

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
Факультет комп'ютерно-інтегрованих технологій, мехатроніки і
робототехніки
Кафедра робототехніки, електроенергетики та автоматизації
ім. проф. Б.Б. Самотокіна

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
до кваліфікаційної роботи магістра
на тему: «Автоматизація технологічного процесу сушіння деревини в
камерній триступеневій сушарці»

Виконав студент 2 курсу, групи ЗАТ-23м
спеціальності 174 “ Автоматизація,
комп'ютерно-інтегровані технології
та робототехніка”

Кушнір Євгеній Алімович

(прізвище та ініціали студента)

Керівник: к.т.н., доц. Шавурський Ю.О.

(науковий ступінь, вчене звання, посада,
прізвище та ініціали)

Рецензент: к.т.н., доц. Чепюк Л.О.

(науковий ступінь, вчене звання, посада,
прізвище та ініціали)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”
Факультет комп’ютерно-інтегрованих технологій, мехатроніки і
робототехніки
Кафедра робототехніки, електроенергетики та автоматизації
ім. проф. Б.Б. Самотокіна

Спеціальність 174 “Автоматизація, комп’ютерно-інтегровані технології
та робототехніка”

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
робототехніки, електроенергетики
та автоматизації
ім. проф. Б.Б. Самотокіна
к.т.н., доц. Громовий О.А.
_____ к.т.н., доц. Громовий О.А.
«_____» _____ 2024р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу магістра

Студент Кушнір Євгеній Алімович

1. Тема роботи: Автоматизація технологічного процесу сушіння деревини в камерній триступеневій сушарці

Затверджена Наказом по університету від «12» листопада 2024 р. № 647/с

2. Термін здачі закінченої роботи на кафедру «18» грудня 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи в основу дипломної роботи покладено технічну документацію про технологічний процес сушіння деревини в камерній триступеневій сушарці

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які підлягають розробці)
У роботі буде проаналізовано технологічний процес сушіння деревини в камерній триступеневій сушарці, досліджено основні переваги та недоліки цього процесу. Розглянуто будову та принцип роботи камерної сушарки. Проведено аналіз шляхів підвищення рівня автоматизації технологічного процесу сушіння деревини у триступеневій сушарці. Розроблено структурну та електричну принципову схеми автоматизованої системи. Створено алгоритм роботи автоматизованої системи та проведено необхідні розрахунки

5. Перелік презентативного матеріалу (з точним визначенням обов'язкових слайдів/креслень) технічне завдання, огляд та аналіз існуючих систем, розробка структурної схеми, електричної-принципової, структурної схем та алгоритму роботи

6. Консультанти з кваліфікаційної роботи магістра із зазначенням розділів роботи, що їх стосуються

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1, 2, 3, 4	Шавурський Ю.О., к.т.н., доцент		

7. Дата видачі завдання 10.09.2024

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Підготувати звіт про переддипломну практику		виконано
2.	Проаналізувати технологічний процес сушіння деревини		виконано
3.	Розглянути будову та принцип роботи камерної сушарки		виконано
4.	Провести аналіз шляхів підвищення рівня автоматизації		виконано
5.	Розробити структурну та електричну принципову схеми		виконано
6.	Розробити алгоритм роботи		виконано
7.	Провести необхідні розрахунки		виконано

Студент _____
(підпис, дата)

Є.А. Кушнір
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис, дата)

Ю.О. Шавурський
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Дипломна робота присвячена розробці системи автоматизації технологічного процесу сушіння деревини в камерній триступеневій сушарці. Проведено аналіз технологічного процесу, визначено ключові параметри, що впливають на якість сушіння: температура, вологість і швидкість повітряного потоку. Запропоновано автоматизовану систему контролю і регулювання, що забезпечує стабільне підтримання умов на кожному етапі сушіння: попереднього, основного та завершального.

У роботі розроблено принципову схему автоматизації, підібрано засоби контролю, включаючи датчики температури, вологості та виконавчі механізми. Створено алгоритм управління, що враховує динамічні зміни параметрів сушіння. Запропонована система спрямована на підвищення ефективності процесу, зменшення енергоспоживання та забезпечення високої якості обробленої деревини.

ANNOTATION

The thesis is devoted to the development of a system for automating the technological process of drying wood in a three-stage chamber dryer. The technological process has been analyzed, the key parameters that affect the quality of drying have been determined: temperature, humidity and air flow rate. An automated control and regulation system has been proposed, which ensures stable maintenance of conditions at each stage of drying: preliminary, main and final.

The work has developed a schematic diagram of automation, selected control means, including temperature and humidity sensors and actuators. A control algorithm has been created that takes into account dynamic changes in drying parameters. The proposed system is aimed at increasing the efficiency of the process, reducing energy consumption and ensuring high quality of processed wood.

ЗМІСТ	Стр.
ВСТУП	5
1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ДЕРЕВИНИ	7
1.1 Процес сушіння деревини	7
1.2 Способи сушіння деревини	8
1.3 Об'єкт регулювання	19
1.4 Шляхи автоматизації	20
2. ТИПИ СУШІННЯ ДЕРЕВИНИ.....	22
2.1 Атмосферний тип сушіння	22
2.2 Штучний тип сушіння	24
2.3 Конвективний тип сушіння	25
2.4 Комбінований тип сушіння	28
2.5 Кондуктивний тип сушіння	29
2.6 Радіаційний тип сушіння	29
3. РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ.....	30
3.1 Вибір та обґрунтування структури системи керування.....	30
3.2. Вибір датчиків та виконавчих механізмів	33
4. РОЗРОБКА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ ТА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ	45
4.1. Функціональна схема системи управління.....	45
4.2 Розробка електричної принципової схеми автоматизованої системи.....	48
4.3 Дослідження динамічних властивостей об'єкта.....	48
5. РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ УПРАВЛІННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ТА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ.....	54
5.1. Алгоритму реалізації закону управління.....	54
5.2 Програмне забезпечення.....	58
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	60
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	61
ДОДАТКИ.....	62

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Сучасна деревообробна промисловість вимагає високої якості продукції, ефективного використання ресурсів та зниження витрат на виробництво. Одним із ключових етапів технологічного процесу обробки деревини є її сушіння, яке суттєво впливає на фізико-механічні властивості матеріалу, запобігає його деформації та руйнуванню в процесі експлуатації. Для забезпечення стабільності параметрів сушіння та зменшення впливу людського фактору необхідно впроваджувати сучасні системи автоматизації.

Триступеневі камерні сушарки є ефективним засобом для обробки деревини, оскільки вони дозволяють реалізувати поетапне видалення вологи із матеріалу при різних умовах температури, вологості та швидкості повітряного потоку. Однак, навіть у таких системах можуть виникати труднощі, пов'язані з нерівномірністю розподілу параметрів сушіння, що призводить до зниження якості кінцевої продукції.

Метою даної роботи є розробка системи автоматизації процесу сушіння деревини в триступеневій камерній сушарці, яка дозволить забезпечити точний контроль технологічних параметрів, знизити витрати енергії та підвищити продуктивність.

У роботі проведено аналіз існуючих технологій сушіння деревини, визначено ключові проблеми, що потребують вирішення, та обґрунтовано необхідність автоматизації. Розроблена система включає використання сучасних датчиків, виконавчих механізмів та алгоритмів управління, що дозволяє оптимізувати процес сушіння. Результати дослідження можуть бути впроваджені на підприємствах деревообробної галузі для підвищення ефективності виробництва та забезпечення стабільної якості деревини.

Об'єктом дослідження є методи побудови автоматизованої системи керування камерної триступеневої сушарки.

Предметом дослідження є автоматизована система керування камерної триступеневої сушарки.

1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ДЕРЕВИНИ

1.1 Процес сушіння деревини

Процес сушіння деревини — це технологічний етап, під час якого відбувається видалення вологи з деревини для забезпечення її стабільності, довговічності та запобігання деформації в процесі експлуатації. Цей процес є необхідним для досягнення оптимального рівня вологості, що відповідає умовам подальшого використання деревини.

Основні етапи сушіння деревини (рис. 1.1):

1. Попередній етап (видалення поверхневої вологи):
 - На цьому етапі видаляється волога, яка знаходиться на поверхні та в зовнішніх шарах деревини.
 - Температура зазвичай невисока, щоб уникнути утворення тріщин і деформацій через різницю вологості між зовнішніми та внутрішніми шарами.
2. Основний етап (видалення внутрішньої вологи):
 - Волога, яка знаходиться всередині волокон деревини, поступово випаровується. Цей процес є більш тривалим і енергоємним.
 - Контролюються температура, вологість повітря та швидкість циркуляції повітря для забезпечення рівномірного сушіння.
3. Завершальний етап (стабілізація):
 - Деревина доводиться до потрібного рівня вологості, який залежить від її подальшого використання (наприклад, для меблів, будівництва чи інших виробів).
 - Відбувається вирівнювання вологості по всій товщині матеріалу, що допомагає уникнути внутрішніх напружень і забезпечує стабільність деревини.

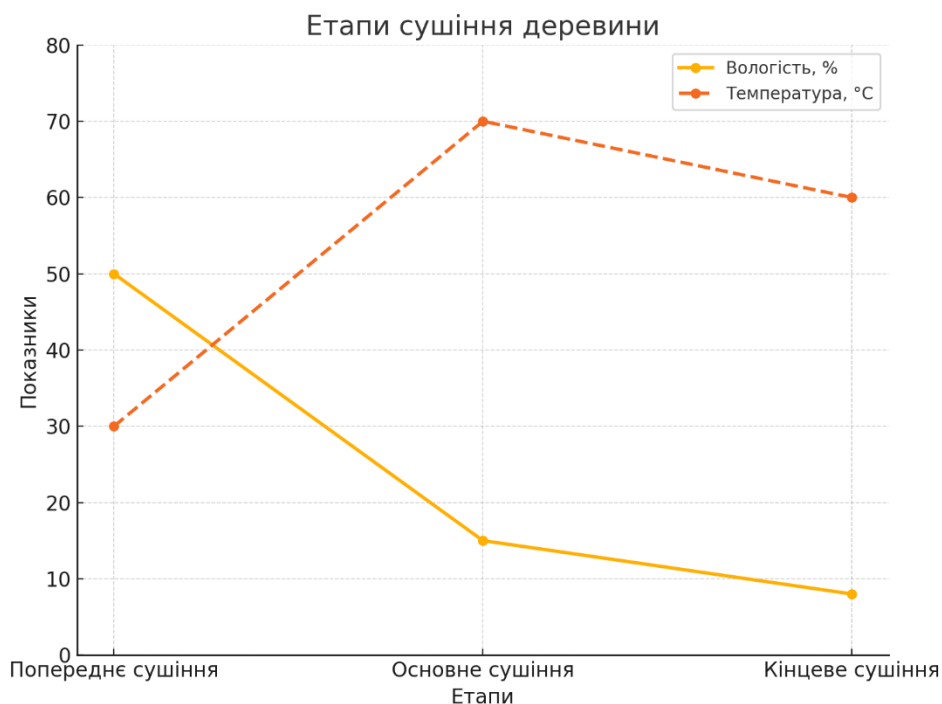


Рис. 1.1. Етапи сушіння деревини

Основні параметри сушіння:

- **Температура:** Регулюється залежно від породи деревини та її початкової вологості. Занадто висока температура може спричинити утворення тріщин або вигинів.
- **Вологість повітря:** Залежить від фази сушіння; контроль вологості важливий для рівномірного видалення вологи.
- **Швидкість повітряного потоку:** Забезпечує рівномірне висушування та ефективне випаровування вологи.
- **Час сушіння:** Залежить від товщини деревини, її породи, початкової та кінцевої вологості.



Рис. 1.2. Діаграма, яка відображає відносну важливість параметрів сушіння деревини

Типи вологи в деревині:

- Вільна волога: Міститься в міжклітинних просторах деревини. Видаляється на першому етапі сушіння.
- Зв'язана волога: Міститься у клітинних стінках деревини. Видаляється на основному етапі сушіння і потребує більших витрат енергії.
- Гігроскопічна волога: Волога, яка утримується деревиною залежно від навколишніх умов (температура, вологість повітря).

Цілі сушіння деревини:

1. Зменшення об'єму та ваги деревини: Це полегшує транспортування та знижує витрати на обробку.
2. Запобігання деформації та тріщинам: Правильний контроль параметрів сушіння мінімізує внутрішні напруження.
3. Підвищення довговічності: Висушена деревина більш стійка до гниття, шкідників та впливу навколишнього середовища.
4. Забезпечення придатності для обробки: Наприклад, для склеювання, фарбування або лакування.

1.2 Способи сушіння деревини

Сушіння деревини є важливим процесом, який впливає на якість, стабільність і довговічність матеріалу. Існує кілька способів сушіння деревини, які використовуються залежно від вимог до якості, економічності та доступності ресурсів.

1. Природне сушіння

- **Опис:** Деревина висушується під відкритим небом або в добре провітрюваних приміщеннях без використання додаткового нагрівання.

- **Переваги:**

- Економічність (не потребує додаткових витрат на енергію).
- Простота організації.

- **Недоліки:**

- Довготривалість процесу (від кількох місяців до року залежно від клімату і породи деревини).
- Неможливість забезпечити точний контроль вологості.

- **Застосування:** Підготовка матеріалу для невибагливих конструкцій (наприклад, огорож, допоміжних будівель).

2. Камерне сушіння

- **Опис:** Деревина розміщується в спеціальних сушильних камерах, де створюються контрольовані умови температури, вологості та циркуляції повітря.

- **Типи камерного сушіння:**

- **Конвективне сушіння:** Використовується гаряче повітря, яке циркулює в камері.
- **Радіаційне сушіння:** Використовується інфрачервоне випромінювання для нагрівання деревини.
- **Конденсаційне сушіння:** Волога видаляється через конденсацію у замкнутій системі.

- Переваги:

- Точний контроль параметрів сушіння.
- Швидкість процесу (від декількох днів до тижня).

- Недоліки:

- Висока енергоємність.
- Дорожнеча обладнання.

- Застосування: Виробництво меблів, паркету, будівельних матеріалів.

3. Вакуумне сушіння

• Опис: Деревина сушиться у вакуумній камері, де волога випаровується при зниженому тиску.

- Переваги:

○ Можливість сушіння деревини цінних порід без утворення тріщин.

- Висока швидкість процесу.
- Енергоефективність у порівнянні з конвективним сушінням.

- Недоліки:

- Висока вартість обладнання.
- Потреба у спеціалізованому обслуговуванні.

• Застосування: Сушіння деревини для музичних інструментів, дорогих меблів, художніх виробів.

