

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

«Допущено до захисту»

Зав. кафедри АВП

к.т.н., доцент

\_\_\_\_\_ Олександр ДІДИК

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
**за другим (магістерським) рівнем вищої освіти**

**на тему:**

**Дослідження та модернізація системи керування  
треступеневим сушінням деревини у камерній сушарці  
гібридного типу**

Виконав здобувач II курсу групи АК-24М  
ОПП «Автоматизація та комп'ютерно-  
інтегровані технології»  
спеціальності 174 «Автоматизація,  
комп'ютерно-інтегровані технології та  
робототехніка»

\_\_\_\_\_ Андрій Журавель

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

Керівник проекту

доцент, канд.техн.наук

\_\_\_\_\_ Віктор БОСЬКО

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

Рецензент

\_\_\_\_\_ **Іван САВЕЛЕНКО**

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

м. Кропивницький

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра автоматизації виробничих процесів

Рівень вищої освіти магістр

Галузь знань 17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації

Спеціальність 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри Дідик О.К.

“ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2025 року

**ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ  
ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ  
ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ**

Журавля Андрія Васильовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження та модернізація системи керування триступеневим сушінням деревини у камерній сушарці гібридного типу

2. Керівник роботи Босько Віктор Васильович, канд. техн. наук, доцент,

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

3. Строк подання студентом роботи до захисту 02.12.2025 р.

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи Метою розробки є дослідження та програмна реалізація мікропроцесорної системи керування сушінням деревини 1. Призначення системи; 2. Огляд існуючих систем, технологій, архітектур та програмних рішень за профілем теми магістерської роботи; 3. Опис функціонування системи; 4. Реалізація роботи. розрахунки і експериментальні дані, що підтверджують вірність проектних та програмних рішень. впровадження системи в промислову експлуатацію.

**5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи**

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Охорона праці</i>	<i>Жесан Р.В.</i>		



## АНОТАЦІЯ

У кваліфікаційній магістерській роботі розроблено програмне забезпечення, спрямоване на модернізацію та вдосконалення роботи лісосушильної камери ДП «Оникіївський лісгосп».

У роботі визначено напрями підвищення ефективності керування з метою зниження споживання енергоресурсів, підвищення точності регулювання процесів та забезпечення більшої економічної ефективності й надійності функціонування сушильної камери гібридного типу. Розроблено сучасну систему автоматизованого керування сушильним процесом.

**Мета дослідження** – дослідити та реалізувати програмну систему керування процесом сушіння деревини.

**Об'єкт дослідження** – процес формування рішень для керування сушарками гібридного типу.

**Предмет дослідження** – програмно-апаратні платформи, що використовуються для реалізації систем керування сушильними камерами.

Методи дослідження ґрунтуються на принципах теорії кодування, методах математичної статистики та підходах до розроблення програмного забезпечення.

**Результати роботи** – створено інтерфейс керування та розроблено програмне забезпечення для мікроконтролера, що забезпечує автоматизоване регулювання параметрів сушіння.

У процесі розробки проведено аналіз сучасних апаратних і програмних засобів, детально описано всі складові створеної системи. Реалізовано зручний користувачький інтерфейс та надано інструкції з експлуатації програмних модулів.

**Ключові слова:** автоматизація, мікропроцесорна система, сушіння деревини, керування, модернізація, енергоефективність.

## ABSTRACT

In this qualifying master's thesis, software was developed, which is intended for the modernization and improvement of the forest drying chamber at the SE "Onykiiv Forestry", and the ways of improving the quality of management are determined to increase the saving of energy resources and increase the accuracy of management and, as a result, increase the economic efficiency and reliability of the operation of the hybrid type drying chamber, developed a modern drying chamber control system.

The purpose of the development is the research and software implementation of the wood drying management system.

The object of the study is the process of building solutions for managing hybrid dryers.

The subject of research is platforms for building solutions for the implementation of control of chamber-type dryers.

Research methods are based on coding theory methods, mathematical statistics methods, and software development methods.

The result of the work is the control interface software and the development of software for the microcontroller.

In the process of working on the software model, an analysis of existing hardware and software was performed. All components of the developed software are fully described.

A convenient user interface has been developed. Instructions for working with software tools are provided.

**Keywords: automation, microprocessor system, pumping station, control, modernization, energy efficiency.**

## ЗМІСТ

Вступ.....	3
1 Сучасний стан технології та обладнання для автоматизації процесу управління насосними станціями.....	6
1.1 Описи автоматизованої системи управління насосною станцією .....	6
1.2 Огляд існуючих систем, технологій, архітектур, програмних рішень за профілем теми магістерської роботи.....	10
2 Огляд об'єкта управління та створення структурної схеми системи автоматичного керування насоною станцією .....	42
2.1 Обґрунтування вибору засобів для побудови системи .....	42
2.2 Розгорнута постановка завдання .....	45
2.3 Опис функціонування системи.....	46
2.4 Розробка структурної схеми .....	50
2.5 Розробка функціональної схеми.....	52
2.5 Розробка діаграми процесів .....	58
3 Реалізація роботи. розрахунки і експериментальні дані, що підтверджують правильність проектних рішень .....	62
3.1 Реалізації автоматизованої системи керування .....	62
3.2 Блок-схеми та опис алгоритмів функціонування системи .....	73
4 Впровадження системи в промислову експлуатацію.....	78
Висновки .....	82

Список літератури .....	84
Додаток А.....	87

## ВСТУП

**Актуальність даної теми.** Сушіння матеріалів є одним із найбільш енергоємних технологічних процесів, який потребує значних витрат палива, пари та електроенергії. Впровадження сучасних автоматизованих систем і спеціалізованого програмного забезпечення дає змогу суттєво скоротити тривалість сушіння, зменшити енергоспоживання та підвищити стабільність технологічних параметрів.

Деревину висушують у вигляді пиломатеріалів (дошок, брусів, заготовок), шпону, стружки, тріски, волокон, а також у формі круглих лісоматеріалів, що використовуються для виготовлення елементів будівельних конструкцій і деталей опор ліній електропередачі.

**Основними цілями сушіння деревини є:**

- запобігання деформаціям виробів і зміні їх геометричних розмірів;
- попередження процесів гниття та псування матеріалу;
- підвищення питомої міцності;
- покращення якості подальшої обробки, склеювання та експлуатаційних характеристик.

Використання автоматизованих систем керування забезпечує не лише економічний ефект, а й має значний організаційний вплив: підвищує вимоги до кваліфікації персоналу, покращує рівень організації виробничих процесів і загальну ефективність управління. Рівень автоматизації та розвитку програмного забезпечення є показником науково-технічного прогресу галузі та держави загалом.

Попри наявність сучасних закордонних систем, що повністю відповідають вимогам автоматизації процесів сушіння, їхня висока вартість суттєво обмежує можливість впровадження у виробництво. Крім того, значна зношеність існуючого обладнання ускладнює процес сушіння та потребує високої кваліфікації обслуговуючого персоналу.

## **Мета і завдання дослідження**

Метою роботи є дослідження та розроблення програмного забезпечення для автоматизованого керування процесом сушіння деревини у триступеневій сушарці гібридного типу.

Розробка передбачає мінімальні матеріальні витрати, створення інтуїтивно зрозумілого інтерфейсу оператора, забезпечення оптимальних технічних характеристик і високої надійності системи.

Для досягнення поставленої мети визначено такі основні завдання:

- провести аналіз існуючих систем керування процесом сушіння;
- дослідити та розробити програмно-апаратні рішення для підтримки роботи сушарки гібридного типу;
- реалізувати програмну систему керування з інтегрованою підсистемою безпеки передачі даних.

## **Об'єкт і предмет дослідження**

Об'єктом дослідження є процес створення мікропроцесорної системи керування сушаркою гібридного типу. Предметом дослідження є методи та засоби реалізації мікропроцесорних систем автоматизованого управління.

## **Методологія дослідження**

Методологічна основа роботи ґрунтується на використанні методів теорії кодування та захисту інформації, математичної статистики, а також сучасних підходів до розроблення програмного забезпечення.

## **Наукова новизна отриманих результатів**

У процесі виконання дослідження отримано такі результати:

- удосконалено систему керування сушаркою гібридного типу;
- підвищено економічну ефективність за рахунок більш точного регулювання параметрів сушіння;
- розроблено вітчизняне програмне рішення для керування сушильними установками, що має розширені функціональні можливості порівняно з існуючими аналогами.

### **Практична цінність результатів**

Практичне значення роботи полягає у створенні алгоритмів, які забезпечують ефективне управління процесом сушіння деревини, що дозволяє підвищити якість готової продукції та знизити енергетичні витрати.

### **Достовірність результатів**

Достовірність отриманих результатів підтверджується теоретичними обґрунтуваннями, даними комп'ютерного моделювання, аналізом параметрів у діючій обчислювальній мережі, а також відповідністю отриманих результатів аналогічним дослідженням, наведеним у наукових джерелах.

# **1. СУЧАСНИЙ СТАН ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ДЕРЕВИНИ**

## **1.1. Описи автоматизованої системи управління сушаркою**

Процес триступеневого сушіння деревини вимагає точного контролю основних технологічних параметрів - температури та вологості у вакуумній камері, а також поточної вологості матеріалу, що піддається сушінню. Управління цим процесом здійснюється шляхом регулювання подачі нагрітого повітря та інтенсивності вентиляції для підтримання оптимального рівня вологості в робочому об'ємі сушарки.

З метою підвищення точності вимірювань і ефективності контролю параметрів у межах виконання кваліфікаційної магістерської роботи передбачено встановлення розширеної системи сенсорів температури та вологості як у внутрішньому просторі сушильної камери, так і безпосередньо в матеріалі, що сушиться. Такий підхід забезпечує більш достовірний моніторинг технологічного процесу та дозволяє оперативно реагувати на його зміни.

Для мінімізації похибок вимірювань, спричинених неоднорідністю середовища, кінцеві значення параметрів планується визначати як середньоарифметичні показники з кількох сенсорів. Це дає змогу не лише підвищити точність контролю, а й забезпечити швидшу реакцію системи на коливання умов сушіння.

У процесі вимірювань доцільно застосовувати сучасні електронні датчики температури та вологості, які характеризуються високою точністю, швидкодією та стабільністю показників.

Для реалізації автоматичного керування передбачено розроблення мікроконтролерної системи, побудованої на базі сучасного мікроконтролера з високою продуктивністю. Така система здійснює безперервний збір інформації

про стан технологічного процесу, аналізує параметри та автоматично регулює подачу повітря і режим вентиляції відповідно до заданої програми.

Розроблена система спрямована на підвищення ефективності сушіння, стабільність параметрів процесу, зниження енергоспоживання та підвищення якості готової продукції.

### **Область застосування**

Аналіз існуючої сушильної установки та обґрунтування необхідності модернізації. У результаті проведеного аналізу роботи наявної сушильної установки виявлено низку недоліків, серед яких основними є низька точність вимірювання температури й вологості, а також застарілі засоби збору технологічних параметрів.

На даний час контроль температури в сушильній камері здійснюється за допомогою ртутних термометрів, які є морально застарілими, незручними в експлуатації та не забезпечують необхідної точності. Визначення вологості відбувається психометричним методом, що передбачає ручне зчитування показників із сухого та вологого термометрів і подальший розрахунок значення вологості за психометричними таблицями. Такий підхід потребує значних часових витрат і характеризується великою похибкою, зумовленою як неточністю вимірювальних приладів, так і людським фактором (наприклад, ефектом паралаксу під час зчитування показників). Крім того, цей метод дозволяє отримати інформацію лише про вологість у певній локальній зоні сушильної камери, що не відображає реальний розподіл параметра по всьому об'єму.

Впровадження сучасних електронних датчиків вологості дозволяє усунути зазначені недоліки, забезпечуючи високу швидкість, точність і надійність вимірювань. Завдяки використанню цифрових сенсорів відпадає потреба у психометричних таблицях, а ймовірність похибок, пов'язаних із ручними вимірюваннями, мінімізується. Аналогічно, застосування цифрових датчиків температури, інтегрованих у мікроконтролерну систему, забезпечує оперативний збір даних і їх подальшу обробку в реальному часі.

Для більш точного та стабільного підтримання оптимальної температури й вологості запропоновано модернізацію сушильної установки шляхом упровадження системи керування на базі мікроконтролера (СКМ). Ця система дозволяє здійснювати автоматичне регулювання параметрів сушіння відповідно до заданого алгоритму, а також передбачає можливість дистанційного керування та моніторингу з персонального комп'ютера.

Розроблене програмне забезпечення забезпечує зручний інтерфейс користувача, автоматичну обробку сигналів від датчиків, архівування параметрів процесу й візуалізацію даних у реальному часі. Це дозволяє не лише підвищити точність контролю, а й суттєво скоротити участь оператора у рутинних операціях.

Таким чином, створення програмно-апаратного комплексу для автоматизованого керування процесом триступеневого сушіння деревини є актуальним і практично значущим завданням, реалізація якого сприятиме підвищенню ефективності технологічного процесу, економії енергоресурсів і поліпшенню якості кінцевої продукції.

## **1.2. Огляд існуючих систем, технологій, архітектур, програмних рішень за профілем теми магістерської роботи**

### **Загальна характеристика процесу сушіння деревини**

Сушіння матеріалів належить до енергоємних технологічних процесів, які потребують значних витрат палива, пари та електроенергії. Впровадження сучасних систем автоматизації та інтелектуального керування дає змогу скоротити тривалість процесу, зменшити енергетичні витрати й підвищити загальну ефективність виробництва.

На деревообробних підприємствах сушінню підлягає деревина у різних формах: пиломатеріали (дошки, бруси, заготовки), шпон, стружка, тріска, волокно, а також круглий ліс, який використовується для виготовлення деталей опор ЛЕП, будівельних конструкцій і з'єднувальних елементів.

У процесі сушіння деревина переходить із природного стану до промислового матеріалу з необхідними фізико-механічними властивостями. Зменшення вологості сприяє підвищенню твердості, щільності та міцності деревини, а також полегшує її подальшу механічну обробку, склеювання й оздоблення.

Сушіння зменшує схильність деревини до гниття та ураження грибками, а також запобігає деформаціям виробів під час експлуатації. Контроль кінцевої вологості є критично важливим параметром, від якого залежить якість і довговічність готової продукції.

Основними завданнями процесу сушіння деревини є:

- запобігання зміні розмірів і форми деталей;
- попередження гниття та біологічного пошкодження матеріалу;
- підвищення питомої міцності;
- покращення якості обробки та склеювання.

Таким чином, сушіння є ключовим етапом у технологічному циклі деревообробного виробництва, оскільки визначає експлуатаційні властивості та стабільність готових виробів.

### **Вибір способу сушіння та обладнання**

Оптимальний вибір методу сушіння й типу сушильного обладнання визначається низкою чинників:

- породою та сортиментом деревини;
- витратами енергоресурсів;
- необхідною продуктивністю;
- умовами експлуатації;
- інвестиційними можливостями підприємства.

Застосування сушильних камер з енергозберігаючими технологіями є одним із головних напрямів підвищення рентабельності деревообробних підприємств.

### **Конвективні сушильні камери**

На сучасному ринку близько 90-95 % сушильних установок становлять

класичні конвективні сушильні камери, у яких теплоносієм виступає пара або гаряча вода. Повітря в таких установках циркулює за допомогою відцентрових вентиляторів, що забезпечують рівномірний розподіл температури та вологості в робочому об'ємі камери.

Переваги конвективних систем:

- низька вартість впровадження;
- простота експлуатації;
- зручність обслуговування.

Циркуляційна система забезпечує рівномірний розподіл сушильного агента, що дає змогу досягати високої якості сушіння при помірних енергетичних витратах.

### **Джерела теплової енергії та типи сушарок**

Теплова енергія для сушильних установок зазвичай виробляється в котельнях. Як теплоносії використовують:

- **пару або гарячу воду** – найпоширеніше рішення;
- **електроенергію** – застосовується рідше через високу вартість, проте має тенденцію до зростання популярності завдяки екологічності.

Типи сушарок:

- конвективні - найбільш розповсюджені завдяки простоті конструкції та доступності обслуговування.
- вакуумні - використовуються для листяних порід із великим поперечним перерізом (понад 50 мм), коли потрібне швидке сушіння з мінімальними дефектами; характеризуються високою вартістю.
- конденсаційні - відзначаються високою енергоефективністю завдяки повторному використанню теплової енергії.

### **Автоматизація процесу сушіння**

Ключовим елементом сучасних сушильних систем є автоматизоване керування технологічними параметрами, зокрема температурою, вологістю повітря та матеріалу. Традиційно контроль здійснюється за допомогою психрометрів, проте автоматизовані системи забезпечують значно вищу точність,

стабільність і повторюваність результатів.

Для підприємств, що працюють із листяними породами деревини та мають обмежений виробничий цикл, доцільним є впровадження вакуумних сушарок або гібридних систем із мікропроцесорним керуванням. Це дозволяє скоротити час сушіння, знизити енергоспоживання та підвищити якість готової продукції.

### **Проблеми та тенденції розвитку сушильних систем**

Раніше більшість процесів сушіння деревини здійснювалися на великих деревообробних комбінатах, обладнаних потужними сушильними установками з річною продуктивністю до 100 тис. м<sup>3</sup> умовного матеріалу. Нині ж основна частина деревини переробляється на малих підприємствах, де застосовуються одна-дві камери з невеликою вантажопідйомністю.

Багато меблевих і деревообробних цехів досі використовують застарілі сушильні установки, що не забезпечують необхідної точності регулювання параметрів. Високий рівень фізичного зносу обладнання, недосконалість систем контролю та недостатня підготовка персоналу призводять до нерівномірного розподілу кінцевої вологості та появи внутрішніх дефектів у готовій продукції.

Сучасні сушильні установки оснащуються автоматизованими системами керування, що дозволяють не лише стабілізувати процес сушіння, а й здійснювати моніторинг і аналіз технологічних параметрів у реальному часі. Такі системи вимагають високої кваліфікації обслуговуючого персоналу, але водночас значно підвищують якість і ефективність виробництва.

Якісне сушіння деревини є ключовим етапом деревообробного виробництва, від якого залежать експлуатаційна довговічність, точність геометричних параметрів і зовнішній вигляд готових виробів. Недостатній рівень автоматизації, застаріле обладнання та людський фактор є основними причинами погіршення якості сушіння.

Отже, модернізація сушильних установок, впровадження сучасних систем автоматизації та створення ефективного програмного забезпечення для контролю процесу сушіння є актуальним і необхідним напрямом розвитку деревообробної галузі.

## Методи сушіння деревини

У таблиці 1.1 приведені види і способи сушіння.

Таблиця 1.1 - Види та способи сушіння деревини

Вид сушіння	Сушильні Агенти	Спосіб сушіння	Основні особливості процесів
Конвективно-атмосферне	Повітря	На корені	Сушіння з використанням з суцільної сили крони живого дерева
	Повітря	Атмосферна	Сушіння на відкритих складах чи під навісами
Конвективно-теплове	Повітря, газ, водяна пара і їхні суміші	Газопарова	Сушіння в нагрітому газовому середовищі при атмосферному тиску
		Ротаційна	Газопарове сушіння з додатковим використанням відцентрового ефекту
	Рідини	Вакуумна	Газопарове сушіння при тиску середовища нижче атмосферного
		У рідинах	Сушіння з використанням нагрітих рідких сушильних агентів
Кондуктивне	Повітря	Кондуктивне	Сушіння з передачею тепла матеріалу за допомогою теплопровідності при контакті із нагрітими поверхнями
Радіаційне	Повітря	Радіаційне	Сушіння передачею тепла матеріалу випромінюванням
Електричне	Повітря	Діелектричне	Сушіння в електромагнітному полі ТВЧ чи СВЧ із передачею тепла матеріалу за рахунок діелектричних втрат

## **Методи сушіння деревини**

Класифікація методів сушіння деревини базується на принципі теплообміну між деревиною та сушильним агентом. Головною метою будь-якого методу є забезпечення мінімальних коливань кінцевої вологості матеріалу, що гарантує його стабільність і високу якість.

До основних методів сушіння належать:

- конвективне сушіння - передача тепла від нагрітого повітря або іншого газоподібного агента до поверхні деревини;
- кондуктивне сушіння - передача тепла шляхом безпосереднього контакту матеріалу з нагрітими поверхнями;
- радіаційне сушіння - нагрівання за рахунок випромінювання енергії від інфрачервоних або інших теплових джерел;
- електричне сушіння - використання електромагнітних хвиль або струмів високої частоти для внутрішнього нагріву деревини.

Вибір методу сушіння, типу обладнання та режиму роботи залежить від сукупності технологічних, економічних і організаційних факторів:

- вимог до якості готової продукції;
- обсягів виробництва;
- доступності джерел енергії;
- технічного стану та комплектації обладнання;
- умов монтажу та експлуатації сушильних камер;
- фінансових можливостей підприємства;
- рівня підготовки обслуговуючого персоналу.

## **Сушіння в рідинах**

У даному методі сушильним агентом виступають гідрофобні (масла, розплави металів, сірка) або гідрофільні рідини. Процес є аналогом високотемпературного конвективного сушіння, однак відбувається у щільному середовищі, що забезпечує інтенсивний теплообмін.

Недоліки методу:

- зниження міцності деревини через нерівномірне прогрівання;

- виникнення внутрішніх напружень, характерних для високотемпературних способів сушіння;

- складність утилізації та очищення робочої рідини.

Через зазначені недоліки метод застосовується обмежено - переважно у спеціалізованих технологічних процесах.

### **Конденсаційне сушіння**

Конденсаційний метод базується на принципі замкненого циклу циркуляції повітря без його викидів в атмосферу та без подачі свіжого повітря.

Основні етапи процесу:

1. Вологе повітря з камери охолоджується нижче точки роси.
2. Частина вологи конденсується, виділяючи тепло.
3. Отримане тепло повторно використовується для нагрівання сушильного агента.

Як холодоагент застосовується фреон, що циркулює в системі теплообміну. Теоретично цей спосіб має нульові теплові витрати на випаровування вологи, оскільки енергія використовується лише для:

- нагрівання матеріалу;
- роботи компресорів і вентиляторів;
- компенсації незначних тепловтрат за допомогою допоміжних нагрівачів.

За даними компаній Hildebrand, Brunner і Vanicek, споживання енергії становить 0,25–0,5 кВт·год на 1 кг випареної води, що приблизно вдвічі менше порівняно з традиційними металевими камерами.

Переваги конденсаційного сушіння:

- висока енергоефективність;
- екологічність процесу (відсутність викидів повітря);
- можливість роботи при низьких температурах.

Недоліком є вища вартість обладнання, проте зниження експлуатаційних витрат швидко компенсує початкові інвестиції.

## **Атмосферне (природне) сушіння**

Атмосферне сушіння є найдешевшим методом, оскільки не потребує енергетичних чи капітальних витрат, але є найбільш тривалим і некерованим процесом.

Деревина сушиться у штабелях, розташованих у спеціально обладнаних навісах або на відкритих майданчиках. Висушування відбувається під впливом природної циркуляції повітря, сонячного випромінювання та температури навколишнього середовища.

Недоліки методу:

- відсутність контролю процесу;
- ризик ураження грибками при підвищеній вологості;
- можливість розтріскування деревини в умовах високої температури.

