

Єрмілова Н.В. Форма № Н-9.02

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»  
(повне найменування вищого навчального закладу)

Навчально-науковий інститут інформаційних технологій та робототехніки  
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра автоматики, електроніки та телекомунікацій  
(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

## Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи

бакалавр

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему **Автоматизація технологічного процесу сушки деревини**

Виконав: студент 4 курсу, групи 401МЕ  
спеціальності 141 «Електроенергетика,  
електротехніка та електромеханіка»  
(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Кашенко А.С.

(прізвище та ініціали)

Керівник

Галай В.М.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

Єрмілова Н.В.

(прізвище та ініціали)

Полтава - 2025 рік

# РЕФЕРАТ

кваліфікаційної роботи

## «Автоматизація технологічного процесу сушки деревини»

Робота містить 49 сторінок, 27 ілюстрацій, 7 таблиць, 16 використаних джерел.

**Ключові слова:** система керування, автоматизована підтримка параметрів, алгоритм, сушка деревини, вакуумна сушка.

**Предметом кваліфікаційної роботи бакалавра** є технологічний процес сушки деревини, а саме вакуумний, нагрівальний, охолоджуючий контури та контур виведення конденсату.

**Об'єктом кваліфікаційної роботи бакалавра** є дослідження можливості розроблення САК технологічного процесу сушки деревини.

**Метою кваліфікаційної роботи бакалавра** є розроблення автоматизованої системи сушки деревини в вакуумній сушильній камері, яка володітиме технічними показниками оптимального рівня, високою надійністю та простим інтерфейсом керування для користувача-оператора.

У роботі було проведено огляд та опис існуючих методів та типів сушки деревини, розроблено схеми інформаційно-матеріальних потоків та функціональну схему автоматизації з переліком елементів до неї, реалізовано вибір давачів та виконавчих механізмів, описано автоматизовану систему сушки деревини в вакуумній камері. Проведено опис контурів керування. В ході роботи було розроблено алгоритми функціонування відповідних контурів.

У ході проекту була розроблена автоматизована система сушки деревини у вакуумній сушильній камері, призначена для використання підприємствами деревообробної промисловості малих та середніх розмірів.

## ABSTRACT

of the qualification work

"Automation of the technological process of wood drying"

The work contains 49 pages, 27 illustrations, 7 tables, 16 sources used.

Keywords: control system, automated parameter support, algorithm, wood drying, vacuum drying.

The subject of the bachelor's qualification work is the technological process of wood drying, namely vacuum, heating, cooling circuits and the condensate removal circuit.

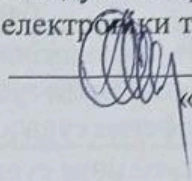
The object of the bachelor's qualification work is to study the possibility of developing an automated wood drying system in a vacuum drying chamber, which will have optimal technical indicators, high reliability and a simple control interface for the user-operator.

The work reviewed and described existing methods and types of wood drying, developed information and material flow diagrams and a functional automation diagram with a list of elements, implemented the selection of sensors and actuators, described an automated system for drying wood in a vacuum chamber. A description of the control circuits was carried out. During the work, algorithms for the functioning of the corresponding circuits were developed.

During the project, an automated system for drying wood in a vacuum drying chamber was developed, intended for use by small and medium-sized woodworking enterprises.

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

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри автоматки,  
електроніки та телекомунікацій  
 О.В. Шефер  
«01» квітня 2025 р.

**ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА**

*Кащенко Андрію Сергійовичу*

1. Тема проекту (роботи) «**Автоматизація технологічного процесу сушки  
деревини**».

**Керівник проекту Галай Василь Миколайович, к.т.н., доцент**, затверджена  
наказом вищого навчального закладу №306/1 ф.а від 03.03.2025 року.

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 10.06.2025р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) температура деревини – до 85 °С;  
температура води в контурі – до 90 °С; вологість деревини – до 90%; рівень  
води в резервуарі – до 2м; рівень вакууму – 1400-1мбар; тиск у водяному  
контурі – до 16 бар.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно  
розробити) Аналіз технологічного процесу сушки деревини. Види сушки  
деревини. Атмосферна сушка. Інфрачервона сушка. Конденсаційна сушка.  
Конвективна сушка. НВЧ-сушка. Вакуумна сушка. Вибір та обґрунтування  
структури системи керування та її опис. Розроблення контурів керування  
процесом сушки деревини. Розрахунок контуру регулювання температури.  
Контур керування технологічним процесом сушки деревини. Вакуумний  
контур. Нагрівальний контур. Охолоджувальний контур. Контур виведення  
конденсату. Вибір датчиків. Вибір виконавчих механізмів та допоміжних  
пристроїв.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових  
плакатів):

- 1) актуальність, мета та задачі розроблення;
- 2) аналіз видів сушки деревини;
- 3) структурна схема сушки деревини;
- 4) дослідження контуру регулювання температури сушки деревини;
- 5) вакуумний контур технологічним процесом сушки деревини;
- 6) нагрівальний контур технологічним процесом сушки деревини;

- 7) охолоджувальний контур технологічним процесом сушки деревини;  
 8) контур виведення конденсату технологічним процесом сушки деревини;  
 9) висновки.

6. Дата видачі завдання 01.04.2025р.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Пор. №	Назва етапів кваліфікаційної роботи бакалавра	Термін виконання етапів роботи			Примітка (плакати)
		Дата	Курс	Відсоток	
1	Аналіз технологічного процесу сушки деревини. Види сушки деревини. Атмосферна сушка. Інфрачервона сушка	22.04.25	I	20%	Пл. 1
2	Конденсаційна сушка. Конвективна сушка. НВЧ-сушка. Вакуумна сушка. Вибір та обґрунтування структури системи керування та її опис. Розроблення контурів керування процесом сушки деревини	10.05.25		40%	Пл. 2,3
3	Розрахунок контуру регулювання температури. Контури керування технологічним процесом сушки деревини	22.05.25	II	60%	Пл. 4,5
4	Вакуумний контур. Нагрівальний контур. Охолоджувальний контур. Контур виведення конденсату. Вибір датчиків. Вибір виконавчих механізмів та допоміжних пристроїв	29.05.25		80 %	Пл. 6,7
5	Оформлення кваліфікаційної роботи бакалавра	10.06.25	III	100%	Пл. 8,9

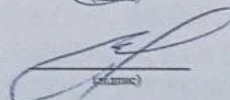
Студент

  
(підпис)

Кащенко А.С.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

  
(підпис)

Галай В.М.

(прізвище та ініціали)

## ЗМІСТ

### ВСТУП

6

## 1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ СУШКИ ДЕРЕВИНИ ТА ОБГРУНТУВАННЯ НАПРЯМКУ АВТОМАТИЗАЦІЇ

### 1.1 Аналіз технологічного процесу сушки деревини

8

### 1.2 Види сушки деревини

10

#### 1.2.1 НВЧ-сушка

10

#### 1.2.2 Атмосферна сушка

12

#### 1.2.3 Інфрачервона сушка

14

#### 1.2.4 Конвективна сушка

16

#### 1.2.5 Конденсаційна сушка

18

#### 1.2.6 Вакуумна сушка

20

## 2. РОЗРОБЛЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ СУШКИ ДЕРЕВИНИ

2.1 Структурна схема системи керування висушування деревини	
22	
2.2 Розроблення контурів керування процесом сушки деревини	
25	
2.3 Розрахунок контуру регулювання температури	
26	
2.4 Конттури керування технологічним процесом сушки деревини	
31	
2.4.1 Нагрівальний контур	
31	
2.4.2 Вакуумний контур	
33	
2.4.3 Контур виведення конденсату	
34	
2.4.4 Охолоджувальний контур	
36	
3. ВИБІР ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ СУШКИ ДЕРЕВИНИ	
3.1 Вибір засобів автоматизації	
38	
3.2 Вибір виконавчих механізмів та допоміжних пристроїв	
41	
ВИСНОВКИ	
46	
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	
47	

ДОДАТОК А

50

ДОДАТОК Б

63

## ВСТУП

**Актуальність роботи.** Реалії різних сфер сучасної електроенергетики посилюють актуальність і значущість вирішення специфічних завдань щодо підвищення якості та ефективності виробництв, здійснення технологічних процесів у яких забезпечується функціонуванням складного електричного обладнання.

В даний час значна частина промислових лісосушильних камер, що використовують природну циркуляцію сушильного агента, мають невисокі технічні характеристики. Особливо це стосується значного часу сушіння та підвищених енергетичних витрат

**Предметом кваліфікаційної роботи бакалавра** є технологічний процес сушки деревини, а саме вакуумний, нагрівальний, охолоджуючий контури та контур виведення конденсату.

**Об'єктом кваліфікаційної роботи бакалавра** є дослідження можливості розроблення САК технологічного процесу сушки деревини.

**Метою кваліфікаційної роботи бакалавра** є розроблення автоматизованої системи сушки деревини в вакуумній сушильній камері, яка володітиме технічними показниками оптимального рівня, високою надійністю та простим інтерфейсом керування для користувача-оператора.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати наступні **завдання:**

– виконати огляд існуючих видів сушки деревини, виявити переваги та недоліки кожного методу;

- вибрати та обґрунтувати структурну систему керування та здійснити її опис;
- розробити контури керування процесом сушки деревини, для кожного контуру розробити алгоритм керування;
- обрати засоби автоматизації та виконавчі механізми.

## **1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ СУШКИ ДЕРЕВИНИ ТА ОБґРУНТУВАННЯ НАПРЯМКУ АВТОМАТИЗАЦІЇ**

### **1.1 Аналіз технологічного процесу сушки деревини**

Перед проведенням аналізу технологічного процесу сушки деревини, доцільним буде розтлумачити саме поняття сушки. Сушка деревини — це процес видалення вологи з деревини та пиломатеріалів до необхідного рівня, що здійснюється шляхом випаровування рідини з матеріалу. Безпосередньо волога, що міститься в деревині, під контролем перетворюється на пар та виводиться в навколишнє середовище. Загалом, процес сушіння супроводжується низкою взаємопов'язаних явищ, під час яких відбуваються різноманітні перетворення матеріалу, включаючи фазові, структурні та механічні зміни деревини, а також процеси внутрішнього та зовнішнього теплообміну [1].

Основною метою процесу сушки та обробки деревини є кардинальна зміна якості дерев'яних матеріалів через технологічну обробку. Це перетворює сировину на високоякісний промисловий матеріал, придатний для використання в промисловості, будівництві, енергетиці тощо. Зміна властивостей деревини робить її високоміцною, біологічно стійкою та стабільною за формою та розмірами. Крім того, це надає деревині естетичний та презентабельний вигляд, покращує її теплоізоляційні та діелектричні характеристики.

Зауважимо, що зміни фізичних та експлуатаційних характеристик

деревини, які виникають через коливання вологості, визначають технологічні цілі процесу сушіння. Серед основних цілей процесу сушіння прийнято виділяти, в першу чергу, підвищення стійкості до впливу навколишнього середовища деревини та захист її від біологічних уражень. Не менш важливою буде ціль щодо зменшення фактичної ваги деревини та підвищення її механічної міцності. Запобігання майбутнім змінам лінійних розмірів деревини є запорукою покращення загальної якості деревини як будівельного матеріалу.

Відомим є факт, що у процесі сушіння деревина перебуває в газоподібному або рідинному середовищі. Таке середовище прийнято називати сушильним агентом. Його основна функція полягає в обміні матеріалів та енергії. Сушильний агент передає тепло деревині та відводить вологу, що утворюється внаслідок випаровування. До ролі агента сушки можуть залучатися повітря, водяний пар, а також гідрофобні рідини або водні розчини солей та інші подібні речовини [2].

Сучасна деревообробна галузь передбачає сушіння деревини у різних формах, а саме: дошках, брусах, круглому лісоматеріалі, шпоні, стружці, щепі та заготовках потрібної форми. На місці розпилювання пиломатеріали попередньо сушать природним шляхом, щоб мінімізувати їх вагу та знизити вартість додаткової обробки та транспортування до місця призначення. Окрім запобігання швидкому гниттю та пошкодженню різними грибками, мікроорганізмами та мурахами, цей початковий природний процес сушіння зберігає якість деревини до її доставки на деревообробні комбінати для необхідної додаткової обробки.

Сьогодні вітчизняні та зарубіжні фахівці в галузі сушіння та захисту деревини стикаються з певними викликами, які потрібно подолати. Процес сушіння з кожним днем потребує вищого рівня технічних та технологічних наукових знань. Основним завданням, яке стоїть перед спеціалістами сушіння, полягає у відчутному покращенні якості та стійкості деревини протягом всього виробничого процесу. Не менш важливим є підвищення

показників кінцевої якості сушіння та захисту деревини, що, в результаті, покращить її характеристики як майбутнього матеріалу для виробництва різноманітної продукції з дерева [3].

Відзначимо, що проблема сушіння деревини з забезпеченням рівномірності її просушування є ключовою в усьому процесі сушіння. Специфікою сушіння є те, що зовнішні шари висихають швидше, ніж внутрішні, що призводить до виникнення механічних напружень. Такі напруження, зазвичай, спричиняють розрив деревини. Таким чином, ефективне регулювання процесу сушіння означає балансування між швидкістю випаровування вологи із зовнішнього та внутрішнього шарів деревини, що зазнає обробки. Це, в свою чергу, забезпечить отримання рівномірно просушеної та високоякісної деревини. У промислових умовах деревину зазвичай обробляють у сушильних камерах, де параметри процесу сушки є під повним безперервним контролем.

Отже, щоб отримати високі показники якості обробки деревини, необхідно використовувати промислові інструменти та методи сушки, автоматизовані системи для точного контролю параметрів технологічних процесів. Також, наявність кваліфікованих працівників по роботі з деревиною є завдатком майбутнього успіху та досягнення високих показників ефективності виробництва.

## **1.2 Види сушки деревини**

У сучасних вітчизняних та зарубіжних деревообробних галузях виокремлюють безліч методів та видів сушки деревини. Вони відрізняються за технологією виконання, фізичними принципами, на яких ґрунтується процес, конструкцією сушильних камер, точністю моніторингу та регулювання параметрів, а також необхідним технічним обладнанням для їх реалізації [4].

### **1.2.1 НВЧ-сушка**

Цікавим методом сушіння деревини є НВЧ-сушка. НВЧ-сушка — це процес сушіння деревини за допомогою електромагнітного поля надвисоких частот. Таку сушку продемонстровано на рисунку 1.5. Основний принцип роботи полягає в перетворенні електромагнітної енергії, що проникає в деревину, на теплову енергію. Це призводить до нагрівання деревини та води, що міститься в ній, завдяки створенню міжмолекулярного тертя. Отже, електромагнітна енергія трансформується на тепло, внаслідок чого волога в деревині перетворюється на пару [5].



Рисунок 1.5 - Приклад НВЧ-сушильної камери

Отже, енергія електромагнітного поля швидко пронизує деревину, проте її поглинання відрізняється в різних ділянках матеріалу. Це пов'язано з тим, що різні складові деревини мають свої діелектричні властивості, які впливають на процес поглинання. Крім того, цей метод відрізняється й розподілом теплової енергії: максимальна температура досягається всередині матеріалу, а не на його поверхні. Нагрівання в таких НВЧ-сушарках відбувається відчутно швидше, ніж у традиційних, оскільки немає потреби спочатку нагрівати пару чи повітря, які потім передавали б тепло матеріалу [3].

Деревина має високу здатність поглинати НВЧ-випромінювання завдяки значному рівню початкової вологості. У процесі нагрівання розподіл

тепла в деревині відбувається так, що дифузія пари з внутрішніх шарів до зовнішніх значно прискорюється. Це пояснюється тим, що схил тиску, температури та концентрації, які впливають на швидкість розсіювання, природно скеровані від центральних пластів до зовнішніх. Ця особливість збільшує результативність процесу сушки. Частота, інтенсивність магнітного поля та діелектричні властивості деревини визначають рівень генерованого тепла, причому ці параметри підбираються відповідно до конкретного виду матеріалу. Каталізатором вологи під час її випаровування є зайвий тиск, що виникає в внутрішніх шарах деревини внаслідок нагрівання за допомогою НВЧ-випромінювання.

