

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**Сумський державний університет**  
Факультет електроніки та інформаційних технологій  
Кафедра комп'ютеризованих систем управління

«До захисту допущено»  
Завідувач кафедри КСУ  
\_\_\_\_\_ Петро ЛЕОНТЬЄВ  
\_\_\_\_\_ 2023 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
на здобуття освітнього ступеня магістр

зі спеціальності 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології  
освітньо-професійної програми  
«Комп'ютеризовані системи управління та робототехніка»  
на тему: «Забезпечення режимів енергозбереження при керуванні промисловою  
копильною установкою»

Здобувача групи СУм.дн-21п

Лесенко Микита Ігорович

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень.  
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на  
відповідне джерело.

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Микита ЛЕСЕНКО

Керівник

доцент, к. т. н., Георгій КУЛІНЧЕНКО  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, ім'я ПРІЗВИЩЕ)

\_\_\_\_\_  
(підпис)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
Кафедра комп'ютеризованих систем управління

ЗАТВЕРДЖУЮ:  
Зав. кафедри КСУ  
\_\_\_\_\_ П.В. Леонт'єв  
\_\_\_\_\_ 2022 р.

**ЗАВДАННЯ**

на кваліфікаційну роботу магістра студенту

Лесенко Микита Ігорович

1. Тема кваліфікаційної роботи:      Забезпечення режимів енергозбереження при керуванні промисловою коптильною установкою.

затверджена наказом ректора СумДУ № \_\_\_\_\_ від " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2023 р.

2. Термін здачі студентом закінченої роботи: 15 грудня 2023 р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи: звіт з переддипломної практики, наукові публікації, технічна документація, перелік літературних джерел.

4. Зміст кваліфікаційної роботи (питання, що підлягають розробленню): огляд існуючих коптильних установок і способів копчення продукції, переваги та недоліки промислової коптильної установки, система автоматичного керування коптильною установкою, система автоматизованого керування коптильною установкою, апаратні засоби автоматизації коптильної установки.

5. Перелік графічних матеріалів: 20 рисунк, 13 схем.

## 6. Календарний план виконання роботи

Номер етапу	Зміст етапу виконання роботи	Термін виконання
1	Аналіз завдання. Огляд літератури.	07.11.2023 – 08.11.2023
2	Розгляд існуючих систем автоматичного управління та способів копчення продукції.	09.11.2023 – 15.11.2023
3	Створення контурів регулювання та їх математичних моделей.	16.11.2023 – 22.11.2023
4	Розрахунок регуляторів для системи регулювання параметрів копильні.	23.11.2023 – 26.11.2023
5	Розроблення схем автоматизації.	27.11.2023 – 28.11.2023
6	Оформлення дипломного проекту та супровідної документації	28.11.2023 – 15.11.2023

7. Дата видачі завдання " 07 " листопада 2023 р.

Керівник проекту:

Доцент, к. т. н.  
(науковий ступінь, вчене звання, посада)

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Георгій КУЛІНЧЕНКО  
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Здобувач:  
студент гр. СУм.дн-21п  
(шифр групи)

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Микита ЛЕСЕНКО  
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

## АНОТАЦІЯ

Лесенко Микита Ігорович. Забезпечення режимів енергозбереження при керуванні промисловою копильною установкою. Дипломна робота. Сумський державний університет. Суми, 2023 р.

Робота містить: 46 сторінок, 20 рисунків, 13 схем. При виконанні було використано 21 літературних джерел.

Об'єктом дослідження виступає автоматизована промислова копильна установка, предметом дослідження являється – забезпечення енергозбереження при керуванні промисловою копильною установкою, що дозволить економніше використовувати енергетичні ресурси.

Було розглянуто існуючі автоматизовані і звичайні копильні установки та обрано об'єкт автоматизації. Визначено контури керування та створено математичні моделі, для дослідження параметрів автоматичної системи. Розроблено систему регулювання відсотка вологості в камері копчення та температурою в камері копчення. На основі математичних моделей визначено та розраховано параметри PID регулятора.

Ключові слова: автоматизація, енергоспоживання, система керування, копчення, оптимізація.

## ABSTRACT

Mykyta Ihorovych Lesenko. Provision of energy saving modes when operating an industrial smoking plant. Graduate work. Sumy State University. Sumy, 2023  
The work contains: 46 pages, 20 figures, 13 diagrams. 21 literary sources were used in the performance.

The object of the study is an automated industrial smoking plant, the subject of the study is to ensure energy saving during the management of an industrial smoking plant, which will allow more economical use of energy resources.

The existing automated and conventional smoking plants were considered and the object of automation was selected. The control contours were determined and mathematical models were created to study the parameters of the automatic system. A system for regulating the percentage of humidity in the smoking chamber and the

temperature in the smoking chamber has been developed. On the basis of mathematical models, the parameters of the PID controller are defined and calculated.

Keywords: automation, energy consumption, control system, smoking, optimization.

## ЗМІСТ

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ І УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	7
ВСТУП.....	8
1. Види коптильних установок та способи приготування продукту .....	10
1.1 Гаряче копчення .....	11
1.2 Холодне копчення.....	11
1.3 Огляд і аналіз існуючих коптильних установок. ....	12
1.4. Теоретичний огляд процесу копчення.....	14
2. Визначення контурів регулювання та принципів автоматизації.....	16
2.1 Контур регулювання температури в камері копчення. ....	19
2.2 Контур регулювання вологи в камері копчення. ....	21
2.3 Контур регулювання подачі повітря в камеру копчення. ....	23
2.4 Основи енергозбереження та визначення параметрів, що впливають на енергоспоживання.....	24
2.5 Особливості регулювання температури та вологості.....	25
3. Автоматизація автоматичної коптильної установки. ....	27
3.1 Розробка САК.....	27
3.2 Контур регулювання температури в коптильній камері.....	28
3.2.1 Блок схема математичної моделі регулювання температури.....	29
3.2.2 Розрахунок математичної моделі контуру регулювання температури.....	30
3.3 Контур регулювання вологи в камері копчення. ....	34
3.3.1 Блок схема математичної моделі регулятора вологи. ....	35
3.3.2 Розрахунок математичної моделі контуру регулювання вологи .....	36
3.4 Розробка SCADA системи.....	40
4. Основні апаратні засоби автоматизації коптильної установки. ....	41
4.1 Siemens S7 - 1200.....	41
4.2 PT100 .....	42
4.3 SteamTech STІМ-30.....	43
Висновок.....	44
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	45

## **СПИСОК СКОРОЧЕНЬ І УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ**

ФСА – функціональна схема автоматизації

БЖ – блок живлення

СА – система автоматизації

КУ – коптильна установка

МК – мікроконтролер

ККД – коефіцієнт корисної дії

## ВСТУП

Копчення – це процес обробки продуктів сумішшю диму та повітря з метою щоб досягти бактеріального та антиокислювального ефектів. Під час цього процесу поверхня продукту отримує золотисто – коричневий колір, а сам продукт набуває специфічного приємного смаку і аромату копчення. З давніх часів і до сьогодні люди використовують копчення як спосіб консервації та зберігання продукту, в свою чергу продукт отримує особливий запах та чудовий смак. Якщо заглибитися в історію, то знайти точну дату коли було винайдено такий спосіб приготування продукту, неможливо, але точно відомо що цей процес не був випадковістю, і з тих часів процес копчення зазнав багато змін.

**Актуальність.** Промислова коптильна установка є важливим об'єктом харчових виробництва. В ній можна обробляти багато видів продукції таких як сир, риба, м'ясо та інші. Не зважаючи на традиційність цього процесу, копчення вимагає значних об'ємів енергії, особливо коли потрібно підтримувати задану температуру та вологість камери. Ключовим викликом для цієї галузі є питання збереження енергії та покращення енергоефективності. Багато експертів замагаються зменшенням споживання енергії, при максимальному збереженні якості та безпеки споживання кінцевого продукту.

**Проблема дослідження** полягає потребі в розробці системи автоматичного керування технологічним процесом копчення, яка дозволить мінімізувати витрати енергоресурсів та покращити якість продукції

**Мета дослідження** – розробка алгоритмів керування коптильною установкою, що реалізують режим енергозбереження з урахуванням технологічних вимог.

**Об'єкт дослідження** – процес копчення харчових продуктів в автоматизованій коптильній камері.

**Предмет дослідження** – автоматичне керування параметрами технологічного процесу копчення в промисловій коптильній установці..



**Наукова новизна** полягає в розробці математичної моделі та алгоритмів автоматичного керування з урахуванням критеріїв енергозбереження.

**Практичне значення** визначається можливістю впровадження результатів роботи на коптильних підприємствах.

## **1. Види коптильних установок та способи приготування продукту**

Головною особливістю копчення являється те, що продукт готується за допомогою диму. Ця особливість дозволяє розташовувати продукти на різній відстані від самого джерела диму, що дозволяє продукту готуватися при різній температурі. Через це існує декілька видів копчення: гаряче копчення, холодне копчення та вологе копчення.

Головною умовою копчення є дим. Для утворення диму застосовують деревину, яка не виділяє шкідливі речовини. В якості матеріалу використовують тиру, стружку або брикети. Для копчення краще всього підходить вільха або ялівець, також використовують тріску плодоносних видів дерев. Кожна порода деревини створює свій неповторний аромат що дозволяє один вид м'яса кожен раз готувати по новому. Перед використанням деревини обов'язково знімають кору, адже вона має смоли, які зіпсують продукт. Розмір та вид деревини підбирають індивідуально під кожен вид продукту.