Кінцева вологість деревини при атмосферному сушінні становить 12–20%, залежно від кліматичних умов і товщини матеріалу.

Процес можна прискорити шляхом:

- зменшення щільності укладання штабелів;
- орієнтації штабелів за напрямом панівних вітрів;
- використання вентиляторів для примусової циркуляції повітря.

Проте швидке зниження вологості може спричинити залишкові внутрішні напруження, що негативно впливають на якість деревини.

## **Камерне сушіння деревини**

Камерне сушіння є основним промисловим методом і проводиться у спеціальних сушильних камерах різних конструкцій і типів вентиляції. Цей метод отримав широке поширення з 1930-х років і досі є базовим у деревообробній промисловості.

Камери можуть бути:

- стаціонарні або мобільні;
- з природною або примусовою вентиляцією.

Процес керується зміною температури, вологості та швидкості повітряного потоку. Для циркуляції застосовуються відцентрові вентилятори, що працюють у

середовищі з підвищеною температурою та вологістю. Швидкість повітряного потоку становить 1–5 м/с залежно від породи деревини.

Переваги камерного сушіння:

- коротка тривалість процесу;
- можливість точного контролю параметрів;
- стабільна якість кінцевого продукту.

Найбільш критичним етапом є початкова фаза сушіння, що триває до 40–45% загального часу, коли надмірне підвищення температури може призвести до зниження міцності матеріалу.

Для пиломатеріалів із твердих листяних порід доцільним є низькотемпературне сушіння при температурі до 40 °С, що забезпечує рівномірне видалення вологи та зменшує ймовірність утворення тріщин.

Кожен із розглянутих методів має свої переваги та обмеження, зумовлені як технологічними, так і економічними факторами.

- атмосферне сушіння - найдешевше, але найменш контрольоване.
- конвективні та камерні методи - найпоширеніші у промисловості, забезпечують стабільну якість.
- конденсаційне сушіння - найефективніше з точки зору енергоспоживання.
- електричне та сушіння в рідинах - спеціалізовані методи, застосовувані у вузьких виробничих умовах.

Сучасні тенденції розвитку сушильних технологій спрямовані на інтеграцію автоматизованих систем керування, що дозволяють оптимізувати режими сушіння, зменшити енерговитрати й підвищити якість деревини.

### **Ротаційний спосіб сушіння**

Ротаційний спосіб сушіння базується на принципі механічного зневоднення деревини під дією відцентрових сил. Процес реалізується у спеціальних роторних сушарках, у яких деревина (пиломатеріали або круглий сортимент) розміщується по діаметру обертової платформи. Під час обертання відцентрова сила діє вздовж волокон деревини, сприяючи видаленню вільної

вологи з клітинної структури матеріалу.

Такий метод дозволяє знизити вологість свіжої деревини до 40–45% протягом короткого часу - 10–20 хвилин. Проте ефективність процесу зменшується при початковій вологості нижче 35%, оскільки зв'язана вода не видаляється механічним шляхом.

Ротаційне сушіння може застосовуватися як попередній етап камерного сушіння, який є найбільш енергоємним. Комбінування обох методів дозволяє зменшити загальне енергоспоживання у 1,5–2 рази та скоротити витрати на сушіння на 25–30%.

Основними недоліками цього методу є:

- громіздкість конструкції роторних установок;
- складність механізму поворотної платформи;
- необхідність точного балансування навантаження.

Через ці фактори ротаційні сушарки не набули широкого промислового застосування, однак розглядаються як перспективний напрям для модернізації попереднього етапу зневоднення деревини.

### **Вакуумні методи сушіння**

Вакуумне сушіння засноване на зниженні тиску в камері, що дає змогу зменшити температуру кипіння води і прискорити випаровування вологи з деревини. Матеріал розміщується у герметичній камері або автоклаві, де створюється розріджене середовище. За таких умов вода починає випаровуватися при 40–45 °С, що дозволяє здійснювати інтенсивне, але щадне низькотемпературне сушіння без погіршення якості деревини.

Прямий вакуумний метод застосовується переважно для сушіння до вологості  $\approx 22\%$ , після чого процес доцільно поєднувати з іншими методами - конвективним або кондуктивним. Це забезпечує досягнення кінцевої вологості, що відповідає технологічним стандартам, при істотному скороченні загальної тривалості сушіння.

### **Вакуумно-кондуктивний метод**

Вакуумно-кондуктивний метод поєднує зниження тиску в камері та

контактне нагрівання деревини через нагрівальні пластини або піддони. Такий підхід дозволяє скоротити тривалість сушіння у три рази порівняно з традиційним камерним способом.

Недоліки цього методу:

- складність вантажно-розвантажувальних операцій;
- нерівномірний розподіл вологості по товщині матеріалу;
- виникнення внутрішніх напружень у товстих пиломатеріалах.

Через ці обмеження вакуумно-кондуктивний метод використовується переважно для сушіння тонких або високоякісних матеріалів.

### **Вакуумно-конвективний метод**

Вакуумно-конвективне сушіння може відбуватися у двох варіантах:

- з циклічним нагріванням і вакуумуванням,
- при постійному вакуумі.

У першому випадку деревина нагрівається при нормальному тиску, а потім камера герметизується й створюється вакуум. Це забезпечує вихід пари з пор деревини під дією градієнта тиску, завдяки чому волога ефективно видаляється з внутрішніх шарів.

Порівняно з конвективним методом, тривалість процесу зменшується у 4–5 разів, при цьому зберігається висока якість сушіння та рівномірність кінцевої вологості.

### **Вакуумно-діелектричний метод**

Вакуумно-діелектричний метод базується на використанні високочастотного електромагнітного поля для внутрішнього нагрівання деревини. Процес здійснюється при низькому тиску (вакуумі) та температурі 45–50 °С.

Переваги:

- різке скорочення часу сушіння (у 10–12 разів порівняно з конвективним способом);
- мінімальні внутрішні напруження;
- висока рівномірність прогрівання матеріалу.

Основні недоліки - висока вартість обладнання, значне енергоспоживання

та складність регулювання рівномірності вологості, що обмежує широке застосування цього методу.

### **Технологічний процес триступеневого сушіння**

На підприємстві застосовується трьохступеневий камерний режим сушіння, який оптимізовано для пиломатеріалів різних порід деревини:

- листяних (табл. 1.2),
- хвойних (табл. 1.3),
- модрина (табл. 1.4).

Кожен етап сушіння має власні параметри температури, вологості та швидкості циркуляції повітря, що забезпечує ефективне видалення вологи при мінімальних деформаціях матеріалу.

Перший етап – попереднє зневоднення. Застосовуються помірні температури та висока відносна вологість повітря для запобігання утворенню тріщин і внутрішніх напружень.

Другий етап – основне сушіння. Температура та швидкість повітря збільшуються, що сприяє інтенсивному випаровуванню вологи з внутрішніх шарів деревини.

Третій етап – фінальна сушка. Проводиться стабілізація вологості матеріалу до нормативного рівня, що відповідає стандартам експлуатації та подальшої обробки.

Застосування триступеневого режиму дозволяє:

- підвищити якість деревини;
- забезпечити рівномірність вологості по всьому об'єму;
- мінімізувати залишкові напруження;
- скоротити тривалість сушіння та енергетичні витрати.

Таким чином, комплексне використання сучасних технологічних методів, зокрема вакуумного та ротаційного сушіння у поєднанні з триступеневими режимами камерного процесу, створює умови для підвищення ефективності виробництва і забезпечення високої якості висушеної деревини.

Таблиця 1.2 – Режими сушіння

Індекси режимів	Вологість деревини	Номер режиму і параметри повітря																	
		2		3		4		5		6		7		8		9		10	
		t	Δt	t	Δt	t	Δt	t	Δt	t	Δt	t	Δt	t	Δt	t	Δt	T	Δt
	>30	82	3	75	3	69	3	63	2	57	2	52	2						
А	30..20	87	6	80	6	73	6	67	5	61	54	55	4						
	<20	108	27	100	26	91	24	83	22	77	21	70	20						
	>30	82	4	75	4	69	4	63	3	57	3	52	3	47	2	42	2	38	2
Б	30..20	87	8	80	8	73	7	67	6	61	6	55	5	50	5	45	4	41	4
	<20	108	29	100	28	91	25	83	23	77	22	70	21	62	18	57	17	52	16
	>30	82	6	75	5	69	5	63	4	57	4	52	4	47	3	42	3	38	3
В	30..20	87	10	80	9	73	8	67	7	61	7	55	7	50	6	45	5	41	5
	<20	108	31	100	29	91	26	83	24	77	23	70	22	62	19	57	18	52	17
	>30	82	8	75	7	69	6	63	5	57	5	52	5	47	4	42	4	38	4
Г	30..20	87	12	80	11	73	10	67	9	61	9	55	8	50	7	45	6	51	6
	<20	108	33	100	31	91	28	83	26	77	25	70	23	62	21	57	20	52	18
	>30	82	10	75	9	69	8	63	7	57	6	52	6						
Д	30..20	87	14	80	13	73	12	67	11	61	10	55	9						
	<20	108	35	100	33	91	30	83	27	77	26	70	24						

Додаток до таблиці 1.2.

Порода	Категорії режиму	Товщина пиломатеріалів, мм							
		До 22	від 22 до 32	від 32 до 40	від 40 до 50	від 50 до 60	від 60 до 70	від 70 до 75	від 75 до 100
береза, вільха	н	3-Д	4-Г	4-В	5-В	6-Б	7-Б	8-Б	9-Б
	ж	2-Д	3-Г	3-В	4-В	—	—	—	—
Осіка, липа, тополя	н	3-Г	3-Б	4-Б	5-В	6-В	7-В	8-В	9-В
	ж	2-Г	2-Б	3-Б	4-Б				—
Бук, клен	н	3-В	4-В	5-В	5-Б	6-Б	7-А'	8-Б	—
	ж	2-Г	3-Б	4-В				—	—
Дуб	н	5-Г	6-В	6-Б	7-Б	8-Б	9-В	10-Б	—
	ж	3-Г	4-В	5-В	—	—		—	—
Горіх	н	5-В	5-Б	6-Г	6-Б	7-В	8-Б	9-В	—
Граб, ясен	н	6-В	6-А	7-Б	8-Б	8-Б	9-В	10-В	—

Таблиця 1.3 - Трьох ступеневий камерний режим сушіння пиломатеріалів хвойних порід - сосни і кедра (по РТМ)

Вологість деревини, %		Номер режиму для пиломатеріалів товщиною, мм							
		1	2	3	4	5	6	7	9
		до 22	23 і 25	26 і 32	33 і 40	41 і 50	51 і 60	61 і 75	76 і 100
<b>Нормальний режим (Н)</b>									
>35	Ti Δt, °C	83 і 9	79 і 7	79 і 6	75 і 5	73 і 5	71 і 4	64 і 3	55 і 2
35 ... 25	ti Δt, °C	88 і 14	84 і 12	84 і 12	80 і 10	77 і 9	75 і 8	68 і 7	58 і 5
<25	ti Δt, °C	110 і 36	105 і 33	105 і 32	100 і 30	96 і 27	85 і 24	85 і 24	75 і 22
<b>Жорсткий режим (Ж)</b>									
>35	Ti Δt, °C	94 і 11	92 і 10	92 і 8	90 і 7	87 і 6	83 і 5	73 і 4	—
35 ... 25	ti Δt, °C	99 і 16 125	97 і 15	97 і 13	95 і 12	92 і 11	88 і 10	78 і 9	—
<25	ti Δt, °C	і 42	123 і 41	123 і 39	120 і 37	115 і 36	110 і 32	98 і 29	—

Таблиця 1.4 - Трьох ступеневий камерний режим сушіння пиломатеріалів листяних порід з деревини модрина (по РТМ)

Вологість деревини, %	Параметри	Номер режиму для пиломатеріалів товщиною, мм						
		Л1	Л2	Л3	Л4	Л5	Л6	Л7
		до 22	23 і 25	26 і 22	33 і 40	41 н 50	51 і 60	61 і 75
<b>Нормальний режим (Н)</b>								
>35	Ti Δt, °C	70 і 9	70 і 8	70 і 6	65 і 5	60 і 4	80 і 3	60 і 2
35 ... 25	ti Δt, °C	75 і 15	75 і 15	75 і 15	70 і 10	65 і 9	65 і 7	65 і 5
<25	ti Δt, °C	80 і 25	80 і 25	80 і 25	75 і 20	70 і 19	70 і 18	70 і 15
<b>Жорсткий режим (Ж)</b>								
>35	Ti Δt, °C	90 і 9	90 і 7	82 і 4	75 і 4	75 і 8	72 і 2	70 і 2
35 ... 25	ti Δt, °C	98 і 12 112	96 і 11 110	87 і 8	80 і 8	80 і 6	78 і 5	76 і 4
>25	ti Δt, °C	і 32	і 30	108 і 29	100 і 28	100 і 26	95 і 20	90 і 18

### Принцип трьохступеневого режиму сушіння деревини

Трьохступеневий режим сушіння базується на поступовому підвищенні температури сушильного агента відповідно до зниження вологості деревини на

кожному етапі процесу. Такий підхід забезпечує рівномірне видалення вологи по всьому об'єму матеріалу, запобігаючи появі тріщин, деформацій і внутрішніх напружень.

Сутність принципу полягає в адаптації режимів нагрівання та вентиляції до фізико-хімічного стану деревини, що змінюється у процесі сушіння. Кожен етап має своє функціональне призначення та набір оптимальних параметрів температури, вологості та швидкості повітряного потоку.

### **Перший етап – попереднє зневоднення**

На початковій стадії деревина висушується при низьких температурах і підвищеній відносній вологості повітря. Такі умови дозволяють:

- уникнути появи поверхневих тріщин і короблення;
- забезпечити поступове видалення вологи з периферійних шарів;
- вирівняти температуру по товщині пиломатеріалу.

Підвищення температури відбувається плавно, що сприяє стабільному переходу вологи до поверхні та зменшенню градієнтів вологості.

### **Другий етап – основне сушіння**

Після досягнення деревиною середнього рівня вологості (приблизно 30–40%) температура в камері поступово збільшується, а відносна вологість знижується. На цьому етапі:

- інтенсивність процесу зростає завдяки збільшенню психрометричної різниці;
- забезпечується активне випаровування вологи з внутрішніх шарів;
- здійснюється контроль температурного режиму для запобігання появі тріщин.

Цей період є найбільш тривалим і визначальним для ефективності сушіння, оскільки саме тут відбувається видалення основної маси вологи.

### **Третій етап – фінальне сушіння**

На завершальному етапі температура повітря досягає максимального значення, тоді як відносна вологість є мінімальною. Це дозволяє:

- довести вологість деревини до нормативного рівня (8-12% для внутрішнього використання, 15-18% - для зовнішніх конструкцій);
- стабілізувати внутрішній стан матеріалу;
- забезпечити готовність деревини до тривалого зберігання або подальшої механічної обробки.

Після завершення цього етапу проводиться вирівнювання вологості (кондиціювання), під час якого параметри повітря поступово нормалізуються для запобігання залишкових напружень.

### **Переваги трьохступеневого режиму**

Використання трьохступеневого режиму сушіння забезпечує:

- рівномірне видалення вологи з усього об'єму деревини;
- зменшення ймовірності виникнення тріщин і деформацій;
- покращення фізико-механічних властивостей готової продукції;
- економію енергоресурсів за рахунок оптимізації температурних режимів.

У результаті деревина набуває стабільної вологості, що відповідає вимогам стандартів і забезпечує високу якість матеріалу для подальшого використання у будівництві, меблевому виробництві та інших галузях.

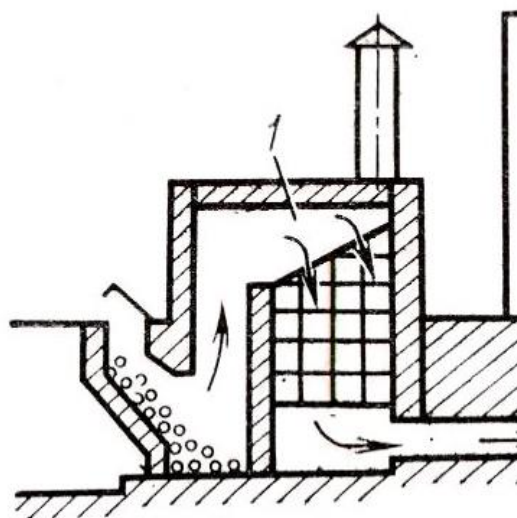


Рисунок 1.1 - Теплогенератор на відходах пиломатеріалів.

## **Система нагріву сушильної камери**

Нагрівання та підтримання необхідного температурного режиму в сушильній камері здійснюється за допомогою трьох теплогенераторів, які працюють на різних видах енергоносіїв. Така комбінація дозволяє гнучко регулювати тепловий баланс, забезпечуючи стабільну роботу установки незалежно від зовнішніх умов.

На рисунку 1.1 представлено конструкцію одного з теплогенераторів, що функціонує на основі спалювання деревного палива (дров).

1. Принцип роботи теплогенератора
2. Спалювання палива. У камері згоряння теплогенератора відбувається спалювання дров, у результаті чого виділяється значна кількість теплової енергії.
3. Передача тепла. Отримане тепло передається теплообмінним трубам, через які проходить повітря. Під час контакту з гарячими поверхнями труб повітря інтенсивно нагрівається.
4. Циркуляція повітря. Для забезпечення руху повітря по трубопровідній системі використовується відцентровий вентилятор, який створює стабільний потік нагрітого повітря.
5. Подача теплого повітря в сушильну камеру. Нагріте повітря надходить у внутрішній об'єм сушильної камери, де відбувається рівномірний розподіл температури і підтримується заданий тепловий режим для ефективного випаровування вологи з деревини.

### **Особливості системи**

- можливість використання альтернативних джерел тепла (дрова, газ, електронагрівальні елементи) підвищує енергоефективність системи.
- регулювання інтенсивності згоряння забезпечує точне підтримання температури відповідно до етапів сушіння.
- система має просту конструкцію, що сприяє її надійності та зручності обслуговування.
-

## Переваги теплогенераторної системи

- стабільність температурного режиму у всьому об'ємі сушильної камери;
- можливість швидкої зміни параметрів нагріву;
- економічність експлуатації за рахунок використання місцевих видів палива;
- підвищення ефективності процесу сушіння та зменшення ймовірності пошкодження деревини.

Отже, використання теплогенераторів різного типу дозволяє забезпечити оптимальні умови для трьохступеневого режиму сушіння, підтримуючи стабільну температуру й рівномірний тепловий розподіл у камері, що є ключовим фактором якісного висушування деревини без втрати її природних властивостей.

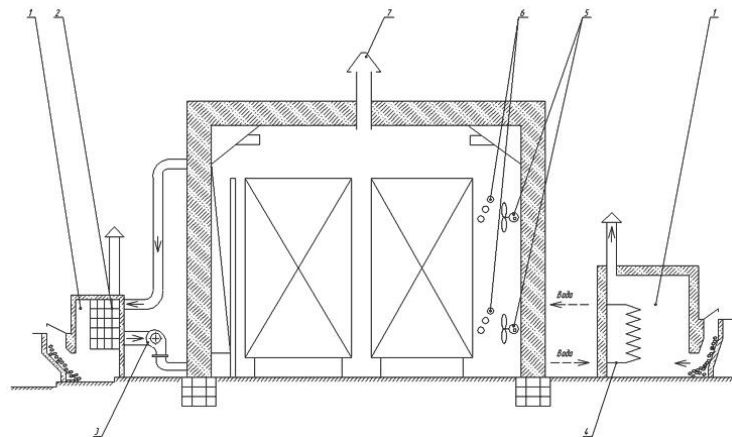


Рисунок 1.2 - Технологічна схема процесу сушіння

- 1 – котел; 2 – труби з повітрям; 3 – відцентровий вентилятор;
- 4 – труби з водою; 5 – вентилятор; 6 – радіатори з гарячою водою;
- 7 – витяжка.

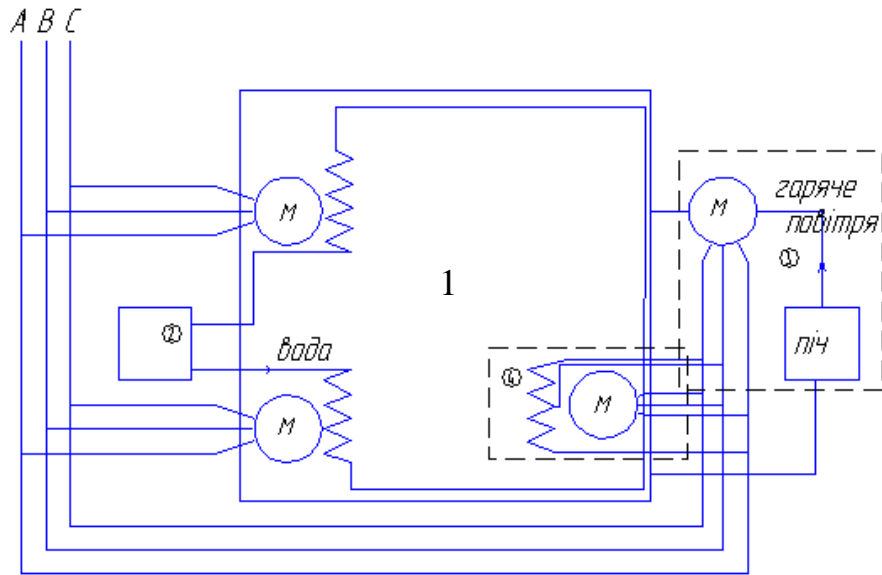


Рисунок 1.3 - Електрична схема живлення електрообладнання.

### **Система теплопостачання та регулювання мікроклімату в сушильній камері.**

Для забезпечення ефективного перебігу процесу сушіння деревини в установці застосовується комбінована система теплогенераторів, що функціонує на різних джерелах енергії. Такий підхід дозволяє гнучко керувати температурним режимом у камері залежно від етапу сушіння та властивостей оброблюваної деревини.

Другий теплогенератор – водяна система нагріву

Другий теплогенератор реалізований у вигляді водяного котла, який нагріває воду, що циркулює замкненою системою трубопроводів і надходить до двох радіаторів, розташованих поблизу сушильної камери.

Принцип дії системи такий:

1. У котлі вода нагрівається до заданої температури.
2. Нагріта вода циркулює через теплообмінні труби, подаючись до радіаторів.
3. Вентилятори, розташовані поруч із радіаторами, створюють потік повітря, який проходить через нагріті ребра, інтенсивно прогріваючись.

4. Тепле повітря спрямовується до сушильної камери, де забезпечує рівномірний розподіл температури по всьому об'єму.

Робота двох таких теплогенераторів забезпечує грубе регулювання температури та підтримання середнього рівня тепла, необхідного для першого й другого етапів триступеневого сушіння.

Третій теплогенератор - електрокалорифер

Для точного та швидкого регулювання температури в сушильній камері використовується третій теплогенератор - електрокалорифер.

Його основні функції:

- оперативна зміна температурного режиму відповідно до алгоритму сушіння;
- підтримання стабільної температури з точністю до 1–2 °С;
- компенсація теплових коливань, спричинених зміною навантаження або зовнішніх умов.

Завдяки цьому забезпечується динамічне керування процесом сушіння та стабільність мікроклімату на всіх етапах технологічного циклу.

