

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

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри КСУ

\_\_\_\_\_ П.В. Леонтьєв

\_\_\_\_\_ 2022 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА**

зі спеціальності 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

на тему: «Оптимізація режимів сушіння деревини для виробництва меблів»

Керівник :  
к.т.н., доцент

Кулінченко Г.В.

Дипломник:  
студент гр. СУ.м-11

Шубенко М.М.

## ЗМІСТ

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	3
ВСТУП.....	4
1.ПРОЦЕС СУШІННЯ ДЕРЕВИНИ .....	7
1.1 Технологія сушіння деревини .....	7
1.2 Функціональні завдання керування .....	11
2.МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СУШІННЯ ДЕРЕВИНИ .....	15
2.1 Теоретична модель сушіння деревини .....	15
2.2 Експериментальна модель сушіння деревини .....	20
3.РОЗРОБКА ПРОГРАМИ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСУ СУШІННЯ ДЕРЕВИНИ НА ОСНОВІ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ .....	25
4.РОЗРОБКА РЕГУЛЯТОРА ВОЛОГОСТІ ДЕРЕВИНИ В АГРЕГАТІ СУШІННЯ.....	32
5.РОЗРОБКА МНЕМОСХЕМИ SCADA СИСТЕМИ.....	43
6.ВИСНОВКИ.....	48
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	50
ДОДАТОК А.....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
ДОДАТОК Б .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>

## СПИСОК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- КСА – камерний сушильний агрегат
- СУ - система управління
- СК – сушильна камера
- АСУ – автоматизована система управління
- ПЛК – програмований логічний контролер
- МК – мікроконтролер
- НВЧ – надвисока частота
- ПЗ – програмне забезпечення
- АЦП – аналого-цифровий перетворювач
- ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач
- ЧЕ – чутливий елемент
- ПО – панель оператора
- ПЛК-програмно-логічний контролер
- ФСА-функціональна схема автоматизації
- САУ-система автоматизованого управління
- ППП-пристрій плавного пуску
- ІМП-інформаційно-матеріальні потоки
- РМСА-рекурентний метод стохастичної апроксимації

## ВСТУП

Оптимізація технологічних процесів в деревообробній промисловості є одним із значущих факторів для забезпечення стабільності економіки України, враховуючи великі обсяги заготівлі деревини та експорту виробів з дерева, а саме меблів з листяних і хвойних порід. Меблева промисловість завжди користується попитом серед людей та підприємств які мають на меті покращити свої умови життя, або покращити промислову ефективність великих та малих підприємств. Меблі є продуктом кінцевого виробництва, але її якісні властивості цілком залежать від початкового етапу їх реалізації, а саме сушіння деревини. Цим обумовлена актуальність даного проекту, присвяченого оптимізації процесу сушіння деревини в конвективній камері.

Технологічним об'єктом, для якого оптимізується система автоматизації, є камерний сушильний агрегат (КСА). КСА призначений для штабельного сушіння дошок і брусків хвойних порід дерева. Максимальна завантажувальна маса штабелю матеріалу складає 50 куб.м. В якості агента сушіння використовується водяна пара. Матеріал з якого виготовлена камера є залізобетонна конструкція паралелепіпедної форми, у якості теплообмінника виступає калорифер, також камера сушіння оснащена відцентровим вентилятором для рівномірного просушування штабелю, також в камері знаходяться давачі для контролю та технологічним процесом, які в свою чергу передають данні до ПЛК та є головними каналами для управління.

В наш час, сушіння деревини та пиломатеріалів проводиться, в більшості, в камерах сушіння конвективного типу, дана технологія не є повністю оптимізованою для задач виробництва меблів, а сам процес сушіння займає багато часу, але даний спосіб є найбільш бюджетним варіантом для більшості приватних підприємств по деревообробці, а також багато приватних підприємств які працюють вже тривалий час в даній галузі використовують застаріле обладнання і не мають змоги придбати нове. А щоб отримати якісний кінцевий продукт, треба мати якісну сировину, а перший процес який необхідно зробити з деревиною – це термічна обробка, що має на меті отримання кінцевого вмісту

вологи  $\pm 8\%$ , що є необхідною умовою для подальшого виробництва меблів і так як це перший з процесів обробки то і великий відсоток якості кінцевого продукту залежить саме від нього.

Потрібно розуміти, що треба отримати якісний вихідний продукт за мінімальний час та мінімального відсотку браку вихідного матеріалу, все ці параметри задають завдання знаходження оптимуму для забезпечення поставлених цілей реалізації системи.

Саме тому, оптимізація системи сушки деревини для виробництва меблів на основі конвективної сушильної камери, з використанням сучасних засобів автоматизації є актуальною та дозволить вагомо підвищити показники швидкості та якості сушіння, зменшити енерговитрати процесу та зменшити відсоток браку.

Метою даного дипломного проекту є розробити та дослідити адаптивну систему керування сушильною камерою та отримати оптимальні режими роботи камери за різних змін навантаження, яка володітиме технічними показниками наближеними до потрібного оптимуму, високою надійністю та задовольнятиме потрібним критеріям сушіння.

На підставі проведеного аналізу технологічної схеми сушарки та регламенту технологічного процесу визначені задачі оптимізації, запропонована функціональна схема системи автоматизації та вибраний регулятор для її технічної реалізації. Можливість технічної реалізації запропонованої системи автоматизації забезпечена комплектом конструкторської документації.

Завданнями дослідження були такі:

- аналіз видів та будови сушильних камер і параметри, що впливають на його ефективність;
- проаналізувати математичну модель теплообмінної системи;
- проаналізувати систему вентиляції сушильної камери,
- промодельювати теплообмінну систему,
- дослідити режими роботи теплообмінної системи з блоком адаптації,

ПД – регулятором

- розрахувати економічні параметри впровадження досліджень.

Наукова новизна:

- набула подальшого розвитку математична модель теплообмінної системи.

Теоретична значущість:

- проведені дослідження можуть бути використані при моделюванні сушильних камер камерного типу.

# 1. ПРОЦЕС СУШІННЯ ДЕРЕВИНИ

## 1.1 Технологія сушіння деревини

Сушіння пиломатеріалів є енергоємним процесом, зв'язаним зі значною витратою палива для котлів, пару, а також електроенергії, а отже оптимізація автоматики дозволить значно скоротити час сушіння та знизити енергетичні витрати. Сушать деревину у виді пиломатеріалів (дошок, брусів, заготовок), шпону (тонколистового матеріалу), трісок, стружки і волокон. Також поширеним є сушіння круглих лісоматеріалів (деталі опор ліній електропередачі, зв'язки, будівельні деталі). Деревину висушують для того, щоб попередити деформацію кінцевого продукту сушіння; запобігання псуванню і загниванню; збільшення питомої міцності; підвищення властивостей матеріалу для подальшої склеювання та обробки[1].

Після повного аналізу предметної області, розгляду видів сушки деревини та їх реалізації, прийняте рішення, об'єктом оптимізації процесу сушіння вибрати конвективний сушильний агрегат камерного типу періодичної дії у виді типової фронтальної камери з завантаженням 50 куб.м. вилковим навантажувачем.

Конвективне сушіння деревини – найбільш популярний спосіб зневоднення кінцевого продукту, що проходить у відповідних приміщеннях які називають камерами. Зазвичай камерним називають конвективно-тепловий вид сушіння реалізований на різних конструкціях.

Вибір режиму сушки обирається в залежності від виду деревини та кінцевого вмісту вологи, адже тривалість самого процесу при м'якому та форсованому режимах відрізняється приблизно у 2 рази, а також від кінцевого призначення матеріалу, адже режим прямо пропорційний до міцності деревини отриманої в завершенні самого процесу [2].

Міграція повітря в камерах відбувається за допомогою відцентрових, або осьових вентиляторів. Значення швидкості циркуляції повітряних мас по штабелю в сучасних камерах коливається в межах від 1,0 до 5,0 м/с у залежності від породи деревини[3].

Через особливості розвитку фізичних напружень всередині деревини, найбільш важливим є початковий період сушіння матеріалу до середньої вологості 30%. Саме тому режими камерного сушіння побудовані так, що на першому ступені процесу була усунена найбільша частина вологи, а по тривалості цей ступінь займає від 45 до 50% усього терміну сушіння матеріалів. Для пиломатеріалів твердих листяних порід сушіння потрібно проводити в особливих низькотемпературних умовах при середній температурі близької до 40 °С, адже в даному випадку процес підсушування є керованим, а тривалість такого процесу в 6-7 разів менший ніж під час атмосферного сушіння на відкритій місцевості, значно зменшується і ступінь нерівномірності просушування усього штабеля, що є важливим фактором для всього процесу.

За принципом роботи розрізняють камери періодичної і неперервної дії, у кожного виду є як свої переваги так і недоліки. При використанні камер періодичної дії після закінчення сушіння повністю розвантажують і на цей час її виключають та готують до наступного циклу. Камера неперервної дії являє собою тунель із щільними дверима в обох кінцях. Матеріал висихає під час повільного руху штабелів на вагонетках уздовж тунелю, це забезпечує більшу кількість вихідного продукту, але унеможлиблює якість рівномірного просушування матеріалу упродовж руху таких вагонеток [4].

Газові сушарні конвективного типу обігріваються гарячою водою. Головним принципом газових сушарок є використання газового котла для нагрівання води, яка по гілці труб надходить до калорифера де за допомогою відцентрових, або осьових вентиляторів нагріває повітряні маси які забезпечують відведення надлишкової вологи з деревини та напвляють її до заслінок системи вентиляції та виведення надлишку в атмосферу.

При сушінні деревини головним є забезпечення контролю параметрів технологічного процесу, для різних видів деревини розроблено різні параметри потрібної температури та вологості всередині камери які представлені в таблиці 1.1 та таблиці 1.2 [5].



