

Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва, транспорту та енергетики
Кафедра «Автоматизації виробничих процесів»

«Допущено до захисту»

Зав. кафедри АВП

к.т.н., доцент

_____ Олександр ДІДИК

« ____ » _____ 2023 р.

ВИПУСКНА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти

на тему

**«Автоматизація процесу виготовлення сухого молока для
сиру»**

Виконав здобувач вищої освіти

IV курсу групи АК-19

ОПП «Автоматизація та комп'ютерно-
інтегровані технології»

спеціальності 151 «Автоматизація та
комп'ютерно-інтегровані технології»

_____ Дарина ТУЗОВА

« ____ » _____ 2023 р.

Керівник проекту

доцент, канд.техн.наук

_____ Олександр ДІДИК

« ____ » _____ 2023 р.

Рецензент

_____ Петро ПЛІШКОВ

« ____ » _____ 2023 р.

м. Кропивницький

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра автоматизації виробничих процесів

Рівень вищої освіти бакалавр

Галузь знань 15 Автоматизація та приладобудування

Спеціальність 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Освітньо-професійна програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри Дідик О.К.

“ ” _____ 20__ року

**ЗАВДАННЯ НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
ЗА ПЕРШИМ (БАКАЛАВРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ
ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ**

Тузової Дарини Костянтинівни

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Автоматизація процесу виготовлення сухого молока для сиру

2. Керівник роботи Дідик Олександр Костянтинович, канд. техн. наук, доцент,

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

3. Строк подання студентом роботи до захисту 31.05.2023 р.

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи Розробити систему автоматизації процесу виготовлення сухого молока для сиру. Провести огляд технології виготовлення сухого молока; Розробити структурну схему системи автоматичного регулювання, вибір та аналіз її елементів; Проектування системи автоматичного регулювання; Практична реалізація системи автоматичної регулювання.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	<i>Огляд технології виготовлення сухого молока</i>	<i>15.04.23</i>	
2.	<i>Розробка структурної схеми системи автоматичного регулювання, вибір та аналіз її елементів</i>	<i>30.04.23</i>	
3.	<i>Проектування системи автоматичного регулювання</i>	<i>15.05.23</i>	
4.	<i>Практична реалізація системи автоматичного регулювання</i>	<i>25.05.23</i>	

Дата видачі завдання _____

Керівник роботи _____ О.К. Дідик « ____ » _____ 2023 р.

Завдання прийнято до виконання

Здобувач _____ Д.К. Тузова « ____ » _____ 2023 р.

Анотація

Випускна кваліфікаційна робота присвячена виробництву сиру із використанням сухого молока. Введення визначає актуальність дослідження. Глава 1 розглядає технологічний процес виробництва сухого молока, включаючи сушіння молока, пастеризацію та переваги індукційного нагріву. Глава 2 описує конструкцію та параметри індукційного нагрівача, включаючи його технічні характеристики. Глава 3 присвячена моделювання роботи індукторів нагріву, включаючи визначення параметрів структурної схеми, систему стабілізації температури, гасіння коливань температури та облік транспортної затримки. Глава 4 описує проектування програми для автоматизації технологічної лінії пастеризації молока, включаючи вибір мікроконтролера та розробку блок-схеми алгоритму та програми. Розділ 5 містить висновки та рекомендації, що базуються на отриманих результатах дослідження.

Summary

Graduation qualification work is devoted to the production of cheese using powdered milk. The introduction describes the relevance of the study. Chapter 1 discusses the milk powder manufacturing process, including milk drying, pasteurization, and the benefits of induction heating. Chapter 2 describes the design and parameters of the induction heater, including its technical specifications. Chapter 3 is devoted to modeling the operation of heating inductors, including determining the parameters of the block diagram, the temperature stabilization system, damping temperature fluctuations, and taking into account the transport delay. Chapter 4 describes the design of a program for the automation of a milk pasteurization process line, including the choice of a microcontroller and the development of a flowchart of the algorithm and program. Section 5 contains conclusions and recommendations based on the findings of the study.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	2
РОЗДІЛ 1 ВИРОБНИЦТВО СУХОГО МОЛОКА ДЛЯ СИРУ.....	4
1.1. Технологічний процес виробництва сухого молока.....	4
1.2. Сушіння молока.....	8
1.2.1. Спрей-сушіння.....	9
1.2.2. Барабанне сушіння.....	11
1.2.3. Вакуумне сушіння.....	13
1.2.4. Осушення за допомогою заморожування.....	15
РОЗДІЛ 2 Конструкція та параметри індукційного нагрівача.....	16
2.1. Переваги індукційного нагрівання.....	16
2.2. Конструкція індуктивного нагрівача.....	18
2.3. Техніко-конструктивні характеристики індукційного нагрівача.....	24
РОЗДІЛ 3 Моделювання роботи індукторів нагрівання.....	31
3.1. Визначення параметрів структурної схеми.....	31
3.2. Замкнута система стабілізації температури в кожному ступені нагрівання.....	34
3.3. Гасіння коливань температури.....	37
3.4. Урахування транспортної затримки.....	39
3.5. Зміна температури на виході з нагрівача в режимі запуску установки.....	41
РОЗДІЛ 4 Проектування програми для автоматизації технологічної лінії пастеризації молока.....	44
4.1. Вибір мікроконтролера	44
4.2. Розробка блок-схеми алгоритму та програми.....	46
ВИСНОВКИ	49
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	50

ВСТУП

Процес виробництва сухого молока включає безліч етапів, одним з яких є нагрівання молока. Традиційно для цієї мети використовуються парові котли, де молоко нагрівається шляхом пропускання пари через трубки, але цей метод може призводити до значного зниження кінцевого продукту.

В даний час, все більшої популярності набувають індукційні нагрівачі, які вже використовуються в багатьох галузях і зокрема при транспортуванні нафти. Незважаючи на значну перевагу використання індукційних нагрівачів, при виробництві сухого молока і досі використовують нагрівання парою.

Актуальність теми. Збільшення терміну придатності продуктів харчової промисловості, а зокрема молочної продукції є дуже важливою з точки зору виробництва. Проблема швидкого псування продукції наразі є досить нагальною, саме тому складом більшості продуктів є сухе молоко, а саме: кондитерських виробів, молочних, бакалії та навіть сумішах дитячого харчування. Адже сухе молоко має тривалий термін зберігання, економічне при транспортуванні та має близькі поживні властивості як в свіжого молока. Ризики, пов'язані з перегрівання молока, в результаті яких вміст поживних речовин в молоці значно знижується і досі присутні.

Ціль та мета дослідження. Метою даного дослідження є заміна, в вже існуючих конструкціях пастеризаторів, звичного нагрівання за допомогою парою на більш ефективні індукційні нагрівачі, спираючись на дослідження зроблені для систем індукційного нагрівання в технологічних комплексах транспортування нафти. Використання для рівномірного нагрівання багатосекційного індукційного нагрівача, а також регулювання температури в даній установці.

Об'єкт дослідження. Нагрівання молока при його пастеризації чи сушінні є досить важливим етапом виробництва сухого молока, так як це безпосередньо впливає на якість сухого молока і загалом кінцевого продукту. Відхилення від норми температури при нагрівання може призвести до руйнування структури білка, а тому і до погіршення смаку, текстури та в цілому поживних властивостей молока.

Предмет дослідження. Удосконалення процесу виробництва сухого молока, шляхом використання індукційного нагрівача в якості джерела тепла. До прикладу заміна парових труб на індукційні в процесі пастеризації молока.

Практичне значення отриманих результатів. ...

Метою цього дослідження є вивчення ефективності індукційного нагріву у виробництві сухого молока для сиру. В рамках дослідження буде розглянуто технологічний процес виробництва сухого молока, включаючи різні методи сушіння, а також розглянуто конструкцію та параметри індукційного нагрівача.

РОЗДІЛ 1

ВИРОБНИЦТВО СУХОГО МОЛОКА

1.1. Технологічний процес виробництва сухого молока

У пошуках зручності людство часто звертає увагу на замітники свіжих продуктів, які швидко псуються. Одним із таких продуктів є сухе молоко, яке вже давно знайоме мільйонам людей. Порошок, який у процесі виробництва виходить із згущеного молока, отримав назву сухе молоко. Сухе молоко, також відоме як молочний порошок - це продукт, отриманий шляхом видалення води з молока. В результаті цього процесу молоко перетворюється на порошкоподібну речовину, яку легко зберігати і яка довго зберігає свої поживні властивості. Отриманий порошок білого або молочного кольору можна розвести у теплій воді. Саме цей продукт є головним та невід'ємним інгредієнтом майже всіх типів дитячого харчування. Сухе молоко виготовляють з різних видів молока, таких як коров'яче, козяче або овече.

Сухе молоко має тривалий термін зберігання і легко транспортується, що робить його практичним та зручним інгредієнтом у харчовій промисловості. При цьому зберігаючи поживні властивості.

Першу згадку про сухе молоко відносять до 1792 року, коли у «Працях Вільного Економічного Товариства» Іван Єріх записав, що жителі східних областей, виморожуючи молоко, отримували «Великі запаси молочних брил».

У 1802 році штаб-лікар Нерчинських заводів Осип Кричевський отримав сухе молоко, яке не поступається за поживними якостями звичайному.

У 1832 році хімік М. Дірчов заснував перше комерційне виробництво сухого молока. І лише у 1885 році за кордоном був запатентований процес виробництва.

У промислових масштабах сухе молоко почали виробляти лише наприкінці 19 століття.

Перші спроби виготовлення сухого молока виглядали наступним чином:

- спершу коров'яче молоко нормалізують, тобто видаляють надлишковий жир;

- далі його пастеризували;
- потім молоко згущалось;
- лише після цього воно підлягало ретельній сушці при температурі в 180 градусів, даний процес відбувається в спеціальних камерах; [1]

Сьогодні принцип виробництва залишився тим самим. Але з, звісно, з плином часу змінилась технологія, вдосконалилось обладнання.

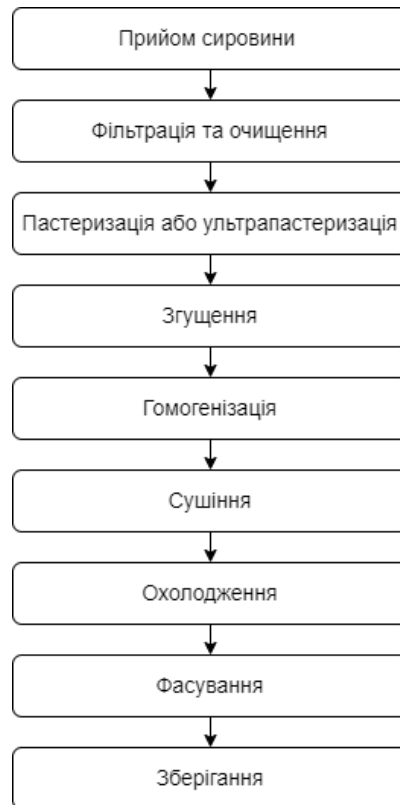


Рис.1.1 Схематичне зображення технологічного процесу виготовлення сухого молока

Технологічний процес виробництва сухого молока має наступний вигляд:

1. Фільтрація та очищення
2. Пастеризація або ультрапастеризація
3. Згущення
4. Гомогенізація
5. Сушка
6. Охолодження
7. Упакування та зберігання

Свіже молоко, зазвичай коров'яче, спочатку проходить попередню підготовку, таку як фільтрація та очищення, щоб видалити всі видимі та

невидимі домішки, до прикладу механічні забруднення, пил, бактерії та інші мікроорганізми. Це може відбуватися з використанням спеціальних фільтрів та очисних систем. [2]

Пастеризація або ультрапастеризація для знищення шкідливих мікроорганізмів, таких як бактерії та віруси, та продовження терміну зберігання сухого молока. Свіже молоко піддається обробці температурою 80-85°C. При пастеризації молоко нагрівається до певної температури, після чого охолоджується, тоді як ультрапастеризація відбувається за більш високих температур.

Гомогенізація - процес, який спрямований на рівномірний розподіл жирових частинок у молоці та запобігання їх відокремленню. Гомогенізація зазвичай проводиться після згущення молока і до процесу сушіння під час виробництва сухого молока. Гомогенізація може бути особливо важливою при виробництві сухого молока з низьким вмістом жиру, щоб забезпечити максимальну однорідність продукту.

Згущення - це видалення вільної вологи з молочної суміші без порушення її плинності. Волога видаляється у вигляді пари у вакуум-випарних апаратах та роторно-плівкових випарниках. Завдяки такому випарюванню вміст сухих компонентів досягає 48-50%.

На (Рис., 1.2) зображено установку для пастеризації. Спершу охолоджене сире молоко надходить через поплавковий резервуар (1) зліва при температурі близько 4–5°C (40°F). Далі проходить через теплообмінник, який також називають регенератором (2), проходячи поруч із вже пастеризованим молоком, яке витікає назовні, дві молочні труби обмінюються своїм теплом: молоко, що входить, нагрівається приблизно до 30°C (100°F), а молоко що виходить навпаки, охолоджується. Підігріте молоко проходить через підігрівач (3), в який пар подається однією з парових труб (зелені) і нагрівається до 54°C (130°F). Тепер молоко надходить у контур пастеризації (позначений цифрами 7, 8, 12 та 13). Воно рухається насосом (7), вприскується додаткова кількість пари (8), щоб нагріти його до 72°C (161°F), і він обтікає довгий контур (12) протягом 15 секунд, щоб підтримувати цю

температуру протягом тривалого часу достатньо для пастеризації. У точці 13 клапан визначає, чи достатньо гаряче молоко для пастеризації.

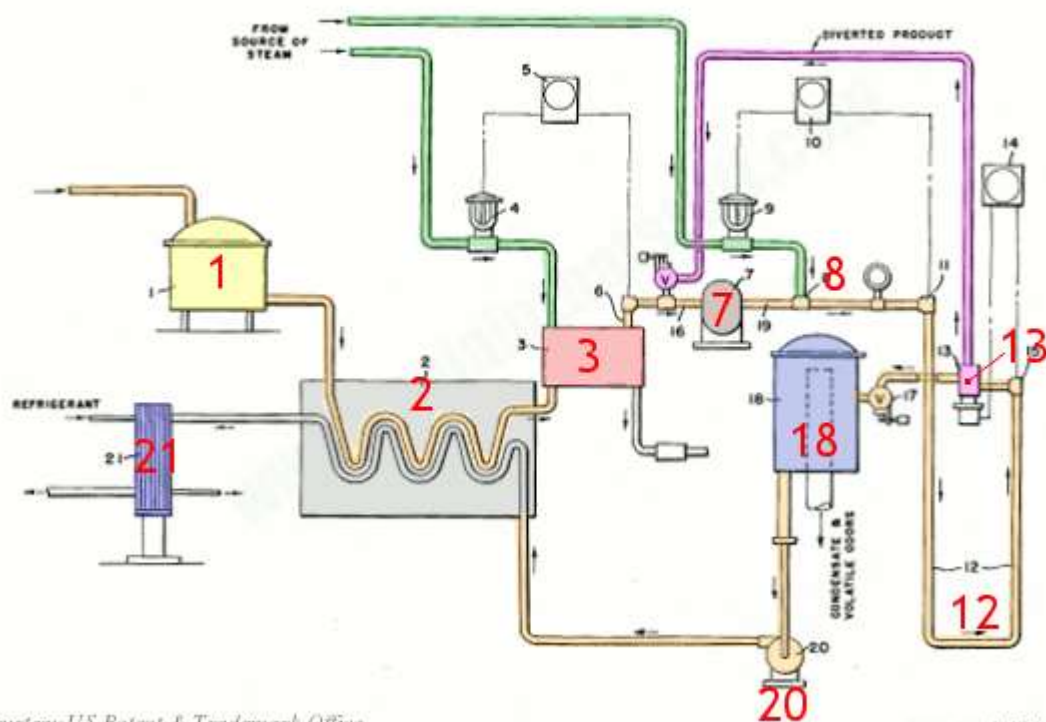
Якщо ні, то він перенаправляється його вгору по фіолетовій петлі і назад по ланцюгу доти, доки температура не досягне потрібної. Як тільки молоко успішно пастеризоване, воно надходить у сепаратор (18) при температурі 72°C, (161°F), де миттєво охолоджується приблизно до 53°C (128°F) та дезодорується. Насос (20) направляє частково охолоджене молоко через регенератор (2), так що воно охолоджується до 7°C (45°F), віддаючи своє тепло молоку, що надходить. Холодильна установка (21) охолоджує його до кінцевої температури для розливу в пляшки та/або тривалішого зберігання.