Однією з основних ознак вищезгаданого методу сушки є його селективний характер. Це пояснюється тим, що тангенс кута діелектричних втрат у деревині прямо пропорційний вологості. У зонах з підвищеною вологістю енергетичні втрати вищі, що призводить до інтенсивнішого нагрівання, тоді як у зонах з низькою вологістю спостерігається протилежна ситуація.

Безпосередньо камера складається з магнетронів, блоків живлення, НВЧ-хвилеводів, випромінювальної системи, реверсних вентиляторів, витяжної системи та інших компонентів, які залежать від конкретної конфігурації установки [1].

Серед плюсів цього методу сушки варто зазначити високу швидкість процесу, можливість швидко та продуктивно висушити великогабаритні лісоматеріали, а також забезпечення еталонного кінцевого продукту та оптимізація властивостей деревини. Крім того, цей метод є універсальним.

Недоліками методу НВЧ-сушки є потреба в контролі з боку оператора, великі розміри сушильної камери, висока вартість як обладнання, так і самого процесу, а також значні енергетичні витрати. Крім того, контроль за процесом дещо ускладнюється, оскільки звичайні датчики температури та вологості не можуть бути розміщені в цій камері через фізичні особливості процесу. Серед інших недоліків – низький коефіцієнт корисної дії, невисока продуктивність

та вимога до високої кваліфікації обслуговуючого персоналу.

### 1.2.2 Інфрачервона сушка

На практиці одним із найефективніших методів сушіння деревини є використання інфрачервоного випромінювання, який візуалізовано на рисунку 1.2. Цей підхід гарантує рівномірне просушування та високу якість кінцевого продукту. Внаслідок цього деформації та дефекти деревини під час висихання мінімізовані.

Отже, поняття інфрачервоної сушки можна розкрити як процес сушіння деревини за допомогою інфрачервоних нагрівальних панелей. Ці сушарки оснащені датчиками температури та вологості, інфрачервоними випромінювачами, системою вентиляції та системами змішування повітря. Основний принцип цього методу полягає в нагріванні води в деревині за рахунок інфрачервоного випромінювання [3].

Деревина укладається в рівні штабелі, між якими розташовуються вищерозглянуті інфрачервоні панелі. Після цього штабелі поміщають у сушильну камеру. На стінах такої камери встановлені інфрачервоні панелі, а всередині розташовані датчики вологості та температури.



Рисунок 1.2 – Інфрачервона сушка деревини

Вся електроніка інфрачервоної сушки з'єднана з програмованим логічним контролером, який відповідає за моніторинг та управління процесом сушіння безпосередньо. Волога, що міститься в деревині, під дією інфрачервоного випромінювання нагрівається та, відповідно, випаровується. Пара, що утворюється, виводиться назовні через вентиляційну систему та конденсується на поверхнях. Деревина при цьому не значно нагрівається, оскільки випромінювання впливає на молекули води, а не на повітря [5].

Стандартною температурою для процесу сушки є  $65^{\circ}\text{C}$ , що сприяє максимальному збереженню структури деревини, запобігаючи розривам волокон та іншим дефектам. Цей метод сушки є економічним, не займає багато часу та має низькі експлуатаційні витрати. Крім того, належної уваги заслуговує так званий безкамерний метод інфрачервоної сушки. Деревину також укладають у штабелі, між шарами розміщують інфрачервоні плити та спеціальний відбивний матеріал. Зауважимо, що штабелі обгорнуті відбивними плитами з усіх сторін.

### **1.2.3 Атмосферна сушка**

Одним із ефективних видів сушки, є, так звана, атмосферна сушка деревини. При атмосферному сушінні сушильним агентом є атмосферне повітря, а деревину та пиломатеріали складають у спеціально оснащених відкриті склади. Цей метод сушки є економічно вигідним та одним з найстаріших, оскільки не потребує витрат на паливо та електроенергію, а також не вимагає використання дорогого та високотехнологічного обладнання. Поряд з низькою собівартістю у порівнянні з іншими способами сушіння, він забезпечує високу якість кінцевого продукту за умови правильного виконання. Атмосферна сушка є характерною для деревообробних підприємств, які обробляють великі обсяги деревини для промисловості [5].

При застосуванні цього методу параметри повітря, що використовується як сушильний агент, не можливо регулювати. На ці

параметри впливають кліматичні умови регіону, де відбувається сушка, а також пора року та погодні умови у той чи інший момент. У сушильних складах формується власний мікроклімат через підвищений рівень вологості, що виникає внаслідок випаровування вологи з деревини. Процес сушки можна покращити, укладаючи пиломатеріали в правильні штабелі, посилюючи вентиляцію на складі та використовуючи спеціальні промислові вентилятори.

Відмітимо, що використання атмосферного сушіння дозволяє досягти досить низьких рівнів вологості деревини. Деревину з таким вмістом вологи доцільно та економічно виправдано використовувати для виготовлення виробів та конструкцій для зовнішнього використання. Однак для подальшого використання в закритих приміщеннях зазвичай рекомендується додаткове досушування за допомогою промислових методів. Безпрограшним варіантом буде комбінація атмосферної сушки з іншими техніками, адже це дає змогу знизити витрати на сушіння та покращити якість кінцевої продукції.

Атмосферна сушка має безліч переваг, серед яких низька собівартість, легкість в організації та проведенні процесу. Така сушка характеризується меншим залишковим напруженням в деревині, ніж при камерному методі. Якщо ефективно використовувати природні умови, обрати правильне місце для розташування складу, невпинно регулювати щільність укладки деревоматеріалів, завчасно захищати торці дошок, можна досягти не аби яких потужних результатів. Це означає, що при дотриманні технології атмосферної сушки можливо отримати дійсно високоякісні матеріали. Якщо організація процесу не порушує технологічні вимоги, атмосферне сушіння допомагає зменшити ризик викривлень, розтріскування та деформації пиломатеріалів.



Рисунок 1.1 - Атмосферна сушка деревини

Серед недоліків атмосферної сушки варто відзначити низький рівень контролю та прогнозованості процесу. Основними факторами, що впливають на сушіння, є температура, вологість та швидкість руху повітря, які постійно змінюються в залежності від часу доби, пори року, а також кліматичних та погодних умов. У процесі атмосферної сушки важко спрогнозувати точний термін висихання. Хоча цей метод є простим, але порушення технології може призвести до псування деревини, оскільки в сирому стані вона стає вразливою до грибків та шкідників. Додатково, через низьку інтенсивність, атмосферна сушка займає багато часу, а також вимагає значних виробничих площ для складування [2].

Сама організація процесу сушіння відбувається наступним чином. Щоб висушити деревину її розміщують на півметровому фундаменті. Такий фундамент може бути з металевим, бетонним або дерев'яним. Укладання деревини для сушки проводиться за спеціальною методикою – штабельною 2,5 на 5 метрів. Деревину, що потрібно висушити, укладають рядами, розділяючи їх спеціальними сухими буртиками. Важливо підбирати матеріал з однаковим перерізом при укладанні деревини рядами. Найчастіше застосовують пакетні штабелі. Для укладання деревини в пакетні штабелі її класифікують за профілем, розміром, перерізом, сортом тощо. Сформовані

штабелі на певній відстані розміщують на підготовленому заздалегідь фундаменті. Звичайно ж, ширина та висота штабельних пакетів є довільною. Для розділення пакетів при їх укладанні використовують спеціальні прокладки.

#### **1.2.4 Конвективна сушка**

Розглянемо детально конвективний метод сушіння деревини. Конвективна або камерна сушка — це процес сушіння деревини гарячим повітрям у спеціально обладнаному приміщенні, відомому як камера (рис. 1.4). До основного складу камерних сушарок входять система зволоження та вентиляції, котел та калорифер. Зазвичай камери конструюють з металевих теплоізоляційних плит вкритих теплоізоляційною оболонкою. Камерні сушки бувають як періодичної, так і безперервної дії.



Рисунок 1.4 – Камерна сушка деревини

Отже, нагріте калорифером повітря циркулює в об'ємі камери, проходячи через штабелі деревини. Під дією тепла дерево виділяє вологу, яка потрапляє в робоче повітря. Коли рівень зволоження досягає відповідної межі, вологе повітря виводиться назовні через спеціальний шибер. Під

юрисдикцію процесу контролю програмованим логічним контролером підпадає контроль за температурою повітря, деревини та теплоносія в калорифері, а також за вологістю, швидкістю обертання вентиляторів [2].

До технологічного циклу входять початковий прогрів деревини, безпосередньо сушка, іригація та кондиціонування. Для запобігання зіпсування деревини та забезпечення рівномірного просушування, повітря та сама деревина періодично зволожуються за допомогою системи зрошення [1].

Камерна сушка деревини здійснюється в одному з рекомендованих стандартом режимів. Згідно з температурними показниками, сушка розмежовується на м'який, природній, нагнітаний та високотемпературний режими. Обирання відповідного режиму залежить від породи деревини, типу та розмірів пиломатеріалів, а також їх кінцевого призначення.

Серед вад камерної сушки спостерігається деяка нерівномірність просушки деревини. Найбільш слабким місцем цього методу є висока собівартість самої камери, суттєві енергетичні витрати, необхідні для нагрівання теплоносія, механічна вентиляція та обіг сушильного агента. Проте, є можливість зниження вологості деревини приблизно до шести відсотків, економія часу на підготовку матеріалу, відносно висока швидкість сушки, відмінна якість кінцевого продукту, повний контроль над процесом та наявність різноманітних режимів сушки.

### **1.2.5 Конденсаційна сушка**

Поряд з тим, потрібно детально розглянути такий тип сушки як конденсаційна. При конденсаційній сушці повітря виступає в ролі агента сушіння. Головна особливість цього методу полягає в тому, що вологе повітря не виводиться з сушильної камери, як у попередньому методі, а осушується безпосередньо в конденсаційній установці. Після цього воно підігрівається та повертається назад у камеру для повторного використання в процесі сушіння. Таким чином, сушка відбувається в закритому циклі без вентиляції. Цей процес дозволяє зекономити енергію, яка потім використовується для

сушіння.

У конденсаційній сушильній камері повітря постійно циркулює, а його відносна вологість контролюється за допомогою конденсаційного пристрою. Після осушення робочого повітря конденсат виводиться з камери, а очищене повітря нагрівається та міксується з робочим. У подальшому суміш підігрівається до потрібної температури в спеціальному нагрівачі. Зазвичай для охолодження використовується стандартний фреон.

Конденсаційні сушильні камери у деревообробній промисловості можуть мати різні форми та конфігурації. Вони також відрізняються за температурними режимами в залежності від холодоагенту, що використовується в конденсаційній установці. Зазвичай виробники інсталиують температуру в межах від 40 до 45°C через властивості холодоагентів. У деяких випадках використовують холодоагенти, які дозволяють підвищити температуру до 75°C.

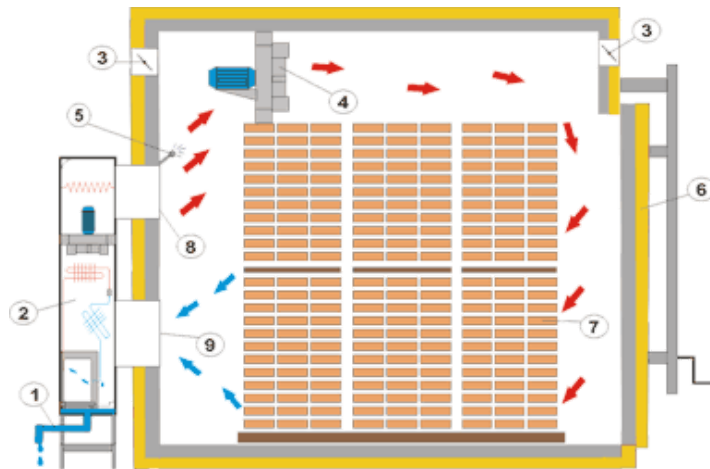


Рисунок 1.3 - Схема конденсаційної сушильної камери

1 - дренажна трубка; 2 - конденсаційна установка зовнішня або внутрішня; 3 - система повітрообміну; 4 - панель вентиляторів;  
5 - зволожувач; 6 - двері зі знімальним механізмом; 7 - штабель;  
8 - випускний канал конденсаційної установки; 9 - всмоктувальний канал конденсаційної установки.

На практиці конденсаційні камери можуть бути періодичними або

неперервної дії, причому останні застосовуються вряди-годи. Для забезпечення необхідної циркуляції повітря у конденсаційній сушильній камері, окрім нагрівальної поверхні та конденсаційного пристрою, необхідно встановлення вентиляторів, які належним чином розміщують поруч із тунелем. У подальшому повітря акумулюється з вологої сторони, проходить через конденсатор та нагрівальні пристрої, після чого прямує в сторону сухості. Пригнічення вологості повітря в конвекційній камері можливе шляхом додавання певної кількості зовнішнього повітря, що створює залежність від його стану. Натомість конденсаційні сушильні камери не мають цієї недоліки, оскільки на них майже не впливають зовнішні фактори. Це дозволяє ретельніше налаштовувати параметри всього процесу сушки.

Вигоди вищерозглянутого методу сушіння ґрунтуються на високій якості висушеного матеріалу поряд з низькими видатками. Завдяки низькій робочій температурі деревина не деформується, не змінює свого кольору та практично не піддається внутрішнім напруженням [4].

Серед недоліків потрібно відмітити тривалий час сушіння, оскільки цей метод потребує вдвічі більше часу. Крім того, кінцевий продукт не має бажаного належного захисту. Оскільки деревина сушиться при низьких температурах, вона залишається чутливою до мікозів через недостатню дезінфекцію.

### **1.2.6 Вакуумна сушка**

Ефективним та цікавим методом сушіння деревини є вакуумна сушка. Вакуумна сушка - це метод сушіння деревини в умовах вакууму. Цей процес відбувається в спеціально обладнаній герметичній камері, з якої відкачують повітря. Приклад такої камери продемонстровано на рисунку 1.6. Завдяки вакууму змінюються процеси нагрівання, випаровування рідини, дифузії та масообміну. Це дозволяє значно зменшити час сушіння та модернізувати якість висушеного матеріалу [2].



Рисунок 1.6 - Приклад вакуумної сушильної камери

Деревину укладають у штабель, при цьому кожен шар пиломатеріалу розміщують між алюмінієвими нагрівальними панелями, через які циркулює гаряча вода, що прогріває масив деревини. Штабель поміщають у сушильну камеру, де процес сушки проходить у три етапи. Спочатку деревину нагрівають при атмосферному тиску, потім створюють вакуум, що дозволяє розпочати основний процес сушки. На фінальному етапі процесу відбувається доведення повітря до сприятливих умов: деревину охолоджують до потрібної температури, щоб уникнути спотворень, породжених температурними гойданнями. Пара конденсується на стінках камери та конденсаційних панелях, після чого виводиться назовні. Для кожного виду деревини встановлюється фаховий режим сушки, який визначає температуру та тривалість кожного етапу.

Сушка здійснюється при сталому вакуумі в діапазоні 0.1 – 0.6 бар без використання кулера, зволожувальних систем або необхідних вимірювальних механізмів. Розглянутий процес базується на фізичних засадах вакуумної сушки. Під впливом тиску волога переміщується з внутрішніх шарів деревини до зовнішніх. Після випаровування зовнішні шари знову орошаються водою з внутрішніх, що забезпечує неквапливий процес та обороняє деревину від недоліків та деформацій. Завдяки високому тиску в камері, вода в деревині закипає та починає випаровуватися при значно

нижчих температурах — 45-60°C, в залежності від тиску. Це успішно впливає на якість деревини. Вакуумну сушку, завдяки її перевагам та пріоритетам, часто використовують для обробки надцінних порід деревини.

Розглянемо вигоди вакуумної сушки. До козирів можна віднести швидкий темп процесу сушіння, узгоджене всебічне просушування деревини, простота монтажу та експлуатації сушильної установки, висока якість завершеного продукту та низькі витрати на енергію.

