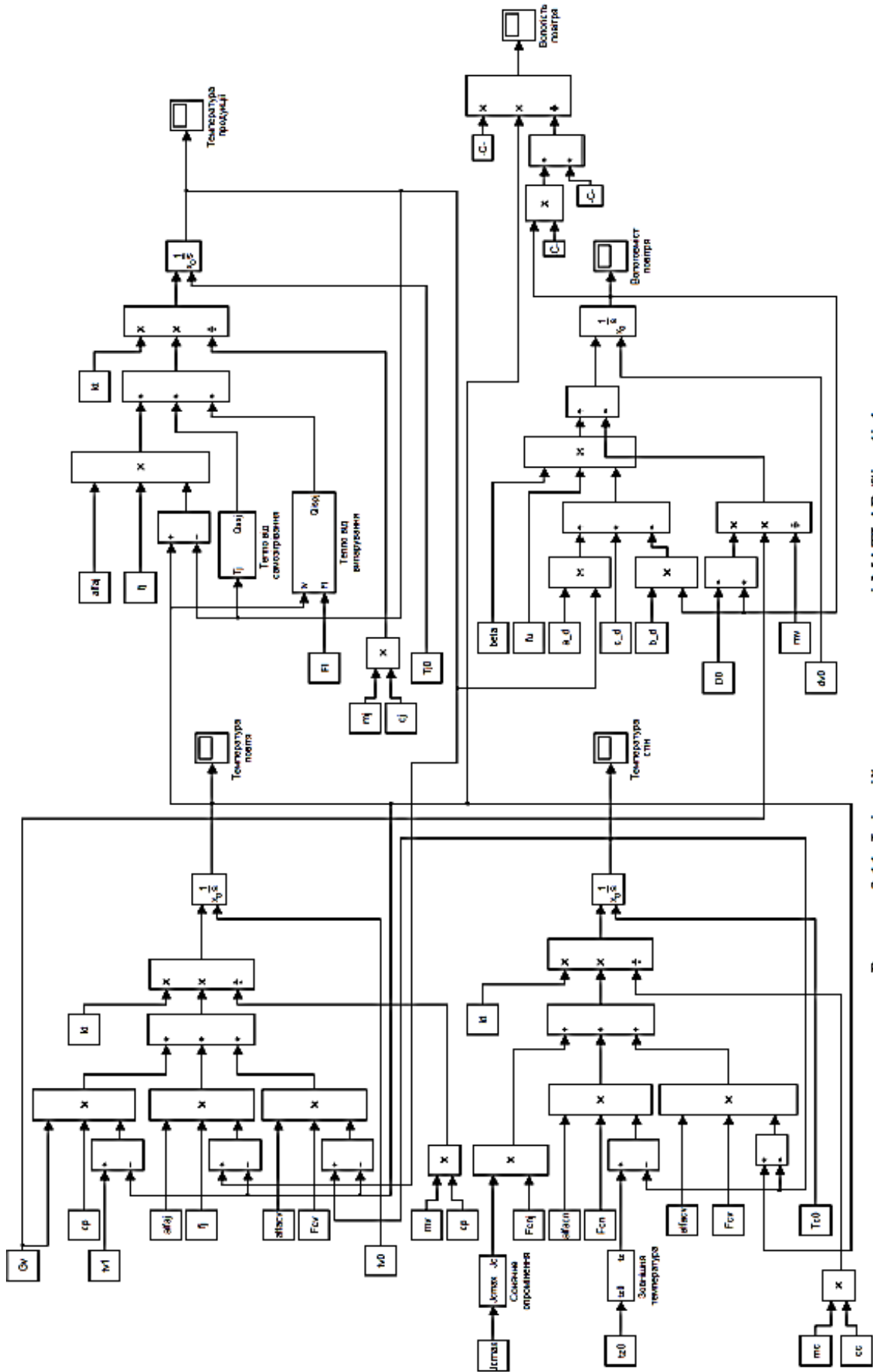


Рисунок 3.11 - Імітаційна модель в системі MATLAB/Simulink холодної камери з продуктом зберігання.

3.2 Математична модель динамічних режимів повітроохолоджувача

Розглянутий повітроохолоджувач являє собою теплообмінник із площинним оребренням, у трубках якого циркулює холодоагент, а через оребрення проходить охолоджуване повітря. У процесі охолодження повітря відбувається його осушення — волога конденсується на поверхні оребрення, утворюючи шар інею.

Теплообмінні апарати такого типу належать до багатоемнісних систем (у даному випадку – маємо чотириємнісний об’єкт), для яких характерний розподіл параметрів, тобто залежність характеристик повітря та холодоагенту від координат уздовж напрямку їх руху. Як зазначено в роботах [8, 14], у ряді випадків (у першому наближенні) можна припустити, що зміна параметрів уздовж просторових координат відбувається лінійно. За таких умов осереднення рівнянь за об’ємом апарата дозволяє отримати модель реактора ідеального змішування безперервної дії, у якій параметри, що описують роботу пристрою, можна представляти зосередженими в одній просторовій точці (наприклад, на його виході).

Динамічні характеристики повітроохолоджувача, як елемента об’єкта керування, описуються рівняннями теплового та масового балансів для чотирьох ємностей, що мають зосереджені параметри. Зміну температури на вході повітроохолоджувача (тобто на виході камери зберігання) можна визначити за допомогою диференціальних рівнянь балансів теплоти та маси, приймаючи типові для цього класу моделей технічні припущення:

- теплофізичні властивості вважаються сталими;
- впливи теплового випромінювання, теплопровідності та масопровідності враховуються через коефіцієнти тепловіддачі, масообміну та теплопередачі;
- температура стінки теплообмінника і шару інею (“снігової шуби”) приймається однаковою;

- теплоємність теплообмінника розглядається як сума теплоємностей металу та шару інею, тобто метал і “снігова шуба” утворюють єдиний одноємнісний об’єкт.

Рівняння, що описують динамічні режими роботи повітроохолоджувача, мають вигляд:

- рівняння теплового балансу для повітря:

$$m_{vv} \cdot c_p \frac{dt_{v2}}{d\tau} = Q_{v1} - Q_{v2} - Q_{ox} - Q_{in} , \quad (3.35)$$

- рівняння теплового балансу для випарника:

$$c_{ox} \frac{d(m_{ox} \cdot \theta_{ox})}{d\tau} = Q_{ox1} - Q_{ox2} + Q_{in} , \quad (3.36)$$

- рівняння теплового балансу для холодоагенту:

$$m_{ax} \cdot c_{ax} \frac{dt_{xa}}{d\tau} = Q_{ox1} - Q_{ox2} - Q_x , \quad (3.37)$$

- рівняння матеріального балансу разом для повітря та поверхні охолодження:

$$G_v \frac{dd_{v2}}{d\tau} = W_{v1} - W_{v2} - W_{in} , \quad (3.38)$$

- рівняння кінетики нарощування інею на поверхні теплообмінника:

$$\frac{dm_{in}}{d\tau} = a_{in} + b_{in} \cdot \varphi_1 , \quad a_{in} = k \cdot (\rho_v \cdot v_v)^{0.7} , \quad (3.39)$$

- матеріальний баланс при інеюутворенні:

$$\frac{dm_{in}}{d\tau} = -m_{vv} \frac{dd_{k2}}{d\tau} , \quad (3.40)$$

Величина коефіцієнта теплопередачі визначається очевидним співвідношенням із урахування наявності шару інею:

$$k_{o.n} = \left(\frac{1}{a_v} + \frac{\delta_{in}}{\gamma_{in}} \right)^{-1} , \quad (3.41)$$

де γ_{in} , δ_{in} – товщина та теплопровідність шару інею.

Коефіцієнт вологообміну при конденсації розраховуємо відповідно до співвідношень:

$$\sigma_0 = k_{o.np} / c_v \quad \text{і} \quad a_v = (0.21 \dots 0.25) \cdot \beta_{\Delta d} . \quad (3.42)$$

Підставляючи значення відповідних складових рівнянь (3.35) – (3.40) і розкриваючи диференціал в рівнянні:

$$c_{ox} \frac{d(m_{ox} \cdot \theta_{ox})}{d\tau} = c_{ox} \left(\theta_{ox} \frac{dm_{ox}}{d\tau} + m_{ox} \frac{d\theta_{ox}}{d\tau} \right),$$

та маючи на увазі, що величина $m_{ox} = m_m + m_{in}$, можна отримати загальну математичну модель динаміки повітроохолоджувача.

Оскільки параметри математичної моделі: G_{xa} , t_0 , d_{txa2} є характеристиками ККА і визначаються режимами їх роботи, то для їх визначення отриману систему рівнянь треба доповнити рівнянням, що характеризує параметри ККА. Режим роботи холодильного агрегату, залежно від кількості холоду, яке він повинен виробляти (визначається із розрахунку теплопритоків з урахуванням втрат теплоти в трубопроводах), визначається чотирма основними температурами:

– температурою випарування холодоагенту у випарнику (зі зниженням температури кипіння холодоагенту холодопродуктивність агрегату

зменшується): $t_0 = \frac{t_{v1} - t_{v2}}{2} - (4 \dots 6)^\circ\text{C}$;

– температурою всмоктування парів холодоагенту в циліндр компресора (температура перегріву) – приймається на $15 - 30$ °C вище від t_0 (для забезпечення сухого ходу компресора): $t_{dc} = t_{nx} = t_0 + (15 \dots 30)^\circ\text{C}$;

– температурою конденсації холодильного агента, яка для забезпечення теплопередачі в конденсаторі повинна бути на $3 - 5$ °C вище середньої температури середовища (повітря) охолоджуючого конденсатора:

$$t_{kx} = 0.5 \cdot (t_{a1} - t_{a2}) + (3 \dots 5)^\circ\text{C} ;$$

– температурою переохолодження рідкого холодильного агента перед терморегулюючим вентиляем (ТРВ) (клапаном), яка приймається на $3 - 5$ °C нижче температури конденсації, її можна визначити за формулою:

$$t_{nx} = t_{kx} - (3 \dots 5)^\circ\text{C} .$$

Таким чином, в загальному вигляді характеристика компресора може бути визначена як функція режимних параметрів [8]:

$$Q_0 = f(t_0, t_{kx}, \Delta t_{bc}, t_{nx}), \quad (3.43)$$

$$N_i = f(t_0, t_{kx}, \Delta t_{bc}, t_{nx}), \quad (3.44)$$

$$G_{nx} = f(t_0, t_{kx}, \Delta t_{bc}, t_{nx}, \Delta P_{bc}), \quad (3.45)$$

Рівняння збереження енергії для холодильного агрегату:

$$Q_0 = Q_k - N_i, \quad (3.46)$$

При визначенні параметрів холодильної машини використовувалися їх характеристики, а саме графіки $Q_0 = f_1(t_0, t_{kx})$ і $N_i = f_2(t_0, t_{kx})$, побудовані за даними заводських випробувань. На рис. 3.12 і рис. 3.13 наведено графічні залежності холодопродуктивності та потужності компресорної установки від температури кипіння і конденсації холодильного агента (фреон 22).

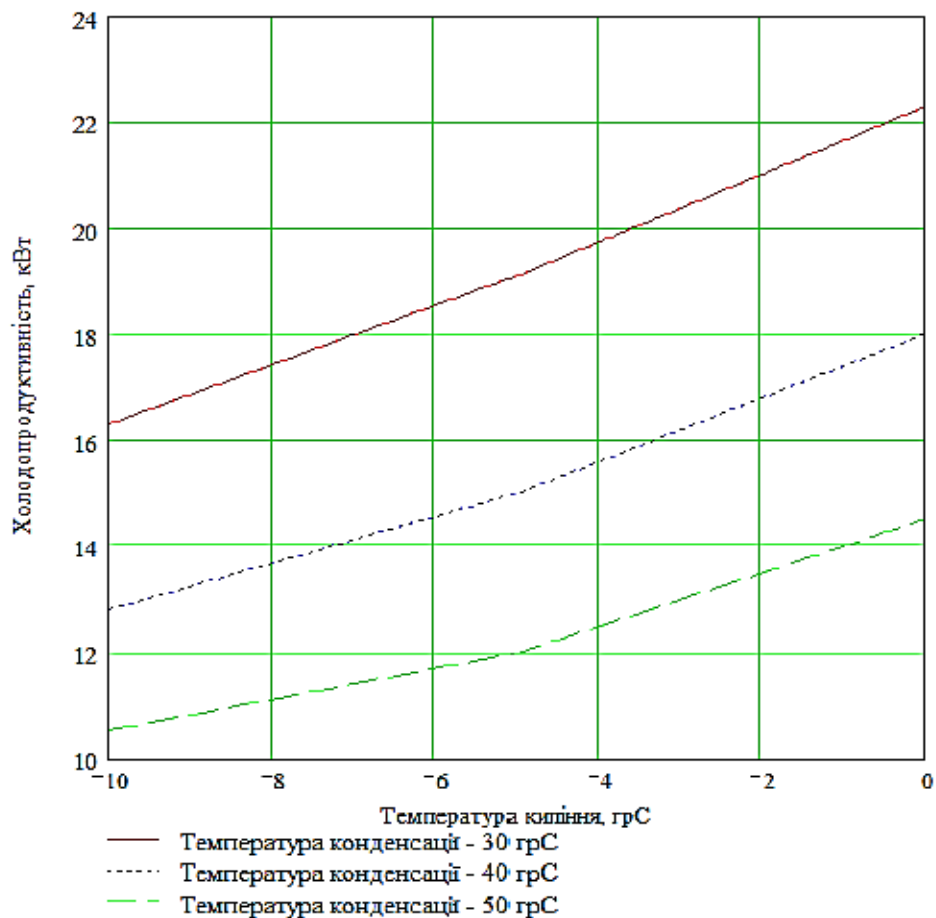


Рисунок 3.12 - Залежність холодопродуктивності компресора від температури кипіння і конденсації холодильного агента

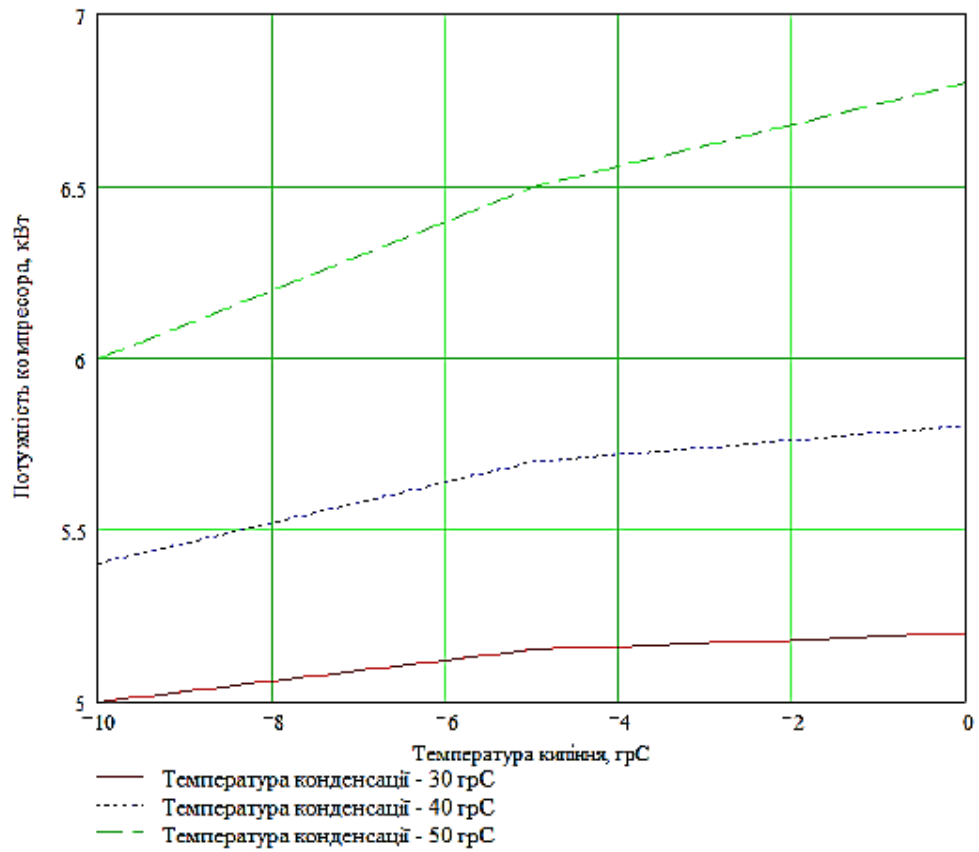


Рисунок 3.13- Залежність потужності компресорної установки від температури кипіння і конденсації холодильного агенту

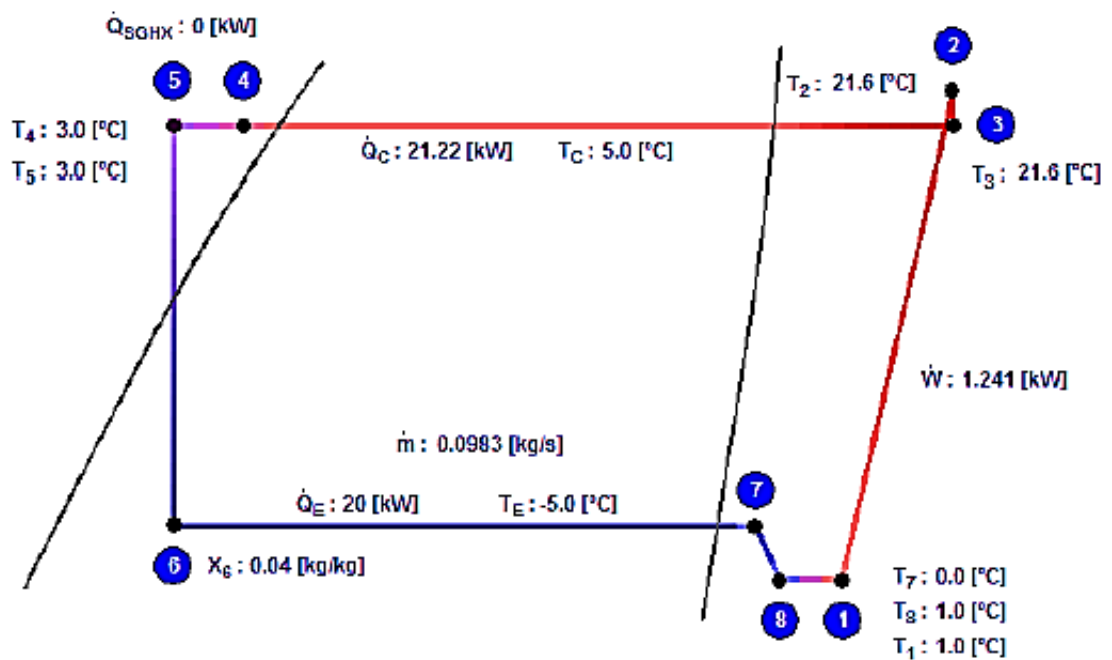


Рисунок 3.14 - Цикл роботи одноступінчастої холодильної машини в T- діаграмі

Із зображення холодильного циклу (рис. 3.14) випливає, що різниця величини ентальпії холодильного агента на всмоктуванні пари і кипінні $i_1 - i_4$ дорівнює величині питомої масової холодопродуктивності:

$$q_0 = i_7 - i_6 = i_{nx} - i_{px} , \quad (3.47)$$

В рівняннях (3.48 і 3.49) величина G_{xa} визначає витрати холодильного агента в контурі холодильного агрегату, а c_{xa} – середню теплоємність холодоагенту. У випарнику холодильний агент знаходиться як в рідкій (кипіння рідини в кількості G_{px}), так і паровій фазах (кількість пари G_{nx}). Тоді загальна кількість холодильного агента у випарнику визначається як сума:

$$G_{xa} = G_{px} + G_{nx} . \quad (3.48)$$

Можна записати рівняння статички для випарника:

$$G_{xa} \cdot c_{xa} \cdot (t_{xa2} - t_{xa1}) = G_{xa} \cdot (i_{nx} - i_{px}) = G_{xa} \cdot (i_{nx} - i_0) , \quad (3.49)$$

тут витрати рідкої фази холодоагенту:

$$G_{xa} = \frac{Q_0}{q_0} , \quad (3.50)$$

об'ємні витрати пари холодоагенту:

$$V_{nx} = \frac{G_{nx}}{\rho_{nx}} . \quad (3.51)$$

Як показав аналіз проведених досліджень впливу навантаження на випарник на режимні параметри холодильного циклу (комп'ютерне середовище CoolPack), величини ρ_{nx} та x залежать від температури кипіння холодоагенту t_0 . В робочому діапазоні зміни параметрів холодильного агрегату ці залежності можуть бути апроксимовані лінійними рівняннями у вигляді:

$$\rho_{nx} = 0.55 \cdot t_0 + 19.22 , \quad (3.52)$$

$$x = 0.1983 - 0.004 \cdot t_0 . \quad (3.53)$$

Годинна холодопродуктивність холодильного агрегату визначається кількістю циркулюючого через установку холодоагенту G_{xa} (кг/с) і питомою масовою холодопродуктивністю холодильного агента q_0 (кДж/(кг·с)):

$$Q_{ox} = G_{xa} \cdot q_0 \cdot 3600 . \quad (3.54)$$

Об'єм пари холодоагенту V_{nx} можна виразити через об'єм, що описують поршні компресора:

$$V_{nx} = \lambda \cdot V_{np} \cdot Z , \quad (3.55)$$

таким чином, холодопродуктивність компресора можна визначити за формулою:

$$Q_k = q_v \cdot \lambda \frac{\pi \cdot D^2}{4} S \cdot Z \cdot n \cdot 60 , \quad (3.56)$$

При заданому значенні температури кипіння холодоагенту $t_0 = (5-7) \cdot t_v$ зміною частоти обертання валу компресора можна керувати холодопродуктивністю ККА. Для агрегованих поршневих двоступінчастих компресорів різної холодопродуктивності сімейства W200 / 2A (виробник Польща) отримані узагальнені рівняння їх характеристик [3]:

$$Q_k = V_{nx} \cdot (6420 \cdot t_{kx} + 216318) \cdot (-t_0)^{-(0.00475 \cdot t_{kx} + 1.98)} , \quad (3.57)$$

$$N_i = Q_0 \cdot [(1.08 \cdot 10^5 - 1.49 \cdot 10^3 \cdot t_x) \cdot t_0 - 1.17 \cdot 10^6 \cdot t_{kx} + 8.33 \cdot 10^6]^{-1} \quad (3.58)$$

Таким чином приведені рівняння дають можливість досить ґрунтовно описувати динаміку теплових процесів в ККА. У працях [7, 9] доведено технологічну ефективність стабілізації температури кипіння холодоагенту у випарнику холодильної машини (ХМ), що сприяє зменшенню втрат продукції.

Якщо врахувати, що будь яка ХМ обладнана терморегулюючими вентилями (ТРВ), за допомогою якого стабілізується температура кипіння холодоагенту, то вбачається можливість стабілізації температури перегріву ТРВ шляхом зміни величини G_{px} (заповнення випарника).