### **Система регулювання вологості**

Регулювання вологості в сушильній камері здійснюється за допомогою витяжної системи, що забезпечує відведення надлишкової вологи з робочого об'єму камери.

Основні завдання витяжок:

- контроль рівня відносної вологості повітря в камері;
- підтримання оптимального градієнта вологості між повітрям і деревиною;
- запобігання утворенню конденсату.

Система витяжок працює синхронно з теплогенераторами та вентиляторами, формуючи замкнену систему регулювання мікроклімату, що гарантує стабільні умови сушіння.

## Вологість деревини як параметр контролю

Вологість деревини є одним із ключових параметрів, що визначає її фізико-механічні властивості. Деревина складається з різних типів клітин, основними з яких є трахеїди (у хвойних порід) та волокна і судини лібриформу (у листяних порід). Також присутні серцевинні промені та клітини паренхіми, які відіграють роль у процесах вологообміну.

Вологість визначають як відношення маси води, що міститься в деревині, до її маси в абсолютно сухому стані, виражене у відсотках:

$$W = \frac{m_{\text{вол}}}{m_{\text{сх}}} \cdot 100 = \frac{m - m_{\text{сх}}}{m_{\text{сх}}} \cdot 100, \quad (1)$$

де  $m$  — загальна маса проби, г;

$m_{\text{сх}}$  — маса проби в абсолютно сухому стані, г;

$m_{\text{вол}}$  — маса вологи в пробі, г.

## Вологість деревини та її види

Волога у деревині міститься у двох основних формах — вільній і зв'язаній, що визначає фізико-механічні властивості матеріалу, його стабільність і поведінку під час сушіння.

Вода заповнює як порожнини клітин і міжклітинні простори, так і клітинні стінки. Відповідно:

- вільна волога - це вода, яка знаходиться у порожнинах клітин і міжклітинниках та вільно переміщується всередині капілярної структури деревини;

- зв'язана (гігроскопічна) волога - це вода, яка утримується у клітинних стінках завдяки фізико-хімічним зв'язкам із целюлозно-лігніновою структурою матеріалу.

## Межа насичення клітинних стінок

Кількість зв'язаної вологи у деревині є обмеженою. Максимальний її вміст відповідає стану, коли клітинні стінки повністю насичені водою, але

порожнини клітин ще залишаються вільними від рідини. Цей стан називається межею насичення клітинних стінок або вологістю межі насичення (ВМ.Н).

Для більшості порід деревини цей показник є практично сталим і становить у середньому 30%. У цьому стані деревина не зазнає істотних змін розмірів, тому процес сушіння до вологості, нижчої за ВМ.Н, є критичним для запобігання деформаціям.

### **Вільна волога**

Якщо вміст вологи в деревині перевищує вологість межі насичення (понад 30%), у матеріалі присутня вільна вода, що знаходиться у вигляді рідини в порожнинах клітин і судин. Її кількість залежить від породи деревини, анатомічної будови та об'єму пор клітинної структури.

Максимальний вміст вільної вологи може коливатися від 60% до 250% відносно маси абсолютно сухої деревини. Під час сушіння саме вільна волога видаляється першою, оскільки вона утримується у макрокапілярній системі слабкими капілярними силами.

### **Зв'язана волога**

Зв'язана або гігроскопічна волога залишається у клітинних стінках навіть після видалення вільної води. Вона утримується завдяки адсорбційним силам і формується у вигляді тонких молекулярних шарів.

Зміна кількості зв'язаної вологи має найбільший вплив на усушку та розбухання деревини, а також на її міцність і еластичність. Зменшення вологості нижче ВМ.Н супроводжується стисканням клітинних стінок і виникненням внутрішніх напружень.

Таким чином, вільна волога формує більшу частину води у сирій деревині, визначаючи початкові етапи сушіння, тоді як зв'язана волога є критичним фактором, що впливає на розміри, міцність та стабільність висушеного матеріалу.

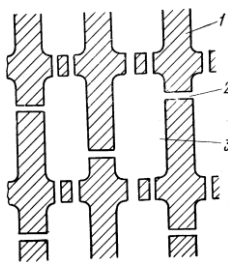


Рисунок 1.4 - Схема макрокапілярної структури деревини

1 - стінка клітки, 2 - пора, 3 - порожнина клітки.

Деревина живого або щойно зрубаного дерева завжди має підвищену вологість, що перевищує рівень вологості насичення, тобто є сирію. Рівень вологості свіжозрізаної деревини визначається низкою чинників, серед яких:

- порода дерева;
- положення ділянки у стовбурі (серцевина чи заболонь);
- пора року.

Під впливом цих факторів вологість може істотно змінюватися. Орієнтовні середні показники вологості свіжозрізаної деревини наведено в таблиці 1.5.

Особливості розподілу вологи в різних частинах дерева:

- у хвойних порід серцевина та стигла деревина характеризуються помітно нижчою вологістю порівняно із заболонню;
- у листяних порід різниця у вологості між серцевиною та заболонню майже відсутня.

Такі відмінності зумовлені тим, що серцевина хвойних дерев є більш сухою - саме вона відіграє роль зони накопичення вологи під час росту дерева, тоді як заболонь містить її у більшій кількості. У листяних порід розподіл вологи є рівномірнішим по всій товщі стовбура.

Таблиця 1.5 - Вологість свіжозрубаної деревини

Порода	Вологість, %		
	Ядра чи спілої деревини	З аболоні	середня
Сосна, ялина	30-40	100-120	60-100
Модрина	40-50	100-120	50-70
Береза Дуб	50—80	70-90	70-90
		70-80	60-80

### Основні способи визначення вологості деревини

Деревина живих або щойно зрубаних дерев завжди містить підвищену кількість вологи, що перевищує рівень вологості насичення, тобто така деревина є сирою.

Вологість свіжозрізаної деревини визначається низкою факторів, серед яких:

- порода дерева;
- місце розташування в стовбурі (серцевина чи заболонь);
- пора року.

Залежно від цих умов рівень вологості може істотно змінюватися. Орієнтовні середні показники вологості свіжозрізаної деревини наведені в таблиці 1.5.

Особливості розподілу вологи в різних частинах дерева:

- у хвойних порід серцевина та стигла деревина мають значно нижчу вологість, ніж заболонь;
- у листяних порід помітної різниці між серцевиною та заболонню зазвичай не спостерігається.

Такі відмінності пояснюються тим, що серцевина хвойних дерев є відносно сухішою частиною стовбура, адже саме тут відбувається накопичення

та збереження вологи під час росту. Заболонь, навпаки, містить більшу кількість води. У листяних порід розподіл вологи відбувається більш рівномірно по всій товщі стовбура.

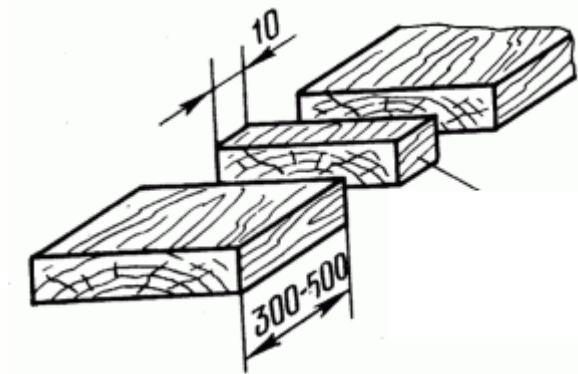


Рисунок 1.5 - Схема вирізки секції вологості з дошки

Постійну вагу деревини приймають рівною її масі в абсолютно сухому стані. Вологість ( $y$  %) визначають за формулою (2):

$$W = \frac{m_n - m_{\text{сх}}}{m_{\text{сх}}} \cdot 100, \quad (2)$$

### **Електричний метод визначення вологості**

Одним із найпоширеніших способів визначення вологості деревини є електричний метод, що ґрунтується на зміні її електричних властивостей залежно від кількості вологи.

Основою методу є залежність електричного опору деревини від її вологості. Прилади кондуктометричного типу (електричні гігрометри) використовуються для вимірювання вологості в межах 7–30%, оскільки при вищих значеннях похибка суттєво зростає.

Для визначення вологості деревини застосовують різні типи електричних вологомірів, зокрема: ЦНИИМОД-2, EV8-100, ЕВА-2, ЕВА-2М, ЄВА-2ДО. Вони оснащені триконтактними щупами, які вводяться в деревину вздовж волокон на повну глибину.

## **Фактори, що впливають на точність вимірювань**

- температура матеріалу. Зі збільшенням температури на кожні 5 °С прилад може показувати на 0,5% більшу вологість. Для отримання достовірних результатів вимірювання рекомендується проводити при температурі близько +20 °С.
- температура навколишнього середовища. Вона також впливає на покази гігрометра, тому повинна бути стабільною під час вимірювань.
- фізико-механічні властивості деревини. Показники вологості залежать від породи дерева, щільності, місця росту та інших характеристик матеріалу. Ці параметри необхідно враховувати під час розрахунків.
- наявність смоли, дефектів і стан поверхні. Смоляні включення, тріщини або пошкодження можуть спотворювати результати. Крім того, поверхнева вологість часто менша, ніж у серцевині.
- градієнт вологості. Під час сушіння спостерігається різниця у вмісті вологи між поверхнею та серцевиною деревини. Це потрібно враховувати, щоб уникнути похибок.

Таким чином, для забезпечення точності визначення вологості деревини слід враховувати всі перелічені фактори та проводити відповідні температурні й породні коригування під час вимірювань.

## **Контроль вологості деревини та внутрішніх напружень під час сушіння**

У процесі сушіння вологість деревини контролюють за допомогою спеціальних контрольних зразків. Для цього з типової дошки, що входить до партії пиломатеріалів, підготовленої до сушіння, вирізають зразок довжиною 1–1,2 м. Із суміжних ділянок цієї ж дошки додатково вирізають дві частини для визначення початкової вологості, як показано на рисунку 1.6.

Після відрізання обидві частини очищують від нерівностей, зважують на технічних вагах і визначають їхню вологість. Початкову вологість (ВП) контрольного зразка обчислюють як середнє арифметичне значення вологості цих двох частин.

Контрольний зразок маркують, зачищають торці та покривають їх густим шаром масляної фарби, щоб запобігти випаровуванню вологи через торцеві поверхні. Потім зразок зважують із точністю до 5 г, а отримане значення початкової маси (МП) заносять до протоколу сушіння або до спеціальної контрольної карти [2, 56].

Для забезпечення достовірності контролю у кожному шарі сушильної камери розміщують по 2–3 контрольні зразки, які вибирають таким чином, щоб вони представляли зони інтенсивного та уповільненого сушіння. Це дозволяє оцінити рівномірність процесу та своєчасно виявити можливі внутрішні напруження в деревині.

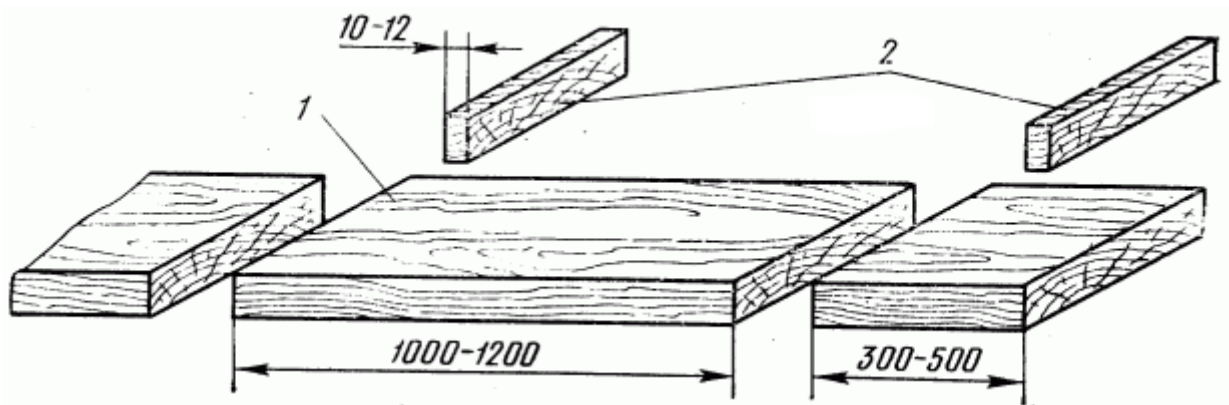


Рисунок 1.6 - Схема випилювання контрольних зразків (1 - контрольний зразок, 2 - секції вологості)

Контрольні зразки розміщують поблизу торця штабеля або трохи вглиб від нього, щоб забезпечити зручний доступ для періодичного вилучення під час сушіння. Зразки укладають на прокладки, уникаючи безпосереднього контакту з поверхнею дощок, що запобігає нерівномірному висиханню та викривленню.

Над контрольними зразками встановлюють спеціальні прокладки з вирізами (рис. 1.7), які забезпечують вільну циркуляцію повітря та підтримують однакові умови сушіння в усіх шарах штабеля. Така конструкція дає змогу отримати більш точні результати контролю вологості та своєчасно коригувати параметри процесу.

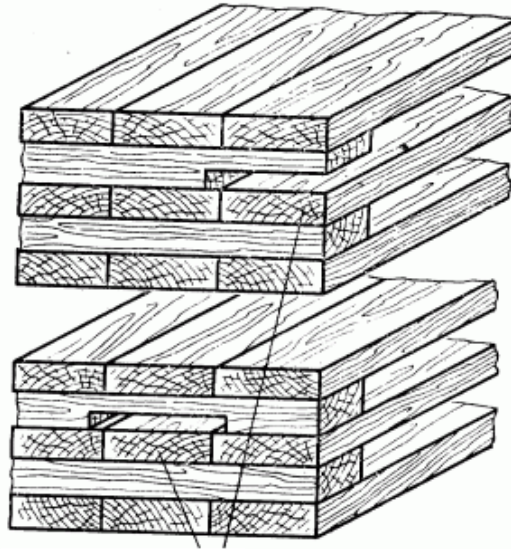


Рисунок 1.7 - Схеми розміщення контрольного зразка в штабелі

Масу абсолютно сухого контрольного зразка визначають, виходячи з відомих значень початкової вологості та початкової маси, за такою формулою:

$$M_{сух} = \frac{M_{п} \cdot 100}{W_{п} + 100}, \quad (3)$$

### **Якість сушіння деревини: завершення процесу та ключові показники.**

Контроль якості сушіння деревини є важливим етапом завершення процесу, оскільки саме від нього залежить подальша міцність, стабільність розмірів і зовнішній вигляд матеріалу.

#### **Основні показники якості сушіння**

- відсутність видимих дефектів висихання.
- недопущення зовнішніх пошкоджень, таких як тріщини, викривлення або деформації поверхні.

#### **Типи тріщин і методи запобігання**

1. Зовнішні тріщини. Виникають на початкових етапах сушіння через надмірні розтягувальні напруження у зовнішніх шарах деревини. Профілактика:

дотримання раціонального режиму сушіння з поступовим підвищенням температури та регулюванням вологості повітря.

2. Внутрішні тріщини. Формуються в центральних шарах деревини під дією високих внутрішніх напружень. Запобігання: контроль температурно-вологісного режиму, застосування проміжної волого-теплової обробки.

3. Торцеві тріщини. Зумовлені надто інтенсивним висиханням торців дощок.

Профілактика: покриття торців вологостійкими складами, фарбами або мастиками; правильне укладання штабелів із захистом торців від прямого повітряного потоку.

4. Радіальні тріщини. Утворюються через нерівномірне висихання деревини в різних напрямках (радіальному та тангенціальному). Запобігання: практично неможливе, але ризик зменшується при поступовому режимі сушіння.

### **Викривлення дощок**

Причина: різниця в усадці деревини по радіальному та тангенціальному напрямках. Профілактика: сушіння в стислому стані, укладання пиломатеріалів однакової товщини, застосування стандартних прокладок і розпірок для рівномірного тиску.

### **Оцінювання кінцевої вологості. Для перевірки рівня висихання:**

- відбирають не менше дев'яти дощок із різних зон штабеля;
- з кожної дошки вирізають дві частини, вологість яких вимірюють окремо;
- кінцева вологість партії (ВКП) визначається як середнє арифметичне усіх отриманих результатів.

Дотримання оптимального режиму сушіння, правильне укладання пиломатеріалів, а також контроль вологості та внутрішніх напружень дозволяють мінімізувати виникнення дефектів, зберегти природну структуру деревини та забезпечити її високу якість для подальшої механічної чи декоративної обробки.

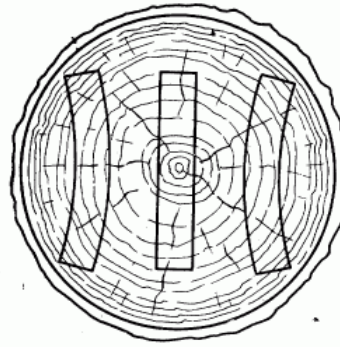


Рисунок 1.8 - Поперечне короблення

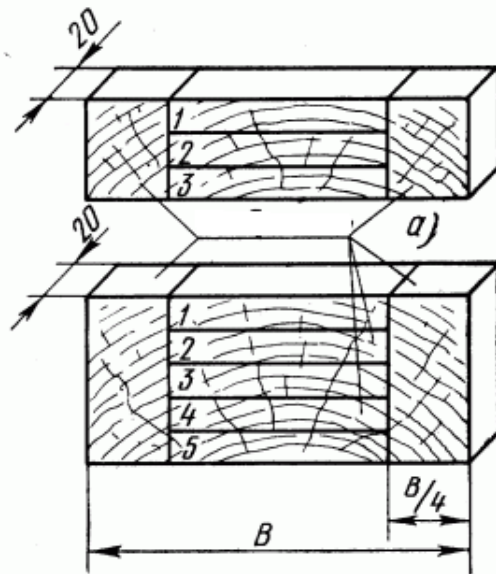


Рисунок 1.9 - Секції пошарової (B-ширина дошки)

Рівномірність кінцевої вологості. Показником рівномірності вважають середнє квадратичне відхилення, що обчислюється по формулі

$$\sigma = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (W_i - W_{CP})^2}}{n-1}, \quad (5)$$

де  $W_i$  – вологість окремої секції, %;

$W_{CP}$  – середня вологість штабеля, %;

$n$  – число секцій вологості.

### Контроль вологості та залишкових напружень пиломатеріалів

Фактична вологість окремих дощок у штабелі з ймовірністю 95% (тобто у 95 випадках зі 100) перебуватиме в межах середнього значення вологості

Це означає, що при правильно організованому сушінні відхилення вологості між окремими дошками не перевищуватиме статистично допустимих меж.

### **Контроль перепаду вологості по товщині**

Для оцінки рівномірності висихання деревини проводять контроль перепаду вологості по товщині дошки.

Перепад визначається за допомогою секцій пошарової вологості, які вирізають поруч із секціями, призначеними для визначення загальної вологості.

Залежно від товщини пиломатеріалу використовують такі схеми розколювання:

- для дощок товщиною до 50 мм - схема, наведена на рис. 2.9 (а);
- для дощок товщиною 50 мм і більше - схема на рис. 2.9 (б).

Отримані показники вологості зовнішніх і середніх шарів дають уявлення про розподіл вологи та рівень рівномірності сушіння.

### **Контроль залишкових напружень**

Залишкові напруження визначають за допомогою силових секцій, які вирізають поряд із секціями пошарової вологості.

Деревина вважається практично вільною від залишкових напружень, якщо відхилення зубців секції у вершині не перевищує 1,5–2% їх довжини.

Цей показник є критично важливим, оскільки надлишкові напруження можуть спричиняти викривлення, тріщини або розшарування матеріалу після сушіння.

### **Категорії якості сушіння**

Якість сушіння деревини регламентується документом «Керівні матеріали по камерному сушінню пиломатеріалів» і поділяється на чотири категорії залежно від вимог до точності та сфери застосування:

I категорія

- сушіння до експлуатаційної вологості, придатної для механічної обробки та складання деталей за 12–10 квалітетами.

- використовується у точному машинобудуванні та при виготовленні високоточних дерев'яних конструкцій.

#### II категорія

- сушіння до експлуатаційної вологості для меблевого виробництва, автомобілебудування та аналогічних галузей.

- відповідає 13–11 квалітетам точності.

#### III категорія

- сушіння до експлуатаційної вологості, придатної для складання деталей у галузях вантажного вагонобудування, сільськогосподарського машинобудування тощо.

- відповідає 15-13 квалітетам точності.

Таким чином, якісний контроль вологості, рівномірності її розподілу по товщині та залишкових напружень є необхідними умовами для забезпечення високої якості сушіння пиломатеріалів, що гарантує стабільність їхніх розмірів, міцність і придатність до подальшої обробки.

### **Контроль вологості та залишкових напружень у деревині**

#### Визначення перепаду вологості по товщині

Для оцінки рівномірності висихання деревини проводять пошаровий аналіз вологості. З цією метою з обраних дощок вирізають спеціальні секції, розташовані поруч із тими, що використовуються для визначення загальної вологості.

Розділення секцій здійснюють за такими схемами:

- для дощок товщиною до 50 мм - за схемою, наведеною на *рис. 1.9 (а)*;
- для дощок товщиною 50 мм і більше - за схемою *рис. 1.9 (б)*.

Отримані дані дозволяють визначити перепад вологості між середнім та крайніми шарами, що характеризує ступінь рівномірності розподілу вологи у товщі деревини. Чим менша ця різниця, тим якісніше та стабільніше проходив процес сушіння.

## Оцінка залишкових напружень

Для контролю залишкових напружень у висушеній деревині застосовують силові секції, які вирізають поряд із секціями, призначеними для аналізу вологості.

Деревина вважається вільною від залишкових напружень, якщо відхилення ріжучих зубців секції у вершині не перевищує 1,5–2% їх довжини. Цей показник є важливим критерієм якості сушіння, оскільки наявність надмірних напружень може призводити до деформацій, розтріскування або викривлення пиломатеріалів під час подальшої обробки чи експлуатації.

Таким чином, пошаровий аналіз вологості у поєднанні з оцінкою залишкових напружень дозволяє комплексно оцінити якість сушіння деревини та своєчасно скоригувати технологічні режими для запобігання дефектам.

Таблиця 1.6 - Норми вимог до якості сушіння пиломатеріалів і заготівок

Категорія якості сушіння	Середня кінцева вологість деревини, %	Допустимі відхилення кінцевої вологості у партії від середньої, %	Допустимий перепад вологості, %, при товщині пиломатеріалів, мм				Залишкові внутрішні напруження
			13-22	25-40	45-60	70-90	
0	19	+2 -4	Не контролюється				Не контролюються
I	6 8	+1,5 ±2	1,5	2,0	2,5	3,0	Не допускаються
II	6 8 10	±2 ±2,5 ±3	2,0	3,0	3,5	4,0	Те ж саме
III	8 10 12 15	±3 +4 ±5 ±5	2,5	3,5	4,0	5,0	Не контролюються

## Вплив вологості та температури на міцність деревини

Міцність деревини є комплексною характеристикою, що залежить від породи, вологи та температурних умов. У процесі сушіння ці параметри

змінюються, що безпосередньо впливає на механічні властивості матеріалу — зокрема, на його стійкість до розтягування, стискання та вигину.