Тепер звернемо увагу на недоліки вакуумної сушки:

- висока вартість обладнання;
- обмежений обсяг одноразового завантаження камери, що призводить до відносно малих обсягів виробництва.

Висновки за розділом

Проблема сушіння деревини з забезпеченням рівномірності її просушування є ключовою в усьому процесі сушіння будь-якими способами. Кожен варіант сушіння деревини має свої переваги та недоліки. Для проведення подальших досліджень був обраний вакуумний спосіб сушіння деревини.

## **2. РОЗРОБЛЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ВИСУШУВАННЯ ДЕРЕВИНИ**

### **2.1 Структурна схема системи керування висушування деревини**

Вакуумне висушування деревини є складним технологічним процесом, що має кілька характерних особливостей: велика кількість параметрів, їх складні взаємозв'язки та вплив неконтрольованих зовнішніх факторів. Для детального розуміння сутності такого виду висушування складемо модель технологічного процесу. Модель цього складного об'єкта можна описати за допомогою набору необхідних змінних:

1) склад вхідних параметрів  $X_1$  (кількість й тип матеріалу, розмір й порода матеріалу, початкова вологість), до переліку якого входять контрольовані змінні, що не повинні бути регульовані;

2) склад вихідних параметрів  $Q$ , що представлено якістю матеріалу, що висушується включає, наприклад; до відповідного складу можливо віднести: розмір залишкових внутрішніх переанпруг, залишкова вологість при певному перепаді вологості в перетині пиломатеріалів;

3) склад необхідних змінних  $X_2$  (старіння обладнання, зміна навколишнього середовища, нерівномірний розподіл матеріалу), які не контролюються;

4) склад керуючих параметрів  $Y$  (кількості тепла й швидкості циркуляції), які показують збурюючі впливи;

5) склад вихідних параметрів  $E$  (тривалість висушування, й ККД), які в прямому сенсі впливають на економічну ефективність технологічного процесу.

Варто створити систему, яка буде максимально подібна до оптимальної, при автоматизації процесу висушування. Це означає, що потрібно досягти заданих параметрів  $Q$  при максимальних значеннях параметрів  $E$ . Це завдання можна вирішити за допомогою самонастроювальних систем, які обирають оптимальну комбінацію керуючих параметрів  $Y$  для досягнення екстремального значення параметра  $F$  [6].

Структурну схему впливу параметрів системи автоматичного керування процесу висушування наведено на рисунку 2.1.

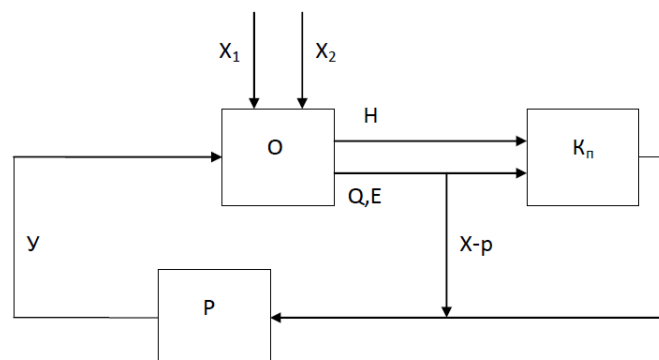


Рисунок 2.1 – Структурна схема впливу параметрів технологічного процесу висушування деревини:

О – камера висушування; Р – регулятор технологічного процесу;  
 $K_{\pi}$  – керуючий прилад,  $X_1$ ,  $X_2$  – вхідні контрольовані та неконтрольовані параметри; У – вплив регулятора на камеру висушування; Q, E – склад камери висушування, що впливають на якість та економічність; Н – задані параметри

Новизною схеми стала поява керуючого впливу  $K_{\pi}$ , що відрізняє її від стандартної системи автоматичного регулювання камери висушування О та регулятора Р. Цей пристрій аналізує вихідні величини об'єкта та підтримує їх на оптимальному рівні, дотримуючись заданим меж Н. Забезпечення оптимального вихідного параметру система автоматичного керування (САК) виконує автоматичний пошук, який полягає у зміні вхідних показників (вхідних параметрів  $X_p$  регулятора та збурюючих впливів У), аналізі результатів цих змін та визначенні напрямку подальших корекцій для досягнення найефективнішого режиму сушіння. В якості критерію оптимізації процесу висушування здійснюється вибір одного з параметрів, що представлено якістю матеріалів та впливають на його ефективність. Інші параметри виступають засобами обмежень Н. Скажімо, для критерію оптимізації може бути обрана інтенсивність сушіння, а обмеженням — збереження певних показників якості матеріалу під час сушіння [10].

Для розробки системи автоматичного контролю (САК) потрібні не лише екстремальні регулятори та стандартні засоби автоматики, а й декілька спеціалізованих вимірювальних пристроїв для нестандартних параметрів:

- для підвищення ефективності технологічного процесу висушування необхідно контролювати температуру та вологість деревини, внутрішньої напруги;
- для оптимізації енергетичних витрат необхідно вимірювати витрати тепла на сушіння або на 1 кг випарованої вологи;
- вологомір з диференційним пристроєм може знадобитись для вимірювання швидкості висушування.

Відсутність розроблених методів та технічних засобів для автоматичного керування не дає можливості орієнтуватися на системи автоматичної оптимізації при автоматизації сушильного процесу [6].



Рисунок 2.2 – Схема системи керування параметрами сушильної камери з урахуванням мікропроцесора

Температура  $T$ , вологість  $W$ , показники якості  $Q$  цілком характеризують стан деревини під час її висушування. Схема регулювання процесу сушіння, що враховує температуру та вологість сушильного агента, є розімкненою за вищенаведеними параметрами.

Оператор сушильно агрегата не має інформації від регуляторів температури та вологості. Існуюча кінцева вологість та якість при такій системі керування не відповідає оптимальним параметрам. Внаслідок цього, щоб уникнути нестачі, параметри режиму сушіння встановлюються на заниженому рівні, що робить технологічний процес висушування доволі складним та нерегульованим. Незважаючи на явні недоопрацювання в системі керування сушильними камерами, останні активно використовуються в деревообробній промисловості та демонструють свою ефективність під час експлуатації.

## 2.2 Розроблення контурів керування процесом сушки деревини

Розробка контурів керування процесом сушіння деревини виконує ряд важливих задач. Серед найважливіших є функціональні задачі.

Функціональні завдання керування процесом сушіння у вакуумній камері можливо поділити на декілька груп:

1. Керування насосами: вакуумним та циркуляційним.
2. Керування конденсатом.
3. Виконання контролю тиску в камері, системі нагріву та охолодження.
4. Контроль температури та рідини, що охолоджує.
5. Необхідно підтримувати параметри температури та вологості, що задаються оператором.

Таблиця 2.1 - Таблиця вхідних параметрів вакуумної камери технологічного процесу висушування

<p><b>Тиску у водяному контурі</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• діапазон 0-16 бар</li> <li>• 2 точки</li> </ul>	<p><b>Рівень вакууму</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• діапазон 1400-1мбар</li> <li>• 1 точка</li> </ul>	<p><b>Температура води в контурі</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 1 – 90°C</li> <li>• 1 (4) точок</li> </ul>
<p><b>Температура деревини</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 0 – 85°C</li> <li>• 1 точка</li> </ul>	<p><b>Вологість деревини</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 4 – 90%</li> <li>• 1 точка</li> </ul>	<p><b>Рівень води в ємності</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 0-2м</li> <li>• 1 (4) точок</li> </ul>

Знаючи вхідні параметри камери для висушування деревини, можемо окреслити вихідні параметри та занести до таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 - Таблиця вихідних сигналів вакуумної камери технологічного процесу висушування

<p><b>Подача води</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• дискретний</li> <li>• 4 точок</li> <li>• електромагнітний клапан</li> </ul>	<p><b>Нагрівання води</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• дискретний</li> <li>• 1 точка</li> <li>• напівпровідникове реле</li> </ul>	<p><b>Циркуляція води</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• дискретний</li> <li>• 2 точки</li> <li>• циркуляційний насос через пристрій плавного пуску</li> </ul>
--	---	--

Створення вакууму	Виведення конденсату	Керування тиском в контурах
<ul style="list-style-type: none"> <li>• дискретний</li> <li>• 1 точка</li> <li>• вакуумний насос через пристрій плавного пуску</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• дискретний</li> <li>• 1 точка</li> <li>• електромагнітний клапан</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• дискретний</li> <li>• 2 точки</li> <li>• циркуляційний насос через пристрій плавного пуску</li> </ul>

Вхідні та вихідні контури дають вагоме підґрунття для розроблення автоматизованої системи керування, так як чітко визначені параметри, які необхідно контролювати, а якими керувати.

### 2.3 Розрахунок контуру регулювання температури

Розглянемо деревосушильну камеру як об'єкт, в якому регулюється температура сушильного агента.

Кількість тепла, що передається від калорифера до камери за проміжок часу  $dt$ , визначається за допомогою рівняння теплового балансу [7]:

$$Q = k_k F_k \cdot (Q_{\text{п}} - Q_{\text{с}}) dt; \quad (2.1)$$

де:  $k_k$  – коефіцієнт теплопередачі калориферу, ккал/м<sup>2</sup>град;

$F_k$  – площа поверхні нагрівача, м<sup>2</sup> ;

$Q_{\text{п}}$  та  $Q_{\text{с}}$  – ступінь нагрітості пари в калорифері та агенту сушіння у камері, °С.

Аналізуючи динаміку об'єкта в контексті каналу «температура пари – температура сушильного об'єкту в приміщенні», припустимо наступне: обсяг сушильного об'єкту є сталою величиною, незначними є коливання температури пари.

$$Q_{\Pi} = Q_{\Pi,0} \pm \Delta_{\Pi}$$

Об'єктами, що отримують тепло від калорифера за нескінченно малий проміжок часу, є:

- безпосередньо сам калорифер  $c_M m_K \cdot dQ_K$  ;
- металеві частини в камері  $c_M m_K \cdot dQ_C$  ;
- втрати технологічні  $k_{ог} F_{ог} (Q_K - Q_{нар}) dt_K$  ;
- теплообмінні процес об'єкту з поверхнею камери  $\alpha F_d \cdot (Q_K - Q_{нар}) dt$  .

Беручи увагу взаємодію тепла з об'єктами камери півність теплового балансу набуде вигляду:

$$k_{ог} F_{ог} (Q_K - Q_{нар}) dt_K + \alpha F_d \cdot (Q_K - Q_{нар}) dt = c_M m_K dQ_K + c_M m_C dQ_C \quad (2.2)$$

Рівність (2.2) після перестановки прийме такий вигляд:

$$k_{ог} F_{ог} (Q_K - Q_{нар}) dt_K + \alpha F_d \cdot (Q_C - Q_d) dt = c_M m_K dQ_K + c_M m_C dQ_C \quad (2.3)$$

де:  $c_M$  – параметр теплоємності металу;

$\alpha$  – коефіцієнт теплообміну деревини у процесі сушіння;

$F_{ог}$  – поверхня огорожі, м<sup>2</sup>;

$T_K$  – маса металу в вакумній камері, кг;

$k_{ог}$  – середній коефіцієнт теплопередачі огорож;

$Q_{нар}$  – температура зовнішнього середовища °С;

$F_d$  – поверхня об'єкту, м<sup>2</sup>;

$Q_d$  – параметр температура об'єкту.

При  $dQ_k/dt=0$ , що відповідає сталому режиму рівняння (2.3) приймає вигляд:

$$k_{\text{вк}} F_{\text{к}} (Q_{\text{с}} - Q_{\text{д}}) dt_{\text{ог}} = k_{\text{сб}} (Q_{\text{нар}} - Q_{\text{д}}) + \alpha F \cdot (Q_{\text{д}} - Q_{\text{д}}) dt \quad (2.4)$$

$$\begin{aligned} \frac{c_M \cdot m_M}{k_{\text{вк}} F_{\text{к}} + k_{\text{д}} + \alpha F} \frac{d\Delta Q_{\text{к}}}{dt_{\text{к}}} + \frac{c_M m_M}{k_{\text{ог}} F + k_{\text{д}} + \alpha F} + \Delta Q_{\text{с}} = \\ = \frac{k_{\text{к}} F_{\text{к}}}{k_{\text{вк}} F_{\text{к}} + k_{\text{д}} + \alpha F} Q \end{aligned} \quad (2.5)$$

Якщо:  $\frac{k_{\text{к}} F_{\text{к}}}{k_{\text{вк}} F_{\text{к}} + k_{\text{д}} + \alpha F} = k_0 \frac{\Delta Q_{\text{с}}}{\Delta Q}$ ; тоді при  $\Delta Q_{\text{к}} = \Delta Q_{\text{п}}$  і

$$\frac{dQ_{\text{к}}}{dt} = \frac{1}{k_0} \frac{d\Delta Q_{\text{с}}}{dt}$$

рівняння (3.5) набуде вигляду [8]:

$$T \frac{d\Delta Q_{\text{с}}}{dt} + \Delta Q_{\text{ел}} = k_0 \Delta Q \quad ; \quad T = \frac{c_M m_M}{k_{\text{вк}} F_{\text{к}}} + \Delta Q_{\text{с}} + \frac{c_M m_M}{k_{\text{к}} F_{\text{к}} + k} \quad (2.6)$$

де:  $T$  – постійна часу.

Розглядаючи рівняння (2.6) видно, що в камері об'єкт, що представляє собою канал «температура пари – температура об'єкта висушування», є по-суті інерційною ланкою.

Виведена математична модель недосконала, так як не враховує затримки, які можуть виникати в реальних умовах. Тому її можна представити у загальному вигляді:

$$T \frac{d\Delta Q(t)}{dt} + \Delta Q_{\text{ел}}(t) = k_0 \Delta Q(t - \tau); \quad (2.7)$$

$$T \frac{dDQ(t)}{dt} + DQ_{\text{fl}}(t) = k_0 DQ(t - \tau); \quad (2.8)$$

Отже, камера періодичної дії може бути описана як послідовне включення аперіодичної ланки та ланки чистого запізнення. При виведенні рівнянь ми припускаємо, що за незначних змін температури сушильного агента в камері, протягом коротких проміжків часу, температура деревини залишається сталою. У такому випадку теплоємність не впливає на інерційність камери [9]. Контур регулювання температури складається з датчика температури та позиційного регулятора.

Розглянемо детальніше регулятор у нашій роботі. Позиційні регулятори функціонують за принципом «ввімкнено/вимкнено». Контактні та безконтактні релейні компоненти можуть реалізувати даний алгоритм. Вони можуть бути двопозиційними, трьохпозиційними або багатопозиційними.

У нашій системі регулювання ми обираємо двопозиційний регулятор. Його налаштовують за наступним алгоритмом:

- 1) визначається рівновага об'єкту керування, що дорівнює обчисленим значенням;
- 2) діюче значення  $\mu_0$  та  $\varepsilon_0$  обчислюється в прирості до умовної рівноваги.

Наступне рівняння описує статичну властивість двопозиційного регулятора з зоною нечутливості:

$$\begin{cases} \mu = \mu_1 \text{ при } \varepsilon \geq a; \\ \mu = \mu_1 \text{ при } -a \leq \varepsilon \leq a \text{ і } d\varepsilon/dt \leq 0; \\ \mu = -\mu_2 \text{ при } \varepsilon \leq -a; \\ \mu = -\mu_2 \text{ при } -a \leq \varepsilon \leq a \text{ і } d\varepsilon/dt \geq 0 \end{cases} \quad (2.9)$$

Вищенаведене рівняння доводить, що двопозиційні регулятори постійно впливають на об'єкт регулювання, так як необхідний рівноважний стану системи ( $\varepsilon=0$ ) відрізняється від цього значення. Наслідком такого стану

є автоколивальний режим, що характеризується постійним коливанням поблизу рівноваги.

На рисунку 2.3 наведено статичну характеристику  $\mu=f(\epsilon)$ .