4. Інфрачервоне сушіння

• Опис: Використання інфрачервоного випромінювання для нагрівання деревини і випаровування вологи.

- Переваги:

- Прискорення процесу сушіння.
- Рівномірне нагрівання поверхні.

- Недоліки:

○ Обмеження для товстих матеріалів (глибина проникнення випромінювання невелика).

• Застосування: Сушіння тонких пиломатеріалів або заготовок.

5. Конденсаційне сушіння

• Опис: У замкнутій камері волога випаровується і конденсується на спеціальних охолоджуваних поверхнях.

• Переваги:

- Енергоефективність за рахунок замкнутого циклу.
- Мінімальний вплив на навколишнє середовище.

• Недоліки:

- Тривалий процес.
- Висока вартість обладнання.

• Застосування: Для сушіння в умовах, де потрібен контроль за екологічністю.

6. Мікрохвильове сушіння: використання мікрохвильового випромінювання для швидкого нагрівання деревини і випаровування вологи.

• Переваги:

- Дуже швидкий процес сушіння.
- Рівномірний нагрів по всьому об'єму матеріалу.

• Недоліки:

- Висока вартість обладнання.
- Потребує точного налаштування для уникнення пошкоджень

деревини.

• Застосування: сушіння спеціалізованих або цінних дерев'яних виробів.

7. Сонячне сушіння: сушіння деревини під впливом сонячного тепла в спеціальних сонячних камерах або на відкритому просторі.

• Переваги:

- низька вартість енергії.
- екологічність.

• Недоліки:

- залежність від погодних умов.
- тривалість процесу.

• Застосування: для підготовки деревини у невеликих обсягах або в регіонах із теплим кліматом.

У табл.1.1 приведені види і способи сушіння деревини.

Таблиця 1.1

Спосіб	Швидкість	Якість	Вартість	Енергоефективність
Природне сушіння	Низька	Низька	Низька	Висока
Камерне сушіння	Висока	Висока	Висока	Середня
Вакуумне сушіння	Дуже висока	Дуже висока	Дуже висока	Висока
Інфрачервоне сушіння	Середня	Висока	Висока	Середня
Конденсаційне сушіння	Середня	Висока	Висока	Дуже висока
Мікрохвильове сушіння	Дуже висока	Дуже висока	Дуже висока	Середня
Сонячне сушіння	Низька	Низька	Дуже низька	Висока

Камерне сушіння

Камерне сушіння деревини — це контрольований процес видалення вологи з деревини, що проводиться у спеціальних закритих камерах із можливістю регулювання основних параметрів: температури, вологості повітря та швидкості його циркуляції. Цей метод широко використовується у промисловості для забезпечення стабільності, довговічності та якості дерев'яних виробів.

Деревина завантажується в сушильну камеру, де створюються певні кліматичні умови залежно від етапу сушіння:

1. Попереднє сушіння:
 - Видаляється поверхнева волога.
 - Низька температура (30–40°C) та висока відносна вологість (70–90%) для уникнення розтріскування поверхні деревини.
2. Основне сушіння: волога з клітинних стінок випаровується під дією підвищеної температури (40–70°C).
3. Завершальне сушіння - доводиться вологість деревини до заданих параметрів (8–12%).

Переваги камерного сушіння

Контрольованість: точне регулювання температури, вологості та швидкості повітря забезпечує стабільність процесу.

Швидкість: процес триває від кількох днів до тижня залежно від породи деревини та початкової вологості.

Універсальність: підходить для сушіння деревини різних порід і розмірів.

Якість: зменшуються ризики деформацій, тріщин і зниження міцності.

Камерне сушіння деревини — це технологічно складний, але ефективний метод, який забезпечує високу якість кінцевої продукції. Завдяки точному контролю параметрів процесу цей метод ідеально підходить для промислових масштабів, особливо для обробки деревини, яка використовується у відповідальних конструкціях та виробках.

Технологічний процес сушіння деревини у триступеневій сушарці

Принцип триступеневого режиму сушіння деревини полягає в поступовому видаленні вологи з деревини через послідовні етапи, кожен з яких має різні умови температури, вологості та швидкості повітряного потоку. Такий підхід мінімізує ризик утворення тріщин, викривлення або інших дефектів, забезпечуючи високу якість кінцевого продукту. На рис. 1.3 зображено теплогенератор, який працює на основі спалювані дров, що призводить до нагрівання труб, по яких рухається повітря за допомогою відцентрового вентилятора. Нагріте повітря подається до сушильної камери (рис. 1.3).

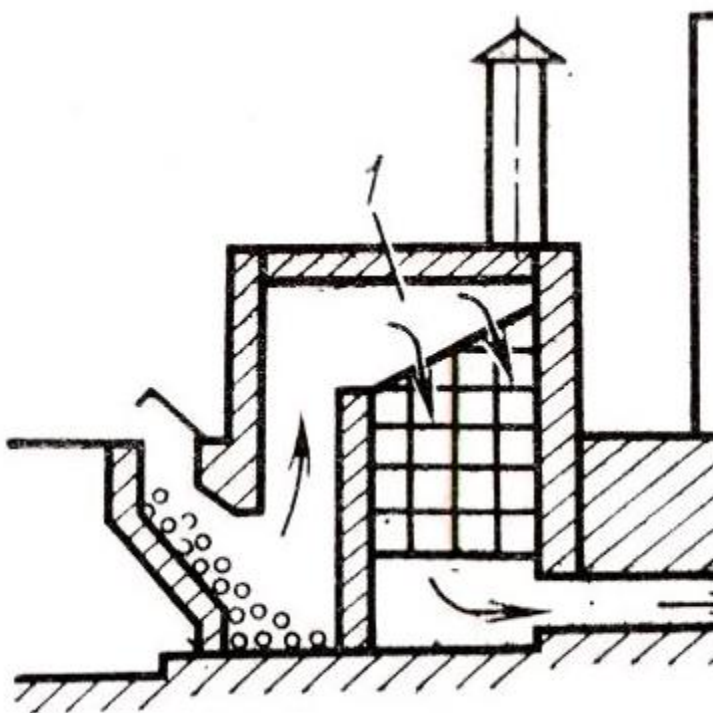


Рис. 1.3. Теплогенератор на відходах пиломатеріалів

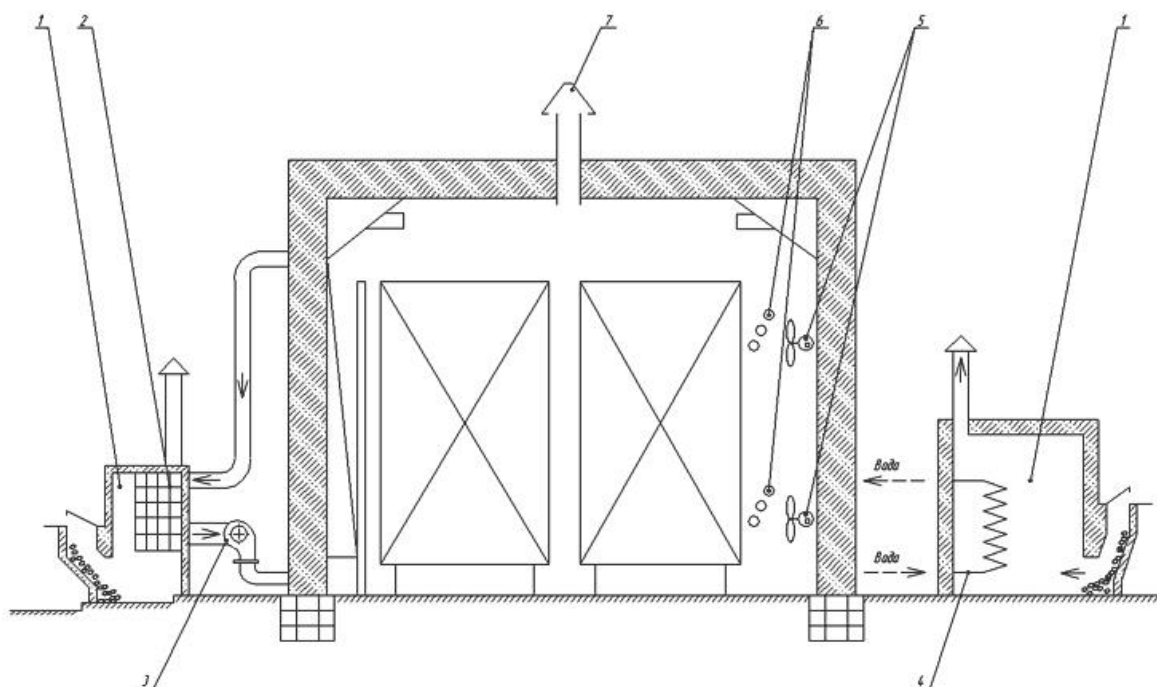


Рис. 1.4. Технологічна схема процесу сушіння деревини: 1 – котел; 2 – труби з повітрям; 3 – відцентровий вентилятор; 4 – труби з водою; 5 – вентилятор; 6 – радіатори із гарячою водою; 7 – витяжка

Другий теплогенератор працює на основі водяного котла та двох радіаторів, які обдуваються вентиляторами. Ці два теплогенератори застосовуються для грубого регулювання температури, а для більш точного регулювання використовують третій – електрокалорифер. Для регулювання вологості у сушильній камері використовують витяжки.

Способи визначення вологості деревини

Визначення вологості деревини — це важливий процес, який забезпечує контроль якості сушіння та готовності деревини до подальшого використання. Існує кілька методів визначення вологості деревини, які поділяються на прямих і непрямих.

Прямі методи

Ці методи базуються на безпосередньому вимірюванні втрати вологи в деревині.

1. Ваговий (сушильно-ваговий) метод:

Суть: зразок деревини зважують до і після висушування до постійної ваги у сушильній шафі.

Розрахунок вологості:

$$W = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 100\%$$

де m_1 — початкова маса зразка, m_2 — маса після висушування.

Переваги:

- Висока точність.
- Метод є стандартом для визначення вологості.

Недоліки:

- Тривалість (кілька годин).
- Потребує спеціального обладнання (сушильна шафа, аналітичні ваги).

2. Хімічний метод:

Суть: Зразок обробляється реагентом (наприклад, безводним кальцій-

хлоридом), який поглинає вологу. Втрату маси реагента використовують для розрахунку вологості.

Переваги:

- Висока точність для невеликих зразків.

Недоліки:

- Потребує хімічних реагентів.
- Трудомісткий.

Непрямі методи

Ці методи базуються на фізичних або електричних властивостях деревини, які змінюються залежно від її вологості.

1. Електричний метод (опірний): вимірюється електричний опір деревини за допомогою голкових електродів, що вводяться у матеріал. Вологість визначається за допомогою каліброваної шкали.

Переваги:

- Швидкість вимірювання.
- Придатність для роботи у польових умовах.

Недоліки:

- Точність залежить від породи деревини.
- Не підходить для деревини з дуже низькою або дуже високою вологістю.

2. Ємнісний метод: вимірюється ємність деревини, яка змінюється залежно від її вологості.

Переваги:

- Безконтактне вимірювання.
- Підходить для великих об'ємів деревини.

Недоліки:

- Менш точний, ніж опірний метод.

3. Радіаційний метод: вимірюється інтенсивність проходження радіації через деревину, яка залежить від її вологості.

Переваги:

- Придатний для великих обсягів деревини.

Недоліки:

- Висока вартість обладнання.
- Потребує спеціального дозволу для роботи з радіацією.

4. Ультразвуковий метод: вимірюється швидкість проходження ультразвукових хвиль через деревину. Чим більша вологість, тим менша швидкість хвиль.

Переваги:

- Безконтактність.
- Підходить для великих обсягів деревини.

Недоліки:

- Низька точність.
- Потребує калібрування для різних порід.

Інші методи

1. Інфрачервоний метод: вимірюється відбиття або поглинання інфрачервоного випромінювання, яке змінюється залежно від вологості деревини.

Переваги:

- Швидкість вимірювання.

Недоліки:

- Дороге обладнання.
- Точність залежить від чистоти поверхні деревини.

2. Мікрохвильовий метод: вимірюється зміна частоти мікрохвильового випромінювання при проходженні через деревину.

Переваги:

- Висока швидкість.

Недоліки:

- Вартість обладнання.

При сушінні пиломатеріалів використовують електровологоміри ЦНИИМОД-2; ЭВ8-100; ЭВА-2; ЭВА-2М; ЭВА-2ДО.

Порівняння методів

Метод	Точність	Швидкість	Обладнання	Застосування
Ваговий	Висока	Низька	Сушильна шафа	Стандартний контроль
Електричний	Середня	Висока	Вологоміри	Польові вимірювання
Ємнісний	Середня	Висока	Ємнісні вологоміри	Вимірювання великих обсягів
Радіаційний	Висока	Висока	Радіометри	Промислове сушіння
Ультразвуковий	Середня	Висока	Ультразвукові прилади	Лабораторне використання
Інфрачервоний	Висока	Висока	ІЧ-сканери	Поверхневий контроль

Контроль за вологістю деревини та внутрішніми напруженнями у процесі сушіння

Контроль за вологістю деревини та внутрішніми напруженнями під час сушіння є ключовим аспектом забезпечення якості кінцевого продукту. Недостатній або неправильний контроль цих параметрів може призвести до тріщин, деформацій, зниження механічної міцності та інших дефектів.

Методи контролю:

Ваговий метод:

- Відбір зразків деревини з різних зон сушильної камери.
- Зважування перед і після висушування для визначення вологості.

Електричний метод:

- Використання вологомірів із електродами, що вводяться в деревину.
- Оперативний метод для визначення вологості без необхідності виймати зразки.

Автоматичні системи моніторингу:

- Датчики вологості, інтегровані в систему управління сушильною камерою.
- Постійний контроль вологості деревини у режимі реального часу.

Закінчення процесу сушіння

Критерії оцінки якості деревини

1. Фізичні характеристики:

- Щільність і вага.
- Вологість (оптимальний рівень вологості для обробки — 8–12%).
- Стійкість до розтріскування.

2. Візуальні характеристики:

- Колір і текстура.
- Наявність дефектів (сучки, тріщини, гниль, зміни кольору).
- Рівність поверхні та волокнистої структури.

3. Механічні властивості:

- Міцність на стискання, згинання, розтягування.
- Твердість і зносостійкість.
- Еластичність і гнучкість.

4. Стійкість до зовнішніх факторів:

- Стійкість до вологи, грибків, шкідників.
- Стійкість до температурних перепадів.

