

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Інститут (факультет) автоматизації і комп'ютерних систем
Кафедра автоматизації та комп'ютерних технологій систем управління

«До захисту в ЕК»

«До захисту допущено»

Директор інституту(декан факультету) Завідувач кафедри

_____ Андрій ФОРСЮК _____
(підпис) (ім'я та прізвище)
«__» _____ 2024 р.

_____ Ярослав СМІТЮХ _____
(підпис) (прізвище та ініціали)
«__» _____ 2024 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА

з спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
(шифр та назва напрямку підготовки (спеціальності))

освітньо-професійної програми: Комп'ютерні технології та програмування в автоматизованих системах управління

на тему: Автоматизована система управління технологічним процесом сушіння деревини з використанням методів нечіткої логіки

Виконав: здобувач 2 курсу, групи ІА-2-2М

_____ Пономарьов Олег Дмитрович _____
(прізвище, ім'я та по батькові повністю)

_____ (підпис)

Керівник Клименко Олег Миколайович
(прізвище, ім'я та по батькові повністю)

_____ (підпис)

Консультанти _____
(прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

_____ (прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Рецензент _____
(прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Засвідчую, що в цій кваліфікаційній роботі немає запозичень із праць інших авторів без відповідних посилань.

Здобувач _____
(підпис)

Київ – 2024 р.

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Факультет Автоматизації і комп'ютерних систем

Кафедра Автоматизації та комп'ютерних технологій систем управління

Освітній ступінь магістр

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

Освітньо-професійна програма «Комп'ютерні технології та програмування в автоматизованих системах управління»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

Ярослав СМІТЮХ

" " _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

Пономарьова Олега Дмитровича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Автоматизована система управління технологічним процесом сушіння деревини з використанням методів нечіткої логіки

керівник роботи к.т.н. доц. Клименко О.М.

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

затверджені наказом закладу вищої освіти від “19” грудня 2023 року №1006-КС.

2. Строк подання здобувачем роботи “12” лютого 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи

Короткі відомості про об'єкт автоматизації, відомості про умови експлуатації об'єкта автоматизації та вимоги до системи автоматизації. Матеріали переддипломної практики.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Розділ 1. Аналіз технологічного об'єкту автоматизації та існуючих АСК. Розділ

2. Загальносистемні рішення. Розділ 3. Вибір засобів автоматизації. Розділ 4.

Розробка інтелектуальної системи управління процесу сушіння деревини з використанням методів нечіткої логіки

5. Перелік графічного матеріалу

1. Схема автоматизації. 2. Схема функціональної структури. 3. Структурна схема.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів виконання кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Видача та затвердження завдання</i>	<i>Перед</i>	
2	<i>Розділ 1. Аналіз технології та існуючих АСК технологічним об'єктом</i>	<i>Захист переддипломної практики</i>	
3	<i>Розділ 2. Розробка структурної схеми комплексу технічних засобів</i>	<i>3 тиждень</i>	
4	<i>Розділ 3. Вибір засобів автоматизації</i>	<i>5 тиждень</i>	
6	<i>Розділ 4. Розробка інтелектуальної системи управління процесу сушіння деревини з використанням методів нечіткої логіки</i>	<i>7 тиждень</i>	
		<i>11 тиждень</i>	

Здобувач _____
(підпис)

Олег ПОНОМАРЬОВ

Керівник роботи _____
(підпис)

Олег КЛИМЕНКО

Анотація

У кваліфікаційній роботі розглядається актуальне питання вдосконалення процесу сушіння деревини та зниження енерговитрат цих технологій, зокрема за допомогою автоматизованих систем керування, що ґрунтуються на сучасних інформаційних технологіях. Для врахування невизначеностей вхідних параметрів та впливових факторів був використаний апарат нечіткого моделювання. Для завершення роботи було необхідно отримати відсутні функціональні залежності між вологостю деревини та часом сушіння від температури обігріву та рівноважної вологості повітря в сушильній камері на основі нечіткого виводу, що було головною метою цього дослідження. Методологічно, робота ґрунтується на теорії сушіння, науці про дерево, регулюванні математичного та нечіткого моделювання, а для перевірки адекватності запропонованої нечіткої моделі використовувалися методи математичної статистики та теорії експерименту.

Результатами проведеного дослідження є отримані зв'язки між часом сушіння і вологості деревини в залежності від температури обігріву та рівноважної вологості повітря в сушильній камері. Ці зв'язки були синтезовані з використанням інструментів нечіткої логіки у пакеті програм Matlab.

Науковий новаторський внесок дослідження проявляється у створенні моделей процесу сушіння на основі нечіткого моделювання. Практичне застосування результатів полягає у можливості розробки інтелектуальної системи автоматичного управління процесом сушіння деревини.

Ключові слова— сушіння деревини; вологості деревини; рівноважна вологость повітря; нечітке моделювання; нечіткий вивід.

Annotation

This qualifying job explores the significant challenge of improving wood drying processes while simultaneously reducing energy consumption, primarily through the use of automated control systems based on modern information technologies. To address uncertainties in input parameters and influencing factors, the study employs fuzzy modeling techniques. The main objective is to establish missing functional relationships between wood moisture content, drying time, heating temperature, and equilibrium air humidity in the drying chamber, utilizing fuzzy output. The research methodology draws from drying theory, wood science, mathematical and fuzzy modeling, and employs statistical and experimental methods to assess the adequacy of the proposed fuzzy model.

The research outcomes consist of derived correlations between drying time, wood moisture content, heating temperature, and equilibrium air humidity in the drying chamber, synthesized using the Fuzzy Logic Toolbox in the Matlab application.

The scientific innovation of this research lies in the development of drying process models based on fuzzy modeling techniques. The practical significance of these findings is the potential to create an intelligent system for automated control of lumber drying processes.

Keywords— wood drying; wood moisture; equilibrium air humidity; fuzzy modeling; fuzzy output.

Зміст

Вступ.....	7
Розділ 1. Аналіз технологічного об'єкту автоматизації та існуючих АСК.....	8
1.1. Аналіз технологічного об'єкту автоматизації	8
1.2. Аналіз існуючих АСК технологічним об'єктом.....	11
1.2.1 Огляд автоматизованих систем контролю	11
1.2.2 Значення АСК у процесі сушіння деревини.....	11
1.2.3 Мета та завдання аналізу.....	11
1.2.4 Огляд технологічного процесу сушіння деревини.....	12
1.2.5 Традиційні АСК для сушіння деревини.....	13
1.2.6 Невизначеність та складнощі в управлінні процесом сушіння деревини.....	14
1.2.7 Застосування нечіткої логіки в АСК.....	15
1.2.8 Аналіз і порівняння існуючих нечітких АСК для сушіння деревини	16
Постановка задачі кваліфікаційної роботи магістра.....	19
Розділ 2. Загальносистемні рішення.....	20
2.1. Загальний опис об'єкту та системи	20
2.2. Функціональна структура системи.....	22
2.3. Опис функцій, що автоматизуються.....	24
2.4. Структурна схема комплексу технічних засобів.....	25
2.5. Опис інформаційного забезпечення АСУ виробництва та основного відділення	29
2.6 Аналіз технологічного процесу сушіння деревини у вакуумній камері з використанням нечіткої логіки.	30
2.7 Функціональні завдання керування з використанням нечіткої логіки.....	30
2.8 Опис контурів керування з використанням методів нечіткої логіки.....	31
2.8.1 Вакуумний контур з нечіткою логікою	31
2.8.2 Нагрівальний контур із застосуванням нечіткої логіки	32
2.8.3 Охолоджувальний контур з використанням нечіткої логіки	33
2.8.4 Контур виведення конденсату з інтеграцією нечіткої логіки.....	33
2.9 Безпека та сигналізація з застосуванням нечіткої логіки	35
Розділ 3. Вибір засобів автоматизації.....	35
3.1 Вибір датчиків в рамках системи з нечіткою логікою.....	35
3.2 Вибір виконавчих механізмів та допоміжних пристроїв.....	42
Розділ 4. Розробка інтелектуальної системи управління процесу сушіння деревини з використанням методів нечіткої логіки	53
4.1. Побудова інтелектуальної системи управління.....	53
Висновки	66
Список використаних джерел	67

Вступ

У контексті глобальної проблеми підвищення ефективності використання енергії в лісовій промисловості, автори раніше розглядали сушіння деревини як один із найбільш енергоємних процесів у лісовому галузі. Вони продемонстрували, що цей процес може бути найбільш ефективно покращено за допомогою автоматичного управління на основі нечіткої логіки. Для досягнення цієї мети необхідно розробити відповідні нечіткі моделі. Ця концепція обґрунтована результатами аналізу досліджень процесу сушіння, ідентифікації невизначеностей у параметрах процесу і чіткого формулювання завдання нечіткого моделювання основних параметрів процесу. Формалізація невизначеностей дозволяє вирішити це завдання, тому метою цих досліджень було розробити моделі інтелектуальної системи управління процесом сушіння деревини на основі апарату нечіткого моделювання.

У роботі передбачено виконання наступних завдань:

1. Враховуючи результати формалізації невизначеності у поточних дослідженнях, визначення нечітких функцій належності для вхідних і вихідних змінних задачі (зведення до нечіткості).
2. Розробка бази правил для нечітких продуктів.
3. Синтез нечіткої моделі залежностей вологості і часу сушіння від вхідних параметрів за допомогою інструменту Fuzzy Logic Toolbox в Matlab.

Розділ 1. Аналіз технологічного об'єкту автоматизації та існуючих АСК

1.1. Аналіз технологічного об'єкту автоматизації

Аналіз теорії щодо сушіння деревини показує, що отримати достатньо повну та адекватну модель управління процесом сушіння деревини за допомогою традиційних статистичних методів, головним чином через умови невизначеності вхідних параметрів процесу, є неможливим. Зазначено, що такі проблеми слід вирішувати на основі теорії нечітких множин та її застосувань, зокрема нечіткої логіки і нечіткого моделювання. У цьому контексті слід відзначити новий напрямок у наукових дослідженнях – з'явлення випадків застосування теорії нечітких множин для дослідження та розробки автоматичного управління сушильним обладнанням. Наприклад, м'які обчислення використовувалися для аналізу параметрів теплопередачі та масопередачі, швидкості випаровування вологи, ефективності сушіння та температури навколишнього повітря у сонячних сушильних камерах. Зазначено, що математичні моделі були створені в системі MATLAB і в цьому випадку виявилися досить адекватними.

У роботі наводиться спроба розробити нечіткий контролер для управління потужністю сонячної сушильної камери.

У вітчизняних і зарубіжних виданнях широко розглядається тема застосування теорії нечітких множин у проблемах моделювання різних процесів. Приклади практичного використання ТНМ ретельно розглядаються в іноземному виданні. У ньому наведено теоретичну основу нечіткого моделювання та опис роботи у комп'ютерній програмі FuzzyTECH.

Однією з фундаментальних робіт, яка має як теоретичне, так і практичне значення для нечіткого моделювання, є дослідження професора А. Пегата з Університету Варшави. За думкою провідних експертів, "це виняткова книга, яка майже не має собі рівних в існуючій літературі".

При оцінці технічного стану будівельних бетонних конструкцій автори Штовба С., Роцтейн А., Панкевич О. запропонували використовувати нечітку логіку.

Розділ системи обчислювальної математики MATLAB, де подається досить докладна теоретична частина щодо створення систем нечіткого моделювання, має велике практичне значення для розробників. В ньому наведено приклади, які дозволяють аналогічно створювати моделі об'єктів будь-якого характеру.

Слід зазначити професора Заде Л.А. та його учня та послідовника Коско Б., авторів Мамдані Е.Х., Такагі Т., Сугено М. як творців і авторів численних прикладних методів нечіткого моделювання.

У галузі нечіткого моделювання існує велика публікаційна активність. Відомі роботи щодо розробки математичного апарату для врахування нечіткості, невизначеності та інших аспектів цього поняття, а також численні прикладні дослідження в різних технічних, гуманітарних галузях, у праві, економіці та медичних науках.

Підсумовуючи огляд, можна зробити основні висновки у контексті поточних досліджень.

1. Результати існуючих досліджень не повністю вирішують проблему автоматичного управління процесом сушіння деревини, головним чином через невизначеності в даних технологічного процесу.
2. Питання дослідження процесів сушіння деревини на основі нечіткого моделювання раніше не розглядались.
3. Для практичної реалізації нечітких моделей головним чином використовується система обчислювальної математики MATLAB, яка надається за допомогою програми Fuzzy Logic Toolbox, спеціально розробленої для цієї цілі.

1. Підготовка деревини до сушіння:
 - Аналіз вихідного матеріалу: Вивчення породи дерева, вимірювання початкової вологості, визначення фізико-механічних властивостей.
 - Обробка перед сушінням: Очищення, видалення кори, розпилення на бруски або дошки відповідно до потрібних розмірів. Також можна розглянути попередню обробку деревини (наприклад, замочування або термічну обробку) для покращення властивостей кінцевого продукту.
2. Проектування та налаштування системи управління сушінням:
 - Розробка алгоритмів на основі нечіткої логіки: Моделювання процесу сушіння з урахуванням різних факторів (тип деревини, початкова вологість, бажана кінцева вологість).
 - Автоматизація системи управління: Встановлення датчиків для моніторингу параметрів сушіння (температура, вологість, швидкість повітряного потоку) та інтеграція з системою управління на основі нечіткої логіки.
3. Прямий процес сушіння:
 - Регулювання параметрів: Налаштування оптимальних умов сушіння залежно від типу та стану деревини.
 - Моніторинг і корекція процесу: Постійний контроль за процесом сушіння, автоматична корекція параметрів відповідно до даних датчиків та алгоритмів нечіткої логіки.
4. Контроль якості та завершення процесу сушіння:
 - Перевірка якості деревини: Оцінка рівномірності сушіння, вимірювання кінцевої вологості, перевірка на наявність тріщин або інших дефектів.
 - Охолодження та акліматизація: Поступове зниження температури в сушильній камері для запобігання термічному шоку деревини.
5. Післясушильна обробка та підготовка до використання або зберігання:
 - Додаткова обробка: Нанесення захисних покриттів, антисептична обробка, шліфування поверхні за необхідності.
 - Упаковка та логістика: Підготовка деревини до транспортування або подальшого використання, упаковка для захисту від зовнішніх впливів.

- б. Аналіз даних та оптимізація процесу:
- Збір і аналіз даних: Аналіз даних, отриманих під час сушіння, для оцінки ефективності процесу та якості кінцевого продукту.
 - Покращення алгоритмів: Модифікація алгоритмів на основі отриманих даних для оптимізації майбутніх процесів сушіння.

1.2. Аналіз існуючих АСК технологічним об'єктом

1.2.1 Огляд автоматизованих систем контролю

Автоматизовані системи контролю (АСК) є невід'ємною частиною сучасних виробничих процесів. Вони включають у себе різноманітні технології: від простих сенсорів до складних систем управління на основі нечіткої логіки та штучного інтелекту. У контексті сушіння деревини, АСК дозволяють точно контролювати температуру, вологість, час сушіння, а також адаптувати процес залежно від типу деревини і бажаних характеристик кінцевого продукту.

1.2.2 Значення АСК у процесі сушіння деревини

Сушіння деревини – це складний процес, який вимагає точного регулювання багатьох параметрів. АСК у цьому процесі відіграють ключову роль, забезпечуючи рівномірну якість сушіння, мінімізуючи ризики пошкодження матеріалу та оптимізуючи використання енергії. Застосування нечіткої логіки в АСК дозволяє ефективно обробляти нечіткі та неоднозначні дані, що є характерним для цього процесу, а також підвищити адаптивність системи до змінних умов виробництва.

1.2.3 Мета та завдання аналізу

Ціль аналізу – дослідити ефективність існуючих АСК у контексті сушіння деревини, а також визначити потенціал впровадження методів нечіткої логіки для покращення цих систем. Основні задачі аналізу включають:

- Вивчення сучасних АСК та їх компонентів.
- Оцінка впливу АСК на якість та ефективність процесу сушіння деревини. Аналіз можливостей інтеграції нечіткої логіки в існуючі системи для підвищення їх адаптивності та точності.

- Розробка рекомендацій щодо оптимізації АСК з урахуванням специфіки процесу сушіння деревини.

Цей розділ стане основою для подальшої розробки та впровадження вдосконалених автоматизованих систем управління сушінням деревини, зокрема з використанням методів нечіткої логіки.

1.2.4 Огляд технологічного процесу сушіння деревини

Опис процесу сушіння

Сушіння деревини - це процес видалення вологи з деревини до заданого рівня. Цей процес важливий для забезпечення стабільності розмірів, зменшення ваги та підвищення міцності матеріалу. Сушіння здійснюється шляхом впливу на деревину контрольованого потоку теплого повітря, що сприяє випаровуванню вологи. Процес може відбуватися природним шляхом (на відкритому повітрі) або в спеціальних сушильних камерах, де температура, вологість і циркуляція повітря строго контролюються.

Технічні характеристики та вимоги

Технічні параметри процесу сушіння залежать від виду деревини, її первинної вологості, бажаного кінцевого рівня вологості та розмірів деревини. Основні характеристики включають:

- Температура сушіння: варіюється в залежності від типу деревини.
- Вологість повітря: контроль за вологістю повітря запобігає пересушуванню. Швидкість циркуляції повітря: забезпечує рівномірне видалення вологи.
- Час сушіння: залежить від товщини та вологості деревини.

Проблеми та складності процесу

Процес сушіння деревини має декілька складнощів та потенційних проблем:

- Деформація та розтріскування: нерівномірне видалення вологи може призвести до деформації та тріщин у деревині.
- Температурні стреси: надмірно висока або низька температура може пошкодити структуру деревини.

- Потреба в точному контролі: необхідність строгого дотримання параметрів процесу для досягнення оптимальних результатів.
- Енерговитратність: сушіння є енерговитратним процесом, що вимагає оптимізації для економії ресурсів.

Управління цими викликами вимагає інтеграції точних і гнучких систем контролю, зокрема з використанням методів нечіткої логіки для адаптації до змінних умов процесу.