Jan. 16, 1962

F. P. HANRAHAN

3,016,815

APPARATUS FOR HEAT-TREATING LIQUID FOOD STUFFS



Courtesy US Patent & Trademark Office

www.explainthatstuff.com

Рис.2.1 Технологічна схема процесу пастеризації, де 1- поплавковий резервуар; 2 - регенератор; 3 - підігрівач; 7 - насос; 8 - клапан в який вприскується додаткова пара; 12 - контур, який обтікає молоко при пастеризації; 13 - точка у якій за допомогою датчику температури визначається дієва температура молока; 18 - сепаратор; 20 - насос; 21 - холодильна установка.

1.2. Сушіння молока

Сушіння молока - це процес видалення води з молока з метою отримання порошкового продукту. Цей процес є важливим етапом виробництва багатьох молочних продуктів, таких як суміші для грудного вигодовування, дитячі суміші, молочні напої та кондитерські вироби.

Існують різні методи сушіння молока, найпоширеніші види сушки молока, котрі використовуються на виробництві:

1. Спрей-сушіння
2. Барабанна сушка
3. Вакуумне сушіння
4. Осушення за допомогою заморожування або фріз сушіння

Кожен метод має свої переваги та недоліки, які залежать від характеристик продукту та вимог до його якості.

Однією з основних переваг сушіння молока є збільшення терміну придатності продукту. Порошок із молока має більш тривалий термін придатності порівняно зі свіжим молоком, що забезпечує можливість тривалого зберігання та транспортування.

Крім того, порошковий молочний продукт має зручнішу форму для зберігання та використання. Він займає менше місця, ніж рідке молоко, і не потребує зберігання холодильника.

Однак, існують деякі недоліки у використанні сушеного молока. Наприклад, при сушінні молока можуть губитися деякі важливі поживні речовини, такі як вітаміни та мінерали. Крім того, процес сушіння може вплинути на смак та аромат молочного продукту.

Також слід враховувати, що сушіння молока є процесом, що вимагає високої точності та контролю, щоб забезпечити високу якість продукту та мінімізувати втрати поживних речовин та якості.

В цілому, сушіння молока є важливим процесом у виробництві багатьох молочних продуктів. Вона має свої переваги та недоліки, і вибір методу сушіння має ґрунтуватися на характеристиках продукту та вимогах до його якості.

1.2.1. Спрей-сушіння

Суть даного процесу полягає в розпиленні рідини на дуже маленькі краплі, при взаємодії яких з гарячим повітрям вода одразу ж випаровується, а молоко перетворюється на дрібні сухі частинки, які потім збираються та упаковуються. Спрей-сушіння забезпечує високу продуктивність, короткий час сушіння та гарну якість сухого молока.

Перевагами даного методу сушіння є **висока продуктивність**: розпилювальне сушіння дозволяє обробляти великі обсяги молока та отримувати сухе молоко з високою продуктивністю. Завдяки високій швидкості випаровування вологи та ефективному теплообміну з гарячим повітрям, процес сушіння відбувається швидко та ефективно; задовільна якість продукту: спрей-сушіння забезпечує довільну якість сухого молока з мінімальною втратою поживних речовин та ароматичних властивостей. Молоко швидко сушиться, що допомагає зберегти його органолептичні властивості, такі як смак, аромат та колір; універсальність: розпилювальне сушіння може бути застосоване для сушіння різних видів молока, таких як незбиране молоко, знежирене молоко, сухе знежирене молоко та інших молочних продуктів.

Недоліками даного методу сушіння є енерговитратність: розпилювальне сушіння вимагає великих обсягів гарячого повітря для випаровування вологи, що може вимагати значних енергетичних витрат та підвищити вартість виробництва; можливі втрати поживних речовин: висока температура та короткочасний процес сушіння можуть спричинити втрату деяких поживних речовин, таких як вітаміни та ферменти через теплову дію; ризик утворення агломератів: при розпилювальній сушці молока можуть утворюватися агломерати – маса продукту, котра злиплася або об'єдналася, що може призвести до нерівномірності вологості та якості сухого молока; вплив на навколишнє середовище: використання великих обсягів гарячого повітря та енергетичних ресурсів у процесі розпилювального сушіння молока може мати негативний вплив на навколишнє середовище, включаючи викиди парникових газів та інші впливи на навколишню атмосферу.

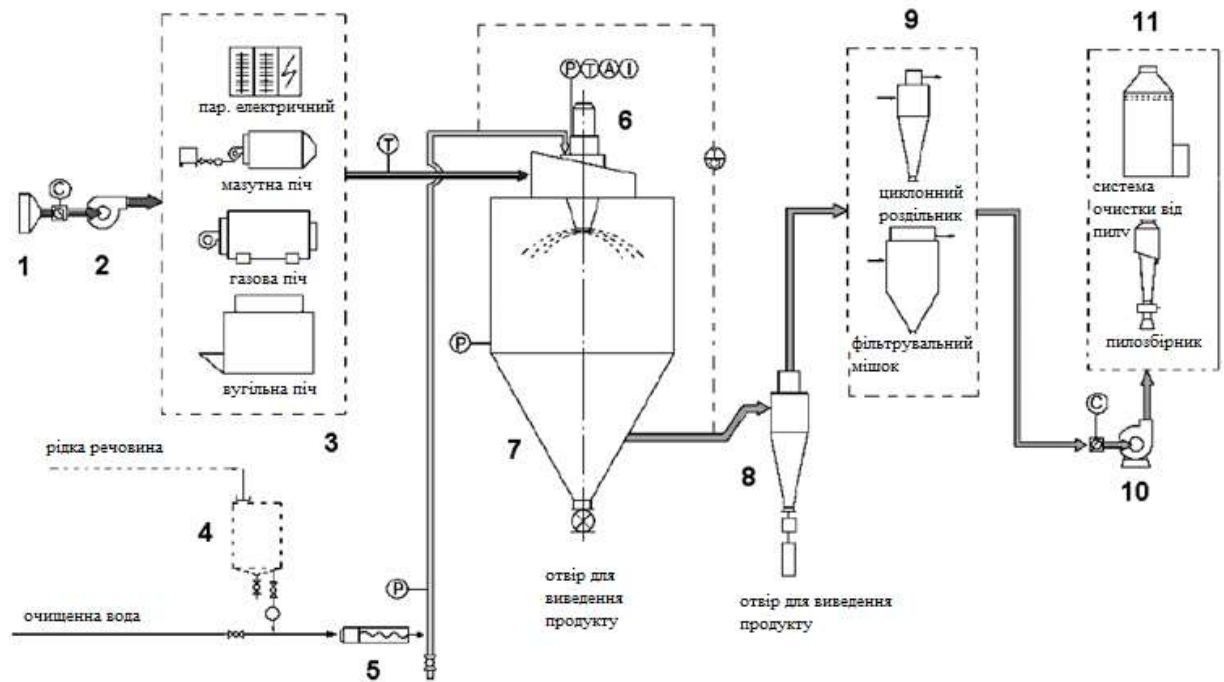


Рис.1.3.1 Технологічна схема розпилювального сушіння, де 1 – фільтр; 2 – вентилятор нагнітаючий; 3 – нагрівач; 4 – ємність із сировиною; 5 – насос подачі; 6 – розпилювач; 7 – сушильна камера; 8 – циклон; 9 – сухий пиловловлювач; 10 – витяжний вентилятор; 11 – вологий пиловловлювач.

Загальний опис процесу, що відбувається при спреї-сушці: молоко подається в розпилювач під високим тиском, щоб утворити дрібні краплі, результатом чого є швидке випаровування вологи в сушильній камері. У сушильній камері зазвичай підтримується певна температура і вологість, щоб забезпечити ефективне випаровування вологи з молока та перетворення його на порошок. Всередині сушильної камери може бути налаштована система циркуляції повітря, щоб забезпечити рівномірний розподіл тепла та вологи для оптимального процесу сушіння. Дана установка зазвичай включає систему нагріву та вентиляції, яка підтримує температуру та вологість всередині сушильної камери. Підігрівальні елементи нагрівають повітря або газ, що надходить до сушильної камери, а вентилятори розподіляють нагріте повітря або газ рівномірно всередині сушильної камери. Після сушіння молока, порошок збирається із сушильної камери. Це може бути здійснено за допомогою циклонів, які відокремлюють порошок від повітря або газу, або інших пристроїв для збирання порошку, таких як фільтри або сепаратори. Зібраний порошок молока потім проходить через процес упакування.

1.2.2. Барабанна сушка

Даний метод сушіння молока ґрунтується на передачі тепла через контакт молока з нагрітим барабаном. Молоко наноситься на поверхню барабана, що обертається, де відбувається швидке випаровування вологи, і молоко утворює суху плівку на поверхні барабана, яка потім знімається за допомогою ножів і молотиться до отримання сухого молока.

Перевагами даного методу сушіння є нижча енерговитратність: барабанна сушіння може бути більш енергоефективним методом сушіння, порівняно з розпилювальним сушінням, так як у процесі використовується безпосередній контакт молока з гарячими поверхнями барабана, що дозволяє ефективніше передавати тепло; зниження ризику утворення агломератів: у процесі барабанного сушіння молоко не розпорошується на дрібні краплі, що знижує ризик утворення агломератів та забезпечує більш рівномірне сушіння продукту; більш високе збереження поживних речовин: барабанне сушіння молока зазвичай відбувається при нижчих температурах, ніж розпилювальне сушіння, що може сприяти якіснішому збереженню поживних речовин, таких як вітаміни та мінерали, в кінцевому продукті.

Недоліками даного методу сушіння є нижча продуктивність: барабанна сушіння зазвичай має нижчу продуктивність порівняно з розпилювальним сушінням, так як процес вимагає тривалішого часу сушіння, це зумовлено безпосереднім контактом молока з поверхнею барабану; більший обсяг обладнання: барабанна сушка може вимагати більшого обсягу обладнання, оскільки процес відбувається на поверхні барабана, що обертається, і потрібен достатній простір для розміщення барабанів і організації процесу сушіння; більш складний контроль параметрів процесу: барабанна сушіння може вимагати більш ретельного контролю параметрів процесу, таких як температура барабана, швидкість обертання барабана та розподіл молока на поверхні барабана, щоб забезпечити рівномірне та якісне сушіння продукту;

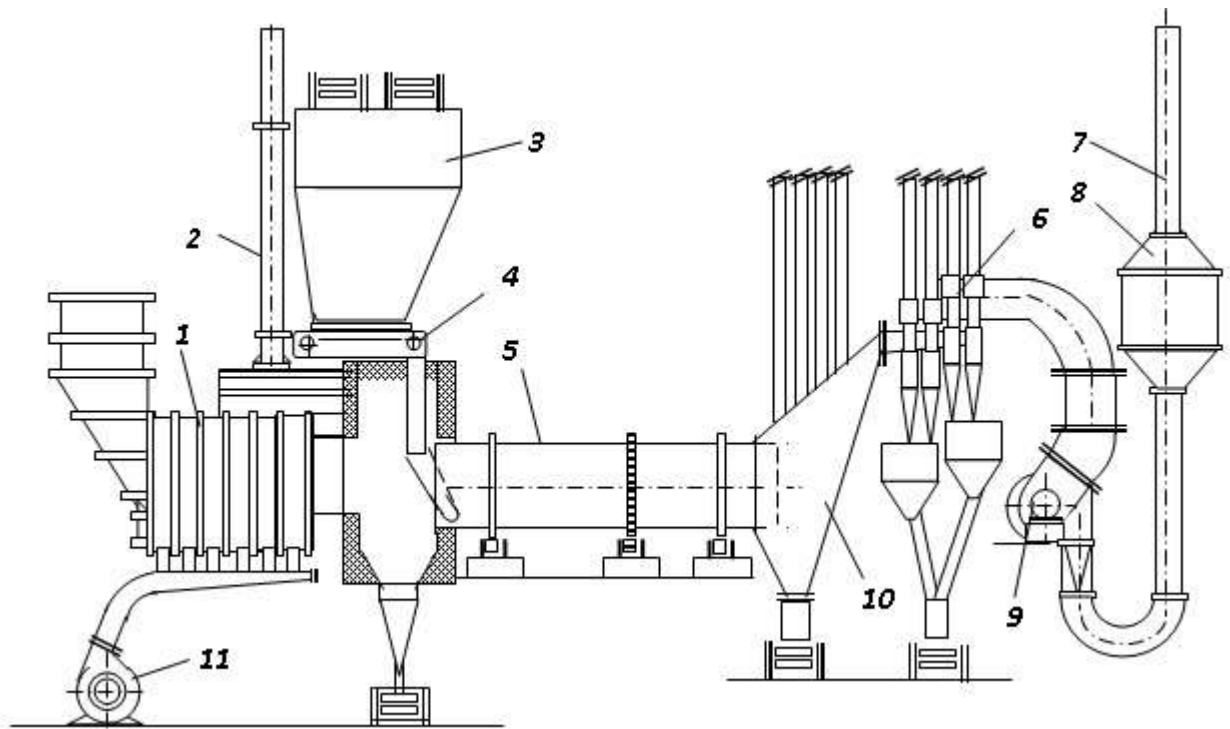


Рис.1.3.2 Технологічна схема барабанного сушіння, де 1 – топка; 2 – розпалювальна труба; 3 – бункер вологого вугілля; 4 – живильник вологого вугілля; 5 – сушильний барабан; 6 – батарейний пиловловлювач; 7 – димова труба; 8 – мокрий пиловловлювач; 9 – димосос; 10 – розвантажувальна камера; 11 – дуттєвий вентилятор.