Додаткові категорії за призначенням

1. Будівельна деревина:

- Переважно використовуються сорти 2–3 категорії.
- Оцінюється за механічними властивостями, стійкістю до вологи та довговічністю.

2. Меблева деревина:

- Використовуються високоякісні сорти (1-й або 2-й).
- Особлива увага приділяється текстурі, кольору та відсутності дефектів.

3. Технічна деревина:

- Підходять сорти 3–4 категорії.
- Використовується для виготовлення фанери, деревних плит, конструктивних елементів.

4. Паливна деревина:

- Найнижчі сорти (4-й категорії).
- Основний критерій — енергетична цінність.

1.3 Об'єкт регулювання

Сушіння деревини є одним із ключових процесів у деревообробній промисловості, що вимагає точного дотримання технологічного режиму для забезпечення якості кінцевого продукту. Автоматизація цього процесу дозволяє досягти стабільності параметрів сушіння, скоротити час циклу і знизити втрати енергії.

Першочерговим завданням автоматичного регулювання процесу сушіння деревини є стабілізація режиму сушіння. Для цього використовуються спеціальні регулятори, які забезпечують підтримання заданих температури та відносної вологості на постійному рівні відповідно до технологічних вимог. Тип регулятора, закон регулювання та параметри його налаштувань обирають із урахуванням статичних і динамічних характеристик сушильної камери, а також вимог, що висуваються до системи регулювання.

Регулятори та їх застосування

У більшості випадків для автоматизації процесу сушіння деревини застосовуються стандартні регулятори, зокрема:

1. Пропорційні регулятори (Р-регулятори).
2. Пропорційно-інтегральні регулятори (PI-регулятори).
3. Пропорційно-інтегрально-диференційні регулятори (PID-регулятори).

Тип регулятора залежить від вимог до точності регулювання, швидкості реакції системи та характеру технологічного процесу.

Визначення динамічних характеристик

Динамічні характеристики сушильної камери визначаються з використанням: диференціальних рівнянь, експериментального методу.

При проектуванні систем автоматичного регулювання необхідно

визначити динамічні параметри об'єктів, такі як:

- Часова постійна.
- Амплітудно-частотна характеристика.
- Передатна функція.

Для цього застосовують аналітичні методи, які базуються на конструктивних і технологічних параметрах сушильної камери. Результати аналізу дозволяють:

- Оптимізувати конструкцію установки.
- Удосконалити технологічний процес.
- Створити універсальні рішення для схожих об'єктів.

Використання результатів

Отримані динамічні характеристики можуть бути застосовані:

1. Для налаштування систем регулювання.
2. Для розробки нових установок сушіння.
3. Для адаптації систем автоматизації до об'єктів інших типів.

На практиці визначення динамічних характеристик є важливим для:

1. Оптимізації енерговитрат.
2. Поліпшення якості продукту.
3. Підвищення продуктивності.

Автоматичне регулювання процесу сушіння деревини є складним завданням, що вимагає точного моделювання та налаштування системи управління. Використання сучасних регуляторів, методів визначення динамічних характеристик і аналітичного підходу дозволяє досягти високої ефективності, стабільності та якості у технологічному процесі. Це не тільки підвищує конкурентоспроможність виробництва, але й сприяє впровадженню енергоощадних технологій.

1.4 Шляхи автоматизації

Після дослідження існуючої установки сушіння пиломатеріалів та визначення незручностей, пов'язаних із процесом, зокрема точність вимірювання температури, визначення вологості, було змінено способи та засоби збору технологічних параметрів.

Сьогодні температура у камері вимірюється ртутними термометрами, які в силу своєї моральної застарілості незручні у використанні. Вологість вимірюється психометричним способом, оператор знімає значення із вологого та сухого термометрів і по психометричним таблицям визначає вологість у сушильній камері. Цей процес потребує певного періоду часу, і має досить велику похибку обумовлену багатьма чинниками, такими як похибка термометрів. Також використання даного методу дає можливість отримання значення вологості лише в певній частині сушильної камери. Використання електронних датчиків вологості дозволяє усунути ряд похибок, тим самим робить процес вимірювання вологості швидшим та значно точнішим, відпадає потреба у використанні психометричних таблиць. Також відбулися зміни у вимірюванні температури, після автоматизації значення температури знімаються цифровими датчиками, значення яких обробляється мікроконтролером, що дає високу швидкість та точності обробки інформації.

Для більшої швидкості та точності регулювання температури в камері запропоновано встановити електрокалорифер, роботу якого контролює КМС.

2. АНАЛІЗ ТИПІВ СУШІННЯ ДЕРЕВИНИ

2.1 Атмосферний тип сушіння

Атмосферне сушіння деревини — це природний спосіб видалення вологи, який здійснюється за рахунок впливу навколишніх умов: температури повітря, відносної вологості та вітру. Цей метод є найпростішим і найдешевшим, але водночас найповільнішим у порівнянні з іншими технологіями.

У цьому методі деревину розташовують у штабелях під навісом або на відкритому майданчику. Штабелі формуються так, щоб між дошками забезпечувався рівномірний доступ повітря, що сприяє якісному випаровуванню вологи. Для цього між деревиною розміщують прокладки однакової товщини, а висота штабелів зазвичай не перевищує трьох-чотирьох метрів.

Процес атмосферного сушіння поділяється на кілька етапів. Спочатку видаляється поверхнева волога, що забезпечує швидке випаровування. Далі відбувається поступове видалення внутрішньої вологи, що потребує більше часу. Завершальним етапом є вирівнювання вологості по всій товщині деревини до рівня рівноважної вологості, яка залежить від кліматичних умов і становить 8–15%.

Основними перевагами атмосферного сушіння є його простота, економічність і екологічність, оскільки цей метод не потребує додаткових енерговитрат. Проте він має й суттєві недоліки: значна тривалість, залежність від погодних умов, обмеження у досягненні низького рівня вологості та можливість утворення дефектів, таких як тріщини, деформації або зміна кольору деревини.

Цей метод використовується переважно для попереднього сушіння перед камерним або вакуумним сушінням, а також для деревини, що застосовується у менш відповідальних конструкціях, як-от будівельні матеріали або упаковка.

Організація процесу сушіння вимагає дотримання правильних умов розташування деревини та регулярного контролю вологості, щоб уникнути дефектів і забезпечити якісне висихання матеріалу.

Зовнішній вигляд камери зображено на рис.2.1.



Рис. 2.1. Зовнішній вигляд атмосферних сушильних камер

2.2 Штучний тип сушіння

Штучний тип сушіння деревини — це технологічний процес видалення вологи з деревини за допомогою спеціального обладнання, яке створює контрольовані умови температури, вологості та циркуляції повітря. Цей метод дозволяє досягти необхідного рівня вологості деревини у значно коротші терміни порівняно з атмосферним сушінням, забезпечуючи високу якість і стабільність матеріалу.

У процесі штучного сушіння деревина розміщується в сушильних камерах або установках, де відбувається регулювання параметрів залежно від породи деревини, її початкової вологості та кінцевих вимог до матеріалу. Використовуються різні способи передачі тепла — конвекція, інфрачервоне випромінювання, вакуум або мікрохвильові технології.

Зовнішній вигляд камер показано на рис. 2.2.



Рис. 2.2. Камера штучного сушіння деревини

Процес атмосферного сушіння поділяється на кілька етапів. Спочатку видаляється поверхнева волога, що забезпечує швидке випаровування. Далі відбувається поступове видалення внутрішньої вологи, що потребує більше часу. Завершальним етапом є вирівнювання вологості по всій товщині деревини до рівня рівноважної вологості, яка залежить від кліматичних умов і становить 8–15%.

Основними перевагами атмосферного сушіння є його простота, економічність і екологічність, оскільки цей метод не потребує додаткових енерговитрат. Проте він має й суттєві недоліки: значна тривалість, залежність від погодних умов, обмеження у досягненні низького рівня вологості та можливість утворення дефектів, таких як тріщини, деформації або зміна кольору деревини.

Цей метод використовується переважно для попереднього сушіння перед камерним або вакуумним сушінням, а також для деревини, що застосовується у менш відповідальних конструкціях, як-от будівельні матеріали або упаковка. Організація процесу сушіння вимагає дотримання правильних умов розташування деревини та регулярного контролю вологості, щоб уникнути дефектів і забезпечити якісне висихання матеріалу.

2.3 Конвективний тип сушіння

Конвективний тип сушіння — це метод штучного сушіння, заснований на використанні гарячого повітря, яке циркулює через штабелі деревини, забезпечуючи випаровування води. Цей спосіб є одним із найпоширеніших у промисловості завдяки його ефективності, відносно низькій вартості та можливості регулювання параметрів сушіння.

Процес сушіння контролюється автоматично по вологості деревини. Автоматична підтримка температури й вологості повітря - для кожного ступеня сушки, що досягається за рахунок управління: клапаном калорифера, клапаном системи зволоження, приводами заслінок вентиляції, реверсом вентиляторів. Перехід на наступну фазу сушіння відбувається автоматично у залежності від вологості деревини. Зовнішній вигляд камери зображено на рис. 2.3.



Рис 2.3. Зовнішній вигляд конвективних сушильних камер

На рис. 2.4 зображено графік, який розкриває суть механізму конвективного сушіння деревини, коли режим традиційно ведеться за двома параметрами: сухого і змоченого термометра.

Процес конвективного сушіння пилопродукції завжди супроводжується нерівномірним розподілом вологовмісту (вологості) деревини по об'єму сортиментів. Ця нерівномірність розподілу вологості (наприклад, за товщиною матеріалу) є, з одного боку, потенціалом сушіння, а з іншого боку, — причиною виникнення вологісних деформацій та, як наслідок, внутрішніх напружень, які призводять до жолоблення або розтріскування матеріалу.

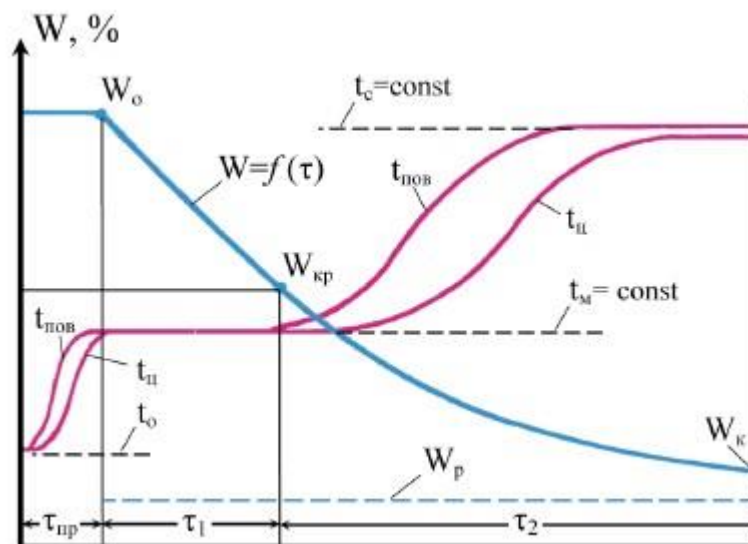


Рис. 2.4. Механізм конвективного сушіння деревини

Конвективний метод сушіння деревини є ефективним і гнучким рішенням для промислового виробництва. Завдяки можливості регулювання параметрів він дозволяє отримувати деревину високої якості, адаптуючи процес до різних порід і вимог. Однак для досягнення оптимальних результатів важливо забезпечити точний контроль температури, вологості та циркуляції повітря в сушильній камері.

2.4 Комбінований тип сушіння

Комбінований тип сушіння — це метод, що поєднує різні способи видалення вологи для оптимізації процесу. Його основна ідея полягає в комбінуванні природного сушіння та штучних методів, таких як конвективне, вакуумне або інфрачервоне сушіння, з метою досягнення високої якості деревини за короткий час і з мінімальними витратами енергії.

Процес зазвичай розпочинається з атмосферного сушіння, коли деревина висихає природним шляхом до певного рівня вологості, наприклад, 20–25%. Це дозволяє знизити початкову вологість без значних енерговитрат. Після цього деревину переміщують у сушильну камеру, де завершується процес за допомогою штучного методу. Залежно від умов і кінцевих вимог, можуть застосовуватися різні технології, як-от конвективний або вакуумний метод.

Основна перевага комбінованого сушіння полягає у зниженні загальних витрат на енергію, оскільки найбільш енергоємний етап сушіння виконується після того, як природним шляхом видалено значну частину вологи. Крім того, цей метод забезпечує рівномірність вологості в деревині та зменшує ризик дефектів, таких як тріщини чи деформації, завдяки плавному переходу між природними і штучними умовами.

Комбінований тип сушіння часто застосовують для обробки великих обсягів деревини або цінних порід, коли важливо досягти балансу між економічністю, якістю та швидкістю процесу. Він є ефективним рішенням для виробництва меблів, будівельних матеріалів, а також декоративних і функціональних дерев'яних виробів.

Зовнішній вигляд камери приведено на рис. 2.5.



Рис. 2.5. Комбіновані сушильні камери

2.5 Кондуктивний тип сушіння

Кондуктивний тип сушіння деревини — це метод, при якому волога видаляється завдяки нагріванню деревини через безпосередній контакт із нагрітою поверхнею. Джерелом тепла зазвичай є спеціальні нагрівальні плити або елементи, які забезпечують передачу тепла до деревини за рахунок теплопровідності. Цей спосіб використовується переважно для сушіння тонких шарів деревини або дерев'яних матеріалів, таких як фанера, деревні плити або шпони.

Процес сушіння відбувається в кілька етапів. На початковому етапі нагрівання деревини сприяє інтенсивному випаровуванню поверхневої вологи. Потім, у міру прогрівання матеріалу, волога з внутрішніх шарів переміщується до поверхні і випаровується. Завдяки прямому контакту деревини з нагрівальною поверхнею забезпечується рівномірне прогрівання і швидке видалення вологи.

Основною перевагою кондуктивного сушіння є його висока ефективність для тонких матеріалів і точний контроль температури. Цей метод дозволяє уникнути надмірного пересушування та забезпечує рівномірність процесу. Однак його використання обмежене товщиною деревини, оскільки нагрівання глибоких шарів відбувається повільніше, що може знижувати загальну швидкість сушіння для масивних виробів.

Кондуктивний тип сушіння зазвичай використовується в промислових умовах для обробки фанери, деревних плит, шпону або тонких дощок, де потрібна швидкість, точність і висока якість кінцевого матеріалу. Він є менш енергоємним порівняно з іншими методами для таких типів продукції, але вимагає спеціального обладнання, яке забезпечує рівномірний контакт і контроль температури. Зовнішній вигляд камер зображено на рис. 2.6.