1.2.5 Традиційні АСК для сушіння деревини

Опис традиційних систем контролю

Традиційні автоматизовані системи контролю (АСК) для сушіння деревини складаються з різних сенсорів та регуляторів, які вимірюють та контролюють основні параметри процесу, такі як температура, вологість повітря, та швидкість циркуляції повітря в сушильній камері. Вони можуть бути оснащені ручними або напівавтоматичними системами управління, де оператор періодично вносить корективи в налаштування системи на основі отриманих даних.

Принципи їх роботи

Традиційні АСК працюють за принципом зворотного зв'язку: сенсори надсилають дані про поточні умови в сушильній камері до центрального контролера. На основі цих даних система регулює роботу нагрівачів, вентиляторів та інших елементів системи для підтримання заданих параметрів сушіння. Однак, ці системи часто вимагають втручання оператора для точного налаштування параметрів, особливо у випадку зміни умов або особливостей сушення різних видів деревини.

Переваги та недоліки:

Переваги:

- Простота у використанні: більшість традиційних систем легко зрозуміти та налаштувати.
- Надійність: мають порівняно просту конструкцію, що зменшує ймовірність поломок.
- Доступність: зазвичай дешевші в порівнянні з більш складними системами.

Недоліки:

- Обмежена гнучкість: традиційні системи часто не можуть автоматично адаптуватися до різних типів деревини або зміни умов.
- Залежність від оператора: потребують постійного моніторингу та втручання людини для оптимального управління.
- Обмежені можливості оптимізації: не так ефективні у мінімізації енергоспоживання та оптимізації часу сушіння.

З огляду на ці фактори, розвиток та впровадження більш передових АСК, зокрема з використанням нечіткої логіки, може значно покращити ефективність та гнучкість процесу сушіння деревини.

1.2.6 Невизначеність та складнощі в управлінні процесом сушіння деревини

Аналіз факторів невизначеності

- Невизначеність у процесі сушіння деревини виникає з кількох причин:
Варіативність видів деревини: Різні види деревини мають різні фізичні та хімічні властивості, що впливають на процес сушіння. Наприклад, щільність, вміст смол, та початкова вологість можуть істотно варіюватися.
- Початкова вологість: Вологість деревини перед сушінням може сильно коливатися в залежності від умов зберігання та пори року, що вимагає різних налаштувань сушіння.

- Розмір і форма матеріалу: Різні розміри та форми деревини вимагають індивідуального підходу до сушіння, адже вони впливають на рівномірність видалення вологи.
- Змінні умови навколишнього середовища: Зміни в температурі, вологості та інших умовах зовнішнього середовища можуть впливати на процес сушіння.

Вплив на якість та ефективність процесу

Ці фактори невизначеності впливають на якість та ефективність процесу сушіння деревини:

- Якість продукції: Невідповідні параметри сушіння можуть призвести до тріщин, деформацій, або нерівномірного висихання деревини, що знижує якість готового продукту.
- Ефективність енергоспоживання: Без точного управління процесом, сушіння може стати надто енерговитратним, особливо якщо потрібно виправляти неправильно встановлені параметри.
- Час сушіння: Невизначеність може призвести до збільшення часу сушіння, що зменшує загальну продуктивність та ефективність процесу.

Для мінімізації цих проблем можна використовувати більш складні системи управління, зокрема ті, що базуються на методах нечіткої логіки. Такі системи можуть краще адаптуватися до змінних умов і компенсувати фактори невизначеності, забезпечуючи оптимальне управління процесом сушіння.

1.2.7 Застосування нечіткої логіки в АСК

Основи нечіткої логіки

Нечітка логіка - це форма багатозначної логіки, яка відрізняється від традиційної бінарної логіки (істина/неправда) тим, що дозволяє проміжні ступені істинності. У контексті АСК, нечітка логіка використовується для моделювання неоднозначних і невизначених ситуацій, де входні дані можуть бути нечіткими або не повністю визначеними. Це досягається за допомогою так званих нечітких множин та правил, які дозволяють системі приймати рішення на основі неточних або нечітких даних.

Переваги застосування нечіткої логіки в АСК

- **Гнучкість:** Нечітка логіка дозволяє системі краще адаптуватися до мінливих умов та обробляти нечітку інформацію.
- **Точність у прийнятті рішень:** У процесах, де існує висока невизначеність або варіативність умов, таких як сушіння деревини, нечітка логіка може покращити точність управління, зменшуючи ризики неправильного вибору параметрів.
- **Здатність до моделювання складних процесів:** Нечітка логіка забезпечує краще розуміння та моделювання складних процесів, які важко описати за допомогою традиційних методів.

Приклади досліджень і розробок

- **Системи управління сушінням деревини:** Використання нечіткої логіки для оптимізації параметрів сушіння деревини, таких як температура, вологість, та час сушіння, залежно від виду деревини та її вихідних характеристик.
- **Дослідження університетів та наукових інститутів:** Багато академічних досліджень фокусуються на розробці нечітких моделей управління для різних промислових процесів, включаючи сушіння деревини.
- **Промислове впровадження:** Деякі компанії вже використовують нечіткі системи управління в своїх сушильних комплексах для підвищення ефективності та якості продукції.

В цілому, застосування нечіткої логіки в автоматизованих системах контролю відкриває нові можливості для підвищення ефективності та якості управління складними виробничими процесами, такими як сушіння деревини.

1.2.8 Аналіз і порівняння існуючих нечітких АСК для сушіння деревини

Аналізуючи і порівнюючи нечіткі автоматизовані системи контролю (АСК) для сушіння деревини, важливо врахувати кілька ключових аспектів:

1. Алгоритми та Методологія

- Різні підходи до моделювання: Деякі системи можуть використовувати стандартні нечіткі контролери, в той час як інші інтегрують складніші методи, такі як адаптивні алгоритми або гібридні системи з елементами машинного навчання.
- Специфіка обробки даних: Різні системи можуть мати відмінності у способах обробки вхідних даних, наприклад, в залежності від точності сенсорів та швидкості обробки інформації.

2. Функціональність та Ефективність

- Точність контролю параметрів сушіння: Деякі системи можуть бути більш точними в підтримці оптимальних умов сушіння, що впливає на якість кінцевого продукту.
- Енергоефективність: Важливим фактором є спосіб, яким система оптимізує споживання енергії, зокрема через адаптивне управління нагрівальними елементами та вентиляцією.

3. Адаптивність і Гнучкість

- Здатність до адаптації під різні умови: Системи можуть відрізнитися за ступенем адаптивності до різних типів деревини та умов сушіння. Можливість налаштування та інтеграції: Важливо, наскільки легко систему можна інтегрувати з існуючими виробничими процесами та налаштувати під специфічні вимоги.

4. Порівняння Конкретних Систем

- Відмінності в реалізації: Наприклад, одна система може використовувати простіші нечіткі правила, тоді як інша включає складні алгоритми, які дозволяють більш точно моделювати процес сушіння.
- Відгуки користувачів та практичні результати: Реальні відгуки від підприємств, які вже використовують ці системи, можуть надати важливу інформацію про їхню ефективність та надійність.

Узагальнюючи, нечіткі АСК для сушіння деревини можуть істотно відрізнитися за своїми характеристиками та ефективністю. Тому при їх аналізі та порівнянні важливо звернути увагу на конкретні потреби та умови виробництва, а також на специфіку використовуваних технологій.

Нові напрямки та інновації в АСК

Огляд недавніх інновацій та досліджень . Останнім часом у розвитку автоматизованих систем контролю (АСК) спостерігається значний поступ, зокрема завдяки інтеграції новітніх технологій:

- Інтеграція Інтернету Речей (IoT): Використання сенсорів IoT для збору даних у реальному часі значно покращує точність та оперативність контролю процесів. Це дозволяє здійснювати більш точний моніторинг умов в сушильних камерах. Застосування штучного інтелекту (ШІ) та машинного навчання: ШІ може аналізувати великі обсяги даних, виявляючи складні закономірності та оптимізуючи параметри процесів. Наприклад, можливе прогнозування оптимального часу сушіння на основі історичних даних.
- Розширений моніторинг за допомогою дронів та робототехніки: У деяких дослідженнях розглядається можливість використання дронів для інспекції великих партій деревини, що дозволяє оперативно виявляти проблемні області.

Потенціал використання передових технологій

- Штучний інтелект та машинне навчання: Ці технології мають великий потенціал у точному прогнозуванні оптимальних параметрів сушіння для різних видів деревини. Це може допомогти в автоматичному адаптуванні процесів сушіння до змінних умов без втручання оператора.
- Застосування біг дата аналітики: Аналіз великих даних дозволяє виявляти тенденції та патерни, які не завжди очевидні при традиційному аналізі. Це може включати оптимізацію енергоспоживання, часу сушіння та загальної якості обробки деревини.
- Розумні алгоритми оптимізації: Використання алгоритмів, які можуть самонавчатися та адаптуватися, забезпечує більш ефективне та гнучке управління процесами.

- Автоматизація та робототехніка: Автоматизація через роботизовані системи може покращити ефективність робочих процесів, зокрема в контексті завантаження та розвантаження матеріалів.

У сукупності, ці інновації відкривають нові можливості для покращення автоматизованих систем контролю у промисловості сушіння деревини, роблячи процеси більш ефективними, точними та економічно вигідними.

Постановка задачі кваліфікаційної роботи магістра

Мета роботи: Розробка та аналіз ефективності автоматизованої системи управління процесом сушіння деревини, яка використовує алгоритми нечіткої логіки для оптимізації параметрів сушіння та підвищення якості кінцевого продукту

Задачі роботи:

1. Теоретичний аналіз: Вивчення існуючих методів та систем автоматизованого управління процесом сушіння деревини. Аналіз особливостей та вимог до процесу сушіння в різних умовах виробництва.
2. Дослідження нечіткої логіки: Аналіз принципів нечіткої логіки та її придатності для управління процесом сушіння деревини.
3. Розгляд потенційних переваг і обмежень застосування нечіткої логіки в даній області. Розробка системи: Проектування архітектури автоматизованої системи управління, включаючи вибір сенсорів, актуатор

Розділ 2. Загальносистемні рішення

2.1. Загальний опис об'єкту та системи

Об'єкт автоматизації – це технологічний процес сушіння деревини, який вимагає високого рівня контролю та регулювання для забезпечення якості та ефективності виробництва. Автоматизована система контролю розроблена з метою оптимізації цього процесу, зокрема шляхом використання сучасних інформаційних та керуючих технологій.

На прикріпленій схемі представлено функціональну структуру системи, яка розділена на три основні рівні:

0-й Рівень: Польові Засоби

Цей рівень включає в себе датчики та виконавчі пристрої (ДВ та ДТ), які безпосередньо взаємодіють з технологічним обладнанням. Датчики збирають інформацію про поточні параметри процесу, такі як температура та вологість, тоді як виконавчі пристрої забезпечують фізичне регулювання умов у сушильних камерах.

1-й Рівень: Контролери

На цьому рівні контролери (КНЛ) обробляють дані, отримані від польових засобів. Вони виконують аналіз часу сушіння, контролюють вирівнювання та коригування параметрів процесу, а також здійснюють автоматичне або напіваавтоматичне управління на основі заданих алгоритмів та налаштувань.

2-й Рівень: SCADA HMI

Центральний вузол на цьому рівні – це система SCADA з панеллю управління. Вона дозволяє операторам візуалізувати та моніторити стан процесу сушіння, а також вносити зміни у параметри контролю та регулювання. SCADA надає можливість оперативного втручання в процес та оптимізації роботи обладнання.

3-й Рівень: Управління Виробництвом

На найвищому рівні знаходиться Центральний Офіс, де здійснюється стратегічне планування, звітність та аналітика. Цей рівень забезпечує інтеграцію даних з системи SCADA для вищого керівництва, дозволяючи вони оцінювати ефективність виробництва та приймати рішення щодо можливих поліпшень.

Система як цілісність спрямована на автоматизацію процесу сушіння деревини, забезпечуючи високу якість кінцевої продукції та оптимізацію енергоспоживання. Вона використовує передові технології для адаптації до змінних умов виробництва та підвищення загальної ефективності процесу.

Опис позначень та їх найменування, що використовувалися при розробці схеми функціональної структури автоматизованої системи управління процесом сушіння вказані в таблиці 2.1.

Позначення	Найменування
Корпус камери	Корпус сушильної камери
ТЕН	Теплоелектронагрівачі (ТЕН)
СУ	Система управління (СУ) сушильної камери
ПК	Управляючий комп'ютер
УП	Напруга живлення ТЕН
КМ	Контактор КМ
ХТ	Сигнал управління ТЕН
УС	Істочник живлення КМ
ПЧ	Преобразувач частоти (ПЧ)
ХУ	Сигнал управління ПЧ
РТ	Регулятор температури (РТ)
РВ	Регулятор вологості (РВ)
УТ	Сигнал від датчика температури (УТ)
УВ	Сигнал від датчика вологості (УВ)
РН	Регулятор напору (РН)
УН	Сигнал від датчика напору (УН)
Тз	Задана температура (Тз)
Вз	Задана вологість (Вз)
Вз	Заданий напір (Вз)
МСТ10	Службова програма "МСТ10" для візуалізації та фіксації параметрів процесу сушки.

Таблиця 2.1 Опис позначень та їх найменування

2.3. Опис функцій, що автоматизуються

Опис функцій, які автоматизуються, та використані при розробці схеми функціональної структури автоматизованої системи управління процесом сушіння деревини вказані в таблиці 2.2.

Позиція	Найменування функції сигналу	Джерело/ Приймач	Читання / Запис	Діапазон	Періодичність	Примітка
C1.1	Моніторинг температури	Датчик Темп. з нечіткою лог.	R	0-120 °C	1с	Температура камери
C1.2	Моніторинг вологості	Датчик Волог. з нечіткою лог.	R	0-100%	1с	Вологість у камері
C1.3	Контроль тиску у камері	Датчик Тиску з нечіткою лог.	R	0.5-2 бар	1с	Тиск у камері
C1.4	Керування швидкістю вентилятора	Контролер Швидк. Вент.	R/W	0-3000 об/хв	0.5с	Вентиляція камери
C1.5	Регуляція нагріву	ТЕН з нечіткою логікою	R/W	-	по потребі	Регулювання температури
C1.6	Контроль вихідного клапана	Вихідний Клапан	R/W	Відкрито/ Закрито	по запиту	Вихід вологого повітря
C1.7	Контроль вхідного клапана	Вхідний Клапан	R/W	Відкрито/ Закрито	по запиту	Вхід сухого повітря
C1.8	Моніторинг стану стопки	Стопка	R	-	10с	Стан деревини
C1.9	Керування двигуном	Двигун ПЧ	R/W	-	по потребі	Керування процесом сушіння
C1.10	Контроль нечітких контролерів	Нечіткі Контролери	R	-	2с	Система керування

Таблиця 2.2 Опис функцій, які автоматизуються

2.4. Структурна схема комплексу технічних засобів

Деревина є енергоємним об'єктом із розподіленими параметрами та складною структурою через розміри, неоднорідність і пористість. Це викликає проблеми під час процесу сушіння, оскільки потрібно швидко висушувати без дефектів та з ефективним використанням енергії. Через велику кількість ресурсів, які витрачаються на нагрівання, зазвичай постає завдання розробки енергоефективного алгоритму сушіння з зазначеною якістю та оптимальним часом.

Для досягнення енергозбереження у процесі сушіння деревини потрібно виконати певні підготовчі заходи. Це включає в себе зрубку деревини, подальший подрібнення на дошки з вказаною довжиною та фарбування поперечних зрізів. Після цього деревину сортують залежно від її вологості і завантажують у сушильну камеру.

Процес сушіння деревини можна поділити на три етапи: нагрівання матеріалу, стабілізацію сушіння при вказаній температурі та період рівномірного зниження температури сушіння. Після завершення останнього етапу сушіння вважається завершеним, і всі виконавчі механізми вимикаються. Для організації процесу сушіння необхідно ввести параметри технологічного процесу об'єкта сушіння та виконавчих пристроїв, перелік яких подано нижче:

- Товщина дошки.
- Середня температура сушіння деревини, T_{set} .
- Швидкість набору температури.
- Температура відключення котла, T_{off} .
- Температура включення котла, T_{on} .
- Вологість включення вакуумного насоса, W_{on} .
- Вологість вимикання вакуумного насоса, W_{off} .
- Температура, при якій відключається вакуумний насос і сушіння вважається завершеним, T_{end} .
- Аварійна температура завершення, T_{Alarm} .
- Час, протягом якого вологість залишається незмінною, t_{const} .

- Поправочні коефіцієнти калібрування датчиків вологості, W, температури агента сушіння, T1, T2.
- Час відкриття та час закриття клапана t_{valve}.
- Кількість вентиляторів циркуляції (від 1 до 4).
- Час затримки послідовного пуску вентиляторів.
- Час напрацювання вентиляторів до зупинки.
- Тип припливно-витяжної вентиляції: використання вентиляторів або шиберних заслінок.
- Вибір схеми підігріву: електричний, водяний, змішаний.

Автоматизована система управління повинна мати можливість переключення в ручний режим управління сушінням, який передбачає операторське втручання у процес. Важливо враховувати критичні та аварійні ситуації під час створення автоматизованої системи

Перелік вхідних-вихідних сигналів сушильної камери

№ з/п	Назва	Позначення
1	2	3
<i>Дискретні вхідні сигнали</i>		
1	ТЕН включений	DI
2	Вакуумний насос увімкнений	DI
3	Циркуляційний насос увімкнений	DI
4	Нижній рівень конденсату	DI
5	Верхній рівень конденсату	DI
6	Кнопка «Старт»	DI
7	Кнопка «Стоп»	DI
8	Кнопка «Аварія»	DI
9	Стан витяжного вентилятора	DI
10	Стан припливного вентилятора	DI
11	Стан вентилятора циркуляції 1	DI
12	Стан вентилятора циркуляції 2	DI
13	Стан вентилятора циркуляції 3	DI
14	Стан вентилятора циркуляції 4	DI
15	Стан насоса відкачування конденсату	DI
<i>Аналогові вхідні сигнали</i>		
1	Температура теплоносія на вході в сушильну камеру	AI
2	Температура теплоносія на виході з камери	AI
3	Температура всередині камери 1	AI
4	Температура всередині камери 2	AI
5	Вологість агента сушіння	AI

1	2	3
<i>Дискретні вихідні сигнали</i>		
1	Включення циркуляційного насоса теплоносія	DO
2	Включення тена електродкотла	DO
3	Включення вакуумного насоса	DO
4	Включення насоса відкачування конденсату	DO
5	Включення відсічного клапана К1	DO
6	Включення відсічного клапана К2	DO
7	Увімкнення витяжного вентилятора	DO
8	Лампа «Стоп»	DO
9	Лампа «Аварія»	DO
10	Лампа «Сушка завершена»	DO
11	Увімкнення вентилятора циркуляції 1	DO
12	Увімкнення вентилятора циркуляції 2	DO
13	Увімкнення вентилятора циркуляції 3	DO
14	Увімкнення вентилятора циркуляції 4	DO
15	Увімкнення припливного вентилятора	DO

Таблиця 2.3

У загальному є 15 цифрових і 5 аналогових вхідних сигналів, а також 15 цифрових вихідних сигналів. На основі цього списку обираються відповідні датчики та пристрої, і проводиться розробка необхідного обладнання.