### **1. Вплив вологості. Гігроскопічна зона:**

- міцність деревини змінюється лише тоді, коли її вологість опускається нижче межі гігроскопічної зони.
- зниження вологості сприяє підвищенню міцності, оскільки зменшується кількість зв'язаної води, що ослаблює структуру клітинних стінок.
- у зоні вологості вище гігроскопічного рівня (понад 30%) вплив на міцність практично відсутній.

#### **Зворотність змін**

- підвищення вологості після висушування знижує міцність деревини.
- після повторного висихання деревина повністю відновлює свої початкові механічні властивості, якщо структура клітин не зазнала руйнувань.

### **2. Вплив температури. Короткочасна дія:**

- при невисоких температурах (до 100 °C) вплив на міцність є зворотним: після охолодження деревина зберігає свої початкові властивості.

#### **Тривалий або високотемпературний вплив**

- тривале нагрівання або дія високих температур (>120 °C) призводить до незворотних змін у структурі деревини - руйнуються лігнін та геміцелюлози.
- у результаті міцність зменшується, навіть після повернення матеріалу до нормальних умов експлуатації.

### **3. Експлуатаційна міцність і міцність під час обробки.**

- міцність під час обробки залежить від поточних параметрів вологості та температури матеріалу.
- експлуатаційна міцність визначається після досягнення деревиною робочої (експлуатаційної) вологості - зазвичай 8–12% - та стабілізації температури до умов навколишнього середовища.

**Ілюстрація впливу температури та вологості.** На рисунку 1.9 наведено залежність межі міцності берези при розтягуванні в тангенціальному напрямку:

- холодна суха деревина має у 15–20 разів більшу міцність, ніж тепла сира.

- аналогічні закономірності спостерігаються й для інших порід, однак ступінь зміни міцності може суттєво різнитися залежно від структури волокон і хімічного складу деревини.

Під час сушіння та подальшої обробки деревини необхідно враховувати:

- вплив вологості на міцність при механічних навантаженнях;
- ризики зниження міцності при тривалому нагріванні;
- потребу у стабілізації деревини перед експлуатацією.

Дотримання цих вимог забезпечує оптимальне поєднання міцності, довговічності та якості обробки деревини у готових виробах.

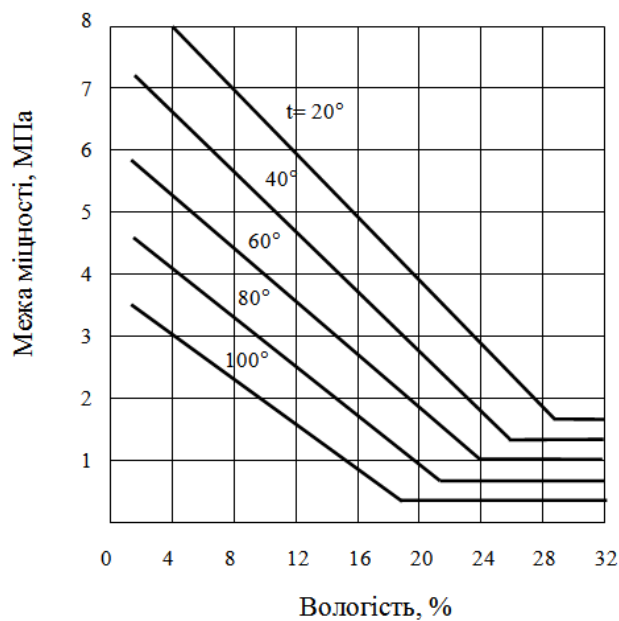


Рисунок 1.9 – Діаграма межі міцності деревини берези при розтягненні поперек волокон у тангенціальному напрямі

### Експлуатаційна міцність деревини

Експлуатаційна міцність деревини визначається її породою, вологістю та умовами попереднього сушіння. Це основний показник, який характеризує

здатність матеріалу зберігати механічні властивості протягом тривалого часу в робочих умовах.

Стандартною характеристикою експлуатаційної міцності вважають міцність деревини, яка:

- не зазнавала дії температур вище 60 °С;
- зберігає робочу міцність, незалежно від тривалості процесу сушіння.

### **Вплив температури сушіння на міцність**

При підвищенні температури понад 60 °С спостерігається зменшення механічної міцності деревини, що зумовлено термічним руйнуванням структурних компонентів (лігніну, геміцелюлоз і частково целюлози). Ступінь зниження міцності залежить від температури, тривалості сушіння, породи та початкової вологості деревини:

- при температурі 80 °С помітне зниження міцності відбувається лише у разі, якщо тривалість сушіння перевищує 40–50 годин.
- при температурі 120 °С цей ефект проявляється вже після 2–3 годин сушіння.

### **Зниження механічних властивостей при високотемпературному сушінні**

Під час інтенсивних процесів сушіння за температури 120–130 °С із тривалою витримкою 30–60 годин механічні характеристики деревини помітно знижуються:

- міцність на розтягування, стискання та статичний згин зменшується на 5–8 %;
- міцність на розщеплення - на 15-20 %.

Таке погіршення властивостей пов'язане з частковою деструкцією органічних речовин, зокрема лігніну, що виконує функцію природного “цементу” між клітинними стінками.

Для забезпечення високої експлуатаційної міцності деревини необхідно:

- дотримуватись оптимальних температурних режимів сушіння (не перевищувати 60-80 °С без потреби);

- уникати тривалої витримки при високих температурах;
- враховувати породні особливості деревини при виборі режиму сушіння.

Це дозволяє зберегти природну міцність, мінімізувати появу мікротріщин і забезпечити довговічність матеріалу у подальшій експлуатації.

## **2 ОГЛЯД ОБ'ЄКТА УПРАВЛІННЯ ТА СТВОРЕННЯ СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ СУШАРКОЮ**

### **2.1 Обґрунтування вибору засобів для побудови системи**

Модернізація системи контролю температури та вологості сушильної установки

Після проведення аналізу роботи існуючої сушильної установки та виявлення основних проблем - насамперед низької точності вимірювання температури й вологості - було здійснено удосконалення методів і засобів збору технологічних параметрів.

#### **Недоліки традиційної системи вимірювання**

На поточному етапі температура в камері вимірюється за допомогою ртутних термометрів, які є морально застарілими, незручними в експлуатації та мають значну похибку. Вологість визначається психометричним методом, при якому оператор знімає покази з вологого та сухого термометрів і обчислює вологість за психометричними таблицями.

Недоліки цього методу:

- значна тривалість процесу вимірювання;
- висока похибка, зумовлена неточністю шкали термометрів і людським фактором (ефект паралаксу);
- можливість вимірювання лише в окремих точках камери, що не забезпечує повної картини вологості по об'єму сушильної зони.

#### **Запропоноване технічне рішення**

Для підвищення точності та швидкості контролю запропоновано замінити психометричний метод на систему електронних датчиків вологості.

Такі датчики:

- забезпечують оперативне й точне визначення вологості без використання таблиць;
- виключають помилки оператора;
- дають змогу безперервно контролювати параметри у різних точках камери.

Одночасно вдосконалено й вимірювання температури — замість ртутних приладів встановлено цифрові термодатчики, що передають показники безпосередньо до мікроконтролера. Це дає змогу автоматично збирати, обробляти та візуалізувати дані з високою швидкістю та точністю.

### **Система автоматичного регулювання**

Для стабілізації процесу сушіння запропоновано встановити електронагрівач, керований контролером мікропроцесорної системи (КМС). Мікроконтролер у реальному часі аналізує дані з датчиків і регулює потужність нагріву, підтримуючи температуру в оптимальних межах.

Увесь процес сушіння контролюватиметься з персонального комп'ютера, що взаємодіє з мікроконтролером через розроблене програмне забезпечення.

### **Програмна реалізація**

Програмний продукт буде реалізовано у вигляді віконного застосунку, розробленого на об'єктно-орієнтованій мові програмування C#, яка забезпечує стабільність, швидкодію та простоту розширення системи.

графічний інтерфейс користувача створюється з використанням Windows Forms API, що дозволяє візуально відображати параметри сушіння в реальному часі.

Для програмування мікроконтролера обрано мову C++, яка забезпечує прямий доступ до апаратних ресурсів і високу ефективність виконання команд.

Таким чином, запропоноване оновлення системи забезпечує підвищення точності вимірювань, оперативність контролю та автоматизацію процесу сушіння, що в комплексі значно покращує якість кінцевого продукту та енергоефективність установки.

## 2.2 Розгорнута постановка завдання

Згідно з технічним завданням на магістерську роботу, передбачається розроблення системи керування сушаркою гібридного типу. У процесі виконання магістерської роботи необхідно реалізувати наступний обсяг проєктних робіт:

а) провести аналіз існуючих систем-аналогів з метою виявлення їхніх переваг і недоліків. Результати аналізу використати для формування технічних і програмних рішень у подальшій розробці системи.

б) вибрати та обґрунтувати методику побудови системи контролю роботи технологічного обладнання у автоматизованому режимі. Розробити функціональну та структурну схеми мікропроцесорної системи управління насосною станцією.

в) створити програмне забезпечення системи, яке забезпечить виконання завдань, визначених технічним завданням. Побудувати блок-схеми алгоритмів основної програми та допоміжних підпрограм.

г) Розробити інтерфейс користувача, який забезпечить:

- зручність роботи оператора з системою;
- формування і виведення на екран повідомлень про некоректні дії користувача;
- індикацію аварійних і нестандартних ситуацій у роботі технологічного обладнання.

д) підготувати рекомендації щодо організаційних і методичних заходів, які забезпечать ефективне впровадження системи в промислову експлуатацію та її подальше надійне функціонування.

е) розробити заходи з охорони праці під час впровадження, налагодження та експлуатації системи автоматизації.

ж) сформулювати висновки щодо виконаного обсягу робіт, отриманих результатів і практичної значущості розробленої системи.

## **2.3 Опис функціонування системи**

### **Автоматичне регулювання процесу сушіння деревини**

Основною метою автоматичного регулювання процесу сушіння є стабілізація режиму сушіння для забезпечення необхідних параметрів температури та вологості. Для цього застосовуються регулятори, які підтримують ці параметри на заданому рівні. Тип регулятора, закон регулювання та його налаштування вибираються з урахуванням статичних і динамічних характеристик сушильної камери, а також вимог до системи керування.

### **Визначення динамічних характеристик об'єкта**

Динамічні властивості сушильної установки можуть бути описані диференціальними рівняннями, що відображають взаємозв'язок між вхідними та вихідними параметрами. Якщо отримати математичну модель складно, характеристики визначають експериментально - за реакцією системи на зміну керуючих впливів.

- експериментальні методи застосовують під час автоматизації існуючих установок, коли можливо проводити реальні вимірювання.

- аналітичні методи використовують на етапі проектування, коли модель будується на основі технологічних і конструктивних параметрів.

Отримані характеристики дозволяють не лише вирішувати задачу регулювання, а й оптимізувати конструкцію установки. Комбінація аналітичних і експериментальних методів забезпечує найвищу достовірність результатів.

### **Розроблений програмний продукт**

У межах кваліфікаційної роботи створено програмний продукт - віконний додаток для автоматизованого керування процесом сушіння деревини, розроблений для промислового підприємства, що здійснює камерне сушіння.

Процес камерного сушіння є багатофакторним і динамічним, оскільки характеризується складними взаємозв'язками між параметрами та впливом зовнішніх неконтрольованих факторів.

**Модель процесу сушіння деревини.** Процес можна представити у вигляді системи взаємопов'язаних груп параметрів:

- група вхідних параметрів ( $Ks_1$ ) – контрольовані, але нерегульовані технологічні фактори (тип деревини, розміри, початкова вологість);
- група неконтрольованих параметрів ( $Ks_2$ ) – зовнішні фактори (зміни навколишнього середовища, знос обладнання, нерівномірність матеріалу);
- група керуючих впливів ( $U$ ) – регульовані параметри, які забезпечують підтримку режиму (кількість теплоти, швидкість циркуляції повітря);
- група вихідних параметрів якості ( $K$ ) – показники кінцевого результату (вологість деревини, залишкові напруження);
- група економічних параметрів ( $E$ ) – ефективність процесу (тривалість сушіння, витрати енергії, собівартість).

#### **Автоматична оптимізація процесу (CAO)**

Для забезпечення оптимального режиму сушіння розроблено систему автоматичної оптимізації (CAO).

У її структурі, окрім типових елементів - об'єкта (O) та регулятора (П), передбачено пристрій керування (КП), який аналізує параметри процесу та здійснює автоматичний пошук найефективніших умов роботи.

Принцип дії CAO полягає у покроковій зміні керуючих параметрів, аналізі результатів та корекції режиму сушіння з метою досягнення оптимального співвідношення між якістю, тривалістю та енерговитратами.

Створена система автоматичного керування забезпечує:

- стабілізацію температурно-вологісного режиму;
- підвищення точності вимірювань і керування;
- автоматичний вибір оптимальних параметрів сушіння;
- зменшення впливу людського фактора;
- підвищення якості готової деревини та економічності процесу.

Таким чином, впровадження автоматизованої системи дозволяє досягти максимальної ефективності сушіння при мінімальних енергетичних витратах і

стабільних параметрах якості продукції.

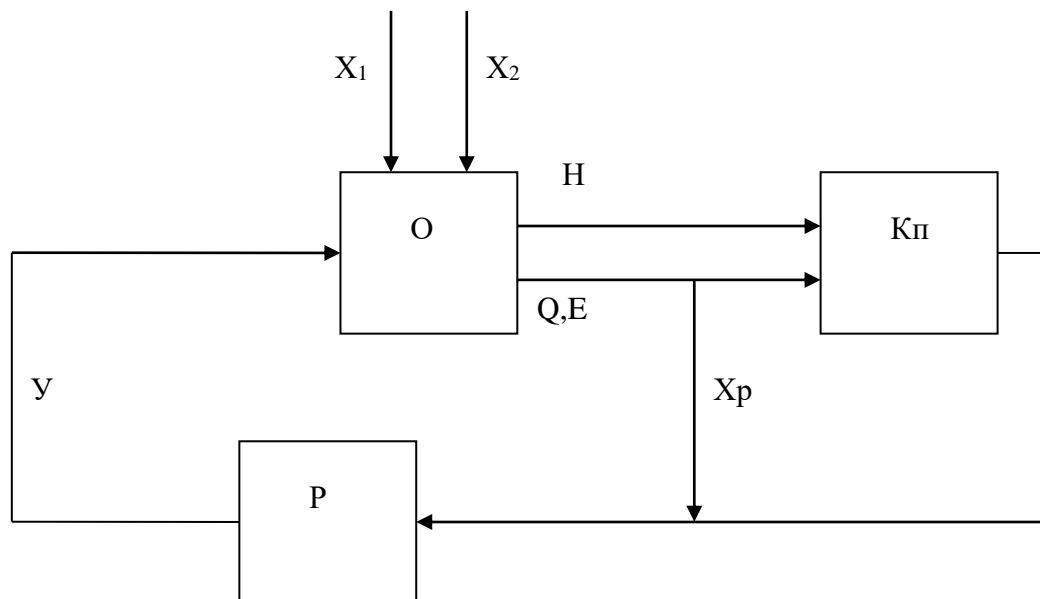


Рисунок 2.1 - Структурна схема системи автоматичної оптимізації

О – об'єкт регулювання; Р – регулятор; Кп – керуючий пристрій,  $X_1$ ,  $X_2$  - вхідні параметри;  $y$  - регулюючий вплив;  $Q$ ,  $E$  - параметри об'єкта, що характеризують якість і економічність;  $H$  — обмеження.

### **Критерії оптимальності процесу сушіння та засоби його автоматичної оптимізації**

Оптимальність процесу сушіння деревини визначається вибором одного або кількох цільових параметрів, які виступають у ролі критеріїв оптимізації. До таких критеріїв можуть належати:

- кінцеві показники якості матеріалу ( $K$ ) – рівень вологості, відсутність тріщин, рівномірність висихання, стабільність розмірів;
- економічна ефективність процесу ( $E$ ) – мінімальні енергетичні витрати та скорочення часу сушіння.

Інші параметри процесу розглядаються як обмеження ( $H$ ), які необхідно дотримуватися в межах роботи системи автоматичної оптимізації (CAO).

Як критерій оптимальності може бути обрана інтенсивність сушіння, тоді

як обмеженням виступає умова збереження необхідних показників якості деревини, зокрема недопущення внутрішніх тріщин або деформацій.

### **Засоби реалізації системи автоматичної оптимізації (CAO)**

Для створення ефективної системи автоматичної оптимізації необхідно не лише впровадити стандартні регулятори, а й забезпечити розширену систему вимірювань із використанням спеціалізованих приладів.

Прилади для контролю якості деревини:

- датчики температури та вологості матеріалу;
- сенсори, що визначають градієнт вологості по товщині деревини;
- прилади для оцінки внутрішніх напружень, які виникають у процесі сушіння.

Прилади для вимірювання енергетичних характеристик:

- лічильники теплової енергії,
- сенсори витрат тепла на випаровування 1 кг вологи,
- вимірювачі енерговитрат для оцінки ефективності сушильного циклу.

Прилади для контролю швидкості висихання:

автоматичні вологоміри з диференційними вимірювальними елементами, що дають змогу відстежувати процес у реальному часі;

пристрої для побудови динамічних графіків зміни вологості в різних зонах камери.

Завдяки цим технічним засобам система здатна здійснювати точний контроль за станом деревини і, відповідно, підвищувати ефективність процесу оптимізації.

### **Проблеми впровадження автоматичних систем оптимізації**

Попри значний потенціал, можливості створення повноцінних автоматичних систем оптимізації сушіння обмежуються такими факторами:

- відсутність розроблених алгоритмів керування, які враховують усі технологічні взаємозв'язки;
- недостатня кількість надійних датчиків для вимірювання вологи в самій деревині (а не лише в повітрі камери);

- складність побудови адекватних математичних моделей, що описують нестационарні процеси тепло- та вологообміну.

### **Необхідність урахування стану деревини**

Система, яка орієнтується виключно на параметри сушильного агента (температура, відносна вологість повітря), не може вважатися ефективною, оскільки вона не враховує стан самої деревини — її температуру, внутрішню вологість, градієнти насичення та деформації.

У таких випадках забезпечити задану кінцеву вологість і якість матеріалу практично неможливо.

Для досягнення оптимальних результатів параметри режиму сушіння повинні бути погоджені з властивостями деревини, що дозволяє одночасно підвищити інтенсивність процесу та зберегти якість матеріалу.

### **Сучасний стан і перспективи**

Попри зазначені обмеження, системи автоматичного регулювання параметрів сушильного агента вже широко застосовуються у промислових умовах. Вони забезпечують:

- стабільність температурно-вологісного режиму;
- енергоефективність процесу;
- зменшення впливу людського фактора.

Подальший розвиток таких систем передбачає інтеграцію сенсорів безпосереднього контролю стану деревини та інтелектуальних алгоритмів оптимізації, що дозволить створити повноцінні самонавчальні системи автоматичного сушіння деревини нового покоління.

## **2.4 Розробка структурної схеми**

Структурна схема - це графічне зображення, яке демонструє побудову системи шляхом відображення її основних елементів, блоків або вузлів та зв'язків між ними. Вона дає можливість зрозуміти загальну архітектуру системи й складові, що забезпечують виконання заданих функцій. Така схема дозволяє

визначити, як саме взаємодіють окремі частини системи, а також які етапи та зв'язки є ключовими для її ефективного функціонування. Відповідно до опису роботи системи, було створено структурну схему, наведену на рисунку 2.2. Вона відображає основні блоки та їх взаємодію, необхідну для коректного налаштування й оптимізації процесу сушіння.

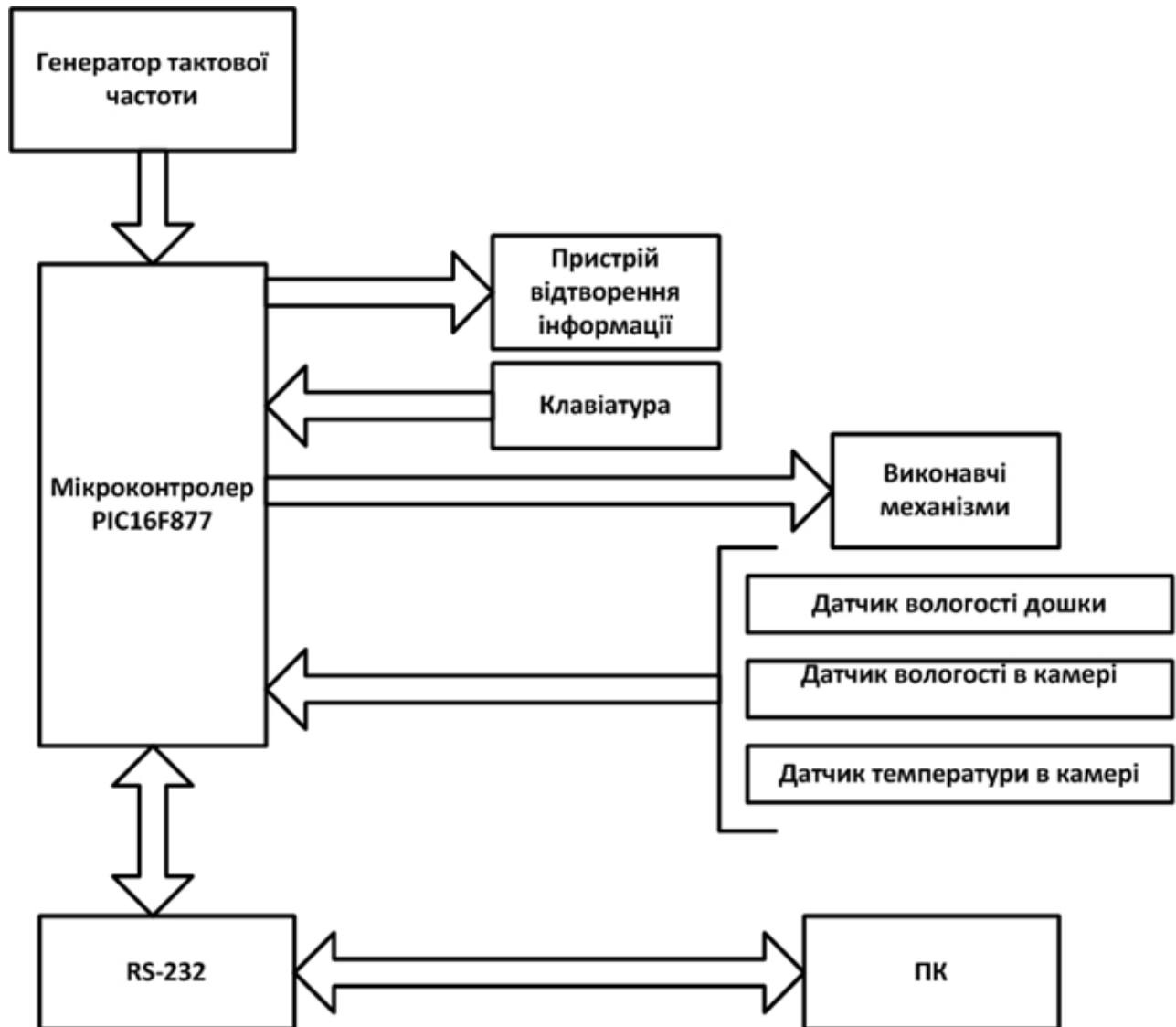


Рисунок 2.2 - Структурна схема керування процесом сушіння деревини

## 2.5 Розробка функціональної схеми

На рисунку 2.3 зображена функціональна схема системи. Нижче розглянемо її більш докладно.