Загальний опис процесу, що відбувається при барабанній сушці: спочатку свіже молоко подається в барабанну сушарку за допомогою спеціальних насосів або розпилювачів. За допомогою внутрішнього барабану молоко рівномірно розподіляється по поверхні внутрішнього барабану, утворюючи тонку плівку. Після чого внутрішній барабан, який зазвичай нагрівається до високої температури (від 150°C до 250°C) за допомогою пари або гарячого повітря, починає обертатися. При обертанні молочна плівка на поверхні барабана під дією високої температури та потокам гарячого повітря, що викликає швидке випаровування води з молочної плівки. В ході випаровування води з молочної плівки, її товщина зменшується. Зрештою, залишається сухий порошок молока, який відокремлюється від поверхні барабана за допомогою скребків або інших пристроїв.

1.2.3. Вакуумне сушіння

Даний метод сушіння молока відбувається в умовах вакууму, що дозволяє сушити молоко при нижчій температурі і зберігати його ніжніші органолептичні властивості. Молоко поміщається в сушильну камеру, з якої створюється вакуумний простір, і відбувається підтримання певних температур та тиску для сушіння молока.

Перевагами даного методу сушіння є нижча температура сушіння: вакуумне сушіння дозволяє проводити сушіння при нижчих температурах, ніж інші методи сушіння, такі як розпилювальне або барабанне сушіння. Це дозволяє зберігати більш високу біологічну активність та поживну цінність молока, оскільки менша ймовірність деградації харчових речовин під впливом високих температур; нижча окисна деградація: вакуумна сушіння може знизити окисну деградацію молока, оскільки відбувається сушіння в умовах зниженого тиску, що знижує вплив кисню на продукт.

Недоліками даного методу сушіння є високі витрати на енергію: вакуумне сушіння може бути занадто енерговитратним процесом через необхідність підтримання зниженого тиску в сушильній камері, що може спричинити високі операційні витрати.

Загальний опис процесу, що відбувається при вакуумній сушці: вакуумна камера являє собою закритий простір ізольований від зовнішньої атмосфери. Всередині вакуумної камери створюється низький тиск (від 1 до 50 мілібар (мбар)), що дозволяє випаровуватися воді при більш низькій температурі (від 40°C до 80°C), ніж при звичайній атмосферному тиску. Вакуумне сушіння молока вимагає подачі тепла для випаровування вологи. Це може бути виконано за допомогою різних методів, таких як подача гарячого повітря, інфрачервоне опромінення або підведення теплового носія, що власне і можна побачити на Рис.1.4. Конденсатор - це пристрій, який збирає вологу, котра, за допомогою теплового носія, випаровується з молока у вигляді пари і конденсує її назад в рідку форму, тим самим перетворюючи її в сухе молоко. Конденсатор охолоджується, щоб сприяти конденсації пари. При вакуумному сушінні молоко вимагає підтримки низького тиску всередині

камери. Для досягнення даної мети використовується система відкачування повітря, яка видаляє повітря з камери та створює вакуумний стан. Молоко при вакуумному сушінні повинно бути перемішане, щоб забезпечити рівномірне сушіння і запобігти утворенню грудок. Для цього всередині вакуумної камери встановлюють механізми перемішування, такі як ротори або лопаті.

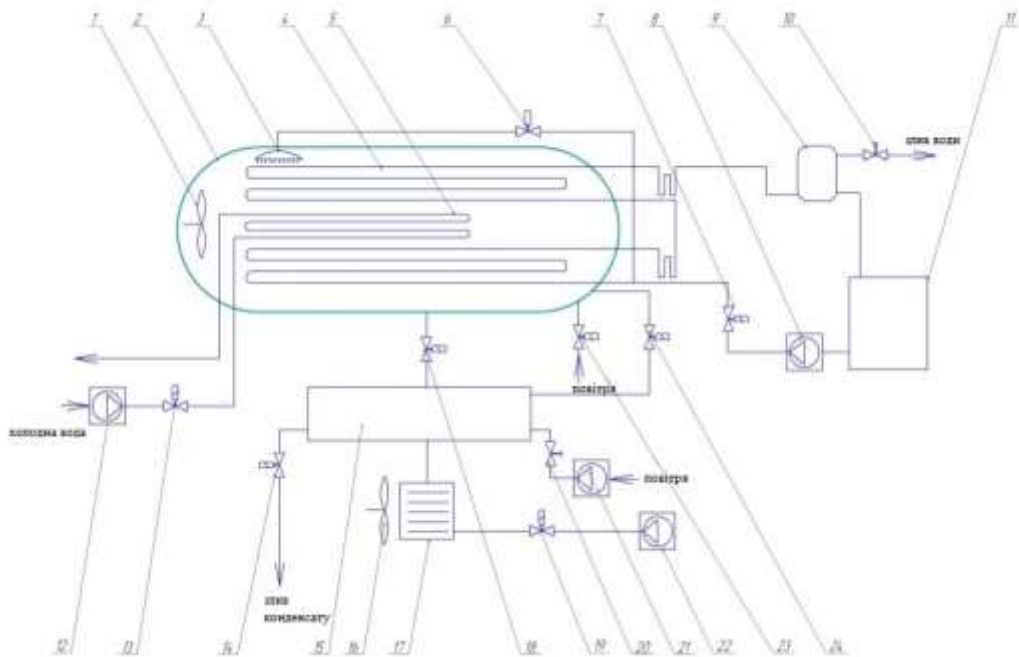


Рис.1.3.3 Технологічна схема вакуумного сушіння, де 1 – вентилятор сушильної камери; 2 – вакуумна сушильна камера; 3 – *** пристрій; 4 – система підігріву камери; 5 – холодна труба; 6 – клапан подачі води для зволоження сушильного *** ; 7 – кран регулювання температури; 8 – циркуляційний насос; 9 – розширювальна ємність; 10 – клапан зливу води; 11 – проточний електронагрівач; 12 – циркуляційний насос подачі холодної води; 13 – клапан подачі води в охолоджувач; 14 – клапан зливу конденсату; 15 – конденсатозбірна ємність; 16 – вентилятор конденсатора; 17 – конденсатор вологи; 18 – клапан перетікання конденсату з камери в збірник конденсату; 19 – вакуумний клапан викачки вакуумної сушильної камери; 20 – клапан напуску повітря в конденсатозбірну камеру; 21 – насос для прокачки конденсату; 22 – вакуумний насос; 23 – клапан напуску повітря в вакуумну камеру сушіння; 24 – вакуумний клапан відкачки вакуумної сушильної камери;

1.2.4. Осушення за допомогою заморожування

Даний метод сушіння молока ґрунтується на заморожуванні молока та подальшій сублімації льоду в пару, минаючи рідку фазу, що дозволяє зберегти максимальну кількість поживних речовин та ароматичних властивостей молока, і результатом є пористий пористий порошок з високим вмістом сухих речовин.

Перевагами даного методу сушіння є довгий термін зберігання: фриз-сушіння забезпечує тривалий термін зберігання молока без необхідності використання консервантів або хімічних добавок, оскільки волога видаляється з продукту, що сприяє зниженню активності мікроорганізмів та розпаду продукту; висока розчинність: фриз-сушіння дозволяє зберегти високу розчинність молока, так як молекулярна структура продукту залишається практично незмінною, що важливо для реагування молока з водою під час приготування харчових продуктів.

Недоліками даного методу сушіння є високі витрати: фриз-сушіння є відносно дорогим методом сушіння через складність процесу, використання спеціалізованого обладнання та високі витрати на енергію; тривалий час сушіння: фриз-сушіння може продовжуватися досить тривалий час, це обумовлено необхідністю попереднього заморожування та подальшому видаленню вологи при зниженому тиску.

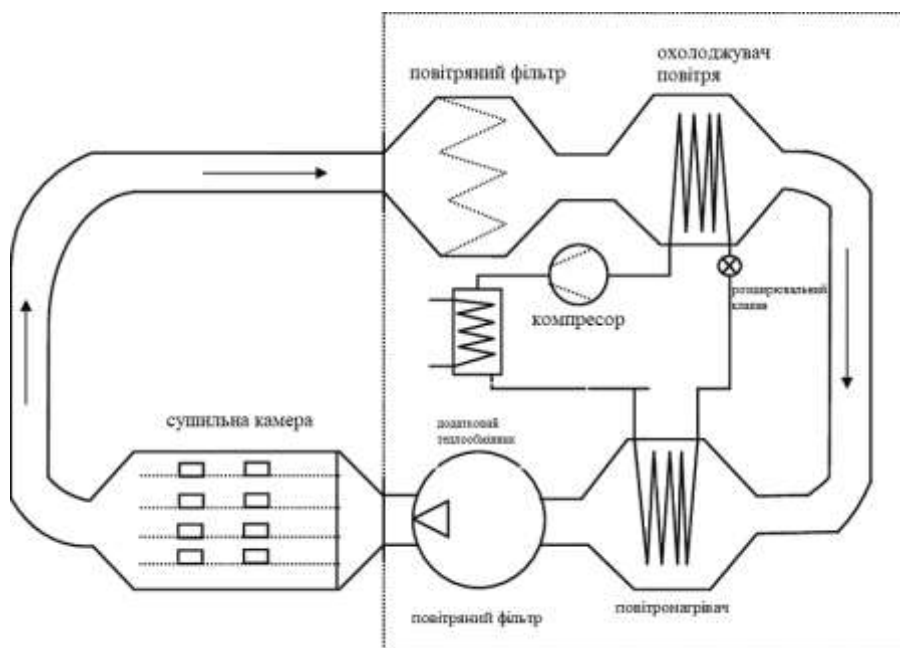


Рис.1.3.4 Технологічна схема сублімації льоду в пару

РОЗДІЛ 2

Конструкція та параметри індукційного нагрівача

2.1. Переваги індукційного нагрівання

Найбільш розповсюдженим видом нагріву молока при пастеризації є нагрів паром та гарячою водою. Недоліками даного підходу є те, що використання парових пастеризаторів на малих фермах потребує додаткових затрат для установки та обслуговування парових котлів, а також додаткового обладнання, складною автоматизацією, жаро-вибухонебезпечною можливістю, небезпекою ураження струмом.[3].

У більшості пастеризаторів, додаткові затрати енергії йде на транспортування вторинних теплоносіїв та втрату тепла через поверхню трубопроводу. Як наслідок, такі пастеризаційні устаткування мають знижений коефіцієнт корисної дії, високу електроємність, а також обмежує можливість плавного регулювання нагріву рідини. Дану проблему можна було б вирішити, використовуючи в якості джерела тепла індукційний нагрівач. При індукційному нагріві теплова енергія виділяється в металевих тілах, що сильніше всього нагрівається. Саме це призводить до отримання високого термічного коефіцієнту корисної дії. В порівнянні з ТЕНовими або гідродинамічними нагрівальними пристроями індукційні мають наступні переваги:

1. Пожежна безпека. Через те, що температура частина, що нагрівається має температуру на 10-15 вище температури рідини, що нагрівається.
2. Передача електричної енергії безпосередньо у тіло, що потребує нагрівання дає змогу здійснити пряме нагрівання провідникових матеріалів.
3. Передача електричної енергії в тіло, що нагрівається, не вимагає контактних пристроїв. Це може бути зручно особливо в умовах автоматизованого потокового виробництва, використовуючи вакуумні та захисні засоби.
4. Індукційне нагрівання дозволяє підвищити продуктивність та покращити умови праці.

5. Низька різність температур. Внаслідок цього інтенсивність утворення накипу або відкладання молочного каменю значно знижується.
6. Індукційні нагрівачі не мають рухомих частин, тому є більш надійними та простими в порівнянні з гідравлічними.

Таким чином, індукційне нагрівання характеризується швидкістю, точністю, низьким енергоспоживанням, можливістю керування, а також забезпечує відносну екологічну чистоту на робочих місцях. Розробляються варіанти застосування таких технологій для широкого діапазону випадків промислового нагріву чи проміжного підігріву.

Не дивлячись на вищенаведені переваги індукційних нагрівачів, застосуванню індукційним нагрівачам для пастеризації молока перешкоджує проблема, пов'язана з нерівномірним нагрівом потоку рідини в стінках даного пристрою. Це може призводити або до перегрівання, або навпаки до недостатнього нагріву, як наслідок зниження якості кінцевого продукту через пошкодження молекул білка. Дана проблема ускладнюється, так як теплова потужність по перерізу труби при пастеризації виділяється нерівномірно, при цьому так само нерівномірно зменшується за товщиною від зовнішньої поверхні до внутрішньої.

Індукційний метод нагріву вже був запропонований при перевезенні нафти по трубопроводній системі. Так як охолодження нафти призводить до збільшення в'язкості. Що в свою чергу призводить до збільшення гідравлічних втрат, а також негативно впливає на насосні станції. Окрім того зниження температури може призвести до відкладення парафінів на стінах трубопроводу, котрі досить складно піддаються очищенню навіть за допомогою різноманітних спеціальних скребків. Аби вирішити дану проблему як раз і використовують індукційні нагрівачі. В результаті аналізу дослідники виявили основні їх недоліки: мала площа поверхні теплообміну великий зазор між обмоткою та елементом, що нагрівається, недосконалість нагрівачів, у яких корпус є елементом нагрівання. Серед переваг можна виділити автономність та можливість автоматичного керування його роботою. Автономність роботи такого пристрою може бути засновано на застосуванні

в якості джерела електроенергії пристроїв та електропристроїв, що використовують оновлюємі джерела енергії [4].

2.2. Конструкція індуктивного нагрівача

При виборі конструкції індукційного нагрівача в даній роботі були використані ідеї, розрахунки та конструкторські рішення авторів робіт з проектування індукційного нагрівання трубопроводів з нафтою для зменшення її в'язкості при транспортуванні [5], а також результати дослідження експериментального зразка стерилізатора молока з індукційним нагріванням малої продуктивності, наведені [6]. Продуктивність установки в нашому проекті приблизно на два порядки менше, ніж та, що нагріває нафтовий потік у трубопроводі та на порядок більше, ніж у роботі [7]. Продуктивність установки суттєво змінює габарити, конструкцію та електричні параметри індуктора порівняно з відомими розробками. Крім того, вимоги на обмеження температури молока та поверхні, що нагрівають молоко, а також стабілізацію та рівномірність температури в області нагріву вказують на необхідність використання засобів автоматизації процесу.

Більшість розробників індукційного нагрівання рідини, що рухається, дійшли висновку, що оптимальна конструкція індуктора являє собою дві коаксіальні труби з нержавіючої сталі, які охоплюються зовні обмоткою індуктора (рис.2.2.1) [8]. При подачі на обмотку індуктора високочастотної напруги зовнішня та внутрішня труби нагріваються індукованими в них вихровими струмами. Рідина, що рухається в просторі між трубами нагріваються від внутрішньої і зовнішньої труби, що дозволяє забезпечити більш рівномірний радіальний розподіл температури.

На Рис.2.2.2 представлена конструкція для реалізації нагріву за допомогою однієї робочої труби, при якому рушійна рідина нагрівається внутрішньою та зовнішньою поверхнею труби.