Наприклад, температурні параметри, такі як температура теплоносія на вході в сушильну камеру, температура теплоносія на виході з камери і температура всередині камери, повинні бути вимірювані в діапазоні від 0 до 100 градусів Цельсія під час процесу сушіння. Для цього можна використовувати датчик температури РТ100 з діапазоном вимірювання від 60 до 250 градусів Цельсія. Щодо вологості деревини під час сушіння, її діапазон становить від 4 до 80 відсотків. Для виміру вологості може використовуватися датчик з діапазоном від 2 до 90 відсотків.

Автоматизована система керування, яка була розроблена, показана на рисунку 2.2.

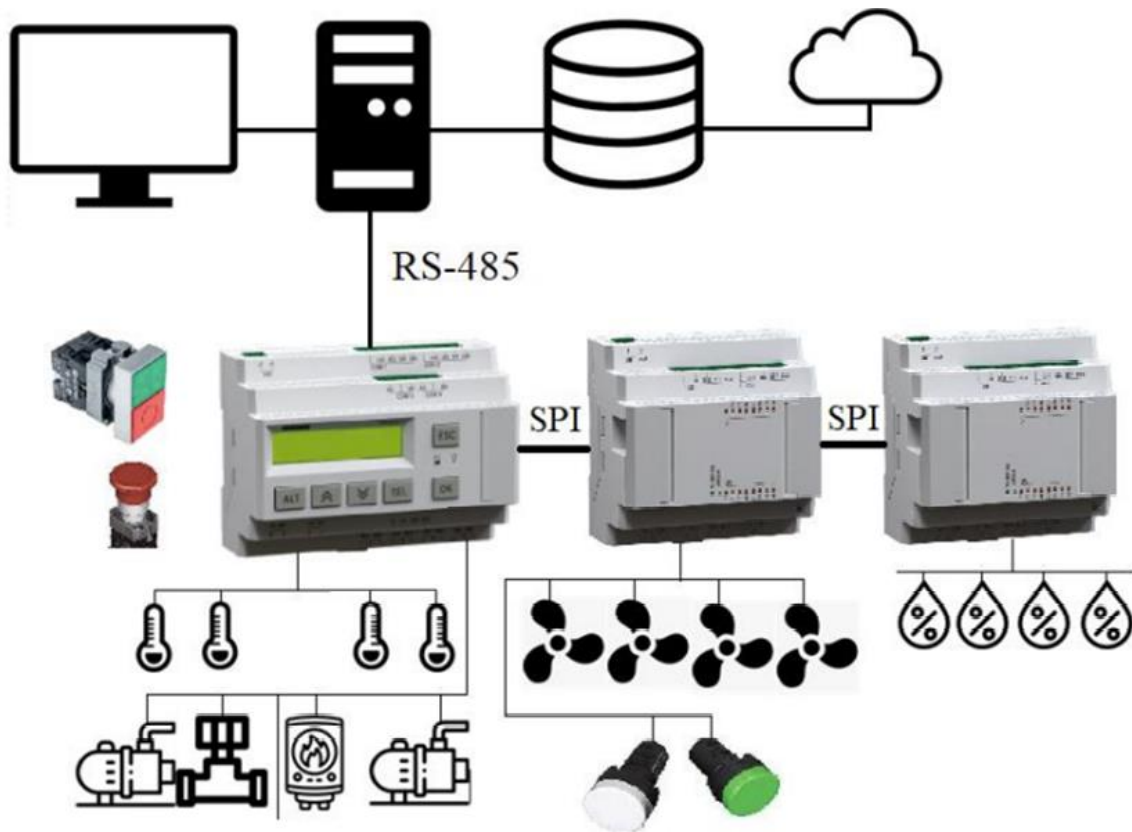


Рисунок 2.2 Структурна схема автоматизації сушильної камери

Висновки та перспективи подальших досліджень: Проблема з енергозбереженням під час сушіння деревини лишається актуальною. Після аналізу наявних джерел стало очевидним, що потрібно розробити нові алгоритми та провести тестування та впровадження існуючих методів у системи автоматизованого управління.

Описано алгоритми функціонування сушильної камери, виділено різні режими роботи, такі як ручний, автоматизований і аварійний.

Після аналізу об'єкта керування був складений перелік вхідних та вихідних сигналів, який включає 15 цифрових та 5 аналогових вхідних сигналів, а також 15 цифрових вихідних сигналів. Цей перелік був використаний для синтезу необхідного обладнання для побудови системи управління.

Була розроблена структурна схема підключення, яка може бути використана для створення функціональної схеми та схеми підключення.

З огляду на велику кількість параметрів, які впливають на процес та якість сушіння, була додана можливість налаштування параметрів управління, вибору типу сушки та розміру деревини.

Запропонована система управління має аварійний режим, можливість архівування даних, зупинки та продовження процесу сушіння. Розроблена автоматизована система використовує двопозиційне та ШІМ-керування. Ця система може бути розширена для впровадження нових алгоритмів керування шляхом додавання відповідних змін до програми контролера.

2.5. Опис інформаційного забезпечення АСУ виробництва та основного відділення



Рисунок 2.3 Автоматизована система управління процесом сушіння деревини

Після глибокого аналізу специфіки сушіння деревини та оцінки різних методів, було вирішено зосередитися на автоматизації вакуумної сушильної камери для деревини. Цей метод демонструє значні переваги та мінімальні недоліки порівняно з іншими, що впливає з проведеного аналізу. Застосування нечіткої логіки в цьому контексті дозволяє підвищити точність та ефективність процесу сушіння.

2.6 Аналіз технологічного процесу сушіння деревини у вакуумній камері з використанням нечіткої логіки.

Досліджуючи процес сушіння деревини у вакуумній сушильній камері, ми враховуємо нечіткість параметрів, таких як вологість деревини та змінні умови середовища, і розробляємо схему інформаційно-матеріальних потоків СУ61.6.151.07.С1, що включає методи нечіткої логіки.

2.7 Функціональні завдання керування з використанням нечіткої логіки

На основі аналізу схеми інформаційно-матеріальних потоків формуємо перелік основних завдань керування, інтегруючи методи нечіткої логіки для оптимізації процесу сушіння:

- підтримка оптимальних параметрів температури та вологості з використанням нечіткої логіки;
- ефективне керування циркуляційними насосами з урахуванням змінних умов;
- адаптивне керування вакуумним насосом для стабілізації умов сушіння;
- автоматизоване виведення конденсату з оптимізацією за допомогою нечіткої логіки;
- точний контроль температури теплоносія та охолоджувальної рідини;
- динамічний контроль тиску в камері з урахуванням змінних параметрів;
- моніторинг тиску в нагрівальному та охолоджуючому контурах за допомогою алгоритмів нечіткої логіки; контроль часу режимів сушіння з адаптацією до змінних умов.

Таким чином, інтеграція нечіткої логіки в систему управління сушінням деревини сприяє підвищенню її гнучкості та ефективності.

2.8 Опис контурів керування з використанням методів нечіткої логіки

2.8.1 Вакуумний контур з нечіткою логікою

Головною функцією вакуумного контуру є створення та підтримка вакууму в сушильній камері з використанням принципів нечіткої логіки. Контроль здійснюється через вакуумметр РТ, електромагнітний клапан НЕ і вакуумний насос з пристроєм плавного пуску NS. Система використовує нечіткі алгоритми для адаптації процесу відкачування повітря до змінних умов сушіння, забезпечуючи оптимальне вакуумне середовище на кожному етапі процесу.

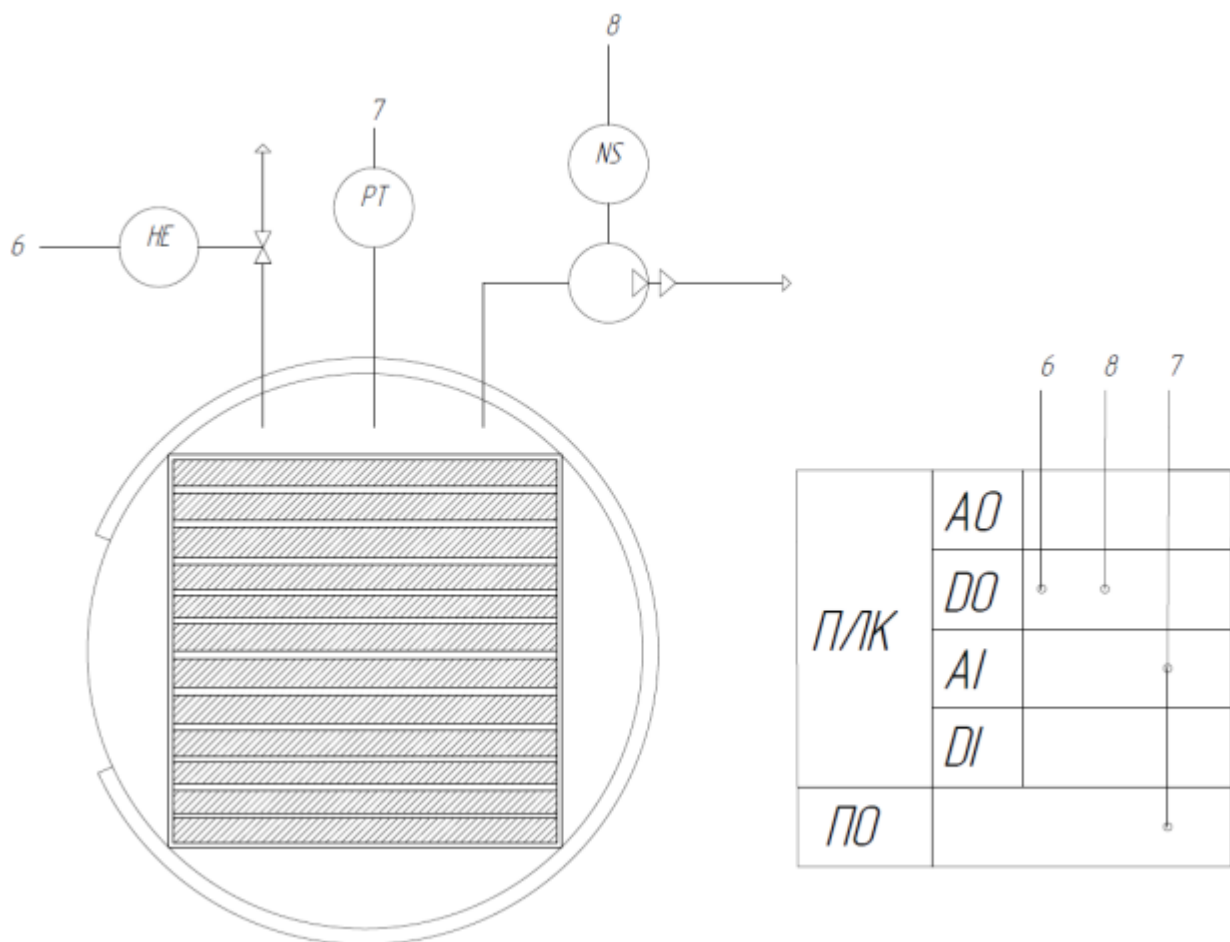


Рисунок 2.4 – Вакуумний контур

2.8.2 Нагрівальний контур із застосуванням нечіткої логіки

Нагрівальний контур (рис. 2.5) забезпечує підігрів штабелю деревини до заданої температури. Використання нечіткої логіки в цьому контурі дозволяє точніше регулювати температуру, враховуючи коливання зовнішніх факторів і зміни вологості. Датчики температури ТЕ та вологомір МЕ з поправкою на температуру, у поєднанні з адаптивними алгоритмами, дозволяють системі гнучко реагувати на зміни умов і підтримувати оптимальний тепловий режим.

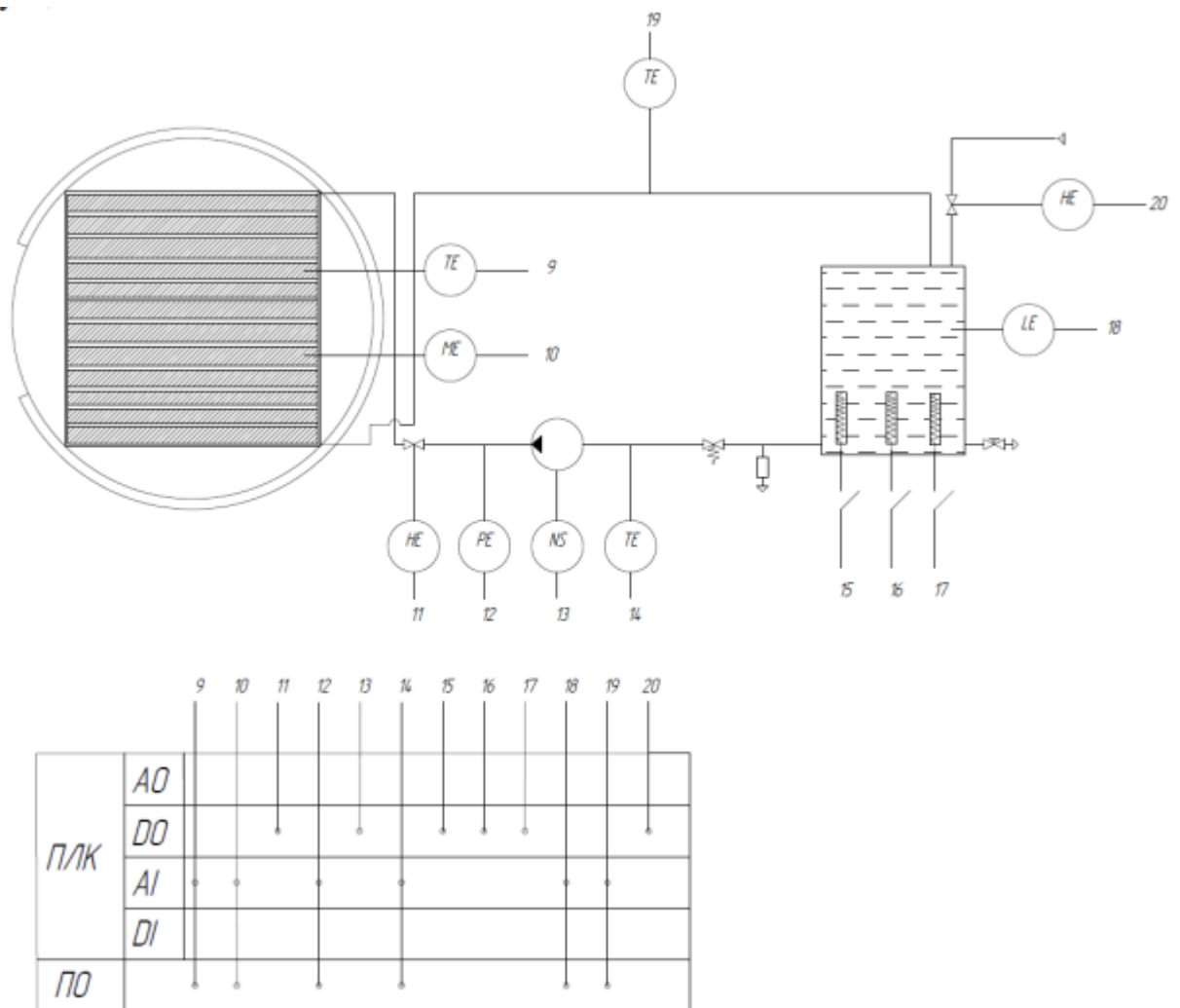


Рисунок 2.5 – Нагрівальний контур

2.8.3 Охолоджувальний контур з використанням нечіткої логіки

Основна задача охолоджувального контуру (рис. 2.3) - це ефективне охолодження камери та конденсація парів води. За допомогою нечіткої логіки, система автоматично адаптує швидкість циркуляції води та температуру охолодження, щоб оптимально відповідати поточним умовам сушіння, підвищуючи ефективність процесу конденсації.

2.8.4 Контур виведення конденсату з інтеграцією нечіткої логіки

Задача цього контуру (рис. 2.6) полягає в видаленні конденсату, що утворюється під час сушіння. Використовуючи алгоритми нечіткої логіки, система гнучко контролює процес виведення конденсату, забезпечуючи ефективне його видалення в залежності від інтенсивності утворення конденсату та змін у внутрішньому тиску камери.