Для сталого режиму холодопродуктивність компресора буде дорівнювати холодопродуктивності охолоджувача:

$$Q_0 = G_v \cdot c_p \cdot (t_{v1} \cdot t_{v2}) = G_v \cdot (i_{x2} - i_{x1}), \quad (3.59)$$

Для спрощення математичної моделі можна використати приведений коефіцієнт теплообміну, який враховує збільшення теплового потоку за рахунок фазового переходу $k_{o.np} = \alpha_v \cdot \xi$, де ξ – коефіцієнт вологовипадіння який дорівнює відношенню повного теплового потоку від повітря до поверхні до явного теплового потоку переданому конвекцією.

При складанні рівняння (3.54) було прийнято, що температура металу (ребра та трубки) та інею однакові та дорівнюють середній температурі θ_{ox} , так як між ними існує лінійний зв'язок. Тоді питома теплоємність охолоджувача дорівнює середньозваженій величині:

$$c_{ox} = \frac{m_{iH} \cdot c_{iH} + m_{cm} \cdot c_{cm}}{m_{iH} + m_{cm}}. \quad (3.60)$$

Відповідно до даних експериментальних досліджень [3] зростання питомої маси інею на поверхні випарника апроксимована лінійною залежністю, яка відтворює реальний процес інеюутворення в діапазоні змінення відносної вологості повітря на вході у повітроохолоджувач (вихід повітря з камери) $\varphi = 85 \dots 92\%$:

$$q_{iH} = (0.00927 \cdot (\rho_v \cdot V_v) + 0.0005 \cdot t_{v1} + 0.284 \cdot \varphi_{v1}) \cdot \tau, \text{ кг/м}^2 \quad (3.61)$$

Збільшення маси інею за часом, відповідно, виражено спрощеною залежністю:

$$m_{iH} = q_{iH} \cdot F_3^n = (a_{iH} + b_i \cdot \varphi_{v1}) \cdot \tau, \quad (3.62)$$

Після перетворень будемо мати рівняння:

$$m_{ox} \cdot c_{ox} \frac{d\theta_{ox}}{d} = k_{o.n} \cdot F_{o.n} \cdot (t_v - \theta_{ox}) + k_{o.v} \cdot F_{o.v} \cdot (\theta_{ox}'' - t_{xa}) - a \cdot G_v + b \cdot a_\varphi + b \cdot a_d \cdot d_{v1} - a_t \cdot t_{v1}, \quad (3.63)$$

Таким чином, у спрощеному варіанті математична модель динаміки повітроохолоджувача може бути представлена отриманою системою диференціальних рівнянь. Ця модель динаміки повітроохолоджувача відрізняється від відомих моделей тим, що враховує динаміку зміни маси випарника та наявність теплоти інеюутворення, а також зміну масообмінних параметрів за часом. Перетворюючи рівняння системи за Лапласом, при нульових початкових умовах аналогічно попереднім дослідженням було отримано передавальні функції по каналах:

- величина температури повітря на виході повітроохолоджувача – величина температури повітря на його вході:

$$W_{v1}(p) = \frac{t_{v2}(p)}{t_{v1}(p)} = k_{vo1} \frac{Bo_3 \cdot p^3 + Bo_2 \cdot p^2 + Bo_1 \cdot p + 1}{Ao_4 \cdot p^4 + Ao_3 \cdot p^3 + Ao_2 \cdot p^2 + Ao_1 \cdot p + 1}, \quad (3.64)$$

- величина температури повітря на виході повітроохолоджувача – вологовміст повітря на вході повітроохолоджувача:

$$W_{v2}(p) = \frac{t_{v2}(p)}{d_{v1}(p)} = k_{vo2} \frac{Co_3 \cdot p^3 + Co_2 \cdot p^2 + Co_1 \cdot p + 1}{Ao_4 \cdot p^4 + Ao_3 \cdot p^3 + Ao_2 \cdot p^2 + Ao_1 \cdot p + 1}, \quad (3.65)$$

- величина температури повітря на виході повітроохолоджувача – витрати рідкого холодоагенту на вході в повітроохолоджувач:

$$W_{v3}(p) = \frac{t_{v2}(p)}{G_{px}(p)} = k_{vo3} \frac{Do_1 \cdot p + 1}{Ao_4 \cdot p^4 + Ao_3 \cdot p^3 + Ao_2 \cdot p^2 + Ao_1 \cdot p + 1} \quad (3.66)$$

- вологовміст повітря на виході повітроохолоджувача – величина температури повітря на його вході:

$$W_{v4}(p) = \frac{d_{v2}(p)}{t_{v1}(p)} = k_{vo4} \frac{Fo_2 \cdot p^2 + Fo_1 \cdot p + 1}{Eo_4 \cdot p^4 + Eo_3 \cdot p^3 + Eo_2 \cdot p^2 + Eo_1 \cdot p + 1} \quad (3.67)$$

- вологовміст повітря на виході повітроохолоджувача – вологовміст повітря на його вході:

$$W_{v5}(p) = \frac{d_{v2}(p)}{d_{v1}(p)} = k_{vo5} \frac{Go_3 \cdot p^3 + Go_2 \cdot p^2 + Go_1 \cdot p + 1}{Eo_4 \cdot p^4 + Eo_3 \cdot p^3 + Eo_2 \cdot p^2 + Eo_1 \cdot p + 1} \quad (3.68)$$

- вологовміст повітря на виході повітроохолоджувача – витрати рідкого холодоагенту на вході в повітроохолоджувач:

$$W_{v6}(p) = \frac{d_{v2}(p)}{G_{px}(p)} = k_{v06} \frac{H_{o1} \cdot p + 1}{E_{o4} \cdot p^4 + E_{o3} \cdot p^3 + E_{o2} \cdot p^2 + E_{o1} \cdot p + 1} \quad (3.69)$$

Будуємо структурну схему:

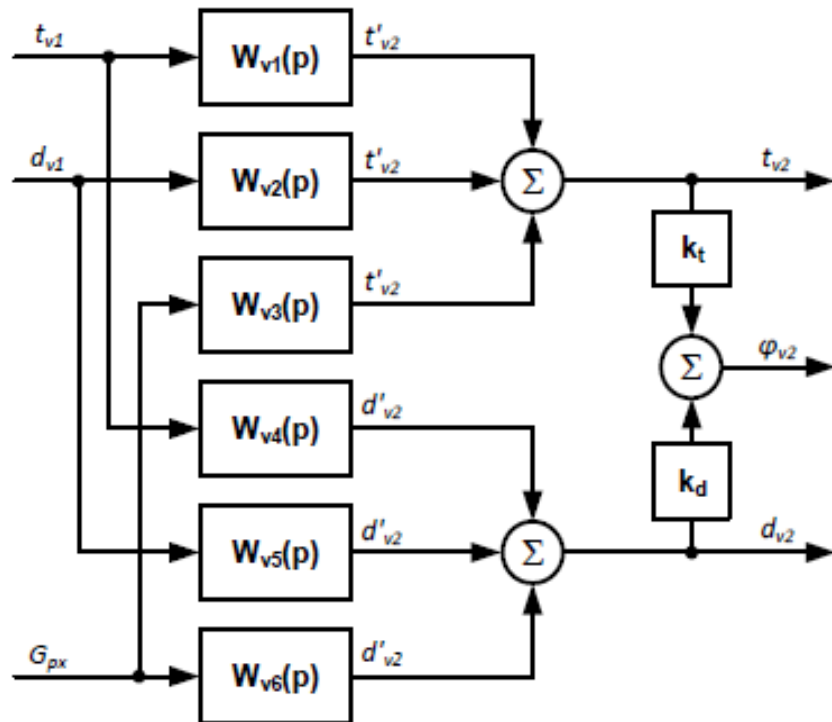


Рисунок 3.15 - Структурна схема повітроохолоджувача

Для визначення реальних динамічних характеристик об'єкта (з урахуванням існуючих нелінійностей) вищевказана система рівнянь була розв'язана в середовищі MATLAB/Simulink. Результати моделювання представлені на рис. 3.16 .

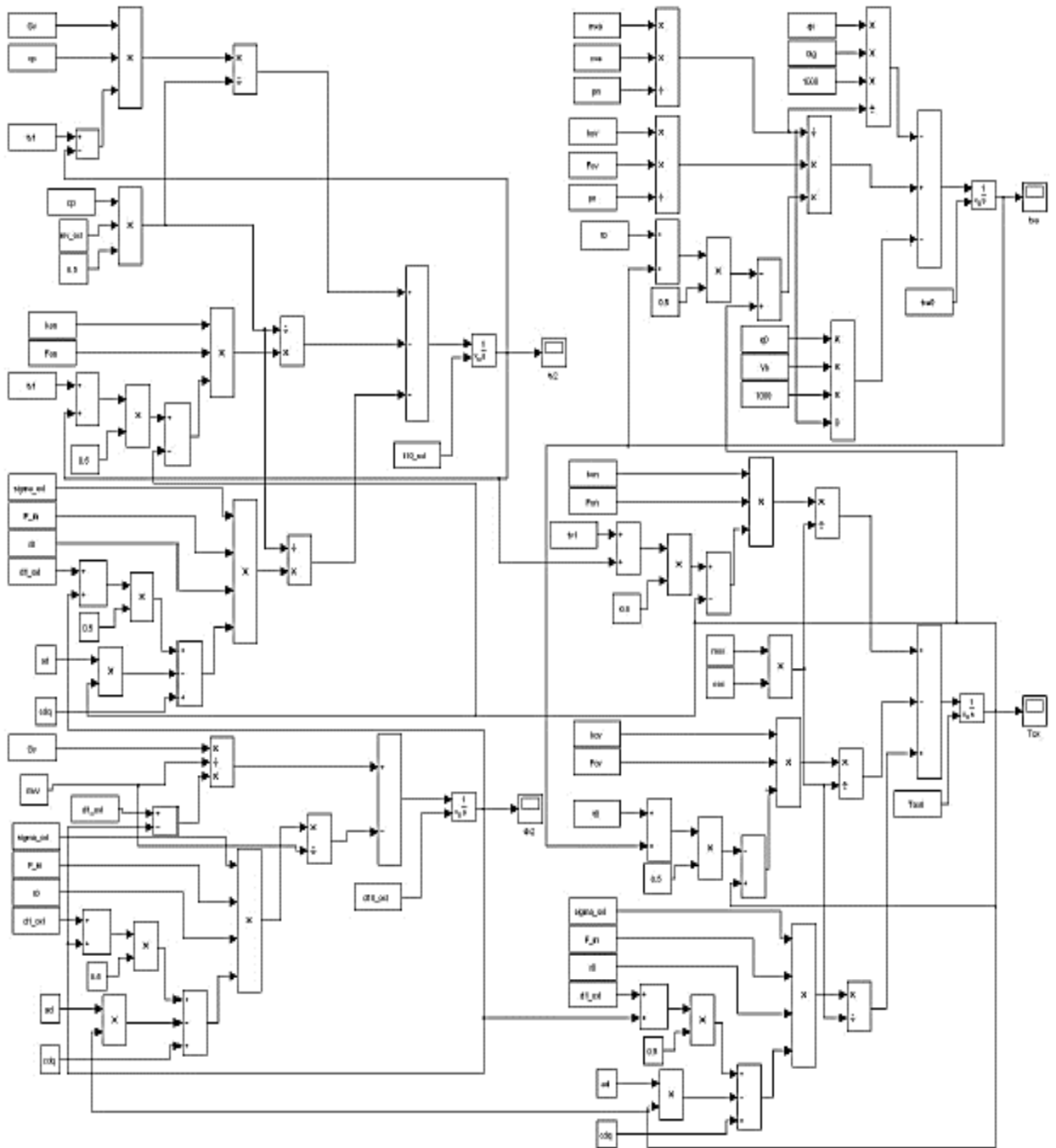


Рисунок 3.16 - Імітаційна модель в середовищі MATLAB/Simulink
повітроохолоджувача

3.3 Математична модель динамічних режимів парозволожувача

Далі розглядаємо парозволожувач повітря, що використовується як об'єкт автоматичного регулювання вологості при низьких температурах, він є складною багатопараметричною системою, яка має чотири вхідні та три вихідні параметри (рис. 3.17).

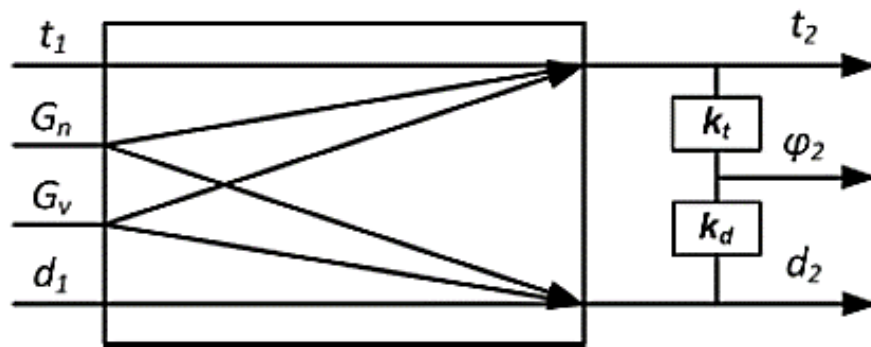


Рисунок 3.17 – Модель парозволожувача

Камеру змішування повітря на виході з повітроохолоджувача та пари від парозволожувача, як елемента системи ССТМХК схематично зображено на рис. 3.18.

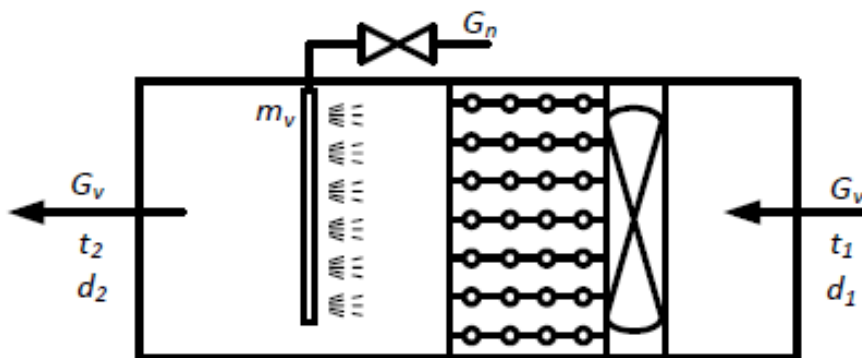


Рисунок 3.18 - Схема камери змішування повітря для зволоження

Під час виведення рівнянь, що описують динамічні характеристики об'єкта, були прийняті наступні припущення:

- зволожувач буде розглядатися як проточний апарат з ідеальним змішуванням;
- теплові втрати в навколишнє середовище не будуть враховуватися;
- фізичні властивості робочих середовищ (пари та повітря), що взаємодіють, вважаються сталими в часі та такими, що не залежать від температури.

Математичну модель зволожувача побудовано на основі рівнянь теплового й матеріального балансів, що описують динаміку зміни температури та величини вологовмісту повітря на виході з апарата $(t_2(\tau), d_2(\tau))$.

Запишемо систему рівнянь математичного опису нестационарних режимів парозволожувача урахуванням прийнятих припущень:

$$m_{vn} \frac{dI_2}{d\tau} = G_n \cdot i_n - G_v \cdot (I_2 - I_1) \quad (3.70)$$

$$m_v \frac{dd_2}{d\tau} = G_n \cdot 10^3 - G_v \cdot (d_2 - d_1),$$

де I_2 і d_2 – величина питомої ентальпії та вологовмісту повітря на виході парозволожувача, кДж/кг та г/кг_{сп.}.

Можна розрахувати ентальпію перегрітої водяної пари у ненасиченому повітрі:

$$i'_n = 2500 + 1.86 \cdot t_n \quad (3.71)$$

Система рівнянь (3.70) не є взаємопов'язаною і не буде враховувати перехресні зв'язки, але їх можна визначити, якщо розрахувати величину $i(t, d)$ за формулою:

$$i = c_p \cdot t + d \cdot (1.86 \cdot t + 2500) \cdot 10^{-3}. \quad (3.72)$$

Наступне рівняння розв'яжемо для визначення взаємозв'язку $t_2 \rightarrow d_1 \rightarrow Gn$:

Для незмінного режиму ($\frac{di_2}{d\tau} = \frac{dd_2}{d\tau} = 0$) будемо мати залежності

$$t_{20} = \frac{G_{n0}}{G_{v0}} \left(\frac{i_n}{a} - \frac{b}{a} 10^3 \right) + t_{10}, \quad d_{20} = \frac{G_{n0}}{G_{v0}} 10^3 + d_{10}. \quad (3.73)$$

Отже, встановлено, що температура повітря на виході з парозволожувача не буде залежати від його вологовмісту. Диференціюючи рівняння (3.73) у часі і розв'язуючи його відносно виразу $\frac{dt_2(\tau)}{d\tau}$, отримуємо диференціальне рівняння, яке описує перехідний процес зміни температури повітря під час додавання до нього водяної пари.

$$\frac{dt_2(\tau)}{d\tau} = \frac{G_n(\tau)}{m_v \cdot c_p} (i_n - r_o) - \frac{G_v}{m_v} t_2(\tau) - \frac{G_v}{m_v} t_1 \quad (3.74)$$

Перетворюючи ці рівняння за Лапласом при нульових початкових умовах, були отримані передавальні функції за керуючими діями по каналах:

- температура повітря на виході парозволожувача – витрати пари

$$W_{n1}(p) = \frac{t_{k1}(p)}{G_n(p)} = \frac{k_{n1}}{T_n \cdot p + 1}, \quad (3.75)$$

$G_v(\tau)$. З огляду на вимоги технологічного регламенту, згідно з яким співвідношення $\frac{G_n(\tau)}{G_v(\tau)} = d_{\text{зад}} = \text{const}$, величину G_v можна прийняти незмінною для деяких режимів роботи системи (наприклад, охолодження або зберігання).

Подача водяної пари до парозволожувача здійснюється від парогенератора, який обладнаний водяним баком з електродними елементами (електродний котел) або інфрачервоними нагрівачами. Робочі характеристики парогенератора визначаються з рівняння теплового балансу:

$$r \cdot dG_n = P_H \cdot d\tau - c_w \cdot m_w \cdot \Delta\theta_w, \quad (3.79)$$

де $c_w, m_w, \Delta\theta_w$ - величини питомої теплоємності, маси та температури води у випарнику.

У правій частині цього рівняння другий член здатний враховувати динаміку нагріву води до температури її кипіння. Паровий канал зволожувача, як правило, вмикають, коли температура води стає близькою до температури кипіння, а потім пару починають перегрівати (орієнтовно до температури 110 – 116 °C на виході парогенератора).

Коли температура води ще нижча за 100 °C на величину $\Delta\theta_w$, тоді додатковий нагрів можна врахувати через величину чистого запізнювання:

$$\tau = \frac{c_w \cdot m_w \cdot \Delta\theta_w}{P_H}. \quad (3.80)$$

Таким чином, передавальну функцію по каналу «паропродуктивність G_n – потужність нагрівача P_H » можна записати у вигляді:

$$W_{\text{пг}}(p) = \frac{G_n}{P_H} = k_{n3} \cdot e^{-\tau \cdot p}. \quad (3.81)$$

При централізованому постачанні пари набуло поширення зволоження повітря холодильної камери через подання водяної пари, що повністю поглинається повітрям, а при використанні автономних парозволожувачів найчастіше використовують безконтактне випаровування води (із застосуванням ІЧ- випромінювачів).

Математичні моделі парозволожувача, в які входять змінна величина витрат повітря, є нелінійними, так як містять добутки двох змінних параметрів $G_v \cdot t_{v2}$. Для визначення перехідних процесів математична модель парозволожувача була реалізована в середовищі MATLAB/Simulink.

Структура моделі зображена на рис. 3.20, а результати моделювання приведені на рис. 3.21 – 3.22.