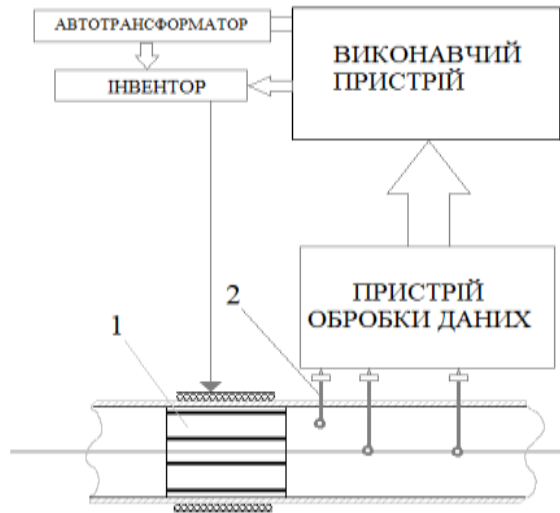


Рис.2.2.1 Конструкція індукційного нагрівача із двома робочими трубами, де 1-Зазор між зовнішньою та внутрішньою трубою; 2-датчики температури



Рис.2.2.2 Конструкція індукційного нагрівача з робочою трубою, де 1-труба, 2 термометр

Обидві конструкції передбачають регулювання процесу нагрівання за допомогою зміни двох параметрів:

- напруги на індукторі, за допомогою якого змінюється електрична загальна потужність нагріву труб та регулюється їх температура
- частоти напруги для рівномірного нагрівання рідини.

У конструкції схеми (рис.2.2.1) зміна частоти дозволяє перерозподілити електричну потужність індуктора, що надходить на зовнішню та внутрішню трубу і таким чином вирівнювання зустрічних теплових потоків від двох труб.

У схемі (рис.2.2.2) - зміни співвідношення температур внутрішньої і зовнішньої поверхонь труби і таким чином вирівнювання температур зовнішнього і внутрішнього потоку рідини. В обох випадках зміна частоти змінює глибину проникнення магнітного поля обмотки індуктора через матеріал робочої труби на глибину скін-шару.

$$\Delta = 503\sqrt{\frac{\rho}{f}}, \text{ де} \quad (1)$$

Стосовно конструкції, наведеної на рис.2.2.1 при нагріванні рідини симетричним потоком тепла залежність оптимальної частоти від товщини стінки труби з нержавіючої сталі визначається умовами, при яких потужності, що виділяються в трубах, будуть рівними. Ця залежність наведена на рис.2.2.3 [9].

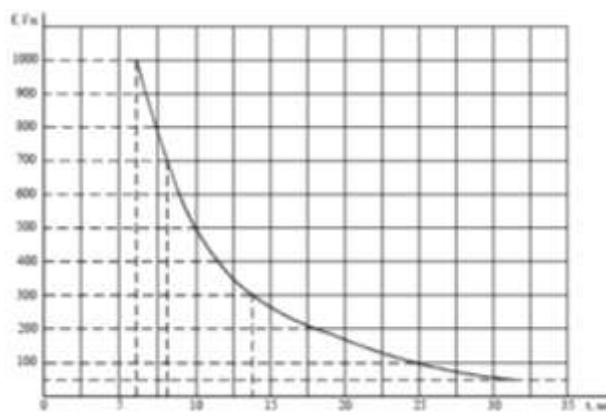


Рис.2.2.4 Залежність оптимальної частоти від товщини стінки труби із нержавіючої сталі [9]

При заданих продуктивності установки, температурі нагріву, теплоємності молока можна оцінити необхідну повну потужність P , індуктора, за відомим співвідношенням [10]:

$$P = C \cdot \gamma \cdot P \cdot \Delta T + \Delta P_{\tau}, \quad (2)$$

де $P = V \cdot S$ – продуктивність нагрівача, ΔT – збільшення температури на виході з нагрівача, ΔP_{τ} – теплові втрати з поверхні індуктора.

к т о р а , V -ш в и д к і с т ь п р о т і к а н н я , C -т е п л о є м н і с т ь , γ -п и т о м а в а г а м о л о к а .

За наявності обмеження на максимальну температуру молока температура стінки труби має бути обмежена на певному рівні. Цей граничний рівень температури труби відповідає максимальній продуктивності трубопроводу. Між температурою стінки труби і середньою температурою потоку рідини в режимі, що встановився, існує однозначний зв'язок, але коефіцієнт теплообміну між стінкою труби і потоком молока в міру його руху і нагрівання вздовж труби зменшується через зменшення різниці між температурами труби і потоком молока. Внаслідок цього зменшується теплопередача від металу труби до рідини. Це означає, що по довжині труби, що нагрівається, потужність нагріву індуктором повинна зменшуватися, щоб уникнути перегріву труби.

Розрахунки, наведені в роботі [9], показали кількісні оцінки падіння рівня потужності за довжиною нагрівача, обумовленого погіршенням умов теплообміну (рис.2.2.3).

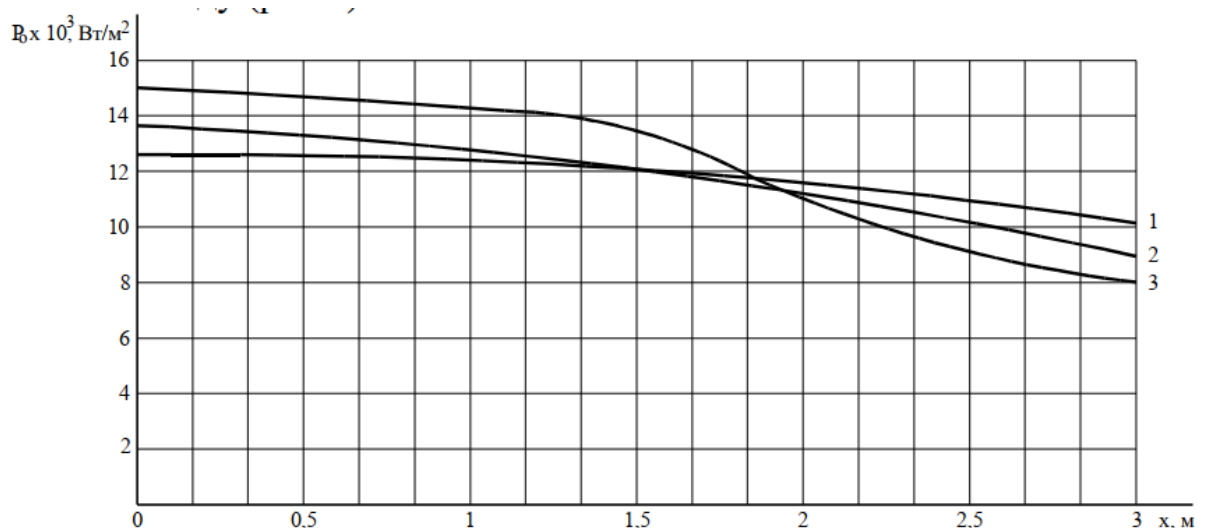


Рис.2.2.4 розрахункові значення питомої потужності за довжиною нагрівача

1 - температура на виході із нагрівача 60 градусів

2 - температура на виході із нагрівача 70 градусів

3 - температура на виході із нагрівача 90 градусів

Як видно з графіків при нагріванні нафти до 80 градусів у трубі індуктора діаметром 300мм завдовжки 3 метри споживана питома потужність наприкінці труби падає майже вдвічі.

Вибір співвідношення між робочим зазором і довжиною нагрівача при заданій продуктивності залежить від багатьох факторів:

- збільшення робочого зазору і зовнішнього діаметра індуктора спрощує прокачування необхідної кількості рідини і дозволяє збільшити площу зіткнення її з поверхнею нагрітої труби, що припадає на одиницю довжини нагрівача. Таким чином, збільшуючи робочий зазор можна зменшити довжину труби, що нагрівається.

- загальна площа нагрітої частини труби до допустимої температури визначається потужністю індуктора та у відповідність до виразу (1) продуктивністю установки, а також коефіцієнтом передачі теплової енергії від металевої стінки труби в потік рідини.

- збільшення робочого зазору та зменшення довжини індуктора зменшує рівномірність розподілу температури за обсягом рідини пов'язаного із збільшенням затримки на передачу теплової енергії від нагрітої поверхні у радіальному напрямку. Величина затримки залежить від коефіцієнта теплопровідності рідини та розміру робочого зазору. Зі збільшенням робочого зазору потік рідини не встигає прогрітися, що призводить до збільшення температурної похибки.

Моделювання процесів, проведене в роботі [9] для визначення оптимального співвідношення між діаметром і довжиною індуктора, призначеного для нагрівання нафти, зроблено для необхідної точності підтримки температури відповідно: $\Delta T_1=18^\circ\text{C}$, $\Delta T_2=15^\circ\text{C}$, $\Delta T_3=10^\circ\text{C}$, $\Delta T_4=6^\circ\text{C}$. Наведені на малюнку 4 залежності вказують на можливість вибору мінімальної довжини при заданій продуктивності 90 тонн за добу та необхідної точності для нагрівача із зовнішнім діаметром труби 300мм.

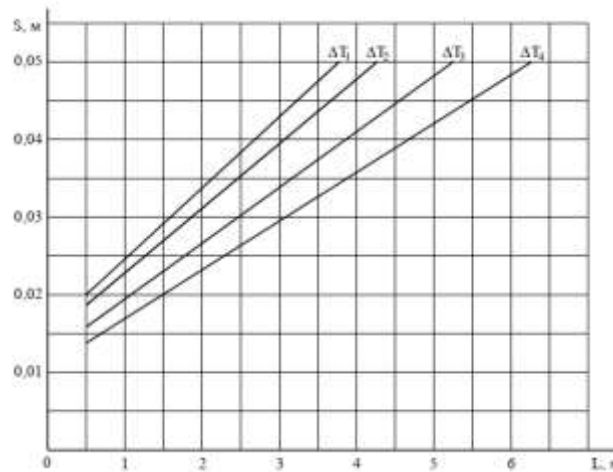


Рис.2.2.5 Оптимальне співвідношення між зазором і довжиною нагрівача.

Продуктивність — 90 т/год.

З графіків видно, що з поліпшення точності витримування температури слід подовжити зону нагрівання. Дійсно, для будь-якої заданої точності витримування температури збільшення робочого кільцевого зазору вимагає збільшення довжини нагрівача, в той же час для одного і того ж зазору, наприклад, 30 мм, щоб поліпшити точність 18 до 6, потрібно подовжити нагрівач удвічі: з 1,5 м до 3 м. Цілком природним у зв'язку з цим напрошується висновок про доцільність використання кількох послідовно встановлених індукторів, як це показано на малюнку 5, наведеному в роботі [11].

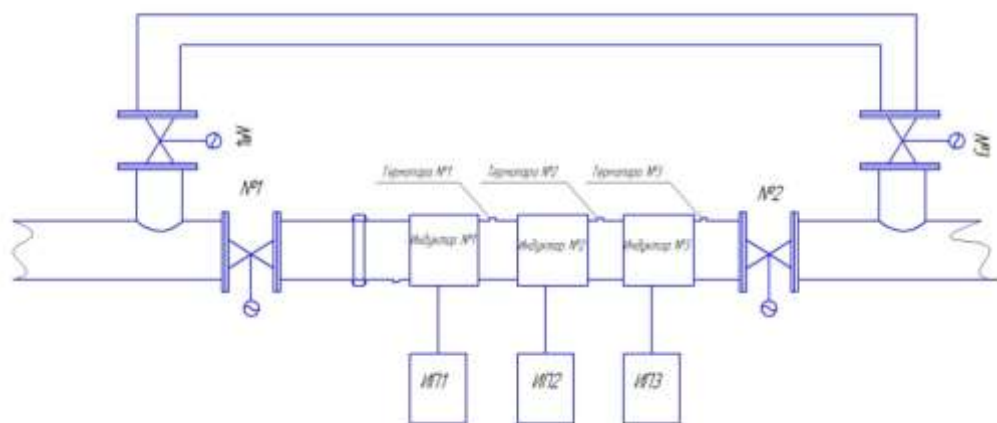


Рис.2.2.6 Функціональна схема багатосекційного індукційного нагрівача.

При проектуванні конструкції індукційного нагріву для пастеризації молока наведені вище дослідження можуть мати лише якісний характер і використовуватися для вибору потужності індуктора за заданою продуктивністю та попередніми геометричними параметрами установки,

враховуючи істотну різницю в коефіцієнтах теплоємності та теплопровідності молока в порівнянні з нафтою.

Однак, зберігається головний висновок, сформульований у роботі [11]: «Наявність жорстких обмежень на температурний режим при нагріванні обумовлює необхідність застосування протяжних нагрівачів значної довжини для досягнення рівномірної за обсягом необхідної середньої температури рідини. Реалізація нагрівачів такої протяжності можлива лише як багатосекційних нагрівальних систем». Очевидно, що такі системи потребують автоматизованого управління.

2.3. Індуктори та їх джерела живлення

Індукційний нагрівач складається з потужного джерела високої частоти та коливального контуру, який містить індуктор (Рис.2.3.1) [12]. У змінне магнітне поле індуктора поміщається заготівля, котра нагрівається. Залежно від матеріалу заготівлі, її об'єму та глибини нагріву, використовують широкий діапазон робочих частот, від 50 Гц до десятків МГц. При низьких частотах близько 100...10000 Гц у промисловості можуть застосовуватись електромашинні перетворювачі та тиристорні інвертори.

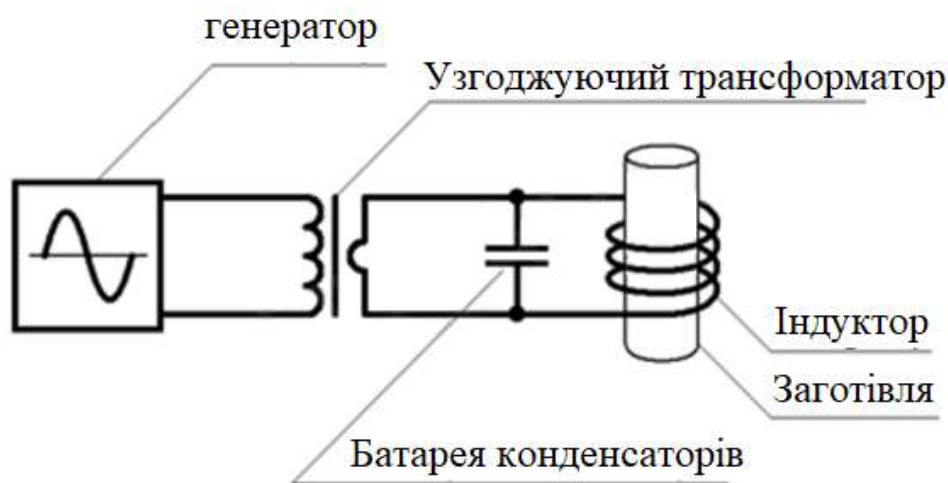


Рис.2.3.1 Загальна схема індукційного нагрівача

Відповідно до закону електромагнітної індукції, провідник, знаходячись в змінному магнітному полі, в ньому індукується (наводиться) електрорушійна сила. При цьому амплітуда електрорушійної сили (ЕРС)

пропорційна швидкості зміни магнітного потоку, у якому знаходиться провідник.

Розглядаючи заготовлю з струмопровідного матеріалу як безліч короткозамкнених контурів, тоді, розмістивши їх у індуктор, під впливом змінного магнітного поля в контурах індукуватимуться струми (так звані вихрові). Величина вихрових струмів залежить від питомого опору матеріалу. А згідно із законом Джоуля-Ленца - струм стимулює до нагрівання матеріал, що має опір. Індуктор разом з навантаженням струмопровідного матеріалу подібні до трансформатора, що не має магнітопроводу (Рис.2.3.2). Первинною такою обмоткою трансформатора є індуктор, вторинною – індуктивність заготовки, яка навантажена на активний опір матеріалу.