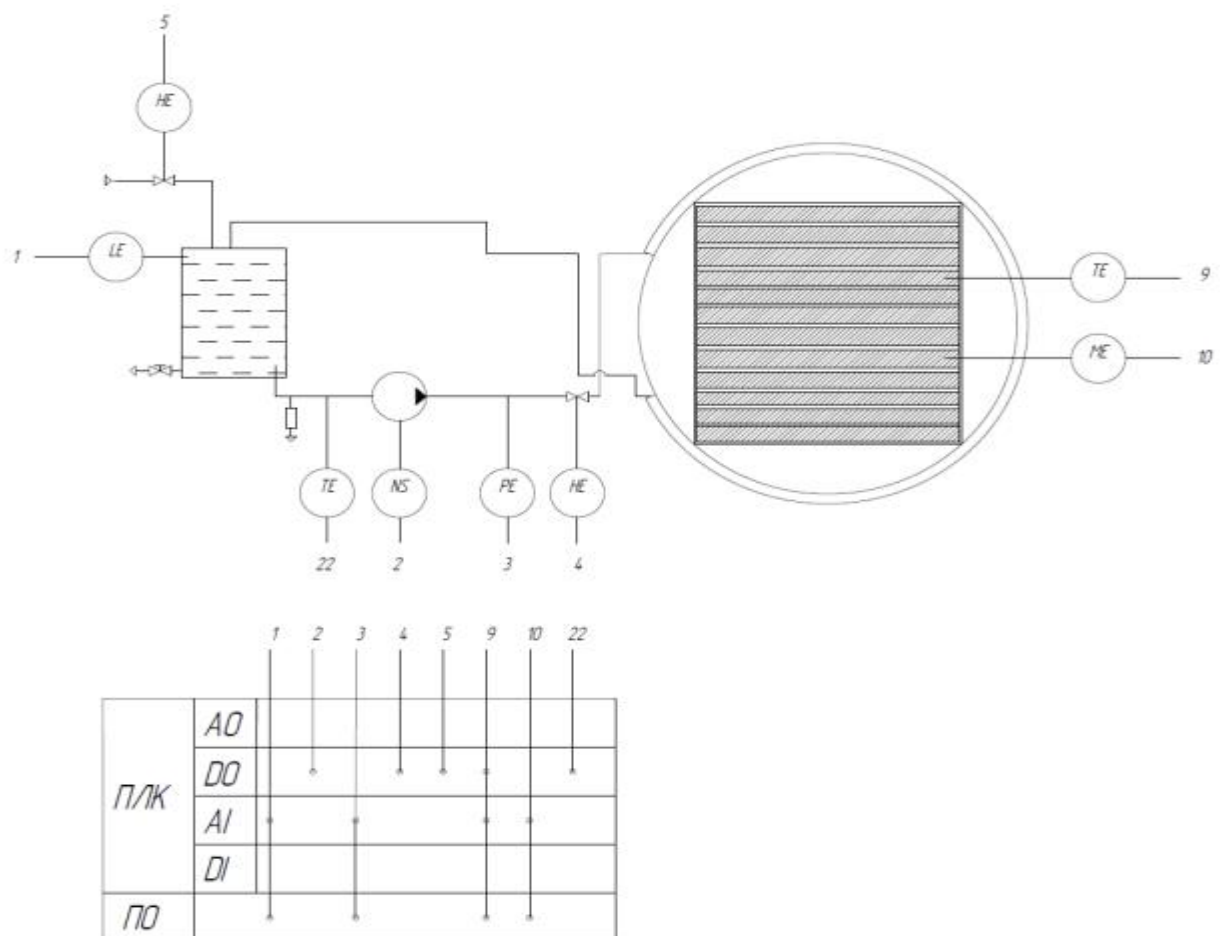


Рисунок 2.6 – Охолоджувальний контур

№ п/п	Сигнал	Діапазон вимірювань	Кількість точок	Тип сигналу
1	Температура штабеля деревини	0 – 85°C	1	4 – 20мА
2	Температура води в контурі	1 – 90°C	2	4 – 20мА
3	Вологість штабеля деревини	4 – 90%	1(4)	4 – 20мА /RS – 485

№ п/п	Сигнал	Діапазон вимірювань	Кількість точок	Тип сигналу
4	Рівень води в резервуарі	0 – 2м	2	4 – 20мА
5	Рівень вакууму	1400 – 1 мбар	1	4 – 20мА
6	Тиск у водяному контурі	0 – 16 бар	2	4 – 20мА

№ п/п	Сигнал	Діапазон сигналу	Кількість точок	Тип сигналу	Виконавчий механізм
1	Подача води	0..1	4	Дискретний	Електромагнітний клапан
2	Створення вакууму	0..1	1	Дискретний	Вакуумний насос(5.5кВт) через пристрій плавного пуску(7.5кВт)
3	Нагрів води	0..1	3	Дискретний	ТЕН через напівпровідникове реле
4	Циркуляція води	0..1	2	Дискретний	Циркуляційний насос(0.5кВт) через пристрій плавного пуску(0.75кВт)
5	Виведення конденсату	0..1	1	Дискретний	Електромагнітний клапан
6	Керування тиском в контурах	0..1	2	Дискретний	Електромагнітний клапан та циркуляційний насос(0.5кВт) через пристрій плавного пуску(0.75кВт)
7	Нагрівання води	0..1	3	Дискретний	Напівпровідникове реле

Таблиця 2.4 Таблиця вихідних сигналів

2.9 Безпека та сигналізація з застосуванням нечіткої логіки

Системи безпеки, включаючи захисні клапани та відвідники повітря, також вбудовують елементи нечіткої логіки для підвищення надійності та ефективності. Це забезпечує автоматичну адаптацію до змінних умов та попереджає можливі аварійні ситуації, покращуючи загальну безпеку системи.

Завдяки включенню методів нечіткої логіки, автоматизована система управління сушінням дерева стає значно гнучкішою та ефективнішою, здатною адаптуватися до різноманітних умов та оптимізувати процес сушіння.

Розділ 3. Вибір засобів автоматизації

3.1 Вибір датчиків в рамках системи з нечіткою логікою

У рамках розробки автоматизованої системи управління сушінням дерева з використанням методів нечіткої логіки, для вимірювання температури деревини під час процесу сушіння було обрано датчик ОВЕН ДТСхх4, конкретно модель ДТС184-50М.В3.40/20.ЕХІ-Т4. Цей датчик буде встановлено в захисну оболонку, а електричний кабель – у захисний кожух, що гарантує його ефективність в умовах вакууму, високої вологості та температури. Інтеграція датчика з нечіткою логікою дозволяє підвищити точність та надійність вимірювань, забезпечуючи адаптивне управління процесом сушіння. Датчик підключається до програмованого логічного контролера через нормувальний перетворювач, забезпечуючи точне зчитування та обробку даних.

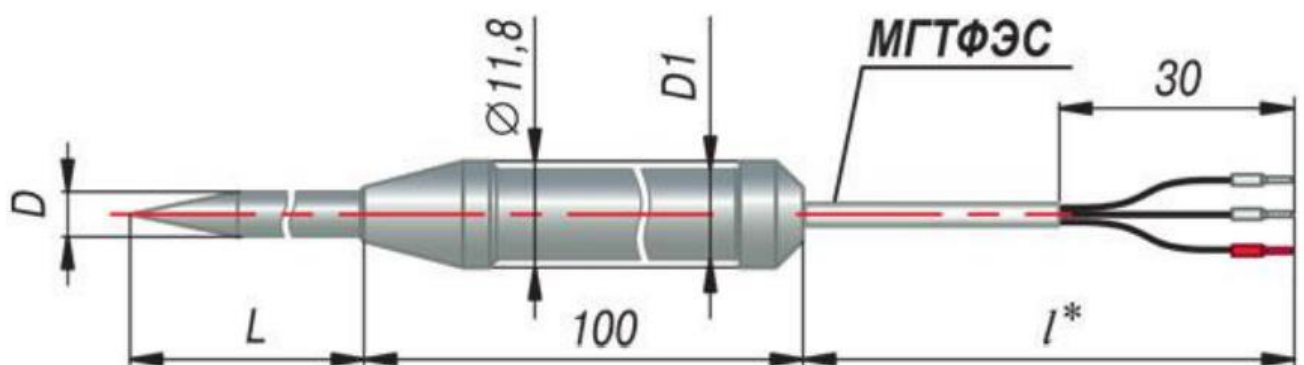


Рисунок 3.1 - Конструктивне виконання ДТС184

Характеристики	Значення
Діапазон вимірювання	від - 100 до +250°C
Умовний тиск	0,1 – 6,3 МПа
Показник теплової інерції	10 – 30м
Опір ізоляції	100 МОм +
Чутливі елементи	1
Схема підключень	тридротова
Сенсор відносно корпусу	ізолюваний
Довжина кабелю	довільна, під замовлення
Матеріал захисної арматури	латунь, сталь
ГОСТ 14254	IP54
Параметри іскро безпечних електричних кіл	$U_i=10,2$ В; $I_i=200$ мА; $L_i=0,75$ мГц; $C_i=2,75$ мкФ

Таблиця 3.1 - Характеристики ДТС184

Для вимірювання вологості деревини використовується датчик СВД-02, що ідеально підходить для систем з нечіткою логікою завдяки його здатності до безперервного вимірювання та передачі даних через порт RS485. Використання кондуктометричних давачів із вбудованим механізмом автоматичної температурної корекції оптимізує процес контролю вологості в різних умовах, що є критично важливим для ефективної роботи автоматизованої системи.



Рисунок 3.2 – Зовнішній вигляд вологоміру СВД-02

Нарешті, для вимірювання вакууму в камері обрано вакуумметр VSC43MA4. Цей прилад використовує п'єзо-перетворювач для вимірювання абсолютного тиску і є важливим елементом в системі управління сушінням дерева з нечіткою логікою. Він дозволяє точно контролювати та регулювати вакуум у камері, що забезпечує оптимальні умови для сушіння.

Характеристика	Значення величини
Діапазон показань вологості	6 – 90 %
Інструментальна складова абсолютної похибки	±0,2 %
Основна абсолютна похибка при вимірюванні вологості	±2%
Час встановлення робочого режиму	Менше 15 хв
Час повного циклу вимірювань	менше 120
Час безперервної роботи	не обмежено
Номінальна напруга живлення	24 В
Допустима напруга живлення	22,5 – 26,5 В
Потужність, Вт, не більше	2
Розміри вимірювального блоку	60×242×216 мм
- діаметр робочої частини електрода кондуктометричного датчика	4 мм
- довжина робочої частини електрода кондуктометричного датчика	25 мм
Вага	
вимірювального блоку	0,6 кг
електрода кондуктометричного датчика	0,15 кг
Повний середній термін служби	10 років

Таблиця 3.2 – Основні технічні характеристики вологоміру СВД-02

Назва	Кількість
Електронний блок-ЕБ	1 шт.
Термометр опору 100М	1 шт.
Електроди кондуктометричних датчиків	8 шт.
Кабель для електродів кондуктометричних датчиків	4 шт.

Таблиця 3.3 – Склад вологоміру СВД-02

Використання цих датчиків в системі управління сушінням дерева з методами нечіткої логіки значно підвищує ефективність та точність процесу, забезпечуючи адаптивність і надійність в умовах змінних робочих характеристик.

Принцип вимірювання вакуумного датчика	П'єзо резистивний, незалежний від типу газу
Діапазон вимірювання	1400 - 1 мбар
Точність вимірювання	± 0,3% від повної шкали
Швидкість вимірювання	20 мс
Електричне живлення	9 - 30 В DC
Підключення до електромережі	M12 A, 5-полюсна вилка
Робоча температура	від +5 до + 110°C
Температура зберігання	від - 40 до + 70°C
Вихідний сигнал	4 - 20 мА
Вакуумний з'єднувач	фланець з нержавіючої сталі з різьбленням G1/4
Ступінь захисту	IP54
Вага	125 г

Таблиця 3.4 – Характеристики давача VSC43MA4



Рисунок 3.3 – Зовнішній вигляд вакуумметра VSC43MA4

У контексті розробки автоматизованої системи управління сушінням дерева, що базується на принципах нечіткої логіки, особлива увага приділяється вибору відповідних датчиків. Одним із ключових елементів системи є п'єзокерамічний вакуумний датчик VSC43MA4, який має наступні переваги:

- Керамічний датчик, стійкий до хімічних впливів та оснащений ущільненням, гарантує високу надійність у складних умовах.
- Висока довговічність і стабільність функціонування в контексті системи з нечіткою логікою.
- Швидкий відгук на зміни умов, що є ключовим для адаптивного управління процесом.
- Захист від забруднень, що забезпечує точність вимірювань навіть у важких умовах.
- Незалежність вимірювань від типу газу, забезпечуючи універсальність застосування.
- Температурна компенсація, важлива для точного вимірювання у різних кліматичних умовах.
- Можливість точного налаштування нульового тиску і меж вимірювань.
- Стандартизований вихідний сигнал для легкого інтегрування у систему управління.
- Простота у підключенні до програмованого логічного контролера.
- Компактність і високий ступінь захисту ір54.

Для вимірювання тиску рідини в системі було обрано перетворювач тиску Danfoss MBS 1700. Цей прилад складається з первинного перетворювача та електронного вимірювального пристрою, що є важливим для забезпечення точного контролю параметрів в рамках системи з нечіткою логікою. Його використання підвищує ефективність управління процесом сушіння дерева, дозволяючи точно адаптувати параметри системи до змінюваних умов робочого середовища.



Рисунок 3.4 – Зовнішній вигляд Danfoss MBS 1700

Характеристика	Значення
Вид робочого середовища	рідина, газ
Тип вимірюваного тиску	відносний
Діапазони вимірювань	0 – 6 бар
Діапазон допустимих температур робочого середовища	-40 – 85°C
Діапазон допустимих температур при транспортуванні і зберіганні	-50 – 85°C
Діапазон компенсованих температур	0 – 90°C
Час реакції	4 мс
Граничний тиск перевантаження	до 1500 бар
Тиск розриву чутливого елемента	до 2000 бар
Технологічне з'єднання	G 1/4, G 1/2
Матеріал контактуючих частин	нержавіюча сталь
Ударостійкість	500 g
Вага	0,25 кг
Електричні характеристики	
Тип вихідного сигналу	4 – 20 мА
Захист від неправильного включення полярності	є
Напруга живлення	9 – 32 В
Граничний струм	28 мА
Електричне підключення	штекер DIN 43650

Таблиця 3.5 – Характеристики Danfoss MBS 1700

У контексті розробки автоматизованої системи управління сушінням дерева з застосуванням методів нечіткої логіки, особливу увагу було приділено вибору датчика температури води. Для цього було обрано модель ОВЕН ДТС145МРТ100.0,5.60.И, яка забезпечує високу точність і надійність вимірювань. Цей термоперетворювач опору, оснащений високоточним нормувальним перетворювачем, здатний безперервно вимірювати та перетворювати температурні показники різних середовищ у стандартизований сигнал 4-20 мА. Це особливо важливо для інтеграції з системою управління, яка використовує нечітку логіку для адаптивної регуляції процесів, оскільки дозволяє точно передавати дані на значні відстані.

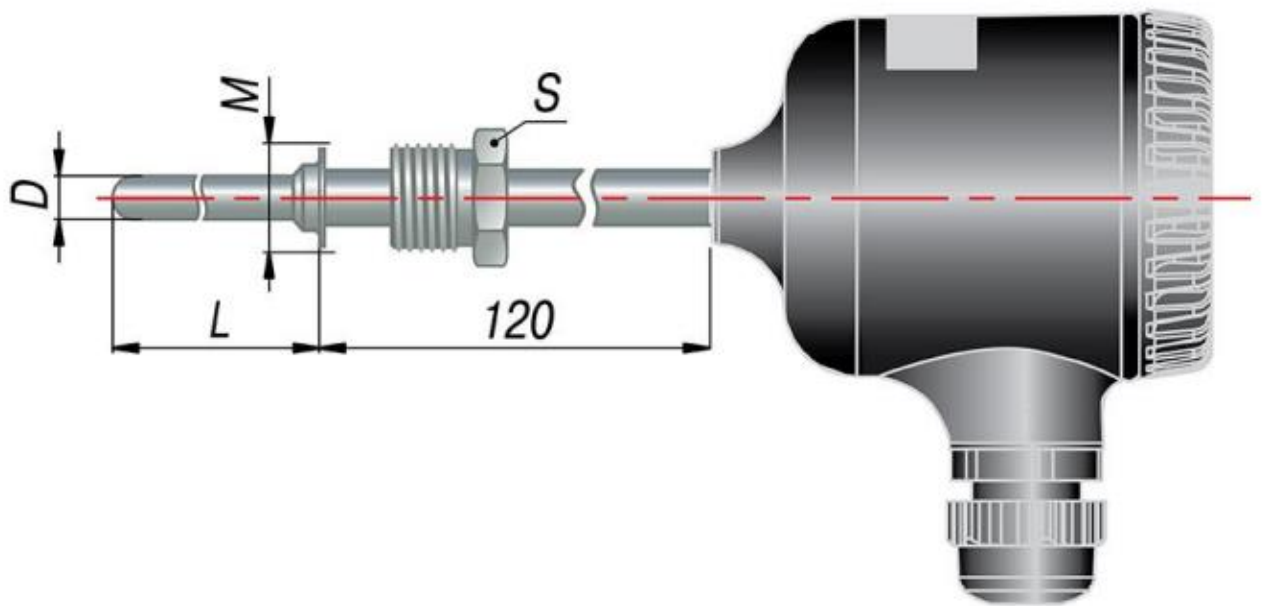


Рисунок 3.5 – Конструктивне виконання ДТС145М-РТ100.0,5.60.И: $D = 6$ мм; $M = 20 \times 1,5$ мм**;
 $S = 22$ мм; $L = 60$ мм

У складі даного датчика присутній первинний перетворювач – термозонд типу Pt100, і вбудований нормувальний вимірювальний перетворювач ОВЕН НПТ-3, який можна налаштовувати через USB-інтерфейс для встановлення практично будь-якого діапазону вимірювань. Це розширює можливості системи управління сушінням дерева, забезпечуючи гнучкість та адаптивність до змінних умов процесу.

Характеристика	Значення
Номінальна напруга живлення	24 В
Допустима напруга живлення	12 – 36 В
Максимальна споживана потужність	0,8 Вт
Вихідний сигнал	4 – 20 мА
Залежність струму від температури	лінійна
Нелінійність перетворення	±0,2%
Розрядність ЦАП	12 біт
Опір дроту перетворювача з термометром опору	до 30 Ом
Опір лінії зв'язку перетворювача	до 100 Ом
Номінальний опір навантаження (при 24 В)	500 Ом
Максимальний допустимий опір навантаження (при 36 В)	1250 Ом
Пульсації вихідного сигналу	0,006

Таблиця 3.6 – Технічні характеристики ОВЕН ДТС145М-РТ100.0,5.60

3.2 Вибір виконавчих механізмів та допоміжних пристроїв

Крім того, у системі управління сушінням дерева з використанням методів нечіткої логіки було обрано електромагнітний клапан моделі 8616 NBR 230V 50Hz для регулювання потоку рідини чи газу. Електромеханічна конструкція клапана забезпечує точне та надійне управління потоками, що є невід'ємною частиною системи, здатної адаптуватися до різних робочих сценаріїв. Електромагнітний клапан ідеально підходить для систем водопостачання та опалення, а також може використовуватися у різних галузях промисловості та сільського господарства, що робить його універсальним вибором для нашої системи.