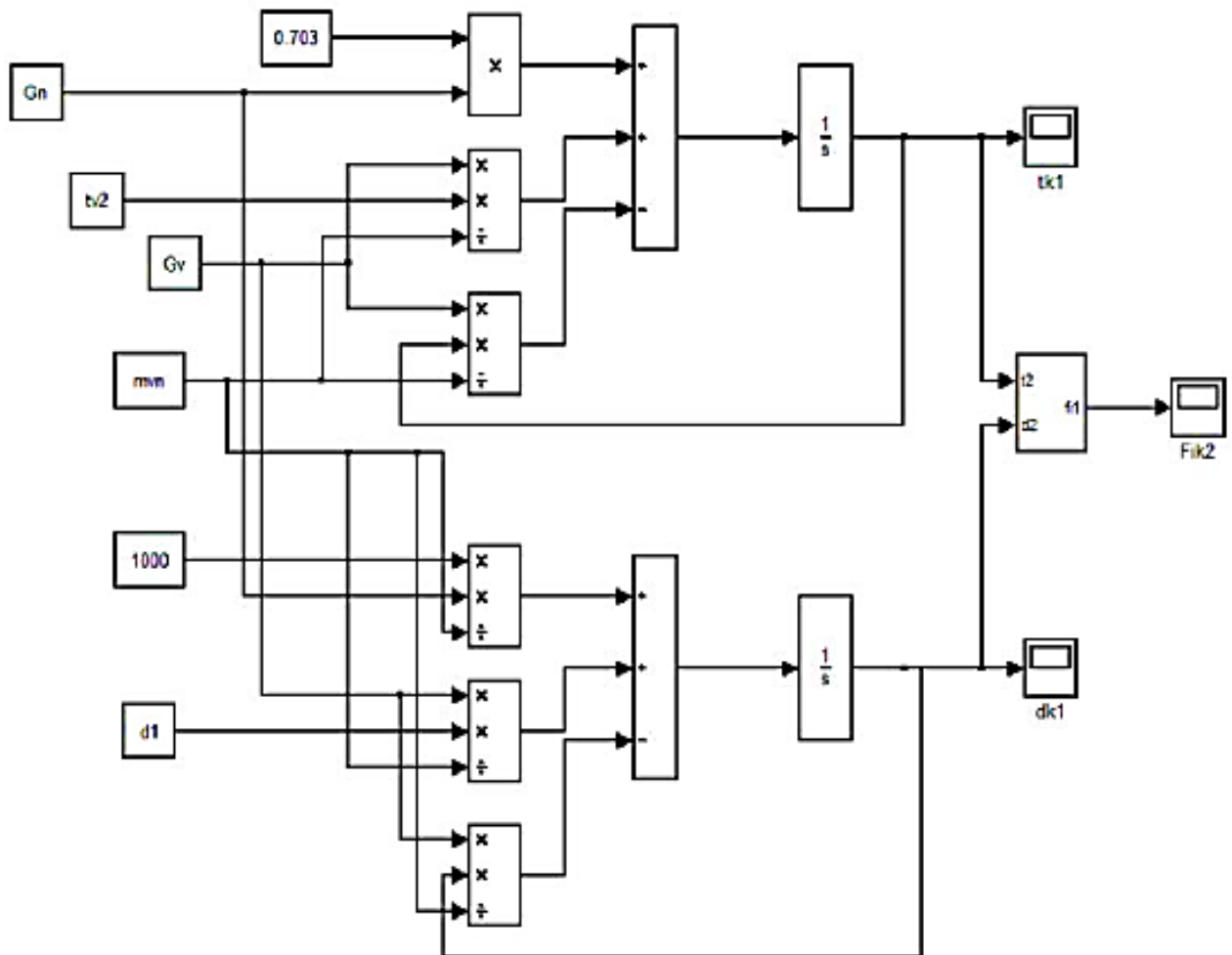


Рисунок 3.20 – Імітаційна модель динамічних режимів в системі MATLAB/Simulink для парозволожувача

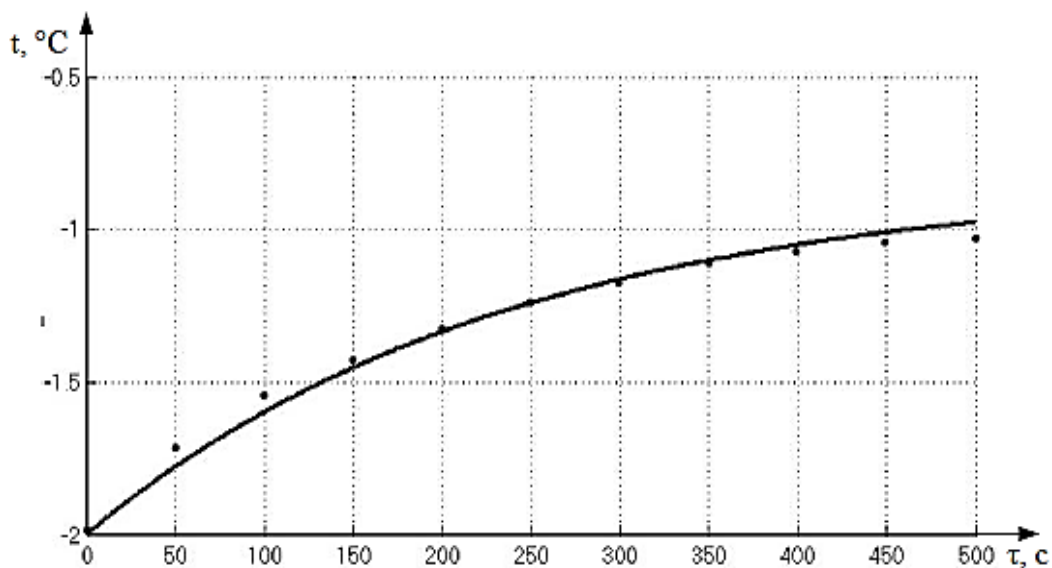


Рисунок 3.21 – Експериментальні (крапки) та імітаційні динамічні характеристики температури повітря на виході з парозволожувача (модель адекватна, відносна похибка 3.7 %)

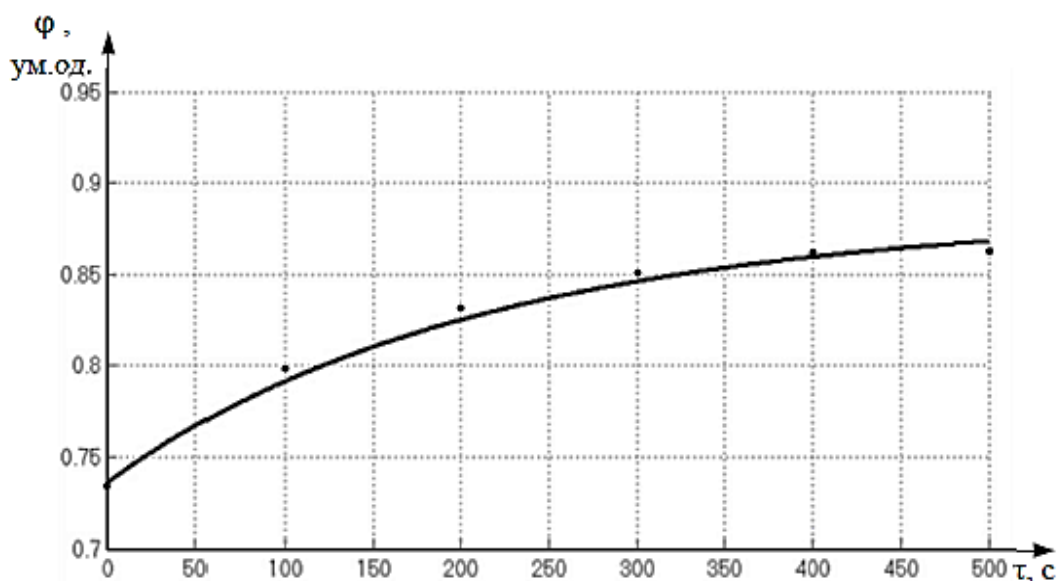


Рисунок 3.22 – Експериментальні (крапки) та імітаційні динамічні характеристики вологості повітря на виході з парозволожувача (модель адекватна, відносна похибка для вологості повітря 4 %)

3.4 Синтез локальних систем автоматичного регулювання параметрів повітря в об'єктах холодильної установки

На основі визначених передавальних функцій і перехідних процесів основних елементів обладнання холодильної установки, отримано структурні схеми локальних САР параметрів повітря.

3.4.1. Локальна система автоматичного регулювання температури повітря на виході повітроохолоджувача

На основі аналізу перехідних характеристик повітроохолоджувача, передавальна функція ТРВ по каналу «витрата холодоагенту – температура на виході повітроохолоджувача» має вигляд:

$$W_{Gxa}(p) = \frac{K_{Gxa}}{T_{Gxa} \cdot p + 1} \quad (3.82)$$

Визначивши передавальні функції датчика, виконавчого механізму та передавальної функції повітроохолоджувача, для створення САК заповнення повітроохолоджувача використовуємо ПІД-регулятор, параметри якого знайдемо з використанням налаштувань PID Tuner (рис. 3.23 – 3.25).

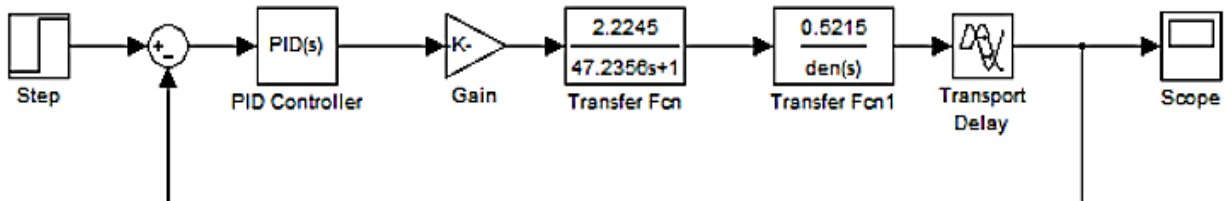


Рисунок 3.23 – Структурна схема в MATLAB/Simulink САР подання холодоагенту у випарник

З графіка перехідного процесу САР подання холодоагенту у випарник (рис. 3.25) визначено, що час регулювання системи який становить близько 360 секунд, перерегулювання близьке до нуля ($\approx 1-2\%$), коливальність системи – відсутня.

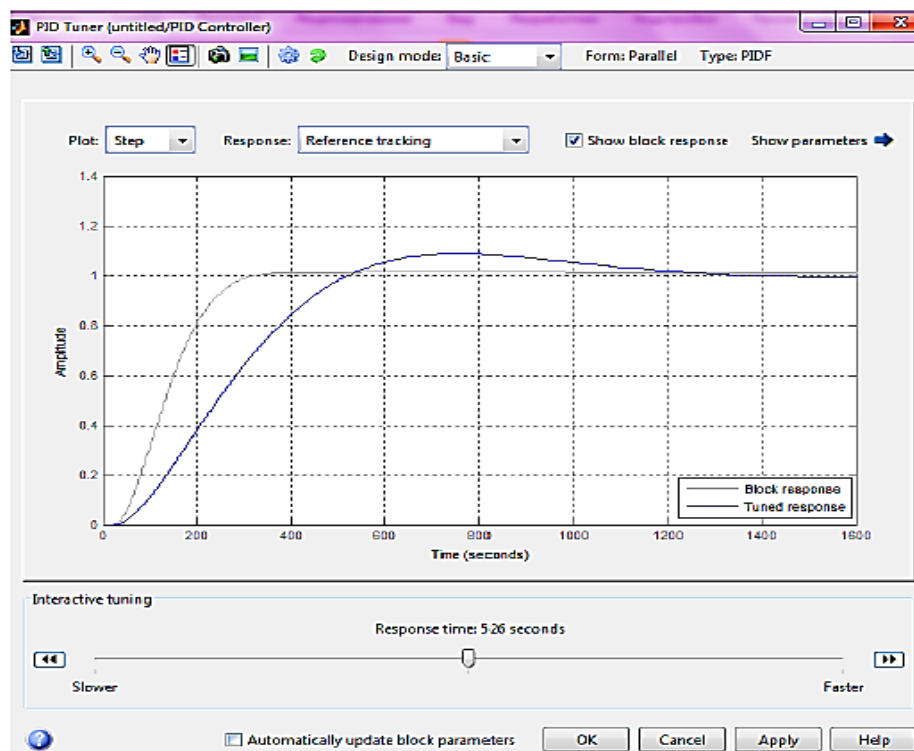


Рисунок 3.24 – Вікно налаштувань PID Tuner в середовищі MATLAB/Simulink

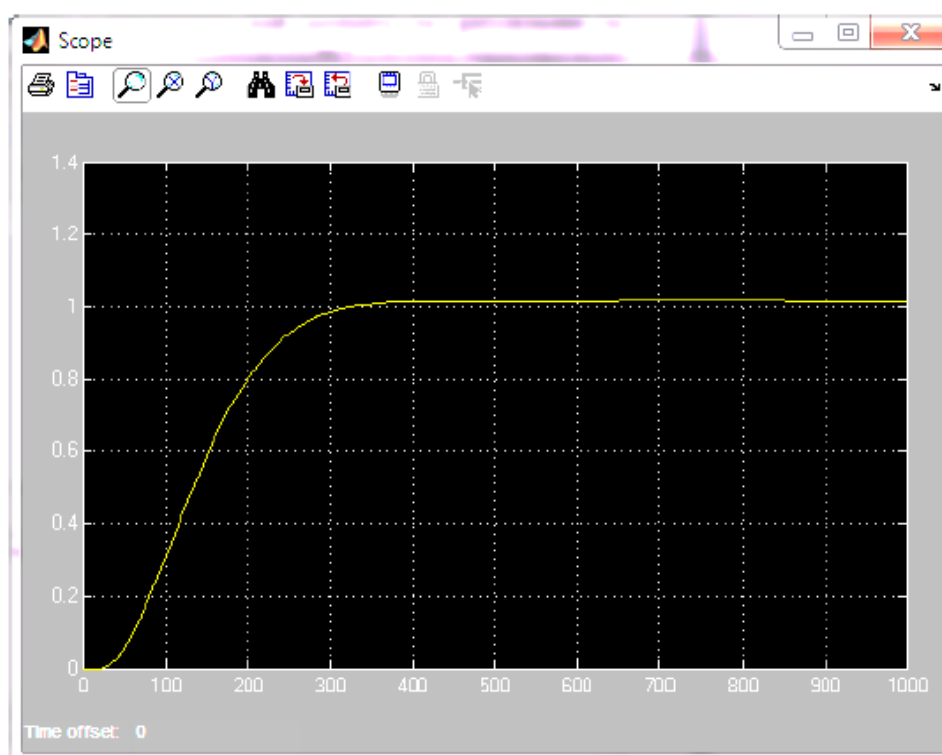


Рисунок 3.25 – Перехідний процес в середовищі MATLAB/Simulink системи автоматичного регулювання подання холодоагенту у випарник з ПД-регулятором

Використовуючи математичний редактор MathCAD, отримано дані для побудови годографа Найквіста (рис. 3.26).

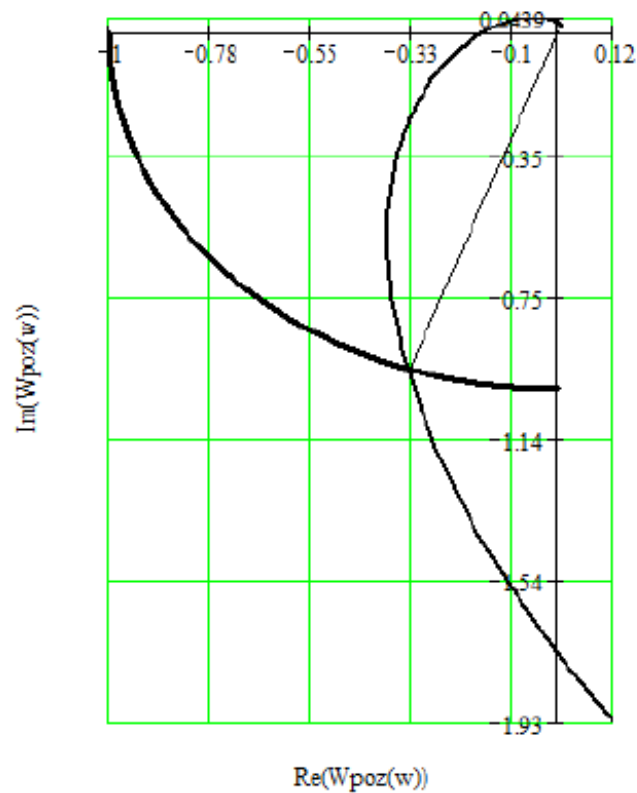


Рисунок 3.26 – Годограф Найквіста (АФЧХ системи АР)

Визначені показники стійкості для цієї системи становлять:

- запас стійкості по амплітуді – 12 dB;
- запас стійкості по фазі – 70.7° .

Таким чином запас стійкості задовольняє технологічним вимогам до САР витрат холодоагенту у випарник.

3.4.2 Локальна система регулювання вологості повітря на вході в камеру

Для дослідження САР вологістю повітря на вході в камеру в середовищі MATLAB/Simulink побудовано структурну алгоритмічну схему системи з П-регулятором (рис. 3.27).

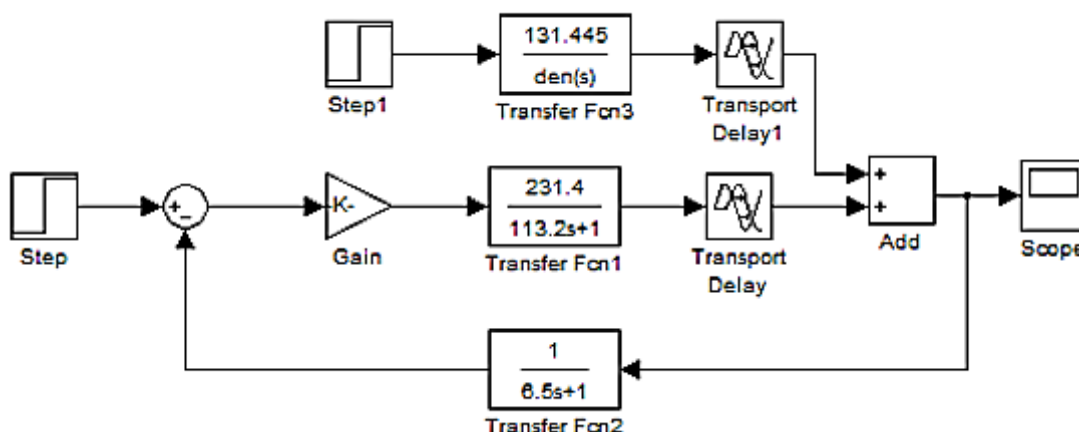


Рисунок 3.27 – Структурно-алгоритмічна схема системи автоматичного регулювання вологістю повітря на вході в камеру з П– регулятором

Визначаємо коефіцієнт підсилення П – регулятора за формулою:

$$K_P = \frac{0.7 \cdot T_0}{K_2} \tau \quad (3.83)$$

При визначених в попередніх розрахунках значеннях K_2 і T_0 обчислюємо коефіцієнт K_p (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 - Розрахункові дані для визначення параметрів налаштування П – регулятора

K_2 , В/Вт	T_0 , с	K_p , Вт/В
257,9	126,2	0,03005
231,4	113,2	0,03004
209,8	102,7	0,03006

З аналізу цієї таблиці можна зробити висновок, що незважаючи на різні параметри об'єкта керування при різних витратах пари, розрахований коефіцієнт підсилення П–регулятора лишається практично незмінним.

Графік перехідного процесу САР вологості повітря з П– регулятором подано на рис. 3.28.

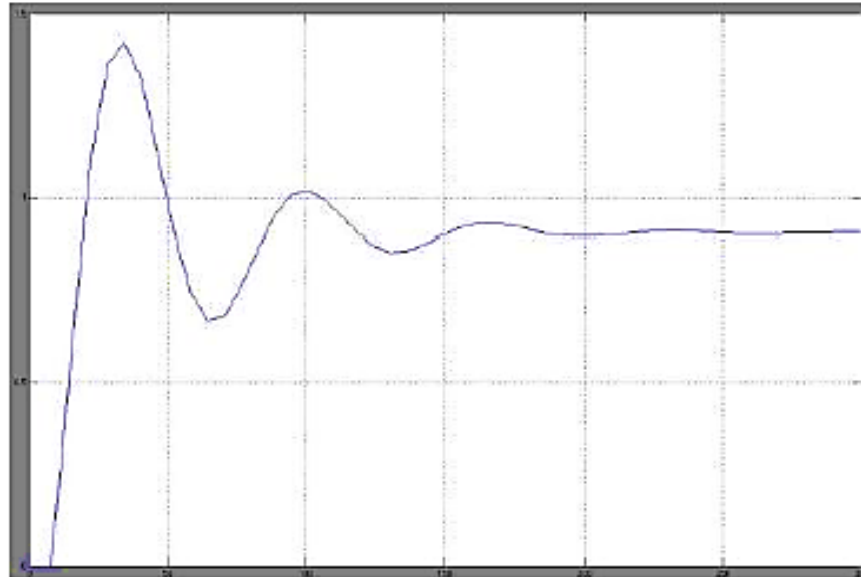


Рисунок 3.28 - Перехідна характеристика САР вологості повітря з
 ПІ- регулятором

Тут маємо значне перерегулювання ($\approx 55\%$), велику коливальність перехідного процесу та значний час регулювання. Статична похибка в цьому варіанті складає $\Delta = 15\%$, що не забезпечує технологічні вимоги.

Проведене моделювання та дослідження системи з ПІ – регулятором показало також невідповідність технологічним вимогам для регулятора вологістю повітря (у цьому випадку була виявлена велика статична похибка $\Delta = 15\%$), тому було прийнято рішення провести моделювання варіанту системи з ПІД- регулятором (рис. 3.29).

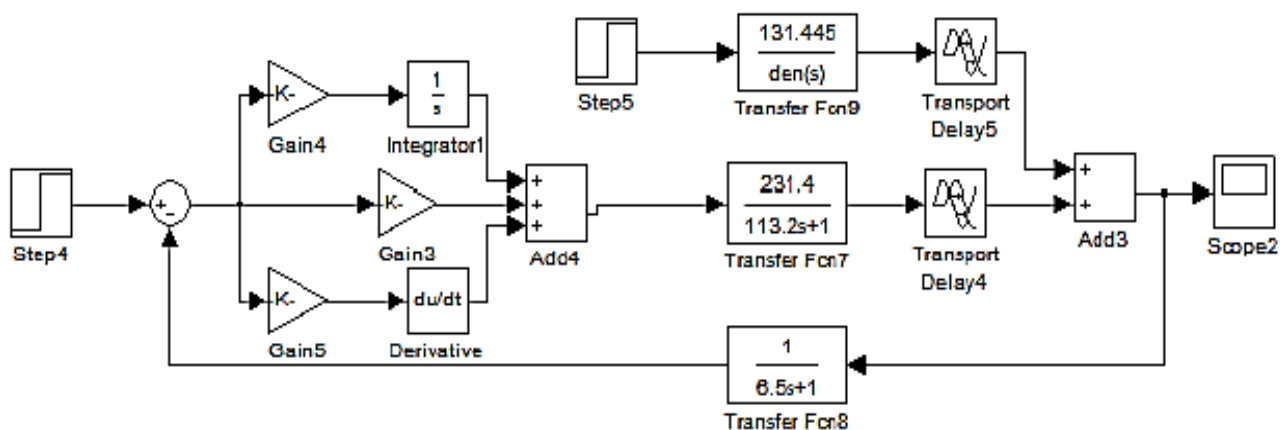


Рисунок 3.29 – Структурна алгоритмічна схема САР вологості повітря з
 ПІД- регулятором

Параметри налагодження системи з ПД– регулятором визначені за формулою:

$$K_p = \frac{0.7 \cdot T_0}{K_2} \tau = 0.0515 . \quad (3.84)$$

Визначивши величину коефіцієнта K_p для різних витрат, можна констатувати, що коефіцієнт підсилення ПД–регулятора K_p залишається практично незмінним при різних витратах пари. Інші параметри налагодження не залежать від цих витрат:

$$T_i = 2 \cdot \tau = 2 \cdot 11.4 = 22.8 \text{ с}, \quad (3.85)$$

$$T_d = 0.4 \cdot \tau = 0.4 \cdot 11.4 = 4.56 \text{ с} . \quad (3.86)$$

В результаті досліджень було отримано таку перехідну характеристику:

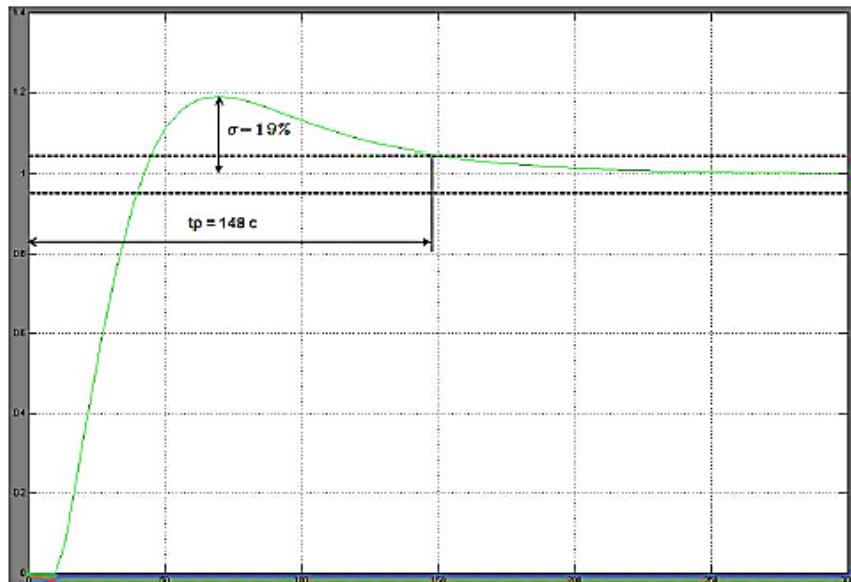


Рисунок 3.30 – Перехідна характеристика САР вологості повітря з ПД– регулятором

Аналіз перехідного процесу системи з ПД – регулятором (рис. 3.30) дозволяє зробити висновок, що статична похибка близька до нуля ($\Delta \approx 0$), величина перерегулювання $\sigma = \frac{1.19-1.0}{1.0} 100\% = 19\%$, час регулювання $t_p = 148 \text{ с}$, коливальність складає $n = 0,5$.