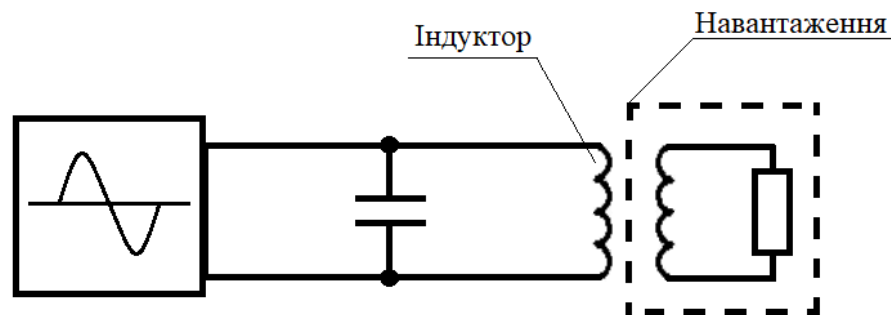


Рис.2.3.2 Еквівалентна електрична схема індуктора

Високочастотний трансформатор працює на паралельний та послідовний контур. У першому випадку трансформатор значно впливає на резонансну частоту контуру. У другому випадку послідовний контур у резонансному режимі споживає максимум потужності з порожнім індуктором (без навантаження). Зі зміною маси або властивостей матеріалу, що нагрівається, резонансна частота коливального контуру змінюється. Найбільш широко застосовують прямий індукційний нагрів на середніх та високих частотах. І тому використовують індуктори спеціального виконання. Індуктор випускає електромагнітну хвилю, яка падає на тіло, що нагрівається і загасає в ньому. Енергія поглиненої хвилі перетворюється в тілі на теплоту. Ефективність нагріву тим вище, чим ближче вид електромагнітної хвилі, що випускається. (Плоска, циліндрична і т.д.) до форми тіла. Тому для нагріву плоских тіл застосовують плоскі індуктори, циліндричних заготовів - циліндричні (соліноїдні) індуктори. Вони можуть мати складну форму,

обумовлену необхідністю концентрації електромагнітної енергії у потрібному напрямку. Особливістю індукційного введення енергії є можливість регулювання просторового розташування зони протікання вихрових струмів. По перше, вихрові струми протікають у межах площі, що охоплюється індуктором. Нагрівається лише та частина тіла, яка знаходиться в магнітному зв'язку з індуктором незалежно від загальних розмірів тіла. По-друге, глибина зони циркуляції вихрових струмів і, отже, зони виділення енергії залежить від частоти струму індуктора (збільшується при низьких частотах та зменшується з підвищенням частоти). Ефективність передачі енергії від індуктора до тіла, що нагрівається, залежить від величини зазору між ними і підвищується за його зменшенні.

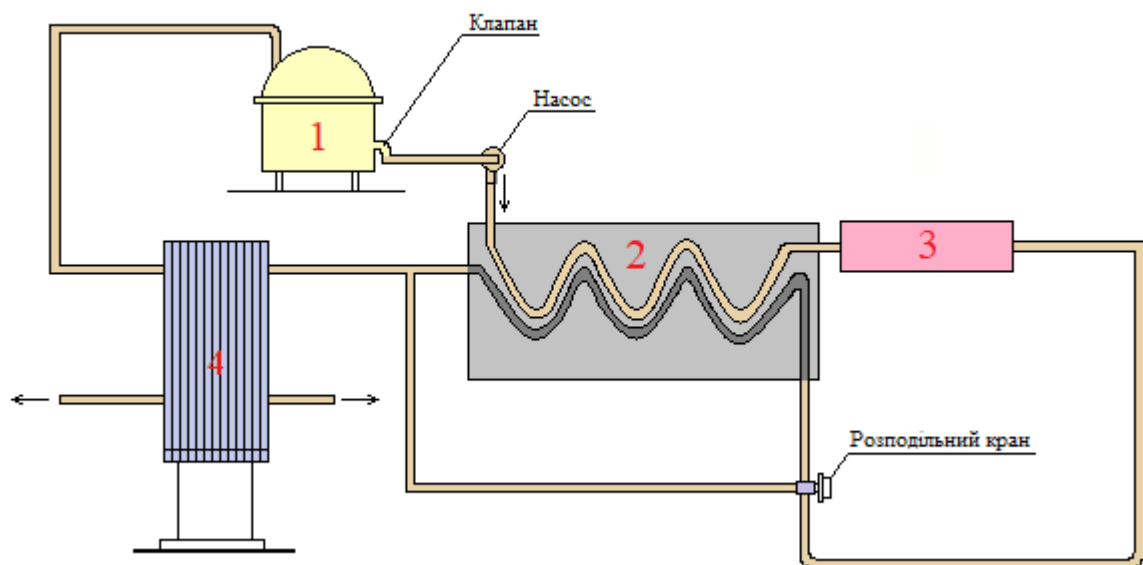


Рис.2.3.3 Зовнішній вигляд технологічного процесу пастеризації молока з індуктором, де 1 — резервуар; 2 — регенератор; 3 — індуктор; 4 — холодильна установка

Даний технологічний процес складається з:

1. Прийом сировини;
2. Індукційний нагрів;
3. Сепарація;
4. Охолодження та пакування.

Принцип функціонування даної технологічної лінії полягає у тому, аби відкривши клапан, починає працювати відцентрований насос, за допомогою

якого, сире молоко (приблизно від 1°C до 4°C), проходячи через труби в регенераторі поруч із вже пастеризованим молоком, підігрівається до температури приблизно 30°C (2). А далі надходить в індуктор (3), і у цей самий момент індуктор вмикається і починає нагріватися. Подолавши три ступені нагріву молоко нагрівається ще на 40°C , при проходженні першої молоко нагрівається на 20°C , при другій на 12°C і при третій на 8°C . Через регенератор (2), за допомогою такого ж самого відцентрованого насоса, охолоджене молоко направляється до холодильної установки, віддаючи своє тепло молоку, що надходить. Холодильна установка (4) остаточно охолоджує його для розливу та зберігання. Проте, проходячи вперше по даній технологічній лінії, через те, що вже термічно оброблене молоко не передає своє тепло сирому, воно не нагрівається до 30°C . А отже молоко, виходячи з індуктора має температуру приблизно 40°C , яка не є задовільною для умов пастеризації. Саме тому доти, доки температура термообробленого молока не досягне потрібної 70°C , молоко буде повертатися у резервуар і знову проходити вздовж даного технологічного контуру. А щоб ще протягом 15ти секунд підтримати температуру молока, необхідну для його пастеризації, воно протікає по 4х метровій герметичній трубі. У випадку, коли температура на виході з індуктора рівна 70°C , термометр покаже 1, це означає, що потужність на індукторі треба стабілізувати. Також у випадку, коли температура на виході з індуктора перевищує 70°C , передбачений електронний клапан, який відкриваючись на певну кількість ділень, буде розподіляти частину молока.

Джерела живлення для індукційного нагріву — це перетворювачі частоти, що трансформують напругу живильної трифазної мережі стандартної частоти в однофазну напругу (струм) з частотою, що необхідна для виконання певної технологічної операції індукційного нагріву. Як правило, джерела живлення це комбінації таких пристроїв як конвентор, інвертор та генератор. Конверторна частина джерела живлення перетворює змінну напругу мережі на постійну напругу, а інверторна або генераторна

частина перетворює постійну напругу в однофазну змінну напругу необхідної для індукційного нагрівання частоти.

Для того аби джерела живлення відповідали як умога більшій кількості різноманітних потреб, котрі можуть виникнути при індукційному нагріванні, виробляють велику кількість типів та моделей. Специфіка застосування індукційного нагріву в кожному конкретному випадку визначає частоту, потужність та інші параметри, такі як напруга, струм, коефіцієнт потужності чи добротність. Графік областей типового застосування індукційного нагріву в залежності від частоти та необхідної потужності наведено на рис. 1.

Надважливим етапом індукційного нагрівання є частота, оскільки саме вона напряду визначає глибину проникнення струму в заготівлю і, як наслідок, глибину та геометрію шару, що нагрівається. Таким чином, при проектуванні елементів джерел живлення насамперед має бути визначена робоча частота. Компоненти джерел живлення повинні бути спроектовані для функціонування з відповідними обмеженнями, що забезпечують високу надійність їх роботи на потрібній частоті.

Інверторна схема, яка перетворює постійний струм на змінний, побудована на напівпровідникових ключових елементах, таких як тиристори і транзистори. Для більших потужностей та низьких частот найчастіше використовуються потужні тиристори. Для низьких потужностей та частот вище 25 кГц використовуються транзистори, оскільки вони можуть перемикатися з високими швидкостями та малими втратами.

Потужність, необхідна для конкретного процесу індукційного нагріву, залежить від обсягу металу, що нагрівається, ступеня нагріву та ефективності процесу. Невеликі області, що нагріваються на малу глибину, можуть потребувати малої потужності (1-2 кВт), у той час як для нагрівання сталевій смуги, що швидко переміщається в індукторі, до температури вище точки Кюрі може знадобитися потужність, що обчислюється мегаватами.

Напругу, струм, коефіцієнт потужності індуктора визначають геометрія заготівлі та індуктора, а також електричні властивості матеріалу, що нагрівається. Дані параметри необхідно визначити за для узгодження виходу

джерела живлення з індуктором. Більшість джерел живлення систем індукційного нагріву відповідають діапазону параметрів індукторів, котрі застосовуються.

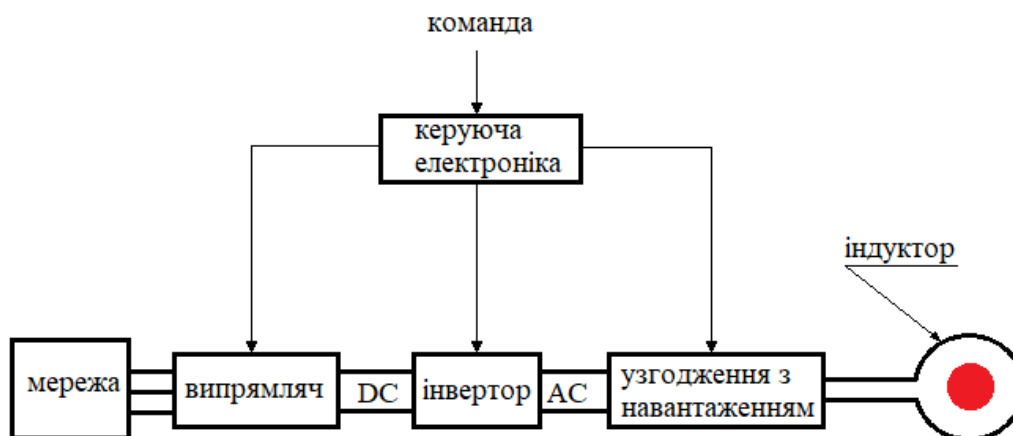


Рис.2.3.4 Спрощена діаграма функціонування джерел живлення для індукційного нагрівання.

При виборі найкращої схеми для технологічного процесу або оцінки придатності її використання для конкретного процесу, необхідно розуміти принципи функціонування різних схем джерел живлення, що використовуються для індукційного нагріву. Спрощена діаграма, що охоплює майже всі види джерел живлення, наведено на рис. 2.3.4. На вхід зазвичай подається трифазна напруга від 220 до 575 В частотою 50 (60) Гц. Перший блок називається конвертером змінного струму в постійний або випрямляч. Цей блок може забезпечувати фіксовану постійну напругу, регульовану постійну напругу або регульований постійний струм. Другий блок називається інвертором або генератором і призначений для перетворення постійного струму однофазний змінний струм. Третій блок називається блоком узгодження та призначений для приведення напруги на виході інвертора до величини, необхідної для ефективного функціонування індуктора. Блок управління порівнює сигнал з виходу системи з керуючим сигналом і регулює вихідну напругу випрямляча, фазу або частоту інвертора, забезпечуючи тим самим відповідний режим нагрівання [135].

Найбільш розповсюдженою конфігурацією інвертору є мостова перетворювальна схема, яку часто називають просто “Міст” (Рис.2.3.5). Вона

складається з чотирьох плеч, що містять ключові елементи такі як, теристори або транзистори. Вхід розташований на діагоналі мосту, так щоб при розімкнутих ключах S1 та S2, струм рухається у напрямку з справа наліво. У випадку, коли ключі S1 та S2 – замкнуті, а ключі S3 та S4 – розімкнуті, струм змінює напрямок на протилежній, тобто з ліва на право. Оскільки цей процес повторюється, відбувається генерування змінного струму частота якого прирівнюється до швидкістю перемикавання вентилів.

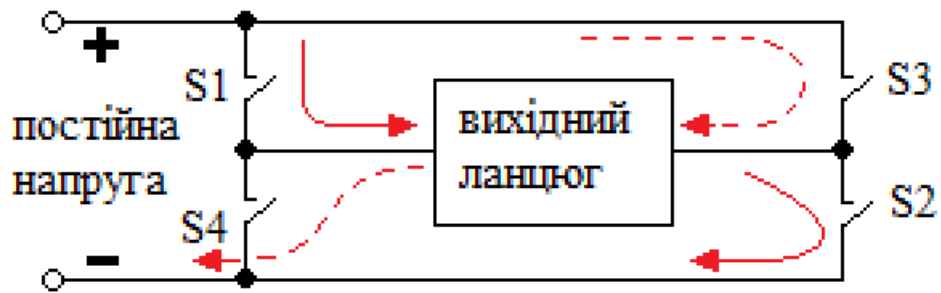


Рис.2.3.5 Базова схема мостового інвертора.

РОЗДІЛ 3

МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ІНДУКЦІЙНОГО НАГРІВУ

3.1. Визначення параметрів структурної схеми

Визначимо основні параметри одного з можливих варіантів індукційного нагрівача молока з продуктивністю 2000 літрів на годину. Виберемо нагрівач, що складається з двох коаксіальних труб (див. Рис.2.3.1) довжиною 3 метри, великим та малим зовнішнім діаметром відповідно $D=60$ мм, $d=30$ мм та товщиною стінок труб 5 мм. Оцінка співвідношення між довжиною труб і робочим перерізом потоку молока обрано за графіком на малюнку 4 з урахуванням різниці у продуктивності та збереження площі контакту рідини з нагрітою поверхнею. Це співвідношення переважно впливає на точність витримування температури за обсягом і залежить від теплопровідності рідини, що нагрівається. У зв'язку з тим, що питома теплопровідність молока ($1,7$ кДж/кг*градус) значно більше теплопровідності нафти ($0,14$ кДж/кг*градус), для якої був побудований графік, можна очікувати, що однорідність прогріву за обсягом для молока буде кращою і точність витримування температури буде вищою ніж 6%.