Таблиця 1.1 – Технологічний процес трьохступеневого сушіння листяних порід

Вологість деревини, %	Номер режиму і параметри повітря											
	2		3		4		5		6		7	
	t°C	Δt°C	t°C	Δt°C	t°C	Δt°C	t°C	Δt°C	t°C	Δt°C	t°C	Δt°C
A >30	82	3	75	3	69	3	63	2	57	2	52	2
A 30...20	87	6	80	6	73	6	67	5	61	54	55	4
A <20	108	27	100	26	91	24	83	22	77	21	70	20
Б >30	82	4	75	4	69	4	63	3	57	3	52	3
Б 30...20	87	8	80	8	73	7	67	6	61	6	55	5
Б <20	108	29	100	28	91	25	83	23	77	22	70	21
В >30	82	6	75	5	69	5	63	4	57	4	52	4
В 30...20	87	10	80	9	73	8	67	7	61	7	55	7

Згідно з таблицею вище, впливає те, що в наш час використовується 3 основних моделі сушіння деревини листяних порід, а саме метод А, Б, В які основані на різному відхиленні вологості від заданої. Метод А є найбільш вибагливим до контролю, адже потребує найменше можливе відхиленням від заданої температури, метод Б більш лояльний до відхилення температури від заданої, але в невеликих межах і метод В допускає значне відхилення від заданого температурного діапазону, метод В не підходить для сушіння деревини зі середньою вологістю < 20 %.

Для кожного методу існують свої режими сушіння в залежності від потрібних параметрів міцності та стійкості кінцевого продукту сушіння. При першому режимі сушіння вивід вологи максимальний та швидше ніж при інших режимах, але у кінцевому рахунку отримаємо гірші показники міцності та стійкості, що є небажаним і відсоток браку кінцевого матеріалу буде більший ніж при другому та подальших режимах. При сьомому режимі процес буде проходити повільно, але це буде сприяти рівномірному вивільненню зайвої вологи зі штабелі, що позитивно вплине на кінцевий продукт, який буде мати високі показники міцності. Дані налаштування управління сушильною камерою

не є кінцевими, адже клієнт має можливість ввести свої параметри в залежності від бажаного результату[6].

Широкий спектр методів та режимів забезпечує високу вірогідність отримання потрібного результату не залежно від зовнішніх завад та людського фактору при сушінні деревини в конвективних камерах.

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

Таблиця 1.2 – Технологічний процес сушіння в залежності від товщини завантажувальної деревини

Основною вимогою до сушильних установок є забезпечення рівномірного сушіння матеріалу задля отримання продукції високої якості в усьому об'ємі сушильної камери при високих техніко-економічних показниках: максимальних габаритах самої камери та мінімальних витрат на побудову сушарки, мінімальних затрат електроенергії та теплоти на висушування сировини, простому ремонті обладнання та інтуїтивно зрозумілого інтерфейсу керування[7].

Рівномірність процесу сушіння є значущим параметром особливо для установок, сушіння матеріалів, в яких початкова вологість може змінюватись в широких діапазонах від 0 до 90%. Для зменшення тривалості сушіння важливо

контролювати та насичувати процеси зовнішнього теплообміну, для багатьох матеріалів насичення процесів внутрішнього переносу теплоти і маси[8].

Технологічний процес висушивання лісових заготовок ілюструє технологічний алгоритм робочого циклу КСА.

**Перший етап** - прогрівання пиломатеріалу, під цього етапу волога з пиломатеріалу не виходить, але при цьому та волога, що знаходиться в зовнішніх зонах, нагрівається краще, ніж та, що у внутрішніх, і це викликає поштовх її зовні всередину. Якщо при цьому ми не уповільнимо вологовіддачу з поверхні, то зовнішні шари пересохнуть і можливий брак продукції. Тому прогрівати штабель пиломатеріалів треба обов'язково при високій відносній вологості агента сушки, щоб звести вологовіддачу до потрібного мінімуму.

**Другий етап** – відвід вологості, сушка деревини від високої початкової вологості до так званої критичної, що дещо перевищує значення вологості межі гігроскопічності (межі насичення волокон) 28-30 %. На цьому етапі з деревини видаляється більшість вільної волога, і процес сушки протікає найбільш інтенсивно, можливе кондиціонування камери.

**Третій етап** – контрольна сушка, сушка від критичної вологості до заданої кінцевої. На цьому етапі з деревини видаляється пов'язана волога. Процес йде набагато повільніше, ніж на другому етапі, але при цьому є більш контрольованим та задаючим подальше призначення пиломатеріалу який потрібно було висушити.

**Четвертий етап** - охолодження пиломатеріалів, в деяких випадках йому передують кондиціонування[9].

## 1.2 Функціональні завдання керування

Сушіння деревини – це процес в якому відбувається зменшення відсотка вологи в конопляній сировині до необхідного рівня. Отже для початку необхідно 3 компоненти: Камера сушіння, Котел який буде генерувати гаряче повітря для сушіння, та Система вентиляції, щоб позбутися відпрацьованого пару. Структурна схема виглядатиме так рис. 1.1



Рисунок 1.2 – Функціональна схема автоматизації

Детально з Функціональною схемою автоматизації можна ознайомитися в додатку А. Тепер потрібно виділити контури регулювання, найважливішим параметром при сушінні деревини є вологість, бо саме її ми виводим з сировини для сушіння, отже і головними контурами керування будуть ті що пов'язані з вологою . Згідно ФСА маємо два основних контури: подачі гарячої пари(рис. 1.3) та виводу відпрацьованої пари(рис. 1.4) .

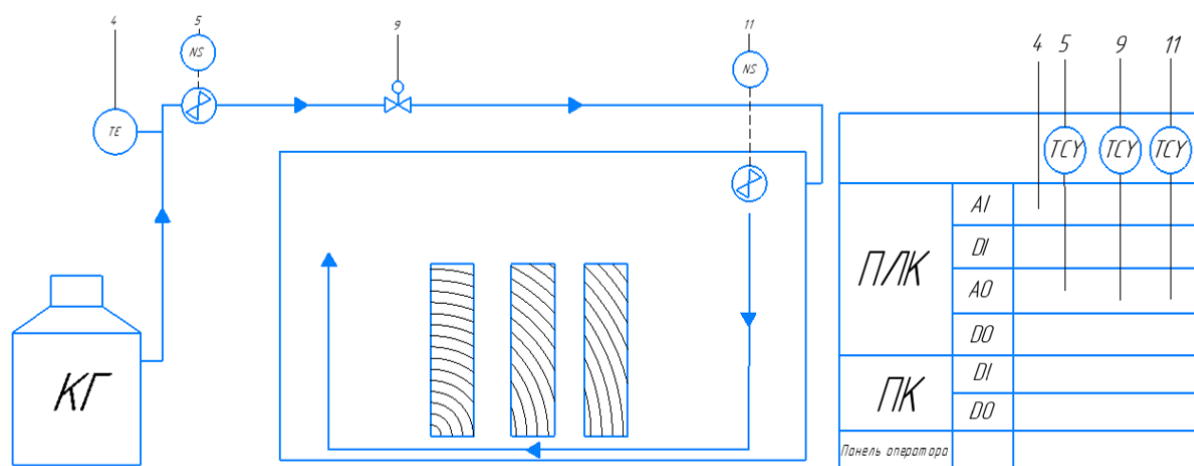


Рисунок 1.3 – Контур подачі гарячої пари

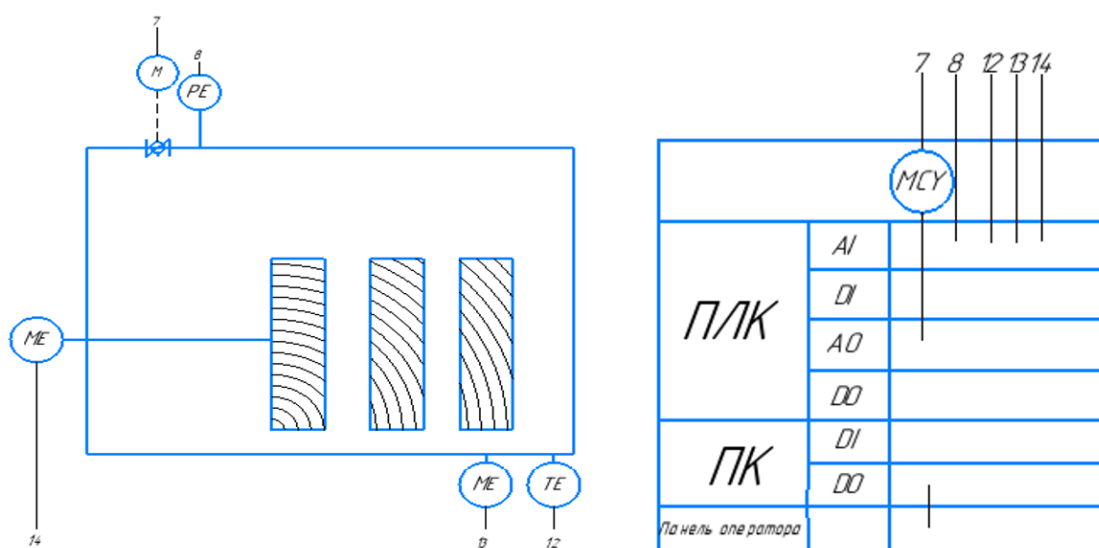


Рисунок 1.4 – Контур виводу відпрацьованої пари

Так як ці два контури взаємопов'язані то і опис їх роботи буде одночасний на двох прикладах: коли треба підвищити рівень вологості або температури, так і навпаки зменшити. При ситуації коли необхідно підвищити рівень параметрів камери сушіння необхідно більше відкрити клапан подачі пару і закрити повністю, або частково вентиляційну заслінку, щоб не втрачати тепло. При ситуації коли необхідно зменшити рівень параметрів відбуваються значення протилежні попередній ситуації. Частково або повністю закривається клапан подачі пару і в той же час сильніше відкриваємо витяжку. Головне пам'ятати що є межі регулювання параметрів які не можна перевищувати та робити занадто малими, бо в такому випадку отримаємо не якісний кінцевий продукт.