Ці показники задовольняють технічним вимогам до процесу парозволоження повітря на вході в холодильну камеру.

Таким чином за результатами досліджень визначено наступне: при математичному моделюванні САР в якості регулювальних параметрів прийнято температуру і вологість повітря на виході охолоджувача і зволожувача. Керуючим впливом – витрати енергоносіїв – холодильного агента і водяної пари. Вплив інших параметрів розглядався як джерела зовнішнього збурення і їх зміна в часі не враховувалась.

Але дія збурень, у нашому випадку, має суттєво нестационарний за величиною і зміною в часі характер, і є практично невизначеним зовнішнім збурювальним фактором в загальній САР холодильною установкою як сукупністю всіх елементів обладнання. Тому на її вході необхідно подавляти збурювальні дії з боку зовнішніх і внутрішніх джерел (перезавантаження продукту, заморожування інею, відтаювання і т. ін.), що передбачає синтез нечіткої системи керування розглянутим об'єктом.

На доцільність застосування нечіткої САК вказують і результати аналізу динамічних моделей елементів обладнання: всі дії регулюючих впливів на об'єкт для компенсації відхилень передбачають зміну витрат енергоносіїв в процесі керування, що призводить до нелінійності динамічних характеристик об'єктів керування. При цьому традиційний підхід до побудови САК вимагає корегування коефіцієнтів передавальних функцій для компенсації збурень в усіх елементах об'єкту зміною витрат енергоносіїв. Повна інформація про стан об'єкта в такому випадку відсутня. Таким чином, досить проблематичним є використання існуючих стандартних алгоритмів (П-, ПІ-, ПІД) регулювання в процесі синтезу САК холодильною установкою як єдиним багатоконтурним об'єктом. Тому можна вважати доведеним доцільність і ефективність створення енергоефективної САК холодильною установкою із застосуванням нечітких множин, нейронних мереж, генетичних алгоритмів, тощо. Це забезпечить якість функціонування холодильного обладнання плодоовочесховищ навіть при відсутності повної інформації про об'єкт.

На базі розроблених математичних моделей окремих елементів системи – повітроохолоджувача, зволожувача повітря та холодильної камери було

створено узагальнену модель системи автоматичного керування режимами холодильного зберігання, яка дала змогу аналізувати усі процеси, що відбуваються в холодильній установці та самому плодоовочесховищі в динаміці (рис. 3.31).

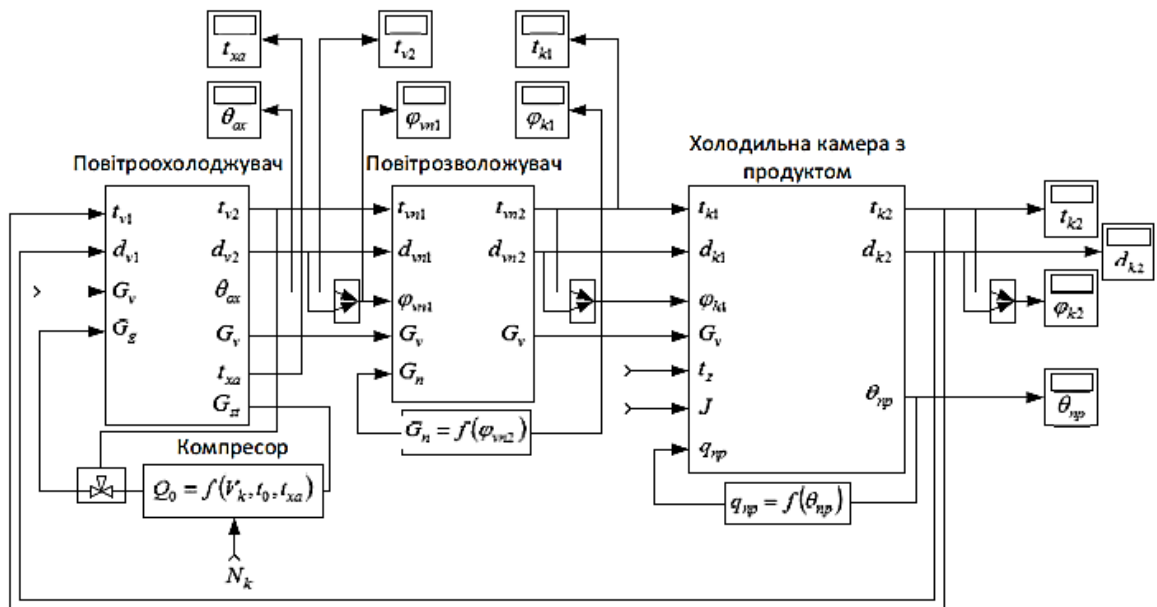


Рисунок 3.31 – Узагальнена модель САК режимами холодильного зберігання продукції у пакеті MATLAB/Simulink

Висновки до розділу

1. Розроблено математичні моделі

- камери холодильного зберігання в плодоовочесховищі, яка дозволяє визначити головні параметри системи в динаміці;
- модель повітроохолоджувача, що дозволяє визначити температуру повітря та холодоагенту в динаміці;
- математична модель зволожувача повітря, що дозволяє визначити вологість повітря на виході зі зволожувача в динаміці.

2. Визначено, що ці локальні системи забезпечують необхідну якість керування температурно-вологісними режимами роботи в діапазоні витрат повітря 1:2 (точність підтримання температури 1 °С, відносної вологості 4 %).

3. Забезпечення необхідної якості керування температурою в плодоовочесховищі може бути досягнуто шляхом використання нечіткого регулятора в системі керування холодильною установкою.

4 СИНТЕЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ КЕРУВАННЯ ХОЛОДИЛЬНИМ ОБЛАДНАННЯМ В ОВОЧЕСХОВИЩАХ

4.1 Синтез нейроінформаційної експертної САК холодопродуктивністю компресора

Для проведення моделювання візьмемо три блоки по 27 наборів експериментальних даних (використовувались дані факторного експерименту роботи [14]): навчальні (Training data), контрольні (Testing data), для перевірки (Checking data). Не обов'язково мати усі три блоки, інколи достатньо лише навчального та контрольного, однак блок Checking data здатний покращити якість подальшої роботи АСК, оскільки дає можливість перевірити, що так зване “перенавчання” мережі не відбулося.

При навчанні експертної системи із навчальної вибірки (Training data) нами були вибрані настройки за умовчанням, встановлено 100 циклів (Epochs) самоналаштування. Отримали прийнятну середньоквадратичну похибку, яка була незначною і становила 1.3587 Вт (рис. 4.1 – 4.2).

ANFIS – це адаптивна штучна нейронна мережа, що базується на системі нечіткої логіки (adaptive neuro-fuzzy inference system).

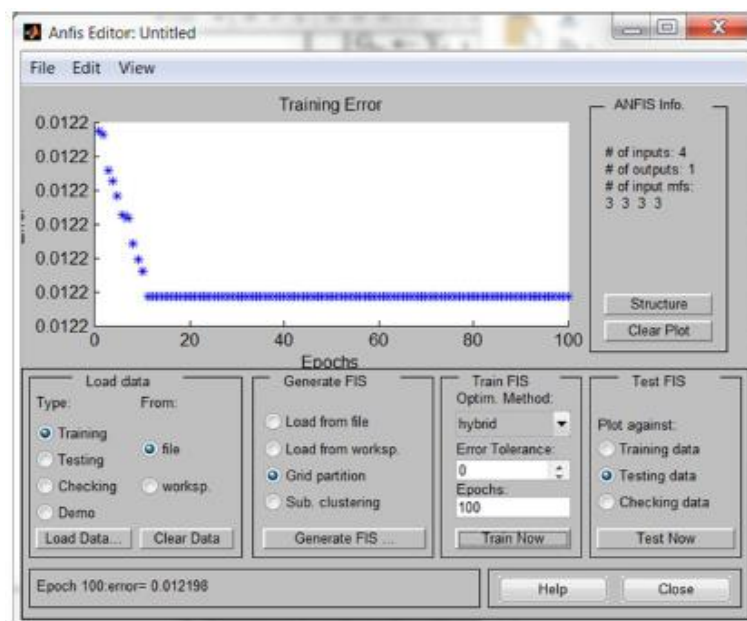


Рисунок 4.1– Поетапне зменшення середньоквадратичної похибки при експертному навчанні ANFIS

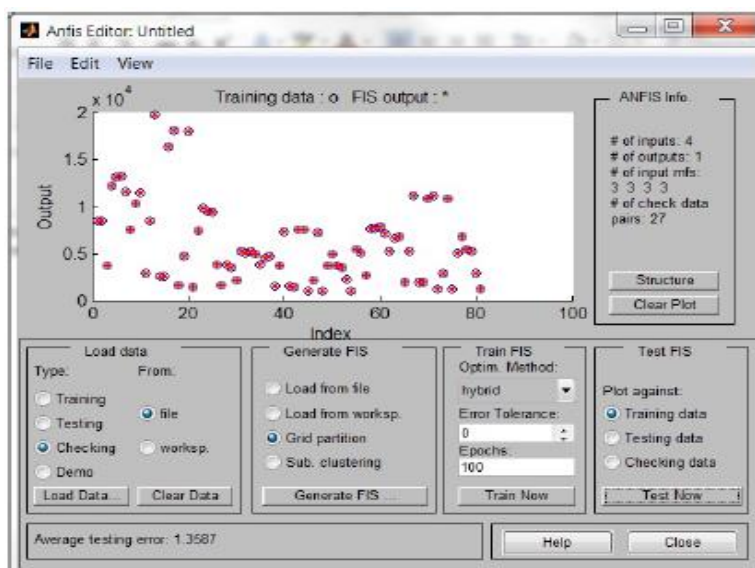


Рисунок 4.2 – Самоналаштування ANFIS на навчальну вибірку експериментальних даних при настройках параметрів системи

Далі було введено значення контрольної вибірки (Testing data). Результати, отримані при налаштуваннях за умовчанням, виявились задовільними – середньоквадратична похибка дорівнювала 0.058 Вт (рис. 4.3). Якість роботи гібридної нейронної мережі оцінили, подавши на вхід дані для перевірки (Checking data). Середньоквадратична похибка становила 0.0037 Вт (рис. 4.4). Отже, ANFIS можна вважати "навченою".

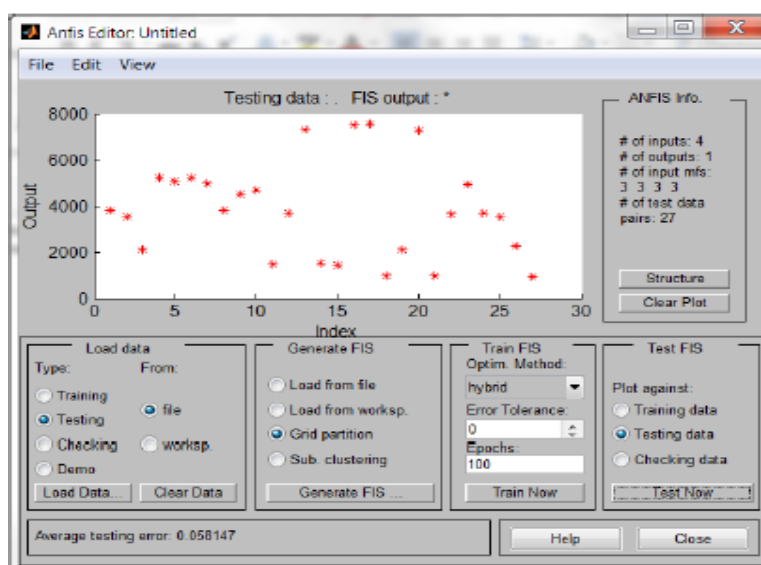


Рисунок 4.3 – Результати самоналаштування ANFIS на тестовий блок даних після експертного настроювання параметрів системи

Для проведення синтезу САК холодопродуктивністю компресора у FIS-редакторі MATLAB ми використали наступний алгоритм:

- вхідну температуру повітря в камері, вхідну вологість повітря та витрати цього повітря було задано;

- набір даних, що було отримано при дослідженні, було включено в одну із вибірок (тестову, навчальну або контрольну) при розробленні САК холодопродуктивністю компресора.

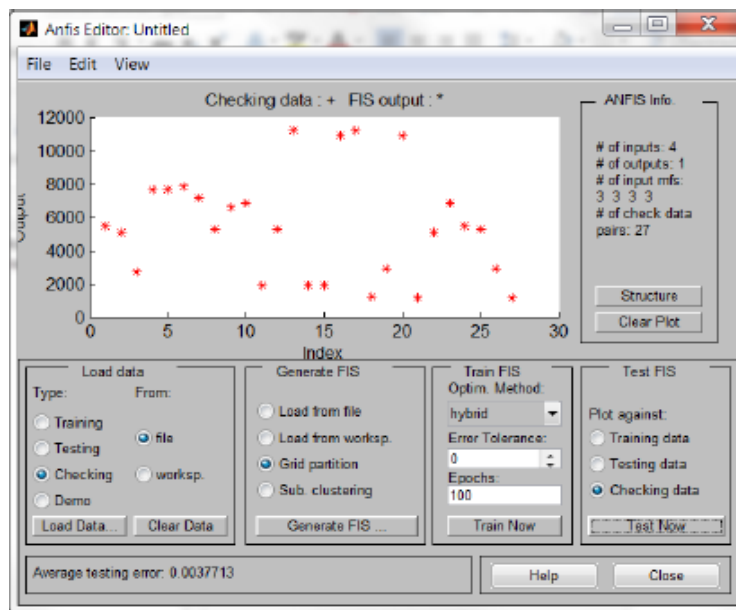


Рисунок 4.4 – Результати самоналаштування ANFIS на контрольний блок даних після настроювання параметрів системи

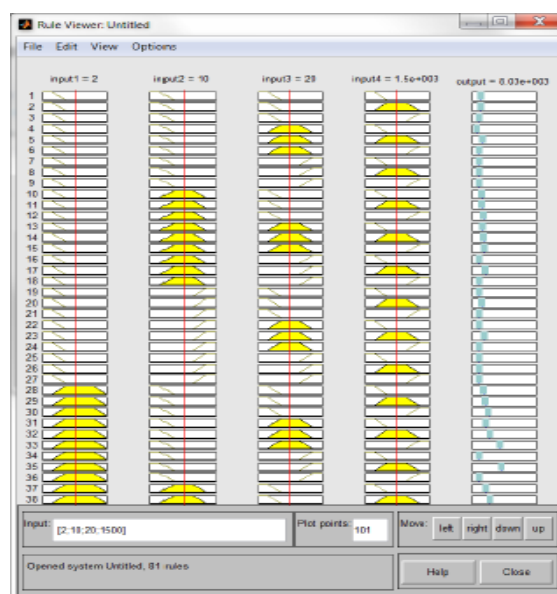


Рисунок 4.5 – Діалогове вікно "Rule" FIS-редактора середовища MATLAB

Вхідними параметрами для синтезування САК холодопродуктивністю компресора були прийняті (рис. 4.6):

- величина витрат повітря G_v , кг/с;
- величина температури на виході камери t_{k2} , °С;
- величина зовнішньої температури t_z , °С;
- величина теплового навантаження на камеру Q_k , Вт.

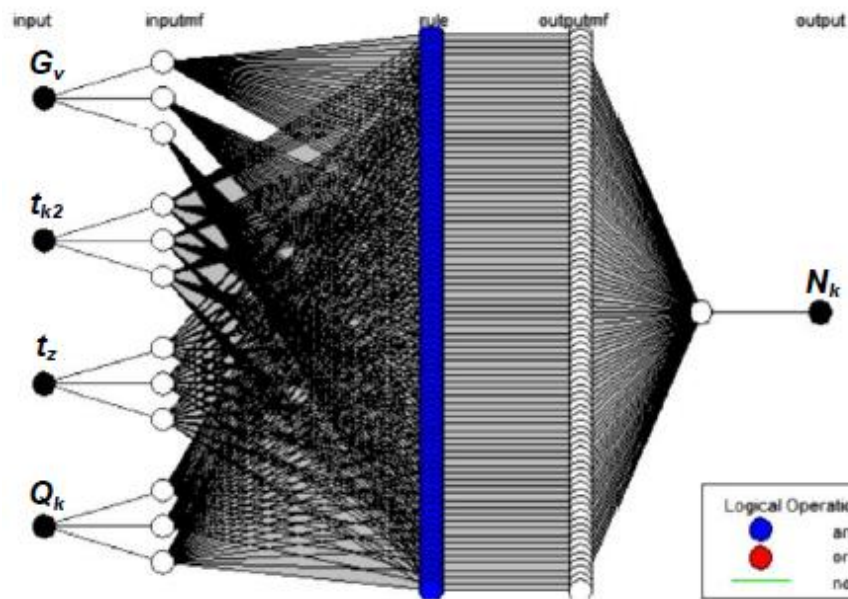


Рисунок 4.6 – Вікно середовища MATLAB/ ANFIS структури неймережевої моделі керування холодильним обладнанням

В результаті проведених досліджень налаштованої нечіткої нейронної мережі було проаналізовано отримані графічні залежності (рис. 4.7 – 4.11). З їх аналізу можна зробити висновки, що мінімальної споживаної потужності компресорної установки можна досягти зменшенням теплонадходжень в камеру як із зовні (t_z) та і з її середини (Q_k).

Також стає зрозумілим, що величина масових витрат повітря (G_v) буде впливати тільки на швидкість охолодження (за умови рівних теплонадходжень). Величина потужності компресора, що визначається з використанням налаштованих нечітких нейронних мереж, відповідає вирішенню поставленої задачі.

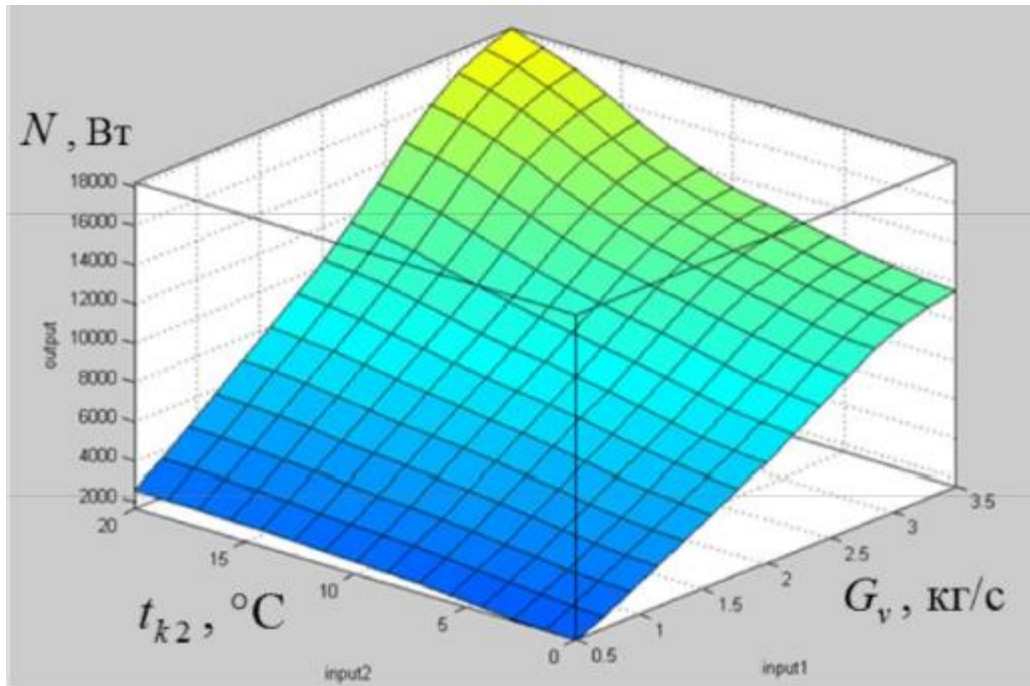


Рисунок 4.7- Залежність потужності компресора N від масових витрат повітря та температури на виході камери

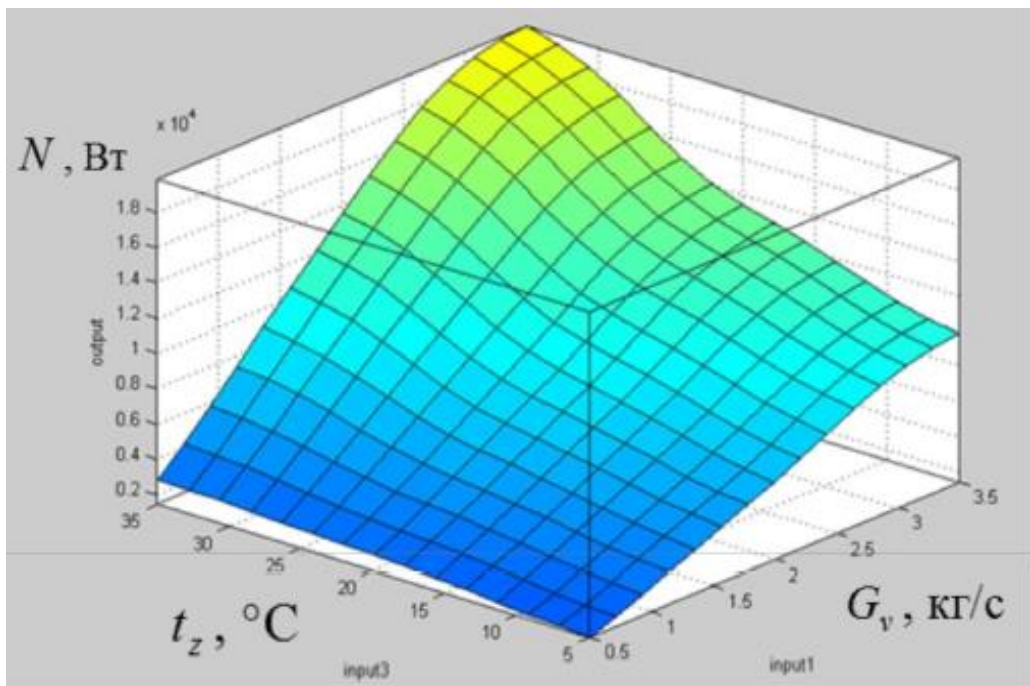


Рисунок 4.8 – Залежність потужності компресора N від масових витрат повітря та температури навколишнього середовища