У цій конструкції два робочі зазори, загальною площею перерізу $S=0.0019$ м³. Отвори мають різні площі перерізу, у співвідношенні: $S_1/S_2 = 12/7$. Це пов'язано з тим, що перший потік рідини рухається між зовнішньою та внутрішньою трубою та обігрівается двома поверхнями, а другий – лише внутрішньою трубою. Для визначення потрібної потужності індукторів спочатку визначимо кількість теплової енергії, необхідної для нагрівання молока, що знаходиться всередині нагрівача на 30 градусів. Передбачається, що на вхід індукційного нагрівача подаватиметься молоко, яке вже попередньо підігріте до 30 - 38 градусів у теплообміннику гарячим молоком, яке пройшло пастеризацію і підлягає охолодженню.

Приймаючи питому вагу молока дорівнює питомій вазі води отримаємо: $Q=m \cdot C \cdot \Delta T = S \cdot L \cdot \rho \cdot C \cdot \Delta T = 652$ кДж, де теплоємність молока $C=3,81$ кДж/кг градус, маса молока в нагрівачі $m=5,7$ кг. При продуктивності установки 2000 кг/год, швидкість потоку молока по нагрівачу становить 0.26 м/с., Час нагріву

молока в трубі 11.4 сек, отже, необхідна теплова потужність дорівнює 205894 кДж/год або без урахування втрат 57,24 кВт електричної потужності індуктора. Оскільки рівень потужності у процесі нагрівання знижується через зменшення коефіцієнта тепловіддачі від стінки труби до рідини в міру її переміщення до виходу (Рис.2.3.6), використовуємо три індуктори, включені послідовно на рівній відстані сумарною потужністю 60 кВт: перший-25 кВт, другий-20 кВт, третій-15 кВт.

Індуктори необхідно розташувати на відстані один від одного, щоб послабити взаємодію магнітних потоків. У цих проміжках можна передбачити встановлення пристроїв для перемішування молока, наприклад, напрямні пластини по периметру, що забезпечують обертання потоку. Крім того, у цих місцях зручно встановити датчики температури нагрівальних труб та температури вхідної та вихідної температури потоків для кожного індуктора.

Розглянемо представлену на Рис.3.1 функціональну схему одного ступеня нагрівача для подальшої побудови структурної схеми.

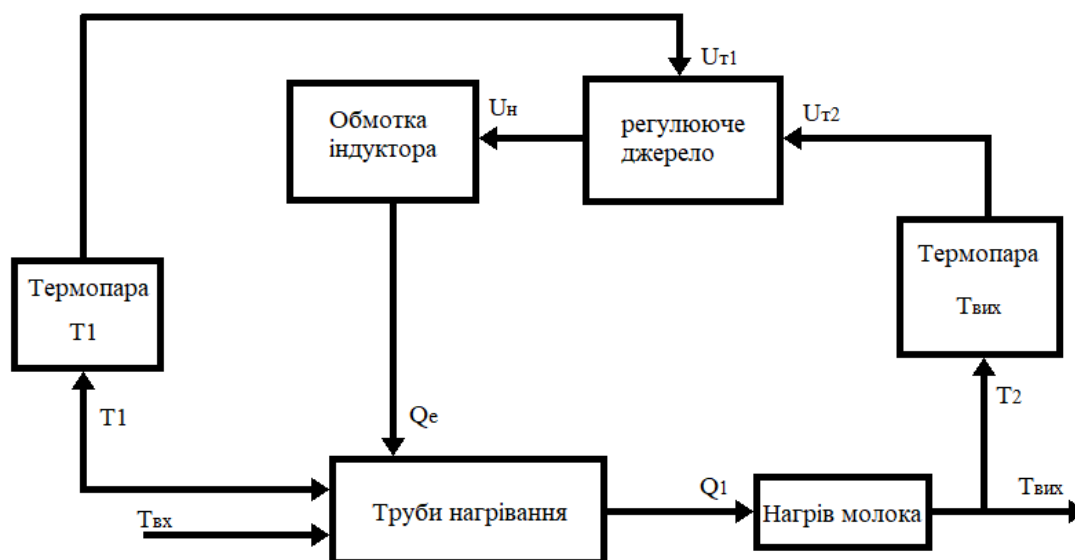


Рис.3.1 Функціональна схема процесу нагрівання в одній секції.

Задане значення температури складається із температури молока на вході в нагрівач $T_1 = T_{вх}$ та програмного підвищення температури $T_3 = \Delta T$, яке відбувається в результаті нагрівання у відповідній секції. Поточне значення температури T_2 вимірюється термопарою на виході із секції. Різниця між

заданою та поточною температурою у вигляді напруги надходить на керування струмом індуктора.

На жаль, математичний опис процесів, що включає перетворення електромагнітної енергії в тепло в стінці труби, передачу теплової енергії від стінки труби в потік рідини з нерівномірним розподілом температури і швидкості перерізу потоку, облік «транспортного» запізнення. виявляється настільки складним, що визначення передавальних функцій досліджуваного об'єкта аналітичним шляхом є дуже трудомістким завданням і з неточними результатами [14]. Тому зробимо спочатку деякі спрощення.

По-перше, динамічні характеристики досліджуваного процесу істотно визначаються пристроями, що мають велику інерційність, особливо якщо вони встановлені послідовно. Їх вплив залежить від співвідношення між постійною часу T аперіодичного ланки і характерним часом перебігу всього процесу. Весь процес у розглянутій установці обмежується часом t_1 з перебування молока, що тече зі швидкістю 0.26 м/с. у трубі нагрівача, що дорівнює 3 метрам. Тому можна знехтувати часом зміну струму в індукторі при стабілізації вихідної температури в кожній секції нагріву.

По-друге, процес нагрівання, як впливає з Рис.3.1, поділений на дві стадії. Перша стадія – нагрівання металевих труб з нержавіючої сталі, друга – передача теплової енергії від нагрітих труб у потік молока. Кожна стадія описується передавальною функцією аперіодичного ланки. Постійна часу аперіодичного ланки може бути прийнята, як $1/3$ від часу, необхідного для нагрівання до заданої температури металу труби або молока, що знаходиться в нагрівачі.

Таким чином, необхідна кількість енергії для нагрівання першої секції дорівнює:

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta t = c \cdot S \cdot L \cdot \rho \cdot \Delta t = 193,3 \text{ кДж} = 0,0556 \text{ кВтгод}$$

$$c = 0.5 \text{ кДж/кг градус} \text{ -теплоємністьсталі;}$$

$$\rho = 7,7 \text{ г/см}^3;$$

$$S_m = \pi(30^2 - 25^2) + \pi(15^2 - 10^2) = 1255 \text{ мм}^2 \text{ – сумарний переріз труб;}$$

$L = 100$ см – довжина металевих труб усекції;

$\Delta t = 20$ градусів;

На вході в перший індуктор температура після теплообмінника дорівнює 30 градусів, а після індукційного нагрівання вона збільшиться на 20 градусів і дорівнюватиме 50 градусів.

При подачі електричної потужності індуктора першого ступеня, що дорівнює 25 кВт, нагрівання труб до заданої температури відбудеться за час:

$T = 0.053 \cdot 3600 / 25 = 7,6$ с, що дозволяє прийняти постійну часу аперіодичної ланки рівної $T_1 = 2$ с.

Оцінка постійного часу для процесу нагрівання молока:

$Q = cm\Delta t = cSLp\Delta t = 552,7$ кДж = 0,0512 кВт год;

$c = 4.2$ кДж/кг градус;

$S_b = 1570$ мм²;

$\Delta t = 20$ градусів;

$T = 9.5$ с , $T_2 = 4$ с;

Аналогічно можна розрахувати параметри другого та третього ступеня нагріву.

3.2. Замкнута система стабілізації температури в кожному ступені нагрівання

Модель системи автоматичного регулювання температури, реалізована в додатку Simulink пакету Matlab дана на Рис.3.2. У цій моделі кожна з трьох ступенів нагрівання працює незалежно, збільшуючи температуру відповідно на 20, 12 та 8 градусів.

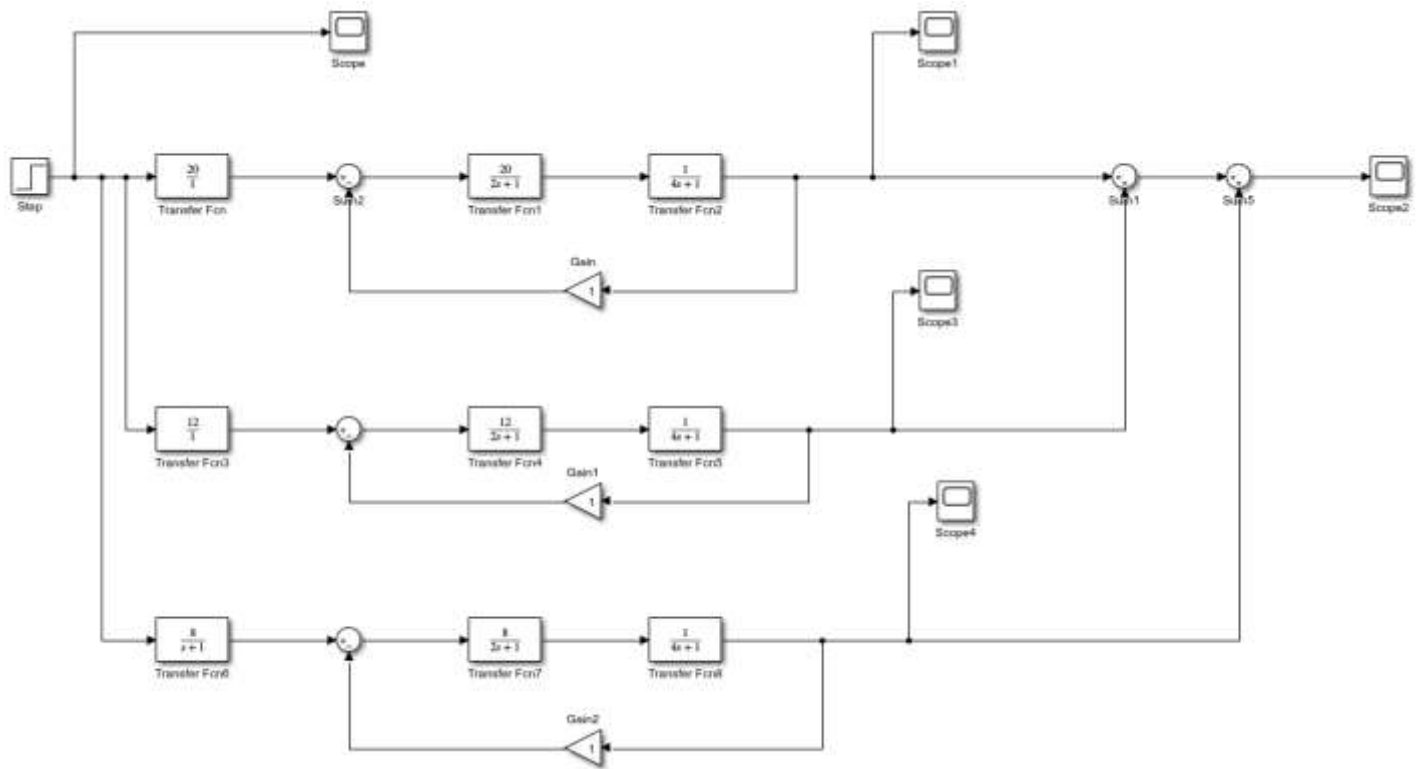


Рис.3.2 Структурна схема та перехідні характеристики.

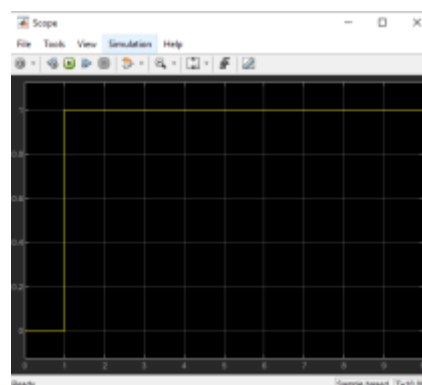


Рис.3.3 Перехідна характеристика залежності температури нагрівання
молока від часу

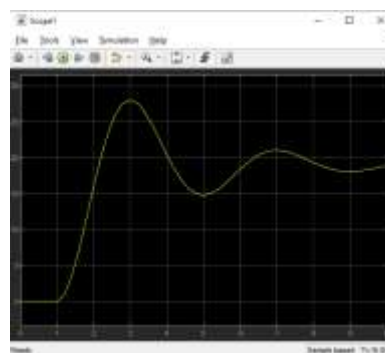


Рис.3.4 Перехідна характеристика залежності температури нагрівання молока
від часу

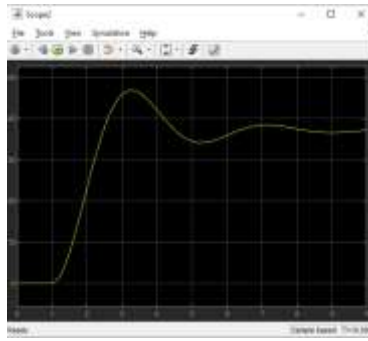


Рис.3.5 Перехідна характеристика залежності температури нагрівання молока від часу

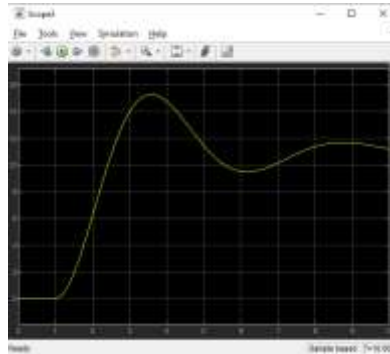


Рис.3.6 Перехідна характеристика залежності температури нагрівання молока від часу

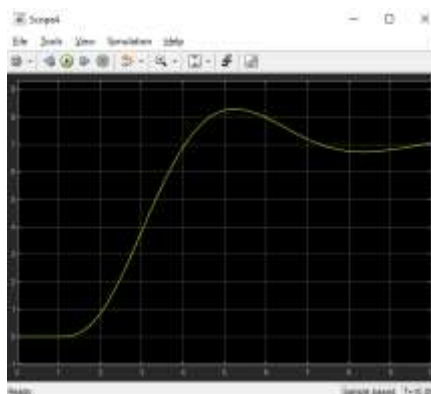


Рис.3.7 Перехідна характеристика залежності температури нагрівання молока від часу

Як видно з перехідних характеристик (графіків залежностей температури нагрівання молока від часу Рис.3.3-Рис.3.7) при прийнятих параметрах нагріву під час перехідного процесу спостерігається закидання температури (перерегулювання) на всіх трьох щаблях нагріву, з тенденцією переходу на загасання коливання. Це можна було очікувати, оскільки відомо, що дві послідовно з'єднані аперіодичні ланки еквівалентні коливальній ланці, і при збільшенні коефіцієнта передачі та збільшенні інерційності ланок коливання наростають аж до переходу в нестійкий режим.

3.3. Гасіння коливань температури

Згідно з теорією автоматичного регулювання, основним засобом гасіння (демпфування) коливань регульованого параметра в замкнутій автоматичній системі є введення похідної до закону регулювання, тобто використання швидкісного зворотного зв'язку. Реалізація такого методу показано на Рис.3.3.1

У структурній схемою кожному індукторі використовується додатково датчик швидкості зміни температури. Сигнал датчика надходить на регульоване джерело разом із сигналами температур на вході та виході секції нагрівача.