Рисунок 3.6 – Зовнішній вигляд клапана

Характеристика	Значення
Потужність	16 Вт
Робоче середовище	Повітря, рідини
Діаметр умовного проходу	25 мм
Діаметр умовного проходу	1 дюйм
Максимальна робоча температура	90°C
Мін. робочий тиск	0.3 бар
Макс. робочий тиск	10 бар
Макс. температура навколишнього середовища	80°C
Принцип дії	НЗ
Вид клапана	Мембранний
Напруга живильної мережі	220 В
Частота мережі	50 Гц

Таблиця 3.7 – Характеристики електромагнітного клапану

У рамках розробки автоматизованої системи управління сушінням дерева з використанням методів нечіткої логіки, важливим аспектом є вибір обладнання, здатного оптимізувати умови процесу. Для створення необхідного вакуумного середовища у сушильній камері було обрано вакуумний водокільцевий насос ВВН 1-1,5. Цей насос є критичним для підтримки пониженого тиску, що сприяє зниженню температури кипіння води, зменшуючи час сушки та покращуючи

збереження властивостей деревини. Його характеристики, такі як висока продуктивність та ефективність роботи, роблять його ідеальним вибором для системи, що використовує нечітку логіку для адаптації до змінних умов процесу.



Рисунок 3.7 – Зовнішній вигляд BVH 1-1.5

Для забезпечення плавного пуску та зупинки вакуумного насоса в системі було використано пристрій плавного пуску ОВЕН УПП1-7К5-В. Цей пристрій важливий для зниження пускового струму, запобігання перевантаженням та підвищення тривалості служби обладнання. Його цифрове керування дозволяє точно налаштувати режими роботи, адаптуючи їх до потреб процесу сушіння дерева, що керується нечіткою логікою. Функція «імпульсного старту» забезпечує ефективний запуск навантажених двигунів, що є важливим для підтримки робочих параметрів системи.



Рисунок 3.8 – Зовнішній вигляд УПП1-7К5-В

Переваги пристрою плавного пуску ОВЕН УПП1, такі як надійний компактний корпус, висока адаптивність до різних робочих умов та зручність у монтажі, роблять його ідеальним компонентом для інтеграції в автоматизовану систему управління сушінням дерева з використанням нечіткої логіки.

Параметр	Значення
Пусковий крутний момент	0 – 85 %
Час розгону	0,4 – 10 с
Час гальмування	0,4 – 10 с
Управляюча напруга	24 – 480 В АС/DC
Напруга мережі	400 – 480 В
Ступінь захисту	IP20
Макс. потужність	7,5 кВт
Макс. струм двигуна	15 А
Тиристорне керування за двома фазами	

Таблиця 3.8 – Характеристики пристрою плавного пуску

В контексті розробки інноваційної автоматизованої системи управління сушінням дерева, де використовуються методи нечіткої логіки для оптимізації процесів, особливу увагу приділено вибору ефективного циркуляційного насоса. Для цієї мети було обрано модель AQUATICA потужністю 0,5 кВт. Цей насос відіграє важливу роль у забезпеченні стабільної подачі теплоносія або охолоджувальної рідини, що є ключовим для підтримки оптимальних умов в процесі сушіння. Використання насоса з такими характеристиками дозволяє системі з нечіткою логікою ефективно реагувати на зміни умов процесу, забезпечуючи рівномірну циркуляцію води та підтримуючи оптимальні температурні параметри.



Рисунок 3.9 – Зовнішній вигляд насоса

Для підвищення ефективності та надійності системи, також було обрано пристрій плавного пуску ABB PSR3-600-70 потужністю 1,5 кВт. Цей пристрій забезпечує плавний запуск та зупинку насоса, знижуючи ризик пошкодження обладнання та сприяючи економії енергії. Він дозволяє точно налаштувати

параметри роботи насоса, що є важливим для адаптивної роботи системи сушіння дерева, оснащеної методами нечіткої логіки. Завдяки своїм технічним характеристикам, пристрій плавного пуску ABB PSR3-600-70 допомагає забезпечити стабільну та ефективну роботу циркуляційного насоса, адаптуючись до різних умов роботи, що є ключовим для успішної реалізації автоматизованої системи управління сушінням дерева.



Рисунок 3.10 – Зовнішній вигляд ABB PSR3-600-70

В рамках розробки передової автоматизованої системи управління сушінням дерева, де активно застосовуються методи нечіткої логіки, особливу увагу було приділено вибору компонентів, що забезпечують оптимальне керування тепловими процесами. Для керування нагрівальними елементами – ТЕН, було обрано напівпровідникове реле Fotek SSR-40DA. Цей вибір зумовлений його високою ефективністю та надійністю в безконтактній комутації, а також можливістю інтеграції з системою управління, яка використовує нечітку логіку. Переваги цього реле, такі як висока швидкість комутації, відсутність іскріння та

електричної дуги, а також тривалий термін служби, є ідеальними для створення стабільного та надійного контролю нагрівання.

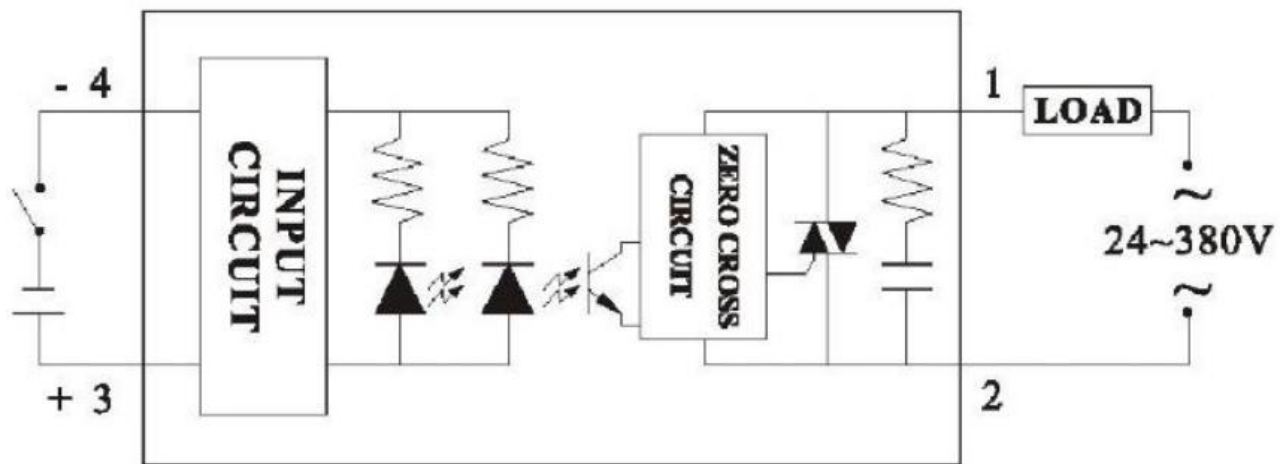


Рисунок 3.11 - Принципова схема напівпровідникового реле

Технічні характеристики реле, включаючи його здатність до комутації значних струмів із низьким падінням напруги, роблять його ідеальним для використання в автоматизованій системі з нечіткою логікою.

Для системи нагріву води було обрано мідний ТЕН потужністю 4 кВт і номінальною напругою 220 В. Цей нагрівальний елемент дозволяє точно та ефективно підтримувати необхідну температуру води, що є ключовим для забезпечення однорідності сушіння та збереження якості деревини.



Рисунок 3.12 – Зовнішній вигляд ТЕН

В якості програмованого логічного контролера (ПЛК) для системи було обрано модель ОВЕН 160(МО2), виходячи з проведеного аналізу вимог до системи та доступних на ринку рішень. Цей ПЛК відповідає всім технічним вимогам, пропонує адекватну вартість та підтримку від виробника, що є важливим для надійності та ефективності системи.

- Високопродуктивні входи для обробки енкодерів.
- Вбудовані дискретні та аналогові входи та виходи.
- Здатність до роботи з попередньо налаштованими сценаріями при підключенні до USB-накопичувачів та можливість архівації роботи обладнання.
- Проста програмованість через інтерфейси USB, Ethernet та RS-232 у середовищі CODESYS.
- Здатність передавати дані до верхніх рівнів через Ethernet або GSM мережу.
- Наявність трьох послідовних портів RS-232 та RS-485.
- Живлення можливе від 220 В або 24 В.

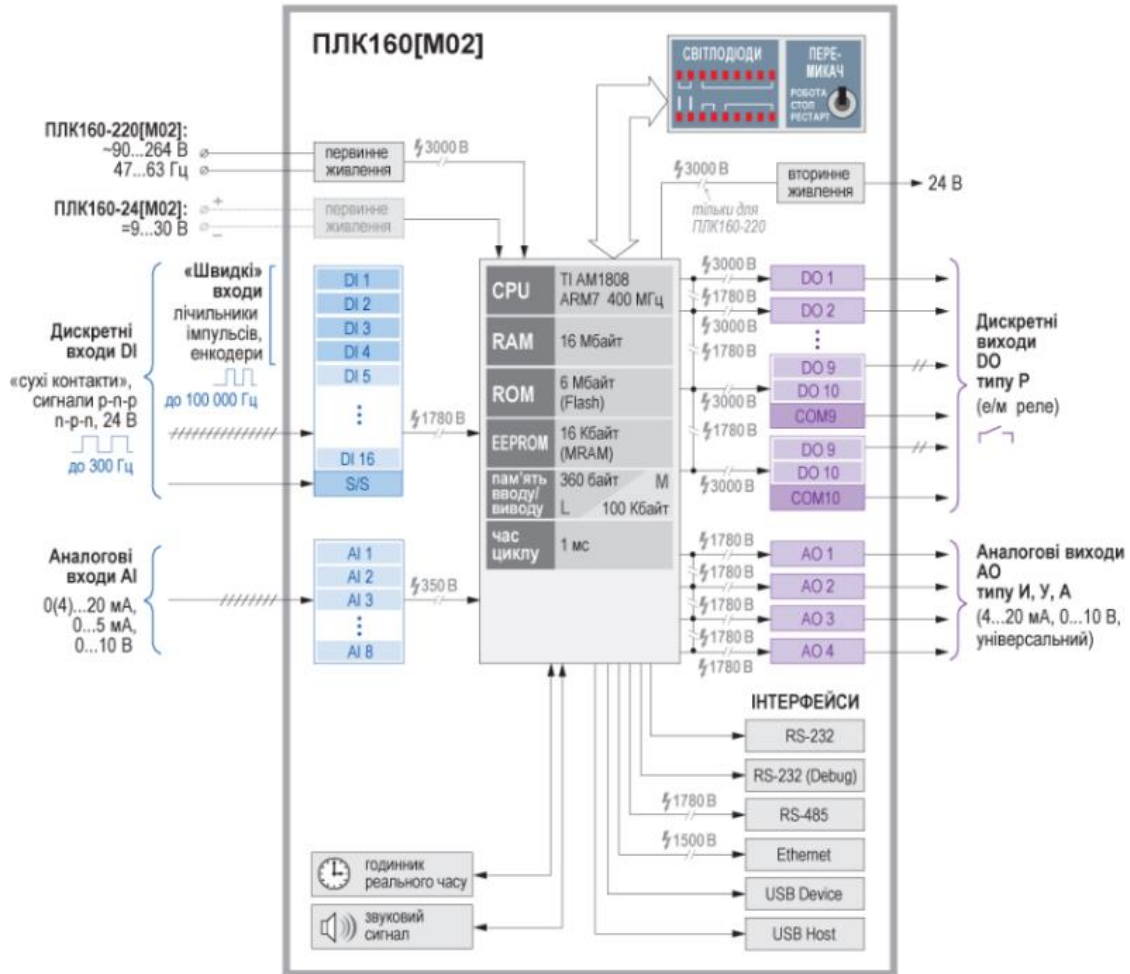


Рисунок 3.13 – Функціональна схема ПЛК160(M02)

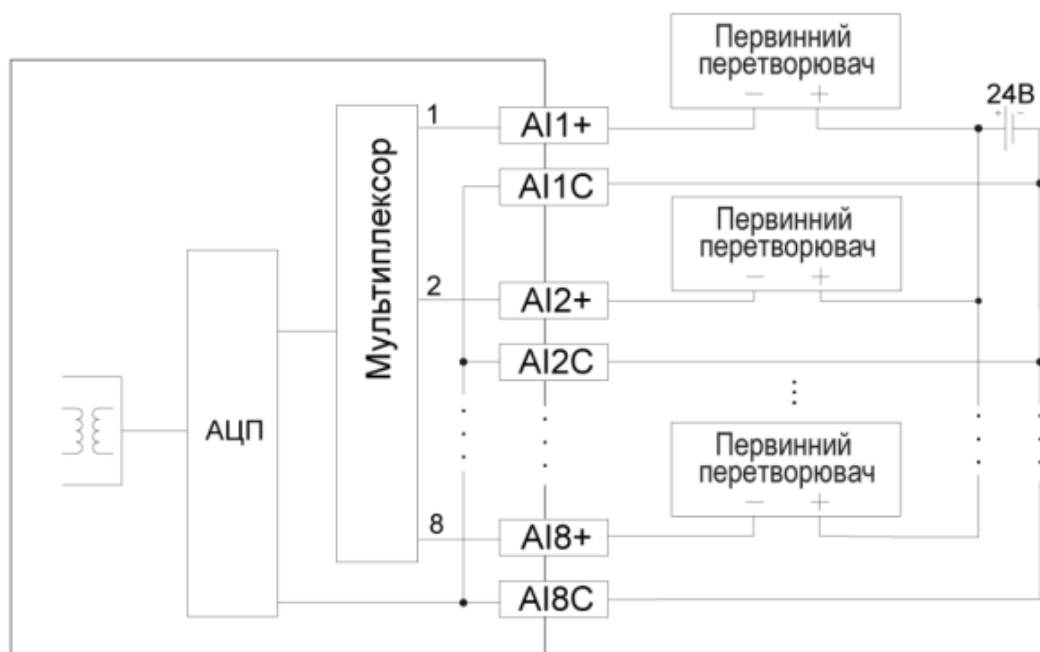


Рисунок 3.14 – Схема підключення аналогових входів

Панель оператора ОВЕН СПК 107, обрана для цієї системи, також має свої переваги:

- Здатність розробляти алгоритми управління та візуалізацію в єдиному середовищі програмування.
- Компактні розміри.
- Зниження загальних витрат на автоматизовану систему управління.
- Поєднання функцій програмованого контролера та панелі оператора в одному корпусі (ПЛК+HMI).
- Сенсорний резистивний дисплей розміром 7 дюймів.
- Широкий набір комунікаційних інтерфейсів: Ethernet, 3×RS-485, 2×RS-232, USB Host, USB Device, підтримка SD-карт пам'яті.
- Програмування в середовищі CODESYS.
- Підтримка протоколів обміну Modbus (RTU, ASCII, TCP), ОВЕН, можливість реалізації нестандартних протоколів. Підтримка протоколів NTP і FTP.
- Здатність оновлювати проекти і вбудоване ПЗ через USB- та SD-накопичувачі.
- Підтримка web-візуалізації.
- Використання Linux як вбудованої операційної системи.
- Присутність сторожового таймера з налаштуванням.
- Можливість розширити кількість точок вводу/виводу за допомогою зовнішніх модулів через будь-який вбудований інформаційний інтерфейс.
- Повна сумісність з попередніми версіями та модифікаціями, включаючи габаритні розміри і імпорт проектів.
- Захист від вологи та пилу на рівні IP65.

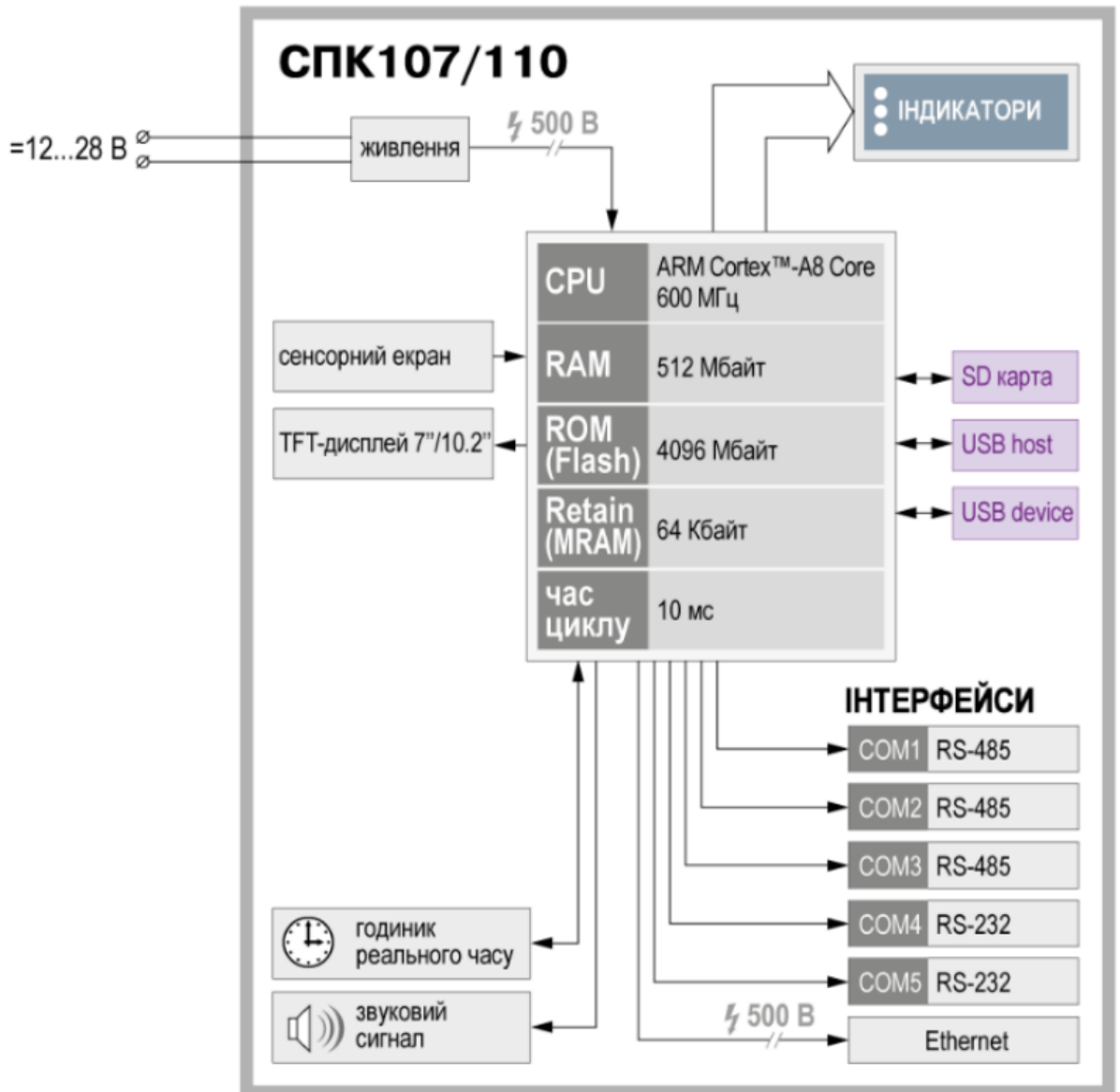


Рисунок 3.15 – Функціональна схема СПК107

Розділ 4. Розробка інтелектуальної системи управління процесу сушіння деревини з використанням методів нечіткої логіки

4.1. Побудова інтелектуальної системи управління

Методологічною основою теоретичних досліджень були теорія сушіння деревини, наука про деревину, математичне та нечітке моделювання, а також проведення експериментальних досліджень для перевірки адекватності запропонованої нечіткої моделі, методи математичної статистики та теорії експериментів.