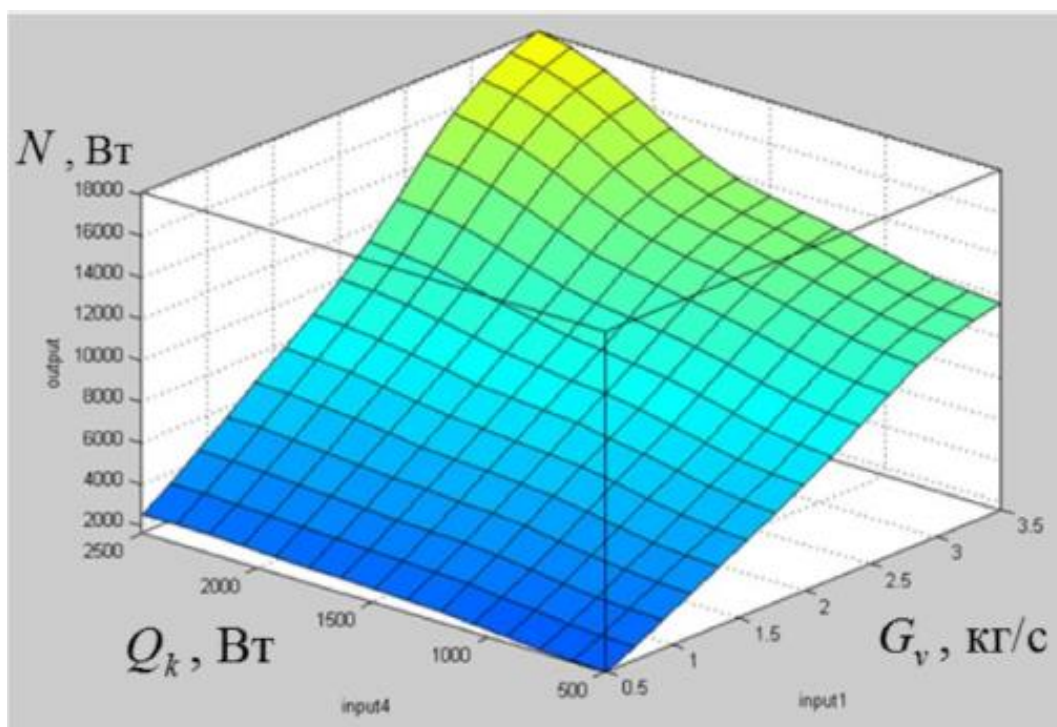


Рисунок 4.9 – Залежність потужності компресора N від масових витрат повітря та теплонадходжень

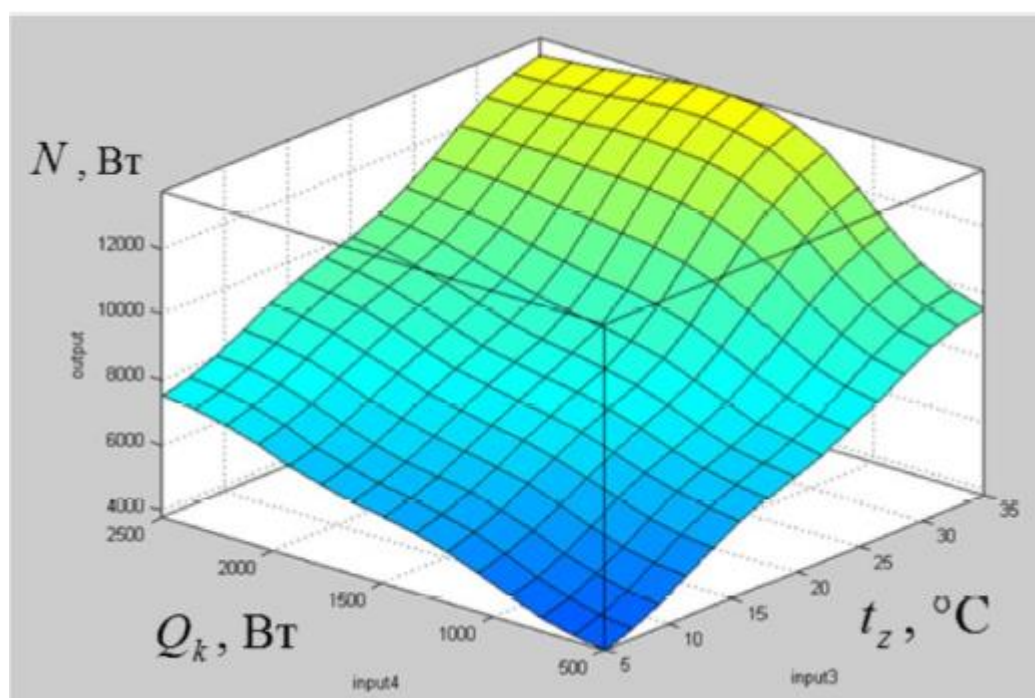


Рисунок 4.10 – Залежність потужності компресора N від температури навколишнього середовища та теплонадходжень

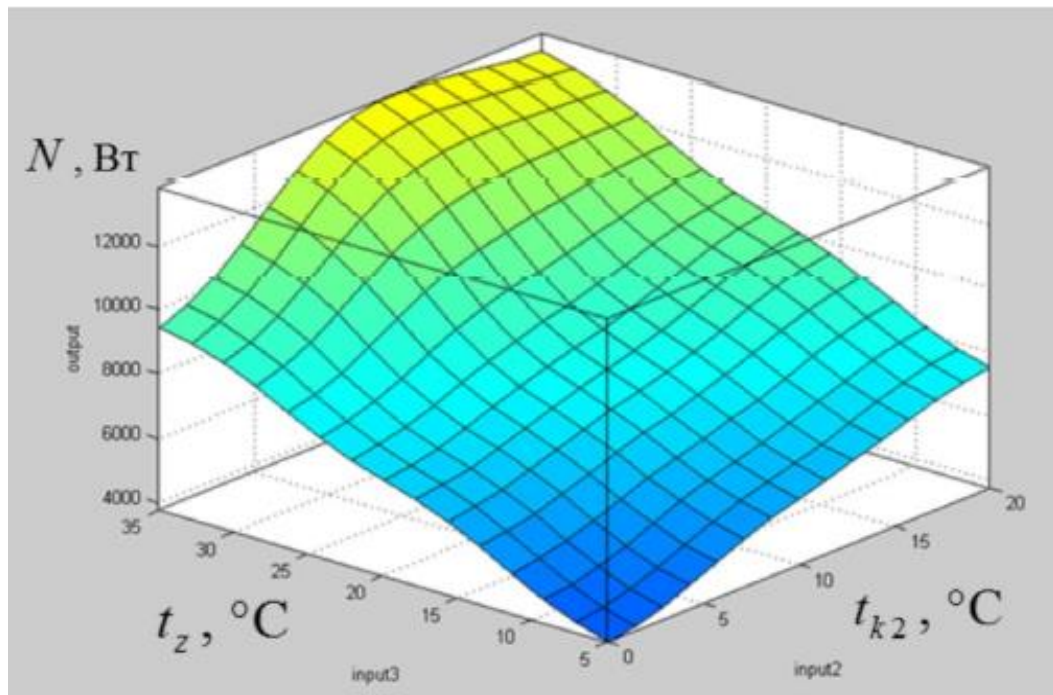


Рисунок 4.11 – Залежність потужності компресора N від температури навколишнього середовища та температури на виході камери

З результатів досліджень можна побачити, що залежності, які були отримані з використанням нечітких нейронних мереж, мають чітко виражений нелінійний характер.

4.2 Аналіз якості функціонування САК холодопродуктивністю компресора з використанням імітаційного моделювання

Для аналізу функціонування синтезованої САК холодопродуктивністю компресора в середовищі MATLAB/Simulink була створена імітаційна модель (рис. 4.12).

Модель процесу підтримування – математичні моделі камери та зволожувача повітря, реалізовано в середовищі MATLAB/Simulink у вигляді функціонального блоку (A-Control compressor).

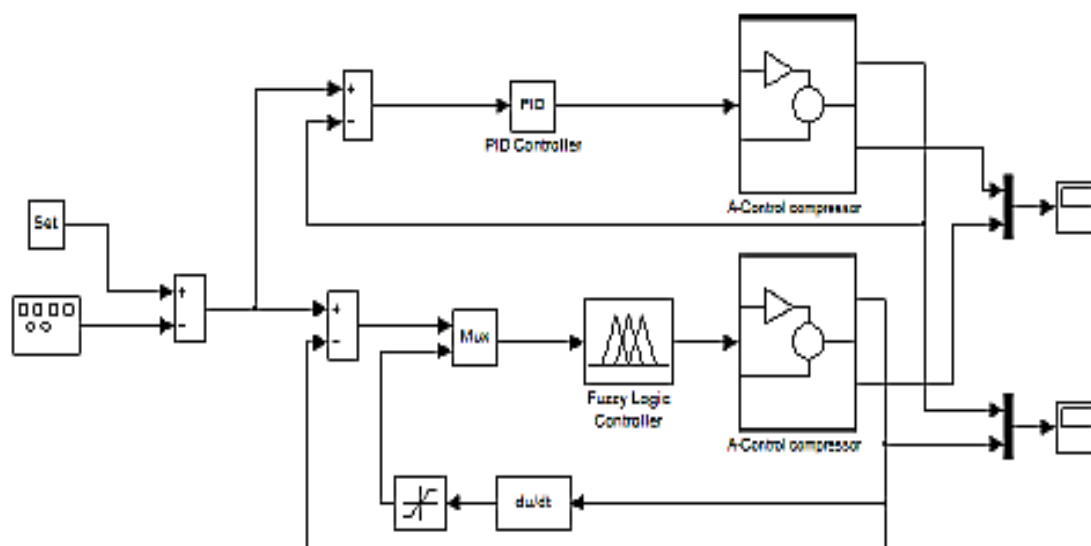


Рисунок 4.12 – Імітаційна модель роботи САК холодопродуктивністю компресора в середовищі MATLAB/Simulink на базі гібридних нейронних мереж та ПІД-регулятора

Система автоматичного керування холодопродуктивністю компресора на базі гібридних нейронних мереж (рис. 4.13), навіть при стохастичній зміні амплітуди значень вхідних параметрів (умови, наближені до виробничих), ефективно функціонувала, виконуючи вимоги щодо підтримки температури повітря в холодильній камері.



Рисунок 4.13 – Якісні характеристики роботи нечіткої нейронної САК холодопродуктивністю компресора в порівнянні з ПІД регулятором

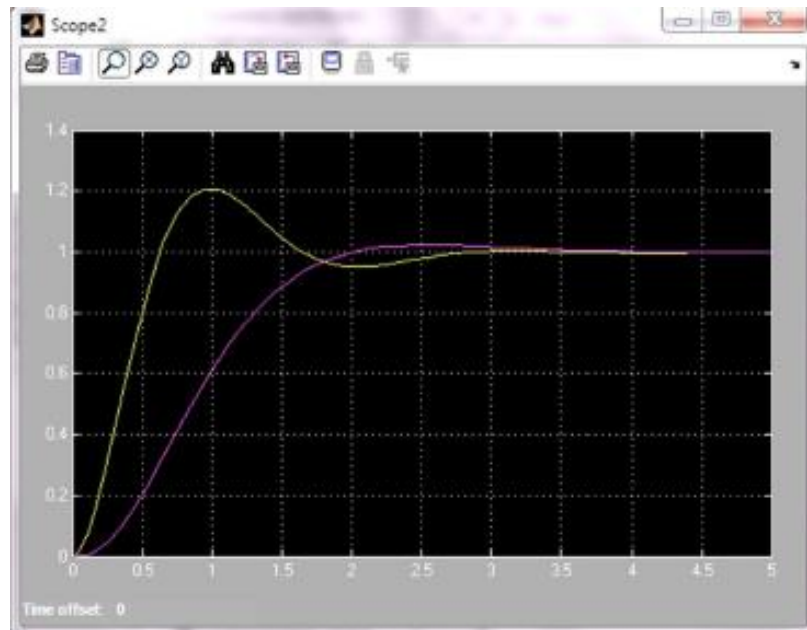


Рисунок 4.14 – Якісні характеристики роботи нечіткої нейронної САК температурою повітря в камері в порівнянні з ПІД регулятором

Функціонування системи автоматичного керування холодопродуктивністю ККА на основі гібридних нейронних мереж характеризуються такими кількісними показниками:

- час регулювання – (20 – 65) хв. (залежно від комбінації вхідних параметрів);
- перерегулювання – біля 2 %;
- максимальне динамічне відхилення – (0,1 – 0,3) °С;
- статична похибка Δ – 0.

Такі характеристики системи керування задовольняють вимогам завдання та відповідним технологічним вимогам зберігання продукції у плодоовочесховищі.

4.3 Апаратна та програмна реалізація енергоефективного керування температурно-вологісними режимами з використанням SCADA Трейс Моуд

В основу автоматизованої системи покладено схему керування холодильною машиною типу MBV20x2-2-2 з компресорною установкою типу 5ПБ20-2-024 потужністю 8,8 кВт, що експлуатується в дослідницькій камері

Подільської дослідної станції садівництва Інституту садівництва НААН України. Для забезпечення енергоефективного регулювання температурно-вологісних параметрів під час холодильного зберігання рослинної продукції розроблено структурну схему системи автоматизованого керування мікрокліматом холодильної камери з використанням SCADA-системи Trace Mode (рис. 4.15).

У запропонованій схемі енергоефективного керування параметрами температури та вологості під час зберігання продукції передбачено застосування двох вимірювальних елементів: датчика температури повітря та датчика відносної вологості повітря.

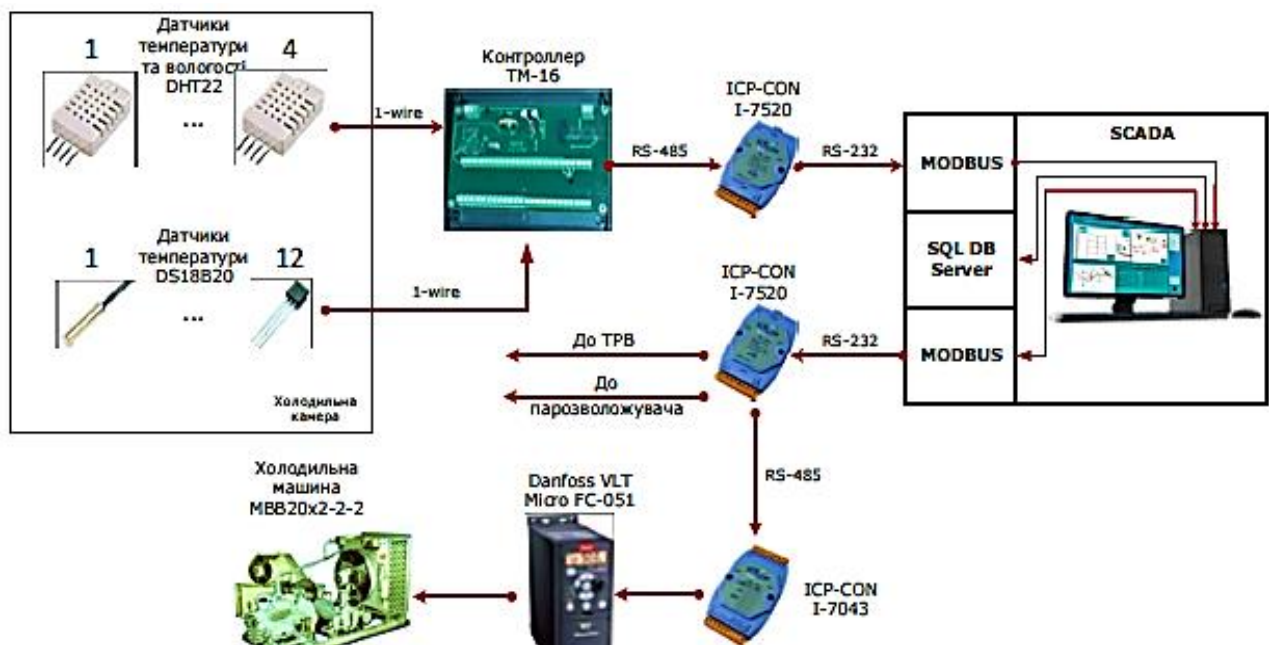


Рисунок 4.15 – Схема реалізації системи автоматичного керування мікрокліматом в холодильній камері з використанням СКАДА-системи

З огляду на технологічні вимоги, зокрема діапазони робочих температур і відносної вологості, було обрано такі сучасні засоби вимірювання:

- капсульний датчик температури повітря DS18b20;
- датчик відносної вологості DHT-22.

Як вимірювальний модуль запропоновано застосувати мікропроцесорний блок TM-16 на базі мікроконтролера Atmel (рис. 4.15). Цей модуль TM-16

містить 16 каналів, серед яких 4 призначено для підключення датчиків DHT-22 та 12 — для підключення датчиків DS18B20. Датчики температури й вологості встановлюються як у внутрішньому об'ємі камери, так і зовні.

Для контролю та керування виконавчими механізмами використано модуль дискретного виходу I-7043, який має 16 дискретних каналів та відомий інтерфейс зв'язку RS-485. Частотне регулювання роботи компресора холодильної машини забезпечує перетворювач частоти Danfoss VLT Micro FC-051 потужністю 11 кВт.

У ролі системи автоматичного керування запропоновано використання SCADA-платформу Trace Mode [22], яка дає змогу отримувати дані з датчиків температури та вологості повітря, а також реалізовувати відповідно до заданого алгоритму нечітке керування частотою обертання електродвигуна компресора. SCADA-система забезпечує також операторський нагляд і контроль за перебігом технологічного процесу у режимі реального часу. Схема електрична принципова модуля опитування системи автоматизованого керування технологічним мікрокліматом в холодильній камері приведена в додаку В.

Програмний пакет, необхідний для роботи системи, може бути встановлений на промисловий комп'ютер, а взаємодія з об'єктом керування забезпечується через драйвери введення-виведення або спеціалізовані сервери. Система TRACE MODE 7 об'єднує повний комплекс інструментів для розроблення АСУ ТП та керування виробничими бізнес-процесами, включаючи: операторські інтерфейси (SCADA/HMI), засоби створення розподілених систем керування, промислову базу даних реального часу, компоненти для програмування промислових контролерів, системи керування основними фондами та технічним обслуговуванням обладнання, а також системи управління виробництвом. TRACE MODE 7 надає можливість поетапно розширювати функціональність автоматизованої системи: від елементарного моніторингу та візуалізації технологічного процесу на одному ПК з SCADA/HMI — до впровадження складних контурів регулювання, організації розподілених обчислень, підключення додаткових робочих місць та інтеграції економічних

модулів, таких як облік і технічне обслуговування обладнання, управління персоналом і контроль виконання виробничих операцій.

Система TRACE MODE 7 здатна підтримувати практично будь-які формати даних, у цьому вона стала більш схожа на універсальне середовище візуального програмування. Крім звичних форматів зберігання дискретних сигналів і значень із плаваючою комою, у цій версії SCADA реалізована підтримка рядків, змінних подвійної точності (double float, hex32), а також міток часу (як самостійних каналів). Для програмування в TRACE MODE 7 використовуємо мови стандарту IEC 6-1131/3, який включає до себе мови Техно FBD та Техно ST.

Розроблена в даній роботі SCADA-система для ефективного зберігання плодоовочевої продукції буде забезпечувати підтримання необхідних значень температури та вологості повітря шляхом регулювання холодопродуктивності компресора та подачі водяної пари зі зволожувача. Оптимальні технологічні параметри визначаються на основі математичного моделювання, після чого у вигляді керувальних сигналів передаються до частотного перетворювача через персональний комп'ютер, використовуючи COM-порт і протокол обміну MODBUS RTU.

Висновки до розділу

Дана система забезпечує мінімізацію зовнішніх впливів на плодоовочепродукт і компенсує теплопритоки від його самозігрівання, використовуючи мінімально необхідну кількість енергії завдяки частотному регулюванню швидкості електродвигуна компресора, що дає змогу підвищити доцільність та економічні показники зберігання продукції.

ВИСНОВКИ

У даній магістерській роботі розв'язано задачу підвищення енергоефективності системи підтримання температурно-вологісного режиму в плодоовочесховищі з машинним охолодженням шляхом впровадження автоматизованого керування ключовими елементами обладнання.

1. З'ясовано, що наявні системи автоматизації холодильних установок для зберігання овочевої продукції не забезпечують належної ефективності керування для утримання необхідних параметрів технологічного мікроклімату. Показано, що головною умовою енергоефективного керування є узгодження холодопродуктивності установки з тепловим навантаженням камери.

2. Теоретичні дослідження процесів взаємодії охолодженого повітря з продукцією продемонстрували визначальний вплив температури на динаміку втрат продукції та дозволили встановити основний регульований параметр системи.

3. Запропоновано новий підхід до автоматизації керування холодною установкою, який базується на тому, що температура циркулюючого в камері повітря на вході в повітроохолоджувач є мірою впливу комплексного збурювального чинника – часових внутрішніх і зовнішніх теплонадходжень, який можна компенсувати зміною подачі повітря і зміною потужності компресорної установки, при цьому необхідна стабілізація температури повітря на вході в камеру.

4. Розроблені математичні моделі для визначення параметрів процесу, через які здійснюється керування режимом холодної установки, ці моделі дозволяють обґрунтувати підхід до стабілізації режиму зберігання, заснований на застосування нечітких нейронних мереж.

5. Забезпечено мінімізацію зовнішніх впливів на продукцію та компенсацію теплопритоків від її самозігрівання з мінімальними енерговитратами завдяки використанню частотного регулювання швидкості двигуна компресора.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Грищенко В. О. Автоматизація керування системою створення мікроклімату в камері плодоовочесховищ / В. О. Грищенко // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія «Техніка та енергетика АПК». – 2014. – Вип. 194. – Ч. 2 – С. 206–209.
2. Котов Б. І. Енергозберігаючий алгоритм управління технологічним мікрокліматом / Б. І. Котов // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія "Техніка та енергетика АПК". – К., 2011. – Вип. 166. – Ч. 4. – С. 147–156.
3. Бондар Ю. С. Передові технології в керуванні кондиціонерами / Холод, м+т. – 2004. – № 4. – С. 38–39.
4. Живиця Ю. В. Система інтелектуальної підтримки прийняття рішень для процесів керування холодильними установками: дис. на здобуття наукового ступеня канд. техн. наук: спец. 05.13.07 / Ю. В. Живиця. – Одеса, 2009. – 160 с.
5. Грищенко В. О. Застосування примусового вентилявання при зберіганні плодоовочевої продукції / В. О. Грищенко // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. – Кіровоград, 2004. – Вип. 34. – С. 80–83.
6. Желіба Ю. О. Енергозбереження при виробництві та споживанні холоду / Ю. О. Желіба // Холод. – 2004. – № 2. – С. 39–43.
7. Котов Б. І. Визначення втрат плодоовочевої продукції на основі моделі тепло- і масоперенесення / Котов Б. І., Грищенко В. О., Толстолік Л. Н. // Праці Таврійська державна агротехнічна академія. – Мелітополь: ТДАТА, 2004. – Вип. 19. – С. 29–35.
8. Котов Б. І. Математичні моделі динаміки електричних зволожувачів повітря / Б. І. Котов, В. О. Грищенко // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. – Кіровоград, 2013. – Вип. 43. – Ч. 1. – С. 71–76.
9. Інтелектуальні системи автоматичного керування. Реалізація систем fuzzy-керування з використанням програмних засобів інтегрованого середовища

Matlab. Комп'ютерний практикум: навчальний посібник для здобувачів ступеня магістра за спеціальністю 141 "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка" / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: О. В. Данілін, С. В. Бойченко, А. В. Босак, І. Я. Майданський. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. – 48 с.