Як основний параметр для розробки моделі був обраний параметр вологість. Для виготовлення меблів потрібно, щоб вміст вологості в дошці був у межах 8%, це і буде нашим критерієм оптимізації, отримати  $\pm 8\%$  вологості при найменших енергетичних витратах. Для цього Треба підтримувати похідну швидкості випаровування постійною, тоді волога буде виходити рівномірно, не швидко, що краще для якості матеріалу, але і не повільно, бо для виробника погано, оскільки треба багато витратити енергії, висновок, треба застосовувати регулятор та знайти і підтримувати такий режим сушіння, щоб мінімально витратити паливо, але щоб це й процес ішов якомога швидше, в той же час так, щоб в деревині не виникало механічних напружень.

Так як ці два контури взаємопов'язані, то їх можна описувати разом та робити оптимізацію для багатоконтурної системи регулювання сушіння деревини, яка представлена в розділі 4.

## 2. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СУШІННЯ ДЕРЕВИНИ

### 2.1 Теоретична модель сушіння деревини

Запишемо рівняння математичної моделі для одиничної дошки згідно з рис.2.1. Точку відліку системи координат розташуємо в довільній точці на площині симетрії дошки. Вісь координати  $x$  направимо перпендикулярно до поверхні дошки з найбільшою площею. Координатну площину  $(y, z)$  розташуємо перпендикулярно до осі  $x$ . Початковий момент сушіння приймемо  $\tau = 0$ . Стан сировини під час сушіння описується двома основними змінними: температурою  $T$  і вологовмістом  $U$ . Зміна температури і вологовмісту в процесі сушіння описується системою диференціальних рівнянь тепло і масопереносу, поданих в теорії сушіння.

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial \tau} = D \nabla^2 u + D \delta_m \cdot \nabla T \\ \frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 T + \frac{\varepsilon r}{c} \frac{\partial u}{\partial \tau} \end{cases} \quad (1)$$

де  $\nabla$  – оператор Лапласа;

$a$  – коефіцієнт температуропровідності,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;

$D$  – коефіцієнт молекулярної дифузії,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;

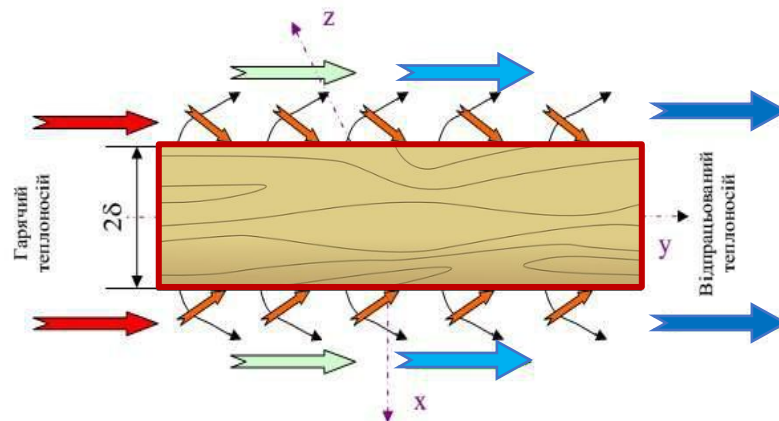
$\delta m$  – термоградієнтний коефіцієнт;

$\varepsilon$  – коефіцієнт фазового перетворення;

$r$  – питома теплота пароутворення,  $\text{кДж}/\text{кг}$ ;

$c$  – масова теплоємність,  $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ .

Схема конвективного сушіння деревини наведено на Рис 2.1.



## Рисунок 2.1 - Схема конвективного сушіння деревини

Так як волога переміщується в деревині переважно вздовж осі  $x$  і випаровується під дією сушильного агента, а перенесення вологи по осях  $y$  і  $z$  незначне, прийmemo, що температура і вологовміст не залежать від координат  $y$  і  $z$ . Тоді рівняння (1) набувають вигляду

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial T} = D \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + D \delta_m \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \\ \frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\varepsilon r}{c} \frac{\partial u}{\partial \tau} \end{cases} \quad (2)$$

Врахуємо залежність коефіцієнтів від часу. Тоді система рівнянь переписеться так

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial T}(x, \tau) = D(\tau) \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}(x, \tau) + D(\tau) \delta_m(\tau) \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}(x, \tau) \\ \frac{\partial t}{\partial \tau}(x, \tau) = a(\tau) \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}(x, \tau) + \frac{\varepsilon(x, \tau) r}{c(\tau)} \frac{\partial u}{\partial \tau}(x, \tau) \end{cases} \quad (3)$$

Верхнє рівняння системи можна перетворити в еквівалентний вигляд, з врахуванням, що  $\varepsilon(x, \tau) \neq 1$  (рівність означає, що волога з поверхні дошки не випаровується).

$$\frac{\partial u}{\partial T}(x, \tau) = \frac{D(\tau)}{1 - \varepsilon(x, \tau)} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}(x, \tau) + \frac{D(\tau) \delta_m(\tau)}{1 - \varepsilon(x, \tau)} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}(x, \tau)$$

(4)

Запишемо умови однозначності. В процесі сушіння змінюються теплофізичні характеристики продукту, прийmemo, що вони лінійно залежать від температури.

$$\begin{aligned} a &= a_0(u) + k_a T, \\ \lambda &= \lambda_0(u) + k_\lambda T, \\ c &= c_0(u) + k_c T, \end{aligned} \quad (5)$$

де коефіцієнти  $a_0$ ,  $k_a$ ,  $\lambda_0$ ,  $k_\lambda$ ,  $c_0$ ,  $k_c$  набувають відповідних значень для кожного конкретного виду деревини.

В момент початку сушіння ( $\tau = 0$ ) вважатимемо температуру і вологовміст сталими.

$$T(x, 0) \equiv T_0, \quad u(x, 0) \equiv u_0. \quad (6)$$

Вважаючи, що площа торця деревини набагато менша від фронтальної площі, граничні умови запишемо для  $x \pm \delta$ , тобто фактично розглядатимемо задачу для нескінченної пластини товщиною  $2\delta$ .



Оскільки ефект бародифузії і термовологопровідності стає помітним тільки за температур більших від 100 °С, знехтуємо їх вкладом і запишемо граничні умови третього роду для рівняння масоперенесення

$$-\lambda_m(\delta, \tau) \frac{\partial u}{\partial x}(\delta, \tau) = \beta(\delta, \tau) \frac{\rho_s \rho_w (u(\delta, \tau) + l)}{\rho_w + \rho_s u(\delta, \tau)} (u(\delta, \tau) - d_{cp}) \quad (7)$$

де  $\lambda_m$  – коефіцієнт масопровідності, (кг/(м·с));

$\beta$  – коефіцієнт масовіддачі, (м/с);

$\rho_w$  і  $\rho_s$  – густина вологи і абсолютно сухої речовини відповідно, (кг/м<sup>3</sup>);

$d_{cp}$  – вологовміст оточуючого середовища, (кг/кг).

З міркувань симетрії отримаємо «внутрішню» граничну умову

$$\frac{\partial u}{\partial x}(0, \tau) = 0 \quad (8)$$

Аналогічно запишемо граничні умови для рівняння теплопередачі

$$\begin{aligned} -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}(\delta, \tau) + a(T(\delta, \tau) - T_{cp}) = \\ = \beta(\delta, \tau) r \frac{\rho_s \rho_w (u(\delta, \tau) + l)}{\rho_w + \rho_s u(\delta, \tau)} \varepsilon(\delta, \tau) (u(\delta, \tau) - d_{cp}) \end{aligned} \quad (9)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності, (Вт/(м·К));

$a$  – коефіцієнт тепловіддачі, (Вт/(м<sup>2</sup>·К)).

$$\frac{\partial T}{\partial x}(0, \tau) = 0 \quad (10)$$

Конкретизуємо вигляд рівнянь на різних стадіях процесу сушіння.

На першій стадії сушіння (при постійній швидкості) і тепловий потік, і потік маси від деревини є константами, адже на поверхні є вільна волога, а вихід вологи можна прийняти як адіабатний.