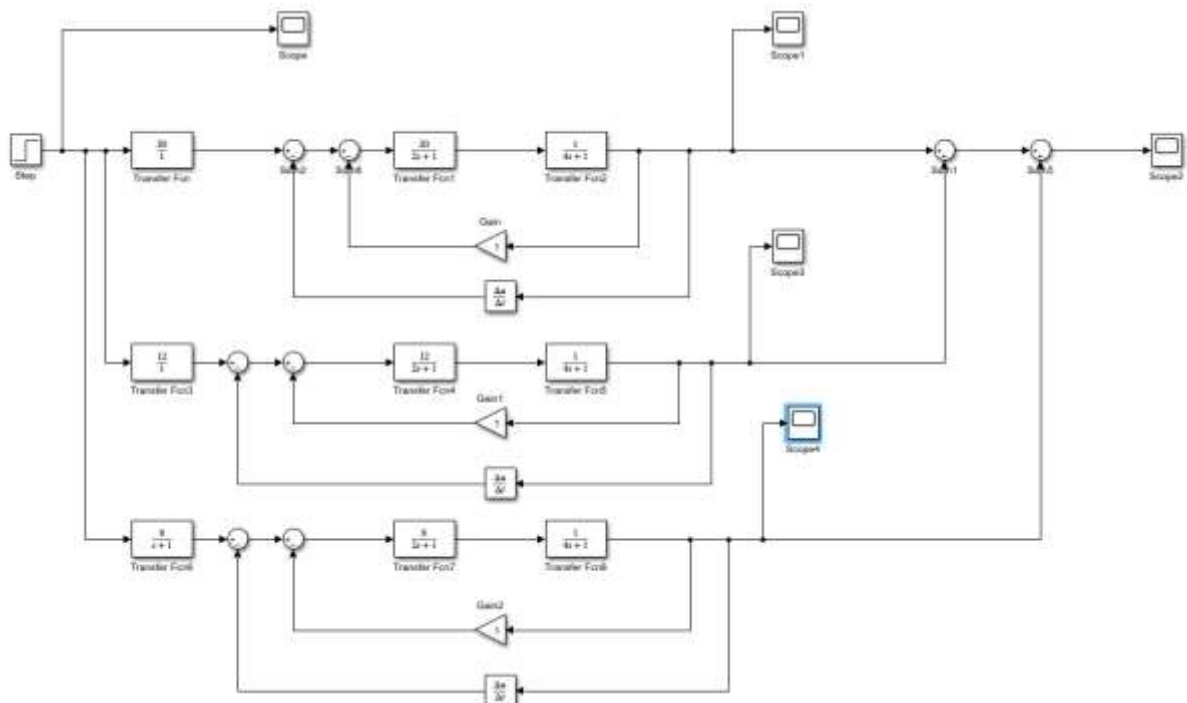
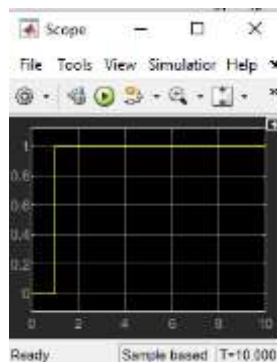
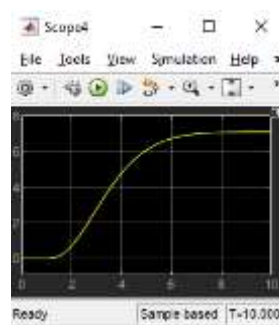
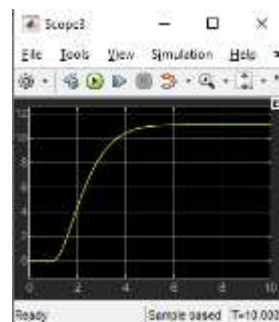
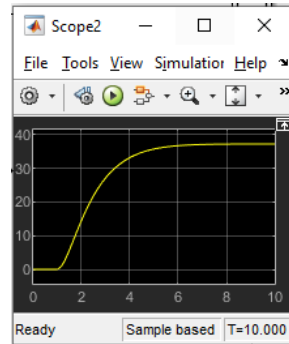
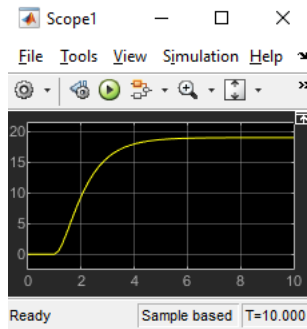


Рис.3.3.1 Структурна схема із запровадженням похідної до закону регулювання.





Як видно на Рис.3.4.1 використання сигналу похідної від температури нагрівання в кожній секції усуває перерегулювання та коливання на всіх етапах нагрівання

Як датчик швидкості зміни температури можна використовувати дві послідовно включені термопари, з зустрічно спрямованими термоелементами, які мають різну інерційність. Такий метод використовується, наприклад, у датчиках ДТБГ в системах сигналізації пожежі.

3.4. Урахування транспортної затримки

Урахування транспортної затримки реалізується шляхом затримки сигналу одиначної ступінчастої функції на 3 секунди для другої секції та на 6 секунд для третьої. Структурна схема наведена на Рис.3.4.1.

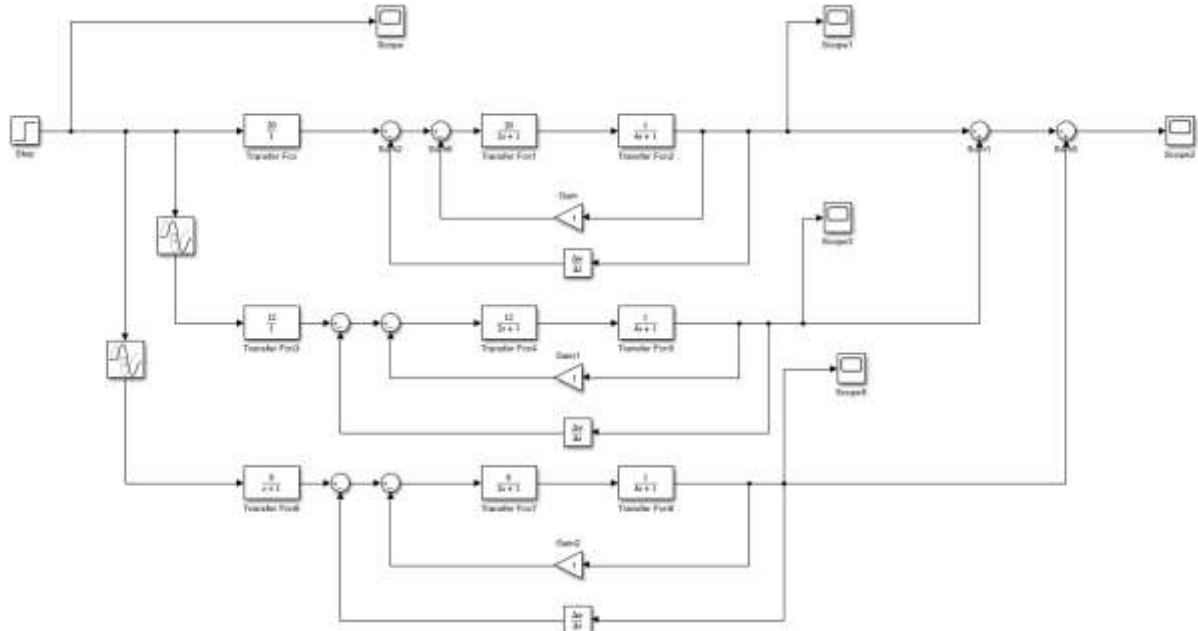


Рис.3.4.1 Структурна схема з урахуванням руху молока у нагрівачі.

З аналізу перехідних характеристик (Рис.3.4.2) випливає:

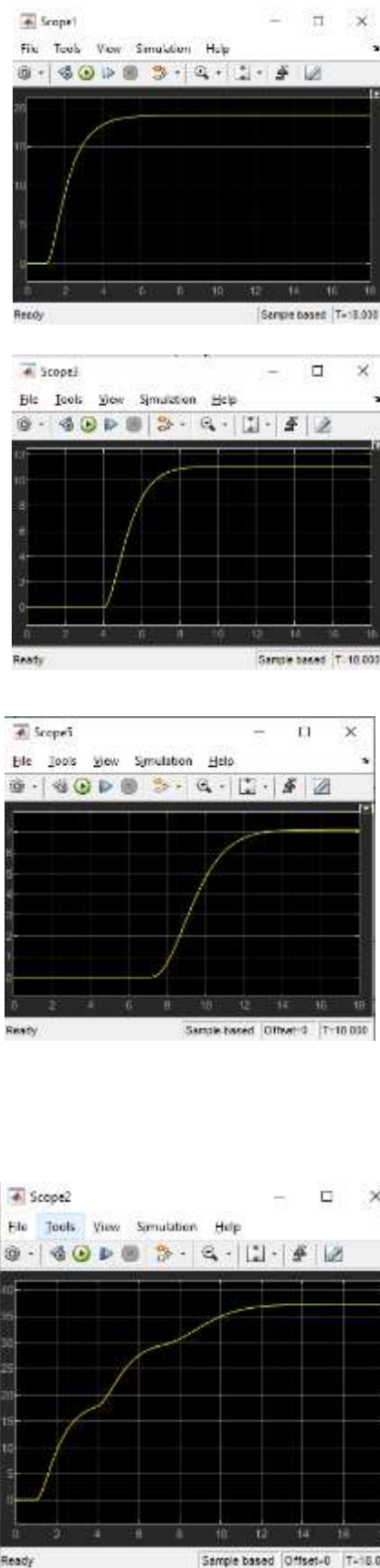


Рис.3.4.2 Зростання температури в окремих секціях та на виході з нагрівача з урахуванням «транспортного запізнення».

З аналізу перехідних характеристик (Рис.3.4.2) випливає:

- індукційне нагрівання молока в трьох ступенях змінює температуру за аперіодичним законом;
- температура на виході з нагрівача досягає заданого значення за 9 секунд, відповідно до сумарного часу перебування молока в індукторах;
- використання швидкісних зворотних зв'язків забезпечує необхідний запас сталості системи;

3.5. Зміна температури на виході з нагрівача в режимі запуску установки

Позначимо температуру молока у резервуарі (Рис.3.8) T_0 . Зазвичай резервуар є холодильником, у якому молоко зберігається при температурі $T_0 = 1-4$ градуси. Як було прийнято в досліджуваній моделі, під час проходження триступеневим індукційним нагрівачем температура молока, незалежно від початкової температури на вході в перший індуктор, збільшиться на $\Delta T = 40$ градусів. При подальшому перебігу молока через теплообмінник частина тепла нагрітого молока передається потоку, що йде з резервуара перший індуктор, збільшуючи його температуру до $T_1 = T_0 + \Delta t$. Очевидно, що у кращому випадку, при якому температура в теплообміннику обох потоків молока стає однаковою, максимальна теплова енергія передається для попереднього підігріву молока та відбувається максимальне попереднє охолодження пастеризованого молока. У міру збільшення температури T_1 поступово буде наростати температура на виході нагрівача.

Розглянемо крайні випадки встановлення закономірності зростання температури після включення індукторів.

1. Нехай $T_0 = 0$, $\Delta T = 40$, температура T_1 на вході в нагрівач у кожному циклі стає рівною половині температури на виході нагрівача:

$$T_1 = 1/2 T_{\text{вих}}$$

Після першого циклу $T_{\text{вих}} = T_0 + \Delta T = 40$;

після другого циклу $T_{\text{вих}} = ((T_0 + \Delta T) / 2) + 40 = (40 + 2 * 40) / 2 = 60$;

після третього $T_{вих} = (40 + 2 * 40 + 2 * 2 * 40) / 2 * 2 = 70$;

після четвертого $T_{вих} = (40 + 2 * 40 + 2 * 2 * 40 + 2 * 2 * 2 * 40) / 2 * 2 * 2$
 $= 75$;

після n циклів:

$$T_{вих} = 40 * (1 + 2^1 + 2^2 + 2^3 + 2^n) / 2^n$$

Графік залежності температури молока на виході з нагрівача від кількості циклів наведено на Рис.3.5.1. У цих умовах значення температури, що встановилося, дорівнює 80 градусів, при якому температура попереднього нагріву до 40 градусів стає рівною температурі нагріву в індукторах. При відхиленні температури на виході нагрівача від 80 градусів у бік збільшення чи зменшення призведе до вихідного значення. Наприклад, при відхиленні температури до 82 градусів температура попереднього нагріву збільшиться до 41 градуса і після індукційного нагріву дорівнює 81 градус і продовжуватиме зменшуватися до 80 градусів. Тобто система статично стійка.

2. Якщо початкова температура в резервуарі дорівнює $T_0 = 20$ градусів, $\Delta T = 40$, то $T_1 = 1/2 * (T_{вих} + T_0) + T_0$.

У цьому випадку наростання температури піде за графіком на Рис.3.5.1. З рисунку видно, що крива наростання температури паралельно зміщується вгору на величину температури молока, що надходить з резервуара, і відповідно збільшується температура, що встановилася.

3. Розглянемо випадок, коли передача тепла від нагрітого пастеризованого молока для попереднього нагріву, що надходить із резервуара, менш ефективна. У граничному випадку, коли відсутній теплообмінник, температура на виході та нагрівача буде постійною, рівною $T_{вих} = T_0 + \Delta T$. Це, звичайно, не вигідно економічно, оскільки вимагає більшої загальної потужності індукторів. Візьмемо для порівняння такі параметри: $T_0 = 0$, $\Delta T = 40$, $T_1 = 1/3 * (T_{вих} - T_0) + T_0$. У цьому випадку третина від різниці теплової енергії холодного та гарячого потоків у теплообміннику передається холодному потоку. (у першому та у другому випадку приймалася максимальна передача - $1/2$ частина). Крива 3 для цього режиму вказує на значне зменшення значення температури $T_{вих}$.

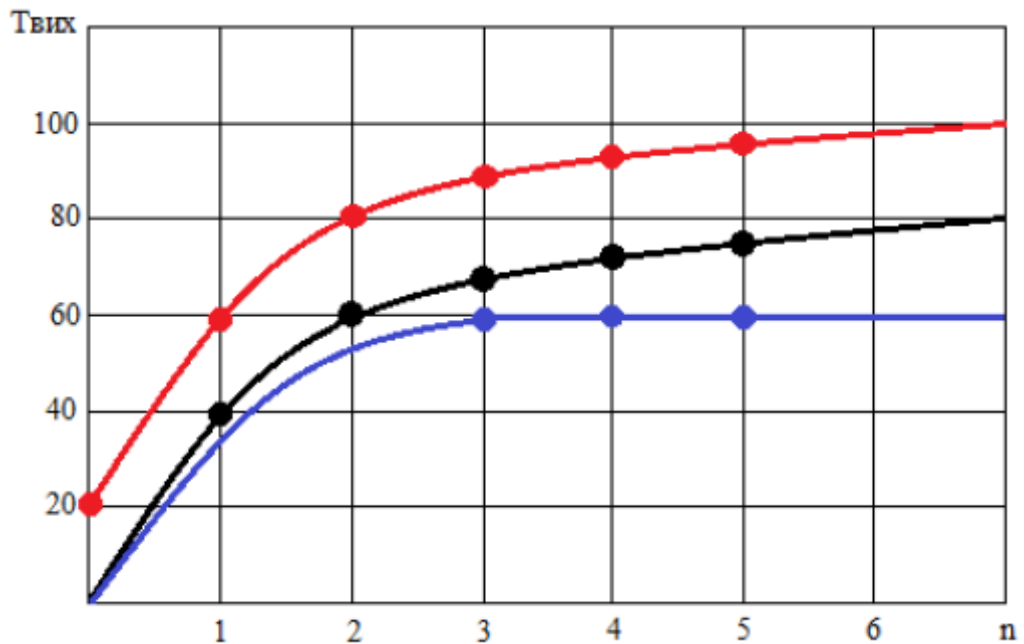


Рис.3.5.1 Збільшення температури молока у пусковому режимі

1 - $T_0 = 0$, $\Delta T = 40$, $T_1 = 1/2 * T_{\text{вих}}$; 2- $T_0 = 20$ градусів, $\Delta T = 40$, то $T_1 = 1/2 * (T_{\text{вих}} - T_0) + T_0$; 3- $T_0 = 0$, $\Delta T = 40$, $T_1 = 1/3 * (T_{\text{вих}} - T_0) + T_0$.