## **1.1 Гаряче копчення**

Під час гарячого копчення обов'язково потрібна підвищена температура, оскільки камеру з продуктом та димогенератор поєднують. Один із найпростіших видів коптильні це звичайне відро або інша залізна ємність. На дно ємності засипають тріску, а залізну ємність поміщають над джерелом тепла, в нашому випадку це вогнище. Без доступу повітря тріска починає тліти і виділяти дим. Для правильного приготування продукту потрібно забезпечити герметичність ємності та необхідну температуру. [2]

Також потрібно під продуктом розмістити ємність для скапування жиру, адже при попаданні жиру на тріску, жир почне горіти та виділяти їдкий дим, який зіпсує кінцевий продукт.

Важливим етапом при гарячому копченні це не створювати занадто високу температуру всередині. Процес копчення ділиться на 2 етапи. В першому етапі потрібно підсушити продукт при температурі близькій до 90 градусів по Цельсію протягом 25% від всього часу виробництва. Після цього температуру піднімають до 120 градусів і тримають до кінця виготовлення. Продукт в середині камери повинен коптитися а не смажитися або варитися.

Температуру всередині вимірюють за допомогою спеціального термометра, в якості нагрівача можна використовувати будь який електричний нагрівач або ТЕН.

Для найпростішої системи нагріву також підходить звичайна електроплита із регулюванням потужності. Під час приготування методом гарячого копчення дозволяється відкривати ємність для перевірки готовності продукту.

## **1.2 Холодне копчення.**

Холодне копчення вимагає більше часу та підготовки для отримання кінцевого продукту. Перед приготуванням продукт потрібно добре просолити та підсушити, оскільки мокрий продукт потрібно набагато більше часу для приготування, оскільки для копчення використовують охолоджений дим. Смак продукту залежить від конструкції коптильного апарату, інтенсивності вироблення диму і вологості продукті та дерев'яної тріски.

Якщо порівнювати цей спосіб від гарячого копчення, то в холодному способі димогенератор і коптильня це окремі модулі, що дозволяє в камеру копчення подавати холодний дим.

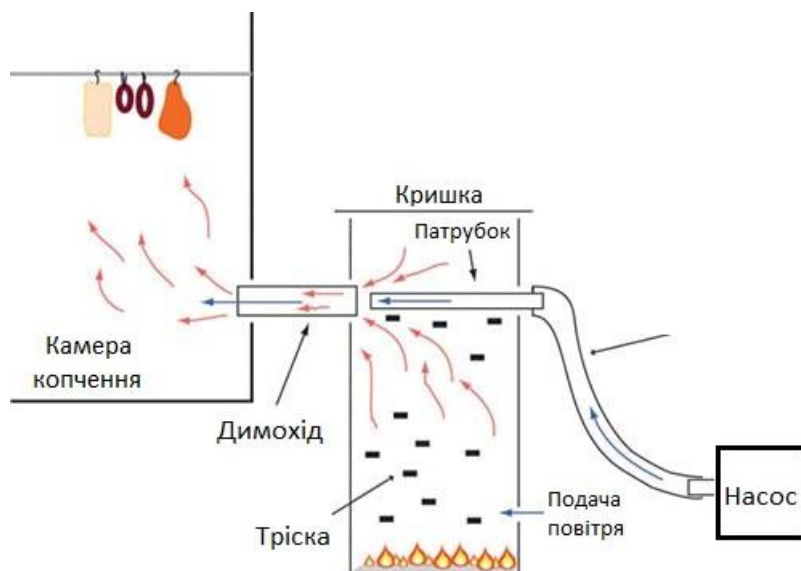


Рисунок 1 Схема коптильні холодного копчення

Для автоматизації процесу копчення, використовують електронагрівач для нагріву тріски та виділення диму, та датчик температури, який вимірює температуру в середині камери копчення. Коли температура в камері з тріскою досягне 35 градусів, можна починати процес копчення. Зрідка потрібно підкладати деревину, щоб підтримувати процес виділення диму. Дим охолоджується шляхом збільшення довжини шлангу, відповідно чим більше довжина тим менше температура в камері копчення.

Також для максимального спрощення коптильні викопують яму в якій розводять багаття, та викопують траншею через яку подається дим природною тягою до камери копчення

. Для того щоб отримати готовий продукт потрібно коптити близько 2-3 днів, в залежності від виду продукту та розміру.

### 1.3 Огляд і аналіз існуючих коптильних установок.

Промислові коптильні установки являють собою автоматизовану систему яка здатна підтримувати задані параметри копчення, що в свою чергу дозволить підвищити продуктивність та якість кінцевого продукту. В наш час такі промислові коптильні установки відіграють важливу роль в харчовій

промисловості. Вони не тільки спрощують виробництво копченостей, але й дозволяють підприємствам або ж ресторанам досягти високої якості та ефективності при використанні мінімальної кількості ресурсів та часу.

Важливість таких установок полягає в точному контролі параметрів копчення, таких як вологість, температура, концентрація диму та інші. Ці всі параметри надзвичайно важливі оскільки їх зміна впливає на якість та смакові характеристики продукту.



Рисунок 2 Промислова коптильна установка

Другий важливий аспект у використанні автоматизованої коптильної установки – це підвищення продуктивності та ефективності виробництва. Ці системи дозволяють навіть маленькому виробництву значно підвищити продуктивність, при цьому майже не збільшуючи кількість працівників.

Також однією із переваг являється безпека працівників. Коптильна установка є зоною підвищеної небезпеки, оскільки людям доводиться працювати з великими температурами, хімікатами та небезпечними випаровуванням. Коптильна установка мінімізує вплив людини на процес копчення, що в свою чергу дозволяє людині мінімально контактувати з процесом і зменшити ризики при виробництві.

Автоматизована коптильна установка з правильно підібраними регуляторами дозволяє максимально ефективно та економно споживати енергію, воду та паливо. Це дозволить максимально швидко окупити установку, та зробити собівартість продукту значно меншою та конкурентоспроможною.

Копчені продукти підлягають суворим стандартам та регулюванням якості та безпеки, автоматизовані системи дозволять моніторити та фіксувати кожен процес, що дозволить легше та прозоріше вести облік та бути впевненим що продукт відповідає всім параметрам якості.[19]

Всі ці аспекти роблять автоматизовані коптильні установки невід'ємною частиною промисловості. Доступність цих систем дозволяє установлювати їх навіть на невеликих підприємствах та ресторанах, що дозволяє забезпечити споживача свіжим та якісним продуктом.

#### **1.4. Теоретичний огляд процесу копчення.**

Процес копчення можна розглядати як процес динамічної адсорбції компонентів, які знаходяться в диму, на поверхню продукту, із подальшим проникненням в масу самого продукту. Цей процес відбувається самостійно, але займає багато часу та енергії. Тривалість цього процесу змусила використовувати коптильні агрегати, в яких протікає весь процес копчення продукту. Для цього було створено системи автоматичного управління, які регулюють температуру, вологість всередині камери та тривалість обробки продукту на кожному етапі цього процесу. [15]

Якість вихідного продукту залежить від багатьох параметрів:

1. Попередня підготовка продукту (соління, очищення, сушіння тощо);
2. Температура копчення;
3. Режими зміни вологи в камері;
4. Режими управління засувкою рециркуляції.

Повний процес копчення складається з декількох етапів. Спочатку утримують температуру 19-20 градусів з включеною витяжкою, для того щоб

видалити зайву вологу з продукту. Дим не подається, а тривалість першого етапу від 0,5 до 2 годин.

Далі температуру підвищують на декілька градусів та вимикають витяжку. Засувка рециркуляції закривається на 20%. В третьому етапі температуру піднімають ще на декілька градусів, а засувку рециркуляції закривають. Далі подають дим та вмикають витяжний вентилятор на час від 0,5 до 1 години, для видалення вологи. Після проходження всіх етапів димогенератор та інші механізми вимикаються. Продовж всіх етапів температура, час та вологість може змінюватись в залежності від продукту, який буде оброблюватись.[10]

## 2. Визначення контурів регулювання та принципів автоматизації.

Автоматизація технологічних процесів у харчовій промисловості, зокрема на виробництві копченої продукції, є вкрай важливою для забезпечення стабільної якості та безпеки харчових продуктів, підвищення ефективності та конкурентоспроможності підприємств.

Головна задача автоматизованої коптильної установки – це підтримання заданих параметрів копчення для окремого виду продукту, який знаходиться всередині камери для копчення. Задані умови створюються за допомогою даних з датчиків, які моніторять ситуацію в камері копчення. САК коптильної установки допомагає контролювати всі важливі параметри в нормі, що дозволить прискорити процес копчення, з мінімальним використанням ресурсів без втрати якості готового продукту.