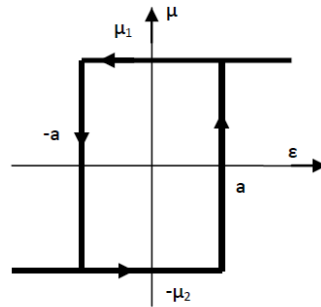


Рисунок 2.3 – Статична характеристика двопозиційного регулятора із зоною неоднозначності

У першому наближенні об'єкт регуляції ОР (вакуумна камера) описується передавальною функцією [7]:

$$W_{об} = \frac{k_{об} \cdot e^{-\tau_0 p}}{T \cdot p + 1};$$

(2.10)

де:  $\tau_0$  – запізнення об'єкта регулювання;

$k_{об}$  – коефіцієнт передачі об'єкта регулювання;

$T$  – стала часу об'єкта регулювання.

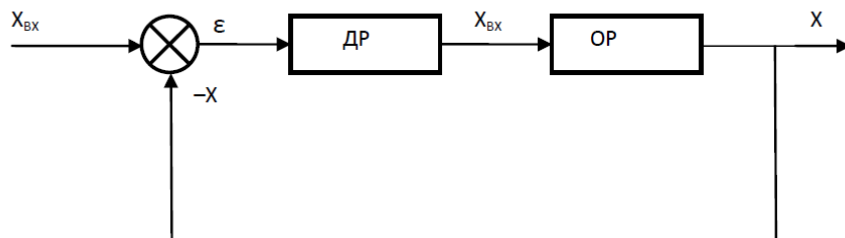


Рисунок 2.4 – Структурна схема автоматичної системи із двопозиційним регулятором

Для подальшого розрахунку необхідно знайти  $k_{об}$ , використовуючи формулу (2.4):

$$k_{об} = \frac{k_k F_k}{k_{об} F_{коб} + k F_d + \alpha F}; \quad (2.11)$$

де:  $k_k$  – значення коефіцієнта теплопередачі калориферу,  $k_k = 13$  ккал/м<sup>2</sup>град;

$F_k$  – площа поверхні калорифера,  $F_k = 12$  м<sup>2</sup>;

$k_{об}$  – середній коефіцієнт теплопередачі огорож,  $k_{ог} = 2$ ;

$\alpha$  – значення коефіцієнта теплообміну деревини у процесі висушування,  $\alpha = 5,1$  ккал/год·м<sup>2</sup>·град;

$F_d$  – площа поверхні об'єкта,  $F_d = 80$  м<sup>2</sup>.

$$k_{об} = \frac{13 \cdot 12}{13 \cdot 12 + 2 \cdot 170 + 5,1 \cdot 8} = 0,0872.$$

Тоді стала часу об'єкта матиме вигляд:

$$T = \frac{c_M m_M}{k_k F_k} + \frac{c_M m_M}{k_k F_k + k F_d + \alpha F}; \quad (2.12)$$

$$T = \frac{37,5 \cdot 120 \cdot 0,11}{13 \cdot 12} + \frac{1700 \cdot 0,11}{13 \cdot 12 + 2 \cdot 170 + 5,1 \cdot 80} = 3,37.$$

Відповідно до характеристик деревосушильної камери відношення:

$$\tau_0 T = 0,26, \text{ тоді } \tau_0 = 0,26 T = 0,879.$$

$$(2.13)$$

До середовища MATLAB вводимо параметри позиційного регулятора. У середовищі MATLAB система регуляції має вигляд, як продемонстровано на рисунку 2.5 [8].

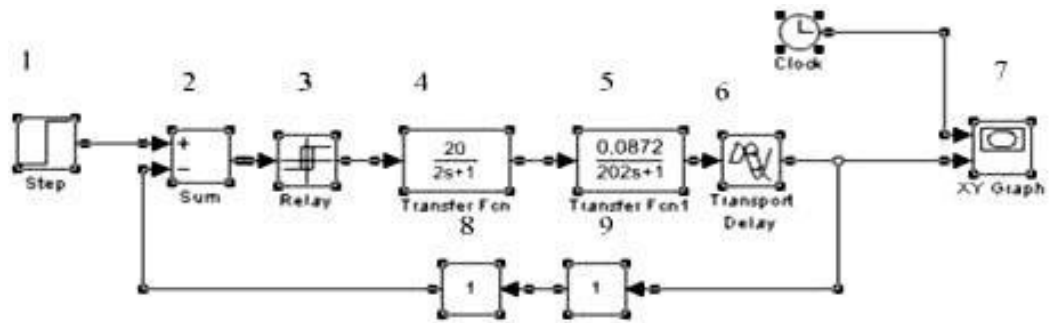


Рисунок 2.5 – Зовнішній вигляд системи регулювання у середовищі MATLAB

1 – step (виконує генерацію одноступінчастої вхідної функції (поодинокий стрибок)); 2 – sum (суматор); 3 – relay (блок реалізує двопозиційне реле із зоною нечутливості); 4 – transfer (блок описується передатною функцією виконавчого механізму); 5 і 6 – transfer (блоки описуються передатними функціями об'єктами регуляції); 7 – graph (блок реалізує графічне відображення результатів дослідження); 8,9 – блоки описуються передавальними функціями перетворювачів та датчиків [8]

Маючи модель у середовищі MATLAB, можемо ввести відповідні значення регуляторів, після чого отримаємо перехідну характеристику, схематично зображену на рисунку 2.6.

Далі можемо провести дослідження стійкості конутур регулювання температури з використанням середовища MATLAB. Загальна умова стійкості системи регулювання температури виходить зі загальної умови стійкості. Для зручності побудуємо карту нулів та полюсів, на якій всі бачимо корені рівняння, які розташовані в лівій його частині комплексної площини. Виходячі з такого результату, можливо констатувати, що система регулювання температурою стійка. [9].

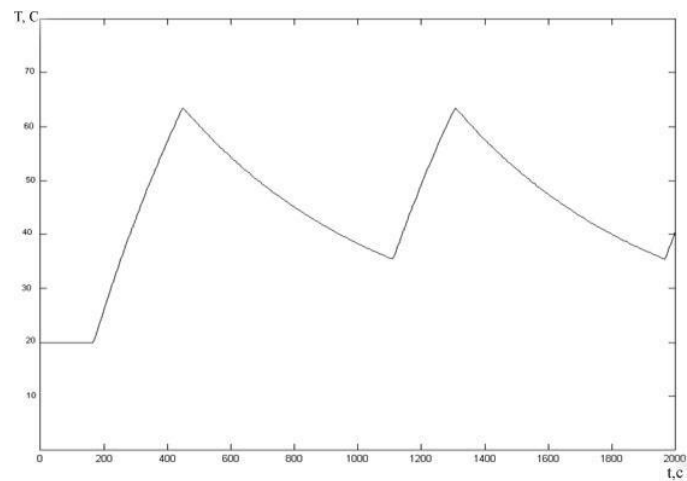


Рисунок 2.6 – Перехідна характеристика вакуумної камери у середовищі MATLAB

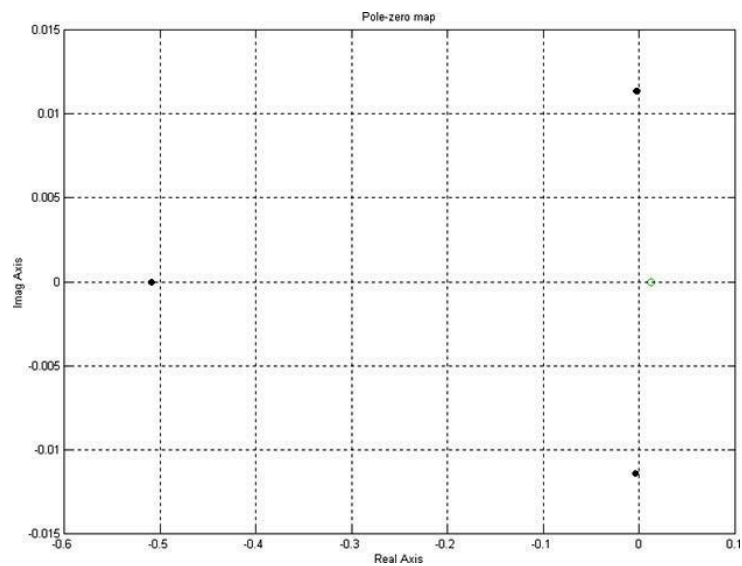


Рисунок 2.7 – Карта нулів та полюсів контуру регулювання температури

Наступним кроком буде проведення дослідження та визначення запасів стійкості контуру регулювання температури. Скористаємось середовищем MATLAB.

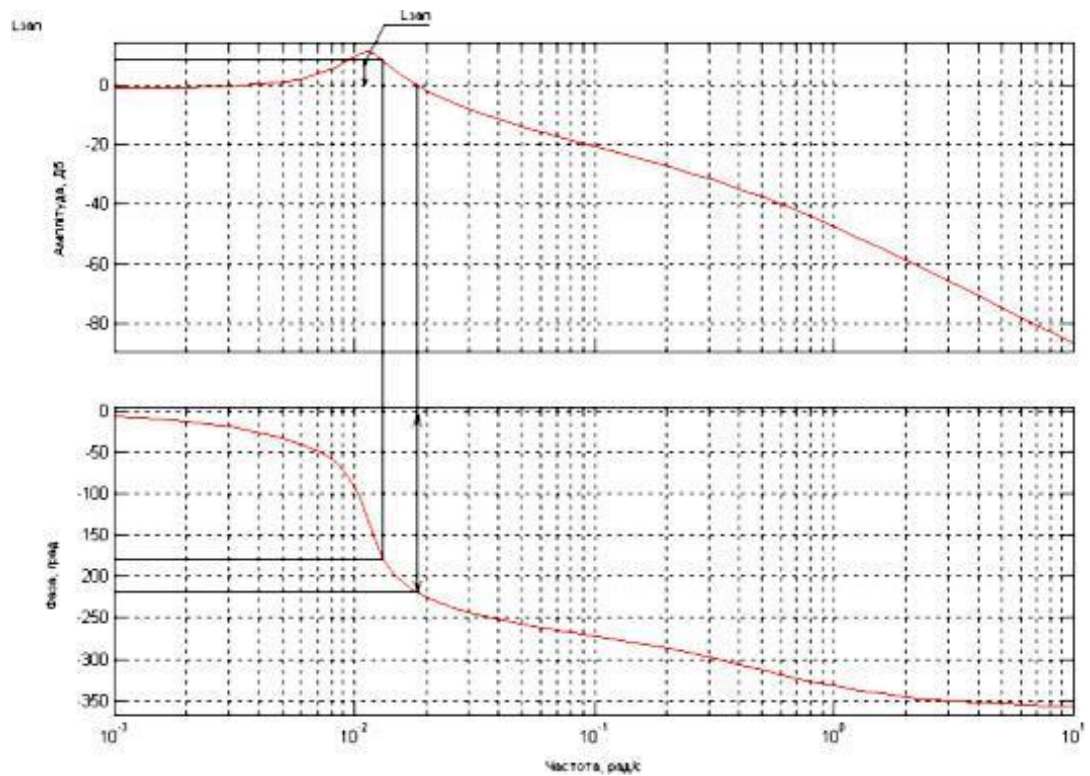


Рисунок 2.8 – АЧХ та ФЧХ контуру регулювання температури

Аналізуючі графіки стійкості контуру регулювання температури вакуумної камери робимо висновок:

- запас стійкості за амплітудою  $\Delta b_{\text{зап}} = 12$  ;
- запас стійкості за фазою  $\Delta \varphi_{\text{зап}} = 210$  градусів

Отримані значення відповідають поставленим цілям. Система є стійкою.

## 2.4 Контури керування технологічним процесом сушки деревини

### 2.4.1 Нагрівальний контур

Завдання нагрівального контуру, який представлено на рисунку 2.9, полягає в підігріві штабелю деревини до встановленої температури та контролі температури протягом усього процесу. Первинні засоби автоматизації температурний: датчик у деревині та теплоносії (ТЕ), вологомір

з корекцією на температуру (ME) виконують первинну фіксацію параметрів, які передають до ПЛК. У системі також присутні циркуляційний насос, підключений через пристрій плавного пуску (NS), та електромагнітні клапани (HE), які регулюють подачу та циркуляцію води, а також котел. Котел є резервуаром з можливістю подачі та зливу води, а нагрівальні елементи представлені ТЕНами, підключеними через напівпровідникові реле. Керування нагрівом виконує ПЛК, який реагує на заданий температурний режим та показання температури води на вході та виході. Контур є закритим, що дозволяє економити воду.

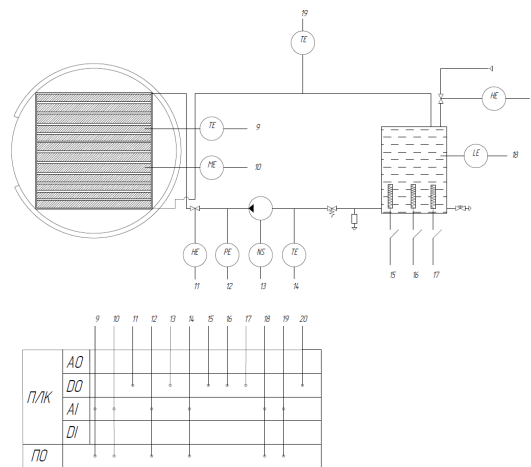


Рисунок 2.9 – Нагрівальний контур

Вода подається в резервуар з зовнішнього джерела за планом або за необхідності через виконавчий механізм, роль якого виконує клапан. Централізована або автономна система водопостачання може виокнувати роль подачі води до камери для висушування. Датчик рівня реалізує функцію контролю рівня води. Запобіжний клапан виконує функцію регулювання тиску. Циркуляційний насос вмикається у разі недостатнього тиску у системі. У контурі також вбудована група безпеки для запобігання аварійним ситуаціям.

#### 2.4.2 Вакуумний контур

Завдання вакуумного контуру, який схематично зображено на рисунку 2.10, полягає у створенні та контролі вакууму в камері для висушування.

Датчик тиску-вакуумметр РТ виконує основну керуючу функцію. Сигнал від цього датчика надходить на ПЛК, який подає команду через пристрій плавного пуску NS на вакуумний насос та електромагнітний клапан закритого типу HE.

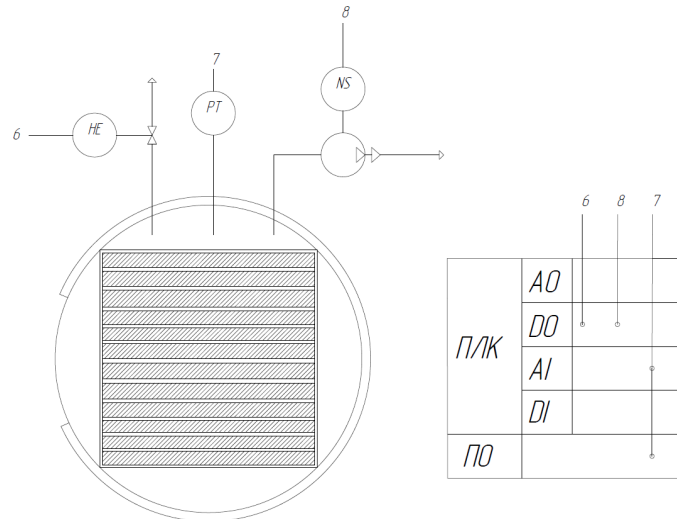


Рисунок 2.10 – Вакуумний контур

Після закриття герметичних дверей камери починається відкачування повітря за допомогою вакуумного насоса до встановленого рівня, необхідного для режиму висушування. Протягом усього технологічного процесу висушування тиск у камері повинен відповідати заданим значенням, а контроль за цими параметрами здійснюється на всіх етапах. Спочатку під час сушіння в камері не створюється середовище низького тиску, а відбувається прогрів штабелю при звичайному тиску. Після цього переходять до основного етапу нагрівання у вакуумному середовищі. Завершуючи процес, до камери подається повітря шляхом відкриття клапана.