З отриманих графіків можна зробити такі висновки:

1. Вихід на режим індукційного нагрівача і вихідної температури молока відбувається за час близько 1 хвилини. Цей час необхідний для стабілізації температури молока на вході до першого індуктора після поступового попереднього підігріву в теплообміннику.

2. Значення температури $T_{\text{вих}}$, що встановилося, за умови фіксованого набору температури в індукторах ΔT істотно залежить від початкової температури T_0 молока в резервуарі-холодильнику та ефективності роботи теплообмінника, обумовленої його конструкцією, швидкістю потоку, різницею температур потоків і т.п. За наявності цих та інших зовнішніх збурень обмеження та стабілізація температури на виході з нагрівачів може грубо регулюватися краном перемикання гарячого потоку перед теплообмінником. Потім необхідно точніше встановити задане значення температури на блоці управління третього індуктора, що дорівнює температурі пастеризації.

РОЗДІЛ 4

ПРОЕКТУВАННЯ ПРОГРАМИ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ЛІНІЇ

4.1. Вибір мікроконтролера

Для проектування системи управління даним технологічним процесом доречно обрати контролер Siemens S7-314C. Siemens S7-314C є програмованим контролером (PLC) із сімейства Siemens SIMATIC S7-300. Він призначений для проектування та реалізації систем управління технологічними процесами у промисловості. S7-314C має наступні характеристики:

1. Контролер оснащений вбудованим процесором з високою продуктивністю, який забезпечує швидку обробку логіки управління та комунікацій.
2. Пам'ять: Пристрій має вбудовану оперативну пам'ять (RAM) для виконання програми керування та зберігання даних. Крім того, воно оснащено енергонезалежною флеш-пам'яттю для довгострокового зберігання програми та параметрів.
3. Введення-виведення (I/O): S7-314C підтримує різні модулі введення-виведення для підключення до зовнішніх датчиків, виконавчих механізмів, комунікаційних пристроїв та інших компонентів системи.
4. Комунікація: Контролер забезпечує підтримку різних промислових протоколів зв'язку, таких як Profibus, Profinet та Ethernet. Це дозволяє інтегрувати S7-314C в мережну інфраструктуру та взаємодіяти з іншими пристроями та системами.
5. Програмне забезпечення: Для програмування та конфігурування S7-314C використовується програмне забезпечення Step 7, яке надає інтуїтивно зрозумілий графічний інтерфейс для створення логіки керування та налаштування параметрів контролера.
6. Надійність та гнучкість: S7-314C відрізняється високою надійністю та стабільністю роботи. Він може бути легко розширений шляхом

підключення додаткових модулів вводу-виводу або комунікаційних модулів.

S7-314C є потужним інструментом для проектування та реалізації систем управління технологічними процесами у різних галузях промисловості, таких як виробництво, енергетика, автоматизація будівель та інші. Він дозволяє програмувати та контролювати різні операції та параметри процесів, забезпечуючи ефективність, надійність та безпеку роботи.

Step 7 - це програмне забезпечення, розроблене компанією Siemens, яке використовується для програмування та налаштування мікроконтролерів із сімейства SIMATIC S7. Ця програма широко застосовується в промисловості для автоматизації процесів та управління системами.

Step 7 забезпечує інструменти для створення програмного забезпечення для контролерів SIMATIC S7, які включають S7-300, S7-400, S7-1200 і S7-1500. Програма дозволяє розробникам створювати, налагоджувати та тестувати програми для автоматичного управління та моніторингу різних процесів у промислових системах. Step 7 є потужним інструментом для розробки програмного забезпечення для мікроконтролерів SIMATIC S7, що має широкі можливості для створення, налаштування, налагодження та управління системами автоматизації. Воно дозволяє інженерам та розробникам створювати надійні та ефективні системи автоматизації для різних промислових додатків. Step 7 дозволяє нам створювати логіку управління, налаштовувати входи/виходи, керувати приводами та комунікацією, а також розробляти візуалізацію та моніторинг системи. Ви також можете налагоджувати та тестувати програми, а потім завантажувати їх на контролер S7-314C для виконання в реальному часі.

4.2. Розробка блок-схеми алгоритму та програми

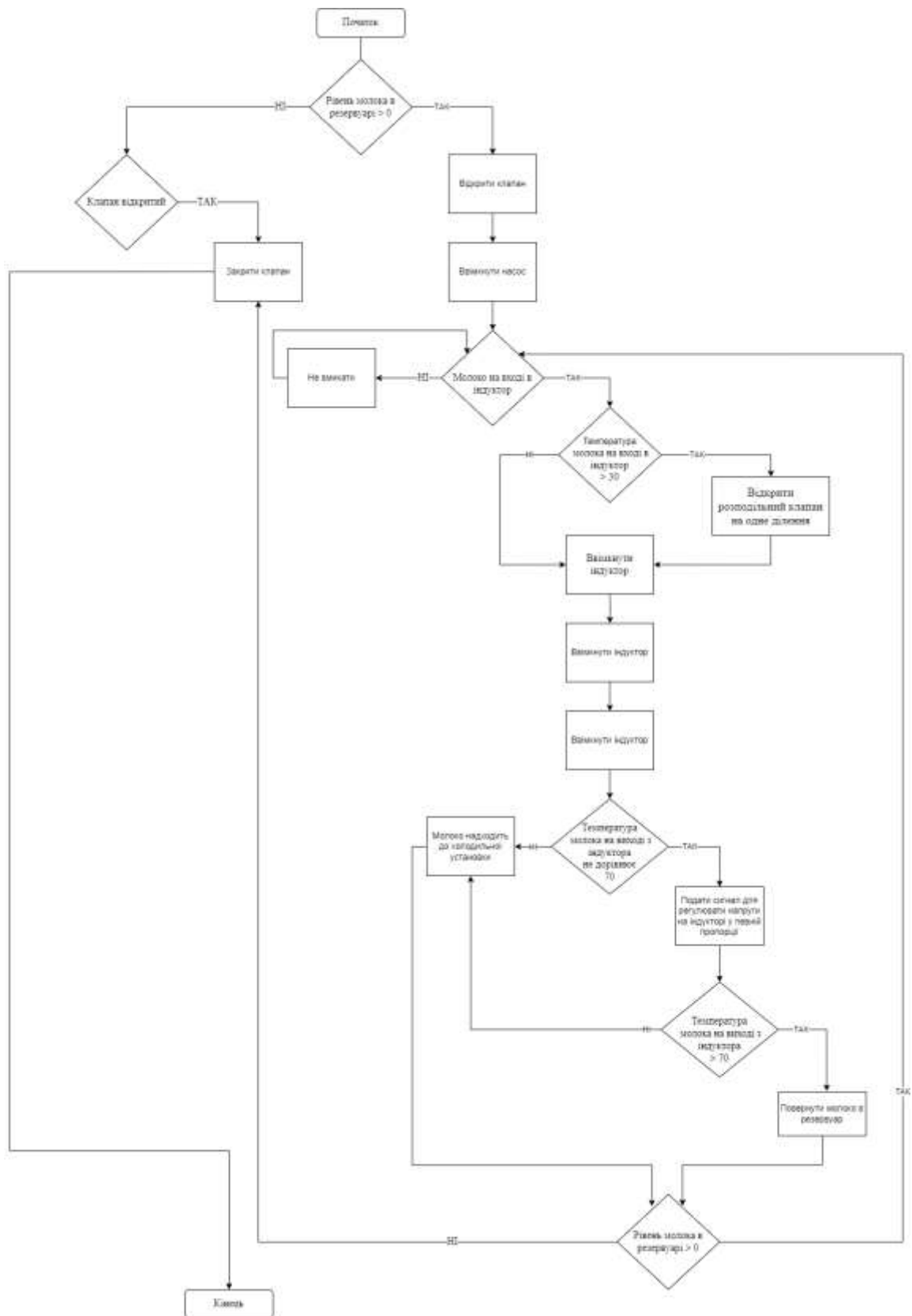


Рис.4.2.1 Блок-схема пастеризації

Приклад програми на мові SCL для контролера Siemens SIMATIC S7-300 для автоматизації процесу пастеризації.

PROGRAM Pasteurization

VAR

// О г о л о ш е н н я з м і н н и х

Temperature: REAL;

RawMilkTemperature: REAL;

Power: BOOL;

ReturnValve: BOOL;

// К о н с т а н т и

SET_TEMPERATURE: REAL := 70.0;

TARGET_TEMPERATURE: REAL := 40.0;

RETURN_TEMPERATURE: REAL := 30.0; HEAT_UP_TEMPERATURE_1: REAL := 20.0; HEAT_UP_TEMPERATURE_2: REAL := 12.0; HEAT_UP_TEMPERATURE_3: REAL := 8.0;

INDICATOR_DELAY: TIME := T#15S; RETURN_DELAY: TIME := T#5S;

END_VAR

// О с н о в н и й ц и к л п р о г р а м и CYCLIC

// З ч и т у в а н н я з н а ч е н ь д а т ч и к і в т а і н ш и х в
х о д і в Temperature := ReadTemperature();

// Ф у н к ц і я з ч и т у в а н н я п о т о ч н о ї т е м п е р а т
у р и RawMilkTemperature := ReadRawMilkTemperature();

// Ф у н к ц і я з ч и т у в а н н я т е м п е р а т у р и с и р у
м о л о к а

// К е р у в а н н я к л а п а н а м и т а н а с о с а м и

IF Temperature >= SET_TEMPERATURE THEN

Power := TRUE; // У в і м к н е н н я і н д у к т о р а

ReturnValve := FALSE; // З а к р и т т я к л а п а н а з в о р о
т н о г о п о т о к у

```

ELSE Power := FALSE; // Вимкнення індуктора
ReturnValve := TRUE; // Відкриття клапана зворотного потоку END_IF // Керування нагріванням
молочка IF RawMilkTemperature < TARGET_TEMPERATURE THEN
// Молоко потребує додаткового нагрівання
IF RawMilkTemperature < (TARGET_TEMPERATURE -
HEAT_UP_TEMPERATURE_1) THEN // Нагрів ступінь 1 Power :=
TRUE; // Увімкнення індуктора ELSIF RawM
// Нагрів ступінь 2 Power := TRUE; // Увімкнення інд
уктора ELSIF RawMilkTemperature < (TARGET_TEMPERATURE -
HEAT_UP_TEMPERATURE_3) THEN // Нагрів ступінь 3 Power :=
TRUE; // Увімкнення індуктора ELSE // Досягнуто
цільової температури Power := FALSE; // Вимкнення
індуктора SET_TEMPERATURE := 70.0; // Встановле
ння температури пастеризації END_IF // Керу
вання повернення молока IF
RawMilkTemperature >= SET_TEMPERATURE THEN // Молоко дося
гло температури пастеризації ReturnValve := TRUE;
// Відкриття клапана зворотного потоку
END_IF // Керування індикатором IF Temperature =
SET_TEMPERATURE THEN // Температура пастериза
ції досягнута // Здійснюємо стабілізацію пот
ужності індуктора протягом 15 секунд
DELAY(INDICATOR_DELAY); END_IF // Керування охолод
ження молока IF ReturnValve = TRUE THEN // Відправка
охолодженого молока до холодильної уст
ановки // Затримка перед знову почати пр

```

о ц е с у п а с т е р и з а ц і ї п р о т я г о м 5 с е к у н д

DELAY(RETURN_DELAY);

END_IF

ВИСНОВКИ

У ході дослідження провели аналіз технологічного процесу виробництва сухого молока для сиру. Було встановлено, що пастеризація молока є важливим етапом даного процесу, оскільки дозволяє знищити патогенні мікроорганізми та забезпечити безпеку продукту.

Було досліджено перевагу використання індукційного нагріву у процесі пастеризації молока. Індукційний нагрівач має високу ефективність, рівномірне нагрівання та мінімальні втрати енергії, що дозволяє досягти оптимальних умов пастеризації.

Було проведено конструкцію та параметризацію індукційного нагрівача. Вивчено його техніко-конструктивні характеристики, що дозволило визначити оптимальні параметри для ефективного функціонування установки.

Проведено моделювання роботи індукторів нагріву. Визначено параметри структурної схеми, розроблено систему стабілізації температури та здійснено гасіння коливань температури. Враховано транспортну затримку та зміну температури на виході з нагрівача в режимі запуску установки.

Проведено проектування програми автоматизації технологічної лінії пастеризації молока. Було обрано відповідний мікроконтролер і розроблено блок-схему алгоритму. Розроблено та реалізовано програму, що забезпечує ефективну автоматизацію процесу пастеризації молока.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Сміт, Д. (2019). Технології сухого молока. Київ: Видавництво "Молоко".
2. Джонсон, Б. (2020). Інноваційні методи виробництва сухого молока. Журнал молочної промисловості, 15(2), 25-37.
3. Робінсон, К. (2021). Оптимізація процесу сушіння молока. У Технології харчування: Прогрес і перспективи (с. 112-130). Львів: Видавництво "Харчова промисловість".
4. Світова організація здоров'я. (2022). Стандарти якості сухого молока. Доступно за адресою: <http://www.who.int/standards/dry-milk-quality>.
5. Россі, М. Сухе молоко: технологічні аспекти. Видавництво "Молочна промисловість", 2014.
6. Жукова, О. В. Вплив технологічних процесів на властивості сухого молока. - Харків: Видавництво "Молокознавство", 2023.
7. Гриньова, Т. С. Інноваційні підходи до виробництва сухого молока. - Київ: Видавництво "Молокопродукт", 2022.

8. Іваненко, О. В. Застосування індукційного нагріву в молочній промисловості. Науковий вісник Молочної галузі, т. 34, вип. 2, 2019, с. 45-59.
9. Ковальчук, Г. О. Оптимізація параметрів індукційного нагріву для виробництва сухого молока. Молочний бізнес, т. 8, вип. 1, 2022, с. 56-68.
10. Лук'яненко, Н. С. Використання індукційного нагріву в процесі сушіння молока: проблеми та перспективи. Науковий журнал "Технологія і управління харчовим виробництвом", т. 18, вип. 3, 2023, с. 89-105.