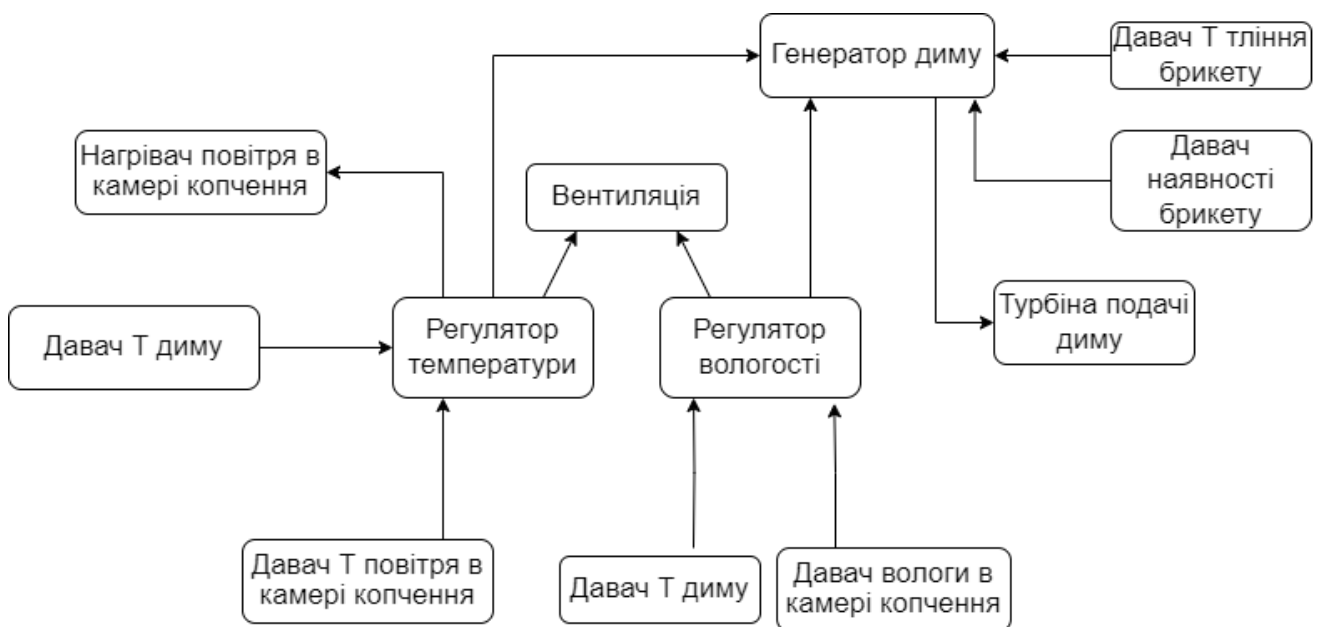


Рисунок 3 Блок-схема автоматизації коптильної установки

Основні параметри які потрібно контролювати:

Волога – копчення відбувається в закритому просторі, тому цей параметр є максимально важливий, оскільки замала вологість пересушить продукт, а завищені значення можуть негативно вплинути на смакові якості продукту.

Тепло – також важливий параметр, оскільки навіть невеликі зміни температури в будь яку сторону будуть негативно відобразитися на саму



продукту та часу, який потрібен на копчення, а це в свою чергу тягне за собою підвищене використання ресурсів.

Генерація диму. Дим являється основним параметром, який надає продукція неповторний смак та аромат, тому потрібно точно моніторити його подачу до камери та його концентрацію та склад.

Система автоматичного керування коптильною установкою повинна забезпечувати точне регулювання та підтримку заданих технологічних параметрів: температури, відносної вологості, тиску, витрати теплоносія та інших параметрів згідно технології копчення на всіх етапах процесу.:

1. Простота використання: коптильна установка повинна бути скомпонована та запрограмована таким чином, щоб людина могла з легкістю її обслужити, маючи поверхневі знання про процеси які відбуваються всередині коптильної камери.
2. Можливість зміни режиму: коптильна установка повинна мати гнучкі параметри налаштування, щоб вміти налаштуватися для копчення всіх можливих продуктів різного походження.
3. Точність регулювання: від того наскільки точно будуть регулюватися задані параметри залежить наскільки якісним буде виходити продукт, тому регулятори повинні бути налаштовані ідеально для більш економного та швидкого виробництва.
4. Зменшення енергозатрат: використання точних давачів, новітнього обладнання та використання альтернативних джерел енергії дозволить зменшити собівартість продукту та терміни окупності коптильної

Управління параметрами температури і вологі здійснюється системою управління.

Для автоматизованої коптильної установки основними контурами регулювання є:

- Контур регулювання температури всередині камери для копчення. Вимірюється температура за допомогою датчиків температури, порівнюється з заданим значенням. За відхиленням формується керуючий

сигнал для регулюючого клапана подачі палива в пальник або для електронагрівачів.

- Контур регулювання вологості. Вимірюється вологість за допомогою датчиків, порівнюється із заданим рівнем. Сигнал керування подається на електроприводи заслінок витяжної вентиляції.
- Контур регулювання витрати повітря, що подається в камеру. За допомогою вимірювача витрати і регулюючих заслінок контролюється витрата повітря на потрібному рівні та дозується подача диму в камеру копчення.

## 2.1 Контур регулювання температури в камері копчення.

Контур регулювання температури в автоматизованій коптильній установці забезпечує точне підтримання заданої температури повітря всередині камери для копчення. Він складається з датчика температури, який безперервно вимірює поточне значення температури в камері. Цей сигнал надходить до контролера, де порівнюється із заданим значенням, так званою уставкою.

У разі відхилення температури від уставки, ПІД-регулятор, інтегрований в контролер, обчислює керуючий сигнал, необхідний для коригування температури. Цей сигнал направляє на регулюючий клапан подачі газу або палива до пальника чи електронагрівачів.



Рисунок 4 Блок - схема регулювання температури

Клапан змінює витрату теплоносія до нагрівачів так, щоб вироблялася потрібна кількість тепла для підтримання уставки температури. Отриманий ефект перевіряється датчиком - замикається контуром зворотного зв'язку. Таким чином реалізується точне регулювання температури за принципом ПД-регулятора без відхилень від заданого режиму копчення.

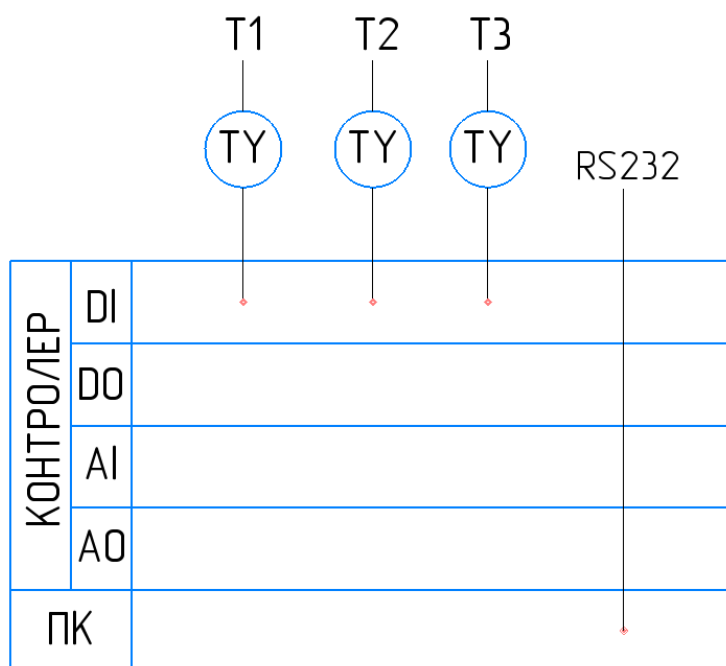


Рисунок 5 Контур контролю температури в камері копчення

## 2.2 Контур регулювання вологи в камері копчення.

Контур регулювання вологості в коптильній установці призначений для автоматичного підтримання заданого рівня відносної вологості повітря в камері копчення. Він складається з датчика вологості, який безперервно вимірює фактичне значення вологості повітря. Цей сигнал надходить в контролер, де порівнюється з заданим значенням, встановленим оператором як уставка.

При відхиленнях фактичного значення вологості від уставки, ПД-регулятор формує керуючий сигнал для електроприводу заслінок витяжної вентиляції. Заслінки регулюють витрату вологого повітря, що видаляється з камери так, щоб компенсувати це відхилення і підтримати задану вологість.



Рисунок 6 Блок - схема регулювання вологи

Сигнал поточного значення з датча замикає контур зворотного зв'язку. Таким чином реалізується стабілізація вологості на потрібному рівні автоматичним регулюванням витяжки.

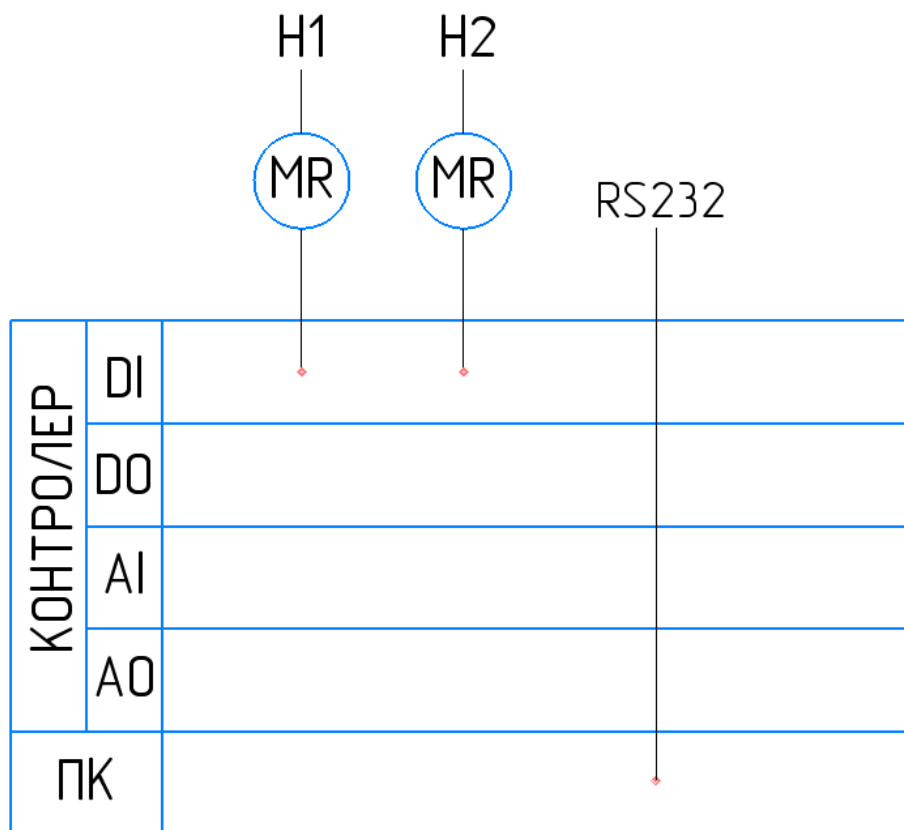


Рисунок 7 Контроль вологості повітря в копильній камері

### 2.3 Контур регулювання подачі повітря в камеру копчення.

Контур регулювання витрати повітря в коптильній установці призначений для автоматичного підтримання заданої витрати повітря, що подається в камеру копчення разом з димом. Він складається з:

1. Датчика витрати повітря (наприклад, діафрагми або тахометричного датчика). Датчик вимірює поточне значення витрати і видає сигнал в контролер.
2. Контролер з ПІД-регулятором, який порівнює сигнал з датчика з заданим значенням витрати (уставкою).
3. За відхилення фактичної витрати повітря від уставки контролер формує керуючий сигнал, який надходить в електропривод регулюючої заслінки на вході в камеру копчення.
4. Електропривод змінює положення заслінки, регулюючи приплив повітря в камеру так, щоб відновити задану витрату.
5. Сигнал з датчика витрати замикає контур зворотного зв'язку та дозволяє точно стабілізувати цей параметр на заданому рівні.

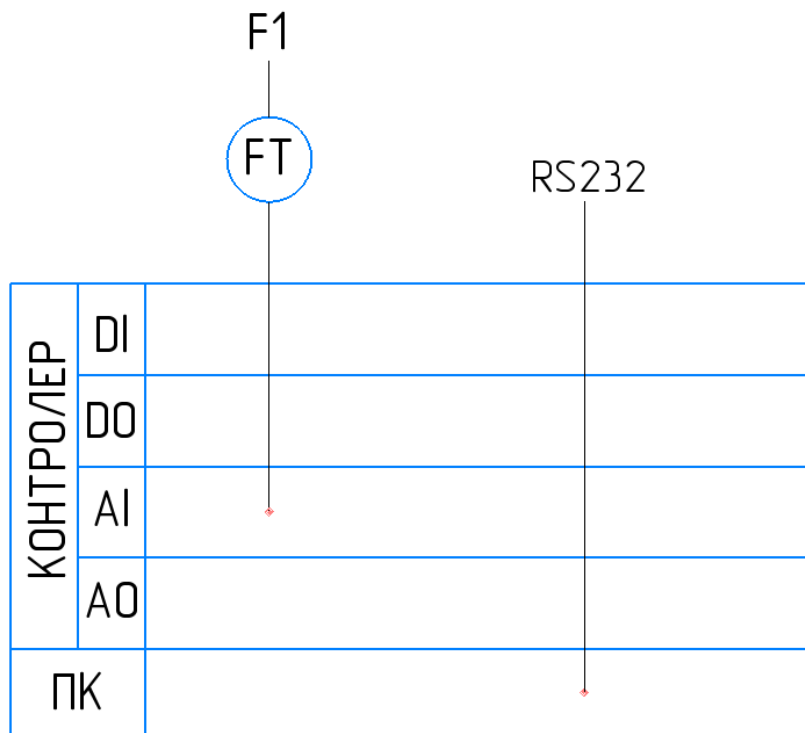


Рисунок 8 Контроль подачі повітря в камеру копчення

## **2.4 Основи енергозбереження та визначення параметрів, що впливають на енергоспоживання.**

В наш час при веденні бізнесу або великого виробництва, основні вимоги до продукту це собівартість. Чим менше собівартість готового продукту тим швидше себе окупить обладнання, і продукт може бути більш конкурентоспроможним в порівнянні з виробниками – конкурентами. Основою для зменшення собівартості є економія природних ресурсів та електрики, що в наш час коштує не дешево та прямим чином впливає на екологію та ефективність виробництва.

Першим кроком до ефективного споживання ресурсів – це проведення аудиту енергоспоживання. Він включає в себе аналіз всіх процесів та обладнання, яке може використовувати енергію. Він допомагає визначити джерела використання енергії і провести пошук можливостей для покращення.

Використання новітнього обладнання дозволить значно знизити споживання енергії. Важливим етапом є вибір обладнання яке матиме максимальний ККД. Оскільки новітнє обладнання використовує правильно налаштовані регулятори, які в свою чергу максимально ефективно використовують наявні ресурси.

При використанні коптильних установок обов'язковим критерієм є використання сучасних матеріалів для ізоляції та утеплення. Оскільки збереження тепла дозволить значно зменшити використання енергії для нагріву ємностей.



Гарним прикладом якісного і відносно не дорогого матеріалу для утеплення є високотемпературний матеріал із керамічного волокна. Він має мінімальну теплопровідність і теплоємність, що дозволяє краще зберігати температуру в середині камери копчення. Керамічне волокно має гарну механічну міцність та стабільність при високих температурах. З таким матеріалом легко працювати а різноманітність товщин дозволить використовувати в багатьох сферах.



Рисунок 9 Керамічне  
волокно

Також значно знизити витрати дозволить установка Led модулів освітлення та сонячних панелей, які знизять витрати електроенергії.

Для досягнення максимальної вигоди потрібно використовувати новітні системи моніторингу та надійних та точних датчиків. Це дозволить в реальному часі спостерігати за зміною параметрів та підтримувати гідний рівень якості продукції з мінімальним енергоспоживанням.

## **2.5 Особливості регулювання температури та вологості.**

Одними із найважливіших параметрів які потрібно точно регулювати – це волога та температура. Ці два параметри є пов'язані між собою, оскільки зміна одного параметру впливає на зміну іншого. Для вирішення цієї проблеми використовують спеціальні регулятори які компенсують зміну одного

параметра, зміною іншого. При такому способі регулювання виникають коливання в процесі регулювання, що може викликати нестабільну роботу контуру регулювання вологи або температури. Для стабілізації роботи регулювання використовують пріоритетне регулювання. Спочатку піднімають температуру до заданого параметру, а вже потім підвищують або зменшують вологість у камері копчення. Також, для більш точного регулювання створюють спеціальні приміщення, в яких параметри вологи та температури повітря доводять до значень близьких, які повинні бути в камері, потім це повітря попадає в основну камеру, де параметри уже доводять до ідеалу.

Для більш точного регулювання зазвичай використовують декілька датчиків, які розміщують в різних частинах коптильної камери. На основі даних з цих датчиків вираховують середнє значення та відповідно через мікроконтролер відправляють управляючий сигнал на виконавчий механізм.

### 3. Автоматизація автоматичної коптильної установки.

#### 3.1 Розробка САК

Для точного регулювання всіх параметрів потрібно створити автоматизовану систему управління промисловою коптильною установкою.

Під час роботи САК утворюються збурення, спричинені зовнішнім впливом. Через це утворюється відхилення температури або вологи від значень, які задані в контролері. Головна задача САК це зменшення або взагалі усунення таких відхилень від заданих значень.

Керування відбувається за допомогою регуляторів, які можуть бути описані в диференціальному рівнянні.

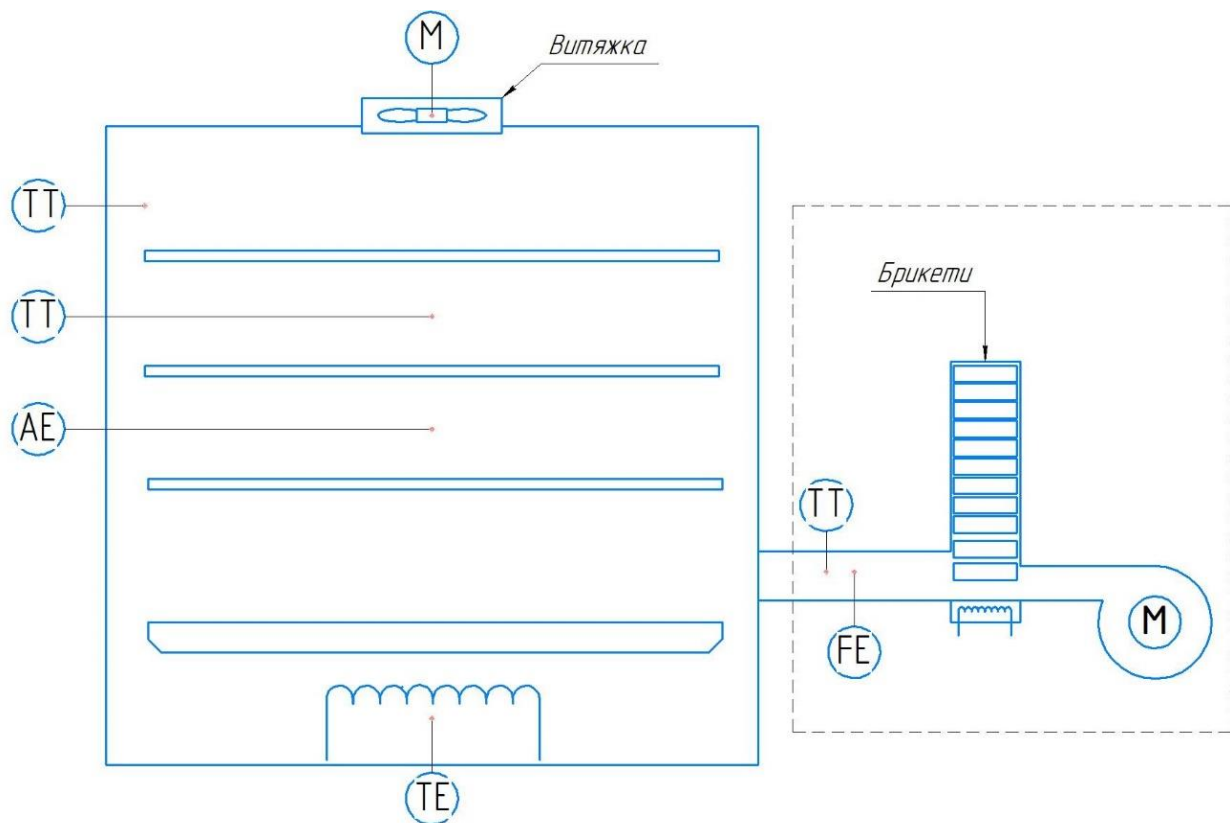


Рисунок 10 ФСА Коптильні

### 3.2 Контур регулювання температури в коптильній камері.

Для автоматичного регулювання температури в промисловій коптильній установці необхідно реалізувати комплексну багаторівневу систему контролю з використанням різних технічних засобів автоматизації.