Рис. 2.6. Зовнішній вигляд кондуктивних сушильних камер

2.6 Радіаційний тип сушіння деревини

Зовнішній вигляд камер зображено на рис. 2.7.



Рис. 2.7. Зовнішній вигляд радіаційних сушильних камер

Радіаційний тип сушіння деревини — це метод, при якому волога випаровується за рахунок нагрівання деревини інфрачервоним випромінюванням. Інфрачервоні джерела тепла передають енергію поверхні деревини, нагріваючи її до температури, яка сприяє випаровуванню вологи. Цей процес забезпечує швидке видалення вологи з поверхневих шарів, а потім із внутрішніх за рахунок теплопередачі.

Радіаційне сушіння має перевагу у швидкості, оскільки інфрачервоне випромінювання нагріває матеріал безпосередньо, мінімізуючи втрати енергії на нагрівання навколишнього повітря. Це робить метод енергоефективним, особливо для сушіння тонких шарів деревини, таких як фанера, шпон або декоративні деталі. Завдяки високій інтенсивності теплової енергії цей спосіб дозволяє суттєво скоротити час сушіння.

Однак радіаційне сушіння має обмеження у використанні для товстих матеріалів. Інфрачервоне випромінювання проникає тільки у поверхневі шари, що може призводити до пересушування зовнішніх шарів, поки внутрішня волога залишається не видаленою. Це підвищує ризик утворення тріщин або деформацій деревини, особливо для масивних виробів.

Радіаційний тип сушіння широко застосовується для обробки тонких і декоративних дерев'яних матеріалів, де важливі швидкість і якість. Він підходить для виробництва фанери, дерев'яних панелей, меблевих елементів або деталей, які потребують мінімального часу на сушіння і високої точності обробки. Метод вимагає спеціального обладнання, включаючи інфрачервоні нагрівальні елементи, системи контролю температури і вологості, що забезпечує ефективний і контрольований процес.

3. РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

3.1 Вибір та обґрунтування структури системи управління та її опис

Камерне сушіння деревини є складним технологічним процесом, який має кілька важливих характеристик: велика кількість параметрів, їхній складний взаємозв'язок та вплив неконтрольованих зовнішніх факторів. Модель цього складного об'єкта можна описати через такі групи параметрів:

1. Вхідні параметри X_1 : це група контрольованих, але не регульованих технологічних характеристик процесу. Сюди входять такі фактори, як кількість і тип деревини (порода, розмір пиломатеріалів, початкова вологість).

2. Неконтрольовані вхідні параметри X_2 : вони враховують вплив зовнішніх факторів, зокрема змін кліматичних умов, старіння й зносу обладнання, неоднорідності деревини та нерівномірного її розташування в камері сушіння.

3. Керуючі параметри U : ця група описує регулюючі дії, які підтримують задані режими сушіння. Сюди належать кількість теплової енергії та швидкість циркуляції повітря або іншого сушильного агента.

4. Вихідні параметри Q : вони характеризують якість висушеної деревини. Зокрема, це рівень залишкової вологості, її рівномірність у поперечному перерізі пиломатеріалів і величина залишкових внутрішніх напружень.

5. Ефективні вихідні параметри E : ця група відображає економічну ефективність сушіння. Вона включає мінімальну тривалість процесу, збереження якості деревини та показники енергоефективності сушильної установки.

Таким чином, камерне сушіння є багатокомпонентною системою, в якій необхідно враховувати різні групи параметрів, що впливають на результативність і якість процесу.

При автоматизації процесу сушіння треба застосувати таку систему, яка б забезпечила проведення сушіння в режимі, близькому до оптимального, тобто повинні бути отримані задані параметри Q при максимальних значеннях параметрів E .

Ця задача може вирішуватися при застосуванні самонастроювальних систем, що вибирають таку комбінацію керуючих параметрів U , що забезпечують екстремальне значення параметра F .

На рис. 3.1 показана структурна схема системи автоматичної оптимізації (САО) процесу сушіння. Крім основних ланок звичайної системи автоматичного регулювання регульованого об'єкта O та автоматичного регулятора P , у схему введений керуючий пристрій K_{Π} . Керуючий пристрій аналізує та підтримує на оптимальному рівні вихідні величини об'єкта (камери) при дотриманні заданих обмежень H .

Для підтримки оптимальних вихідних параметрів САО робить автоматичний пошук, що зводиться до спробної зміни вхідних параметрів системи (вхідної величини X -р регулятора і регулюючих впливів B), аналізу результату.

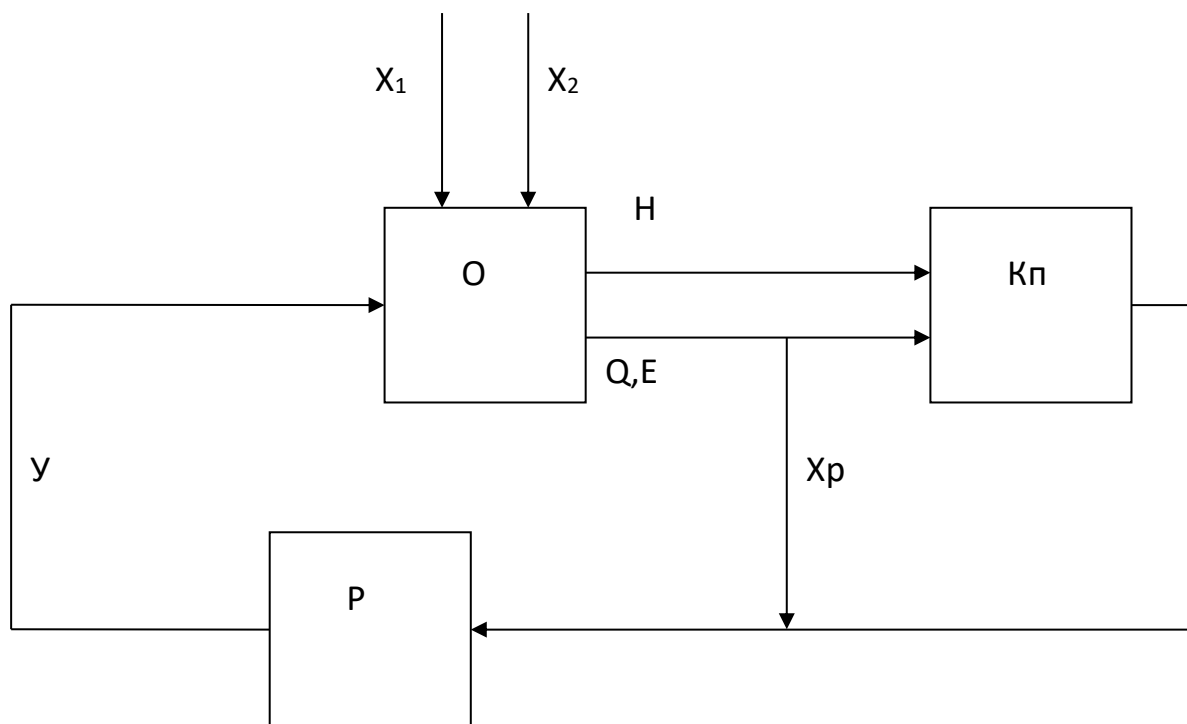


Рис. 3.1. Структурна схема системи автоматичної оптимізації : O – об'єкт

регулювання; P – регулятор; K_p – керуючий пристрій, X_1, X_2 — вхідні параметри; U — регулюючий вплив; Q, E — параметри об'єкта, що характеризують якість і економічність; H — обмеження

Цієї зміни і визначенню напрямку подальшої зміни для приведення системи до найвигіднішого режиму сушіння. За критерій оптимальності процесу сушіння вибирається один чи кілька вихідних параметрів Q і E , при цьому інші показники задаються в САО у вигляді обмежень H . Наприклад, за критерій оптимальності вибирають інтенсивність сушіння, а як обмеження задають збереження визначених показників якості матеріалу при сушінні.

Для створення систем автоматичного управління (САО) необхідно використовувати не лише екстремальні регулятори та стандартні засоби автоматики, але й спеціалізовані вимірювальні пристрої, зокрема:

- а) для моніторингу якісних характеристик матеріалу під час сушіння, таких як температура і вологість деревини, різниця вологості по товщині матеріалу, а також внутрішні напруження, що виникають у процесі сушіння;
- б) для оцінки енергетичних параметрів процесу, наприклад, витрати теплової енергії на сушіння або на випаровування 1 кг води;
- в) для вимірювання швидкості сушіння, зокрема з використанням автоматичних вологомірів, оснащених пристроями для диференціювання, та інших аналогічних приладів.

Відсутність розроблених методів для подібного автоматичного керування і технічних засобів для його здійснення не дозволяє в даний час орієнтуватися при автоматизації сушильного процесу на системи автоматичної оптимізації.

Система регулювання температури та вологості сушильного агента працює у розімкненому контурі відносно параметрів, які описують стан деревини, що сушиться (температура T , вологість W , якісні характеристики Q). Інформація про ці параметри не використовується регуляторами температури та вологості сушильного агента. У зв'язку з цим така система не здатна гарантувати досягнення заданої кінцевої вологості та необхідної якості

висушеного матеріалу. Щоб уникнути дефектів, режими сушіння часто налаштовуються на занижені параметри, що стримує можливість інтенсифікації процесу.

Незважаючи на це, автоматизовані системи регулювання, орієнтовані на параметри сушильного агента, активно використовуються у промисловості й демонструють свою ефективність під час експлуатації.

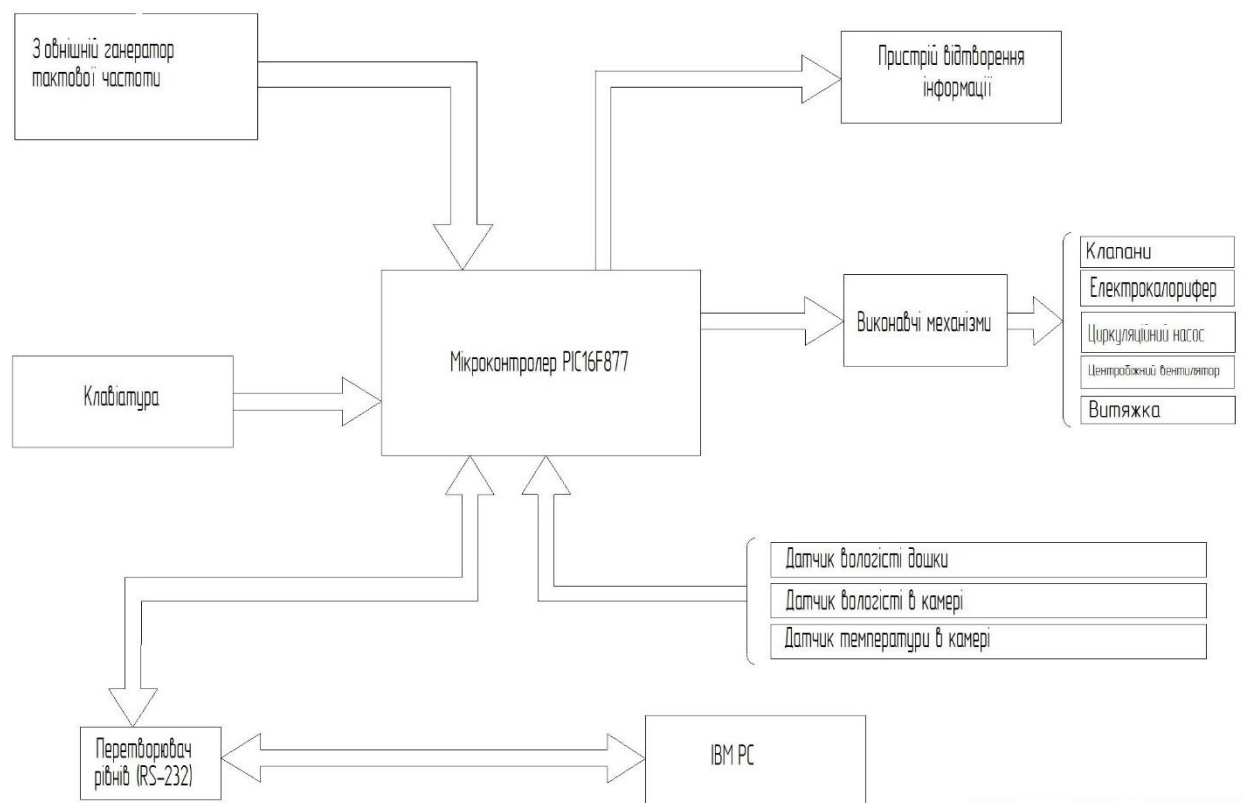


Рис. 3.2. Структурна схема автоматизованої системи

3.2 Вибір датчиків та виконавчих механізмів

Датчики температури

Датчик температури TCN75 — це цифровий термометр і термостат, який використовується для вимірювання температури з високою точністю. Він заснований на напівпровідниковій технології і забезпечує вихідні дані через інтерфейс I²C. Датчик ідеально підходить для використання в системах

контролю температури, автоматизації, побутовій техніці та промислових установках.

Основні характеристики TCN75

- Діапазон вимірювання температури: від -40°C до $+125^{\circ}\text{C}$.
- Точність вимірювання:
 - $\pm 1^{\circ}\text{C}$ у діапазоні від 0°C до 100°C .
- Інтерфейс зв'язку: I²C.
 - Дозволяє підключати до 8 пристроїв на одну шину.
- Роздільна здатність:
 - Параметри можна налаштувати, роздільна здатність до 12 біт (0.0625°C).
- Напруга живлення:
 - Від 2.7 В до 5.5 В.
- Споживання енергії:
 - У режимі активного вимірювання: близько 200 мкА.
 - У режимі очікування: менше 1 мкА.

Функціональність

1. Режими роботи:
 - Контроль температури: Підтримує налаштування для порогових значень температури (TSET) і температури відключення (THYST).
 - Автоматичний перехід у режим очікування для зниження енергоспоживання.
2. Пам'ять конфігурації:
 - Зберігає налаштування навіть після вимкнення живлення.
3. Гнучке налаштування:
 - Дозволяє змінювати частоту опитування та роздільну здатність через конфігураційний регістр.