#### 2.4.3 Контур виведення конденсату

Завдання контуру полягає у видаленні конденсату, що утворився під час процесу сушки. Пристрій плавного пуску NS, який отримує сигнали від вакуумметра РТ та електромагнітного клапана HE, подає сигнал керування на насос. Якщо є необхідність у регулюванні тиску у камері, то вода віднодиться до навколишнього середовища або в бак.

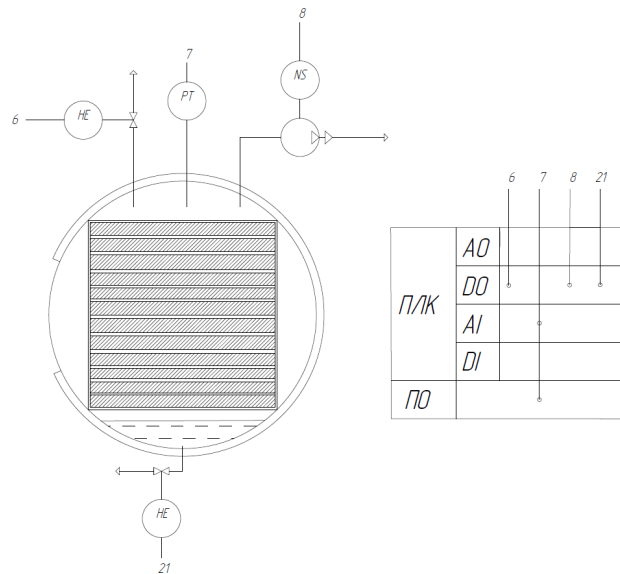


Рисунок 2.11 – Контур виведення конденсату

#### 2.4.4 Охолоджувальний контур

Під час активної фази висушування у камері утворюються й циркулюють водяні пари. Головними завданнями охолоджувального контуру, який ми бачимо на рисунку 2.12, зводиться до охолодження камери та конденсації водяних парів. Охолоджуюча сорочка, через яку проходить вода, розташована на камері, що забезпечує охолодження стінок камери. Волога, що конденсується на стінках, відповідно стікає вниз. Вода для охолодження зберігається в резервуарі, рівень якого контролюється поплавковим датчиком. Подача води в резервуар здійснюється з зовнішнього джерела, яке може бути як автономним, так і централізованим.

Алгоритм циркуляції та подачі води в контурі камери реалізується за допомогою циркуляційного насоса. Пристрій плавного пуску NS забезпечує циркуляційному насосу зменшення пускових струмів, подовжує термін експлуатації. У якості виконавчого механізму використовується електромагнітний клапан HE. Датчик температури контролює її зміни. У контурі під час циркуляції можуть утворюватись повітряні пробки, які усуваються автоматичним клапаном для відводу повітря.

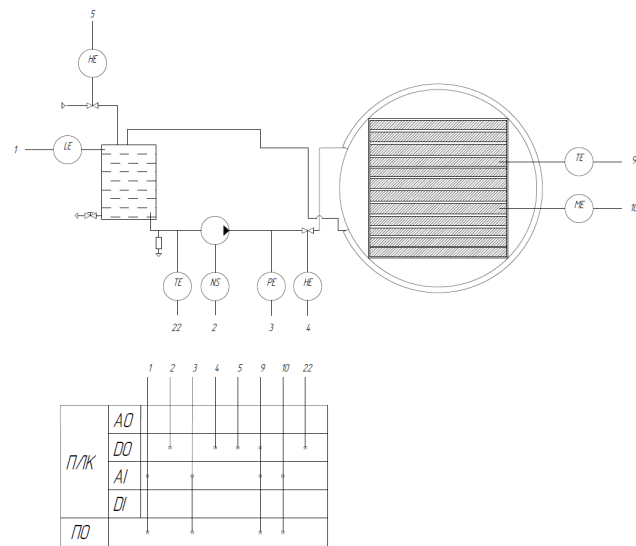


Рисунок 2.12 – Охолоджувальний контур

### Висновок за розділом

Розробили контури керування процесом сушки деревини, а саме вхідні та вихідні сигнали. Для кожного контуру розробили функціональну схему автоматизації. Провели розрахунок та налаштування контуру регулювання температури. Відрегульований контур точно та швидко реагує на коливання в стані об'єкту. Алгоритм вимірювання температури тепер здійснюється цифровим датчиком, який надає сигнал на мікроконтролер, який швидко та якісно оброблює інформацію та видає команду на виконавчий механізм.

### 3. ВИБІР ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ СУШКИ ДЕРЕВИНИ

#### 3.1 Вибір засобів автоматизації

Для вимірювання температури деревини під час сушки було обрано датчик серії ОВЕН ДТС184. Це забезпечить можливість його використання для вимірювань у вакуумі. Блок обробки сигналу знаходиться поза агресивним середовищем, тому датчик може бути використаний в умовах нестандартної температури та вологості. Нормувальний перетворювач служить елементом під'єднання до ПЛК, що дозволяє зчитувати та обробляти його показання за допомогою уніфікованого сигналу.

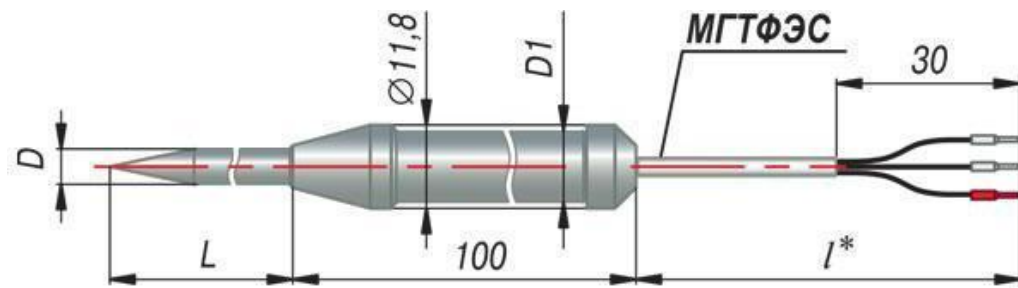


Рисунок 3.1 – особливості конструкції ОВЕН ДТС184

Таблиця 3.1 - Характеристики датчика температури ОВЕН ДТС184

Характеристики	Значення
Діапазон вимірювання	від - 100 до +250°C
Умовний тиск	0,1 – 6,3 МПа
Показник теплової інерції	10 – 30м
Опір ізоляції	100 МОм +
Чутливі елементи	1
Схема підключень	тридротова
Сенсор відносно корпусу	ізольований
Довжина кабелю	довільна, під замовлення
Матеріал захисної арматури	латунь, сталь

Для вимірювання вологості деревини під час сушки було обрано

безконтактний вологомір для деревини WALCOM MD-918. Вимірювальний діапазон 4 ~ 80%, може бути застосований до більш 50 сортів деревини. Функція калібрування на поточну температуру, опція контролю меж діапазону робить цей прибор унікальним в порівнянні з аналогами [10].



Рисунок 3.2 – Загальний вигляд вологоміру WALCOM MD-918 [11]

Таблиця 3.2 – Основні технічні характеристики вологоміру WALCOM MD-918

Діапазон вимірювання вологості	від 4 до 80%
Розподіл	$\pm 1\%$
Похибка	0,5 %
Глибина проникнення СВЧ поля	50 мм
Живлення	3 батарейки 1,5 В типу ААА
Температура зберігання	від -10 °С до +60 °С
Вологість у приміщенні	від 0 до 70% RH
Розміри, мм	132x67x26
Вага, г	95 (без батарейок)
Гарантія	12 міс

Серед інших аналогів відповідний датчик має свої особливості MD-918:

1. Має досить невеликі габарити.
2. Не пошкоджує вимірювальну поверхню.
3. Достатня глибина проникнення випромінювання, що є оптимальним варіантом для більшості пиломатеріалів і виробів з дерева.
4. Можливість вибору сорту деревини.

5. Достатньо широкий діапазон вимірювання від 4 до 80 %.
6. Висока точність вимірювання - похибка  $\pm 1\%$ .
7. Стійкий до збурюючих впливів (температура, вакуум).
8. Висока швидкість вимірювання.

Для вимірювання вакууму в камері був вибраний вакуумметр Пірані PNP101 (рис. 3.3). П'єзоелектричний датчик вакууму Пірані PNP101 широко застосовується в різних галузях, де потрібний точний вимір тиску у вакуумних системах. Він може використовуватися в промисловості, наукових дослідженнях та медицині. Датчик має діапазон вимірів від 0,05 Па до  $1,5E+5$  Па. Точність вимірювань становить 2,5% на діапазоні п'єзодатчика та 15% для Пірані, що забезпечує високу достовірність результатів.

Датчик має електричний інтерфейс DB15VGA, що полегшує його підключення до електронних систем та обробку отриманих даних. Вакуумний інтерфейс датчика - КФ16, що дозволяє його легко встановити вакуумну систему.



Рисунок 3.3 – Зовнішній вигляд вакуумметра Пірані PNP101 [12]

Таблиця 3.4 – Характеристики вакуумметра Пірані PNP101

Принцип вимірювання вакуумного датчика	П'єзо резистивний
Діапазон вимірювання	1400 - 1 мбар
Точність вимірювання	$\pm 0,3\%$ від повної шкали
Швидкість вимірювання	20 мс
Електричне живлення	9 - 30 В DC
Підключення до електромережі	M12 A, 5-полюсна вилка
Робоча температура	від +5 до + 110°C
Температура зберігання	від - 40 до + 70°C
Вихідний сигнал	4 - 20 мА

В якості датчика тиску рідини було обрано WİKA A-10 (рис. 3.4). Структура датчика складається з первинного перетворювача та електронного вимірювального пристрою [13].



Рисунок 3.4 – Зовнішній вигляд WİKA A-10

Таблиця 3.5 – Характеристики WİKA A-10

Характеристика	Значення
Вид робочого середовища	рідина, газ
Діапазони вимірювань	0 – 400 бар
Діапазон допустимих температур робочого середовища	0 – 80°C
Діапазон компенсованих температур	0 – 90°C
Точність вимірювання	$< \pm 0.5 \%$
Тип вихідного сигналу	4 – 20 мА
Напруга живлення	9 – 32 В
Граничний струм	28 мА
Електричне підключення	штекер DIN 43650

**Первинні засоби автоматизації передають сигнал 4 – 20 мА до ПЛК,**

який через виконавчі механізми налаштовує задані параметри висушування деревини.

### **3.2 Вибір виконавчих механізмів та допоміжних пристроїв**

У даній роботі зупинимо свій вибір на нормально-закритому електромагнітному клапані моделі 8616 NBR 230V 50Hz, який є соленоїдним. Цей електромеханічний пристрій призначений для регулювання потоку рідин або газів. Контроль потоку відбувається за рахунок поршня або диску, що встановлено в соленоїдіз сердечником. Головними функціями електромагнітних клапанів в водопостачанні та опаленні є очищення та кондиціонування.

ОВЕН 160(MO2) за своїми технічними характеристиками та функціональними можливостями підходить для регулювання процесу висушування деревини.

Даний ПЛК конкурентноздатний за ціною та оптимальним рівнем технічної підтримки виробником [14].

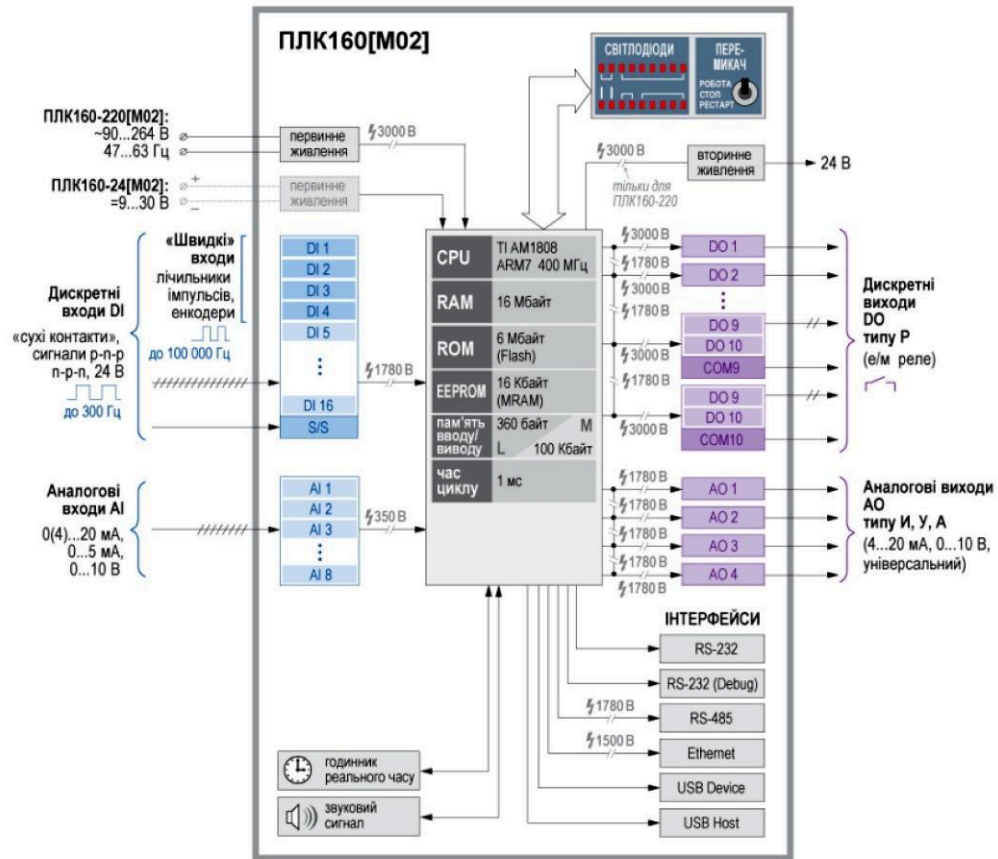


Рисунок 3.5 – Функціональна схема ПЛК160(M02)

Для більшої сумісності та технічної підтримки виробником в якості панелі оператора було обрано ОВЕН СПК 107, функціональна схема представлена на рисунку 3.15. Вибране програмне забезпечення відповідає технічним вимогам, є простим у налаштуванні та використанні, а також сумісне з обраним ПЛК.

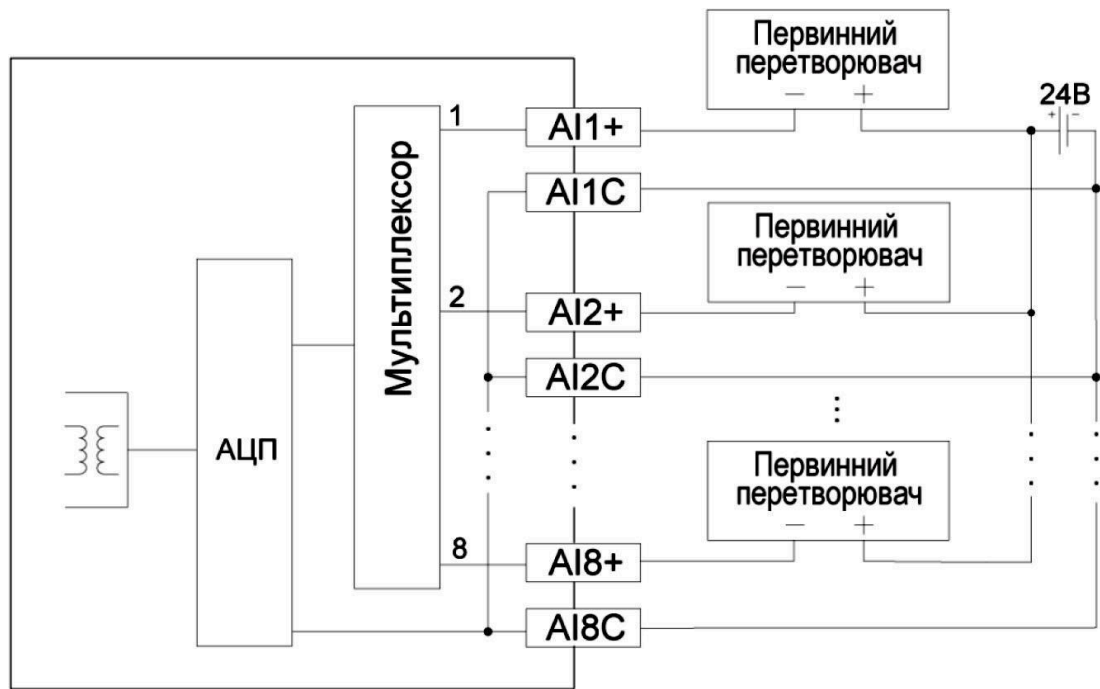


Рисунок 3.6 – Схема підключення аналогових входів ПЛК

ОВЕН СПК 107 має свої певні особливості, що виділяє його серед інших аналогів:

- досить невеликі розміри, що надає компактності при невеликих посадкових місцях;
- дозволяє проектувати алгоритми керування та їх візуалізацію в одному середовищі;
- при необхідності може виконувати функції ПЛК;
- підтримка протоколів NTP та FTP;
- при необхідності можливо оновити програмне забезпечення з USB- та SD-накопичувачі;
- для зручності передбачено достатня кількість комунікаційних інтерфейсів;
- Linux використовується як операційна система;
- Великий та інформативний дисплей.