Розробка функцій нечіткого виведення виконувалася відповідно до відомого методу у наведеній нижче послідовності. Ця техніка також використовувалася авторами для вирішення інших проблем.

Крім того, у попередніх дослідженнях авторів формулювання проблеми нечіткого моделювання процесу сушіння було виконано у загальній формі, і вхідні та вихідні змінні проблеми були обґрунтовані.

Для подальшого вирішення проблеми необхідно визначити функції нечіткої приналежності та базу нечітких продукційних правил.

Давайте визначимо значення вхідних змінних. Температура t у конвекційній камері для умовної деревини встановлюється у 8 етапів у діапазоні від $69\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $83\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Значення рівноважної вологості u згідно з експериментальними дослідженнями приймає значення від 4 до 12,5%.

Вихідні значення проблеми - це вологість W та час сушіння деревини T .

Сушіння в цій проблемі розглядається від вологості 60% і закінчується на 8%.

Час сушіння слід розглядати лише як орієнтовний і лише для умовної деревини. Таблиця 4.1 показує експериментальні дані з. Враховуючи фізичні значення величин, слід визначити лінгвістичні змінні проблеми.

У всесвіті нечітких множин у цьому випадку було б розумно прийняти п'ять значень вхідних та вихідних лінгвістичних змінних.

Набори термінів лінгвістичних змінних представлені трикутними нечіткими числами, а на межах області визначення - сигмоїдними нечіткими інтервалами. Для

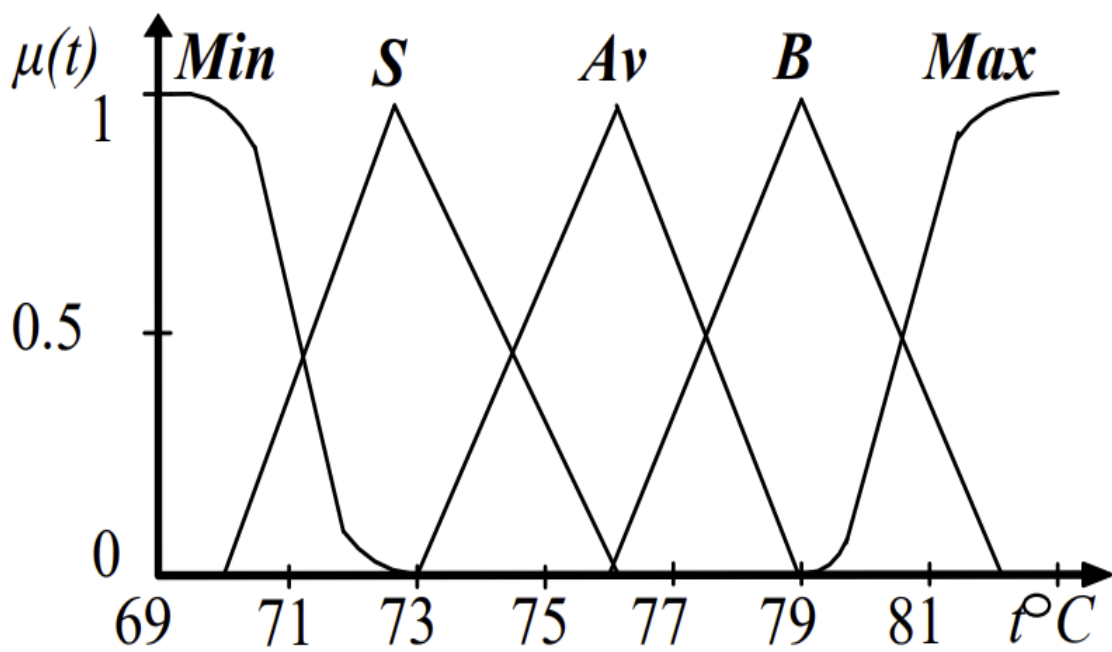
терміну "Великий" змінної "Рівноважна вологість" припускається трапецієподібне нечітке число, через збільшений діапазон значень у цьому регіоні. Графічно лінгвістичні змінні показані на рис. 4.1.

Для позначення лінгвістичних змінних запропонованих функцій використовуються наступні значення: - "Мінімум" - Min; "Маленький" - S; "Середній" - Av; "Великий" - B; "Максимум" - Max.

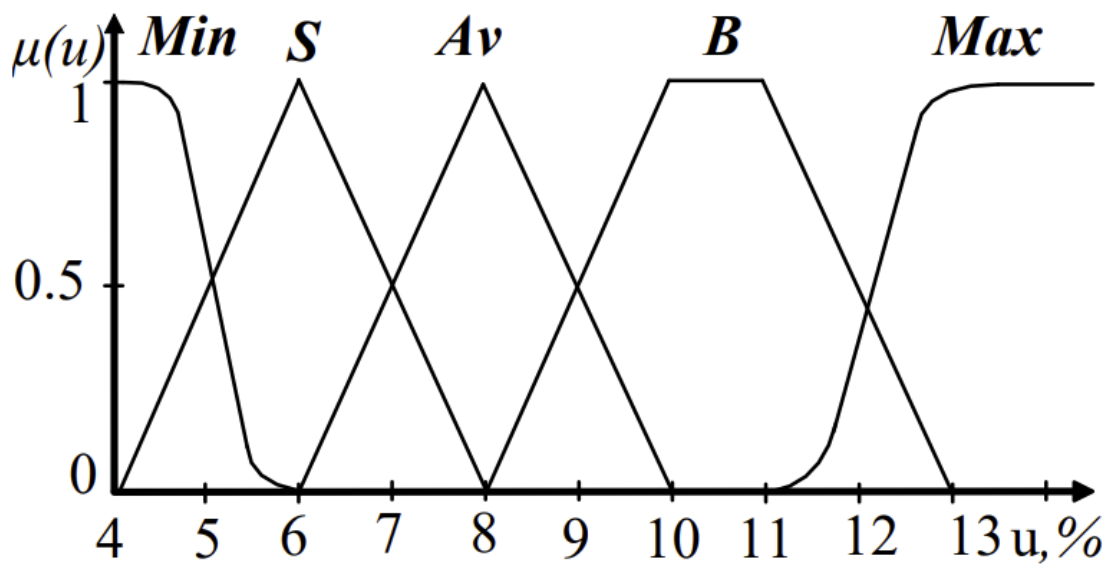
З точки зору теорії нечітких множин, лінгвістичні змінні визначаються наборами термінів з наступними значеннями:

- "Температура t" {Min, M, Av, B, Max};
- "Рівноважна вологість U" {Min, M, Av, B, Max};
- "Вологість W" {Min, M, Av, B, Max};
- "Час T" {Min, M, Av, B, Max}.

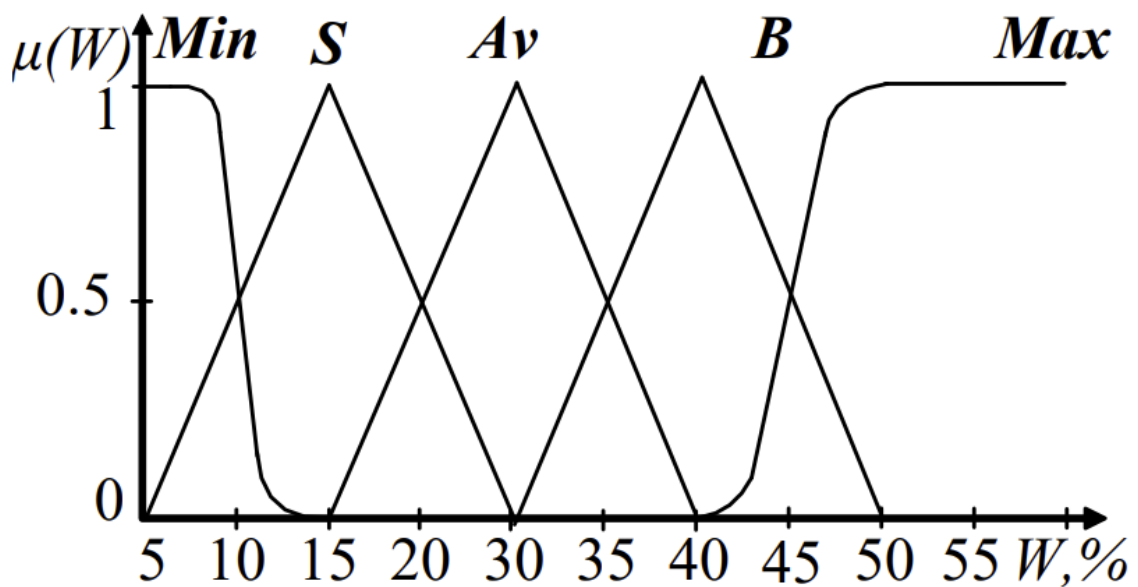
Для нечіткого виведення функції приналежності ми використовуємо один з найпоширеніших методів – метод Мамдані. Використання цього методу передбачає розробку бази правил для нечіткої продукції.



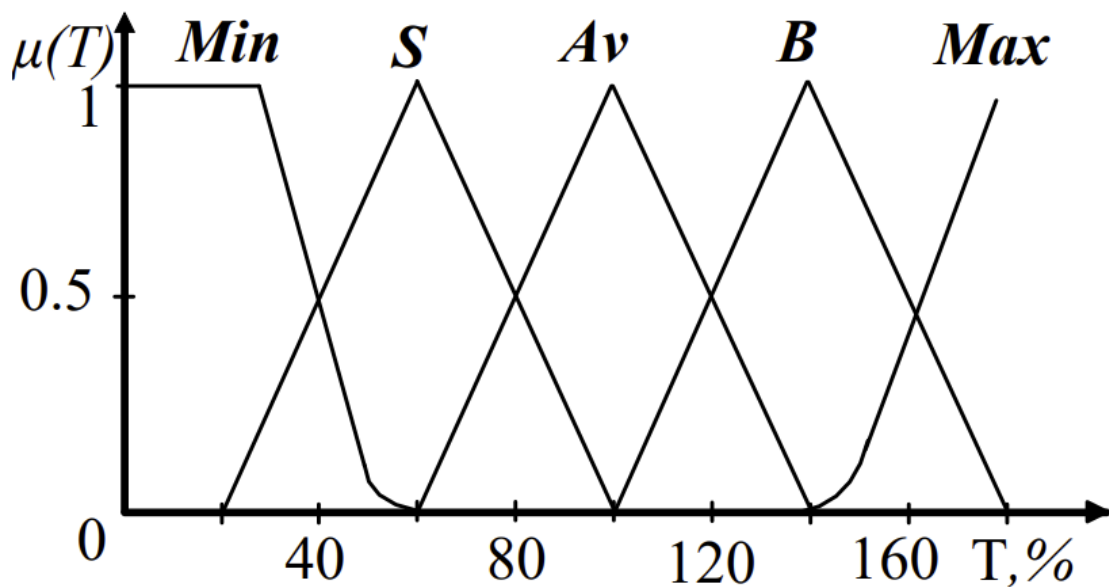
a



b



c



d

Рисунок 4.1. Нечіткі функції приналежності лінгвістичних змінних для виведення функції $W = f(t, U)$: а - «Температура t »; б - «Рівноважна вологість U »; в - «Вологість W »; д - «Час T »

Функції нечіткої приналежності лінгвістичних змінних для виведення функції $W = f(t, U)$: а – "Температура t "; б – "Рівноважна вологість U "; с – "Вологість W "; д – "Час T "

Давайте опишемо вплив деяких комбінацій вхідних дій на вихідний параметр.

- Якщо $t = \text{"Мінімум"}$ та $u = \text{"Мінімум"}$, тоді $W = \text{"Мінімум"}$ та $T = \text{"Середнє"}$;
- Якщо $t = \text{"Мінімум"}$ та $u = \text{"Максимум"}$, тоді $W = \text{"Максимальна"}$ та $T = \text{"Максимум"}$;
- Якщо $t = \text{"Максимум"}$ та $u = \text{"Мінімум"}$, тоді $W = \text{"Мінімум"}$ та $T = \text{"Мінімум"}$;
- Якщо $t = \text{"Великий"}$ та $u = \text{"Мінімум"}$, тоді $W = \text{"Маленька"}$ та $T = \text{"Маленький"}$;
- Якщо $t = \text{"Середнє"}$ та $u = \text{"Середнє"}$, тоді $W = \text{"Середня"}$ та $T = \text{"Середнє"}$;
- Якщо $t = \text{"Максимум"}$ та $u = \text{"Маленький"}$, тоді $W = \text{"Маленька"}$ та $T = \text{"Маленький"}$.

Значення лінгвістичної змінної "Температура t".	Значення вихідних нечітких підмножин "Вологість W" зі зміною нечіткої функції "Рівноважна вологість U".				
	Min	S	Av	B	Max
Min	Max	Max	Max	Max	Max
S	B	B	Max	Max	Max
Av	Av	B	B	Max	Max
B	S	Av	B	B	Max
Max	Min	S	Av	B	Max

Таблиця 4.1 Складання бази правил нечітких добутоків для моделювання $W=F(T,U)$

Значення лінгвістичної змінної "Температура t".	Значення вихідних нечітких підмножин "Час T" зі зміною нечіткої функції "Рівноважна вологість U".				
	Min	S	Av	B	Max
Min	Av	B	B	Max	Max
S	Av	Av	Av	Max	Max
Av	S	Av	Av	B	Max
B	Min	S	S	Av	B
Max	Min	Min	S	Av	B

Таблиця 4.2 Складання бази правил нечітких добутоків для моделювання $T=F(T,U)$

Нечіткий висновок результативної функції виконується за методом Мамдані

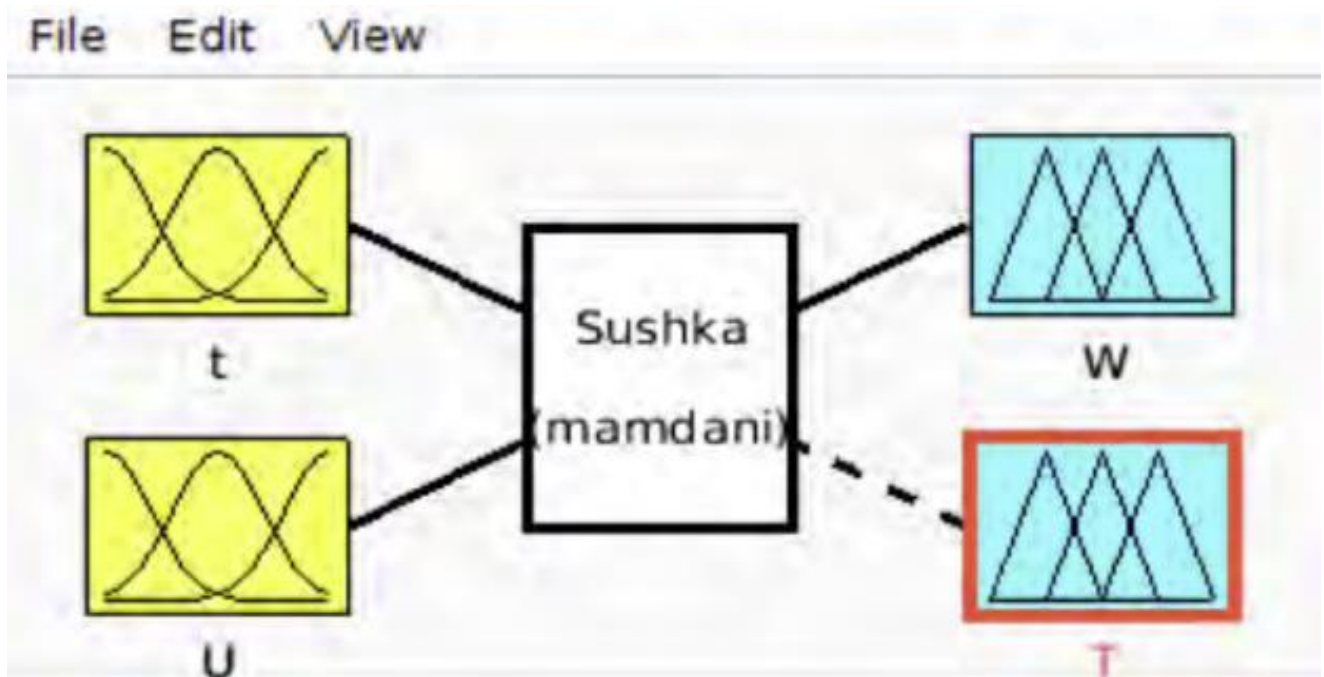
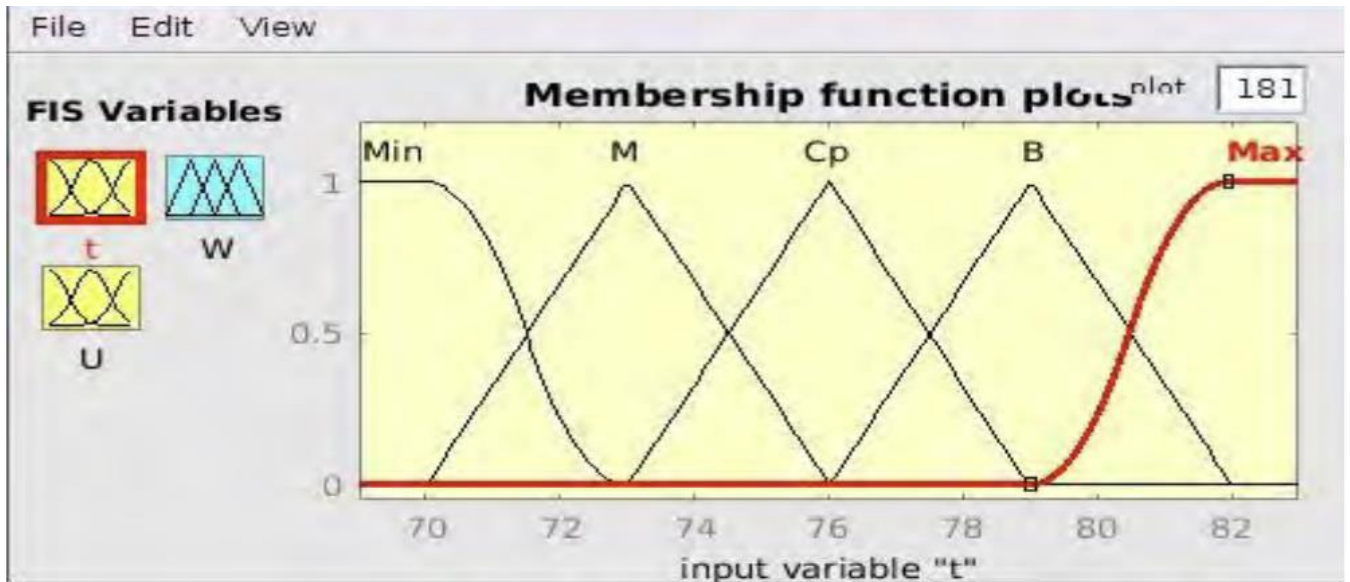