Функціональна схема автоматизації процесу сушіння деревини відображає основну структуру та принцип роботи системи керування. Вона включає кілька головних складових: сушильну камеру, вентилятори, насосне обладнання та мікропроцесорний комплекс на базі мікроконтролера PIC16F877 з підключеними периферійними датчиками, які здійснюють збір і контроль технологічних параметрів.

### Опис роботи системи

1. Режим очікування. На початковому етапі система перебуває в режимі очікування до моменту, коли оператор подасть команду на старт процесу. Після завантаження деревини й проведення попереднього нагріву, оператор задає параметри — необхідну температуру та вологість для кожного етапу сушіння, враховуючи породу деревини та її розміри.

2. Запуск процесу сушіння. Після введення параметрів система переходить у робочий режим. Вмикається котельне обладнання, гаряча вода надходить у теплообмінник, а в камеру подається нагріте повітря. Мікроконтролер PIC16F877 отримує сигнали від датчиків температури та вологості всередині камери, а також від електродного сенсора, що контролює стан вентиляційних клапанів.

3. Основний процес сушіння.

- Якщо рівень вологості деревини перевищує заданий поріг ( $V_n > V_{n.c.1}$ ), система активує першу фазу сушіння.

- Коли температура у камері досягає граничного значення для поточної стадії, контролер відключає опалення.

- Після досягнення встановленого рівня вологості ( $V_k > V_{k.c.}$ ) система зупиняє витяжний вентилятор і відкриває вентиляційний клапан. Ці цикли повторюються, доки не завершиться відповідна фаза процесу.

#### 4. Регулювання температури.

- грубе регулювання здійснюється через контури нагріву рідинно-повітряної камери.

- точне регулювання реалізується мікроконтролером, який керує електронагрівачем для підтримання стабільної температури.

5. Моніторинг і керування. На панелі управління відображаються поточні значення температури та вологості деревини й повітря в камері, що дає змогу оператору в режимі реального часу контролювати процес. Якщо показники вологості падають нижче заданого рівня, система автоматично зупиняє вентилятор і закриває клапан, запобігаючи виникненню внутрішніх напружень у матеріалі, які можуть призвести до його деформації.

6. Перехід між фазами сушіння. Коли задана вологість досягнута, контролер подає сигнал про завершення поточної стадії. Оператор може ініціювати перехід до наступного етапу. Після досягнення кінцевих параметрів система автоматично завершує роботу та повідомляє про завершення сушіння.

Переваги схеми: Розроблена функціональна схема забезпечує повністю автоматизований контроль усіх етапів процесу сушіння, підвищуючи його точність, стабільність і ефективність, а також зменшуючи ризики пошкодження деревини.

На рисунку 2.3 зображено функціональну схему системи.

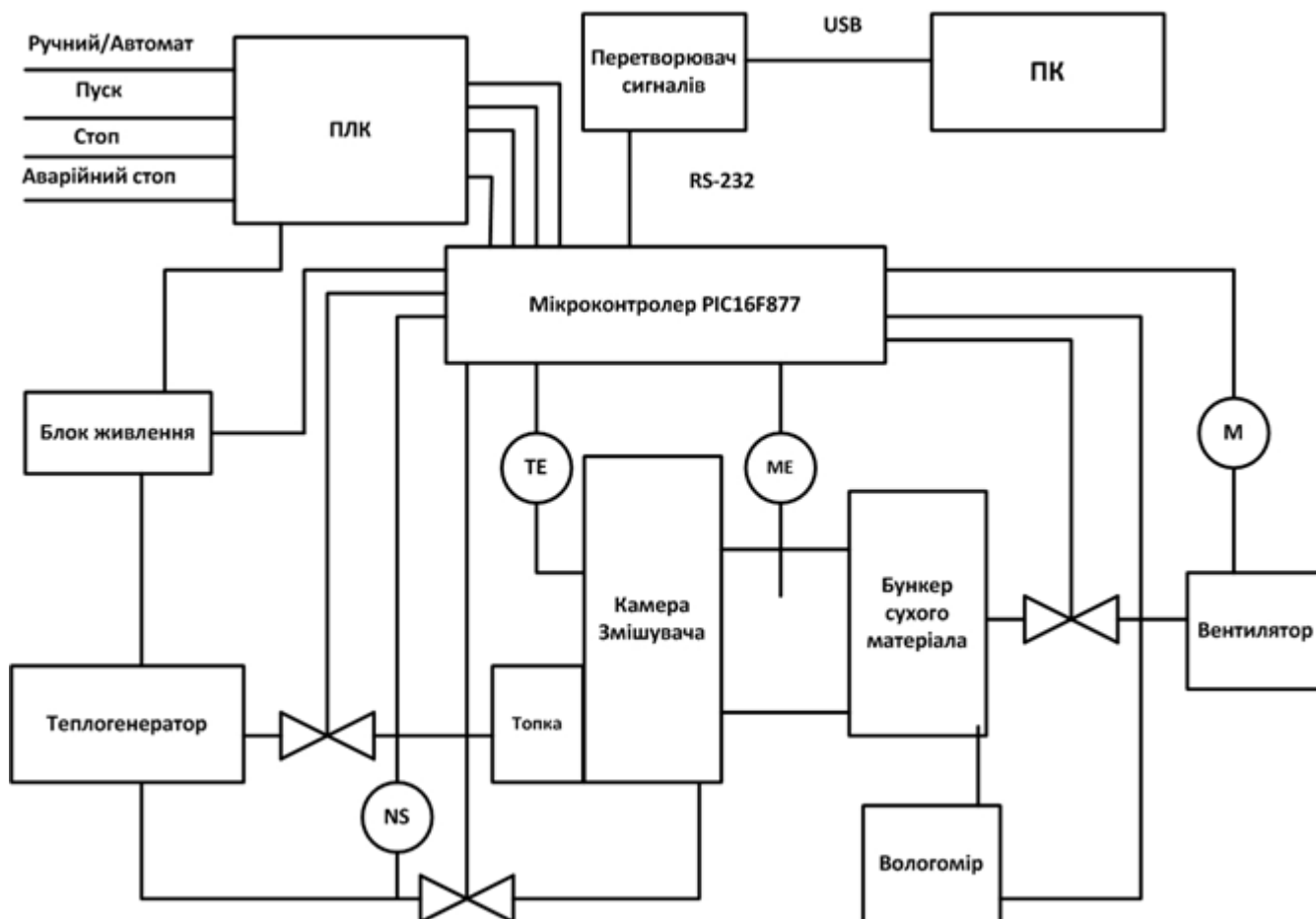


Рисунок 2.3 – Функціональна схема системи

## Розробка діаграми процесів

Діаграма взаємодії процесу є ключовим інструментом у проектуванні програмних систем, оскільки наочно демонструє, як саме відбувається обмін і обробка даних між різними компонентами. Вона допомагає зрозуміти логіку взаємодії елементів системи, відобразити послідовність етапів та забезпечити узгодженість роботи всієї структури.

### Основні аспекти діаграми взаємодії процесу

1. Візуалізація наборів даних. Діаграма ілюструє взаємозв'язки між різними частинами даних у межах системи, відображаючи як абсолютні, так і відносні показники. Це дозволяє краще зрозуміти логіку взаємодії компонентів та способи передачі інформації.

2. Потоки даних і процеси. На діаграмі показано, як дані циркулюють у

системі, які етапи обробки проходять, які процеси взаємодіють між собою та як формується загальний інформаційний потік.

3. Контекстний рівень. Цей рівень демонструє загальну взаємодію системи з її зовнішнім середовищем — користувачами, сенсорами або іншими пристроями. Він дозволяє отримати уявлення про структуру системи на концептуальному рівні та зрозуміти її межі.

4. Деталізація процесів. На більш глибокому рівні відображаються конкретні етапи обробки даних: які операції виконуються, які параметри аналізуються та як формується результат. Це забезпечує точне розуміння логіки роботи системи.

#### 5. Блок-схема основної програми та підпрограм

Після побудови діаграми взаємодії наступним етапом є створення блок-схеми програми, що відображає логіку роботи системи, алгоритми її функціонування та структуру підпрограм.

- основна програма. Забезпечує загальне керування процесом сушіння: ініціалізує всі компоненти, збирає дані з датчиків температури та вологості, виконує розрахунки необхідних параметрів і формує керуючі команди для виконавчих механізмів.

- підпрограми. Реалізують окремі функції, такі як вимірювання температури й вологості, керування вентиляцією та системою опалення, обчислення результатів і передача інформації оператору через інтерфейс.

Розробка блок-схем дозволяє чітко структурувати логіку роботи програми, визначити послідовність виконання дій і розмежувати функціональні обов'язки між її частинами.

#### 6. Діаграма взаємодії процесу для системи сушіння деревини

На основі описаної системи можна побудувати діаграму, яка показує:

- як дані з датчиків температури та вологості надходять до мікроконтролера;

- як мікроконтролер PIC16F877 аналізує отриману інформацію та приймає рішення щодо регулювання температури чи вологості в сушильній

камері;

- як оператор взаємодіє із системою через інтерфейс, задаючи параметри для кожної фази сушіння та контролюючи процес.

Діаграма взаємодії процесу та блок-схема програмного забезпечення разом утворюють основу для розуміння роботи системи автоматизації сушіння деревини. Вони дозволяють побачити повну картину обміну даними, алгоритмів обробки та прийняття рішень, що забезпечує ефективність, стабільність і точність функціонування системи.

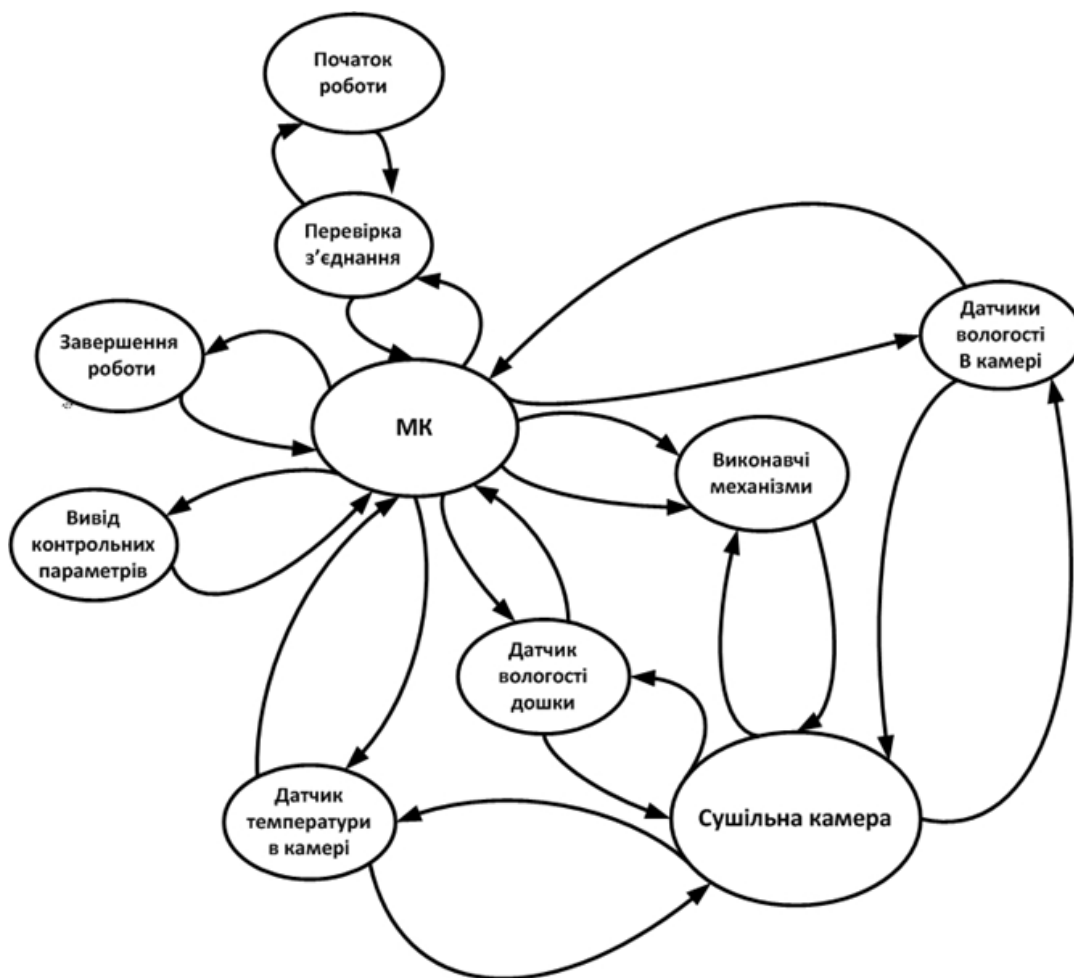


Рисунок 2.5 – Діаграма взаємодії процесів

Таким чином, після розгляду загального опису системи, її структурної та функціональної схем, а також діаграми взаємодії процесів, можна перейти до опису блок-схем основної програми та допоміжних підпрограм, які забезпечують реалізацію функцій автоматизованої системи керування.

### **3 РЕАЛІЗАЦІЯ РОБОТИ. РОЗРАХУНКИ І ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДАНІ, ЩО ПІДТВЕРДЖУЮТЬ ПРАВИЛЬНІСТЬ ПРОЕКТНИХ РІШЕНЬ**

#### **3.1 Реалізації автоматизованої системи керування сушаркою**

У процесі виконання даної кваліфікаційної роботи було створено програмний продукт - віконний застосунок, призначений для автоматизованого керування процесом сушіння деревини. Програма забезпечує контроль параметрів середовища в сушильній камері, обробку даних із сенсорів та передавання команд до виконавчих пристроїв, що дозволяє підвищити точність, ефективність і стабільність технологічного процесу.

##### **Вибір комплексу технічних засобів**

Датчики температури

Для реалізації температурного контролю було обрано датчик TCN75 - програмований цифровий сенсор температури з послідовним інтерфейсом. Пристрій формує сигнал на виході INT/CMPTTR, який надходить до мікроконтролера у разі перевищення температурою встановленого користувачем порогу. Вихід INT/CMPTTR може бути налаштований як:

- вихід компаратора для роботи у режимі термостата;
- вихід переривання для сигналізації про перевищення температури.

##### **Основні технічні характеристики:**

- діапазон напруги живлення: 2.7–5.5 В;
- інтерфейс зв'язку: двопровідна шина, сумісна зі стандартом I<sup>2</sup>C;
- можливості програмування: зчитування поточної температури, задання межових значень та гістерезису;
- режим за замовчуванням: компаратор із порогом 80 °C та гістерезисом 5 °C;

- режим низького енергоспоживання: активується передачею команди через інтерфейс I<sup>2</sup>C;
- точність АЦП:  $\pm 1$  °C;
- швидкість перетворення: 8 вибірок за секунду;
- формат даних: 8-розрядний двійковий код.

### Переваги використання TCN75:

- можливість підключення до восьми датчиків на одну шину I<sup>2</sup>C, що забезпечує багатозонний контроль температури;
- підтримка роботи як у режимі опитування, так і переривання, що підвищує гнучкість системи;
- компактність, низька вартість і простота інтеграції в мікропроцесорні системи;
- усі регістри доступні для читання мікроконтролером, що спрощує налаштування і калібрування.

Таким чином, датчик TCN75 є оптимальним рішенням для системи автоматизації процесу сушіння деревини, забезпечуючи надійний температурний контроль, просте підключення до мікроконтролера PIC16F877 та стабільну роботу навіть у складних умовах експлуатації.

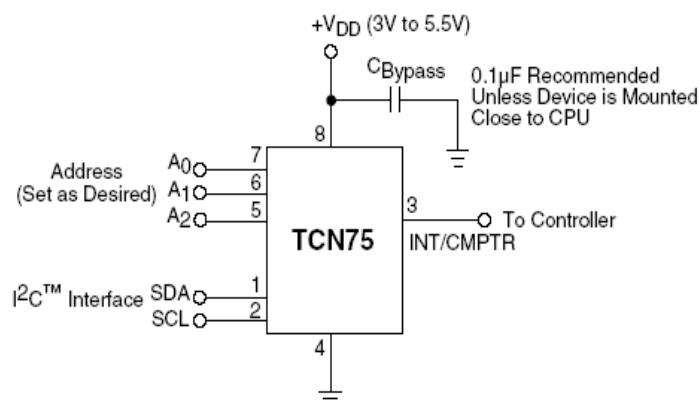


Рисунок 3.1 - Структурна діаграма датчика

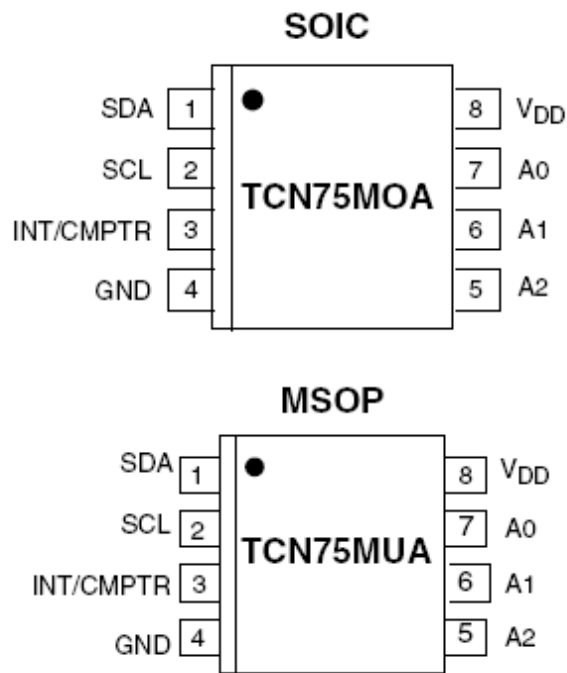


Рисунок 3.2 - Тип корпусу

Таблиця 3.1 - Електрична специфікація датчика

Символ	Параметр	Min	Тип	Max	Одини- ці виміру	Умови тестува- ння
$V_{DD}$	Напруга живлення	2.7	-	5.5	V	
$I_{DD}$	Струм живлення	-	0.250	-	mA	* **
$A_V$	Середній ухил вихідної струму	-	1	-	$\mu A$	*
$V_{OL}$	Вихідна напруга (low)	-	-	0.8	V	$I_{OL}=4\text{ mA}$
$I_{OL}$	Вихідний струм	-	1	4	mA	
$t_{TRIP}$	Час звітування	1	-	6	$t_{CONV}$	Задається програмно

Примітка.

\* - послідовний порт активовано.

\*\* - послідовний порт неактивовано.

Таблиця 3.2 - Температура/bit конвертор

$\Delta T$	Чутливість	-	$\pm 3$	-	$^{\circ}\text{C}$	
$t_{\text{CONV}}$	Час конвертування	-	55	$\pm$	мсек.	
$T_{\text{SET(PU)}}$	Значення температури по замовчуванню	-	80	-	$^{\circ}\text{C}$	При вмиканні
$T_{\text{HYST(PU)}}$	Значення гістирезису по замовчуванню	-	5	-	$^{\circ}\text{C}$	При вмиканні

Таблиця 3.3 - Інтерфейс двопровідної шини

$V_{\text{IH}}$	Високий логічний рівень (вхід)	$V_{\text{DDX}}$ 0.7	-	-	V	
$V_{\text{IL}}$	Низький логічний рівень (вхід)	-	-	$V_{\text{DDX}}$ 0.3	V	
$V_{\text{OL}}$	Низький логічний рівень (вихід)	-	-	0,4	V	$I_{\text{OL}} = 3\text{mA}$
$C_{\text{IN}}$	Вхідна ємність	-	15	-	pF	
$I_{\text{OL(SDA)}}$	Струм зовнішнього кола	-	-	6	mA	

Зв'язок із датчиком TC74 реалізується через двопровідний послідовний інтерфейс, сумісний зі стандартом SMBus/I<sup>2</sup>C. Цей інтерфейс використовується не лише для передавання даних, але й для керування режимами роботи пристрою.

У регістрі стану сенсора міститься біт «SHDN», який дозволяє перевести TC74 у режим зниженого енергоспоживання. У цьому режимі аналогово-цифровий перетворювач (АЦП) вимикається, проте послідовний порт

залишається активним, що забезпечує можливість підтримання зв'язку з контролером.

Споживаний струм мікросхеми становить близько 200 мкА у стандартному режимі роботи та лише 5 мкА у режимі енергозбереження. Така характеристика робить ТС74 зручним і економічним рішенням для застосування в автоматизованих системах контролю температури, де важливо мінімізувати енергоспоживання без втрати функціональності.

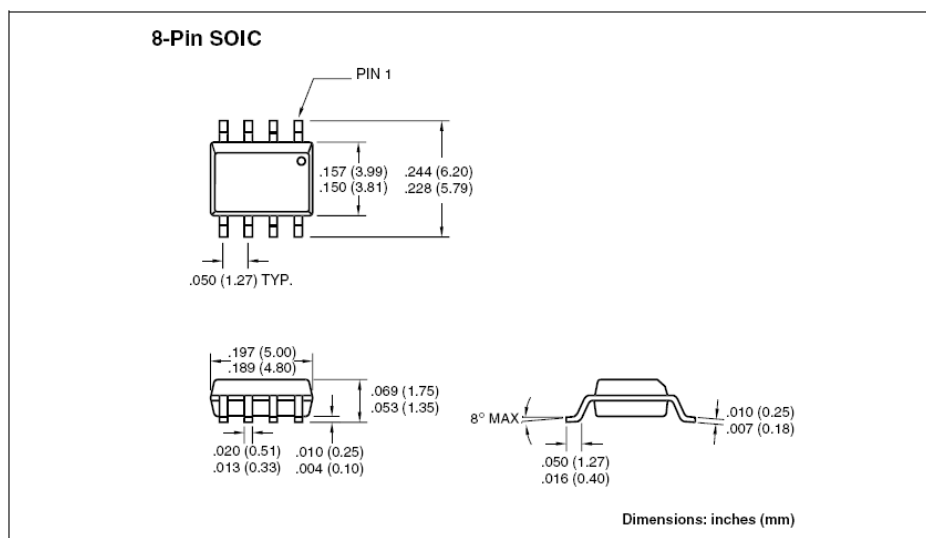


Рисунок 3.3 - Розміри корпусу датчика. Розмірність: дюйми (мм).

### Сенсор відносної вологості НН-3602

Загальні відомості. Для вимірювання рівня вологості в системі автоматизації сушіння деревини використовується сенсор НН-3602. Це високоточний датчик відносної вологості, виконаний у металевому корпусі типу ТО-5, який забезпечує надійний захист від механічних пошкоджень та зовнішніх впливів.

Пристрій оснащений гідрофобним фільтром із нержавіючої сталі, що запобігає потраплянню пилу, крапель вологи та конденсату на чутливий елемент, зберігаючи точність показників навіть у складних умовах експлуатації.

Сенсор НН-3602 характеризується стабільністю роботи, швидкою реакцією на зміни вологості та низьким рівнем гістерезису, що робить його

ефективним для використання в системах автоматичного контролю мікроклімату, зокрема в камерах сушіння деревини.