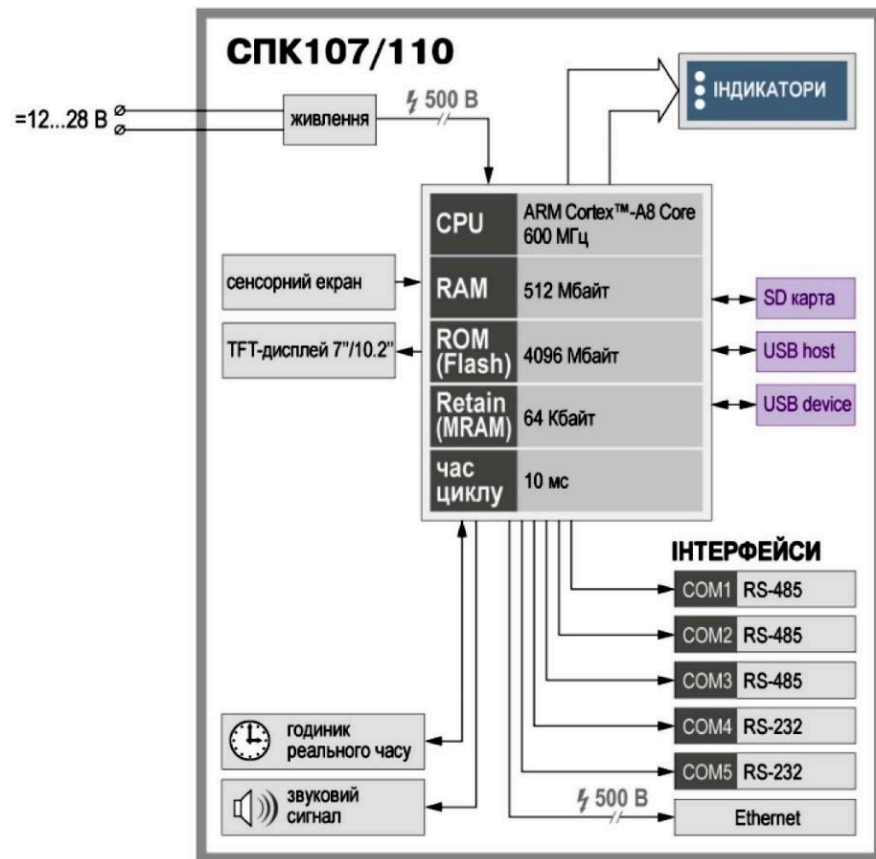


Рисунок 3.7 – Функціональна схема СПК107

Для впровадження алгоритмів автоматизованого процесу сушки деревини у вакуумній камері розробляється програмне забезпечення для програмованих логічних контролерів (ПЛК), на основі якого створюється система автоматизації. CODESYS є комплексом інструментів для промислової автоматизації, що включає інтегроване середовище для відпрацювання застосунку для цифрових контролерів [15].

Вбудована система виконання дає можливість запрограмувати контролер у середовищі CODESYS. При виготовленні та підготовки до продажу вбудована система встановлюється в нього. Але щоб адаптувати систему до інших платформ програм та апаратів можуть бути застосовані спеціальні інструменти.

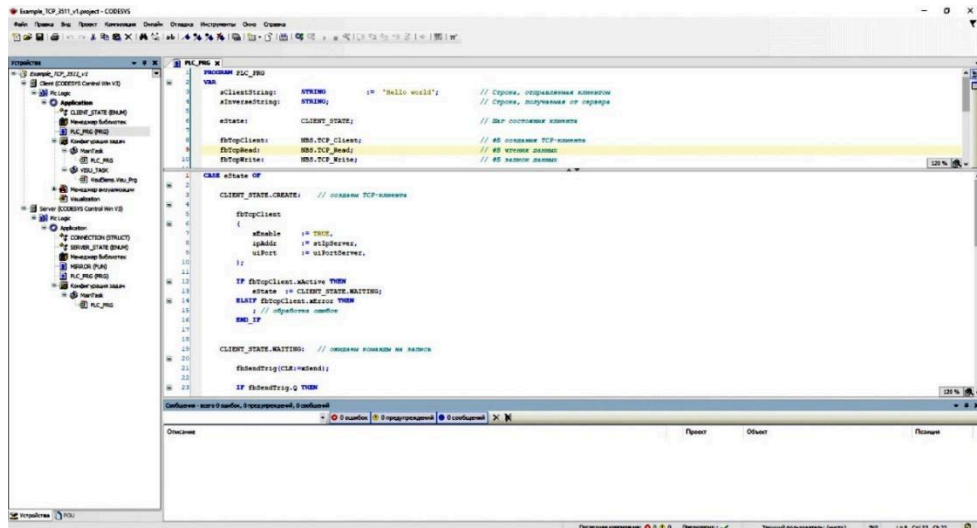


Рисунок 3.8 – Робочий простір IDE CODESYS

За допомогою п'яти мов програмування (рис.3.9)) здійснюється програмування ПЛК в середовищі CODESYS. Ці мови повинні відповідати міжнародному стандарту IEC 61131-3 [15].



Рисунок 3.9 – Мови програмування CODESYS

### Висновки за розділом

Для якісного збору технологічних параметрів обрано сучасні датчики температури деревини та води, вологості в камері, вологості пиломатеріалів, тиску, вакуумметра. Для реалізації алгоритму керування контурами обрані виконавчі механізми: реле, клапани, перетворювач частоти, насос. Для автоматизації технологічного процесу був обраний програмований контролер.

Для програмування алгоритмів автоматизованого процесу сушки деревини у вакуумній камері використана програма CODESYS.

## **ВИСНОВКИ**

Мета кваліфікаційної робота бакалавра досягнута, а саме розроблено автоматизовану систему сушки деревини в вакуумній камері для сушіння, яка матиме швидкодіючі засоби технічної автоматизації, що збільшать надійність та простоту керування для оператора.

У першому розділі проаналізовано технологічний процес сушіння деревини. Проблема сушіння деревини з забезпеченням рівномірності її просушування є ключовою в усьому процесі сушіння будь-якими способами. Кожен варіант сушіння деревини має свої переваги та недоліки. Для проведення подальших досліджень був обраний вакуумний спосіб сушіння деревини.

У другому розділі розробили контури керування процесом сушки деревини, а саме вхідні та вихідні сигнали. Для кожного контуру розробили функціональну схему автоматизації. Провели розрахунок та налаштування контуру регулювання температури. Відрегульований контур точно та швидко реагує на коливання в стані об'єкту. Алгоритм вимірювання температури тепер здійснюється цифровим датчиком, який надає сигнал на мікроконтролер, який швидко та якісно оброблює інформацію та видає команду на виконавчий механізм.

У третьому розділі для якісного збору технологічних параметрів обрано сучасні датчики температури деревини та води, вологості в камері, вологості пиломатеріалів, тиску, вакуумметра. Для реалізації алгоритму керування контурами обрані виконавчі механізми. Для автоматизації технологічного процесу був обраний програмований контролер. Для програмування алгоритмів автоматизованого процесу сушки деревини у вакуумній камері використана програма CODESYS.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Development of the temperature prediction algorithm for smart thermostat – [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://hdl.handle.net/10995/94223> (дата останнього звернення 10-12-2020).
2. Автоматика керування сушильними камерами деревини [Електронний ресурс]. -2020. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.gorlush.com.ua/electronics.aspx>.
3. Сичевский, В.А. Моделирование технологического процесса конвективной сушки пиломатериалов / В.А. Сичевский // Научный журнал// Серия физико-технических наук. 2018. Т. 63. № 4. С. 424- 434.
4. Пінчевська О.О., Спірочкін А.К. Технологія сушіння і захисту деревини. Частина 1. Навчальний посібник. Київ: вид-во, 2021. Ч.1. 171 с.
5. Рокун, Р. Основні технології пропарювання та сушіння деревини. Науковий вісник НЛТУ України, 27(1), 2017. С - 168-171.
6. Теорія автоматичного керування: Навчальний посібник [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», освітньо-професійна програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології кібер-енергетичних систем»; уклад.: О. Й. Штіфзон, П. В. Новіков, В.П. Бунь. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 144 с.
7. Теорія автоматичного керування : навчальний посібник / П. В. Леонт'єв та ін. ; за заг. ред. П. В. Леонт'єва. – Суми : Сумський державний університет, 2024. – 296 с.
8. Лістровий С. В., Мірошник М. А., Клименко Л. А. Теорія автоматичного керування, штучний інтелект і автоматизація процесу прийняття рішення: Навч. посібник. – Харків: УкрДУЗТ, 2019. – 120 с., рис. 24, табл. 1.

9. Хісматулін В. Ш., Сосунов О. О., Сотник В. О. Теорія оптимальних систем автоматичного керування: Навч. посібник. – Харків: УкрДУЗТ, 2022. – 229 с.

10. Керівництво з експлуатації термоперетворювача ОВЕН [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfefindmkaj/https://www.td-etalon.com/files/395/dts-termopreobrazovatel-s.pdf>

11. Каталог безконтактних вологомірів [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <https://3sf.com.ua/ua/pribori/vlagomery/vlagomery-drevesiny/vlagomer-drevesiny-walcom-md-918>.

12. Каталог вакуумметрів [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <https://vactron.org/product>

13. Каталог датчику тиску [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <https://peko.com.ua/process-sensors/pressure-sensors/wika-a-10-12719341-0-400-bar>

14. Керівництво з експлуатації контролера ОВЕН 160 [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <https://ukrspecavtomat.com.ua/uk/products/oven-plk-160/>

15. Керівництво з експлуатації CODESYS [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfefindmkaj/https://aqteck.ua/uploads/102/codesys\\_v3.5.\\_pervyj\\_start\\_2.0\\_\\_ukr.pdf](chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfefindmkaj/https://aqteck.ua/uploads/102/codesys_v3.5._pervyj_start_2.0__ukr.pdf)

16. Методичні рекомендації до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» – Полтава: Національний університет імені Юрія Кондратюка, 2025. – 18 с.



# ДОДАТКИ

## ДОДАТОК А

# CHAPTER 1 ANALYSIS OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF WOOD DRYING AND JUSTIFICATION OF THE DIRECTION OF AUTOMATION

### 1.1 Analysis of the technological process of wood drying

Before analyzing the technological process of wood drying, it would be advisable to explain the concept of drying itself. Wood drying is the process of removing moisture from wood and lumber to the required level, which is carried out by evaporating liquid from the material. Directly, the moisture contained in the wood is converted into steam under control and released into the environment. In general, the drying process is accompanied by a number of interrelated phenomena, during which various material transformations occur, including phase, structural and mechanical changes in wood, as well as internal and external heat exchange processes.

The main goal of the process of drying and processing wood is a cardinal change in the quality of wood materials through technological processing. This turns the raw material into a high-quality industrial material suitable for use in industry, construction, energy, etc. Changing the properties of wood makes it highly durable, biologically stable and stable in shape and size. In addition, it gives the wood an aesthetic and presentable appearance, improves its thermal insulation and dielectric characteristics.

Note that the change in the physical and operational characteristics of wood, which occurs due to fluctuations in humidity, determines the technological goals of the drying process, namely:

- protection against biological damage;
- reduction of actual weight;
- increase in mechanical strength;
- increase in resistance to environmental influences;

- improving the quality of wood as a material as a whole;
- preventing future changes in the linear dimensions of wood.

During drying, wood is in a gaseous or liquid medium, which is called a drying agent. Its main function is to exchange materials and energy. The drying agent transfers heat to the wood and removes moisture formed as a result of evaporation. Air, water vapor, as well as hydrophobic liquids or aqueous solutions of salts and other similar substances can be involved in the role of a drying agent.

The modern woodworking industry involves drying wood in various forms, namely: boards, beams, round timber, veneer, chips, chips and blanks of the desired shape. As a rule, lumber is pre-dried naturally at the felling site in order to reduce their weight and significantly reduce the costs of further transportation and processing. Such primary drying also protects the wood from rapid decay, damage by fungi, insects and various microorganisms, which allows you to preserve its quality until delivery to woodworking enterprises, where it is subject to further processing.

Today, domestic and foreign specialists in the field of drying and wood protection face certain challenges that need to be overcome. The drying process requires a higher level of technical and technological scientific knowledge every day. The main task facing drying specialists is to significantly improve the quality and stability of wood throughout the entire production process. No less important is the increase in the final quality of drying and wood protection, which, as a result, will improve its characteristics as a future material for the production of various wood products.

It should be noted that the problem of drying wood while ensuring its uniformity of drying is key in the entire drying process. The specificity of drying is that the outer layers dry faster than the inner ones, which leads to the appearance of mechanical stresses and, as a result, the wood tissue ruptures. Therefore, effective control of the drying process consists in maintaining a balance between the rate of moisture evaporation from the outer and inner layers of the processed wood. This, in turn, will ensure the receipt of evenly dried and high-quality wood.

In industrial conditions, wood is usually processed in drying chambers, where the parameters of the drying process are under full continuous control.

Therefore, in order to obtain high quality indicators of wood processing, it is necessary to use industrial tools and drying methods, automated systems for precise control of technological process parameters. Also, the presence of qualified workers working with wood is a prerequisite for future success and achieving high production efficiency.

## 1.2 Types of wood drying

In modern domestic and foreign woodworking industries, there are many methods and types of wood drying. They differ in the technology of execution, the physical principles on which the process is based, the design of drying chambers, the accuracy of monitoring and adjusting parameters, as well as the necessary technical equipment for their implementation.

### 1.2.1 Atmospheric drying

One of the effective types of drying is the so-called atmospheric drying of wood. During atmospheric drying, wood and lumber are stacked in stacks in specially designated open warehouses, where the drying agent is atmospheric air. This drying method is economically profitable and one of the oldest, since it does not require fuel and electricity costs, and does not require the use of expensive and high-tech equipment. Along with low cost compared to other drying methods, it ensures high quality of the final product if performed correctly. Atmospheric drying is typical for woodworking enterprises that process large volumes of wood for industry.

When using this method, the parameters of the air used as a drying agent cannot be regulated. These parameters are influenced by the climatic conditions of the region where the drying takes place, as well as the season and weather conditions at a particular moment. In drying warehouses, their own microclimate is formed due to the increased level of humidity that occurs as a result of the

evaporation of moisture from the wood. The drying process can be improved by stacking lumber in correct stacks, increasing ventilation in the warehouse and using special industrial fans.

It should be noted that the use of atmospheric drying allows you to achieve fairly low levels of wood moisture: up to 20% in temperate and northern climatic zones, and up to 15% in the south. Wood with this level of humidity is suitable for the manufacture of external structures and products that are operated outdoors. However, for further use in closed rooms, additional drying using industrial methods is usually recommended. A win-win option would be to combine atmospheric drying with other techniques, as this allows you to reduce drying costs and improve the quality of the final product. Atmospheric drying has many advantages, including low cost, ease of organization and implementation of the process, as well as significantly lower residual stresses in wood compared to the chamber method. With an optimal combination of natural conditions, choosing a suitable location for the warehouse and its organization, adjusting the density of material stacking and protecting the ends of the boards, you can achieve quite high results. This means that if you follow the atmospheric drying technology, you can get really high-quality materials. If the organization of the process does not violate technological requirements, atmospheric drying helps reduce the risk of warping, cracking and deformation of lumber.