Перш за все, в ключових точках технологічного процесу встановлюють датчики температури - термопари або терморезистори. Вони вимірюють поточну температуру всередині робочої камери, в зоні генерації та подачі диму, на вході та виході теплоносія. Датчики мають швидкодію, високу точність, надійність та хімістійкість.

Отримана аналогова інформація про температуру надходить в блок отримання та обробки даних на основі програмованого логічного контролера (ПЛК). Він перетворює сигнали в цифрові значення, відображає поточні показники на дисплеї в контрольній кімнаті, архівує графіки температурних трендів.

Головне завдання контролера - аналіз значень та порівняння з заданими в програмі уставками оптимальної температури для конкретної фази процесу. При розбіжностях контролер генерує керуючий вплив у вигляді стандартного уніфікованого сигналу 4-20 мА або цифрового сигналу.

Цей сигнал надходить на виконавчі механізми – регулюючі клапани, які можуть змінити витрату теплоносія в камеру копчення, або рециркуляційні засувки димових газів. Так можна коригувати температуру в необхідних межах автоматично за принципом зворотного зв'язку без участі людини.

Для повноти картини також використовують додаткові давачі положення засувки, рівня рідини в гідросистемі, тиску пари чи газу. Їх сигнали допомагають краще настроїти регулятори ПІД-типу в контролері та уникнути перерегулювань.

Отже, автоматичне регулювання температурного режиму в коптильній установці потребує комплексу технічних засобів, їх системної інтеграції між собою та з програмним забезпеченням контролера для досягнення найкращих результатів.

### 3.2.1 Блок схема математичної моделі регулювання температури

Розглянемо блок схему математичної моделі регулювання температури в камері копчення.

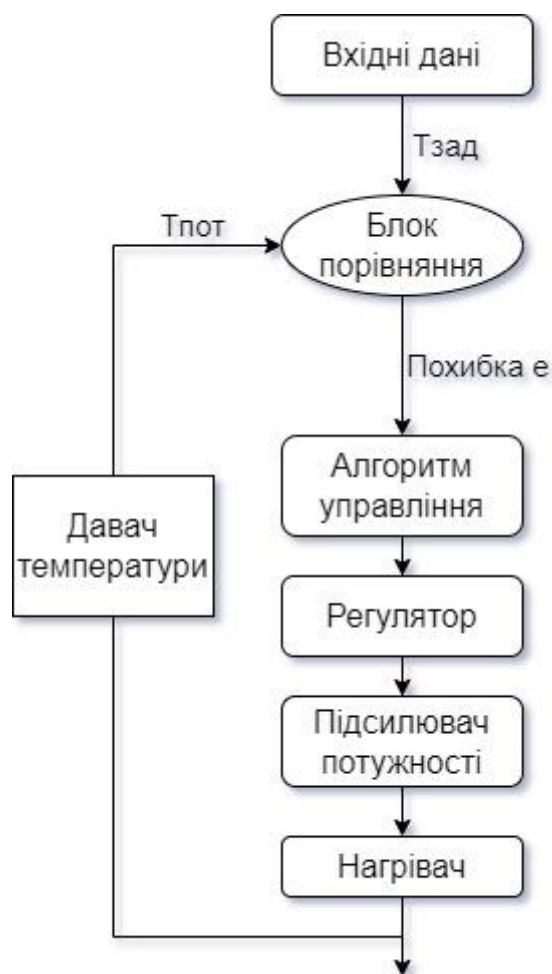


Рисунок 11 Блок схема математичної моделі регулятора температури

Блок "Вхідні дані" - тут заводяться два вхідні параметри:

- Тзад - це задане значення температури, яку необхідно підтримувати в камері для якісного копчення.
- Тпот - поточне значення температури повітря, що вимірюється датчиком всередині камери.

Блок "Порівняння" - тут відбувається порівняння заданої Тзад та поточної Тпот температур і визначається похибка регулювання е.

Сигнал похибки е проходить через алгоритм управління та після підрахунків йде на блок "Регулятор", де за певним алгоритмом формується керуючий сигнал, який буде поданий на виконавчий механізм через підсилювач потужності.

Виконавчий механізм - це нагрівальний елемент (ТЕН, газова горілка тощо), за допомогою якого нагрівається повітря в копильній камері.

Реалізовано зворотній зв'язок за допомогою сигналу з датчика. Тпот постійно надходить на регулятор. Це дозволяє автоматично коригувати параметри нагрівання повітря в разі відхилення температури.

Така система дозволяє автоматично та ефективно підтримувати задану температуру повітря в коптильній камері, що є критично важливим параметром якісного процесу копчення.

### 3.2.2 Розрахунок математичної моделі контуру регулювання температури.

Математична модель системи автоматичного регулювання температури в коптильній установці може бути представлена у вигляді наступних рівнянь.

Рівняння теплового балансу камери копчення:

$$Q_{вх} + Q_{г} - Q_{ст} = C * dT/dt$$

де  $Q_{вх}$  - тепловий потік від теплоносія, Вт;

$Q_{г}$  - теплота від горіння палива в генераторі, Вт;

$Q_{ст}$  - тепловтрати в навколишнє середовище, Вт;

$C$  - теплоємність камери, Дж/°С;

$T$  - поточна температура, °С.

Знайдемо теплоємність камери копчення. Щоб знайти теплоємність камери копчення, скористаємось наступним підходом:

1. Визначимо матеріал стінок камери та їх товщину. Припустимо, камера виконана з листової нержавіючої сталі товщиною 5 мм.
2. Розрахуємо загальний внутрішній об'єм камери  $V$ . Нехай вона має форму паралелепіпеда з розмірами 2х2х3 м, тоді:

$$V = 2 \cdot 2 \cdot 3 = 12 \text{ м}^3.$$

3. Знайдемо питому теплоємність матеріалу камери  $c_3$  - для нержавійки вона становить приблизно 500 Дж/(кг\*°С).
4. Визначимо масу стінок камери. Об'єм сталі розрахуємо як добуток площі поверхні на товщину:

$$S = 2 \cdot (23 + 22 + 32) = 34 \text{ м}^2 \text{ Vcm} = 340,005 = 0,17 \text{ м}^3$$

При щільності сталі  $7800 \text{ кг/м}^3$ , маса становитиме:  $m = 0,17 \cdot 7800 = 1350$   
кг

5. Тепер знайдемо теплоємність сталеві камери:

$$C = c_{st}m = 5001350 = 675\,000 \text{ Дж/}^\circ\text{C}$$

Отже, теплоємність розрахованої камери копчення дорівнює  $675 \text{ кДж}$  на градус Цельсія. Це значення потрібно використати в рівняннях математичної моделі системи терморегулювання.

Проведемо розрахунок рівняння теплового балансу для нашої камери копчення. Вихідні дані:

Розміри камери:  $2 \times 2 \times 3 \text{ м}$

Матеріал: нержавіюча сталь

Товщина стінки:  $0,005 \text{ м}$

Теплоємність  $C$ :  $675\,000 \text{ Дж/}^\circ\text{C}$  (вже розраховано раніше)

Додатково приймемо:

Тепловий потік від теплоносія  $Q_{вх} = 50 \text{ кВт}$

Теплота від горіння газу в генераторі  $Q_{г} = 80 \text{ кВт}$

Коефіцієнт теплових втрат  $k = 0,8 \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$

Поточна  $T$  і початкова  $T_0$  температури всередині камери  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  і  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  відповідно

Запишемо рівняння теплового балансу:

$$Q_{вх} + Q_{г} - Q_{ст} = C \cdot (T - T_0) / (t_2 - t_1)$$

де  $t_1$  і  $t_2$  - початковий і кінцевий моменти часу.

Підставляємо значення, приймаючи  $\Delta t = t_2 - t_1 = 1 \text{ хв} = 60 \text{ с}$ :

$$50\,000 + 80\,000 - kS(T - T_0) = 675\,000 (20 - 10) / 60$$
$$Q_{ст} = 0,834 \cdot (20 - 10) = 272 \text{ Вт}$$

Остаточно:  $50\,000 + 80\,000 - 272 = 675\,000 * 10/60\ 130\,000 = 112\,500$   
Рівняння теплового балансу верифіковано. Можна використовувати в моделі системи автоматичного регулювання температури коптильної камери.

Розрахуємо передатну функцію об'єкта регулювання - камери копчення.

Прийmemo наступні допущення:

- коефіцієнт підсилення об'єкта  $k = 1$ ;
- постійна часу нагріву камери  $T_0 = 15$  хвилин = 900 секунд

Запишемо передатну функцію об'єкта в канонічному вигляді:

$$W(p) = k / (T_0 * p + 1)$$

де  $p$  - оператор диференціювання за Лапласом.