#### **Основні переваги:**

- висока точність і відтворюваність вимірювань;
- стійкість до конденсату та пилу завдяки гідрофобному фільтру;
- сумісність із аналоговими входами мікроконтролерів;
- низьке енергоспоживання і тривалий термін служби.

Таким чином, НІН-3602 є оптимальним вибором для побудови системи моніторингу вологості в процесі сушіння деревини, забезпечуючи надійне вимірювання параметрів і точне регулювання технологічного процесу.

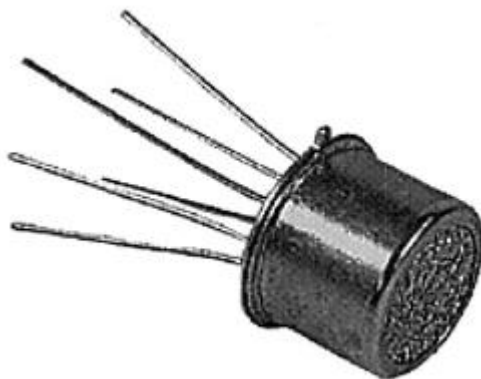


Рисунок 3.4 - Зовнішній вигляд датчика

#### **NIST калібрування**

Кожен сенсор НІН-3602 проходить індивідуальне калібрування за стандартами NIST (*National Institute of Standards and Technology*), що гарантує високу точність і відповідність міжнародним метрологічним вимогам. Разом із сенсором надається друкований звіт калібрування, у якому зазначені параметри точності, діапазон вимірювання та контрольні значення, отримані під час тестування. Це дозволяє використовувати сенсор у наукових і промислових системах, де важлива метрологічна достовірність показників.

#### **Структура сенсора**

Конструктивно НІН-3602 являє собою планарний конденсатор, поверхня якого вкрита полімерним чутливим шаром, що змінює свою діелектричну

проникність залежно від відносної вологості повітря. Додатковий захисний полімерний шар виконує функцію бар'єра, який оберігає чутливий елемент від пилу, бруду, масел, вологи та інших забруднень, забезпечуючи стабільність вимірювань упродовж тривалого часу експлуатації.

Завдяки такій структурі сенсор має:

- високу довготривалу стабільність характеристик;
- стійкість до зовнішніх впливів (пил, конденсат, пари);
- швидкий відгук на зміни вологості;
- збереження точності калібрування протягом усього терміну служби.

Таким чином, НН-3602, завдяки прецизійному NIST-калібруванню та надійній конструкції, є високоякісним компонентом для систем точного контролю вологості у процесі сушіння деревини.



Рисунок 3.5 - Внутрішня будова датчика

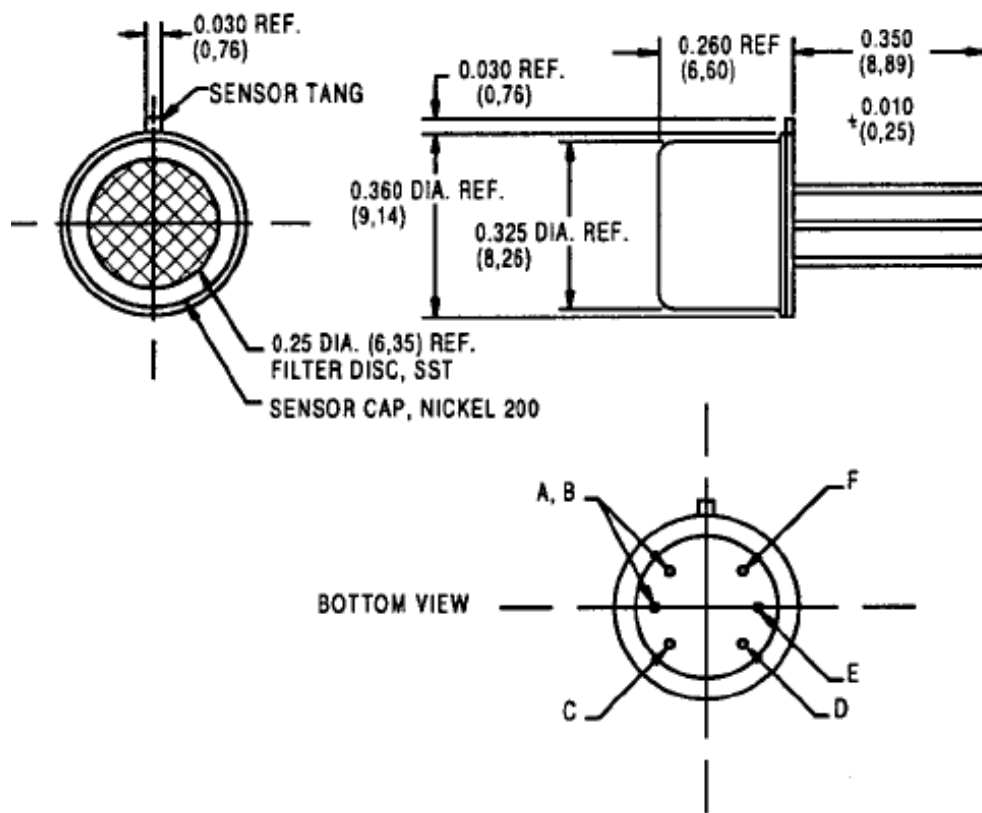


Рисунок 3.6 - Монтажні розміри

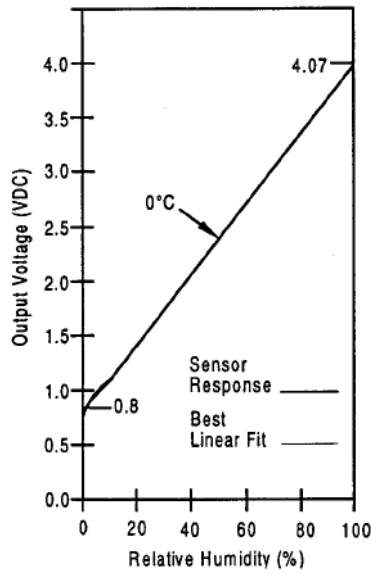
Таблиця 3.4 - Внутрішнє з'єднання виводів

A, B	Не використовуються
C	+VDC живлення
D	(-) живлення або земля
E	VDC вихід
F	Заземлення корпусу

Таблиця 3.5 - Специфікація виконання

Повторюваність RH	$\pm 0,5\% RH$
Час реакції RH	50 сек при повільному русі повітря і при 25°C
Стабільність RH	$\pm 1\% RH$ типовий при 50% RH на протязі 5 років
Вимоги живлення Напруга Струм	4...5,8 VDC, сенсор калібровано при 5VDC 200µA при 5VDC
Вихідна напруга При $V_{supply}=5VDC$	$V_{out}=V_{supply}(0.0062(sensorRH)+0.16)$ , типова при 25°C
Температурна компенсація Результат при 0% RH Результат при 100% RH	$RH=(sensorRH)/(1.093-0.012T)$ T в °F $RH=(sensorRH)/(1.0546-0.00216T)$ T в °C $\pm 0.007\% RH/^{\circ}C$ $-0.22\% RH/^{\circ}C$
Діапазон вологості Робоча Зберігання	0...100% RH, не конденсується 0...90% RH, не конденсується
Діапазон температур Робоча Зберігання	-40°C...85°C -40°C...125°C
Корпус	ТО-5 з 60µ гідрофобним фільтром з нержавіючої сталі, стійким до конденсації
Поводження	Статичний чутливий діод захищає до 15 kV

OUTPUT VOLTAGE VS RELATIVE HUMIDITY (at 0°C)



OUTPUT VOLTAGE VS RELATIVE HUMIDITY (at 0°C, 25°C, and 85°C)

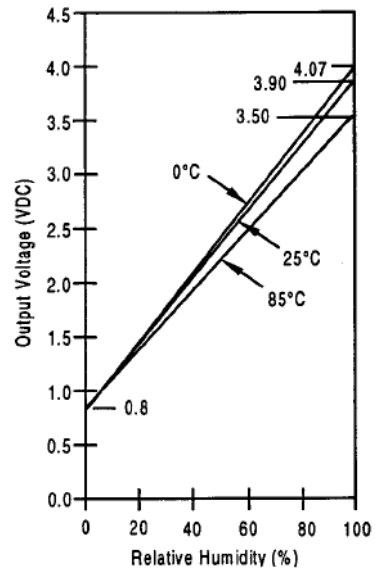
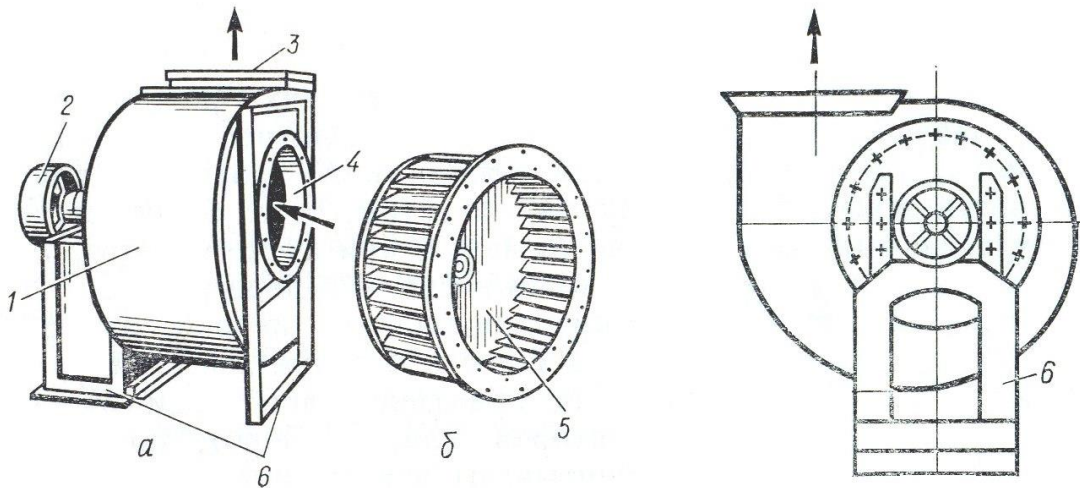


Рисунок 3.7 - Вихідні характеристики

## Центробіжний вентилятор



Рисинук 3.8 - Центробіжний вентилятор

## Вентилятори

Вентилятори є механічними пристроями, призначеними для переміщення повітряного потоку у вентиляційних або технологічних системах. Вони забезпечують циркуляцію, нагнітання або відсмоктування повітря, що особливо

важливо під час процесу сушіння деревини для підтримання необхідних параметрів мікроклімату.

### Принцип роботи центробіжного вентилятора

У центробіжних вентиляторах переміщення повітря відбувається внаслідок обертання робочого колеса, розташованого всередині спірального корпусу (барабанного типу) з лопатками. Під дією відцентрової сили повітря, що потрапляє в центральну частину колеса, переміщується радіально назовні між лопатками до периферії. Далі воно надходить у спіральний корпус і, завдяки формі спіралі, нагнітається у повітропровід, що прилягає до вихідного отвору вентилятора.

### Конструктивні особливості

На рисунку 3.9 представлено схему центробіжного вентилятора. Робоче колесо обертається за допомогою приводу (2), вал якого проходить усередину корпусу. У центрі бокової частини колеса передбачено циліндричний отвір для його закріплення на кінці вала. Конструкція забезпечує можливість обертання колеса у напрямку розвороту спіралі корпусу, що визначає правильність руху повітряного потоку.

Повітря всмоктується через боковий отвір корпусу та виходить під кутом  $90^\circ$ , утворюючи потік, спрямований у вентиляційний канал або сушильну камеру. Такий принцип дії забезпечує рівномірний розподіл теплого повітря по об'єму камери, що є важливою умовою якісного сушіння деревини.

### Застосування у сушильній техніці

У лісосушильних установках, як правило, використовуються вентилятори низького тиску - до 1000 Па, оскільки вони забезпечують достатню швидкість повітряного потоку при помірному енергоспоживанні. Їхня робота сприяє:

- рівномірному розподілу температури та вологості в камері;
- інтенсифікації процесу сушіння;
- запобіганню утворенню зон застою повітря.

Таким чином, центробіжні вентилятори є невід'ємною частиною системи автоматизованого керування сушильними процесами, забезпечуючи ефективну циркуляцію повітря та стабільні умови для висушування деревини.

### Електрокалорифер

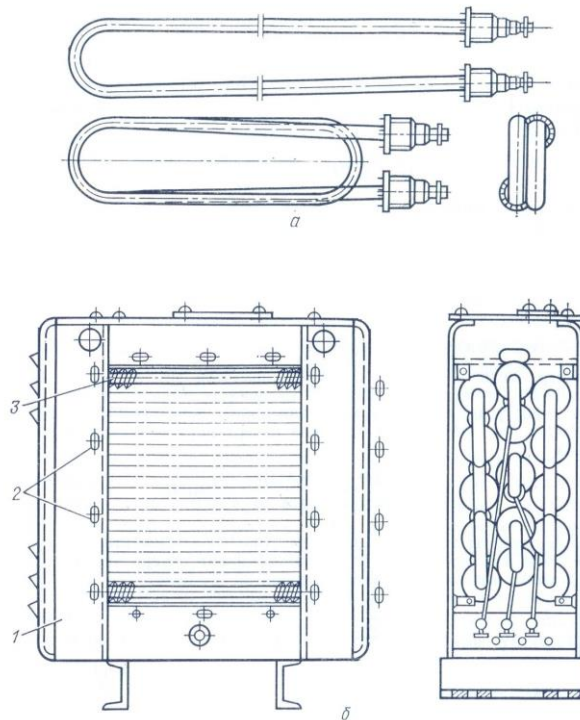


Рисунок 3.9 - Електрокалорифер

### Нагрівач

Нагрівальний елемент (ТЕН) являє собою U-подібну або складно зігнуту металеву трубку діаметром 10–16 мм та довжиною у розгорнутому стані 1–2,5 м. У середині трубки, у шарі електроізоляційного матеріалу, розміщено ніхромовий нагрівальний дріт діаметром 0,3–0,5 мм і довжиною 8–17 м.

Технічні характеристики:

- габаритні розміри ТЕНів: довжина - 0,5–1 м; ширина - 50–120 мм; товщина (у місці підключення) - близько 20 мм; маса - 1–2,5 кг.
- температура поверхні: 300 - 350 °С (знижується при збільшенні швидкості обдування, при цьому зберігається постійна тепловіддача).
- потужність: 0,4-5 кВт.

Таким чином, трубчастий електронагрівач (ТЕН) є компактним і надійним елементом для системи обігріву повітря в сушильній камері.

На основі ребристих ТЕНів потужністю 1,6 кВт виготовляються електрокалорифери типу ОКБ-3083, ОКБ-3084, ОКБ-3085, із загальною потужністю 20, 40 та 100 кВт і напругою живлення 380 В. У лісосушильних камерах можуть застосовуватись опалювальні електрокалорифери серії СФО потужністю 16–250 кВт, які працюють від мережі 380 В і забезпечують нагрів повітря до 100 °С.

### **Циркуляційний насос**

Циркуляційний насос є одним із ключових елементів системи водяного опалення, оскільки забезпечує рух теплоносія по замкненому контуру, що сприяє стабільній тепловіддачі та рівномірному прогріванню системи.

Основні переваги:

- просте електричне підключення;
- низький рівень шуму під час роботи;
- високоякісні матеріали виготовлення;
- мінімальне енергоспоживання;
- не потребує окремого захисту електродвигуна;
- широкий діапазон моделей і сфер застосування.

Такі насоси особливо ефективні у системах гарячого водопостачання, де потрібно підтримувати постійну температуру води в контурі.

Для забезпечення циркуляції води у водяному контурі обігріву сушильної камери обрано циркуляційний насос Grundfos UPS 25-20, який поєднує високу ефективність, надійність і низький рівень енергоспоживання, що робить його оптимальним для використання у системах автоматизованого керування процесом сушіння деревини.



Рисунок 3.10 - Циркуляційний насос

### **Особливості та переваги циркуляційного насоса**

Циркуляційні насоси серії Grundfos UPS 25-20 відзначаються високою надійністю, ефективністю та зручністю експлуатації, що робить їх оптимальним вибором для систем опалення та гарячого водопостачання у сушильних установках.

Основні переваги:

- довговічні керамічні підшипники, що забезпечують мінімальне тертя і тривалий ресурс роботи;
- простота монтажу завдяки зручній конструкції;
- вбудоване теплове реле для автоматичного захисту від перевантажень;
- безтехнічне обслуговування, що зменшує експлуатаційні витрати;
- низький рівень шуму під час роботи;
- мінімальне енергоспоживання;
- широкий робочий діапазон параметрів;
- тривалий строк служби навіть у безперервних режимах роботи;
- у однофазному виконанні має вбудований модуль захисту електродвигуна.

Технічні характеристики:

- продуктивність: до 10 м<sup>3</sup>/год;
- напір: до 12 м;
- діапазон температури рідини: від -25 °С до +110 °С;

- максимальний робочий тиск: 10 бар.

### **Вибір мікроконтролера**

Для реалізації функцій автоматизованого керування процесом сушіння деревини обрано мікроконтролер PIC16F877, який забезпечує обробку сигналів від сенсорів, формування керуючих команд для виконавчих пристроїв і відображення даних на інтерфейсі користувача.

PIC16F877 - це 8-розрядний однокристальний FLASH CMOS мікроконтролер, розроблений компанією Microchip Technology Inc. Його популярність обумовлена поєднанням високої продуктивності, низького енергоспоживання та гнучких можливостей конфігурації.

### **Характеристика мікроконтролера PIC16F877**

Мікроконтролер побудований на високошвидкісній RISC-архітектурі, що включає 35 інструкцій, більшість із яких виконуються за один машинний цикл (за винятком команд переходів, які потребують двох циклів). Така структура забезпечує швидке реагування системи на зміни параметрів процесу.

Основні характеристики мікроконтролера PIC16F877 наведено в таблиці 4.6, серед яких:

- обсяг програмної пам'яті типу FLASH;
- обсяг оперативної пам'яті (RAM);
- кількість портів вводу/виводу;
- наявність АЦП із високою роздільною здатністю;
- підтримка послідовних інтерфейсів SPI, I<sup>2</sup>C, USART;
- можливість програмування «в системі» (In-Circuit Serial Programming, ICSP).

Таким чином, PIC16F877 забезпечує надійне керування всіма елементами системи автоматизації - від сенсорів температури та вологості до виконавчих пристроїв (вентиляторів, нагрівачів, насосів), що робить його оптимальним ядром для побудови інтелектуальної системи сушіння деревини.

Таблиця 3.6 - Основні характеристики мікроконтролера PIC16F877

Параметр	Опис, характеристика
Тактова частота	DC - 20МГц
Скидання (затримка скидання)	POR, BOR (PWRT,
FLASH пам'ять програм (14-розрядних слів)	8К
Пам'ять даних (байт)	368
EEPROM пам'ять даних (байт)	256
Переривань	14
Порти вводу/виводу	Порти А,В,С,D,Е
Таймери	3
Модуль захвату/порівняння/ШІМ	2
Модулі послідовного інтерфейсу	MSSP, USART
Модулі паралельного інтерфейсу	PSP
Модуль 10-розрядного АЦП	8 каналів
Інструкцій	35

### **Характеристики та режими роботи мікроконтролера PIC16F877**

Мікроконтролер PIC16F877 має широкий набір функціональних можливостей, які забезпечують його ефективне використання у системах автоматизації технологічних процесів, зокрема у системі керування сушінням деревини. Нижче наведено основні характеристики, режими роботи та периферійні модулі пристрою.

#### **Основні характеристики та режими роботи**

1. Режими адресації: підтримуються *прямий, непрямий і відносний* режими доступу до пам'яті.

2. Скидання при включенні живлення (POR): автоматичне встановлення початкового стану після подачі живлення.

a. Таймери ініціалізації:

b. *PWRT (Power-up Timer)* — забезпечує затримку запуску після включення живлення;

c. *OST (Oscillator Start-up Timer)* — затримує запуск системи до стабілізації генератора.

3. Сторожовий таймер (WDT): має власний RC-генератор та призначений для запобігання зависання програми.

4. Програмований захист пам'яті: дозволяє захистити прошивку від несанкціонованого читання або запису.

5. Режим енергозбереження (SLEEP): переводить систему у стан мінімального споживання енергії.

6. Вибір тактового генератора: підтримуються різні типи генераторів (RC, XT, HS, LP).

7. FLASH/EEPROM технологія: енергоефективна CMOS-структура з можливістю перепрограмування.

8. Повністю статична архітектура: дозволяє зупиняти тактування без втрати даних.

9. Внутрішньосхемне налагодження (ICD): використовує лише два виводи, що полегшує діагностику.

10. Діапазон живлення: від 2.0 В до 5.5 В, що дозволяє застосування у широкому спектрі пристроїв.

11. Підвищена навантажувальна здатність портів введення/виводу: до 25 мА.

**Мале енергоспоживання:**

- < 0.6 мА при 3.0 В, 4.0 МГц;
- 20 мкА при 3.0 В, 32 кГц;
- < 1 мкА у режимі SLEEP.

## **Периферійні модулі**

Таймер 0:

- 8-розрядний таймер/лічильник з програмованим передподільником, який може використовуватись для відліку часу або підрахунку зовнішніх імпульсів.

Таймер 2:

- 8-розрядний таймер/лічильник з передподільником і вихідним дільником, застосовується для генерації частот або періодичних сигналів.

Модулі CCP (Capture/Compare/PWM):

- 16-розрядний режим захоплення (Capture): з максимальною роздільною здатністю 12,5 нс — використовується для точного вимірювання інтервалів часу;

- 16-розрядний режим порівняння (Compare): з роздільною здатністю 200 нс — дозволяє генерувати точні події у часі;

- 10-розрядний режим широтно-імпульсної модуляції (ШІМ): використовується для керування потужністю вентиляторів, нагрівачів чи двигунів.

Таким чином, мікроконтролер PIC16F877 є потужним і надійним рішенням для реалізації системи автоматизованого керування сушильними процесами. Його багатофункціональні апаратні модулі, низьке енергоспоживання та висока швидкодія забезпечують стабільну роботу всієї системи навіть у складних промислових умовах.

## **Периферійні модулі мікроконтролера PIC16F877**

Мікроконтролер PIC16F877 має широкий набір периферійних пристроїв, які забезпечують йому гнучкість та універсальність у використанні в системах автоматизації, зокрема в комплексах контролю й керування процесом сушіння деревини.

Аналого-цифровий перетворювач (АЦП):

- тип: багатоканальний, 10-розрядний.
- призначення: перетворення аналогових сигналів (наприклад, з датчиків температури чи вологості) у цифрові значення для подальшої обробки мікроконтролером.
- особливості: висока точність перетворення та можливість одночасного підключення декількох аналогових каналів.

### **Послідовний синхронний порт MSSP**

Підтримує два основні інтерфейси:

- SPI (Serial Peripheral Interface) - ведучий або відомий режим;
- I<sup>2</sup>C (Inter-Integrated Circuit) - ведучий або відомий режим.
- призначення: обмін даними між мікроконтролером і периферійними пристроями (сенсори, пам'ять, дисплеї тощо).
- перевага: забезпечує швидку та надійну передачу інформації без великої кількості провідників.