Враховуючи це, а також початкові і граничні умови, задачу можна розв'язати чисельно, розклавши в ряд  $T(x, \tau)$  і  $u(x, \tau)$ , відкинувши складові зі степенями більше 2 як малі, і в силу симетрії задачі по  $x$  (пластина симетрична), отримаємо

$$\begin{cases} T(x, \tau) \approx T_2(x, \tau) = T_0(\tau) + T_2(\tau)x^2 \\ u(x, \tau) \approx u_2(x, \tau) = u_0(\tau) + u_2(\tau)x^2 \end{cases} \quad (11)$$

Тоді рівняння теплопереносу з початковими умовами матиме вигляд

$$\begin{cases} \frac{\partial T_0}{\partial \tau}(\tau) + \frac{\partial T_2}{\partial \tau}(\tau)x^2 = 2a(\tau)(T_2(\tau) + 6T_4(\tau)x^2) \\ T_0(0) + T_2(0)x^2 = T_0 \end{cases} \quad (12)$$

Рівняння масопереносу

$$\begin{cases} \frac{\partial u_0}{\partial \tau}(\tau) + \frac{\partial u_2}{\partial \tau}(\tau)x^2 = \frac{2D(\tau)}{1-\varepsilon(x,\tau)}(u_2(\tau) + 6u_4(\tau)x^2) \\ \quad + \frac{2D(\tau)\delta_m(\tau)}{1-\varepsilon(x,\tau)}(T_2(\tau) + 6T_4(\tau)x^2) \\ u_0(0) + u_2(0)x^2 = u_0 \end{cases} \quad (13)$$

В обидві системи необхідно додати також граничні умови (8) і (7) відповідно. Прирівнювання коефіцієнтів при однакових степенях  $x$  і з допущенням, що  $\varepsilon(x, \tau) = 0$  дає системи рівнянь

$$\begin{cases} \frac{\partial T_0}{\partial \tau}(\tau) = 2a(\tau)T_2(\tau) \\ \frac{\partial T_2}{\partial \tau}(\tau) = 12a(\tau)T_4(\tau) \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial u_0}{\partial \tau}(\tau) = 2D(\tau)u_2(\tau) + 2D(\tau)\delta_m(\tau)T_2(\tau) \\ \frac{\partial u_2}{\partial \tau}(\tau) = 12D(\tau)u_4(\tau) + 12D(\tau)\delta_m(\tau)T_4(\tau) \end{cases} \quad (15)$$

За стадію часу сушіння з однією постійною швидкістю збільшення коефіцієнта температуропровідності, а за рахунок зростання температури частково повертається зменшенням за рахунок зниження вологи в деревині. Так як на першому етапі випаровування адіабатне, то значення  $T_{cp}$  і  $u_{cp}$  постійні, а  $T_{cp} = T_m$ , де  $T_m$  – температура мокрого термометра. На другій стадії сушіння температура починає підвищуватися, поки не вирівняється по перерізу деревини. Тоді ліва частина рівняння (1) тотожно рівна 0. Підставляючи в рівняння (2) і в граничні умови відомі значення констант задачу можна вирішити чисельно. Від цього впливає, що початкові умови для рівняння другого періоду сушіння прогнозуються з розв'язку рівняння для першого періоду. Наприкінці другого періоду температура стала і дорівнює температурі сухого термометра сушильного агента, а завдання зводиться до побудови функції вологовмісту. Так як температура вирівнюється по всій її товщині, складова  $\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$  з рівняння масопереносу зникне, а рівняння матиме вигляд

$$\frac{\partial u}{\partial \tau}(x, \tau)\varepsilon(x, \tau) = D(\tau)\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}(x, \tau) + \varepsilon(x, \tau)\frac{\partial u}{\partial \tau}(x, \tau)$$

(16)  
Або

$$\frac{\partial u}{\partial \tau}(x, \tau) = \frac{D(\tau)}{1-\varepsilon(x, \tau)} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}(x, \tau)$$

(17)

Початкові умови матимуть вигляд

$$u(x, \tau_0) = C_0 + C_2 x^2$$

(18)

де  $C_0$  і  $C_2$  можна знайти з середнього значення, визначеного експериментально

Запишемо завдання масоперенесення зроблених припущень

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t}(x, \tau) = A \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}(x, \tau) \\ u(x, \tau_0) = C_0 + C_2 x^2 \\ \frac{\partial u}{\partial x}(\delta, \tau) = B \cdot u(\delta, \tau) \end{cases}$$

(20)

Отримана система рівнянь (20) є крайовою задачею третього роду для умов теплопровідності. Скористаємось окремим випадком її розв'язку, справедливим для  $Bi \gg 1$ . Для окресленої першої стадії процесу сушіння деревини чисельний розв'язок побудовано за допомогою математичного пакета Mathcad систем рівнянь (12) і (13), дає часову залежність функцій температури і вологовмісту близької до лінійної. Для перевірки точності та відповідності математичної моделі співставимо її результати з експериментальними, описаними в [12]. Для другої стадії, підставляючи значення констант в систему (20) можна побудувати

криву сушіння, подану на рис. 2.2 разом з лінійною апроксимацією результатів експерименту [12].

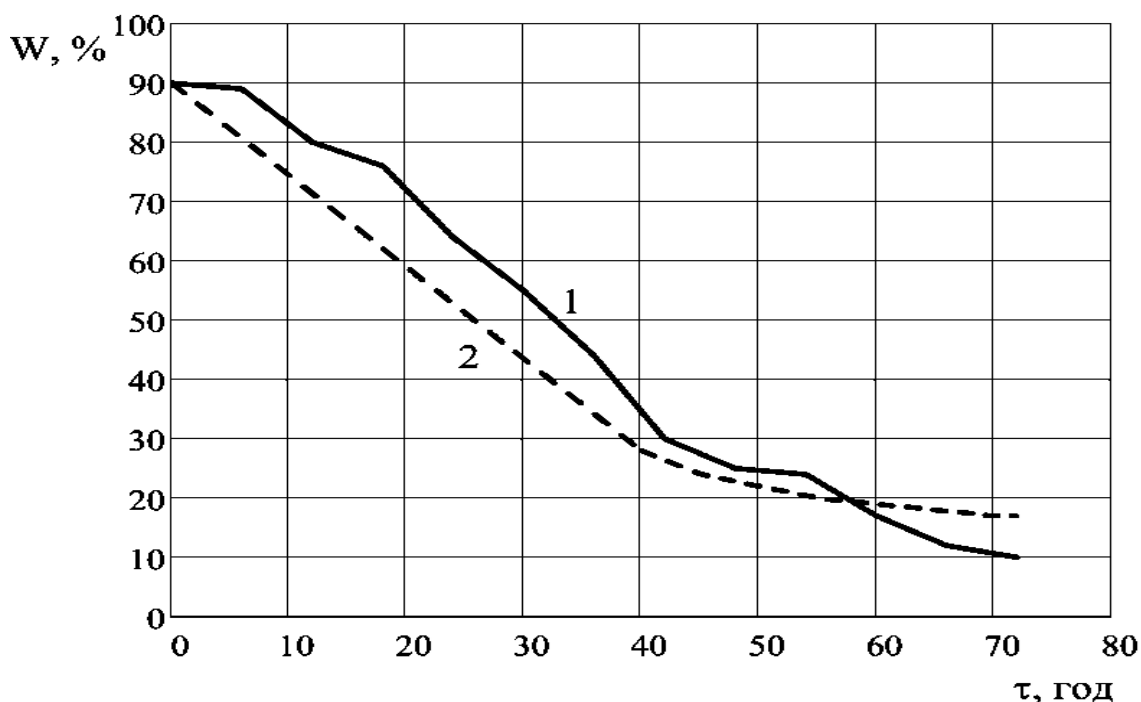


Рис 2.2 - Функція зміни вологовмісту деревини в процесі сушіння 1 - експериментальні дані, 2 – результати розрахунків

## 2.2 Експериментальна модель сушіння деревини

Експериментальну модель наведено для визначення раціонального режиму сушки деревини з використанням регресійної моделі, яка має вигляд:

$$V_k = a_0 + a_1 \cdot V_n + a_2 \cdot T_c \quad (21)$$

$V_k$  – кінцева вологість деревини;

$V_n$  – початкова вологість деревини;

$T_c$  – час сушіння деревини;

$a_0, a_1, a_2$  – коефіцієнти регресії.

Кінцева вологість деревини залежить від початкової її вологості і часу сушки. Результати пасивного експерименту проведеної сушки 20 партій деревини в одному і тому самому сушильному агрегаті приведено в таблиці 2.1, візуалізацію даних було приведено за допомогою програми Microsoft Excel.

	A	B	C
1	Кінцева вологість	Початкова вологість	Час сушіння
2	8	23	16
3	7	20	13
4	7	18	15
5	7	22	15
6	7	19	15
7	7	15	13
8	6	13	8
9	7	21	14
10	8	23	16
11	6	14	8
12	7	16	13
13	6	12	6
14	7	15	13
15	7	21	14
16	6	15	7
17	8	12	16
18	8	22	15
19	7	14	9
20	7	17	14
21	6	13	8

Таблиця 2.1 – Дані результатів 20-ти партій сушки[10].

Сушіння проводилося в максимально схожих умовах за погодніми характеристиками, а також при мінімальному відхиленню від середнього значення вологості та температури навколишнього середовища. Ці партії сушіння проводилися з однією категорією деревини, та одного об'єму початково завантажувального штабелю.

Проведена регресивна статистика представлена у вигляді в таблиці 2.2

Регресивна статистика				
Множинна	0,891273832			
R-квадрат	0,794369044			
Нормован	0,770177167			
Стандартн	0,329026823			
Спостереж	20			
Дисперсний аналіз				
	df	ss	ms	f
Регресія	2	7,109602943	3,554801471	32,83619
Залишок	17	1,840397057	0,10825865	
Сумма	19	8,95		

Таблиця 2.2 – Підсумки регресивного аналізу

Рівняння парної лінійної регресії отриманою на основі таблиці 2 має вигляд:

$$V_k = 4,45 + 0,06 \cdot V_n + 0,11 \cdot T_c \quad (22)$$

- $R^2 = 0,794$ , отже, 79,4 % дисперсій значень вологості пояснюється впливом чинників;
- розрахункове значення критерію Фішера дорівнює 32,836;
- критичне значення критерія Фішера при  $m_1 = 2$ ;  $m_2 = 17$ ;  $\alpha = 0,041$ ;  $F_{кр} = 32,8$ .

Отже, рівняння регресії в цілому статистично значиме, тобто є достатня відповідність з початковими даними проведеного експерименту;

- коефіцієнт множинної кореляції дорівнює 0,89. Він служить критерієм оцінки точності функції регресії.[10]

Дисперсійний однофакторний аналіз застосовується у різноманітних дослідженнях зміни результативної ознаки під впливом зміни фактора, його умов або градацій. Ідея математичних перетворень дисперсійного методу виявляється в тому, щоб зіставити дисперсії за факторами із дисперсією усіх інших значень, отриманих в експерименті, що далі служить підґрунтям для критерію Фішера.