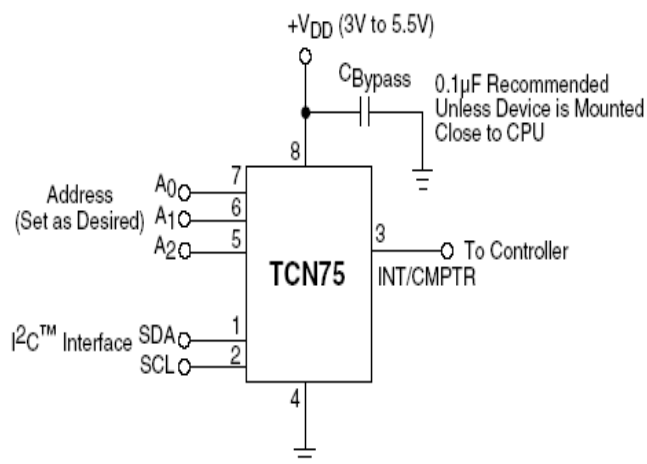


Рис 3.3. Структурна діаграма датчика

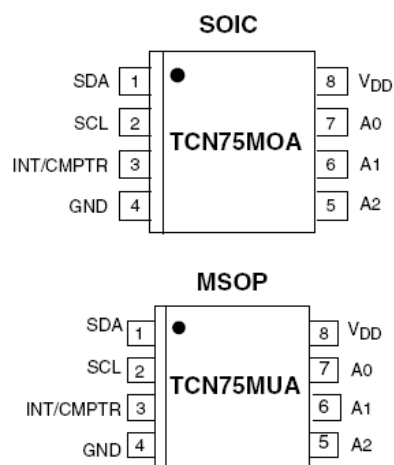


Рис 3.4. Тип корпусу

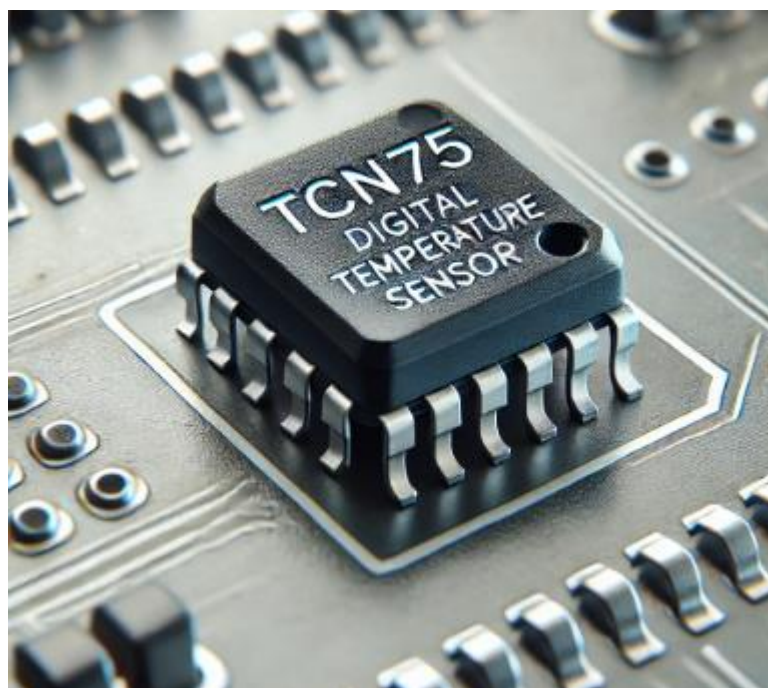


Рис.3.5. Загальний вигляд

Датчик відносної вологості

Датчик відносної вологості HCH-1000 —це ємнісний датчик, призначений для вимірювання відносної вологості повітря. Він забезпечує високу точність, швидкий час відгуку та стабільність роботи, що робить його придатним для використання в системах контролю клімату, автоматизації, промислових та побутових пристроях (рис. 3.6).



Рис.3.6. Зовнішній вигляд датчика відносної вологості

Вимірює вологість на основі зміни ємності спеціального чутливого шару, яка залежить від кількості молекул води у повітрі.

- ☐ Діапазон вимірювання:
 - Від 0% до 100% RH (відносної вологості).
- ☐ Точність:
 - $\pm 2\text{--}3\%$ RH у діапазоні від 20% до 90% RH.
- ☐ Час відгуку:
 - Порядку кількох секунд для адаптації до змін вологості.
- ☐ Робочий діапазон температур:
 - Від -40°C до $+85^{\circ}\text{C}$.
- ☐ Робоча напруга:
 - Від 5 В до 10 В.

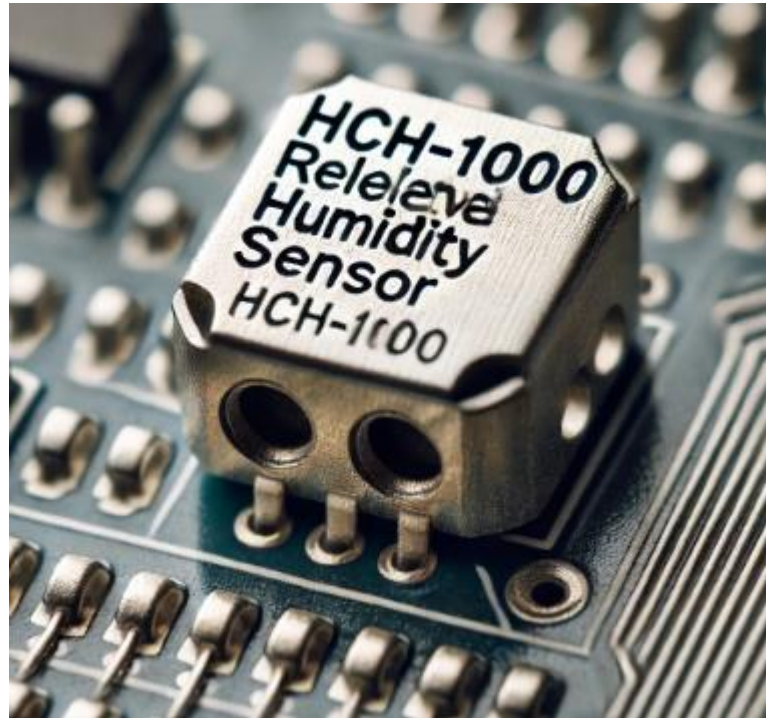


Рис.3.7. Монтажні розміри

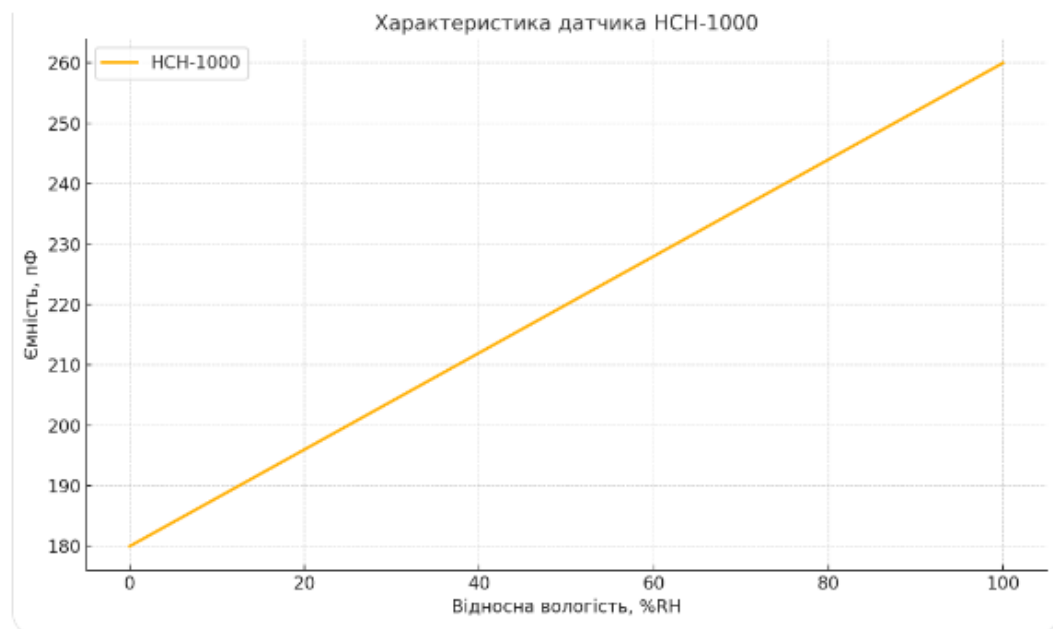


Рис.3.8. Вихідні характеристики

Графік відображає залежність ємності датчика HCH-1000 від відносної вологості повітря. Він демонструє лінійну характеристику, що є важливим для точного вимірювання вологості в різних умовах.

Центробіжний вентилятор

Центробіжний вентилятор — це пристрій для переміщення повітря або газових сумішей, який працює за принципом відцентрової сили. Він широко використовується в системах вентиляції, кондиціонування повітря, промислових сушарках, а також у технологічних процесах, де потрібно забезпечити циркуляцію або видалення газів. Центробіжний вентилятор заснований на відцентровій силі. Повітря входить у вентилятор через центральний отвір колеса, яке обертається. Лопатки колеса надають повітрям енергію, що змушує його рухатися від центру до периферії. Вихідний потік повітря спрямовується під кутом 90° до осі входу, забезпечуючи високий тиск і продуктивність.

На рис. 3.9. показано центробіжний вентилятор. Колесо обертається приводом 2, вал якого проходить всередину корпусу.

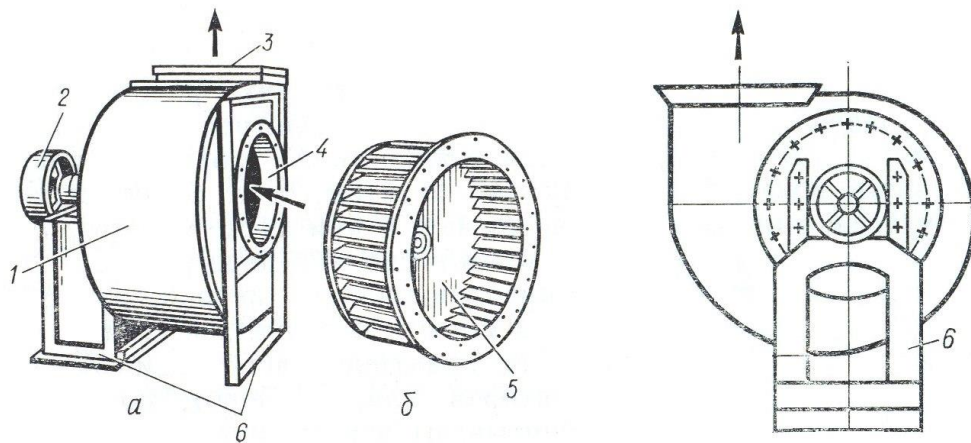


Рис. 3.9. Центробіжний вентилятор: а – загальний вигляд; б – колесо; в – вид зі сторони приводу; 1 – корпус; 2 – привідний шків; вихлопний отвір; 4 – всмоктуючий отвір корпусу; 5 – всмоктуючий отвір колеса; 6 – станина корпусу

У центрі бокового колеса є циліндричний отвір для кріплення колеса на кінець валу в середині корпусу. Повітря потрапляє в бокову частину корпусу, а виходить з корпусу під кутом 90° градусів. У лісосушильній техніці використовуються вентилятори низького тиску – до 1000 Па. Центробіжний вентилятор є універсальним рішенням для систем, де потрібно створювати

стабільний потік повітря при високому тиску, і залишається ключовим компонентом у багатьох інженерних та промислових сферах.

Електрокалорифер (рис. 3.10).

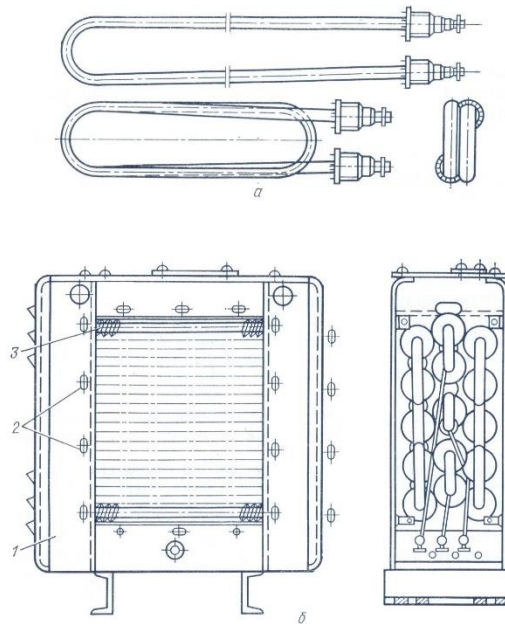


Рис. 3.10. Електрокалорифер

Електрокалорифер — це пристрій, призначений для нагрівання повітря шляхом перетворення електричної енергії в теплову. Він широко використовується в системах вентиляції, обігріву приміщень, промислових сушарках та інших установках, де необхідне нагрівання повітряного потоку. Електрокалорифер працює за принципом примусового нагрівання повітря, що проходить через нагрівальні елементи. Повітряний потік, створюваний вентилятором, проходить через спіральні або пластинчасті електричні нагрівачі, які передають йому теплову енергію.

Температура повітря на виході регулюється за допомогою терморегуляторів або спеціальних контролерів, що забезпечують автоматичне підтримання заданих параметрів.

Циркуляційний насос

Циркуляційний насос — це пристрій, який забезпечує примусову циркуляцію рідини в замкнутих системах, таких як системи опалення,

кондиціонування, водопостачання та охолодження. Він використовується для підтримання рівномірного розподілу тепла чи холоду, забезпечуючи ефективну роботу всієї системи.

Циркуляційний насос перекачує рідину через систему за допомогою обертання робочого колеса (імпелера). Пристрій створює перепад тиску, що змушує рідину рухатися по трубопроводах. Насос не змінює фізико-хімічних властивостей рідини, а лише забезпечує її рух.

Типи циркуляційних насосів

- Мокрий ротор: Ротор двигуна занурений у перекачувану рідину, яка слугує змащенням і охолодженням. Ці насоси малошумні, підходять для побутових систем опалення.
- Сухий ротор: Ротор ізолюваний від рідини, використовуються для потужних промислових систем. Вони забезпечують більшу продуктивність, але видають більше шуму.

Циркуляційні насоси Grundfos має просте електричне під'єднання, низький рівень шуму, високоякісні матеріали, низьке енергоспоживання, захист електродвигуна не потрібен, широка номенклатура та широкий спектр використання. Циркуляційний насос дозволяє підтримувати постійну температуру води в системі гарячого водопостачання.

Для циркулювання води в водяному контурі обігріву камери вибираємо циркуляційний насос Grundfos UPS 25-20.



Рис. 3.11. Циркуляційний насос

Вибір мікроконтролера

Для виконання поставлених до системи автоматизації вимог вибираємо комплекс побудований на базі мікроконтролера PIC16F877 та засобів вимірювання та індикації стану системи автоматизації.