Figure 1.1 - Atmospheric drying of wood

Among the disadvantages of atmospheric drying, it is worth noting the low level of control and predictability of the process. The main factors affecting drying are temperature, humidity and air speed, which constantly change depending on the time of day, season, as well as climatic and weather conditions. In the process of atmospheric drying, it is difficult to predict the exact drying time. Although this method is simple, violation of the technology can lead to damage to the wood, since in the raw state it becomes vulnerable to fungi and pests. In addition, due to the low intensity, atmospheric drying takes a lot of time, and also requires significant production areas for storage.

The organization of the drying process itself is as follows. For drying, wood is placed on a foundation with a height of half a meter, made of metal, concrete or treated wood. The stacking is carried out according to a certain developed method. It is customary to form stacks 2.5 meters wide and 5 meters high. Proper stacking is the key to successful drying of wood. Wood up to 15 centimeters wide is stacked in rows, separated by spacers, for which prepared dry slats are used. It is important to select material with the same cross-section when stacking wood in rows. Package stacks are most often used. When stacking wood in a package, it is sorted by size, grade, cross-section, etc. The packages are stacked on a foundation, the distance between them is kept small. The width and height of the packages are arbitrary. The packages are separated from each other by spacers, usually 10×10 centimeters in size.

### 1.2.2 Infrared drying

In practice, one of the most effective methods of drying wood is the use of infrared radiation, which is visualized in Figure 1.2. This approach guarantees uniform drying and high quality of the final product. As a result, deformations and defects of wood during drying are minimized.

Infrared drying is the drying of wood using infrared heating panels. Such dryers are equipped with infrared emitters, a ventilation and air mixing system, and

temperature and humidity sensors. The principle of such drying is based on heating the water in the wood with infrared radiation.

The wood is stacked in even stacks, infrared panels are placed between the layers of lumber, after which the stacks are placed in a drying chamber. Infrared panels are installed on the walls of the chamber, and humidity and temperature sensors are located inside.



Figure 1.2 – Infrared wood drying

All electronics are connected to a programmable logic controller (PLC) to monitor and control the drying process. The moisture contained in the wood is heated and evaporated by infrared radiation. The resulting steam is discharged to the outside through the ventilation system and condenses on the surfaces. The wood does not heat up significantly, since the radiation affects water molecules, not air.

The standard temperature for the drying process is 65°C, which contributes to the maximum preservation of the wood structure, preventing fiber breaks and other defects. This drying method is economical, does not take much time and has low operating costs. In addition, the chamberless method of infrared drying deserves attention. The wood is also stacked in stacks, infrared plates and a special

reflective material are placed between the layers. The stacks are covered with reflective plates on all sides.

### 1.2.3 Condensation drying

In addition, it is necessary to consider in detail such a type of drying as condensation. In condensation drying, air acts as a drying agent. The main feature of this method is that moist air is not removed from the drying chamber, but is dried in a condensation unit, after which it is heated and returned back to the chamber for reuse in the drying process. Thus, drying takes place in a closed cycle without ventilation. This process saves energy, which is then used for drying.

In a condensation drying chamber, air constantly circulates, and its relative humidity is controlled using a condensing device. After the working air is dried, condensate is removed from the chamber, and the purified air is heated and mixed with the working air. The resulting mixture is heated to the required temperature in a special heater. Standard freon is usually used for cooling.

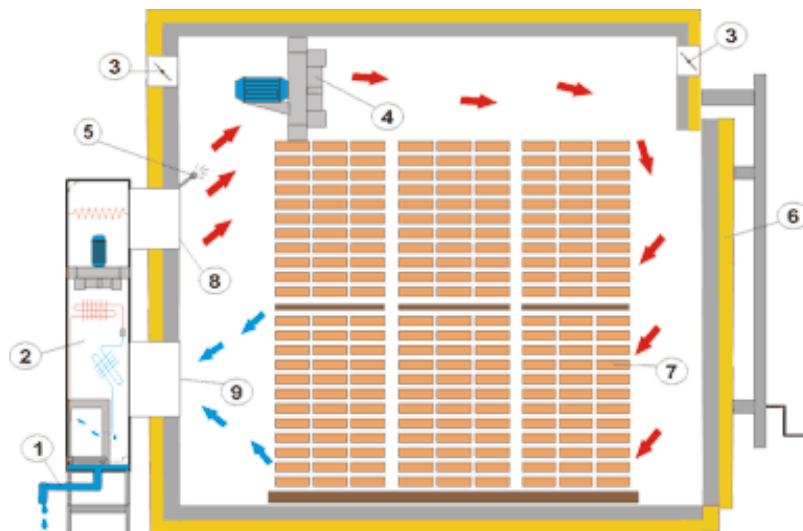


Figure 1.3 - Condensation drying chamber diagram

- 1 - drainage tube; 2 - external or internal condensing unit; 3 - air exchange system; 4 - fan panel;  
5 - humidification; 6 - door with a release mechanism; 7 - stack;  
8 - condensing unit outlet channel; 9 - condensing unit suction channel.

Condensation drying chambers in the woodworking industry can have various shapes and configurations. They also differ in temperature regimes depending on the refrigerant used in the condensing unit. Typically, manufacturers set the temperature at 40-45°C, which is due to the characteristics of the refrigerants. In some cases, refrigerants are used that allow the temperature to be increased to 75°C. According to the principle of operation, condensing chambers are periodic and continuous chambers. Continuous chambers are used quite rarely. In order to obtain the necessary air circulation, in addition to the heating surface and the condensing device, it is necessary to install fans that are installed next to the tunnel. The air is taken from the wet side, then, passing through the condenser to the heating devices, it is directed to the dry side.

Reducing the level of air humidity in the convection chamber is possible only by adding a certain amount of outside air, which directly depends on its condition. In contrast, condensation drying chambers do not have this drawback, since they are almost not affected by external factors. This allows you to adjust the parameters of the drying process more precisely.

The advantages of this drying method include high quality of the dried material, relative ease of implementation and low costs. Due to the low operating temperature, the wood does not warp, does not change color, and is almost not subject to internal stresses.

Among the disadvantages, it is necessary to note the long drying time, since this method requires twice as much time. In addition, the final product does not have the desired proper protection. Since wood is dried at low temperatures, it remains vulnerable to fungal diseases because it is not sufficiently sterilized.

#### 1.2.4 Convective Drying

Let us consider in detail the convective method of drying wood. Convective or chamber drying is the process of drying wood with hot air in a specially equipped room known as a chamber (Fig. 1.4).

These dryers are equipped with a special boiler, heater, fans, shutters and humidification systems. Typically, the chambers are made of heat-insulating plates consisting of a metal profile and a heat-insulating layer. There are periodic and continuous chambers.



Figure 1.4 – Chamber drying of wood

So, the air heated by the heater circulates in the volume of the chamber, passing through stacks of wood. Under the influence of heat, the wood releases moisture, which enters the working air. After reaching the required level of humidity, the humid air is discharged outside through the shutter. The temperature of the air, wood and coolant in the heater, as well as humidity, fan speed and other process parameters are controlled by a programmable logic controller (PLC).

The technological processes include the initial heating of the wood, drying, moisture treatment (humidification) and conditioning. To avoid damage to the wood and ensure more uniform drying, the air and the wood itself are periodically moistened using a humidification system.

Chamber drying of wood is carried out in one of the modes recommended by the standard. According to temperature indicators, soft, normal, forced and

high-temperature drying modes are distinguished. The choice of the appropriate mode depends on the type of wood, the type and size of the lumber, as well as their final destination.

Among the disadvantages, one can single out the possible unevenness of wood drying. The most significant disadvantage of this method is the high cost of the chamber and significant energy costs required for heating the coolant, conditioning and circulation of the drying agent. However, at the same time, there are a number of advantages, namely the possibility of reducing wood moisture to 6%, saving time on material preparation, relatively high drying speed, excellent quality of the final product, full control over the process and the availability of various drying modes.

#### 1.2.5 Microwave drying

An interesting method of drying wood is microwave drying. Microwave drying is the process of drying wood using an electromagnetic field of ultrahigh frequencies. Such drying is demonstrated in Figure 1.5. The basic principle of operation is to convert electromagnetic energy penetrating the wood into thermal energy. This leads to heating of the wood and the water contained in it by creating intermolecular friction. Thus, the electromagnetic energy is converted into heat, and the moisture in the wood evaporates.



Figure 1.5 - Example of a microwave drying chamber

The energy of the electromagnetic field instantly penetrates the wood, but its absorption varies in different parts of the material. This is due to the fact that different components of wood have their own dielectric properties that affect the absorption process. In addition, this method is also different in the distribution of thermal energy: the maximum temperature is reached inside the material, and not on its surface. Heating in such dryers occurs much faster than in traditional ones, since there is no need to first heat steam or air, which would then transfer heat to the material.

Wood has a high ability to absorb microwave radiation due to its significant level of initial moisture. During the heating process, the heat distribution in the wood occurs in such a way that the diffusion of steam from the inner layers to the outer ones is significantly accelerated. This is due to the fact that the pressure, temperature and concentration gradients that affect the diffusion rate are naturally directed from the central layers to the outer ones. This feature increases the efficiency of the drying process. The frequency, magnetic field strength and dielectric characteristics of the wood determine the level of heat generated, and these parameters are selected for a specific type of material. The driving force of moisture during its evaporation is the excess pressure that arises in the internal layers of the wood as a result of heating using microwave radiation.

One of the characteristic features of the above drying method is its selectivity. This is explained by the fact that the tangent of the dielectric loss angle in wood is directly proportional to humidity. In areas with high humidity, energy losses are higher, which leads to more intense heating, while in areas with low humidity the opposite situation is observed.

The chamber itself consists of magnetrons, power supplies, microwave waveguides, a radiation system, reverse fans, an exhaust system and other components that depend on the specific configuration of the installation.

Among the advantages of this drying method, one can single out a high process speed, the ability to quickly and efficiently dry large-sized timber, as well

as high quality of the final product and improvement of wood properties. In addition, this method is universal.

The disadvantages of the microwave drying method are the need for operator control, the large size of the drying chamber, the high cost of both the equipment and the process itself, as well as significant energy costs. In addition, process control is somewhat complicated, since conventional temperature and humidity sensors cannot be placed in this chamber due to the physical characteristics of the process. Other disadvantages include low efficiency, low productivity, and the requirement for highly qualified service personnel.

### 1.2.6 Vacuum drying

An effective and interesting method of drying wood is vacuum drying. Vacuum drying is a method of drying wood under vacuum conditions. This process takes place in a specially equipped, hermetic chamber from which air is pumped out. An example of such a chamber is shown in Figure 1.6. The vacuum changes the processes of heating, liquid evaporation, diffusion, and mass transfer. This allows for a significant reduction in drying time and an increase in the quality of the dried material.



Figure 1.6 - Example of a vacuum drying chamber

The wood is stacked, with each layer of lumber placed between aluminum heating panels, through which hot water circulates, warming the wood mass. The

stack is placed in a drying chamber, where the drying process takes place in three stages. First, the wood is heated at atmospheric pressure, then a vacuum is created, which allows the main drying process to begin. At the final stage, conditioning occurs: the wood is cooled to the required temperature to avoid deformations caused by the temperature difference. The evaporated moisture condenses on the walls of the chamber and condensation panels and is discharged outside. A specific drying mode is set for each type of wood, which determines the temperature and duration of each stage.

Drying takes place at a stable vacuum within 0.1 - 0.6 bar, without the need to use fans, various humidification systems or special measuring devices.

The above process is explained by the physical principles of vacuum drying. Under the influence of pressure, moisture moves from the inner layers of wood to the outer ones. After evaporation, the outer layers are moistened again with water from the inner ones, which ensures a smooth process and protects the wood from damage and deformation. Due to the high pressure in the chamber, the water in the wood boils and begins to evaporate at much lower temperatures - 45-60°C, depending on the pressure. This has a positive effect on the quality of the wood. Vacuum drying, due to its advantages and features, is often used for processing valuable wood species.

Let's list the advantages of vacuum drying, including:

- drying speed;
- high quality of the final material;
- low energy costs;
- uniform drying of wood along the entire length and width;
- ease of installation and use of the drying unit.

Let's list the disadvantages of vacuum drying, including:

- high cost of equipment;
- limited volume of one-time loading of the chamber, which means relatively small production volumes.

### Conclusions by section

The problem of drying wood with ensuring uniformity of its drying is key in the entire drying process by any methods. Each option for drying wood has its advantages and disadvantages. For further research, the vacuum method of drying wood was chosen.

## **ДОДАТОК Б**

Міністерство освіти та науки України  
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»  
Кафедра автоматики, електроніки та телекомунікацій

## **Автоматизація технологічного процесу сушки деревини**

### **Кваліфікаційна робота бакалавра**

Виконав:

студент 401МЕ групи

Керівник:

к.т.н, доцент

Кащенко А.С.

Галай В.М.

Полтава 2025

**Предметом кваліфікаційної роботи бакалавра** є технологічний процес сушки деревини, а саме вакуумний, нагрівальний, охолоджуючий контури та контур виведення конденсату.

**Об'єктом кваліфікаційної роботи бакалавра** є дослідження можливості розроблення САК технологічного процесу сушки деревини.

**Метою кваліфікаційної роботи бакалавра** є розроблення автоматизованої системи сушки деревини в вакуумній сушильній камері, яка володітиме технічними показниками оптимального рівня, високою надійністю та простим інтерфейсом керування для користувача-оператора.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати наступні **завдання**:

- виконати огляд існуючих видів сушки деревини, виявити переваги та недоліки кожного методу;
- вибрати та обґрунтувати структурну систему керування та здійснити її опис;
- розробити контури керування процесом сушки деревини, для кожного контуру розробити алгоритм керування;
- обрати засоби автоматизації та виконавчі механізми.