Підставляємо числові значення:

$$W(p) = \frac{1}{(900 * p + 1)}$$

Отже, передатна функція камери копчення як об'єкта регулювання має вигляд:

$$W(p) = \frac{1}{(900 * p + 1)}$$

Цю модель можна використати при розрахунку налаштувань регулятора в системі автоматичного підтримання температури.



В пакеті моделювання Matlab Simulink модулюємо контур регулювання температури.

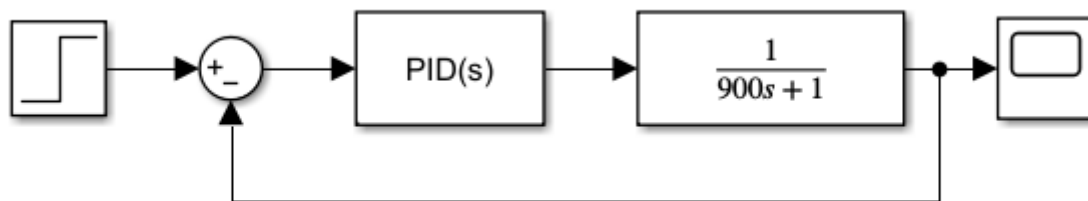


Рисунок 12 Контур регулювання температури

Після налаштування ПІД – регулятора на мінімальний перехідний процес графік має наступний вигляд:

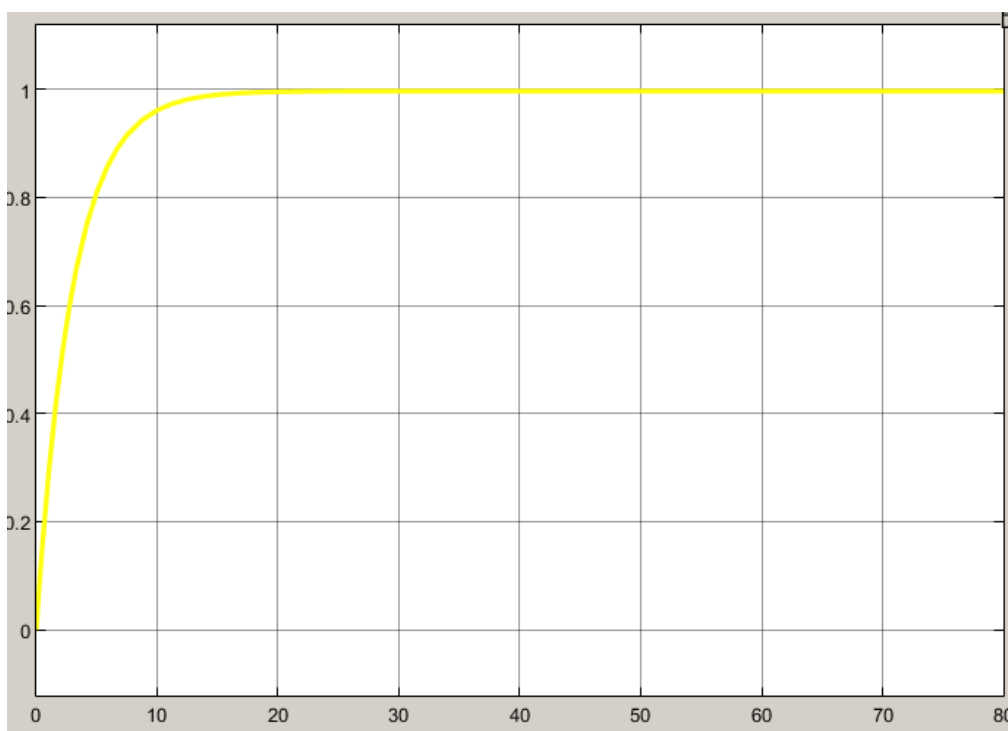


Рисунок 13 Перехідний процес регулятора температури

### **3.3 Контур регулювання вологи в камері копчення.**

Для автоматичного керування рівнем вологості повітря в камері промислової коптильної установки використовується система з вимірювальних датчиків, керуючого контролера та виконавчих механізмів.

В процесі копчення дуже важливо підтримувати певний вміст вологи в робочому середовищі камери. Занадто сухе повітря призведе до висихання поверхні та псування смаку продуктів. В той же час надлишкова вологість погіршить коптильний ефект та уповільнить утворення скоринки.

Для контролю рівня відносної вологості в камеру встановлюють сенсори на основі ємнісних або резистивних елементів. Вони чутливі до наявності водяної пари та з високою точністю вимірюють поточні параметри.

Сигнали датчиків надходять в електронний блок керування, яким найчастіше виступає програмований логічний контролер або спеціалізований мікроконтролерний модуль. Він відповідає за обробку інформації, порівняння її з заданим оптимальним діапазоном вологості, формування керуючих впливів.

У разі перевищення бажаних меж контролер подає сигнали на виконавчі пристрої - парогенератор або туманоутворювачі для підвищення рівня вологості. При пересушуванні середовища спрацьовують вентилятори обдуву та циркуляційні заслінки.

Завдяки безперервному зворотному зв'язку система автоматично підтримує необхідний рівень вологості протягом усього циклу роботи коптильні для отримання якісної продукції.

### 3.3.1 Блок схема математичної моделі регулятора вологи.

Розглянемо блок схему математичної моделі регулятора вологи в камері копчення.

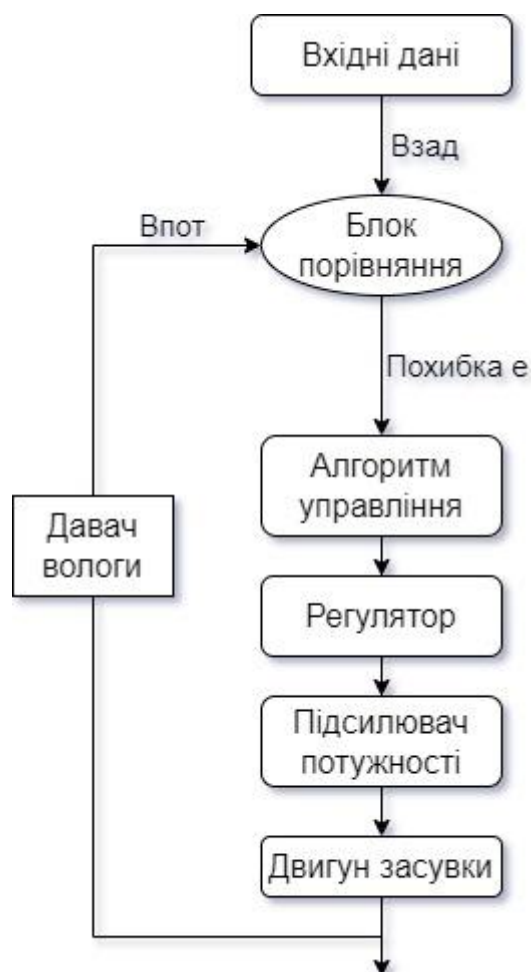


Рисунок 14 Блок схема математичної моделі регулювання вологи в камері копчення

Блок задавача вологості (Взад) дозволяє оператору встановлювати необхідну відносну вологість повітря в камері від 30% до 98% з кроком 1% залежно від рецептури та виду копченої продукції.

Цифровий датчик вологості з ємнісним сенсором (Впот), має наступні технічні характеристики: діапазон вимірювань 30-98% RH; похибка  $\pm 3\%$ ; час відгуку 1 хвилина; вихідний цифровий сигнал RS-485.

Блок мікропроцесорного порівняння виміряного і заданого значення вологості відбувається із періодом 3 секунди. В разі перевищення похибки регулювання значення  $\pm 5\%$  формується дискретний сигнал для регулятора. Регулятор на базі ПЛК із ПІД-алгоритмом формує аналоговий сигнал 4-20 мА

для керування продуктивністю виконавчого механізму – двигуна заслінки вентиляції. Замикається контур зворотного зв'язку для компенсації зовнішніх дестабілізуючих факторів.

Така система забезпечує надійне автоматичне підтримання вологості на заданому рівні за будь-яких умов експлуатації в межах технічних характеристик вузлів системи.

### 3.3.2 Розрахунок математичної моделі контуру регулювання вологи

Розробимо математичну модель регулятора для системи контролю вологості в камері копчення.

Позначимо:

- $H(t)$  - вологість повітря в камері в момент часу  $t$ , відносно одиниці
- $E(t)$  - потужність нагрівального елемента в момент часу  $t$ , Вт
- $F(t)$  - витрата пари, що подається в камеру в момент часу  $t$ , кг/с
- $\tau$  - стала часу камери, с

Рівняння балансу вологості:

$$\tau * dH(t)/dt = -H(t) + k1 * E(t) + k2 * F(t)$$

де  $k1$  і  $k2$  - коефіцієнти пропорційності.

Функція керування (ПД-регулятор):

$$E(t) = E0 + kp * (H0 - H(t)) + ki * \int (H0 - H(t))dt + kd * dH(t)/dt$$

де  $E0$  - базова потужність нагріву;  $H0$  - задана вологість;

$kp$ ,  $ki$ ,  $kd$  - коефіцієнти регулятора.