PIC16F877 однокристальний 8-розрядний FLASH CMOS мікроконтролер компанії Microchip Technology Incorporated.

Характеристика мікроконтролера

PIC16F877 — це універсальний 8-бітний мікроконтролер серії PIC16 від компанії Microchip Technology. Завдяки своїм функціональним можливостям і простоті програмування, він широко використовується в автоматизації, управлінні пристроями та системами, а також в освітніх і промислових проектах. [8]

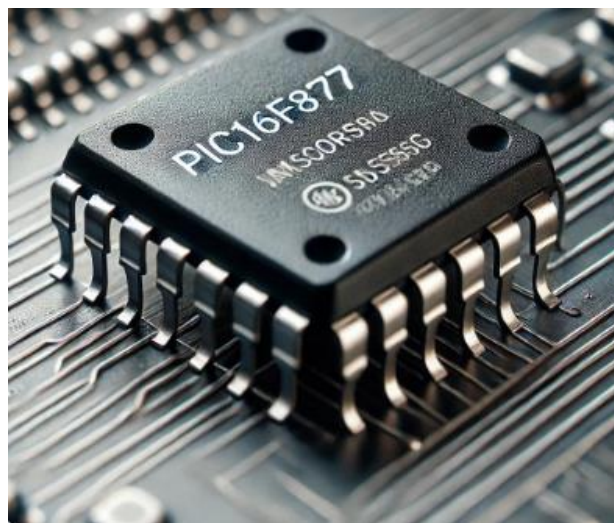


Рис 3.12. Технологічні розміри мікроконтролера PIC16F874/877

4. РОЗРОБКА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ ТА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

4.1. Функціональна схема системи управління

Функціональна схема автоматизації є ключовим документом, що описує структурну організацію системи керування. У проекті, що стосується процесу вакуумного сушіння деревини, така схема надана у графічній частині. Система включає сушильну камеру, вентилятори, насоси та мікропроцесорний комплекс, який базується на мікроконтролері PIC16F877 з підключенням периферійних датчиків для збору технічних параметрів.

Робота системи організована наступним чином. До початку сушіння система знаходиться в режимі готовності. Після завантаження деревини та її попереднього прогрівання оператор задає стартову команду. Вводяться бажані значення вологості для кожного етапу сушіння, а також параметри температури та вологості повітря в камері, що залежать від породи деревини та її геометричних характеристик. Після введення даних система починає працювати відповідно до заданих параметрів.

Нагрівальні котли запускаються, і гаряча вода подається до теплообмінників. Тепле повітря циркулює в сушильній камері. Мікроконтролер PIC16F877 отримує дані від датчиків вологості та температури в камері та безпосередньо в матеріалі, а також приймає інформацію про стан заслінок вентиляції через канали дискретного вводу. На основі отриманих даних мікроконтролер обробляє сигнали та управляє процесом.

На першому етапі сушіння, якщо вологість дошки перевищує задане порогове значення, система підтримує роботу в рамках цього етапу. При досягненні граничного рівня температури в камері, характерного для поточного етапу, мікроконтролер зупиняє нагрів котла. Якщо вологість повітря в камері перевищує допустимий рівень, система вимикає витяжний

вентилятор і відкриває вентиляційні заслінки. Цей цикл повторюється, поки не виконуються умови для переходу на наступний етап сушіння.

Система реалізує два типи регулювання температури: "грубе" та "точне". Для "грубого" регулювання використовується рідинний та повітряний контур обігріву камери, тоді як для "точного" — електрокалорифер, яким керує мікроконтролер. На панелі управління виводяться поточні значення температури, вологості в камері та вологості матеріалу.

Коли вологість у камері знижується до певного рівня, витяжний вентилятор зупиняється, а вентиляційні заслінки закриваються, щоб уникнути виникнення внутрішніх напружень і деформацій деревини. При завершенні етапу сушіння мікроконтролер подає сигнал оператору про необхідність переходу до наступного етапу. Після досягнення кінцевого значення вологості матеріалу процес автоматично зупиняється, і контролер повідомляє про завершення сушіння.

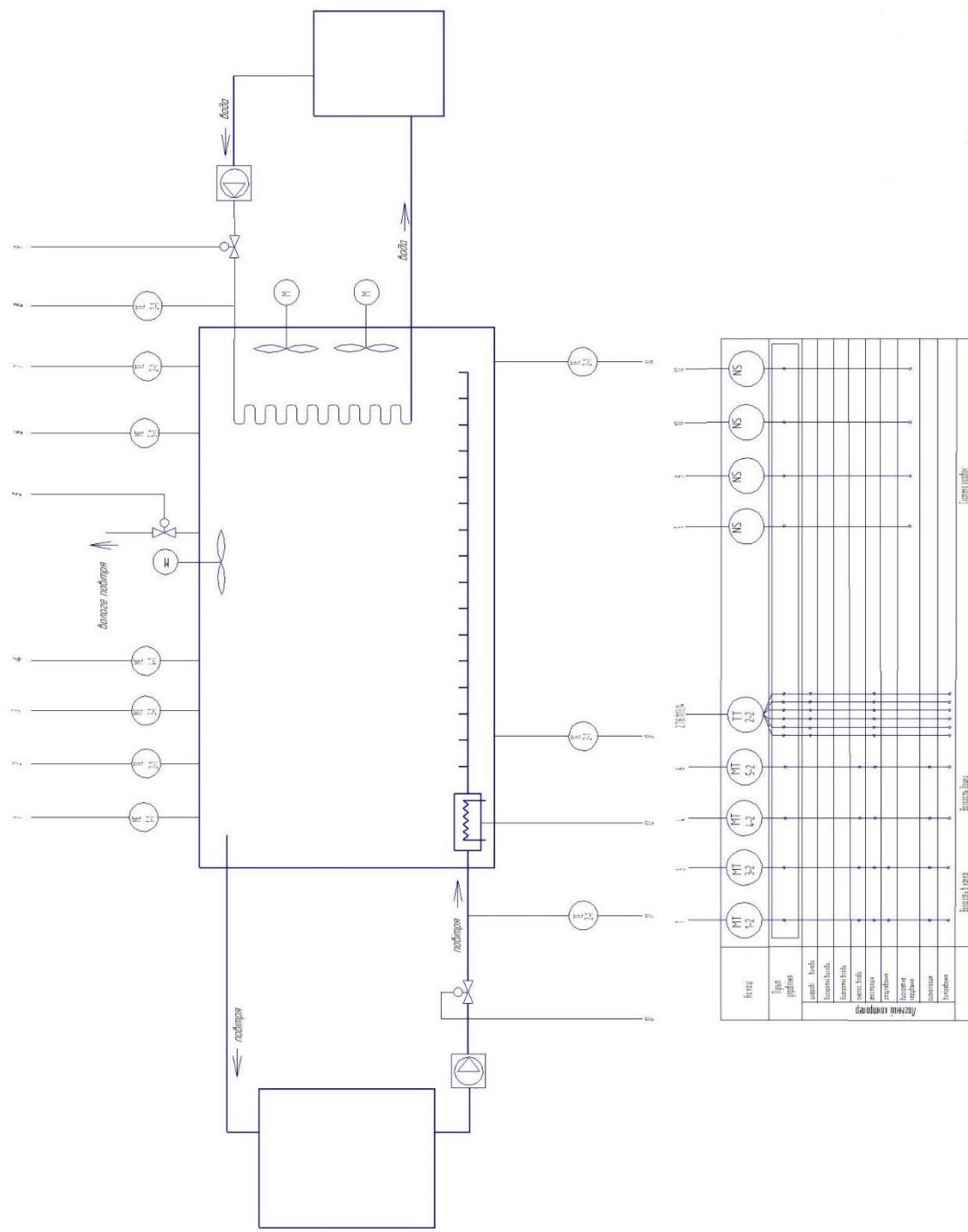


Рис. 4.1. Функціональна схема системи

4.2 Розробка електричної принципової схеми автоматизованої системи

Розроблено електричну принципову схему автоматизованої системи сушіння деревини на основі сучасної елементної бази, яку приведено на рис. 4.2.

4.3 Дослідження динамічних властивостей сушильної камери

Дослідження динамічних властивостей сушильної камери — це ключовий етап у проектуванні та налаштуванні систем автоматизації процесу сушіння деревини. Воно дозволяє оцінити поведінку системи в реальному часі, враховуючи зміну основних параметрів, таких як температура, вологість повітря, швидкість циркуляції повітря та стан деревини. Ці дослідження спрямовані на забезпечення стабільного, ефективного і якісного процесу сушіння. [7].

Математичний опис процесу сушіння деревини базується на врахуванні тепло- і масообмінних процесів, які відбуваються між деревиною, сушильним агентом (повітря) та системою сушіння. Основою для такого опису є системи диференціальних рівнянь, які описують зміну вологості, температури та енерговитрат у часі.

Основні змінні

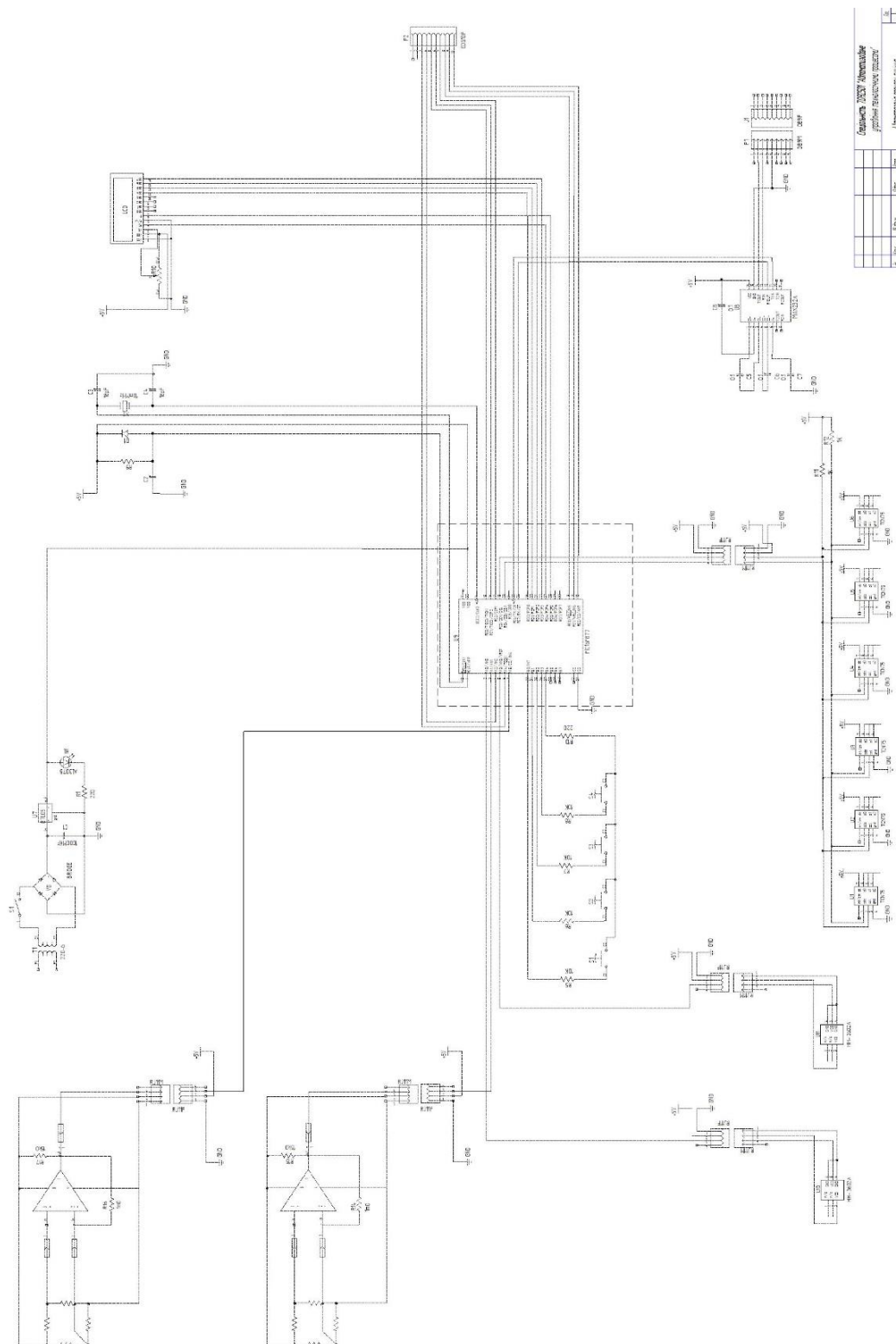
- $W(t)$ — вологість деревини в момент часу t , %.
- $T_d(t)$ — температура деревини в момент часу t , °C.
- $T_a(t)$ — температура сушильного агента в момент часу t , °C.
- $H_a(t)$ — відносна вологість сушильного агента в момент часу t , %.
- $Q(t)$ — кількість тепла, переданого деревині, Дж.

Процес видалення вологи описується рівнянням:

$$\frac{dW}{dt} = -k_m \cdot (W - W_{eq}),$$

де:

- k_m — коефіцієнт масопереносу, який залежить від породи деревини, температури та швидкості повітря, с^{-1} ;
- Weq — рівноважна вологість деревини при даних умовах сушіння, %.



Температура деревини змінюється відповідно до рівняння:

$$c_d \cdot \rho_d \cdot \frac{dT_d}{dt} = \alpha \cdot (T_a - T_d) - r_v \cdot \frac{dW}{dt},$$

де:

- c_d — теплоємність деревини, Дж/(кг·°C);
- ρ_d — щільність деревини, кг/м³;
- α — коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м²·°C);
- r_v — теплота випаровування води, Дж/кг.

Тепло, яке передається сушильним агентом деревині, визначається як:

$$Q = \dot{m}_a \cdot c_a \cdot (T_{a,in} - T_{a,out}),$$

де:

- $\dot{m}_a$ — масова витрата сушильного агента, кг/с;
- c_a — теплоємність сушильного агента, Дж/(кг·°C);
- $T_{a,in}, T_{a,out}$ — температура сушильного агента на вході і виході з камери, °C.

Відносна вологість сушильного агента змінюється згідно з рівнянням:

$$\frac{dH_a}{dt} = -k_h \cdot (H_a - H_{a,eq}),$$

де:

- k_h — коефіцієнт масообміну між сушильним агентом і деревиною, с⁻¹;
- $H_{a,eq}$ — рівноважна вологість агента.