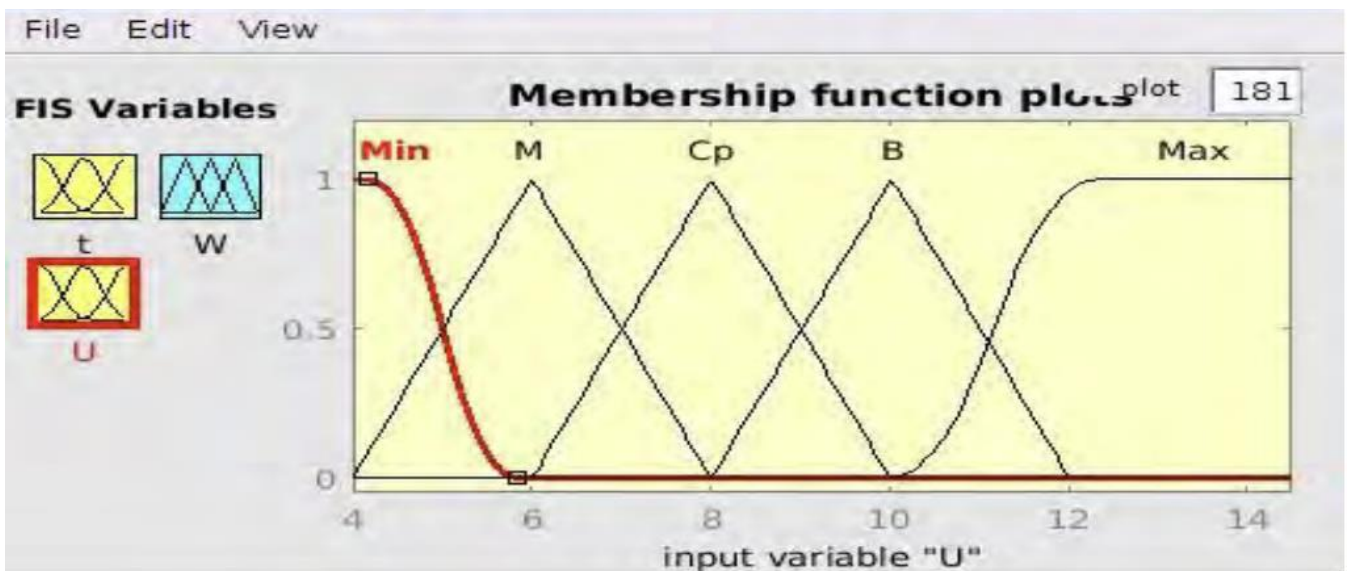
Рисунок 4.2. Схема роботи розмитого виведення в середовищі Matlab

Формальна формулювання проблеми нечіткого виведення реалізована в комп'ютерній програмі Fuzzy Logic Toolbox додатку Matlab. Процедура виведення показана на рис. 3. У цьому випадку алгоритм використовувався відповідно до відомого методу.

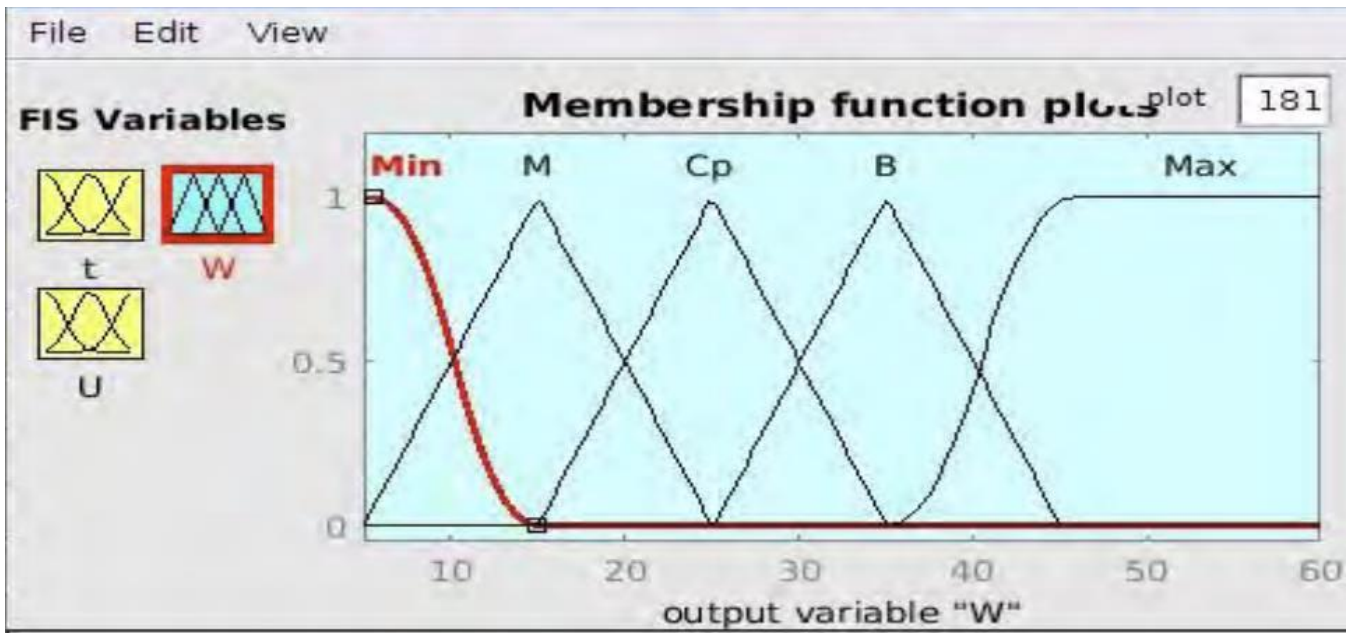
1. Розмитість (введення розмитості), (рис. 3,а-3,с);
2. Формування бази правил для розмитих виробів (рис. 3,д);
3. Розмите виведення (рис. 3,е);
4. Дерозмитнення (повернення до ясності), (рис. 3,е);
5. Отримання кінцевої функції розмитого виведення (рис. 3, ф).



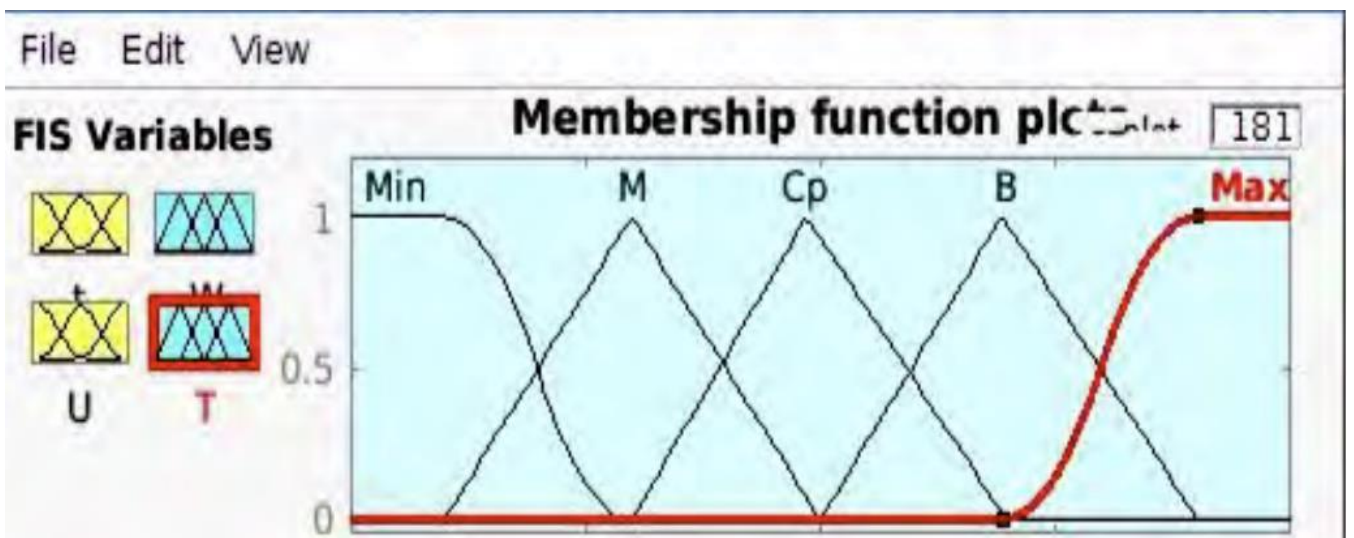
a



b



c



d

Рисунок 4.3 Розміта функція в середовищі Fuzzy Logic Toolbox додатку Matlab: а - розміта функція належності до лінгвістичної змінної "Температура t"; б - розміта функція належності до лінгвістичної змінної "Рівноважна вологість U"; в - розміта функція належності змінної "Вологість W"; г – розміта функція належності до лінгвістичної змінної "Час T".

Функції, що виникають в результаті розмітого виведення, є математично достатньо коректними і можуть використовуватися для прогнозування значень вологості та часу сушіння деревини. Порівняння з експериментальними даними показує їх адекватну адекватність. Б. Аналіз результатів Результати розглядаються

з точки зору відмінностей від поточних досліджень, аналізуючи їх відповідність наступним критеріям наукової цінності:

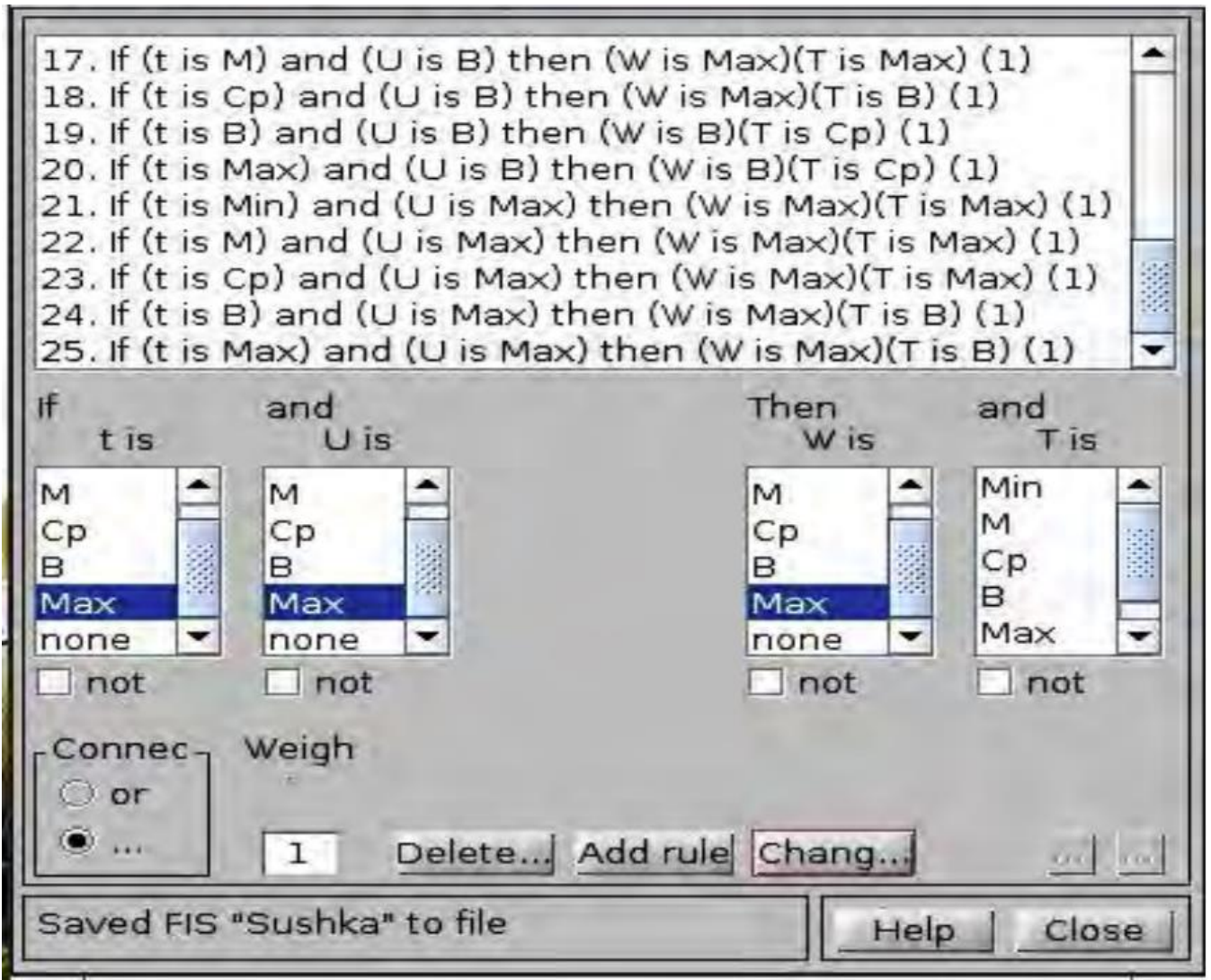
- відмінність від відомих результатів;
- наукова новизна;
- практична застосовність.

Основна відмінність результатів полягає в тому, що, як було показано, не існує достатньо повномасштабних досліджень процесів сушіння деревини, присвячених розмитому моделюванню сушіння деревини для розробки автоматизованих систем керування процесом за допомогою розмитої логіки ні в Україні, ні за кордоном.

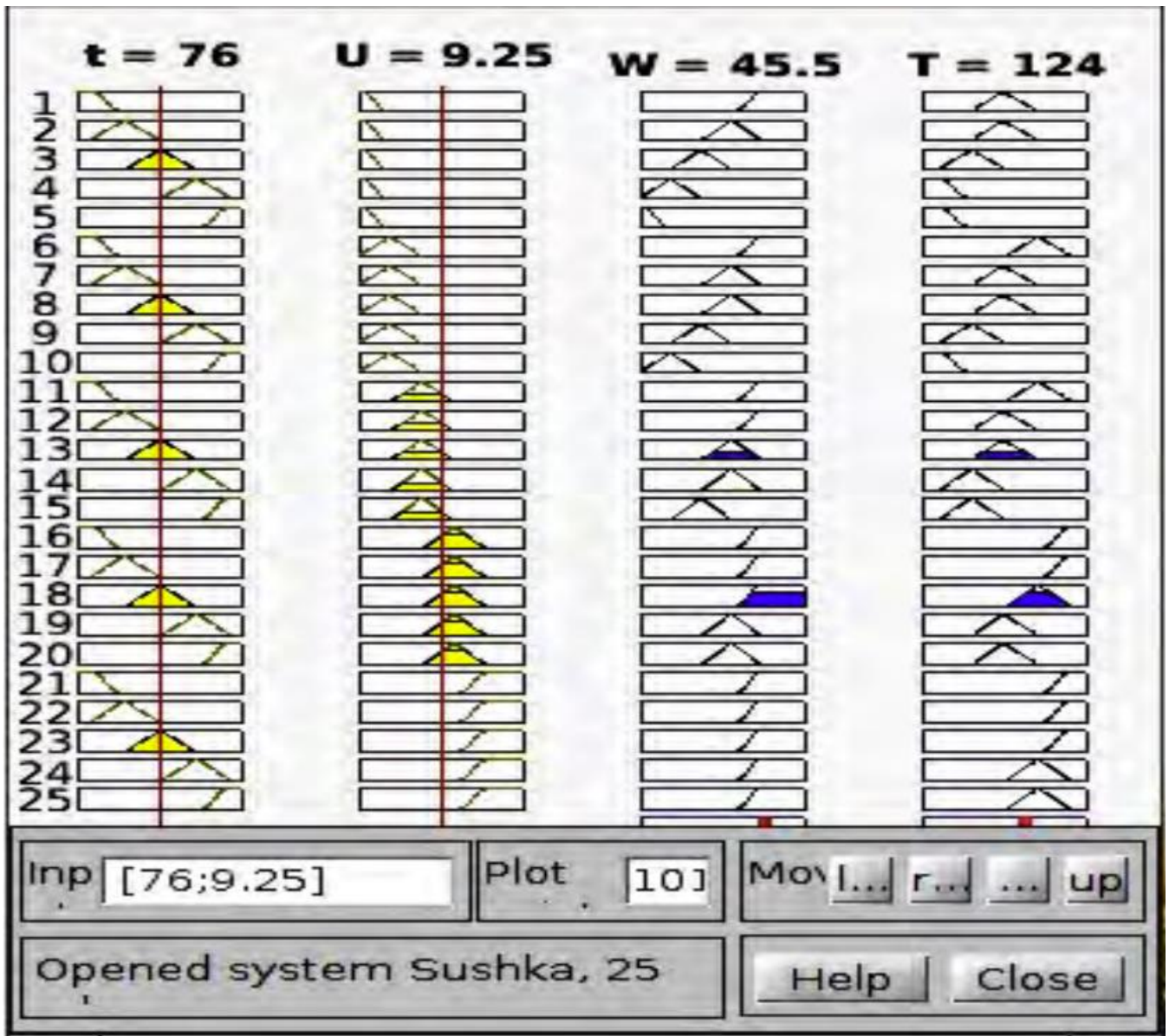
Умови невизначеності в початкових параметрах процесу сушіння призводять до ситуацій, коли традиційні методи є неефективними через відсутність достатньо надійних знань про об'єкт керування. Запропонований підхід і отримані результати, на відміну від існуючих методів, дозволяють вирішити цю проблему стосовно процесу сушіння пиломатеріалів.