F-тестом або критерієм Фішера — прийнято сприймати будь-який статистичний критерій, тестова статистика якого при виконанні нульової гіпотези має розподіл Фішера (F-розподіл). Статистика тесту так чи інакше зводиться до відношення вибіркової дисперсії (сум квадратів, ділених на «ступеня свободи»). Щоб статистика мала розподіл Фішера, необхідно, щоб чисельник і знаменник були незалежними випадковими величинами і відповідні суми квадратів мали розподіл  $\chi^2$  квадрат. Для цього потрібно, щоб дані мали нормальний розподіл. Крім того, передбачається, що дисперсія випадкових величин, квадрати яких підсумовуються, однакова. Тест проводиться шляхом порівняння значення статистики з критичним значенням відповідного розподілу Фішера при заданому рівні значимості.

Коефіцієнт множинної кореляції характеризує інтенсивність кореляції (або ступінь тісноти зв'язку) між залежною змінною та кількома незалежними змінними. Його величина не може бути меншою, ніж абсолютна величина будь-якого коефіцієнта простої чи частинної кореляції. Множинний коефіцієнт кореляції завжди має додатний знак і змінюється від 0 до 1. В кореляційному аналізі можна визначити, та й встановити, на скільки процентів варіація результативної ознаки обумовлена впливом кожного фактора зокреми або усіх факторів разом взятих.

Дану модель регресії можна використовувати для ухвалення рішень і прогнозування. Використання отриманого рівняння регресії дозволить по необхідній кінцевій вологості  $V_k$  і початковій вологості  $V_n$  розрахувати час сушіння  $T_c$ , що буде розглянуто далі

$$T_c = \frac{(V_k - a_0 - a_1 \cdot V_n)}{a_2} \quad (23)$$

Визначення часу сушіння дозволяє отримати задану вологість сухої деревини, і не витратити зайві енергоресурси, пересушуючи матеріал. В процесі сушіння дуже важливо підтримувати задану температуру. Експериментальні дані входять в основу програми по визначенню часу сушіння по введеним даним початкової та кінцевої вологості представлену в розділі 3.





### 3. РОЗРОБКА ПРОГРАМИ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСУ СУШІННЯ ДЕРЕВИНИ НА ОСНОВІ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

Нечітка логіка була розроблена для формалізації людських здібностей до неточних або наближених міркувань, які дозволяють найправильніше описувати ситуації з невизначеністю. У класичній логіці проблема невизначеності в силу прагматичності та математики ні як не вирішується, тому, що всі міркування та висловлювання можуть бути "істиною" (І, 1) або "брехнею" (Б, 0), що еквівалентно людському «так» чи «ні». Однак людиною можуть бути прийняті різні рішення такі як «Можливо так», «Не можу сказати», «Можливо ні», «Вже ні», «Ще ні», «Скоро так» та інші, тому істинність міркувань у нечіткій логіці оцінюється як певний ступінь, який може приймати різні значення, відмінні від «І» або «Б». Для можливості вираження невизначених значень необхідно побудувати якусь логічну структуру, яка дозволить будь-якому вислову набувати справжнє значення, яке відрізняється від бінарного «І» або «Б». Існує деякий підхід розширення множини істинних значень  $\{I, B\}$ , який дозволить висловлюванням набувати додаткових різних значень істинності.

Л. Заде запропонував варіант визначення нечіткої логіки безліч справжніх значень висловлювань узагальнювати до дійсних інтервалів значень  $[0,1]$ , тим самим висловлювання може набувати будь-якого значення з заданого інтервалу. Отримане чисельне значення  $i$  є кількісна оцінка ступеня істинності висловлювання, про який точно не можна сказати ставитися воно до істини чи брехні. Такий підхід до ситуації дозволив побудувати логічну ієрархічну схему, за якою можна шукати міркування з невизначеністю і оцінювати істинність виразу у діапазоні від 0 до 1, наприклад, таких як «Швидкість сушіння деревини досить низька» та інші. У системі нечіткого керування та нечіткої логіки центральне місце займає нечіткий висновок (кінцевий результат міркування). Система нечіткого висновку – це процес отримання інших нечітких висновків про необхідне управління системою на основі нечітких умов або передумов, що мають на меті продемонструвати інформацію про поточний стан системи. Цей процес поєднує у собі всі основні концепції теорії нечітких множин: функції

приналежності, лінгвістичні змінні, нечіткі логічні операції, методи нечіткої імплікації та нечіткої композиції. Системи нечіткого висновку створені для реалізації процесу нечіткого висновку і є концептуальним базисом всієї сучасної нечіткої логіки. Системи нечіткого виведення дозволяють вирішувати завдання автоматичного управління, класифікації даних, розпізнавання образів, прийняття рішень, машинного навчання та багато інших. Архітектура нечіткого управління заснована на заміні класичної системи управління системою нечіткого управління, як якою використовуються системи нечіткого виводу (рис. 3.1)[11].

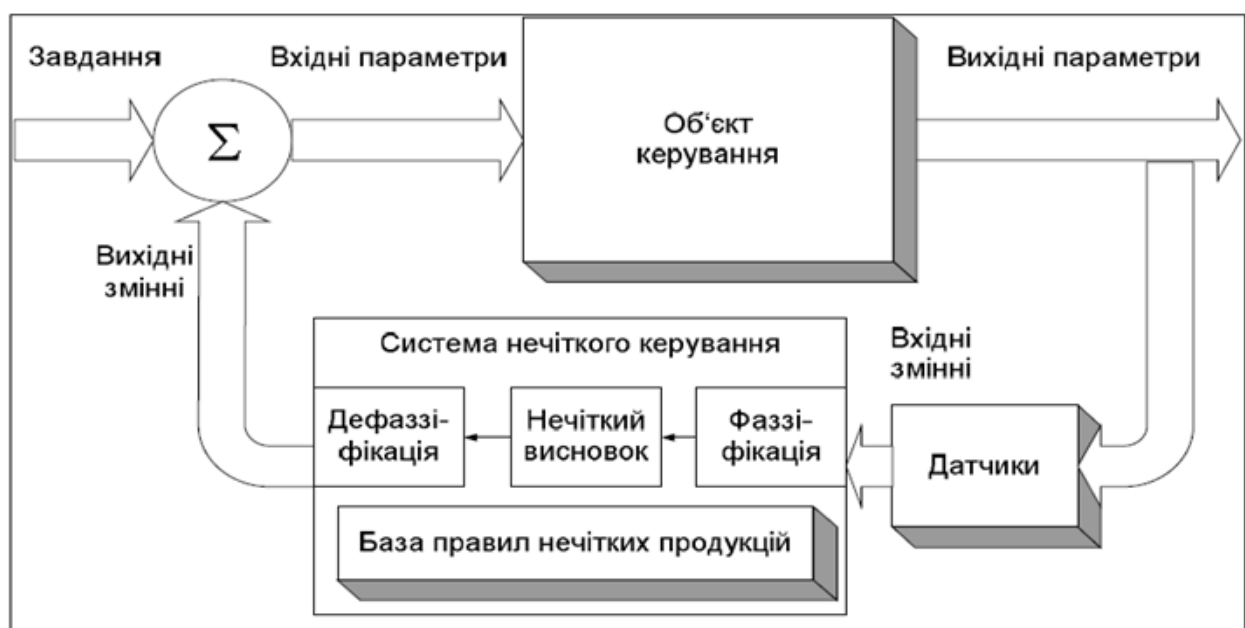


Рисунок 3.1 – Структура нечіткого управління

Для формування системи нечіткого висновку необхідно сформувати базу правил нечітких термів та реалізовувати нечіткий висновок висновків на основі посилок або умов, представлених у формі нечітких лінгвістичних висловлювань. Це все призводить до формування нечітких закономірностей які будуть базисом для усього процесу управління обраним об'єктом, тому це важливий етап всього процесу.

Основними етапами нечіткого висновку є:

1. Фаззифікація вхідних змінних – це етап виконання нечіткого виведення та процедура знаходження значень функцій належності нечітких множин (термів) на основі звичайних вхідних даних  $u_A^i(x_j)$

2. Агрегування функцій власності знаходиться  $w_i = u_A^i(x_j)$ . Агрегування є процедурою визначення ступеня істинності умов щодо кожного з правил системи нечіткого висновку.
3. Формування сигналів за кожним правилом  $y_i(x) = p_{i0} + \sum_{j=1}^N p_{ij}x_j$
4. Акумулявання висновків – це множення сигналів  $y_i(x)$  на ваги  $w_i$  (знаходження функції приналежності для кожної з вихідних лінгвістичних змінних).
5. Дефазифікація - це обчислення виваженого середнього. Дефазифікація визначається  $x = \sum_{i=1}^n w_i * x_i$
6. Вивід результату

Спираючись на експериментальні дані представлені в таблиці 2.1 та статистичний аналіз представлений в таблиці 2.2 розроблено програму на базі нечіткої логіки для визначення часу всього процесу сушіння по вхідним даним початкової та кінцевої вологості деревини, результати звірено з еталонними визначеними з формули (23).

Програму розроблено в пакеті Fuzzy Logic Toolbox в MATLAB/Simulink, який широко застосовується для дослідження та відлагодження розроблених алгоритмів роботи ПС на основі нечіткої логіки.

Першим етапом написання програми розроблено набір входів та виходів в Fuzzy Logic Designer, на вході у нас значення початкової та кінцевої вологості, а на виході ми отримуємо час сушіння. В програмі використано алгорит Мамдані, адже він підходить до нашого випадку.