10. Salau, Ayodeji & Takele, Haymanot. (2022). Towards the Optimal Performance of Washing Machines Using Fuzzy Logic. Scientific Programming. 2022. 1-11. 10.1155/2022/8061063

11. Radu-Emil Precup, Anh-Tu Nguyen, Sašo Blažič. A Survey on Fuzzy Control for Mechatronics Applications. – Режим доступу:

<https://www.researchgate.net/publication/376377595>

12. Fuzzy sets and pattern recognition. Computer Science Department at Princeton University. – Режим доступу:

<https://www.cs.princeton.edu/courses/archive/fall07/cos436/HIDDEN/Knapp/fuzzy0>

13. Голик О. П. Нейроадаптивний контур нечіткої системи керування автономним енергопостачанням на основі енергій сонця та вітру / О. П. Голик, Р. В. Жесан, В. М. Штепа // Наук. вісн. Національного ун-ту біоресурсів і природокористування України. Сер. «Техніка та енергетика АПК» . – 2011. – № 161. – С. 133–142.

14. Грищенко В. О. Реалізація автоматизованої системи керування динамічними режимами камер холодильного зберігання плодоовочевої продукції / В. О. Грищенко // Науковий вісник Ніжинського агротехнічного університету. – Ніжин, 2009. – С. 196–199.

15. Шефер О.В. Електропривод та автоматизація загальнопромислових механізмів: конспект лекцій. – Полтава: ПолтНТУ, 2011. – 154 с.

16. Farhan A.S., Аyman A.Aly.El. Fundamentals of Automatic Control: Theory and Application. – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. – 616 p.

17. Шефер, В.В. Електричні машини: навчальний посібник / В.В. Онушко, О.В. Шефер. – Полтава, ПолтНТУ, 2015. – 536 с.

18. Лазарєв Ю. Ф. Моделювання динамічних систем у Matlab. Електронний навчальний посібник. – Київ: НТУУ "КПІ", 2011. – 421 с.
19. Основи комп'ютерного моделювання: навч. посібник / М.С. Барабаш, П.М. Кір'язєв, О.І. Лапенко, М.А. Ромашкіна. 2-е вид. стер. – К.: НАУ, 2019. – 492 с.
20. Голодний І.М., Червінський Л.С., Жильцов А.В., Санченко О.В. Романенко О.І. Моделювання регульованого електропривода: Підручник. – К.: Аграр Медіа Груп, 2019. – 266 с.: іл.
21. MATLAB Programming for Engineers Stephen J. Chapman 2020. – 305с.
22. Пупена О.М. Розроблення людино-машинних інтерфейсів та систем збирання даних з використанням програмних засобів SCADA/HMI: Навч. посіб. – Київ: Видавництво Ліра-К, 2020. – 594 с. – ISBN 978–617–7910–07– 6.
23. SCADA-система для керування енергетичними потоками промислової теплиці / В. П. Лисенко, І. М. Болбот, Т. І. Лендел. – Національний університет біоресурсів і природокористування України «Енергетика і автоматика» - 2022, №4. – С. 24-33. DOI 10.31548/energiya2022.04.024
24. Шефер О.В., Єрмілова Н.В. Методичні рекомендації до виконання кваліфікаційної роботи для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня зі спеціальності G3 «Електрична інженерія» (141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка») – Полтава: Національний університет імені Юрія Кондратюка, 2025. – 26 с.
25. Слинко М.О., Нікітовський П.М. Аналіз та вибір типу автоматичного регулятора в системах керування мікрокліматом овочесховищ // Збірник тез за матеріалами II Міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Молодіжна наука: інновації та глобальні виклики». (Полтава, 07 листопада 2025 р.) – Полтава: НУПІ імені Юрія Кондратюка, 2025. С. 316-317.

Міністерство освіти та науки України
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Кафедра автоматики, електроніки та телекомунікацій

**Розроблення та дослідження автоматизованої системи
забезпечення раціонального температурно-вологісного
режиму в плодовоовочесховищі**

Кваліфікаційна робота магістра

Виконав:

студент групи 601МЕ

Слнсько М.О.

Керівник:

доцент, канд. техн. наук

Єрмілова Н.В.

Полтава 2026

ДОДАТКИ
Додаток А

Актуальність теми. Сучасною аграрною політикою в Україні визначено за доцільне зберігати плодоовочеву продукцію у місцях, де вона виробляється, що дає можливість знизувати втрати плодів та овочів.

В останні роки намітився значний прогрес в автоматизації обладнання плодоовочесховищ, однак дослідження в сфері мінімізації витрат енергії на процес зберігання овочевої продукції шляхом керування ним за тепловим навантаженням є актуальними, необхідними і своєчасними.

Предметом дослідження є система керування обладнанням плодоовочесховища, яка включає компресори, вентилятори, розпилювачі, направляючі апарати, контрольно-вимірювальну апаратуру та інші додаткові засоби.

Об'єктом дослідження є процеси, що відбуваються в приміщеннях плодоовочесховищ під впливом комплексного збурювального чинника – часових внутрішніх і зовнішніх теплонаходжень.

Мета дослідження – розроблення автоматизованої системи забезпечення раціонального температурно-вологісного режиму в плодоовочесховищі для підвищення його енергетичної і технологічної ефективності.

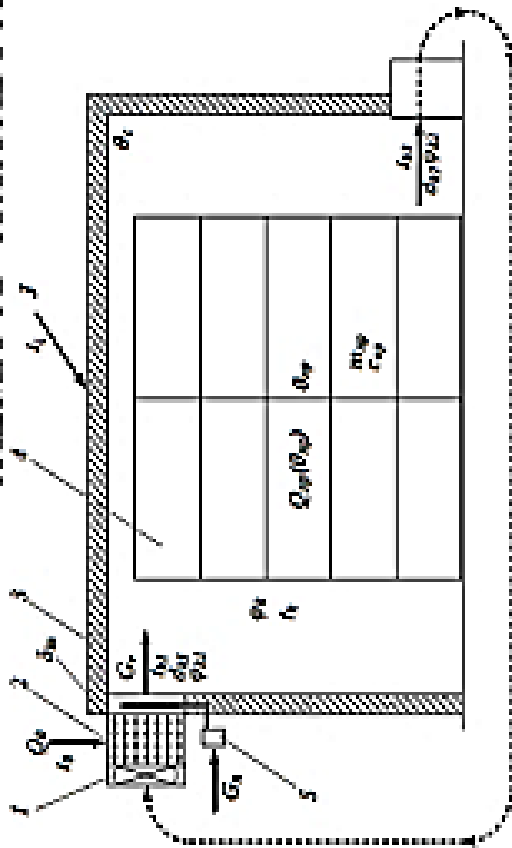
3

Основні задачі дослідження:

- провести аналіз процесів, що відбуваються при холодильному зберіганні овочевої продукції, як об'єкта керування, визначити шляхи вдосконалення системи автоматичного керування (САК);
- експериментально дослідити режими охолодження овочевої продукції, виявити та кількісно оцінити вплив основних контрольованих параметрів (температура, вологість і швидкість руху, питомі витрати повітря) на втрати маси продукції;
- розробити математичні моделі окремих елементів та загальну математичну модель холодильної установки і камери з продуктом;
- розробити та дослідити модель теплових процесів холодильної установки для керування її режимами;
- застосувати апарат нечітких множин для створення нейромережевої системи і алгоритму керування холодильним обладнанням в овочесховищах;
- розробити автоматичну систему і комплекс технічних засобів, для забезпечення раціональних тепловологісних режимів в холодильній камері.

СХЕМА ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ

4

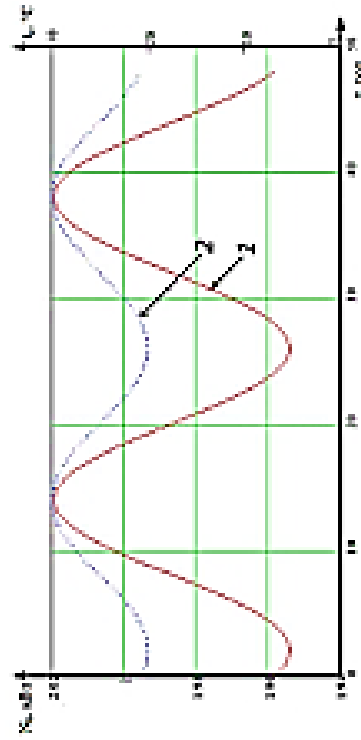


- t – температура змісної холодоагенту,
- t_k – температура повітря в камері,
- $t_{\text{вн}}$ – температура біною,
- Q_c – холодопродуктивність ЕХА,
- G_v – витрати повітря,
- $\phi_{\text{вн}}$ – температура повітря на вході в камеру,
- $G_{\text{вн}}$ – витрати пари на зволоження,
- ϕ_k – вологість повітря в камері,
- $\phi_{\text{вн}}$ – вологість повітря в камері,
- $\phi_{\text{вн}}$ – температура орошення,
- $\phi_{\text{вн}}$ – температура продуції,
- $t_{\text{вн}}$ – температура повітря на вході з камери,
- $\phi_{\text{вн}}$ – вологість повітря на вході з камери,
- J – інтенсивність сонячного випромінювання,
- t_c – температура зовнішнього повітря.

Технологічна схема процесу з холодильного зберігання овочової продукції: 1 – вентилятор, 2 – повітроохолоджувач, 3 – стінні камери, 4 – овочева продукція, що зберігається в контейнерах, 5 – парозволожувач

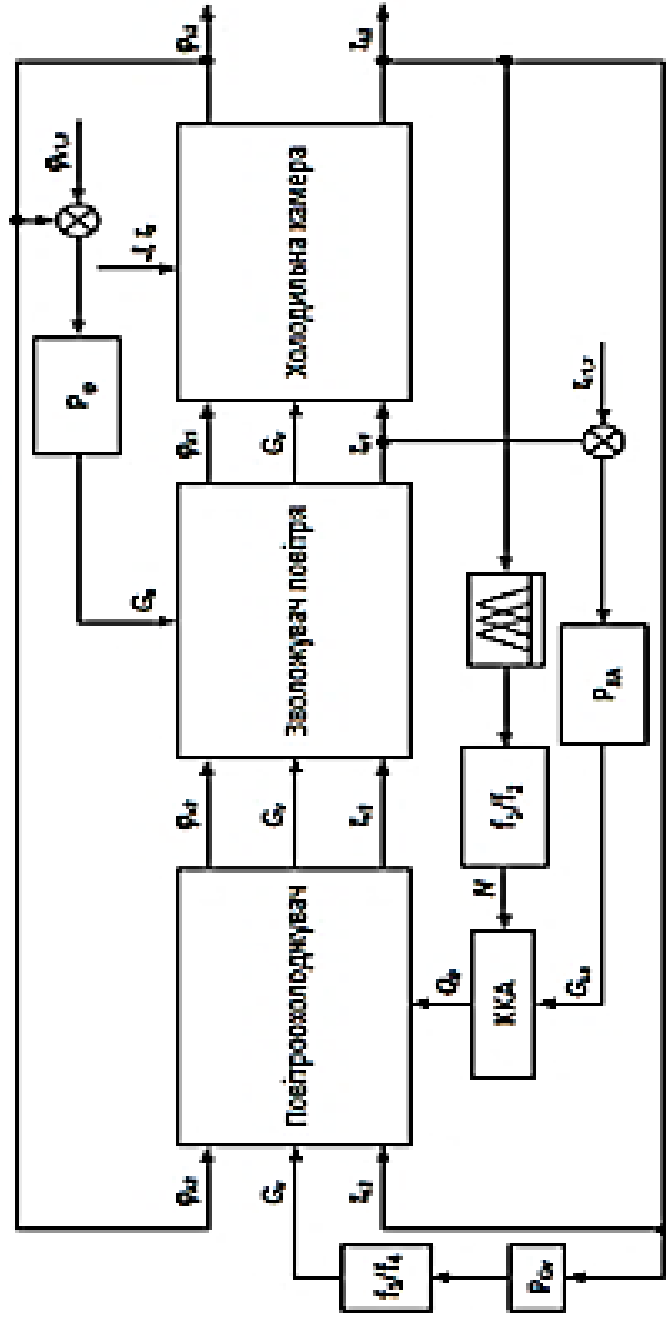
№	Об'єкт	Позначення	Рівні зберігання
1	Витрати повітря, м ³ /с	X ₁	0.1...1.7
2	Температура повітря на вході в камеру, °С	X ₂	1...9
3	Температура повітряного паропотоку, °С	X ₃	1...25
4	Витрати на опалення, Вт	X ₄	100...1500

Фактори, що впливають на режим роботи холодильної установки
 X_1 - G_v , X_2 - $t_{\text{вн}}$, X_3 - $t_{\text{вн}}$, X_4 - Q_c



Залежність потужності компресора (1) від зміни температури зовнішнього повітря (2) в часі

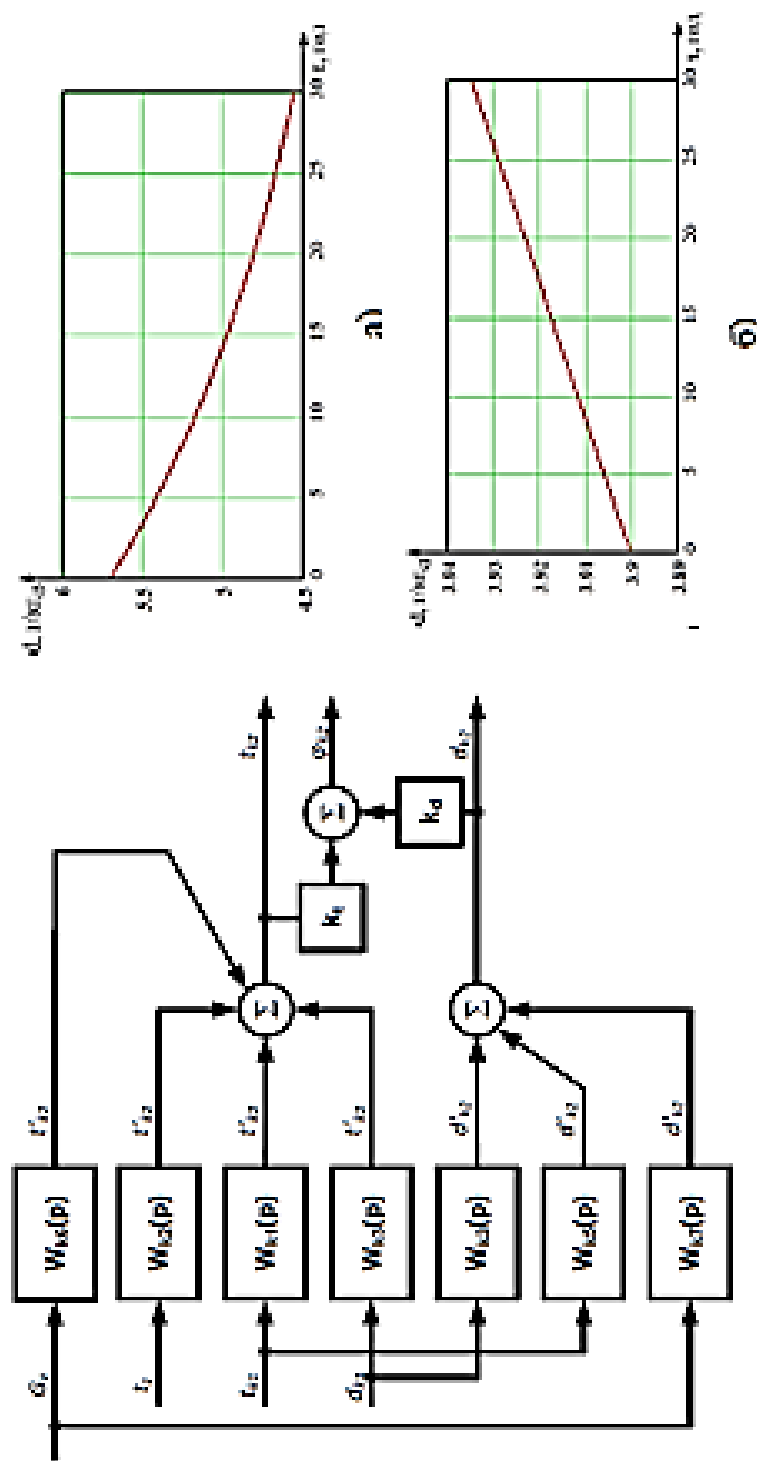
5
СХЕМА УЗАГАЛЬНЕНОЇ САК ХОЛОДИЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ В
ОВОЧЕСХОВИЩІ З ВИКОРИСТАННЯМ НЕЧІТКОГО РЕГУЛЯТОРА



$P_{ср}$ – регулятор витрат повітря повітроохолоджувача; $P_{к}$ – регулятор поєднання (рідкого) холодагенту у повітроохолоджувач; $P_{в}$ – регулятор повітрозволожувача

СТРУКТУРНА СХЕМА КАМЕРИ ХОЛОДИЛЬНОГО ЗБЕРІГАННЯ ТА ДИНАМІКА ЗМІН ПАРАМЕТРІВ

6

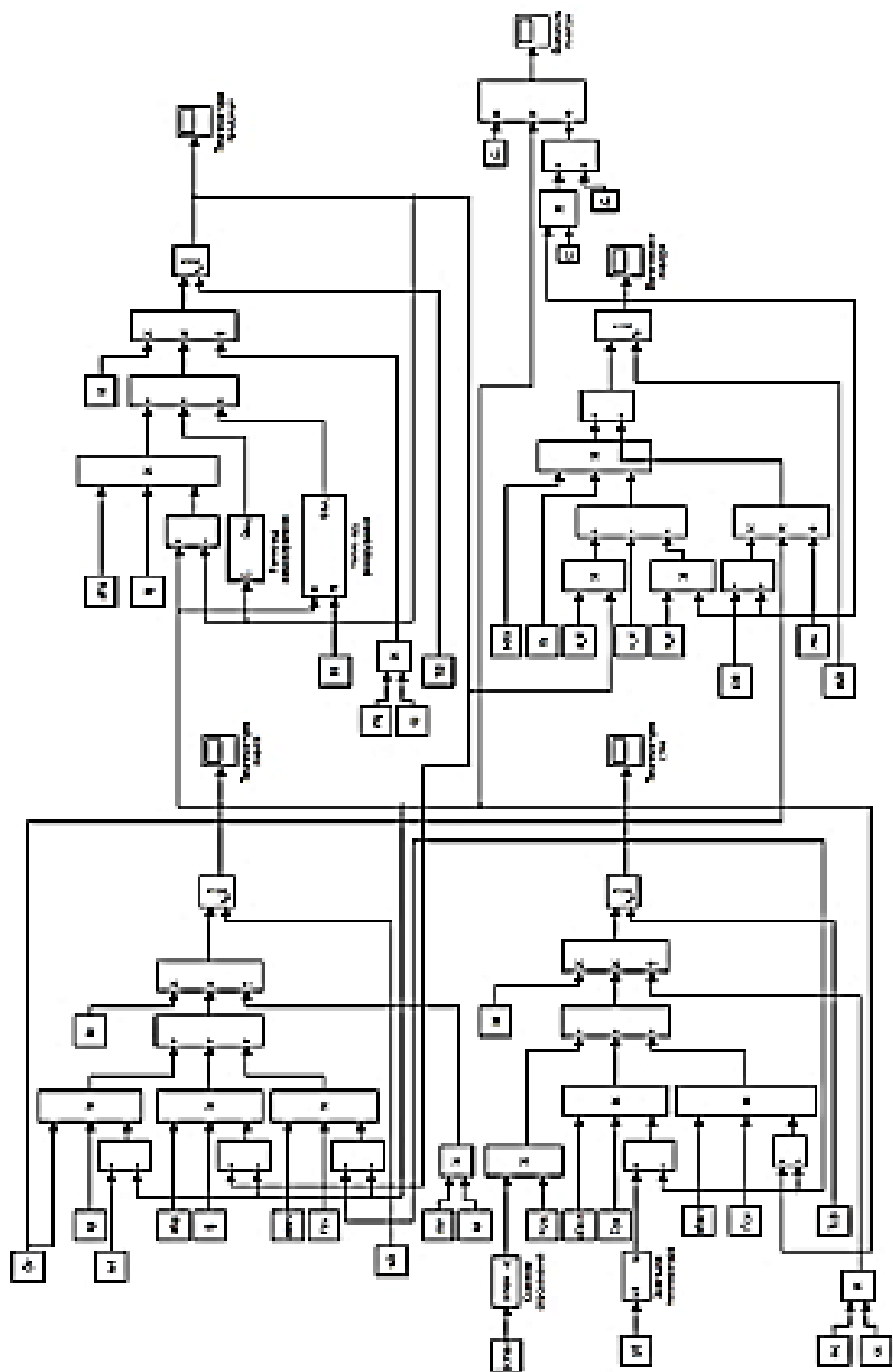


Структурна схема камери холодильного зберігання
своєївипroduкції

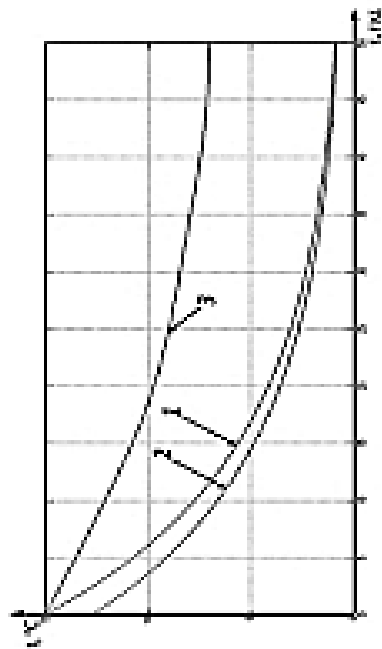
Динаміка зміни вологовмісту повітря в камері в
процесі охолодження (а) та нагрівання (б)

ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ В СИСТЕМІ МАТЛАВ/SIMULINK
ХОЛОДИЛЬНОЇ КАМЕРИ З ПРОДУКТОМ ЗБЕРІГАННЯ