**Аналіз видів сушки деревини**



Атмосферна сушка деревини



Інфрачервона сушка деревини

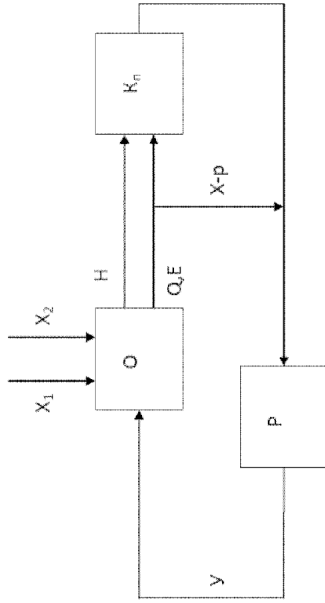


Камерна сушка деревини



Приклад вакуумної сушильної камери

**Структурна схема сушки деревини**



O – об'єкт регуляції; P – регулятор;  $K_n$  – керуючий пристрій,  $X_1, X_2$  – входні параметри;  
 Y – регулюючий вплив; Q, E – параметри об'єкта, які характеризують якість та економічність,  
 H – обмеження

№ п/п	Сигнал	Діапазон вимірювань	Кількість точок	Тип сигналу
1	Температура штабеля деревини	0 – 85°C	1	4 – 20mA
2	Температура води в контурі	1 – 90°C	2	4 – 20mA
3	Вологість штабеля деревини	4 – 90%	1(4)	4 – 20mA / RS – 485
4	Рівень води в резервуарі	0-2м	2	4 – 20mA
5	Рівень вакууму	1400-1мбар	1	4 – 20mA
6	Тиск у водянному контурі	0-16 бар	2	4 – 20mA

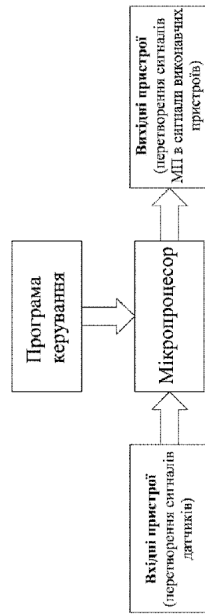
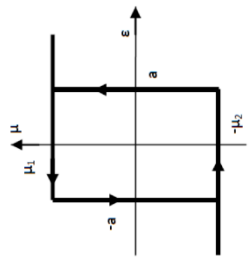
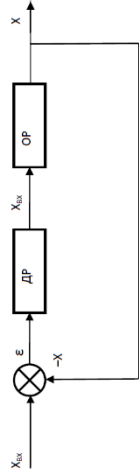


Схема системи управління з урахуванням мікропроцесора

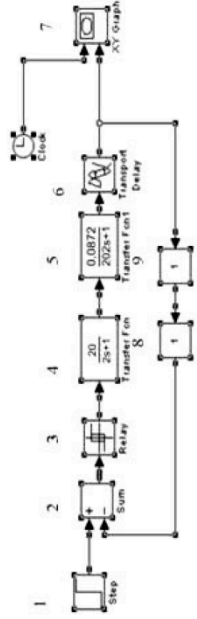
**Дослідження контуру регулювання температури сушки деревини**



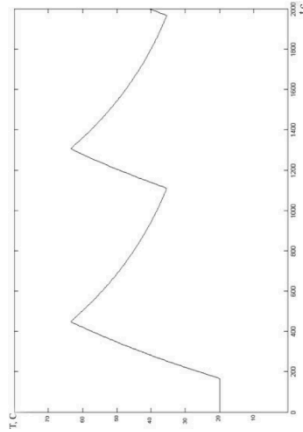
Статична характеристика двопозиційного регулятора із зоною невіднозначності



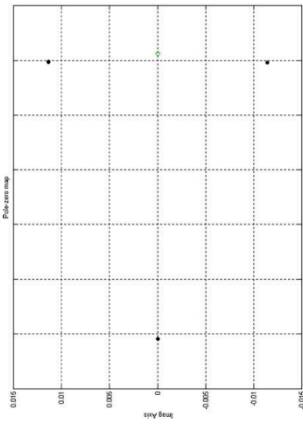
Статична характеристика двопозиційного регулятора із зоною невіднозначності



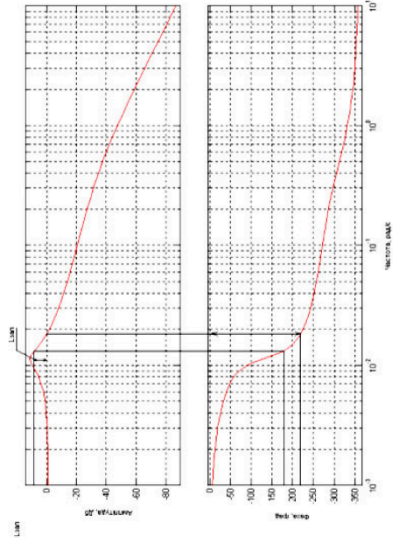
Зовнішній вигляд системи регулювання у середовищі MATLAB



Перехідна характеристика вакуумної камери побудована за допомогою моделювання у MATLAB

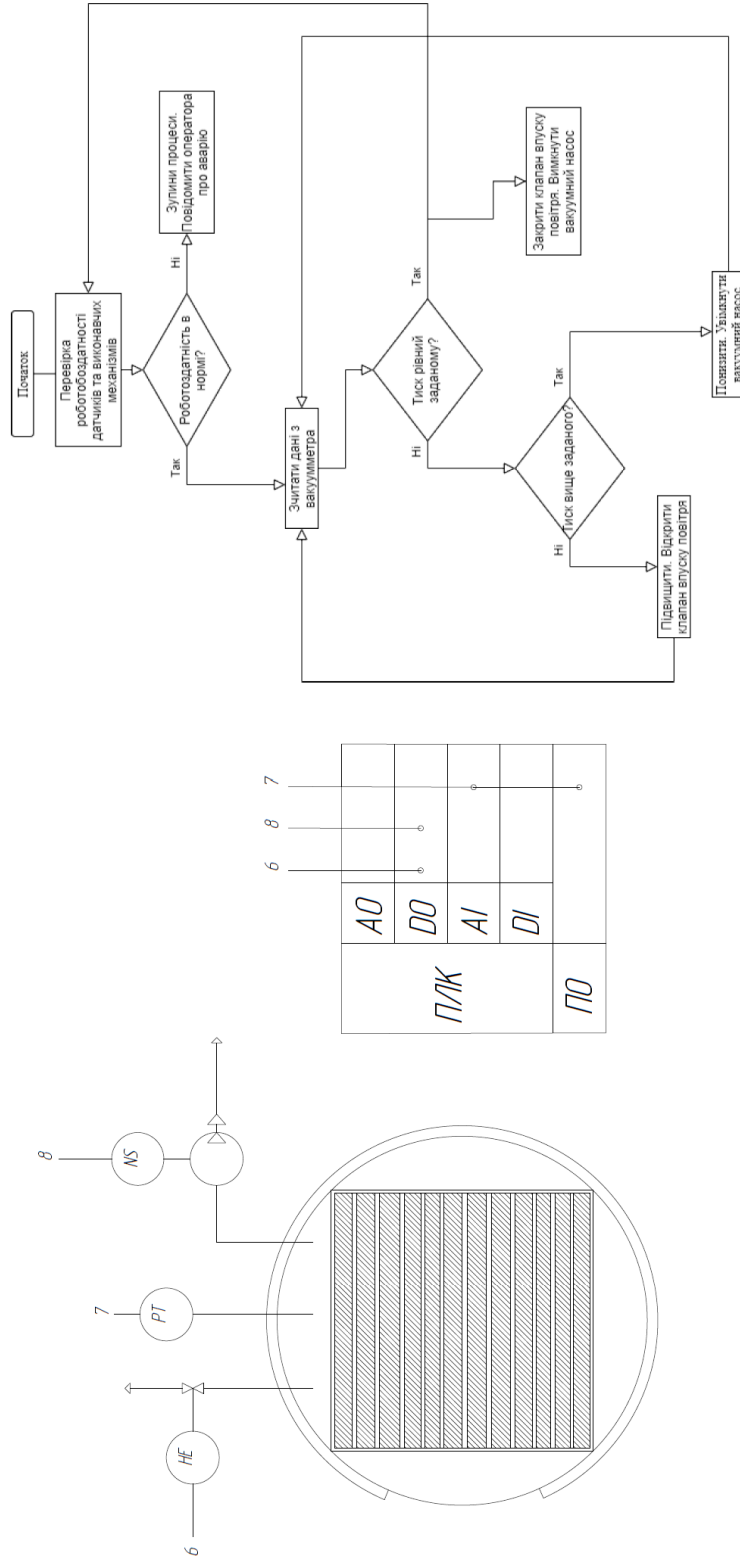


Карта нулів та полюсів системи

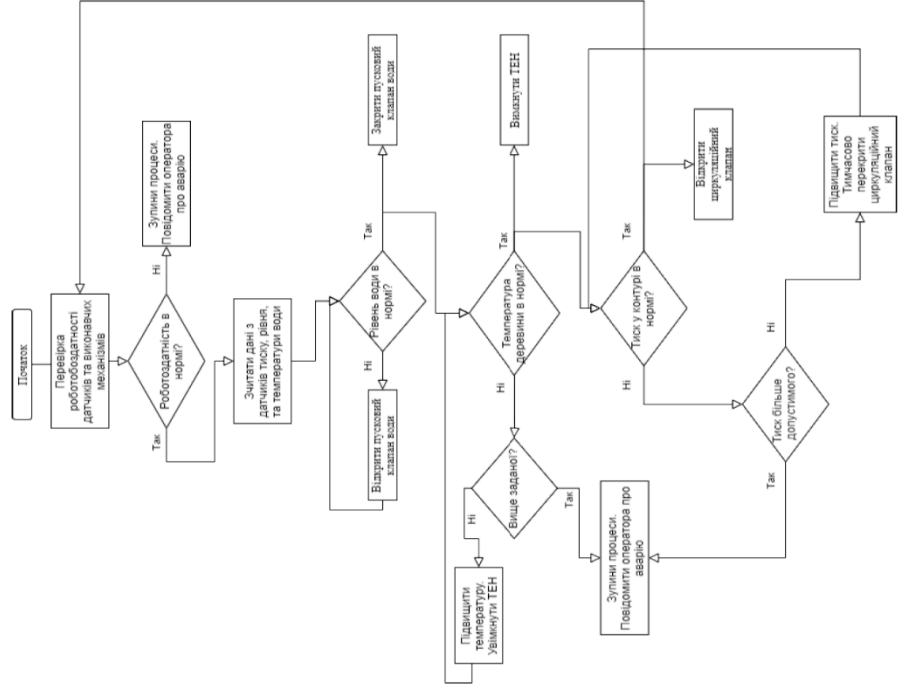
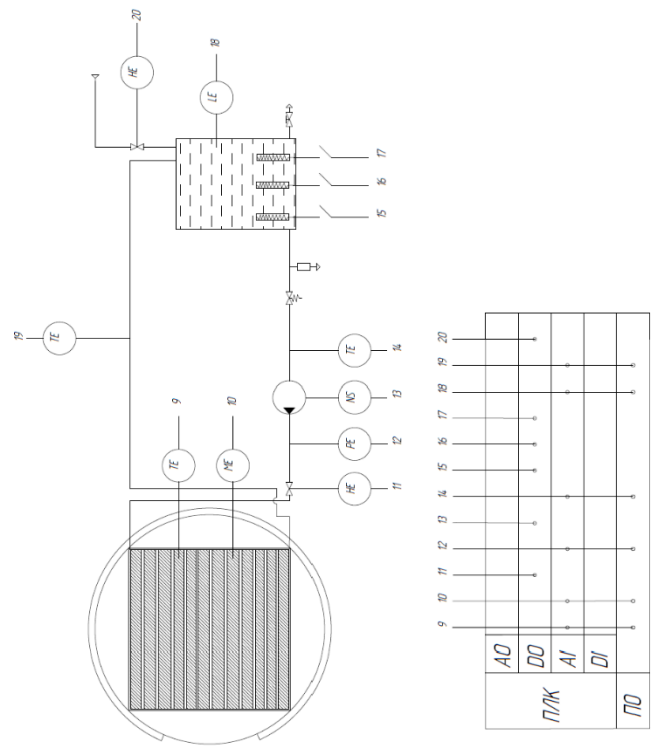


АЧХ та ФЧХ системи

**Вакуумний контур керування технологічним процесом сушки деревини**

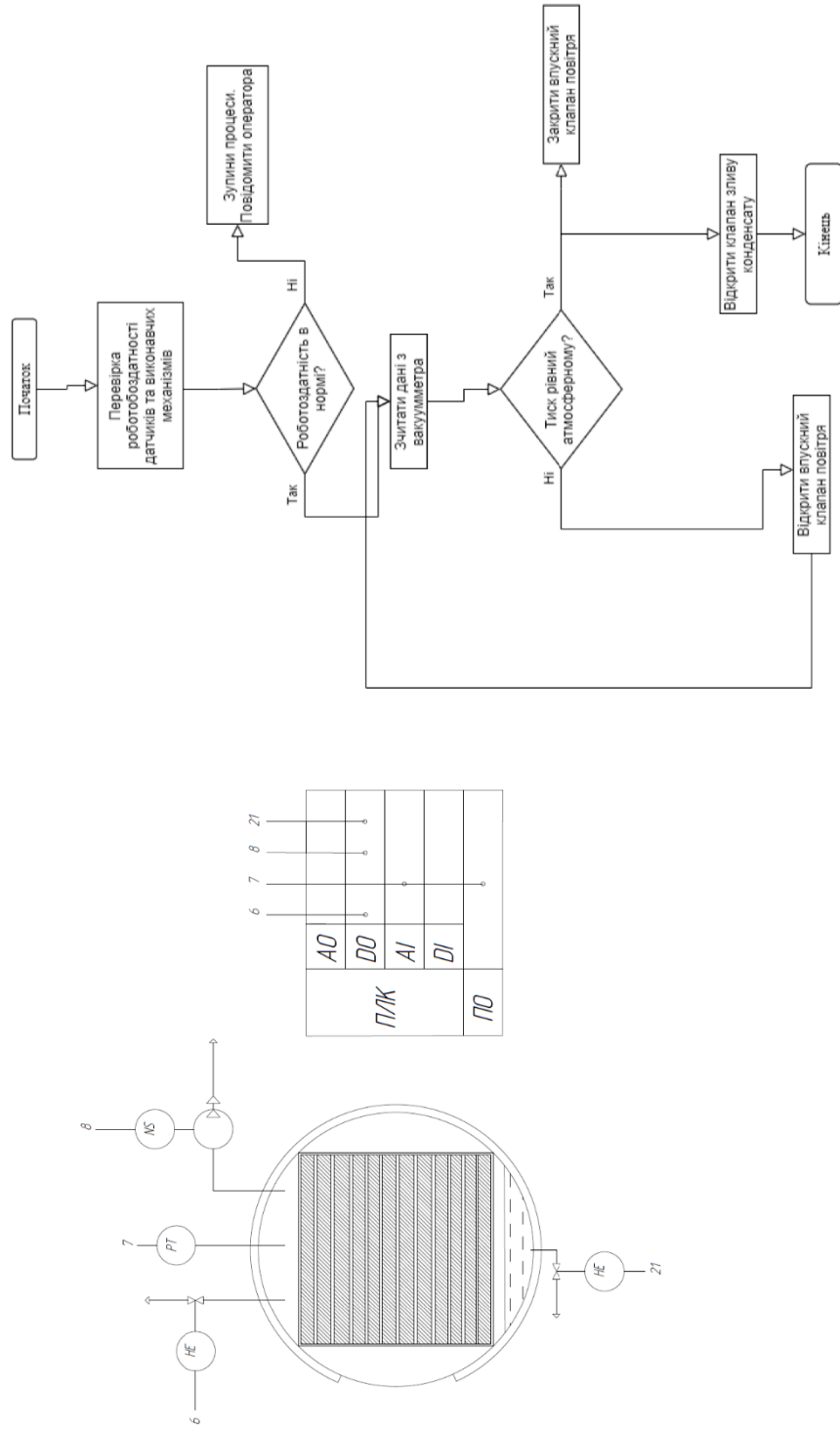


**Нагрівальний контур керування технологічним процесом сушки деревини**





**Контур виведення конденсату керування технологічним процесом сушки деревини**



## ВИСНОВКИ

Мета кваліфікаційної робота бакалавра досягнута, а саме розроблено автоматизовану систему сушки деревини в вакуумній сушильній камері, яка володітиме технічними показниками оптимального рівня, високою надійністю та простим інтерфейсом керування для користувача-оператора.

У першому розділі проаналізовано технологічний процес сушіння деревини. Проблема сушіння деревини з забезпеченням рівномірності її просушування є ключовою в усьому процесі сушіння будь-якими способами. Кожен варіант сушіння деревини має свої переваги та недоліки. Для проведення подальших досліджень був обраний вакуумний спосіб сушіння деревини.

У другому розділі розробили контури керування процесом сушки деревини, а саме вхідні та вихідні сигнали. Для кожного контуру розробили функціональну схему автоматизації. Провели розрахунок та налаштування контуру регулювання температури. Що дає можливість точніше і головне швидше реагувати на зміну стану об'єкта автоматизації. Також відбулися зміни у вимірі температури: після автоматизації значення температури знімаються цифровими датчиками, значення яких обробляється мікроконтролером, який дає високу швидкість та точності обробки інформації.

У третьому розділі для якісного збору технологічних параметрів обрано сучасні датчики температури деревини та води, вологості в камері, вологості пилотматеріалів, тиску, вакуумметра. Для реалізації алгоритму керування контурами обрані виконавчі механізми: реле, клапани, перетворювач частоти, насос. Для автоматизації технологічного процесу був обраний програмований контролер. Для програмування алгоритмів автоматизованого процесу сушки деревини у вакуумній камері використана програма CODESYS.

Дякую за увагу!