Математична модель процесу сушіння деревини дозволяє оптимізувати режими сушіння, зменшити енерговитрати та покращити якість деревини. Її

використання дає можливість симулювати процес, враховуючи всі основні фізичні закономірності, та знаходити найбільш ефективні параметри для реальної системи.

Математична модель процесу сушіння деревини дозволяє оптимізувати режими сушіння, зменшити енерговитрати та покращити якість деревини. Її використання дає можливість симулювати процес, враховуючи всі основні фізичні закономірності, та знаходити найбільш ефективні параметри для реальної системи. З попереднього рівняння видно, що двопозиційні регулятори постійно здійснюють на об'єкт регулювання вплив, відмінний від значення необхідного для рівноважного стану системи ($\epsilon=0$). У результаті цього автоматична система з двопозиційним регулятором працює в автоколивальному режимі в околі її рівноважного положення. Статична характеристика $\mu=f(\epsilon)$.

Для визначення оптимальних параметрів налаштування регулятора складемо структурну схему автоматичної системи з регулятором (рис. 4.3)

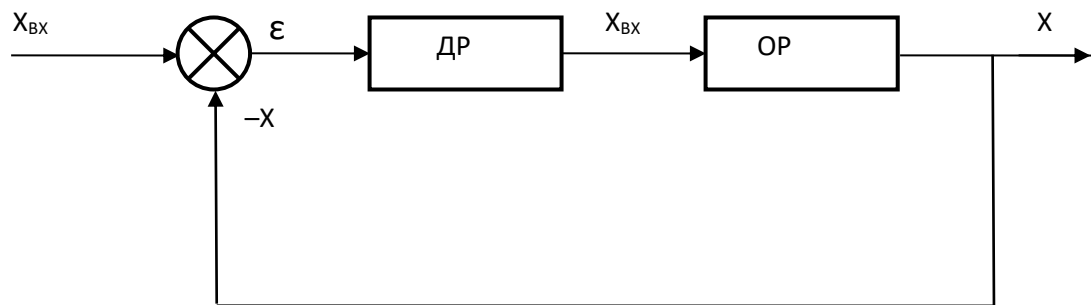


Рис.4.3. Структурна схема автоматичної системи з двопозиційним регулятором

Проведемо більш детальні дослідження і визначимо запаси стійкості системи по амплітуді та фазі. Для цього в середовищі MATLAB побудуємо графіки АЧХ та ФЧХ системи:

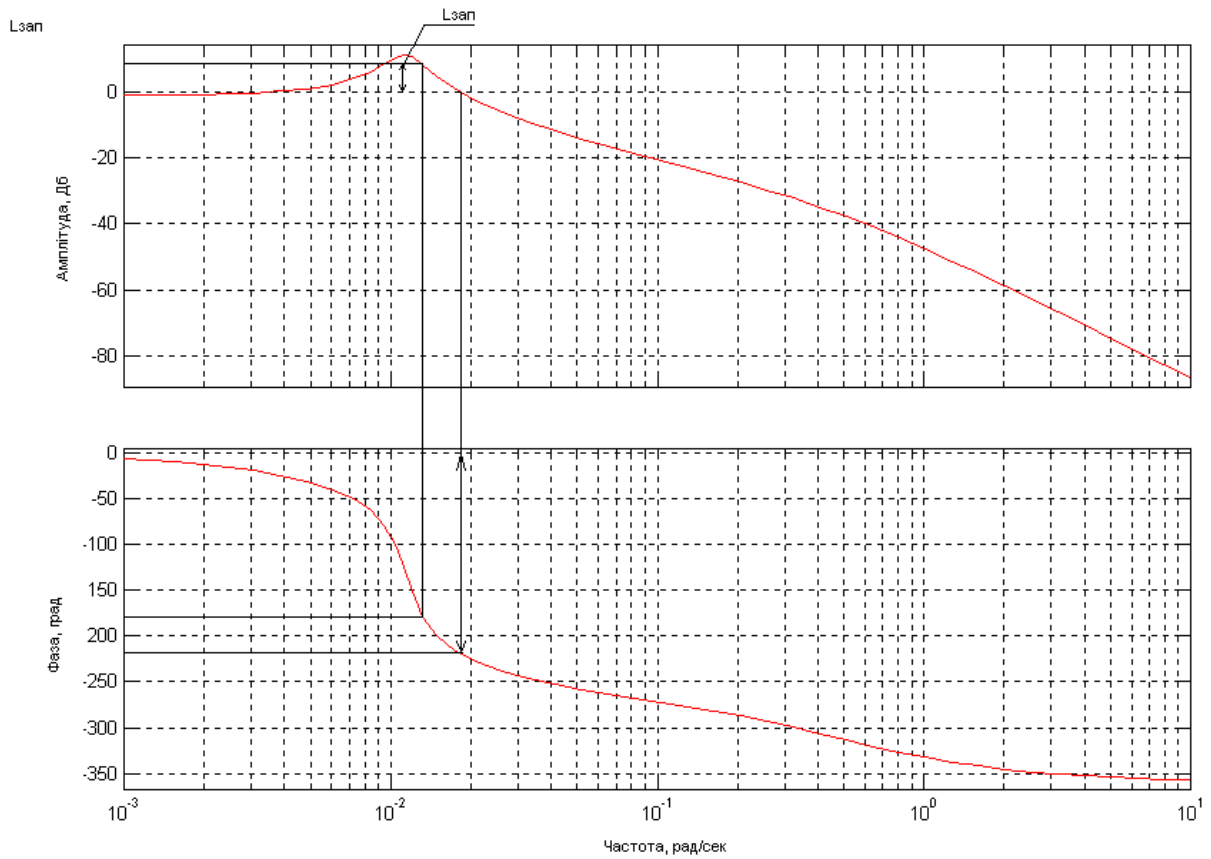


Рис. 4.5. АЧХ та ФЧХ системи

З побудованих графіків ми бачимо, що запас стійкості по амплітуді складає 10 Дб, а запас стійкості по фазі 220 градусів. Дані значення перевищують мінімально допустимі, а тому можна сказати, що система є стійкою.

5. РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ РЕАЛІЗАЦІЇ ЗАКОНУ УПРАВЛІННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ

5.1 Алгоритму реалізації закону управління

Дослідження поставленої задачі виявило, що для глибокого розуміння процесу необхідно детально вивчити технологію сушіння деревини в умовах триступеневого камерного режиму. У процесі розробки системи автоматизації було проведено аналіз можливих станів системи та факторів, які викликають їхні зміни. Враховуючи всі аспекти технологічного процесу та вплив пріоритетних факторів на стан системи, був створений алгоритм роботи триступеневої камерної сушарки, представлений у вигляді блок-схеми на рисунку 5.1.

В результаті впливу факторів, які змінюють стан системи, мікроконтролерна система генерує дискретні сигнали високого та низького рівнів на вихідних каналах, тим самим керуючи перебігом процесу.

На етапі завантаження пиломатеріалів система перебуває у стані «повна зупинка процесу сушіння». У цьому стані не активовані ані повітряний, ані рідинний контур обігріву, електрокалорифер вимкнений, вентилування в камері не проводиться, а клапан вентилування зачинений.

Далі виконується прогрівання камери разом із завантаженими пиломатеріалами. Тривалість прогрівання визначається розрахунком: 1 година на кожен сантиметр товщини деревини.

Наступним кроком є запуск мікроконтролерної системи (МКС) разом із пристроями для збору інформації. МКС надсилає запити на введення бажаних значень вологості для кожного з трьох ступенів сушіння, а також значень температури та вологості в камері для відповідних етапів.

Після того як оператор вводить необхідні параметри, подається команда на початок процесу сушіння. МКС зчитує початкові значення вологості завантажених пиломатеріалів і, на основі отриманих даних, система переходить до виконання першого етапу триступеневого процесу сушіння.

Сушіння у межах певного ступіння виконується до того часу поки виконується умова ($Wd. < Wd.c.*$).

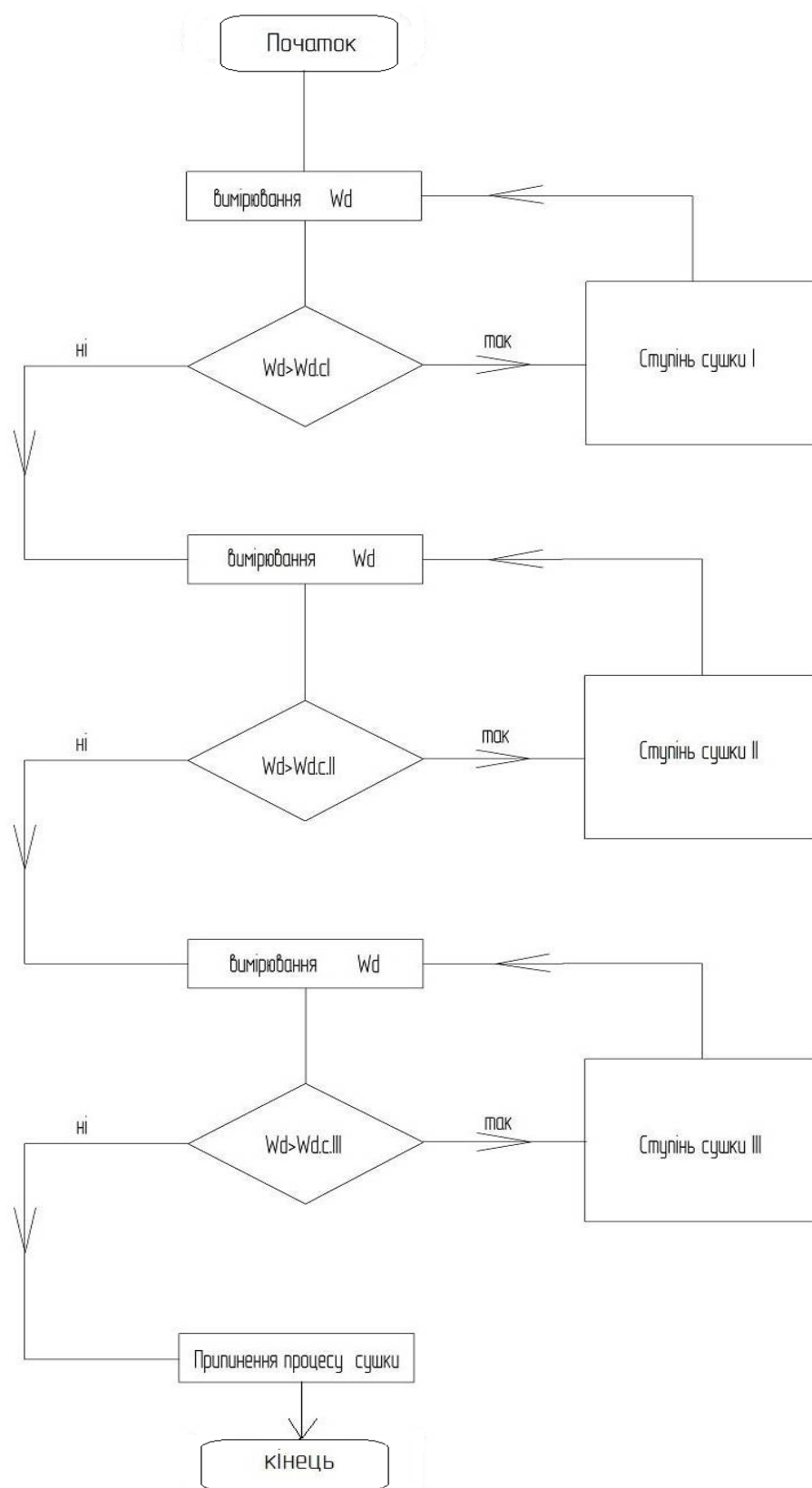
Де: $Wd.$ – вологість дошки у момент збору інформації,

$Wd.c.*$ - бажана вологість дошки для даного ступеню сушіння деревини (вводиться оператором на початку).

МКС отримує від датчиків поточні значення температури та вологості в камері (T_k, W_k). Дані значення температури і вологості порівнюються з тими, які відповідають значенням що потрібно досягнути для даного ступеню сушіння. У результаті порівняння МКС формує керуючі сигнали на пристрої що регулюють температуру та здійснюють вентилявання камери, тим самим зменшують вологість повітря у камері.

При виконанні умови $T_k < T_{k.c.}(*)$ вмикається електрокалорифер, в протилежному випадку МКС дає сигнал на вимкнення. Відкриття клапану вентилявання та включення вентилятору витяжки відбувається при виконанні умови $W_k < W_{k.c.}(*)$.

В залежності від стадії сухості пиломатеріалів змінюється циклічність зміни станів системи та тривалість перебування в певному стані.