Розв'яжемо рівняння балансу вологості:

$$\tau * dH(t)/dt = -H(t) + k1E(t) + k2F(t)$$

Припустимо, конкретні значення параметрів такі:

$$\tau = 100 \text{ с}$$

$$k_1 = 0.05 \text{ (одиниця вологості)/(Вт)}$$

$$k_2 = 0.2 \text{ (одиниця вологості)/(кг/с)}$$

$$E(t) = \text{const} = 100 \text{ Вт}$$

$$F(t) = \text{const} = 0.01 \text{ кг/с}$$

Тоді рівняння набуває вигляду:  $100 \cdot dH(t)/dt = -H(t) + 5 + 0.002$

Це лінійне диференціальне рівняння 1-го порядку зі сталими коефіцієнтами.

Розв'язок має вигляд:  $H(t) = c \cdot \exp(-t/100) + 5.002$

З граничних умов  $H(0) = H_0$  знаходимо сталу інтегрування:

$$c = H_0 - 5.002$$

Отже, розв'язком є:  $H(t) = (H_0 - 5.002) \cdot \exp(-t/100) + 5.002$

Це означає, що вологість в камері експоненційно наближатиметься до сталого рівня 5.002 одиниць.

Розв'яжемо рівняння  $H(t) = H_{\text{задане}}$  відносно  $t$ , щоб знайти час досягнення заданої вологості.

Маємо розв'язок рівняння балансу вологості:

$$H(t) = (H_0 - 5.002) \cdot \exp(-t/100) + 5.002$$

Де  $H_0$  - початкова вологість.

Позначимо  $H_{\text{задане}} = H_1$ .

Тоді рівняння, яке потрібно розв'язати:

$$(H_0 - 5.002) \cdot \exp(-t/100) + 5.002 = H_1$$

Виконуємо перетворення:

$$\exp(-t/100) = (H_1 - 5.002) / (H_0 - 5.002)$$

$$-t/100 = \ln[(H_1 - 5.002) / (H_0 - 5.002)]$$

$$t = -100 \cdot \ln[(H_1 - 5.002) / (H_0 - 5.002)]$$

Отже, час досягнення в камері заданої вологості  $H_1$  дорівнює:

$$t = -100 * \ln[(H1 - 5.002) / (H0 - 5.002)]$$

Наприклад, якщо  $H0 = 10$ ,  $H1 = 6$ , то  $t = 230$  с або 3 хв 50 с.

Знайдемо коефіцієнт передачі  $k1$  в передатній функції даної системи визначається виходячи з параметрів процесу регулювання вологості та характеристик камери копчення.

Згідно з рівнянням балансу вологості:

$$\tau * dH(t)/dt = -H(t) + k1E(t) + k2F(t)$$

Де:  $E(t)$  - потужність нагріву,

Вт  $H(t)$  - вологість, відносні одиниці (або %)

Коефіцієнт  $k1$  показує, на скільки зміниться вологість в камері при зміні потужності нагріву на 1 Вт. Тобто розмірність  $k1$  - (одиниці вологості)/(Вт).

Наприклад, якщо при збільшенні  $E$  на 10 Вт, вологість  $H$  зменшується на 0.5 одиниць, то

$$k1 = 0.5/10 = 0.05 \text{ (од.волог.)/(Вт)}$$

Знайдемо передатну функцію. Маємо диференціальне рівняння балансу вологості:

$$\tau * dH(t)/dt = -H(t) + k1E(t) + k2F(t)$$

де:  $\tau$  - стала часу камери

$H(t)$  - вологість у камері

$E(t)$  - потужність нагріву

$F(t)$  - витрата пари

Перетворимо це рівняння в операторну форму, позначивши зображення вологості як  $H(s)$ :

$$\tau sH(s) = -H(s) + k1E(s) + k2F(s)$$

Передатна функція, що показує залежність вихідної величини  $H(s)$  від вхідної  $E(s)$ , буде:

$$W(s) = H(s)/E(s) = k1/(\tau*s + 1)$$

Отже, передатна функція цієї системи має вигляд аперіодичної ланки 1-го порядку з коефіцієнтом підсилення  $k1$  та сталою часу  $\tau$ .

Дану модель буде використано при розрахунках контуру регулювання вологості.

В пакеті моделювання Matlab Simulink модулюємо контур регулювання температури:

Після налаштування ПІД – регулятора на мінімальний перехідний процес графік має наступний вигляд:

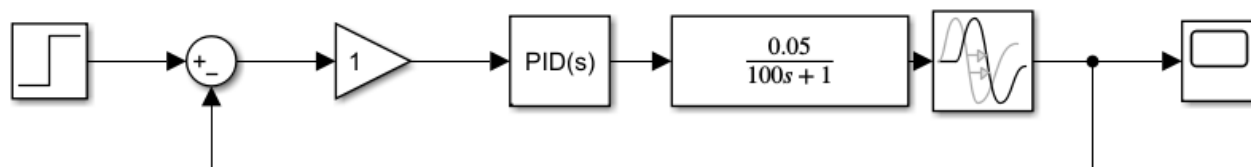


Рисунок 15 Модель регулятора вологи

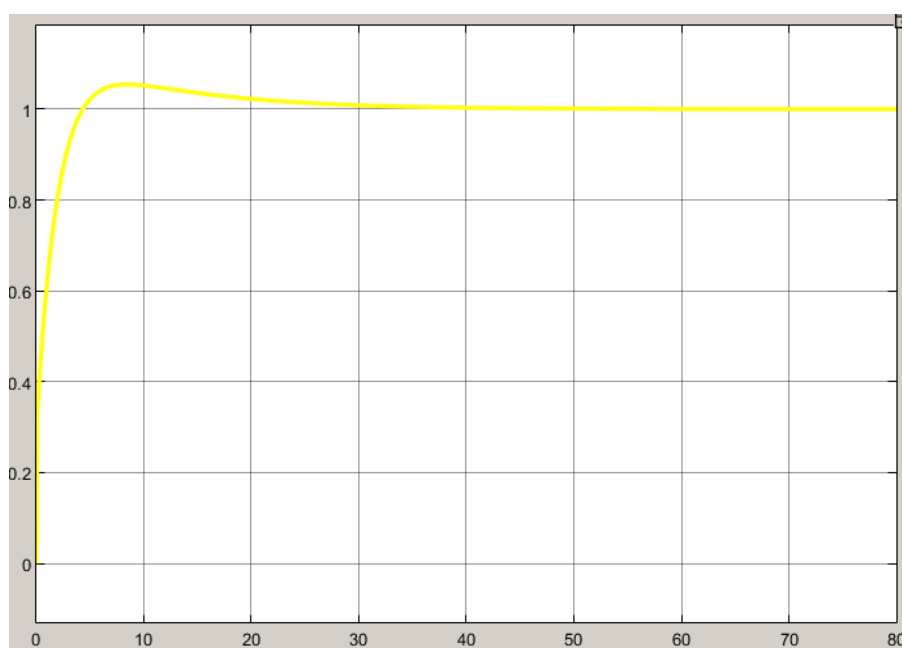


Рисунок 16 Перехідний процес регулятора вологи

### 3.4 Розробка SCADA системи

Розроблена SCADA-система призначена для автоматизованого контролю та керування процесом холодного та гарячого копчення продуктів харчування у коптильній камері. SCADA виконує збір даних з датчиків температури та вологості, керує роботою системи подачі пари, циркуляції повітря та нагріву ТЕНів для підтримки заданих параметрів копчення.

Функції SCADA системи:

- Візуалізація технологічного процесу
- Відображення поточних значень температури та вологості у камері
- Задання та контроль режимів роботи системи
- Автоматичне регулювання температури та вологості
- Керування системою подачі пари та повітря
- Сигналізація про вихід параметрів за допустимі межі
- Ведення архівів та звітів

Таким чином, SCADA дозволяє оператору контролювати весь процес копчення та оперативно коригувати параметри для отримання якісної готової продукції.