7



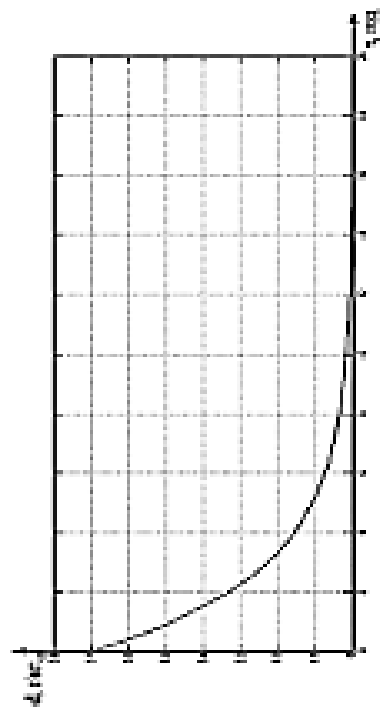
ГРАФІКИ ДОСЛІДЖЕНЬ ЗМІН ПАРАМЕТРІВ У ЧАСІ 8



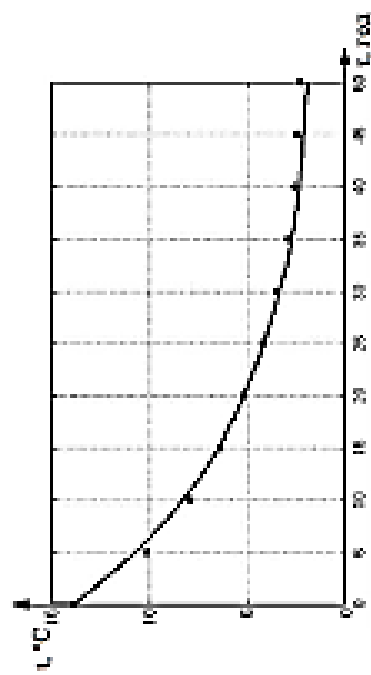
Зміна температури замороженої продукції в часі при охолодженні



Зміна температури продукції в камері при розігріві

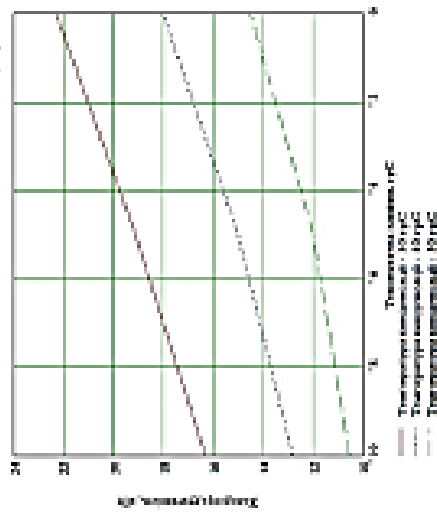


Графікна зміни вологовмісту повітря

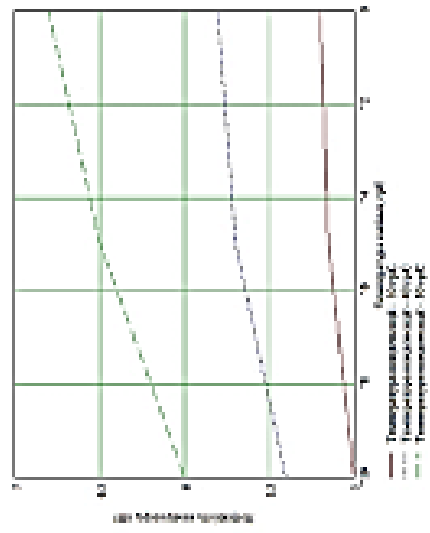


Зміна температури повітря в камері при охолодженні

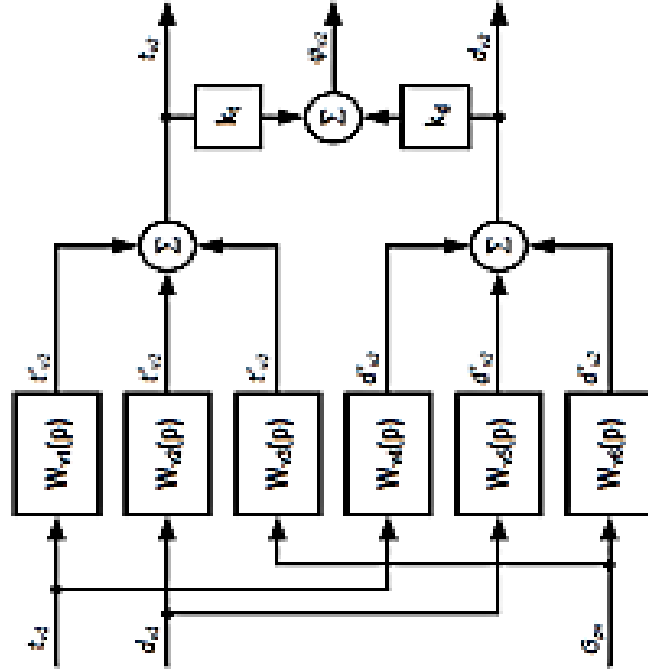
СТРУКТУРНА СХЕМА ПОВІТРООХОЛОДЖУВАЧА ТА ДИНАМІКА ЗМІН ПАРАМЕТРІВ 9



Залежність холодопродуктивності від температури кипіння і конденсації холодильного агенту



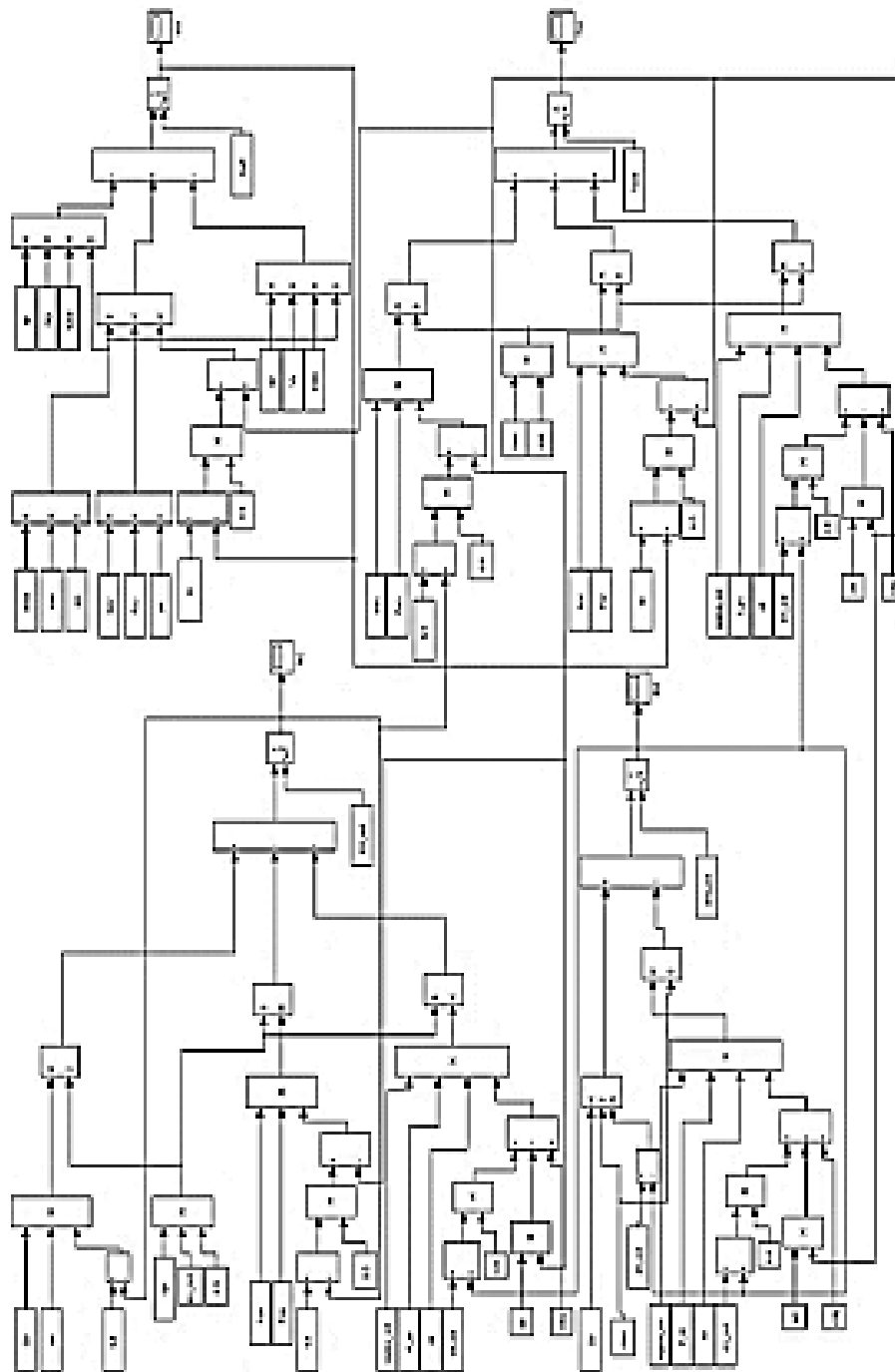
Залежність потужності компресорної установки від температури кипіння і конденсації холодильного агенту



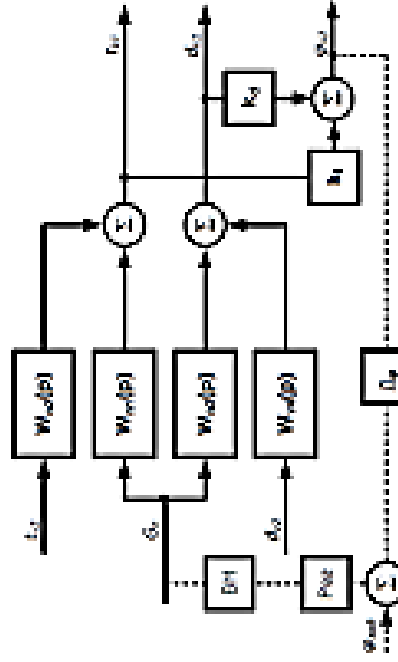
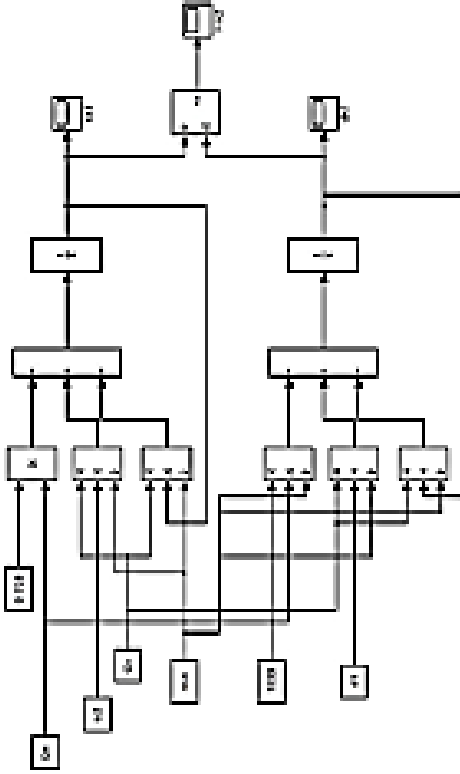
Структурна схема повітряохолоджувача

10

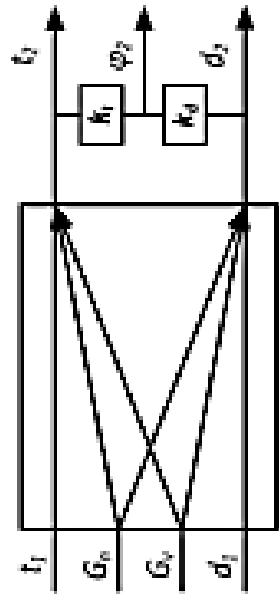
ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ В СИСТЕМІ МАТЛАВ/SIMULINK
ПОВІТРОХОЛОДЖУВАЧА



СТРУКТУРНА СХЕМА ТА МОДЕЛЮВАННЯ ПАРОВОЛОЖУВАЧА

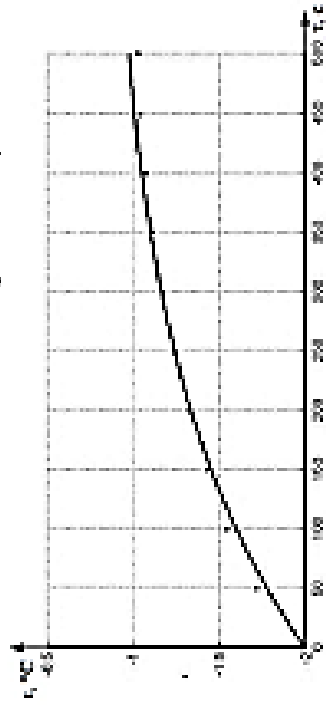


Структурна схема пароволожувача



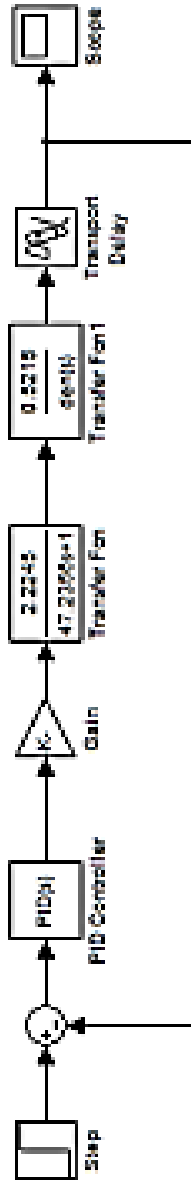
Диференціальна модель пароволожувача

Вітальніна модель динамічних режимів в системі MATLAB/Simulink для пароволожувача

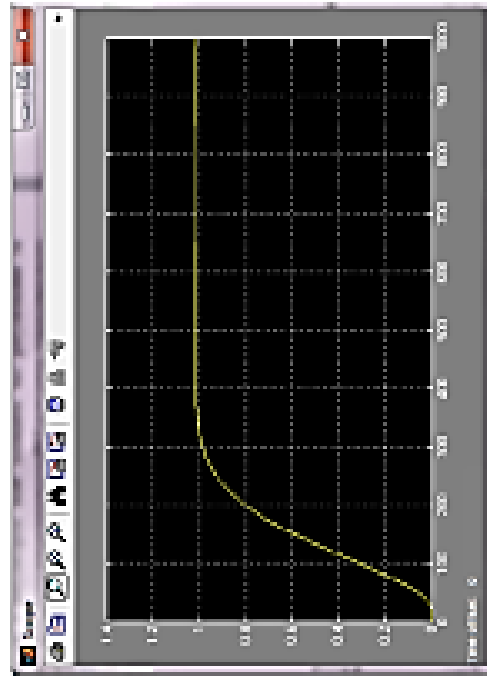


Експериментальні (крапки) та імітаційні динамічні характеристики температури повітря на виході з пароволожувача

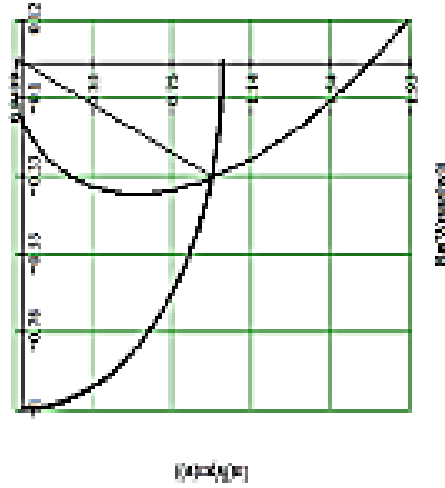
ПОБУДОВА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ САР ПОДАВАННЯ ХОЛОДОАГЕНТУ У ВИПАРНИК



Структурна схема в MATLAB/Simulink системи автоматичного регулювання подавння холодоагенту у випарник

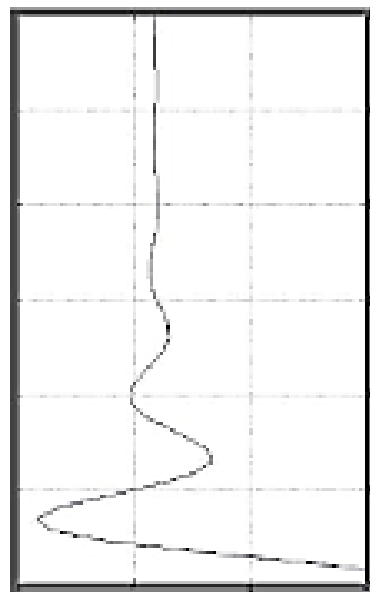
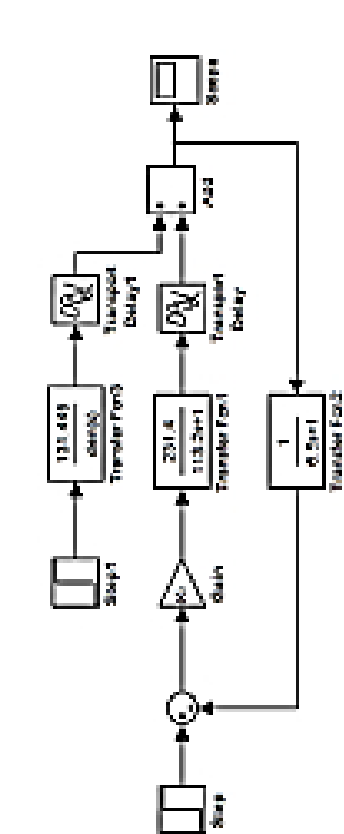


Перехідний процес в MATLAB/Simulink системі автоматичного регулювання подавння холодоагенту у випарник з ПД-регулятором



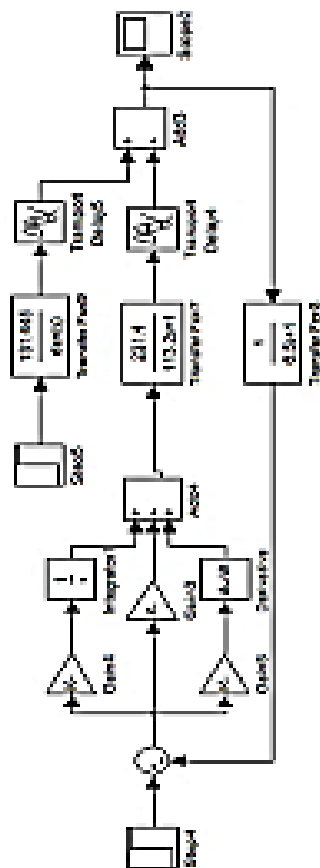
Годограф Найквіста

Визначені показники стійкості для цієї системи становлять:
 - запас стійкості по амплітуді – 12 dB;
 - запас стійкості по фазі – 70.7°

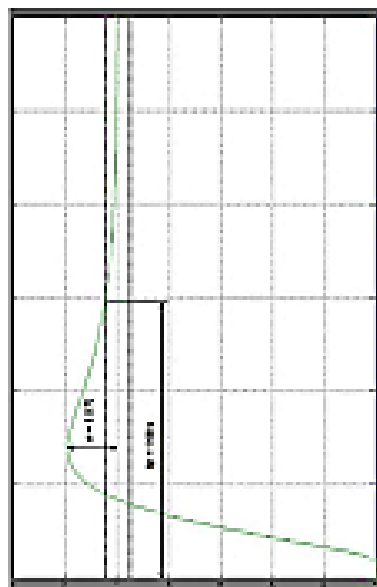


Структурно-алгоритмічна схема системи автоматичного керування вологістю повітря на вході в камеру з П-регулятором

Перехідна характеристика САК вологості повітря з П- регулятором

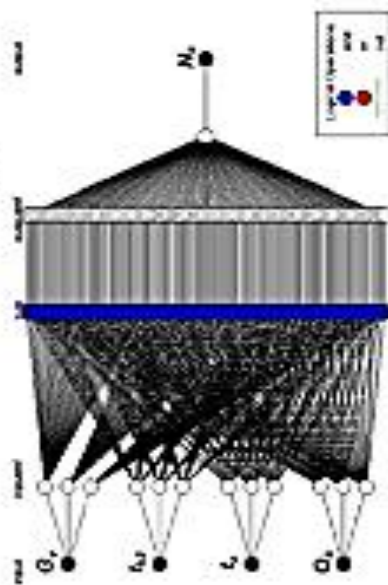


Структурна алгоритмічна схема САК вологості повітря з ПІД- регулятором

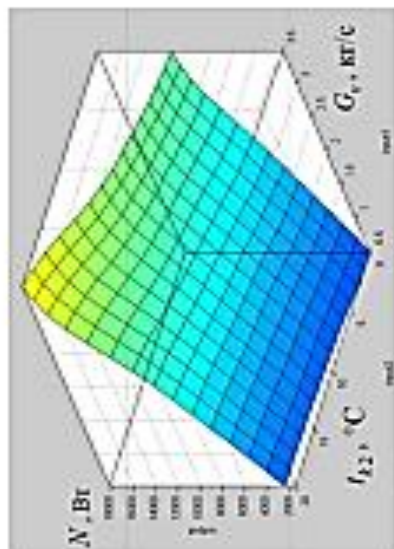


Перехідна характеристика САК вологості повітря з ПІД – регулятором

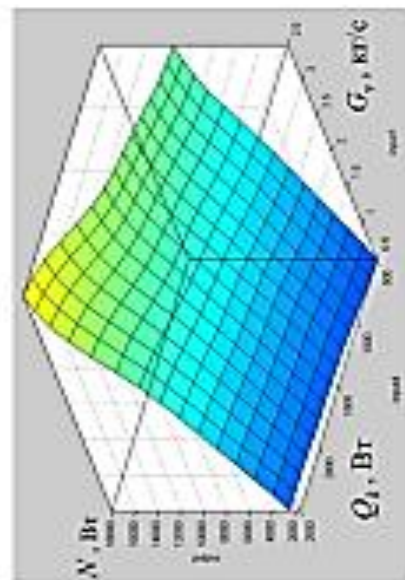
ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ПОТУЖНОСТІ КОМПРЕСОРА ВІД ДИНАМІКИ ЗМІН ПАРАМЕТРІВ 14



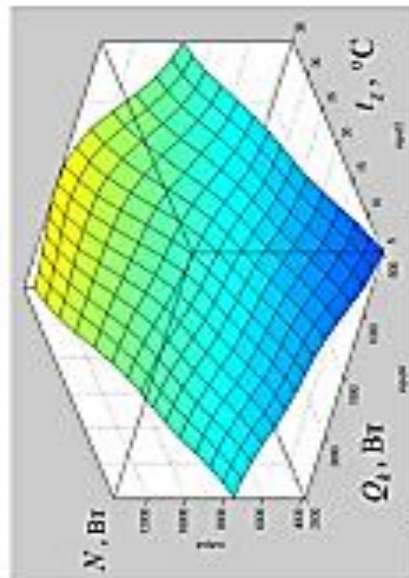
Вікно середовища MATLAB/ ANFIS структури розробленої нейронмережової моделі енергоефективного керування холодильними обладнаннями в плодощовочесювачах



Графік залежності потужності компресора від масових витрат повітря та температури на виході камери