### **Послідовний прийомопередатчик USART**

Підтримує синхронний і асинхронний режими роботи.

- може виконувати адресне детектування, що дозволяє ідентифікувати конкретні пристрої у багатоточкових мережах.
- застосування: обмін інформацією між контролером і зовнішнім комп'ютером, модемом або комунікаційними модулями (наприклад, Bluetooth або Wi-Fi).

### **Паралельний порт PSP (Parallel Slave Port)**

Тип: 8-розрядний ведучий порт.

Підтримує сигнали:

- – RD (зчитування),
- – WR (запис),
- – CS (вибір пристрою).

Призначення: обмін паралельними даними з іншими мікропроцесорними або обчислювальними системами.

### Детектор пониженої напруги (BOD):

- використовується для автоматичного скидання системи (BOR) у разі зниження напруги живлення нижче допустимого рівня.
- перевага: забезпечує стабільну роботу мікроконтролера при нестабільному живленні та запобігає збої в роботі програми.

### Електро-технічні характеристики:

- температура зберігання від  $-65^{\circ}\text{C}$  до  $+150^{\circ}\text{C}$ ;
- напруга  $V_{dd}$  відносно  $V_{ss}$  від  $-0.3\text{В}$  до  $+7.5\text{В}$ ;
- напруга  $-MCLR$  відносно  $V_{ss}$  від  $0\text{В}$  до  $+14\text{В}$ ;
- напруга  $RA4$  відносно  $V_{ss}$  від  $0\text{В}$  до  $+8.5\text{В}$ ;
- напруга на інших виводах відносно  $V_{ss}$  від  $-0.3\text{В}$  до  $V_o+0.3\text{В}$ ;
- максимальний струм  $V_{ss}$  300мА;
- максимальний струм  $V_{dd}$  250ма;
- вхідний замикаючий струм  $I_{ik}$  ( $V_i < 0$  або  $V_i > V_{dd}$ )  $\pm 20\text{ма}$ ;
- вихідний замикаючий струм  $I_{ok}$  ( $V_o < 0$  або  $V_o > V_{dd}$ )  $\pm 20\text{ма}$ ;
- максимальний вихідний струм стоку каналу вводу/виводу 25ма;
- максимальний вихідний струм джерела каналу вводу/виводу 25ма;
- максимальний вихідний струм стоку портів вводу /виводу PORTA, PORTB і PORT 200ма.

Максимальний вихідний струм джерела портів вводу /виводу PORTA, PORTB і PORTE 200ма.

Максимальний вихідний струм стоку портів вводу /виводу PORTC і PORTD 200ма.

Максимальний вихідний струм джерела портів вводу /виводу PORTC і PORTD 200ма.

Мікроконтролер PIC16F874/877 випускаються в 40-вивідному корпусі типу: PDIP40 - 600т.

## Конструктивне виконання

Мікроконтролери PIC16F874 / PIC16F877 виготовляються у 40-вивідному корпусі типу PDIP40-600t, що забезпечує зручність монтажу на друкованих платах і сумісність із макетними системами.

Завдяки наявності розвиненої системи периферійних модулів, широкому діапазону електротехнічних параметрів і надійному захисту живлення, PIC16F877 є одним із найоптимальніших варіантів для побудови мікропроцесорних систем керування в автоматизованих установках сушіння деревини.

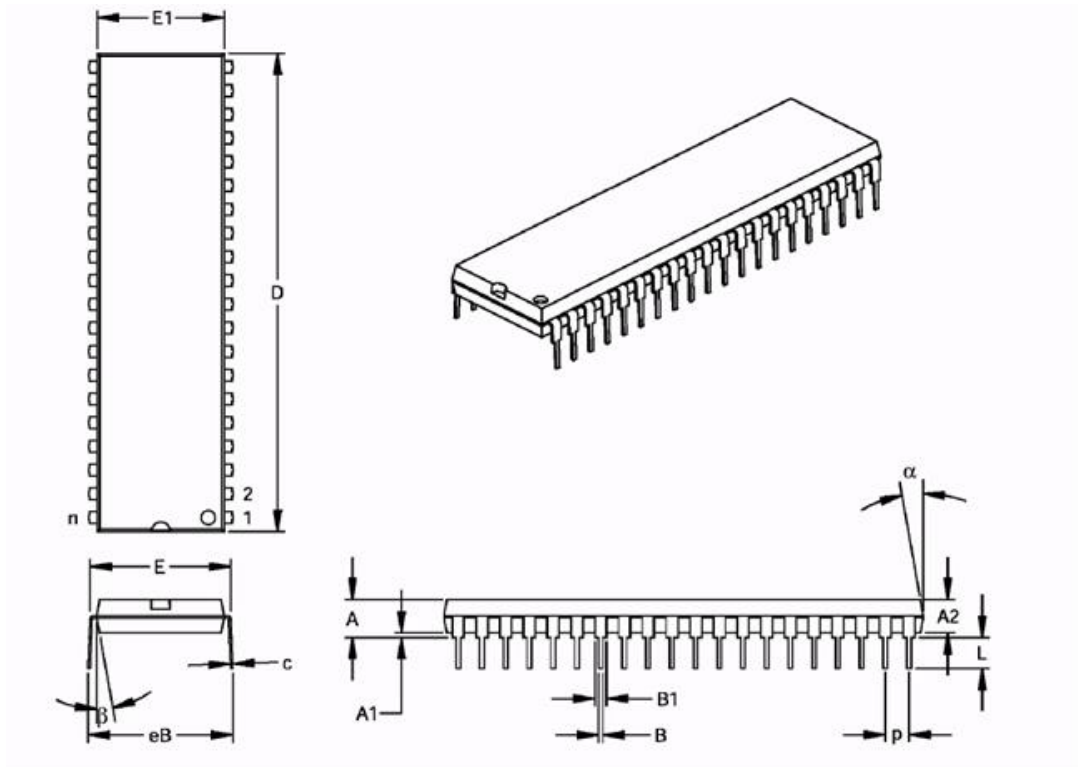


Рисунок 3.11 - Технологічні розміри мікроконтролера PIC16F874/877.

Мікроконтролер PIC16F877 має компактну та ефективну систему команд, побудовану за принципом RISC-архітектури (Reduced Instruction Set Computer), що забезпечує високу швидкодію при мінімальному наборі інструкцій. Кожна

команда має фіксовану довжину та виконується за один машинний цикл, що значно спрощує програмування і прогнозування часу виконання.

Загальна структура команд

Кожна команда мікроконтролера складається з 14-розрядного слова, яке поділяється на:

- `OPCODE` (код операції) - визначає тип виконуваної операції;
- операнд(и) - вказують регістри, біти або константи, з якими виконується операція.

Таким чином, структура інструкцій забезпечує простоту декодування і високу швидкість виконання.

Основні групи команд

Система команд є ортогональною, тобто більшість інструкцій може працювати з будь-якими регістрами, що робить програмування більш гнучким. Всі команди поділяються на три основні групи:

1. Байт-орієнтовані команди. Виконують операції над байтами даних (8-бітними регістрами).

$f$  - покажчик регістра, з яким виконується операція;

$d$  - вказує місце збереження результату:

- якщо  $d = 0$ , результат записується у робочий регістр  $W$ ;
- якщо  $d = 1$ , результат записується назад у регістр  $f$ .

Приклад: `ADDWF f, d` — додати значення робочого регістра  $W$  до регістра  $f$ .

2. Біт-орієнтовані команди. Призначені для роботи з окремими бітами в регістрах.

$b$  - номер біта, який береться до операції;

$f$  - регістр, у якому цей біт розташований. Приклад: `BSF f, b` - встановити (set) певний біт у заданому регістрі.

3. Команди керування та операцій з константами. Виконують переходи, зміни лічильника команд, роботу з літералами або прямими значеннями.

○  $k$  - константа (8 або 11 біт). Приклад: `MOVLW k` - записати константу  $k$  у регістр  $W$ .

### Принцип виконання команд

- Більшість інструкцій виконується за один машинний цикл, тобто за чотири такти генератора.
- Для тактової частоти 4 МГц тривалість одного машинного циклу становить 1 мкс.
- Команди умовного переходу або ті, що змінюють лічильник команд (РС), виконуються за два машинних цикли ( $\approx 2$  мкс). У таких випадках у другому циклі автоматично виконується команда NOP (No Operation).

### Переваги системи команд PIC16F877

- мінімальний, але повний набір інструкцій (усього 35 команд);
- передбачуваний час виконання команд, що важливо для реального часу;
- простота у створенні та налагодженні програм керування;
- ефективна робота з регістрами та портами введення/виведення;
- оптимальна для використання в системах автоматизації, керування пристроями та обробки сигналів.

Система команд мікроконтролера PIC16F877 забезпечує високу швидкодію, компактність програмного коду та простоту реалізації алгоритмів керування, що робить його одним із найефективніших мікроконтролерів для побудови автоматизованих систем, зокрема в технологічних процесах сушіння деревини.

### **Структура та метрологічні характеристики каналів контролю і регулювання**

Система керування містить у своєму складі канали введення та виведення інформації, які забезпечують взаємодію мікроконтролера з зовнішніми датчиками, виконавчими пристроями та іншими елементами системи автоматизації.

#### Вихідні канали

Усі вихідні канали мають дискретний (логічний) характер і призначені для керування виконавчими механізмами, такими як:

- електромагнітні клапани;
- реле та контактори;
- вентилятори;
- нагрівальні елементи (ТЕНи);
- циркуляційні насоси тощо.

Сигнали на виходах формуються у вигляді логічних рівнів, які відповідають станам «0» (вимкнено) та «1» (увімкнено). Це дозволяє мікроконтролеру безпосередньо або через проміжні силові елементи (транзистори, реле, оптрони) здійснювати вмикання та вимикання необхідних пристроїв автоматизації.

#### Вхідні канали

Вхідні канали використовуються для зчитування сигналів від датчиків, що відображають поточний стан технологічного процесу — температуру, вологість, тиск, положення клапанів тощо. Інформація надходить у цифровому або аналоговому вигляді й обробляється мікроконтролером за допомогою вбудованого АЦП або цифрових входів.

#### Призначення каналів

- забезпечення обміну інформацією між контролером і об'єктом керування;
- реалізація алгоритмів автоматичного регулювання;
- підтримання стабільних параметрів процесу сушіння;
- оперативне реагування на зміни зовнішніх умов або стану системи.

Канали введення/виведення є ключовими елементами системи автоматизації, оскільки саме через них реалізується зв'язок між програмним рівнем керування (мікроконтролером) і фізичними пристроями сушильної установки.

Таблиця 3.7 - Карта сигналів.

N п/п	Назва параметру	Вид сигналу	Одиниця вимірювання	Номінальне значення	Допустиме відхилення
2	Температура в камері, точка 2	Цифровий	°C	0...90	–
3	Температура в камері, точка 3	Цифровий	°C	0...90	–
4	Температура в камері, точка 4	Цифровий	°C	0...90	–
5	Керування двигуном центробіжного вентилятора	Дискретний	В	“0” – +0..1 “1” – +2,5..5	–
6	Вологість в камері, точка 1	Аналоговий	%	0...100	–
7	Вологість в камері, точка 2	Аналоговий	%	0...100	–
8	Вентилювання в сушильній камері	Дискретний	В	“0” – +0..1 “1” – +2,5..5	–
9	Керування циркуляційним насосом	Дискретний	В	“0” – +0..1 “1” – +2,5..5	–
10	Керування вентиляторами вентелявання камери	Дискретний	В	“0” – +0..1 “1” – +2,5..5	–
11	Регулювання температури в камері	Дискретний	В	“0” – +0..1 “1” – +2,5..5	–
12	Вологість дошки в точці 1	Аналоговий	%	5...100	–
13	Вологість дошки в точці 2	Аналоговий	%	5...100	–

### 3.2 Блок-схеми та опис алгоритмів функціонування системи

#### Алгоритм роботи трьохступеневої камерної сушарки

Дослідження поставленої задачі показало, що для розроблення ефективної системи автоматизації необхідно перш за все глибоко розуміти технологічний процес сушіння деревини у трьохступеновому камерному режимі.

На основі аналізу поведінки системи, її можливих станів і чинників, які впливають на зміну цих станів, було створено алгоритм роботи трьохступеневої сушильної установки.

Блок-схема розробленого алгоритму представлена на відповідних слайдах і відображає взаємодію всіх підсистем - нагріву, вентиляції, контролю температури та вологості.

### **Загальний принцип роботи системи**

У результаті впливу зовнішніх і внутрішніх факторів система формує на дискретних вихідних каналах логічні сигнали високого або низького рівня, що відповідають командам вмикання або вимикання відповідних пристроїв автоматизації.

Таким чином, мікроконтролер здійснює автоматичне керування процесом сушіння, змінюючи стани системи відповідно до поточних параметрів середовища.

Початковий стан - "Повна зупинка процесу сушіння"

Після завантаження пиломатеріалів у камеру система перебуває в початковому стані повної зупинки. У цьому режимі:

- не працюють повітряний і рідинний контури обігріву;
- електрокалорифер вимкнений;
- вентиляція не здійснюється, клапан закритий;
- витяжний вентилятор зупинений.

Після цього розпочинається прогрів камери з деревиною, тривалість якого визначається з розрахунку 1 година на кожен сантиметр товщини пиломатеріалу.

### **Запуск системи керування**

Після завершення прогріву відбувається ініціалізація мікроконтролерної системи (МКС), яка зчитує дані з датчиків температури та вологості, а також здійснює обмін інформацією з оператором. МКС запитує:

- бажані значення вологості ( $W_{d.c.*}$ ) для кожного ступеня сушіння;

- контрольні значення температури та вологості в камері ( $T_{k.c.}$ ,  $W_{k.c.}$ ).

Після введення оператором цих даних система переходить у режим активного сушіння.

### **Робота системи в межах кожного ступеня сушіння**

Сушіння відбувається поетапно, і для кожного ступеня МКС порівнює поточні дані з контрольними параметрами. Система перебуває на поточному рівні доти, доки виконується умова:

$$W_d < W_{d.c.*},$$

де

- $W_d$  - поточна вологість деревини;
- $W_{d.c.*}$  - бажана вологість для відповідного ступеня сушіння.

Після досягнення граничних значень система автоматично переходить до наступного ступеня.

### **Алгоритм регулювання температури та вологості**

Мікроконтролер отримує від датчиків поточні значення  $T_k$  (температура в камері) та  $W_k$  (вологість повітря) і порівнює їх із заданими для поточного ступеня:

- якщо  $T_k < T_{k.c.*}$ , вмикається електрокалорифер для підігріву повітря;
- якщо  $T_k \geq T_{k.c.*}$ , калорифер вимикається;
- якщо  $W_k < W_{k.c.*}$ , відкривається вентиляційний клапан і запускається витяжний вентилятор для зниження вологості.

Таким чином, система підтримує необхідний мікроклімат у камері відповідно до заданої програми сушіння.

### **Зміна станів і тривалість циклів**

Зі зменшенням вологості деревини змінюється циклічність роботи системи - тривалість вмикання нагріву, вентиляції та пауз між циклами. Це

дозволяє поступово зменшувати інтенсивність процесу, запобігаючи внутрішнім напруженням у матеріалі.

### **Переваги розробленого алгоритму**

Запропонований алгоритм роботи трьохступеневої сушарки пиломатеріалів дозволяє:

- повністю автоматизувати процес сушіння з мінімальним втручанням оператора;
- адаптувати систему до наявних апаратних засобів контролю та збору даних;
- оптимізувати використання ресурсів мікроконтролера, оскільки алгоритм не потребує складних обчислень;
- забезпечити стабільність, точність і повторюваність результатів при сушінні деревини різних порід і товщини.

Розроблений алгоритм трьохступеневої камерної сушарки є ефективною основою для побудови автоматизованої системи керування, що забезпечує контроль температурно-вологісних параметрів, економію енергії та високу якість кінцевого продукту.

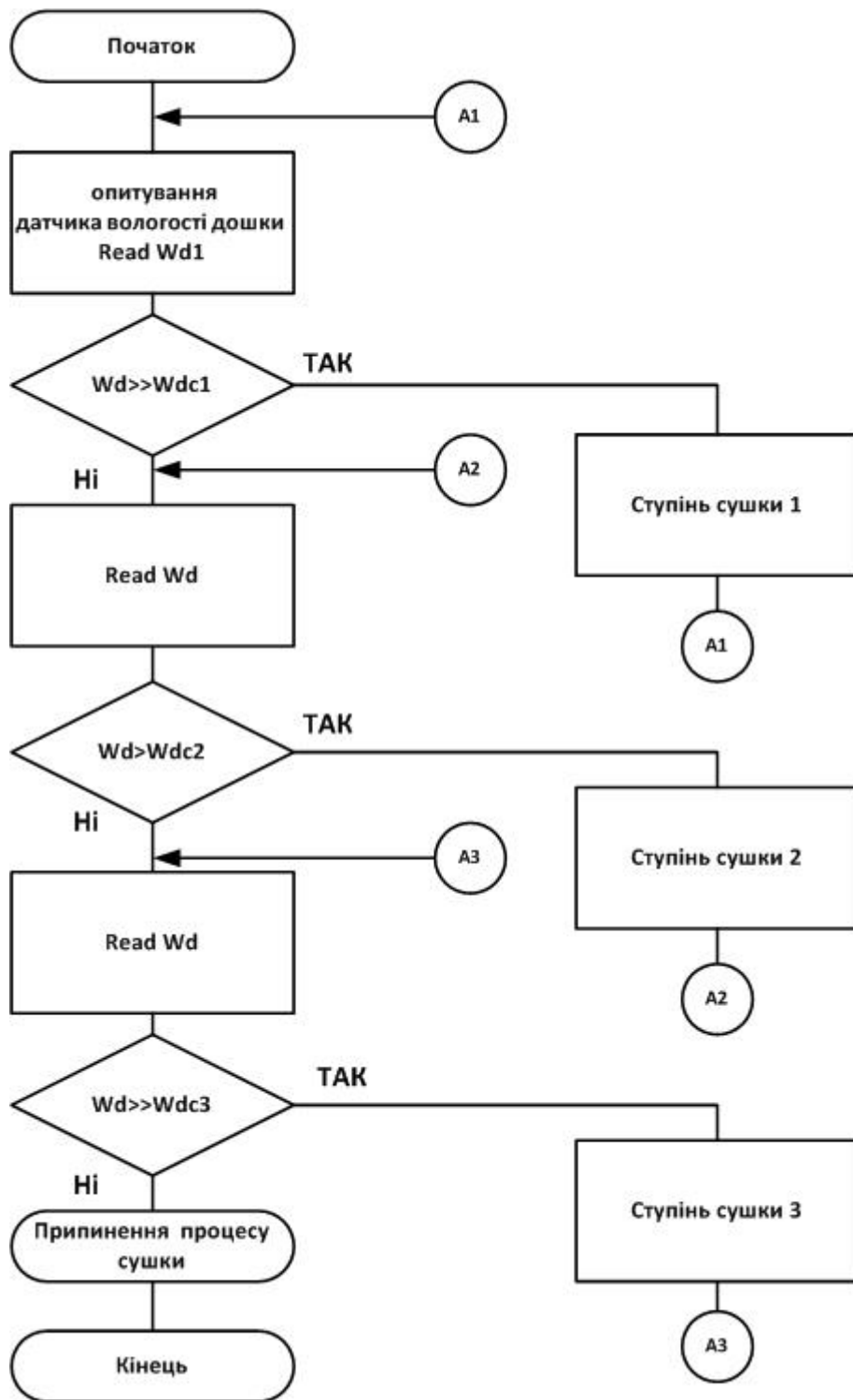


Рисунок 3.12 – Блок-схема алгоритму включення ступеня сушки

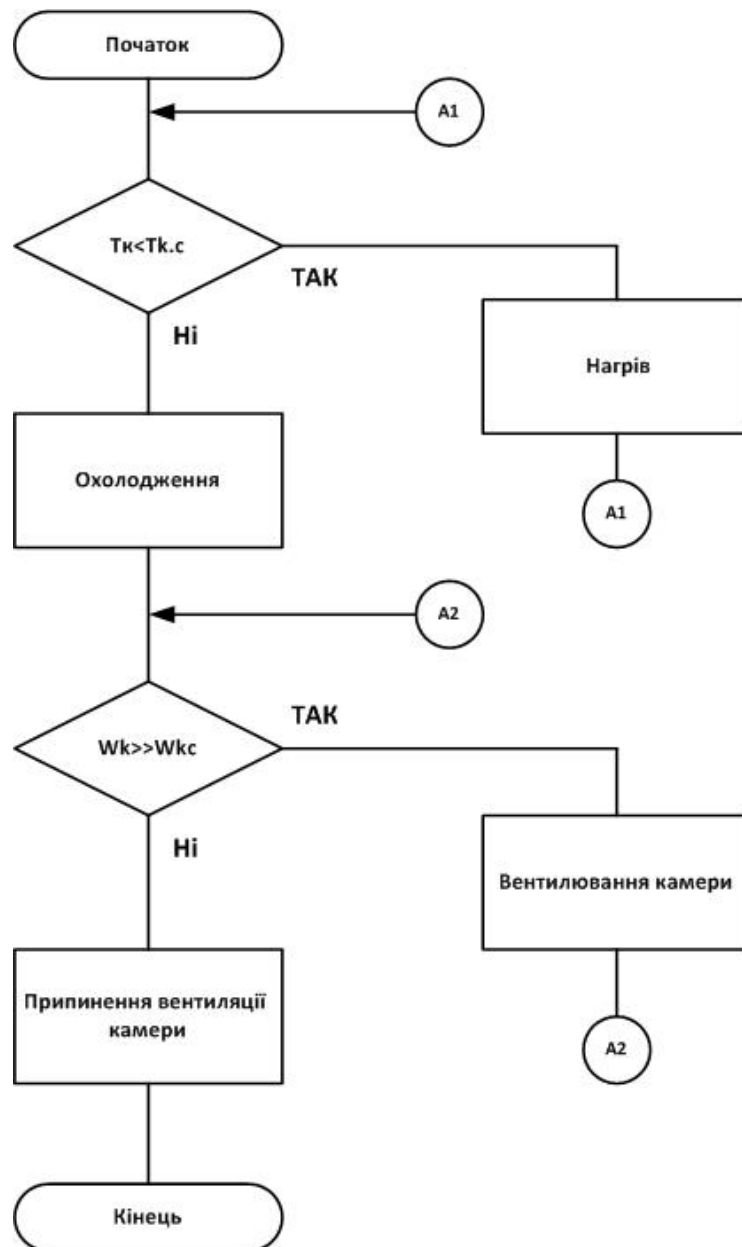


Рисунок 3.13 – Блок-схема алгоритму роботи сушіння деревини

### Розробка програмного забезпечення

Програмний продукт було створено у вигляді настільного віконного застосунку та програмного забезпечення для мікроконтролера, яке реалізовано мовою низького рівня C++. Практичним результатом виконання бакалаврської роботи став розроблений софт - віконний застосунок для керування процесом сушіння деревини.

## Опис функціоналу

Технологія трьохступеневого сушіння потребує постійного контролю ключових параметрів, таких як температура та вологість у вакуумній камері, а також вологість деревини. Керування процесом здійснюється шляхом регулювання подачі нагрітого повітря та вентилявання камери для забезпечення необхідних умов вологості.