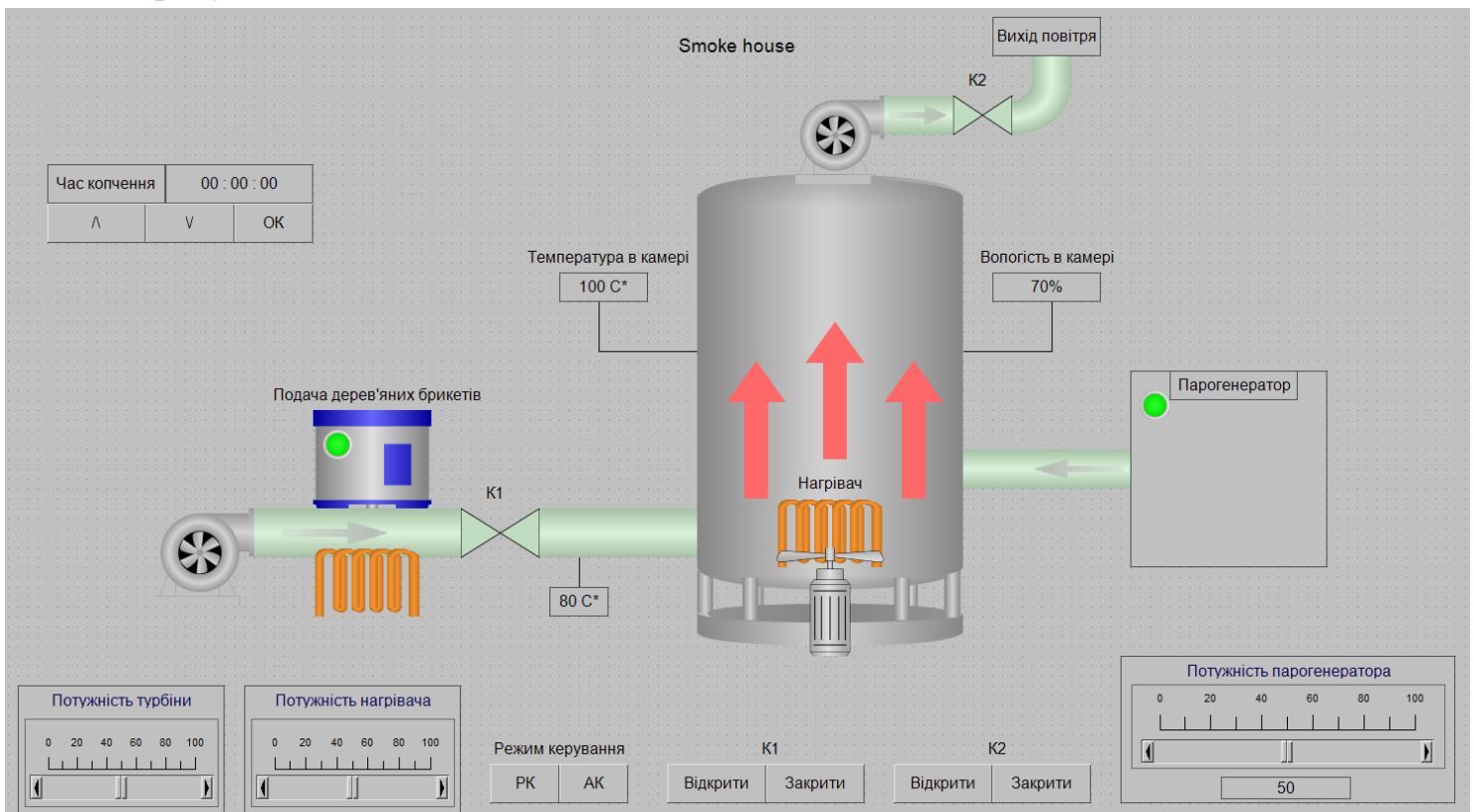


Рисунок 17 SCADA система коптильної установки



## 4. Основні апаратні засоби автоматизації коптильної установки.

### 4.1 Siemens S7 - 1200

Siemens S7-1200 - це серія програмованих логічних контролерів (ПЛК) від компанії Siemens, призначених для вирішення задач автоматизації невеликої та середньої складності. Основні технічні характеристики S7-1200:

- Продуктивність - час виконання логічних операцій від 0.05 мс
- Об'єм пам'яті - від 10 Кбайт на програму в базових моделях
- Інтерфейси - Ethernet, RS485, CAN, цифрові та аналогові I/O
- Вбудований HMI порт підключення панелей оператора
- Живлення =24В постійного струму
- Підтримка протоколів Modbus TCP/RTU, PROFINET і інших

Переваги S7-1200:

- Компактні розміри і можливість модульного розширення
- Широкі комунікаційні можливості
- Програмування СФЧТ-кодом



Рисунок 18 Зовнішній вигляд ПЛК  
Siemens S7 - 1200

## 4.2 PT100

PT100 - це платиновий термометр опору, широко використовуваний як датчик температури в системах автоматизації. Основні характеристики PT100:

- Тип датчика - резистивний
- Елемент - платинова нитка
- Стандартний діапазон - від -200 до +850°C
- Вихідний сигнал - опір, залежний від температури
- Нелінійність -  $\pm 0,1^\circ\text{C}$  (+100...+450°C)

Переваги PT100:

- Висока точність і стабільність показань
- Гарна реакція на невеликі зміни температури
- Широкий робочий діапазон температур

PT100 широко застосовується для точного вимірювання температури в печах, термокамерах, системах опалення та вентиляції. Має модифікації з різною конструкцією чутливого елемента.



Рисунок 19 Зовнішній вигляд  
давача температури

### 4.3 SteamTech STПМ-30

SteamTech STПМ-30 - це професійний парогенератор від компанії SteamTech (Німеччина), призначений для використання в харчовій промисловості.

Характеристики:

- Потужність - 30 кВт
- Продуктивність по парі - 30 кг/год
- Температура пари - до 180 °С
- Тиск - до 10 бар
- Об'єм бака для води - 95 літрів

Особливості цього парогенератора, це інжекторний спосіб утворення пари, PID-контроль температури і тиску, сенсорний дисплей керування, автоматичне доливання води та захист від сухого ходу і зниження рівня води

Корпус виготовлено з нержавіючої сталі, що дозволяє легко мити і чистити обладнання. STПМ-30 широко застосовується в системах автоматизації копильних камер, оскільки дозволяє гнучко регулювати параметри пари для заданого циклу копчення. Має високу надійність і довговічність.



Рисунок 20 Зовнішній вигляд парогенератора

## **Висновок**

У ході виконання дипломної роботи було розглянуто найбільш популярні копильні установки, описано принцип енергозбереження під час автоматизації процесу копчення, було створено математичну модель та підібрано та налаштовано PID регулятори, для більш ефективного використання енергоресурсів. Також було виконано підбір виконавчих механізмів та створено схему підключення. Реалізовано методи керування температурою та вологістю повітря в копильній камері на базі зворотних зв'язків і заданих профілів, які дають істотну економію газу та електроенергії порівняно з традиційними підходами. Застосовано алгоритми оптимального регулювання процесами нагрівання і охолодження робочої камери з метою мінімізації споживання енергії на основі аналізу даних датчиків параметрів. Запропоновані технічні рішення можуть бути інтегровані в загальну автоматизовану систему управління виробництвом для комплексної оптимізації енергоспоживання. Було розроблено SCADA систему, що дозволить оперативно керувати всім процесом копчення

Результатом роботи стало більш економне використання енергоресурсів, за рахунок правильних регуляторів та енергоефективних виконавчих механізмів. Практичне застосування розробленої автоматизованої системи керування копильною установкою з режимами енергозбереження дозволить отримати значний економічний ефект за рахунок скорочення витрат на газ та електрику.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Wang, Y., et al. "Energy efficiency technologies for industrial electro-thermal processes." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 93 (2018): 245-264.
2. «Коптильна установка гарячого та холодного копчення» - [formagib.com](http://formagib.com)
3. «Коптильні для дому» - [drevos.biz](http://drevos.biz)
4. «Автоматика коптильні» - [craftstore.com.ua](http://craftstore.com.ua)
5. «Automatic smokehouse» - [akciza.net](http://akciza.net)
6. NRECA International. "Guide to Improving Efficiency in Industrial Smoking Units." Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2018.
7. «Automatic Meat Smoking House Machine» - [www.meatmachinechina.com/automatic-meat-smoking-house-machine/](http://www.meatmachinechina.com/automatic-meat-smoking-house-machine/)
8. «Коптильні» - [artkamin.ua/koptilni/](http://artkamin.ua/koptilni/)
9. «Вимірювання температури з використанням датчиків DS18B20 на кількох OneWire шинах» - [arduino.ua/art9-arduino-izmerenie-temperatury-s-ispolzovaniem-datchikov-ds18b20-na-neskolkih-onewire-shinah-](http://arduino.ua/art9-arduino-izmerenie-temperatury-s-ispolzovaniem-datchikov-ds18b20-na-neskolkih-onewire-shinah-)
10. Hasanbeigi, A. et al. "Industrial Smoking Kilns: Key Findings and Best Practice Energy Efficiency Technologies." Global Alliance for Clean Cookstoves, 2019.
11. «DS3231 Datasheet» - [google.com/search? sca\\_esv=573962864&sxsrf=AM9HkKkAgj2rGqcONZt39wBv1XOdWUcLfw:1697529397167&q=DS3231+Data sheet&sa=X&ved=2ahUKEwiv1NrlzfyBAxVPwQIHHZtXA48Q1QJ6BAg9EAE&biw=1536&bih=715&dpr=1.25](https://www.google.com/search? sca_esv=573962864&sxsrf=AM9HkKkAgj2rGqcONZt39wBv1XOdWUcLfw:1697529397167&q=DS3231+Data+sheet&sa=X&ved=2ahUKEwiv1NrlzfyBAxVPwQIHHZtXA48Q1QJ6BAg9EAE&biw=1536&bih=715&dpr=1.25)
12. «SSR – 40» - [digital-world.in.ua/product/tverdotelnoe-rele-fotek-ssr-40-da-vhod-3-32-vdc-vyhod-24-380vac/](http://digital-world.in.ua/product/tverdotelnoe-rele-fotek-ssr-40-da-vhod-3-32-vdc-vyhod-24-380vac/)
13. «KY – 040 Datasheet» - [rcscomponents.kiev.ua/datasheets/ky-040-datasheet.pdf](http://rcscomponents.kiev.ua/datasheets/ky-040-datasheet.pdf)
14. «Resistive humidity sensor, Model: HR202» - [elecrow.com/download/HR202%20Humidity%20Sensor.pdf](http://elecrow.com/download/HR202%20Humidity%20Sensor.pdf)

15. Smokehouse Control Temperature - <https://controllercreators.com/smoker-controllers/>
16. Smoking House - <https://www.xiaojinmachinery.com/product/smoking-house>
17. Smokehouse Helps Make Ends 'Meat' -  
<https://www.meatpoultry.com/articles/28917-smokehouse-helps-make-ends-meat>
18. PitmasterPi - Now runs in Docker - <https://github.com/justindean/PitmasterPi>
19. Electrical Automatic Smoked Fish Machine - <https://www.bossgoo.com/product-detail/electrical-automatic-smoked-fish-machine-38886318.html>
20. Mutaf, S. et al. "Improving the energy efficiency of industrial smoking kilns." *Journal of Cleaner Production* 266 (2020): 122000.
21. Hasanbeigi, A., and Lynn, P. Emerging energy-efficiency and carbon dioxide emission-reduction technologies for the iron and steel industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 82 (2018): 745-764.