Алгоритм Мамдані:

Нехай база знань містить лише два нечіткі правила вигляду:

Правило1: якщо  $x \in A1$  і  $y \in B1$ , тоді  $z \in C1$ ,

Правило2: якщо  $x \in A2$  і  $y \in B2$ , тоді  $z \in C2$ ,

де  $x, y$  – імена вхідних змінних,

$z$  – ім'я змінної висновку,

$A1, A2, B1, B2, C1, C2$  – деякі нечіткі множини, задані функціями

приналежності  $( ) x \mu A1, ( ) x \mu A2, ( ) y \mu B1, ( ) y \mu B2, ( ) z \mu C1, ( ) z \mu C2$

при цьому чітке значення  $z_0$  необхідно визначити на основі наведеної інформації і чітких значень  $x_0, y_0$ .

Візуально процес налаштування інтерфейсу представлено на рис. 3.2.

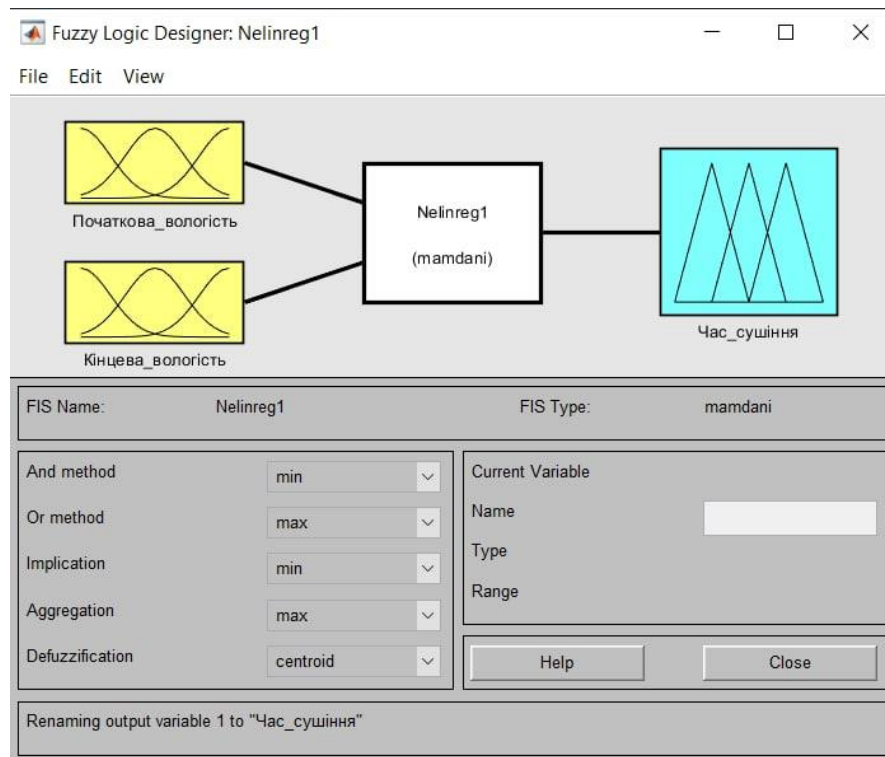


Рисунок 3.2 – Входи та виходи програми

Далі розробляємо базу правил на основі експериментальних даних, яка складається з 10 правил. Основним правилом виводу в класичній логіці є правило *modus ponens*, згідно з яким ми можемо судити про істинність висловлювання  $B$  по істинності висловлювання  $A$  і імплікації  $A \rightarrow B$  (див. розділ 2). Це правило виводить висновок "В є істинно", якщо відомо, що "А є істинно" і існує правило "Якщо А, то В" ( $A$  і  $B$  - чіткі логічні твердження). Нижче ми приведемо спосіб формалізації наближених міркувань, заснований на поняттях та операціях в нечіткій логіці. База термів, або правил зображено на рис. 3.3

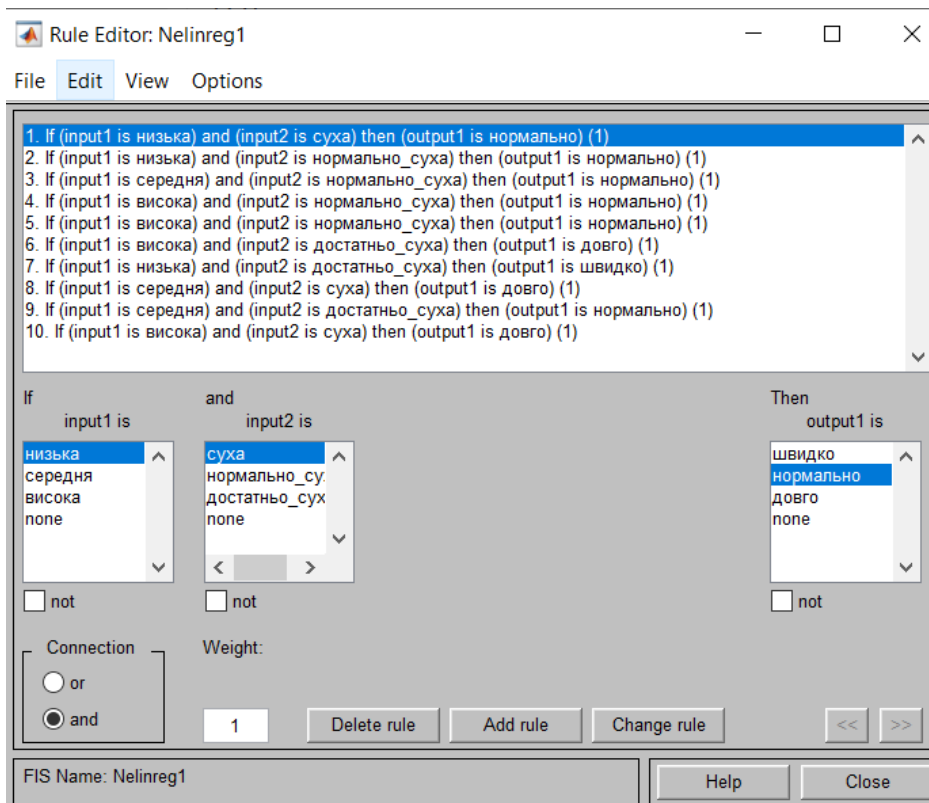


Рисунок 3.3 – База правил для програми

По створених закономірностях будемо поверхню нечітких висновків, щоб отримати чітку візуалізацію проведених маніпуляцій в середовищі Fuzzy Logic Toolbox. Для показу результатів було взято діапазон початкової вологості від 10 до 30 %, а кінцевої від 6 до 10,5%, побудована поверхня включає в себе всі можливі варіанти часу сушіння в межах заданого діапазону. Побудована поверхня представлена на рис. 3.4.

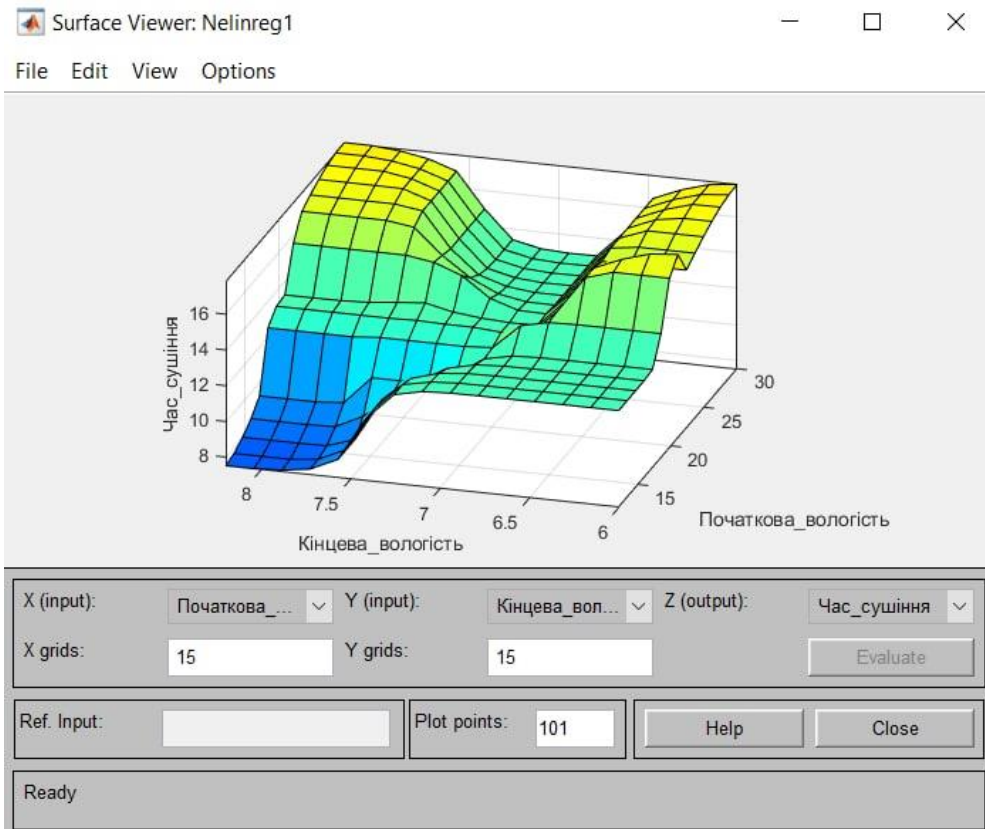


Рисунок 3.4 – Поверхня нечітких висновків

Також візуалізуємо правила методом окремих секцій, так званих комірок нечітких висновків які представлені на рис. 3.5