У процесі сушіння деревина з природного матеріалу перетворюється на промислову сировину, що відповідає вимогам різних галузей. Зменшення вологості покращує фізико-механічні властивості деревини, запобігає зміні її форми та розмірів, а також підвищує стійкість до грибкових уражень та гниття. Суха деревина легше обробляється та краще склеюється. Тому контроль кінцевої вологості є критично важливою складовою процесу.

Основними цілями сушіння є:

- забезпечення стабільності геометричних параметрів деталей;
- запобігання псуванню та гниттю;
- підвищення питомої міцності;
- забезпечення якісної обробки та склеювання.

Особливості автоматичного регулювання

Основним завданням автоматизації сушіння є стабілізація робочого режиму. Для цього використовуються регулятори, які підтримують задані температурні та вологісні параметри. Тип і настройки регуляторів визначаються з урахуванням характеристик сушильної камери.

Динамічні характеристики системи визначаються або математичними моделями, або експериментально - особливо у випадках, коли отримати рівняння об'єкта складно.

Подальша розробка системи

На наступному етапі було створено вдосконалену схему контролю параметрів сушіння з розробленням відповідного програмного забезпечення для:

- мікропроцесорної схеми керування,
- виконавчих механізмів,

- датчиків,
- а також інтерфейсу керування з ПК.

### **Робота системи**

На початку процесу система перебуває в режимі очікування. Після завантаження деревини та її початкового прогріву оператор задає необхідні параметри сушіння: цільові вологості на кожному етапі, температуру та вологість у камері. Параметри вибираються залежно від породи та товщини пиломатеріалів.

Далі процес працює автоматично.

Алгоритм керування

- якщо вологість деревини  $W_d > W_{d.c.1}$ , працює перша ступінь сушіння.
- при досягненні максимального допустимого температурного порогу вимикається нагрів.
- якщо вологість у камері  $W_k > W_{k.c. (*)}$ , вимикається витяжний вентилятор і відкривається вентиляційна заслінка.
- ці цикли повторюються до виконання умов переходу на наступну ступінь.

У системі передбачено два типи регулювання температури:

- грубе - за допомогою рідинного та повітряного контурів,
- точне - за допомогою електрокалорифера, керованого мікроконтролером.

На екран виводяться поточні значення:

- вологості деревини,
- температури в камері,
- вологості повітря в камері.

При зменшенні вологості у камері нижче заданої межі система зупиняє витяжку та закриває заслінку, щоб уникнути внутрішніх напружень і деформацій.

## **Завершення етапів сушіння**

Коли деревина досягає цільової вологості для певного ступеня, контролер сповіщає оператора та очікує підтвердження переходу на наступний етап. Після досягнення кінцевої вологості процес автоматично завершується, і контролер виводить сигнал про завершення сушіння.

## **Програмування авторизації користувача**

Авторизація у системі здійснюється шляхом введення користувачем власних облікових даних - логіна та пароля.

### **Алгоритм роботи механізму авторизації**

1. Введення облікових даних. Користувач вводить свій логін та пароль у відповідні поля форми.

2. Перевірка коректності введення. Система перевіряє, чи всі необхідні поля заповнені та чи не містять вони недопустимих значень.

3. Верифікація користувача у базі даних. На цьому етапі проводиться пошук облікового запису у базі даних та звірення введених даних із тими, що збережені у системі. Це є розгалуженим етапом алгоритму, оскільки можливі різні сценарії:

- користувача знайдено і дані збігаються;
- користувача не знайдено;
- пароль неправильний;
- обліковий запис заблоковано тощо.

4. Вхід до особистого кабінету. У разі успішного підтвердження даних здійснюється авторизація та відкривається персональний профіль користувача.

### **5. Пояснення до розгалуженої гілки алгоритму**

Розгалуження означає, що подальший хід подій залежить від результатів перевірки авторизаційних даних: система або допускає користувача до особистого кабінету, або виводить відповідне повідомлення про помилку.

### **6. Програмний код**

Повний код розробленого застосунку для ПК наведено в додатку. Функція `login_form()` відповідає за ініціалізацію процесу авторизації. Вона

виконуються під час запуску веб-додатку, відображає форму входу та містить посилання на реєстрацію нового користувача.

```
<a href='register_new.php'>Не зареєстровані-??</a>
```

Файл *register\_new.php*, на який веде гіперпосилання, забезпечує можливість реєстрації нового користувача в системі.

```
<?
require_once('function.php');
do_html_header();
?>
<h1>Реєстрація нового користувача.h1>
<?
display_registration_form();
do_html_footer();
?>
```

Файл *register\_new.php* містить функцію *display\_registration\_form*, яка відповідає за відображення діалогового вікна реєстрації нового користувача, а також стандартну структуру вебсторінки, описану в попередньому розділі. У цьому файлі також підключається головний функціональний модуль веб-застосунку - *function.php*.

Функція *display\_registration\_form* формує та надсилає дані, заповнені користувачем у полях форми, до файлу *add\_user.php*. Програмний код файлу *add\_user.php* наведено у лістингу додатку.

Якщо введені дані задовольняють усі встановлені вимоги, у файлі *add\_user.php* викликається функція *register*, яка здійснює запис нового користувача до бази даних. Для кращого розуміння роботи функції *register*, нижче подано її програмний код.

```
function register($name,$password){db_connect();
mysql_select_db("user");
$zaput="select * from register where username='$name' " ;
$result=mysql_query($zaput);
if(mysql_num_rows($result)>0){echo "Таке ім'я вже існує в базі даних
";exit; }
$zaput="insert into register (username,password,status)
values('".$name."','".$password."','".$0')";
$result=mysql_query($zaput);
if(!$result){echo"Помилка запису даних";}
```

## 4.2 Захист розробленого програмного забезпечення

Для захисту облікових даних користувачів на вебсайті застосовується криптографічний алгоритм `bcrypt`.

`Bcrypt` - це адаптивна криптографічна хеш-функція, призначена для безпечного зберігання паролів. Її розробив Нільс Провос, а вперше алгоритм був представлений на конференції USENIX у 1999 році. Основою `bcrypt` є шифр Blowfish, проте для підвищення криптостійкості під час формування ключа використано модифікований алгоритм підготовки ключів.

Однією з ключових особливостей `bcrypt` є використання `salt`, що забезпечує захист від атак із застосуванням райдужних таблиць. Крім того, алгоритм є адаптивним: час обчислення хешу легко змінюється шляхом коригування кількості раундів, що дозволяє ускладнити атаки методом перебору.

Шифр Blowfish має складну процедуру генерації ключів. Провос використав цю властивість, модифікувавши алгоритм підготовки ключів і створивши варіант Eksblowfish (expensive key schedule Blowfish). Кількість раундів при цьому повинна бути ступенем двійки, а конкретне значення визначається під час використання `bcrypt`.

Першу реалізацію `bcrypt` було інтегровано у функцію `crypt` операційної системи OpenBSD. На сьогодні існують реалізації для багатьох мов програмування, зокрема: Java, Python, Nim, C#, Ruby, Perl, PHP (починаючи з версії 5.3), Node.js та інших.

Алгоритм `bcrypt` використовує механізм підготовки ключів Eksblowfish і працює за наступним принципом:

```
EksBlowfishSetup(cost, salt, key)
    state
  initState()
    state
  ExpandKey(state, salt, key)
    repeat (2cost)
      state
  ExpandKey(state, 0, key)
```

```

state
ExpandKey(state, 0, salt)
return state
ExpandKey(state, salt, key)
for(n = 1..18)
    Pn

```

Функція *InitState* відповідає за ініціалізацію, аналогічну до початкової процедури в алгоритмі Blowfish. На цьому етапі масив P та S-бок заповнюються значеннями, отриманими з дробової частини певного числа.  $\{\pi\}$   $\pi$ .

Функція ExpandKey:

```

key[32(n-1)..32n-1]
\oplus Pn //treat the key as cyclic
ctext

```

```

Encrypt(salt[0..63])

```

```

P1

```

```

ctext[0..31]

```

```

P2

```

```

ctext[32..63]

```

```

for(n = 2..9)

```

```

    ctext

```

```

Encrypt(ctext

```

salt[64(n-1)..64n-1) //encrypt using the current key schedule and treat the salt as cyclic

```

    P2n-1)

```

```

ctext[0..31]

```

```

    P2n

```

```

ctext[32..63]

```

```

for(i = 1..4)

```

```

    for(n = 0..127)

```

```

        ctext

```

```

Encrypt(ctext
salt[64(n-1)..64n-1]) //as above
    Si[2n]
ctext[0..31]
    Si[2n+1]
ctext[32..63]
return state

```

Для формування хешу алгоритм `bcrypt` опрацьовує вхідні дані аналогічно процедурі шифрування за схемою «`eksblowfish` (посилений\_ключ, `input`)»  
`bcrypt(cost, salt, key, input)`

```

state
EksBlowfishSetup(cost, salt, key)
ctext
input
repeat (64)
    ctext
EncryptECB(state, ctext)
return Concatenate(cost, salt, ctext)

```

У різних операційних системах (Linux, OpenBSD), де алгоритм `bcrypt` використовується у стандартній функції `crypt(3)`, як вхідні дані застосовується константний рядок «`OrpheanBeholderScryDoubt`». Алгоритм `bcrypt` був створений у 1999 році та на той час забезпечував надійний захист від апаратного перебору. Однак із поширенням ПЛІС стало можливим виконувати обчислення `bcrypt` значно швидше, що знизило його стійкість до сучасних апаратних атак.

У відповідь на ці виклики у 2009 році був запропонований алгоритм `scrypt`, який для своєї роботи потребує великих обсягів пам'яті, що ускладнює реалізацію ефективних атак на апаратному рівні.

## **4. ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМИ В ПРОМИСЛОВУ ЕКСПЛУАТАЦІЮ**

### **Обслуговування сушарки та встановлення програмного забезпечення**

Технічне обслуговування сушарної установки та встановлення необхідного програмного забезпечення можуть виконувати один електротехнік та один програміст (за сумісництвом). До їх основних обов'язків належать:

- ведення технічної документації, яка включає: апаратний журнал, журнал заяв про несправності та журнал обліку роботи системи;
- проведення повної перевірки монтажу, якості з'єднань, стан ізоляційних матеріалів і блокувань (раз на шість місяців) спільно з ремонтно-профілактичною бригадою;
- забезпечення цілодобового чергування ЕТУС, яке виконується черговими електромонтерами зв'язку ремонтно-відбудовчої бригади у складі до двох осіб;
- виконання вимірювально-налагоджувальних та регулювальних робіт у виробничій лабораторії або спеціальній вимірювальній групі (штат - до двох осіб);
- здійснення поточного обслуговування обладнання, яке включає:
  - заміну пошкоджених плавких запобіжників;
  - контроль роботи ліній та виявлення несправних каналів;
  - контроль відновлення роботи апаратури, що сигналізується світловими індикаторами;
- визначення під час аварії несправного напрямку передачі або ділянки системи та своєчасний виклик аварійно-обслуговуючої групи.

### **Техніка безпеки**

Під час монтажу, налагодження та експлуатації обладнання необхідно суворо дотримуватися вимог, викладених у таких нормативних документах:

- «Правила техніки безпеки при устаткуванні й обслуговуванні телефонних і телеграфних станцій», К., «Радіо і зв'язок», 2000 р.;
- «Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів» та «Правила техніки безпеки при експлуатації електроустановок споживачів», К., «Енергоатом», 1996 р.;
- «Правила техніки безпеки при роботі на лініях зв'язку і провідного мовлення», К., «Зв'язок», 1999 р.

До роботи з кінцевим обладнанням та проміжними станціями допускається технічний персонал, який:

- добре знає правила, зазначені в п.1 цієї інструкції;
- володіє знаннями щодо конструкції апаратури;
- ознайомлений з «Інструкцією з експлуатації БКІУ1.131.001 ІЕ»;
- має кваліфікаційну групу з техніки безпеки не нижче третьої.

Під час грози забороняється виконувати будь-які роботи з апаратурою.

Усі вимірювальні прилади, які використовуються при роботах із кінцевим устаткуванням та проміжними станціями, повинні бути перевірені та мати дійсне калібрувальне клеймо. Використовувані дроти не повинні мати пошкоджень ізоляції.

### **Пошук несправностей**

Виявлення та локалізація несправностей під час ремонту будь-якого пристрою є найбільш трудомістким і відповідальним етапом. Для визначення несправності необхідно знайти елемент, вузол або модуль, що вийшов з ладу.

Процес ремонту умовно поділяється на чотири основні етапи:

- встановлення факту наявності несправності;
- визначення характеру несправності;
- усунення несправності;
- перевірка роботи пристрою після ремонту.

Згідно зі статистичними даними, на виявлення факту несправності витрачається близько 3% загального часу ремонту, на встановлення її характеру - приблизно 60%, безпосереднє усунення займає 15%, а фінальна перевірка

пристрою - 22%. Ці показники демонструють, що основним резервом скорочення часу ремонту є оптимізація етапу визначення характеру несправності, чого можна досягти за допомогою діагностичного обладнання та спеціальних індикаторних пристроїв (наприклад, світлодіодних індикаторів).

Фахівець, зокрема технік-електронік, повинен добре знати принципову схему і конструктивні особливості пристрою, а також володіти методиками пошуку несправностей.

### **Види несправностей**

Усі несправності радіоелектронних пристроїв поділяються на:

Механічні. Це порушення у механічних елементах пристрою. У контексті даного обладнання до таких несправностей належать:

- вихід з ладу перемикачів,
- пошкодження механічних елементів блоку індикації або блоку введення параметрів.

Електричні. Це несправності, що змінюють електричний опір або цілісність ланцюгів, зокрема:

- обрив провідників;
- коротке замикання;
- критичне зниження або підвищення опору;
- вихід з ладу резисторів, конденсаторів, мікросхем тощо.

### **Методи пошуку несправностей**

У практиці ремонту застосовують п'ять основних методів. Цей метод дозволяє виявити більшість механічних та частину електричних несправностей. Під час огляду перевіряють:

- якість монтажу;
- надійність кріплення перемикачів, резисторів, роз'ємів;
- стан ізоляції проводів;
- якість паяних з'єднань;
- наявність сторонніх предметів у корпусі;
- зовнішні дефекти компонентів (нагрів, обвуглення, зміна кольору).

У включеному стані додатково можна визначити:

- перегрів трансформаторів, конденсаторів, напівпровідників;
- характерні запахи перегрітих елементів;
- зміну звукового фону трансформаторів.

Для перевірки відсутності коротких замикань використовують омметр. При підозрі на несправність елемент випаюють і тестують окремо.

### **Метод проміжних вимірювань**

Суть полягає в послідовному контролі проходження сигналу від одного блока до іншого, що дозволяє локалізувати дефектну ділянку.

Метод виключення. Полягає у тимчасовому відключенні завідомо справних вузлів для ізоляції несправної частини схеми.

Метод заміни. Передбачає заміну підозрілих елементів або навіть цілих модулів на справні аналоги. Ефективний для транзисторів, мікросхем, трансформаторів.

Метод порівняння. Оцінюються параметри несправного пристрою відносно справного з такою ж моделлю та схемотехнікою.

### **Алгоритм пошуку несправностей**

Пошук проводять послідовно — від великих конструктивних одиниць до дрібних елементів:

Блок → Вузол → Каскад → Елемент

Перевірка окремих елементів.

Резистори

- оглядають зовні на наявність потемнінь або обвуглення.
- перевіряють омметром — значення має відповідати номіналу.

Конденсатори

- неелектролітичні перевіряються омметром: при пробі прилад показує КЗ.

- для перевірки обирають множник  $\times 100$  або  $\times 1000$ .
- при справному конденсаторі стрілка відхиляється і швидко повертається на « $\infty$ ».

- у електролітичних повернення стрілки повільніше.
- При заміні враховують:
- номінальну ємність;
- робочу напругу;
- клас точності;
- температурний коефіцієнт (ТКЄ).

#### Трансформатори

- при обриві обмотки омметр показує нескінченний опір.
- під час заміни враховують маркування виводів згідно з довідниками.

## ВИСНОВКИ

У даній кваліфікаційній магістерській роботі мною було створено автоматизовану систему керування процесом сушіння деревини із застосуванням мікроконтролерних засобів та розробленого програмного забезпечення для візуалізації та управління перебігом сушіння.

У межах роботи також спроектовано та розроблено такі схеми:

- функціональна схема;
- схема зовнішніх з'єднань;
- принципова електрична схема;
- схема монтажу електронних компонентів.

Запроектована мікроконтролерна система на базі сучасного мікроконтролера PIC16F877 забезпечує збір основних технологічних параметрів роботи сушарки та регулювання процесу згідно із наперед визначеною програмою. Для керування процесом використано принцип двопозиційного регулювання.

Для точного збору технологічних параметрів застосовано високоякісні сучасні датчики температури та вологості повітря в камері, а також вологості деревини. Це дозволяє швидко та точно реагувати на зміну стану об'єкта автоматизації. Автоматизація процесу значно покращила точність вимірювання температури - цифрові датчики передають дані безпосередньо мікроконтролеру, що забезпечує високу швидкість та точність їх обробки.

Створена система, побудована на базі сучасних технічних засобів та комплексу датчиків збору параметрів, дозволяє здійснювати сушіння різних порід деревини за наперед визначеними програмами з високою гнучкістю налаштувань. Передбачена також можливість адаптації програмних режимів залежно від специфічних вимог, що виникають під час сушіння різних матеріалів.

Особливо варто відзначити, що використані датчики мають широкий діапазон вимірювань та високу точність, що забезпечує якісне керування процесом і покращену якість кінцевої продукції - чого практично неможливо досягти при використанні застарілих засобів контролю та ручному втручанні оператора.

У цілому розроблене програмне забезпечення підтверджує доцільність та ефективність прийнятих технічних рішень і повністю відповідає вимогам технічного завдання. Створена система має потенціал для подальшого розвитку та впровадження в різних галузях промисловості.

**У ході виконання роботи отримано такі результати:**

- розроблено та обґрунтовано алгоритм автоматизованого керування триступеневим процесом сушіння деревини у камерній сушарці гібридного типу, який забезпечує оптимальне регулювання температури, вологості та швидкості циркуляції повітря, що позитивно впливає на якість сушіння;

- визначено переваги гібридного методу сушіння, що поєднує конвекційний і радіаційний впливи, завдяки чому підвищується енергоефективність процесу та забезпечується рівномірне сушіння деревини різних порід;

- створено математичну модель процесу сушіння, яка описує взаємозв'язок між основними технологічними параметрами (температура, вологість, швидкість повітряного потоку) та якісними показниками готової продукції;

- запропоновано адаптивну систему керування сушінням, що враховує зміну фізико-хімічних властивостей деревини у процесі обробки та дозволяє динамічно коригувати параметри роботи сушарки в режимі реального часу;

- розроблено програмне забезпечення для автоматизованого моніторингу та управління процесом сушіння, яке забезпечує налаштування режимів роботи сушарки, контроль технологічних параметрів та наочну візуалізацію даних для оператора.

Експериментальними дослідженнями підтверджено ефективність створеної системи, зокрема:

- зменшення тривалості сушіння на 20–25%;
- зниження енергоспоживання на 15–18%;
- збереження фізико-механічних характеристик деревини без появи дефектів, спричинених нерівномірним висушуванням.

Запропонована методика може бути успішно застосована у деревообробній промисловості для підвищення якості продукції, економії ресурсів та подальшого розвитку автоматизованих систем керування технологічними процесами.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Саліхов М.М. Самокеровані автомобілі та системи їх навігації// Навч. посібник / В. Є. Бахрушин. – Запоріжжя: КПУ, 2011. – 268 с
2. Кузнецов Ю.М., Луців І.В., Дубиняк С.Г. Теорія технічних систем. - К.: Тернопіль, 1998.-310с.
3. Стеклов В.К. Проектування систем автоматичного керування. - К.:Вища школа,1995.-231 с.
4. Мигаль В. Д. Інтелектуальні системи в технічній експлуатації автомобілів: монографія. Х.: Майдан, 2018. 262 с.
5. Романенко В.Д. Методи автоматизації прогресивних технологій.- К.:Вища школа,1995.-519 с.
6. Рудик А. В. Наукові основи та принципи побудови приладової системи.
7. Koval V., Adamiv O., Proc. of the Third IEEE International Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS'2005). – Sofia (Bulgaria). – 2005. – P. 120- 124.
8. Зайцев Г.Ф., Стеклов В.К., Бріцький О.І. Теорія автоматичного управління. – К.: Техніка, 2002. – 688 с.
9. Довідник по автоматизації с/г виробництва //За ред. І.І. Мартиненка.- К.:Урожай,1985.-212 с.
10. Мигаль В. Д. Інтелектуальні системи в технічній експлуатації автомобілів: монографія. Х.: Майдан, 2018. 262 с.
11. Попович М.Г., Ковальчук О.В. Теорія автоматичного керування: Підручник. – 2-ге вид., – К.: Либідь, 2007. - 656 с.
12. Автоматизація технологічних процесів і виробництв харчової промисловості: Підручник/ Ладанюк А.П.,Трегуб В.Г., Ельперін І.В., Цюцюра В.Д. – К.: Аграрна освіта, 2001 – 224 с.

13. Навігаційні системи [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. Спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / С.Л. Лакоза; КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. — 80 с
14. Simulink Documentation [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/simulink>.
15. Жидецький В. Ц. Основи охорони праці : підруч. Львів : Афіша, 2005. 350 с.
16. Гогіташвілі Г. Г., Лапін В. М. Основи охорони праці : навч. посіб. 3-є вид., стереотипн. Львів : «Новий Світ – 2000». 2006. 232 с.
17. Босов Є. П., Жесан Р. В., Каліч В. М., Голик О. П., Зубенко В. О. Охорона праці при проектуванні систем автоматизації виробництва : навч. посіб. 2-е вид., перероб. і доп. Кропивницький : ЦНТУ, 2022. 208 с.
18. Конституція України. Київ : Андронум, 2020. 60 с.
19. Про охорону праці : Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/2694-12#Text> (дата звернення: 21.10.2024).
20. Основи законодавства України про охорону здоров'я : Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2801-12#Text> (дата звернення 03.11.2024).
21. Про систему громадського здоров'я : Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2573-20#n840> (дата звернення 03.11.2024).
22. Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку : Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/39/95-%D0%B2%D1%80> (дата звернення 29.10.2024).
23. Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування : Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1105-14> (дата звернення 24.10.2024).
24. Кодекс цивільного захисту України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/5403-17#Text> (дата звернення: 17.11.2024).
25. Кодекс законів про працю України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/322-08#Text> (дата звернення: 07.10.2024).

26. Правила улаштування електроустановок : вид. офіц. Київ : Міненерговугілля України, 2017. 617 с.

27. Вікіпедія. Вільна енциклопедія : веб-сайт. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/> (дата звернення: 31.09.2024).

28. Жидецький В. Ц., Джигирей В. С., Сторожук В. М., Туряб Л. В., Лико Х. І. Практикум з охорони праці. Львів : Афіша, 2000. 352 с.

29. Іванов В. Г., Дзюндзюк Б. В., Олександров Ю. М. Охорона праці в електроустановках : навч. посіб. / за ред. В. Г. Іванова. Київ : Око, 1994. 226 с.