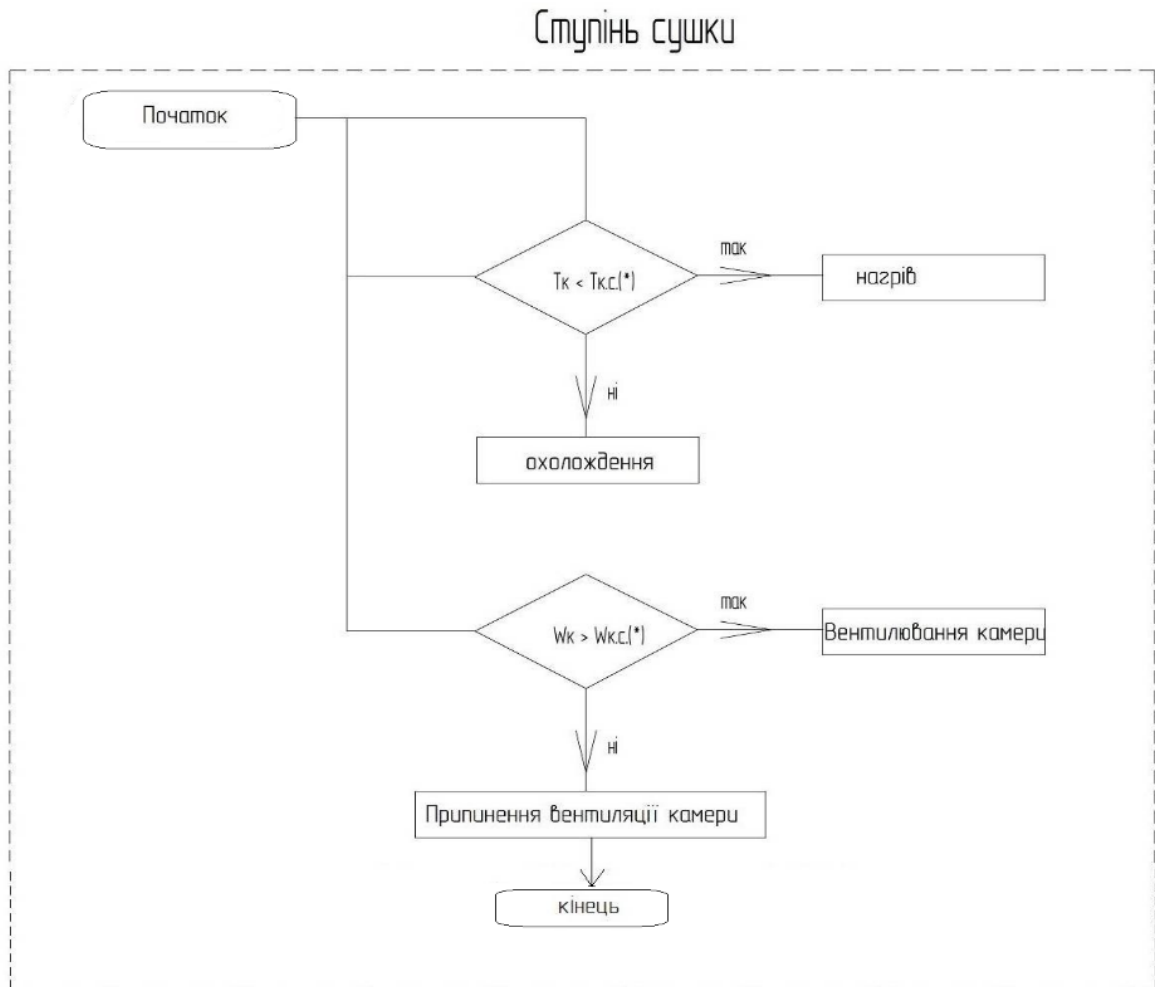


Рис.5.1. Алгоритм функціонування автоматизованої системи управління

Процес взаємодії з датчиками та управління виконавчими механізмами здійснюється у циклічному режимі. Алгоритм повинен передбачати періодичне зчитування показників із датчиків, відображення числового еквівалента електричного сигналу, отриманого з датчиків, перевірку відповідності рівня сигналу встановленим допустимим межам, а також генерацію керуючих сигналів для кожного виконавчого механізму.

5.2 Програмне забезпечення

Розроблено інтерфейс програми керування сушки деревини, який приведено на рис. 5.2. Ось опис основних елементів:

1. Верхня частина:
 - Вентиляційні системи: зображено кілька клапанів або заслінок, які регулюють потік повітря. Поточні показники відкриття клапанів відображаються у відсотках (наприклад, 0% — повністю закриті).
 - Вентилятор: центральна секція показує роботу вентилятора, що забезпечує циркуляцію повітря в камері. Інтенсивність роботи вентилятора вказана у відсотках (наприклад, 65%).
2. Середня частина:
 - Теплообмінник: розташований зліва, відповідає за подачу тепла. Вказані температурні значення (наприклад, 57.6°C), а також рівень нагрівання.
 - Зволожувальна система: праворуч представлений зволожувач для регулювання вологості в камері. Відображено параметри вологості (наприклад, 58.2°C та 3.2% відносної вологості).
3. Нижня частина:
 - Стос пиломатеріалів: у центрі відображено штабелі деревини, які проходять процес сушіння.
 - Параметри вологості деревини: кожен шар має відповідні значення поточної вологості (наприклад, 14.5%, 13.8%, 15.7%). Відсотки вказують рівень залишкової вологості в деревині на різних рівнях стосу.
 - Гістограма: показує температурний градієнт по висоті камери (зліва) та розподіл вологості (праворуч).
4. Індикація стану системи:
 - Панель температури (зліва): відображає температурні рівні на різних етапах сушіння.
 - Панель вологості (праворуч): демонструє зміни вологості в камері.

Загалом цей інтерфейс дозволяє оператору контролювати температурно-вологісний режим сушіння, стан систем вентиляції, роботу зволожувача та поточний рівень вологості деревини.

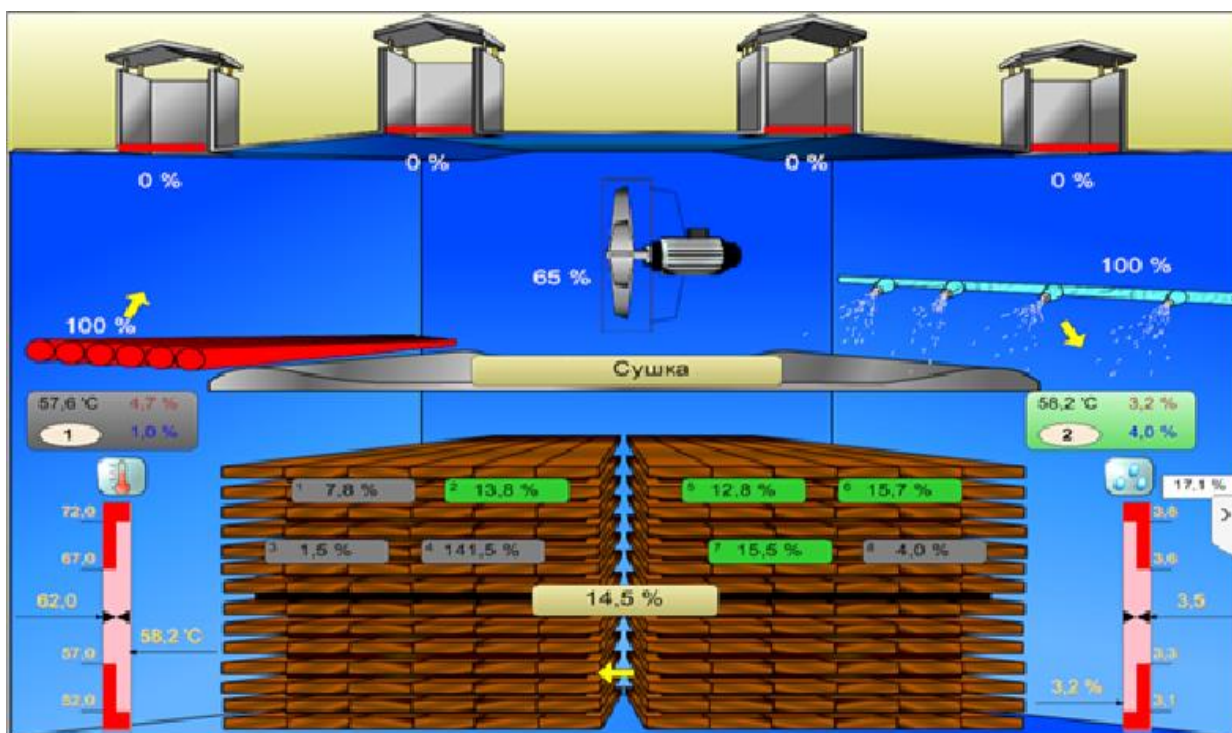


Рис.5.2. Інтерфейс програми

Код управляючої програми

```
<!DOCTYPE html>
<html lang="en">
<head>
  <meta charset="UTF-8">
  <meta name="viewport" content="width=device-width, initial-scale=1.0">
  <title>Wood Drying Control System</title>
  <style>
    body {
      font-family: Arial, sans-serif;
      margin: 0;
      padding: 0;
      background-color: #f4f4f9;
    }
    header {
      background-color: #2c3e50;
      color: #fff;
      padding: 20px;
      text-align: center;
    }
    .container {
      padding: 20px;
    }
    .section {
      margin-bottom: 20px;
      padding: 20px;
      background-color: #fff;
      border-radius: 8px;
      box-shadow: 0 2px 5px rgba(0, 0, 0, 0.1);
    }
  </style>
</head>
<body>
  <header>
    <h1>Wood Drying Control System</h1>
  </header>
  <div class="container">
    <div class="section">
      <h2>Welcome to the Wood Drying Control System</h2>
      <p>This system is designed to monitor and control the wood drying process, ensuring optimal conditions for drying and preventing damage to the wood.
```

```
.section h2 {  
    margin-top: 0;  
    color: #34495e;  
}  
  
.input-group {  
    margin-bottom: 15px;  
}  
  
.input-group label {  
    display: block;  
    font-weight: bold;  
    margin-bottom: 5px;  
}  
  
.input-group input, .input-group select {  
    width: 100%;  
    padding: 10px;  
    border: 1px solid #ccc;  
    border-radius: 5px;  
}  
  
.button-group {  
    text-align: center;  
}  
  
.button-group button {  
    padding: 10px 20px;  
    background-color: #3498db;  
    color: #fff;  
    border: none;  
    border-radius: 5px;  
    cursor: pointer;  
    font-size: 16px;  
}
```

```

        .button-group button:hover {
            background-color: #2980b9;
        }
    </style>
</head>
<body>
    <header>
        <h1>Wood Drying Control System</h1>
    </header>
    <div class="container">
        <!-- Section for input parameters -->
        <div class="section">
            <h2>Input Parameters</h2>
            <div class="input-group">
                <label for="wood-type">Type of Wood:</label>
                <select id="wood-type">
                    <option value="pine">Pine</option>
                    <option value="oak">Oak</option>
                    <option value="maple">Maple</option>
                    <option value="custom">Custom</option>
                </select>
            </div>
            <div class="input-group">
                <label for="initial-moisture">Initial Moisture Content (%):</label>
                <input type="number" id="initial-moisture" min="0" max="100"
step="1">
            </div>
            <div class="input-group">
                <label for="target-moisture">Target Moisture Content (%):</label>
                <input type="number" id="target-moisture" min="0" max="100"

```

```

step="1">
    </div>
</div>

<!-- Section for system status -->
<div class="section">
    <h2>System Status</h2>
    <p><strong>Temperature:</strong> <span id="temperature">---</span>
°C</p>
    <p><strong>Humidity:</strong>    <span    id="humidity">---</span>
%</p>
    <p><strong>Drying Stage:</strong> <span id="stage">---</span></p>
</div>

<!-- Section for controls -->
<div class="section">
    <h2>Controls</h2>
    <div class="button-group">
        <button onclick="startProcess()">Start Process</button>
        <button onclick="stopProcess()">Stop Process</button>
        <button onclick="pauseProcess()">Pause Process</button>
    </div>
</div>
</div>

<script>
function startProcess() {
    alert('Starting the drying process...');
}

```

```
function stopProcess() {  
    alert('Stopping the drying process...');  
}  
  
function pauseProcess() {  
    alert('Pausing the drying process...');  
}  
</script>  
</body>  
</html>
```

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У процесі виконання роботи було розглянуто технологію сушіння деревини в камерних триступневих сушарках, здійснено аналіз існуючих підходів до автоматизації цього процесу та запропоновано рішення, що забезпечують підвищення ефективності й якості сушіння.

1. Дослідження технологічного процесу: У результаті аналізу було визначено, що процес сушіння деревини є багатофакторним і залежить від параметрів, таких як температура, вологість повітря, швидкість повітряного потоку та початкова вологість пиломатеріалів. Вплив цих факторів на якість деревини потребує детального моделювання та оптимізації.

2. Розробка системи автоматизації: На основі досліджених вимог була створена функціональна схема автоматизації, яка включає мікроконтролерну систему управління, датчики температури, вологості та виконавчі механізми. Алгоритм роботи системи дозволяє забезпечити циклічний контроль параметрів сушіння та автоматичне регулювання процесу залежно від заданих умов.

3. Моделювання динамічних властивостей: Було проведено моделювання динамічних характеристик сушильної камери, що дозволило оцінити реакцію системи на зміну параметрів. Це забезпечило оптимізацію роботи вентиляційної системи, електрокалорифера та клапанів для досягнення рівномірного сушіння деревини.

4. Розробка інтерфейсу управління: Створено прототип інтерфейсу програми для управління сушінням деревини, який дозволяє оператору вводити параметри сушіння, стежити за станом системи в реальному часі та керувати процесом.

5. Ефективність автоматизації: Запропонована система автоматизації дозволяє:

- Скоротити тривалість процесу сушіння за рахунок оптимального управління температурою і вологістю;

- Знизити енерговитрати через точний контроль роботи нагрівальних і вентиляційних пристроїв;
- Забезпечити високу якість деревини за рахунок уникнення внутрішніх напружень і деформацій.

СПИСОК ВИКРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Губін, В. О. Технологія сушіння деревини: навч. посіб. / В. О. Губін. – Київ: Либідь, 2012. – 350 с.
2. Дубовик, О. М. Сучасні методи автоматизації технологічних процесів: монографія / О. М. Дубовик, П. С. Іванов. – Харків: ХНУРЕ, 2015. – 420 с.
3. Іванов, С. О. Мікроконтролери PIC: основи програмування / С. О. Іванов. – Львів: Світ, 2018. – 275 с.
4. Гончаренко, П. В. Автоматизація сушильних установок: досвід і перспективи / П. В. Гончаренко, Т. Ю. Сидоренко. – Запоріжжя: Поліграф, 2020. – 312 с.
5. Мікроелектроніка в автоматизації: навч. посіб. / за ред. В. І. Коваленка. – Одеса: ОНПУ, 2017. – 400 с.
6. Петров, М. В. Основи розробки систем автоматичного управління / М. В. Петров. – Київ: Техніка, 2016. – 480 с.
7. Сухов, А. В. Дослідження процесів сушіння деревини: теорія і практика / А. В. Сухов. – Дніпро: ДДУ, 2019. – 290 с.
8. Федоров, І. В. Програмування мікроконтролерів для систем автоматизації: навч. посіб. / І. В. Федоров. – Харків: Прапор, 2021. – 340 с.
9. Глущенко, О. Г. Теплообмінні процеси в сушильних камерах / О. Г. Глущенко. – Київ: Ніка-Центр, 2018. – 310 с.
10. Мельник, В. П. Контроль параметрів процесу сушіння / В. П. Мельник. – Львів: ЛП, 2020. – 280 с.
11. ISO 9001:2015 Системи управління якістю. Вимоги. – Женева: ISO, 2015. – 40 с.
12. ДСТУ 7316:2012 Технологічні процеси сушіння деревини. Основні вимоги. – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2012. – 25 с.

13. Керівництво користувача мікроконтролера PIC16F877. – Microchip Technology Inc., 2019. – 120 с.
14. Smith, J. Advanced Wood Drying Technologies / J. Smith. – New York: Springer, 2016. – 320 p.
15. Brown, R. Industrial Automation for Wood Processing / R. Brown. – London: CRC Press, 2018. – 410 p.
16. Harrison, L. Fundamentals of Process Control / L. Harrison. – Boston: McGraw-Hill, 2017. – 450 p.