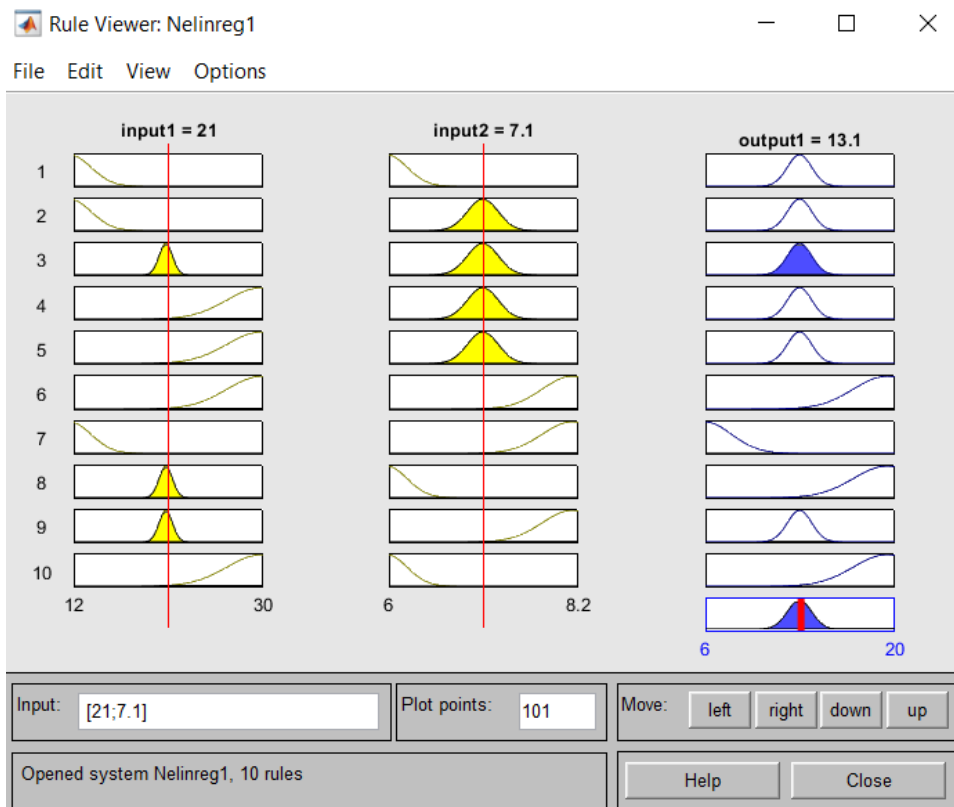


Рисунок 3.5 – Нечіткі висновки у вигляді комірок

Результат роботи програми:

Початкова вологість = 23

Кінцева вологість = 8

Кількість часу сушіння = 16.5838

Визначення часу сушіння дозволяє отримати задану вологість сухої деревини, і не витратити зайві енергоресурси, пересушуючи матеріал. Отже, завдяки даній програмі можна оптимізувати використання енергоресурсів. В процесі сушіння дуже важливо підтримувати задану температуру. З повним кодом програми можна ознайомитися в додатку Б.

#### 4. РОЗРОБКА РЕГУЛЯТОРА ВОЛОГОСТІ ДЕРЕВИНИ В АГРЕГАТІ СУШІННЯ

Призначення сушильного агрегату, як випливає з назви, це видача просушеного сипучого матеріалу заданої вологості. Тому головними технологічними керованими величинами сушильного агрегату є продуктивність та вологість продукту на виході агрегату. Крім того, для підтримки процесу сушіння в оптимальному режимі потрібно підтримувати правильні значення та інших допоміжних технологічних параметрів. У процесі роботи сушильного агрегату на нього діють не тільки головні керуючі величини, як подача газу та обурення «продуктивність по входу», тобто швидкість подачі матеріалу в піч, але й інші впливи. Це подача повітря для підтримки правильної температури сушильного агента гарячого повітря, а також вологість матеріалу, що подається, яка може змінюватися в деяких межах. Крім того, подача повітря, необхідного для оптимального горіння газового пальника всередині камери сушіння. Спрощена функціонально технологічна схема позначена на рисунку 10.

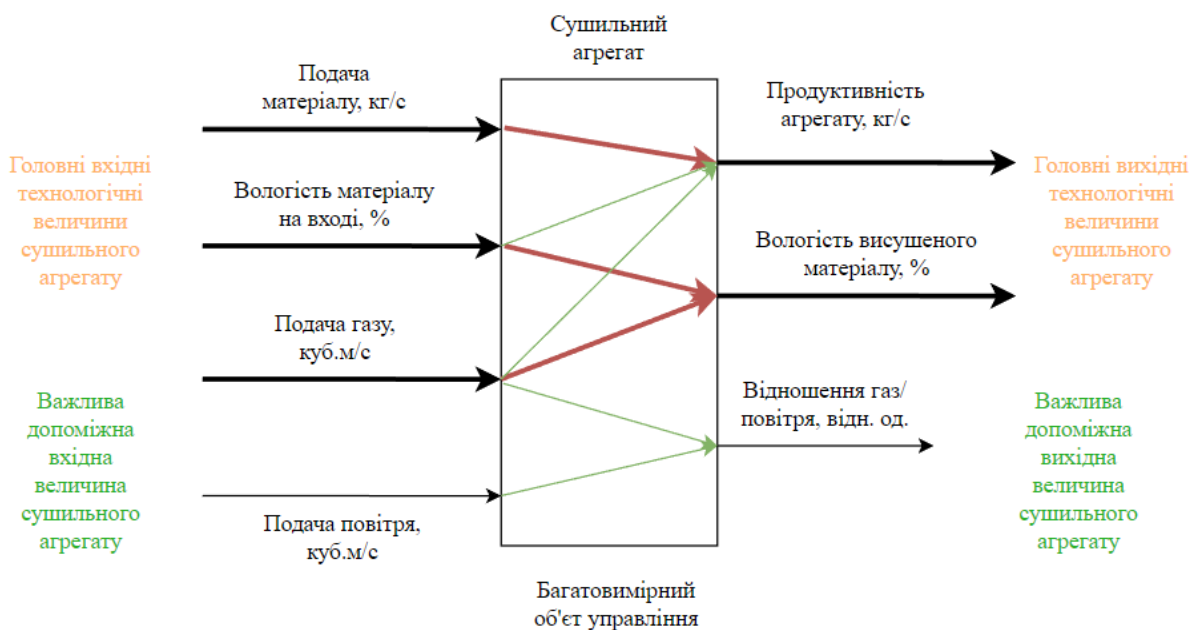


Рисунок 10 - Спрощена функціонально технологічна схема сушильного агрегату

Показано найбільш важливі впливи та керовані величини. Головні технологічні параметри показані жирними стрілками, допоміжні тонкими. Червоним показані суттєві впливи, головним чином впливають на вихідні величини, зелений -



непрямий, менш помітний вплив вхідних величин на вихідні. З огляду на цей вплив можна вибрати основні канали управління з кожної вихідній величині, тобто. задати, визначити для кожної керованої величини керуючу.

Очевидно, що продуктивність сушильного агрегату дорівнює швидкості подачі матеріалу на сушку за вирахуванням висушеної вологи:

$$Pr(Q, Vl_{\text{вх}}, Vl_{\text{вих}}) = Q \cdot (1 - Vl_{\text{вх}} + Vl_{\text{вих}}) \quad (24)$$

де:

$Pr$  – продуктивність агрегату, кг/сек (або т/годину);

$Q$  – темп подачі матеріалу в сушарку, кг/сек (або т/годину);

$Vl_{\text{вх}}$  - вологість матеріалу на вході в сушарку, отн. одиниці;

$Vl_{\text{вих}}$  - вологість матеріалу на виході із сушарки, отн. одиниці.

Розглянемо технологію сушіння з погляду управління цим технологічним процесом. Головне, що потрібно від агрегату сушіння, це отримання потрібного обсягу достатньо висушеного матеріалу або темпу його безперервної видачі. В стандартному випадку сушарка знаходиться в технологічному ланцюжку і тому продуктивність її визначається величиною подачі матеріалу на сушіння, що задається попередніми технологічними процесами. Працюючи в автономному режимі продуктивність сушарки виставляється оператором. Тому з погляду управління безпосередньо процесом сушіння подача матеріалу, а отже, й дуже жорстко пов'язана з нею продуктивність сушарки, не піддається внутрішньому регулюванню, решта процесів повинні підлаштовуватися під задану ззовні продуктивність агрегату сушіння. Звідси виходить, що продуктивність сушарки, залежить від багатьох факторів. Швидкість подачі матеріалу в сушильний агрегат є обуренням для всіх внутрішніх частин, що забезпечують безпосередньо функціонування сушарки, систем управління. Отже, головна технологічна вхідна величина сушильного агрегату та головна технологічна вихідна величина є з погляду управління безпосередньо процесом сушіння та його оптимізації є продуктивність[13].

Аналогічна ситуація з вологістю матеріалу на вході сушарки. Вона визначається попередніми технологічними процесами, не може регулюватися при управлінні

безпосередньо сушильним агрегатом, і тому вологість матеріалу на вході є обуренням з точки зору процесу управління сушінням. Сушильний агрегат як об'єкт управління вологістю матеріалу на виході може бути представлений такою структурно-функціональною моделлю як представлено на рис. 4.1.