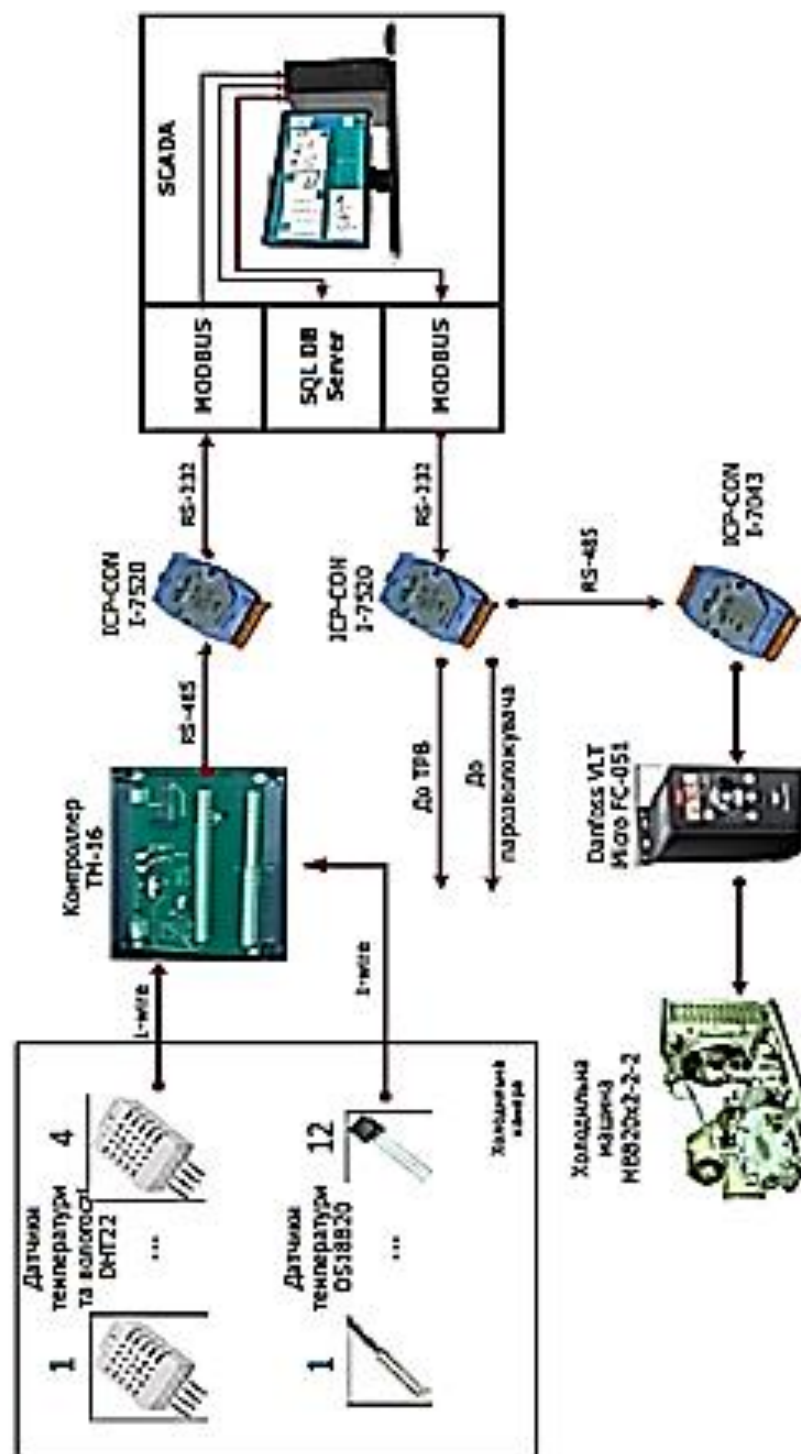


Графік залежності потужності компресора від масових витрат повітря та теплонакопичень



Графік залежності потужності компресора від температури навколишнього середовища та теплонакопичень

16
СХЕМА РЕАЛІЗАЦІЇ САК ТЕХНОЛОГІЧНИМ МІКРОКЛІМАТОМ В
ХОЛОДИЛЬНИЙ КАМЕРІ З ВИКОРИСТАННЯМ СКАДА СИСТЕМИ ТРЕЙС МОУД



1. З'ясовано, що наявні системи автоматизації холодильних установок для зберігання овочевої продукції не забезпечують належної ефективності керування для утримання необхідних параметрів технологічного мікроклімату. Показано, що головною умовою енергоефективного керування є узгодження холодопродуктивності установки з тепловим навантаженням камери.
2. Теоретичні дослідження процесів взаємодії охолодженого повітря з продукцією продемонстрували визначальний вплив температури на динаміку втрат продукції та дозволили встановити основний регульований параметр системи.
3. Запропоновано новий підхід до автоматизації керування холодильною установкою, який базується на тому, що температура циркулюючого в камері повітря на вході в повітроохолоджувач є мірою впливу комплексного збурювального чинника – часових внутрішніх і зовнішніх теплонадходжень, якій можна компенсувати зміною подачі повітря і зміною потужності компресорної установки, при цьому необхідна стабілізація температури повітря на вході в камеру.
4. Розроблені математичні моделі для визначення параметрів процесу, через які здійснюється керування режимом холодильної установки, ці моделі дозволяють обрентувати підхід до стабілізації режиму зберігання, заснований на застосування нечітких нейронних мереж.
5. Забезпечено мінімізацію зовнішніх впливів на продукцію та компенсацію тепловитоків від її самозірівання з мінімальними енерговитратами завдяки використанню частотного регулювання швидкості двигуна компресора.

Додаток Б

Міністерство освіти і науки України
 Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
 «1 DECEMBRIE 1918» University of Alba Iulia (Румунія)
 Економічний технологічний університет (Польща)
 Вільнюський університет прикладних наук (VIKO) (Литва)
 Університет Флориди (США)
 London Metropolitan University (Велика Британія)
 Словачеський технологічний університет (Словаччина)
 Гривчи-металургійна академія імені Станіслава Сташиця (Польща)
 Національний університет «Закарпатська політехніка»
 Національний університет «Дніпровська політехніка»
 Національний університет «Одеська політехніка»
 Ізмаїльський державний гуманітарний університет
 Глухівський національний університет
 Сумський національний аграрний університет
 Національний технічний університет України
 «Київський політехнічний інститут імені Ігори Сікорського»
 Харківський національний педагогічний університет імені Г.С. Сковороди
 Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича
 Національна академія суворовських військ імені гетьмана Петра Сагайдачного
 Київський національний університет будівництва та архітектури
 Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
 Одеський національний університет імені Л.Л. Мечникова

МОЛОДІЖНА НАУКА: ІННОВАЦІЇ ТА ГЛОБАЛЬНІ ВИКЛИКИ

ЗБІРНИК ТЕЗ
 II МІЖНАРОДНОЇ НАУКОВО-ПРАКТИЧНОЇ
 КОНФЕРЕНЦІЇ СТУДЕНТІВ, АСПІРАНТІВ ТА МОЛОДИХ
 ВЧЕНІХ



Полтава, 07 листопада 2025 року

<i>Кравченко Станіслав Олександрович</i> <i>Науковий керівник: Кавітон Алла Мирославівна</i>	
ІННОВАЦІЇ В ІТ. ВПЛИВ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ НА РОЗВИТОК ЛЮДСТВА.....	308
<i>Пальцер Станіслав Віталійович</i> <i>Войтенко Андрій Сергійович</i> <i>Кисляр Світлана Григорівна</i>	
АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА БЕЗПЕРЕРВНО-ДИСКРЕТНОГО СТЕЖЕННЯ ЗА СОНЦЕМ АВТОНОМНИХ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ЕНЕРГОУСТАНОВОК.....	310
<i>Приймак Максим Сергійович</i> <i>Задорожна Ірина Миколаївна</i>	
КОНЦЕПЦІЯ SMART GRID ЯК ВІДПОВІДЬ НА СУЧАСНІ ВИКЛИКИ В ЕНЕРГЕТИЦІ УКРАЇНИ.....	312
<i>Рудоманов Тимур Володимирович</i>	
МОЖЛИВОСТІ ТА РИЗИКИ ЗАСТОСУВАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В ВІДЕОІГРОВІЙ ІНДУСТРІЇ.....	314
<i>Стицько Максим Олександрович</i> <i>Нікітовський Павло Миколайович</i>	
АНАЛІЗ ТА ВИБІР ТИПУ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЯТОРА В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ МІКРОКЛІМАТОМ ОВОЧЕСХОВИЩ.....	316
<i>Смолянний Олексій Сергійович</i>	
РОЗРОБКА РОТОРНО-ПОРШНЕВОГО ДВИГУНА ТА ПРОГРАМИ ДЛЯ ЙОГО РОЗРАХУНКУ.....	318
<i>Чинкує Камелія</i>	
ІМІТАЦІЙНИЙ ЦИФРОВИЙ ДВІЙНИК ПОЛІГРАФІЧНОЇ УСТАНОВКИ З ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИМИ АЛГОРИТМАМИ.....	319
<i>Шпакович Богдан Валентинович</i>	
ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ЯК СКЛАДОВА НАЦІОНАЛЬНОЇ СТРАТЕГІЇ СТАЛОГО РОЗВИТКУ.....	321
<i>Щербина Богдан Тарасович</i>	
МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ШІ-АГЕНТІВ ДЛЯ ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ З САЙТУ ЗАКЛАДУ ВИЩОЇ ОСВІТИ.....	322
СЕКЦІЯ №4. ОСВІТА, НАУКА ТА РОЗВИТОК ОСОБИСТОСТІ: МІЖДИСЦИПЛІНАРНИЙ ДИСКУРС.....	325
<i>Заскова Вікторія Корнійвна</i>	
ТЕАТРАЛЬНА ПЕДАГОГІКА ЯК ЧИННИК РОЗВИТКУ ОСОБИСТОСТІ В МІЖДИСЦИПЛІНАРНОМУ ОСВІТНЬОМУ ПРОСТОРІ.....	325

S. Souchleris K., K.G., A.G.A. Reinforcement Learning in Game Industry. *MDPI*. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/4/2443> (date of access: 24.10.2025).

УДК 681.515

Слишко Максим Олександрович

здобувач другого (магістерського) рівня вищої освіти

Нікітоський Павло Миколайович

здобувач першого (бакалаврського) рівня вищої освіти

Національний університет

«Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

АНАЛІЗ ТА ВИБІР ТИПУ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЯТОРА В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ МІКРОКЛІМАТОМ ОВОЧЕСХОВИЩ

Сучасна аграрна політика України передбачає доцільність зберігання плодоовочевої продукції безпосередньо у місцях її вирощування, що дає змогу суттєво скоротити післязбиральні втрати. Попри значний прогрес у галузі автоматизації холодильних систем, їх потенціал для подальшого вдосконалення залишається доволі значним [1]. Тому дослідження, спрямовані на зменшення енерговитрат під час зберігання плодоовочевої продукції шляхом регулювання процесу за тепловим навантаженням, є актуальними, необхідними та своєчасними [2]. Для дослідження ефективності системи автоматичного керування (САК) температурно-вологісними режимами овочесховища необхідно було побудувати математичну модель динамічних процесів, що відбуваються у складових елементах обладнання, приміщення та самій продукції під час її охолодження чи зберігання.

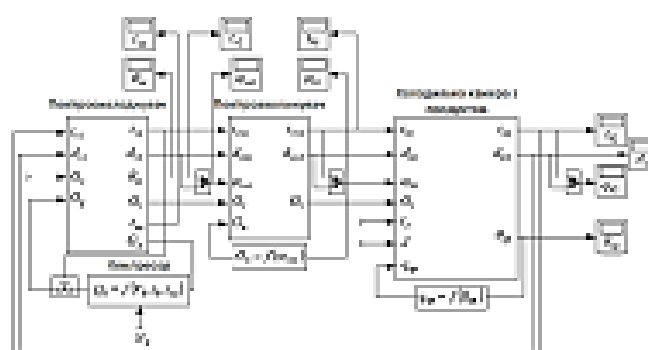


Рис.1. Структура математичної моделі для дослідження динамічних режимів холодильної установки

В результаті проведених досліджень процесу взаємодії охолодженого повітря з об'єктом зберігання встановлено, що саме температура має

вирішальний вплив на динаміку втрат продукції. У роботі розроблено математичні моделі окремих елементів системи — повітроохолоджувача, зволожувача повітря та холодильної камери. На їх основі було створено узагальнену модель системи автоматичного керування режимами холодильного зберігання, яка дала змогу визначати зміну температури та вологовмісту повітря в динаміці (рис. 1). Запропонована математична модель є адекватною реальному процесу та описує його з похибкою, що не перевищує 4 %.

Дослідження динамічних режимів на базі розробленої моделі свідчать, що використання системи з П-регулятором призводить до значної середньоквадратичної похибки регулювання. Уведення інтегральної складової до П-закону керування спричиняє появу коливань керованих параметрів і може погіршити динамічні властивості системи через втрату стійкості, тому застосування ПІ-регулятора є небажаним. Використання широко розповсюдженого ПД-регулятора забезпечує лише незначне покращення якості регулювання, проте суттєво ускладнює схему системи.

Результати досліджень свідчать, що застосування системи керування температурним режимом на основі нечіткого регулятора в умовах нестаціонарних збурень забезпечує стабілізацію температури, тоді як система з ПІ-регулятором демонструє автоколивальний перехідний процес.

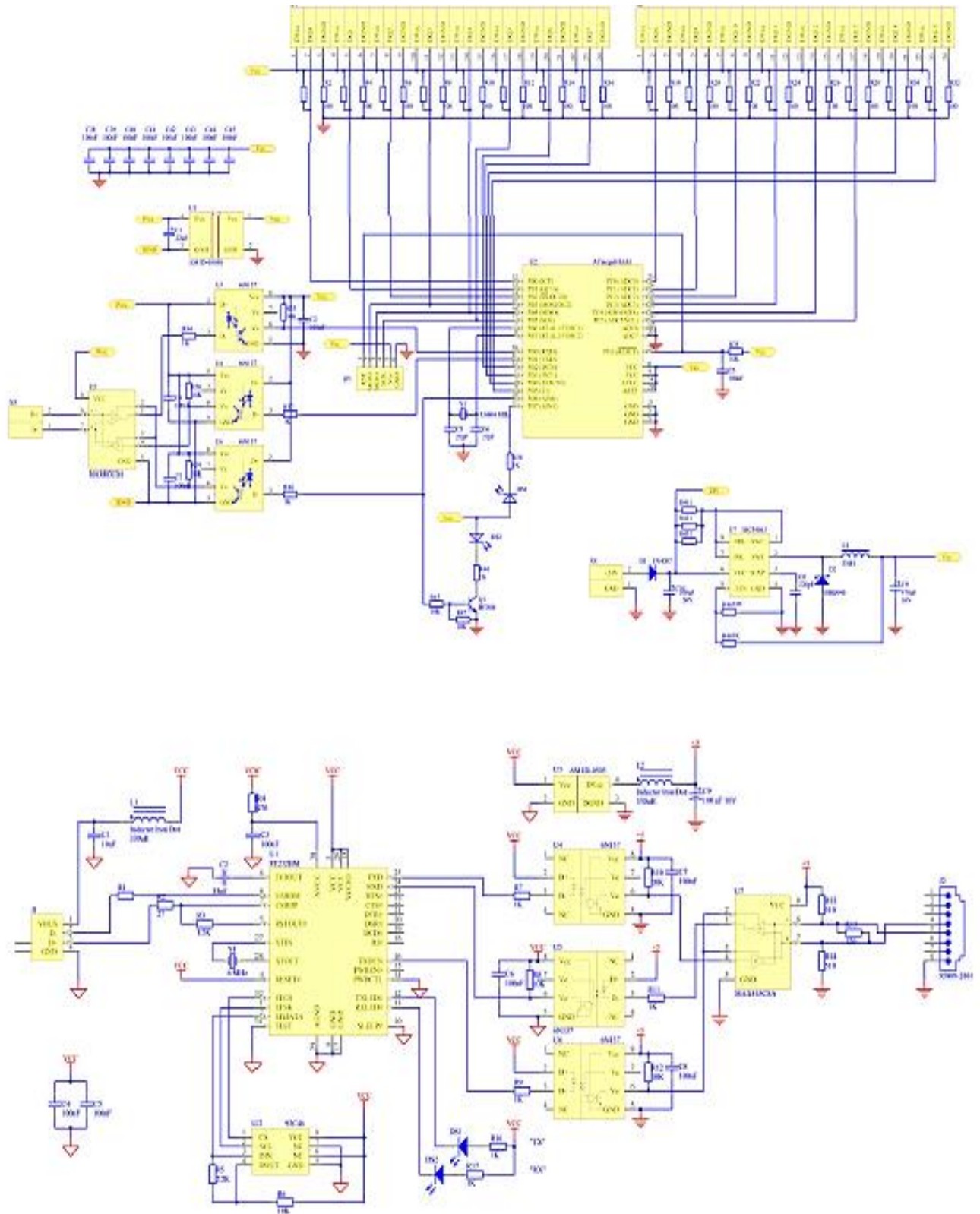
Система керування з нечітким регулятором здійснює вимірювання температури повітря в приміщенні та автоматично визначає оптимальний режим роботи і необхідну холодопродуктивність компресора [3]. При цьому задане значення температури постійно коригується з урахуванням поточних показників температури та вологості повітря в камері. Встановлено, що порівняно з ПД-регулюванням у нечіткій системі спостерігається істотне зменшення амплітуди коливань температури. Таким чином можна підсумувати, що використання нечітких логічних регуляторів у системах керування мікрокліматом овочесховищ може забезпечити: відсутність різких температурних перепадів у приміщенні, можливість підтримання допустимої швидкості руху повітря, автоматичне встановлення потрібної холодопродуктивності, а також зниження енергоспоживання на 20–30 %.

Список використаних джерел

1. Котов Б.І., Грищенко В.О. Енергозберігаючий алгоритм управління технологічним мікрокліматом. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України*. 2011. Вип.166. Ч.4. С. 147-156.
2. Huang B. J., Chen H. Y. Modeling of integral-type Stirling refrigerator using system dynamics approach. *International journal of refrigeration*. 2015. Vol. 23. P. 632–641.
3. Ligang Wu, Xiaojie Su, Peng Shi. Fuzzy Control Systems with Time-Delay and Stochastic Perturbation: Analysis and Synthesis. *Springer*. 2016.

Додаток В

Схема електрична принципова модуля опитування системи автоматизованого керування технологічним мікрокліматом в холодильній камері



Додаток Г

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

q_0 – питома теплота дихання при температурі повітря 0°C , Вт/т, для яблук – $q_0 = 12$ Вт/т;

$c_{\text{пр}}$ – питома теплоємність продукції яка зберігається в холодильній камері плодовоовочесховища, Дж/(кг·°C);

$m_{\text{пр}}$ – маса продукції яка зберігається в холодильній камері плодовоовочесховища, кг;

$\theta_{\text{пр}}$ – середньооб'ємна температура продукту, °C;

$P_{\text{н}}^{\text{п}}(\theta_{\text{пр}})$ – парціальний тиск насиченої водяної пари при поверхні продукції, Па;

$F_{\text{пр}}$ – площа (загальна) поверхні продукції яка зберігається в холодильній камері плодовоовочесховища, м²;

$\alpha_{\text{пр}}$ – коефіцієнт теплообміну продукту та повітря, Вт/(м²·°C);

t_v – температура повітря в камері плодовоовочесховища, °C;

R – газова стала водяної пари ($R = 461.5$ Дж/(кг·°K)), Дж/(кг·°K);

T – температура водяної пари ($T = 273 + t_w$), °K;

ΔG – втрачена маса продукцією під час зберігання, кг;

c_p – питома теплоємність повітря, Дж/(кг·°C);

ρ_v – густина повітря (осереднене за об'ємом), кг/м³;

$\epsilon_{\text{пр}}$ – пористість шару продукції;

G_v – масові витрати повітря, кг/с;

Re – критерій Рейнольдса;

Pr – критерій Прандтля;

Nu – критерій Нусельта;

d_{v1}, d_{v2} – вологовміст повітря на вході і виході повітроохолоджувача, г/кгср;

$d_v = 0.5 \cdot (d_{v1} + d_{v2})$ – середній вологовміст повітря в повітроохолоджувачі, г/кгср;

d_{k1}, d_{k2} – вологовміст повітря на вході і виході камери плодовоовочесховища, г/кгср;

$d_k = 0.5 \cdot (d_{k1} + d_{k2})$ – середній вологовміст повітря камери плодовоовочесховища, г/кгср;

t_{v1}, t_{v2} – температура повітря на вході та виході повітроохолоджувача, °С;

$t_v = 0.5 \cdot (t_{v1} + t_{v2})$ – середня температура повітря на вході і виході повітроохолоджувача, °С;

t_{k1}, t_{k2} – температура повітря на вході і виході камери плодоовочесховища, °С;

$t_k = 0.5 \cdot (t_{k1} + t_{k2})$ – середня температура повітря на вході і виході камери плодоовочесховища, °С;

t_z – зовнішня температура повітря, °С;

J – інтенсивність сонячної радіації, Вт/м²;

r_0 – питома теплота пароутворення (конденсації (інеюутворення)), Дж/кг;

β – коефіцієнт випаровування, кг/(м²·с·Па);

$\alpha_{c.v}$ – сумарний коефіцієнт теплопередачі внутрішньої поверхні огороження, Вт/(м²·°С);

$\alpha_{c.z}$ – сумарний коефіцієнт теплопередачі зовнішньої поверхні огороження, Вт/(м²·°С);

$f_{c.z}$ – зовнішня поверхня огороження, м²;

$f_{c.v}$ – внутрішня поверхня огороження, м²;

F_{sv} – частина зовнішньої поверхні яка сприймає сонячну радіацію, м²;

c_T – питома теплоємність тари, Дж/(кг·°С);

c_c – питома теплоємність матеріалу огороження, Дж/(кг·°С);

m_T – маса тари, кг;

φ_v – кут між напрямком випромінювання та нормаллю до опромінюваної поверхні;

$t_{п}$ – температура водяної пари, °С;

$G_{п}$ – витрати водяної пари, кг/с;

$c_{п}$ – теплоємність водяної пари, Дж/(кг·°С);

m_{vk} – маса повітря в камері, кг;

m_c – маса огороження, кг;

θ_c – температура огороження (середня за товщиною), °С;

θ_{ox}, θ_{in} – температура поверхні охолоджувача та інею, намороженого на ньому, °С;

$t_{\text{ха2}}$, t_0 – температура холодоагенту на виході з повітроохолоджувача та температура його кипіння, °С;

$G_{\text{ха}}$ – витрати холодоагенту, кг/с;

$m_{\text{ох}}$, m_{vv} – маса охолоджувача та повітря в його об'ємі, кг;

$k_{\text{o.n}}$, $k_{\text{o.v}}$ – коефіцієнт теплопередачі та коефіцієнт тепловіддачі від внутрішньої поверхні до холодоагенту, Вт/(м²·°С);

σ_0 – коефіцієнт масовіддачі при конденсації (інеюутворенні), кг/(м²·°С);

$c_{\text{ох}}$, $c_{\text{ха}}$ – питомі теплоємності матеріалу випарника та холодоагенту, Дж/(кг·°С).