Наукова новизна впливає з відмінних особливостей результатів, тобто вперше було запропоновано теоретичний підхід для оцінки параметрів вологості та часу сушіння деревини на основі розмитого моделювання. Іншим елементом наукової новизни є встановлені функціональні залежності вологості та часу сушіння деревини від температури та рівноважної вологості повітря в сушильній камері. Адекватність отриманих залежностей підтверджується результатами експериментальних досліджень.

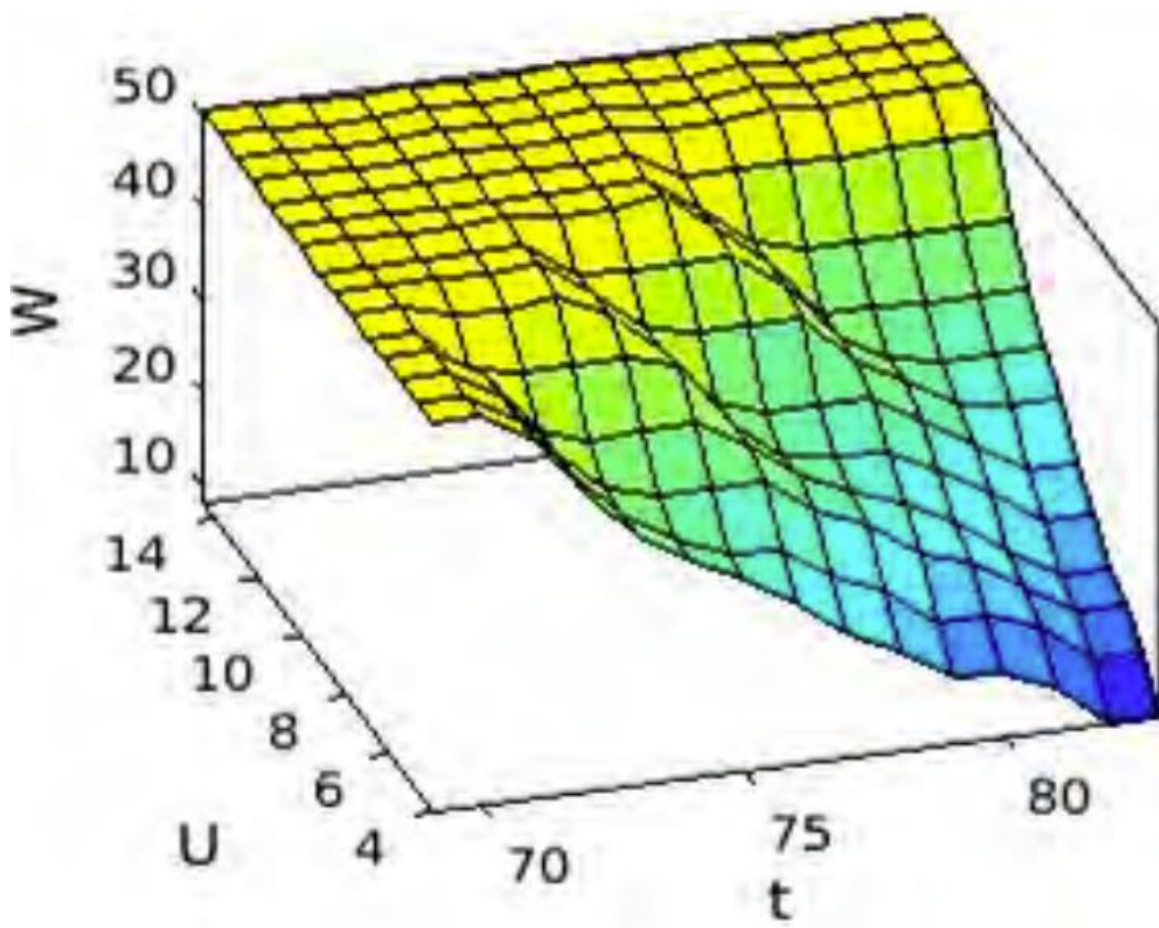
Практична застосовність результатів полягає в можливості створення системи автоматичного керування процесом сушіння деревини. Результати у вигляді функціональної залежності, отриманої з розмитого виведення, необхідні для розробки контролера керування сушильною камерою.



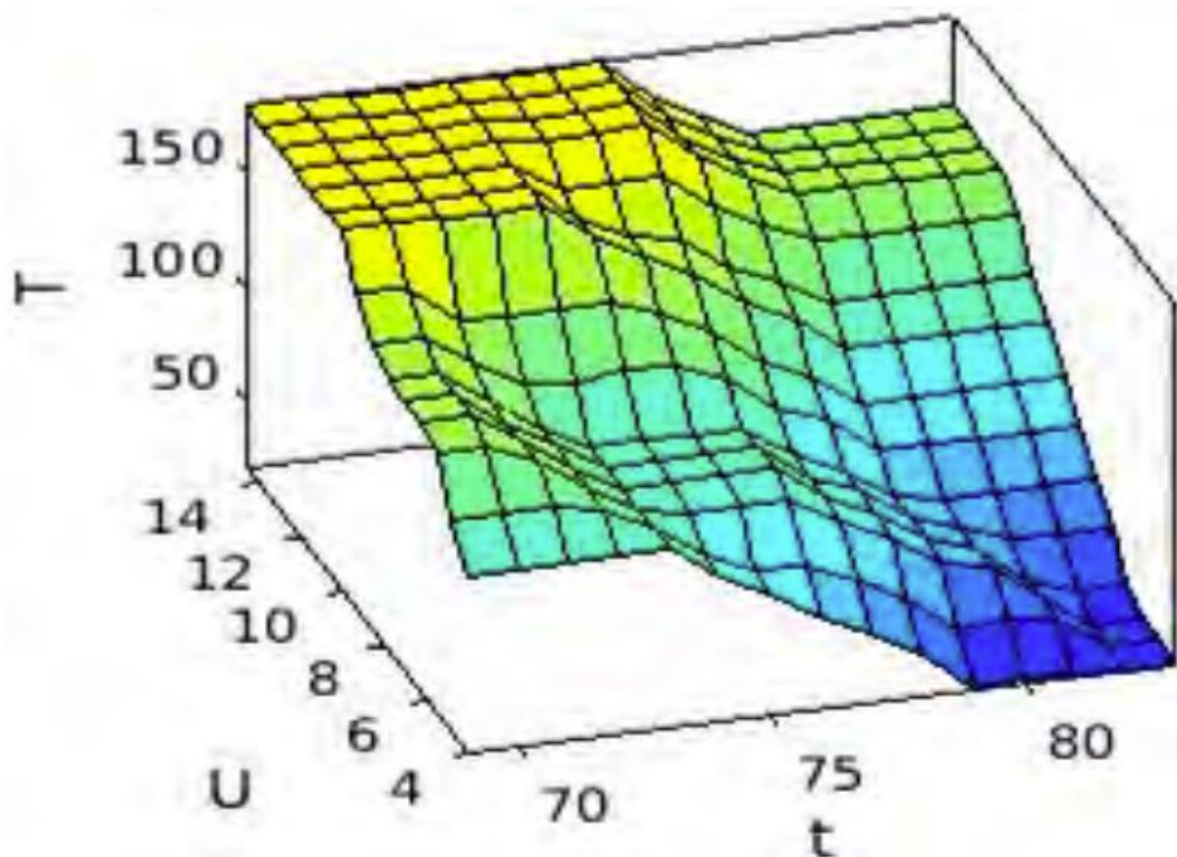
a



b



c



d

Рис. 3. Нечітка функція в середовищі Fuzzy Logic Toolbox застосування Matlab: a - нечітка функція приналежності до лінгвістичної змінної «Temperature t»; b - нечітка функція приналежності до лінгвістичної змінної «рівноважна вологість U»; c - нечітка функція належності змінної «Вологість W»; d - нечітка функція приналежності до лінгвістичної змінної «Час T»

Висновки

Дослідження призвели до таких висновків:

1. На даний час покращення методів дослідження параметрів сушіння деревини неможливе без використання інтелектуальних програмних систем та комп'ютерних інструментів. Запропонована формулювання проблеми розмитого моделювання та впровадження відповідного програмного забезпечення в середовищі Matlab дозволяє ефективно використовувати інформаційні технології в дослідженнях, моделюванні та вдосконаленні сушильних камер.

2. Аналіз досліджень процесу сушіння деревини призвів до виявлення розмитості у вихідних даних, для обґрунтування інформативного встановлення завдання розмитого моделювання, враховуючи невизначеності. Для умов проблем такого роду найбільш підходящим є апарат теорії розмитих множин та її застосувань, зокрема, розмите моделювання. Запропоновані розмиті моделі формують математично коректний апарат для оцінки вологості деревини та часу сушіння, що дозволяє рекомендувати ці результати для використання в практиці проектування систем інтелектуального автоматичного управління сушильними камерами.

3. Запропоновані функції вологості та часу сушіння деревини, побудовані на основі розмитого виведення, враховують основні параметри процесу - температуру в камері, рівноважну вологість повітря, і порівняння результатів моделювання з експериментальними даними показує, що розроблена модель достатньо адекватна та дозволяє впровадити принципово новий підхід до вирішення проблеми покращення сушильного обладнання, підвищення якості пиломатеріалів та зниження енергетичної інтенсивності процесів.

Список використаних джерел

1. П. Ом, Р. Саураб, К. Аніл, П. Трипаті, "Застосування м'яких обчислювальних систем у сонячних сушильних системах", Технологія сушіння сонячною енергією, с. 419-430.
2. З. Сітуморанг, Р. Вардойо, С. Хартаті, Дж. Е. Істіянто, "Графік оптимального нечіткого керування в контролері з концепцією багатомодельності для сонячної енергії", Процес сушіння деревини, том 15, № 2, червень 2009, с. 137-151.
3. С. Штовба, А. Ротштейн, О. Панкевич, "Система нечіткого управління для діагностики тріщин кам'яних конструкцій будівель. Прогрес у обчислювальному інтелекті та навчанні", Методи та застосування. Видавництво Kluwer Academic: Дордрехт, 2002, с. 401-412.
4. "Примітки до випуску MATLAB® та Simulink® для R2008a", доступно за адресою: <http://www.mathworks.com>.
5. Г. А. Харіш, "Метод лінійного програмування на основі покращеної функції оцінки для інтервально-значущих піфагорійських нечітких чисел та їх застосування у прийнятті рішень", Міжнародний журнал невизначеності, нечіткості та систем, заснованих на знаннях, том 26, № 01, 2018, с. 67-80.
6. Ю. Хонгюнь, Лі Цзюньмін, С. Цзярон, В. Ян, "Адаптивне нечітке керування слідкуванням для стохастичних нелінійних систем з часовими затримками входу, використовуючи квадратичними, використовуючи квадратичні функції", Міжнародний журнал невизначеності, нечіткості та систем, заснованих на знаннях, том 26, № 01, 2018, с. 109-142.
7. А. Л. Г. Карнейро, А. К. С. Порто-мол., "Інтегрований підхід для діагностики керувальних клапанів процесу за допомогою нечіткої логіки", Світовий журнал ядерної науки та технологій, том 4, 2014, с. 148-157.
8. Дж.-Дж. Лін, Ц.-Дж. Чуанг, Ц.-Ф. Ко, "Застосування ГА та нечіткої логіки для діагностики поломок у процесі прядіння", Інтелектуальне управління інформацією, том 9, 2017, с. 21-38.

9. "A Decade of Improved Lumber Drying Technology ", Спрингер Линк, 2016.
– Доступ до ресурсу: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40725-016-0034-z>.
10. Гефферт Антон, "Обрані процеси обробки деревини", Дудінце, Словаччина: Транс Тек Публікації, 2015. – 242 с.
11. Йоахім Блас Ганс, "Інженерія деревини - Принципи для проектування", 2017. – 658 с.
12. Джон Девідсон, "Сушка деревини сонячною енергією - Плани включені", 2016. – 55 с.
13. "Кінетика вакуумного контактного сушіння деревини сосни і її вплив на механічні властивості: промислові застосування", Спрингер Линк, 2015. – Доступ до ресурсу: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00231-014-1476-0>
14. Мінеа Васіле, "Промислове використання теплових насосів для сушіння деревини", Нью-Йорк: CRC Press, 2018. – 705с.
15. "Інформація про датчик температури води", 2015. – Доступ до ресурсу: yermoperetvorjuvachi-oporu-z-vyhidnym-sygnalom-4...20ma.
16. "Інформація про панель оператора", 2015. – Доступ до ресурсу: <https://owen.ua/ua/sensorni-panelni-kontrolery/spk1xx> sensorni-panelni-kontrolery-z-ethernet.
17. "Інформація про програмовані логічні контролери (ПЛК)", 2015. – Доступ до ресурсу: <https://owen.ua/ua/programovani-logichni-kontrolery/plk160-m02-programovanyj-logichnyj-kontroler>.
18. "Інформація про пристрій плавного пуску", 2015. – Доступ до ресурсу: <https://owen.ua/ua/pryvidna-tehnika/upp1-prystroji-plavnogo-pusku>.
19. "НПАОП 20.0-1.02-05. Правила охорони праці в деревообробній промисловості", 2013. – Доступ до ресурсу: https://dnaop.com/html/32398_3.html.

20. Романов М.С. Синергетичні основи сталого інноваційного розвитку харчової промисловості: концептуальний підхід, наукове видання / М.С. Романов. – К.: НУХТ, 2019. – 71 с.
21. Кишенько В.Д. Моделювання систем [Електронний ресурс]: конспект лекцій для студ. освіт. ступ. "Магістр" спец. 151 "Автоматизація та комп'ютерно інтегровані технології" спеціал. "Автоматизація та інтелектуальні системи керування технологічними комплексами" ден. форми навч. / В. Д. Кишенько. – К. : НУХТ, 2016. — 205 с.
22. Кишенько В.Д. Інтелектуальні системи. Практикум [Електронний ресурс]: навчальний посібник / В. Д. Кишенько, Ю. О. Самойленко, Я. В. Смітюх. – Київ : НУХТ, 2017. — 67 с.
23. Кишенько В.Д. Інтелектуальні системи: конспект лекцій для студ. спец. 6.092500 "Автоматизовані системи управління технологічними", 6.092500 "Комп'ютерно-інтегровані процеси та виробництва" напряму 0925 "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології" ден. та заоч. форм навч. / В. Д. Кишенько. – К. : НУХТ, 2008. — 133 с.
24. Кишенько В.Д. Ідентифікація та моделювання об'єктів автоматизації: конспект лекцій для студ. спец. 6.092500 "Автоматизовані системи управління технологічними процесами", 6.092500 "Комп'ютерно-інтегровані процеси та виробництва" напряму 0925 ден. та заоч. форм навч. / В. Д. Кишенько. – К. : НУХТ, 2007. — 102 с.
25. Оптимізація процесів переробки сільськогосподарської сировини: монографія / В.О. Мірошник В.О., М.А. Гачковська, В.Д.Кишенько, О.В. Грабовська.– К.:ЦП "Компринт", 2019.– 479 с.
26. Ладанюк А.П. Методологія наукових досліджень: навчальний посібник / А.П. Ладанюк, Л.О. Власенко, В.Д. Кишенько. – К.: Видавництво Ліра-К, 2018. – 352 с.

27. Методи сучасної теорії управління: підручник / А.П. Ладанюк Н.М. Луцька, В.Д. Кишенько, Л.О. Власенко, В.В. Іващук. – К.: Видавництво Ліра-К, 2018. – 368 с.
28. Системний аналіз складних систем управління. Практикум: навчальний посібник / А.П. Ладанюк, Я.В. Смітюх, Л.О. Власенко, Н.А. Заєць, І.В. Ельперін. – К.: НУХТ, 2014. – 157 с. (№37.49 - 02.07.2014)
29. Трегуб В.Г. Автоматизація об'єктів періодичної дії: підручник / В.Г. Трегуб. – Київ: Видавництво Ліра-К, 2017. – 136 с.
30. Автоматизоване управління технологічними процесами. Конспект лекцій до вивчення дисципліни для студентів спеціальності 6.08040 „Інформаційні управляючі системи та технології” напряму підготовки 0804 “Комп’ютерні науки” ден. та заоч. форм навчання/ Уклад.: І.В.Ельперін, С.М.Швед – К: НУХТ, 2007. – 71 с.
31. Гончаренко Б.М. Цифрові системи керування: навчальний посібник / Б.М. Гончаренко, О.П. Лобок, А.П. Ладанюк. – Вінниця: Нова книга, 2007.–160 с.