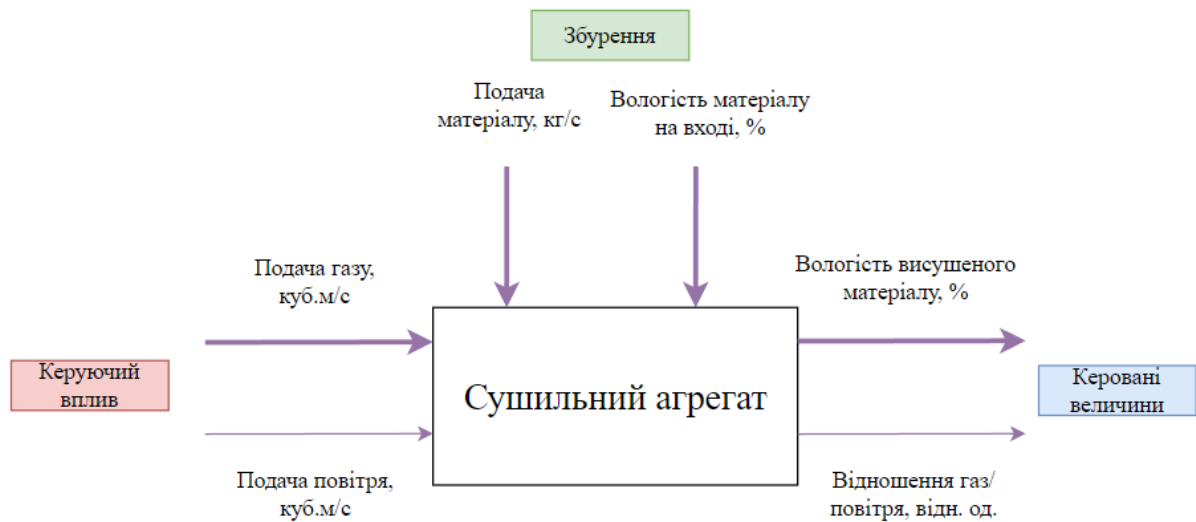


Рисунок 4.1 - Структурно-функціональна модель сушильного агрегату.

Вважатимемо, що сушильний агрегат знаходиться в середині технологічного ланцюжка, тому темп подачі матеріалу на сушіння визначається попередніми умовами. У такому випадку можна вважати, що керування продуктивністю сушильного агрегату здійснюється розімкнутою САУ з жорстким керуванням представлена на рис 4.2.

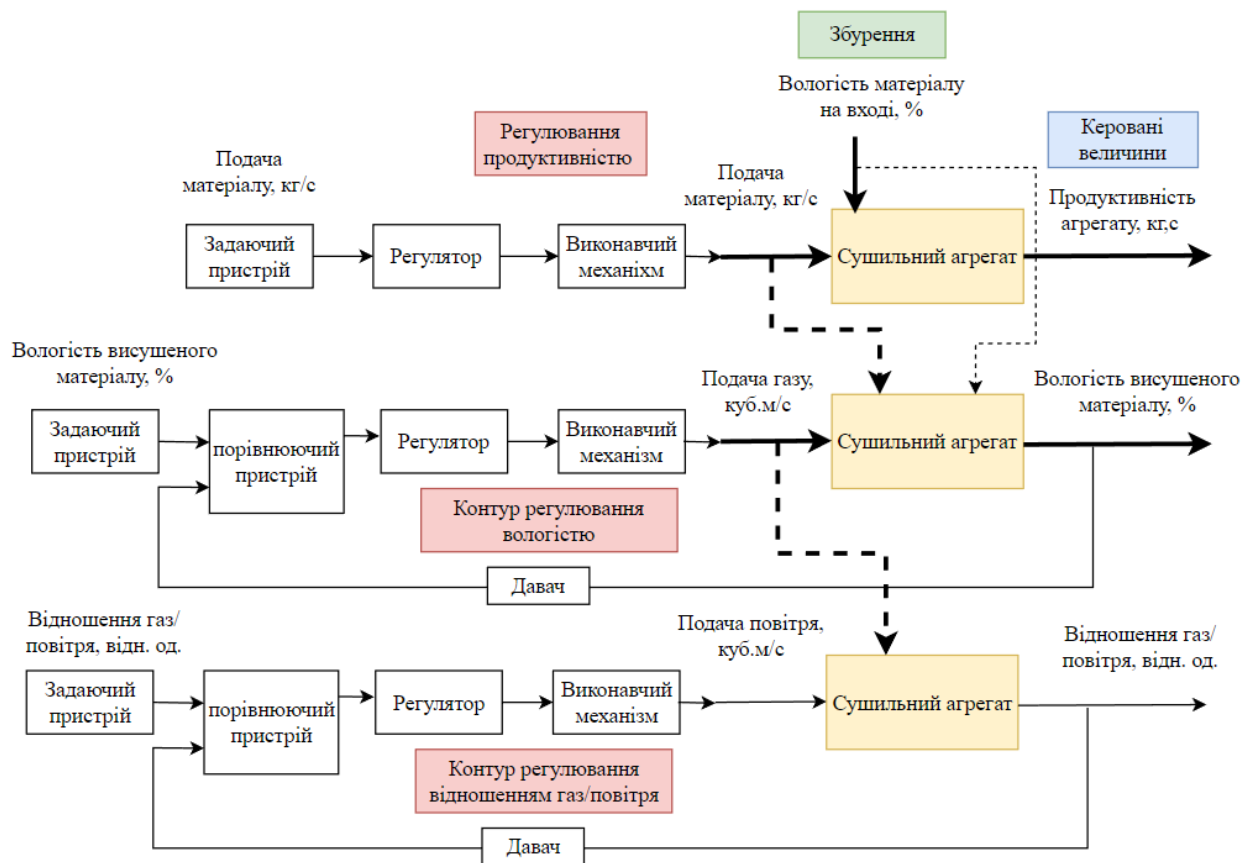


Рисунок 4.2 - Багатовимірна дворівнева система керування сушильним агрегатом

Таким чином, наведена модель сушильного агрегату і системи управління ним показують, що агрегатом можна керувати двома зв'язаними САУ, перша і головна з яких подає необхідну для сушіння матеріалу кількість газу, а друга допоміжна забезпечує оптимальність процесу сушіння, подаючи необхідне для горіння факела кількість повітря в газовий пальник. Як видно, друга САУ буде в деякому сенсі підлеглою, допоміжною, яка обслуговує, по відношенню до першої. Отже, для керування процесом сушіння слід використовувати одну основну САУ вологості матеріалу на виході, одну допоміжну САУ співвідношення газ/повітря, а також ряд додаткових САУ та систем контролю, що забезпечують гарантування працездатності та оптимального функціонування сушарки. Але основною тематикою даної роботи є керування по заданій вологості, тому будемо розглядати основну САУ саме цього параметру, що схематично представлена на рис. 4.3[14].

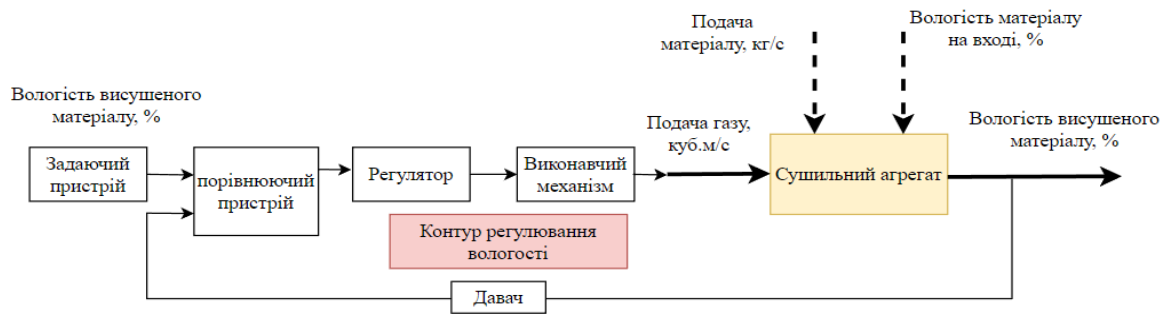


Рисунок 4.3 – Модель курування вологістю сушильного агрегату в залежності від вологості по відхиленню

В першому наближенні об'єкт регулювання ОУ (камера сушіння) описується передаточною функцією :

$$W_{об} = \frac{k_{об} \cdot e^{-\tau_0 p}}{T \cdot p + 1} \quad (25)$$

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

$\tau_0$  – стала запізнення об'єкта регулювання;

$T$  – постійна часу об'єкта регулювання.

Розрахуємо  $k_{об}$ , використовуючи формулу :

$$k_{об} = \frac{k_k F_k}{k_k F_k + k_{ог} F_{ог} + \alpha F_d} = \frac{45,7 \cdot 33,8}{45,7 \cdot 33,8 + 1,74 \cdot 213,9 + 153 \cdot 182,2} = 0,0518 \quad (26)$$

де  $k_k$  – коефіцієнт теплопередачі калориферу,  $k_k = 45,7$  Ват/м<sup>2</sup>С;

$F_k$  – поверхня калорифера,  $F_k = 33,8$  м<sup>2</sup>;

$k_{ог}$  – середній коефіцієнт теплопередачі огорожень  $k_{ог} = 1,74$ ;

$F_{ог}$  – поверхня огорожень  $F_{ог} = 213,9$  м<sup>2</sup>

$\alpha$  – коефіцієнт теплообміну в процесі сушіння

$\alpha = 153$  Ват/год·м<sup>2</sup>·град;

$F_d$  – поверхня об'єкту сушіння,  $F_d = 182,2$  м<sup>2</sup>.

Постійна часу об'єкта буде рівна:

$$T = \frac{c_m m_m}{k_k F_k} + \frac{c_m m_m}{k_k F_k + k_{ог} F_{ог} + \alpha F_d} = \frac{54,5 \cdot 180 \cdot 0,21}{45,7 \cdot 33,8} + \frac{48000 \cdot 0,21}{45,7 \cdot 33,8 + 2 \cdot 180 + 153 \cdot 80} = 2,04 \quad (27)$$

Згідно характеристик лісосушильної камери вибираємо, що відношення

$$\frac{\tau_0}{T} = 0,26. \text{ Тоді } \tau_0 = 0,26 \cdot T = 0,530 \text{ хв.}$$

Розробимо спрощену модель контуру автоматичного регулювання вологістю по відхиленню представлені на рис. 4.4.

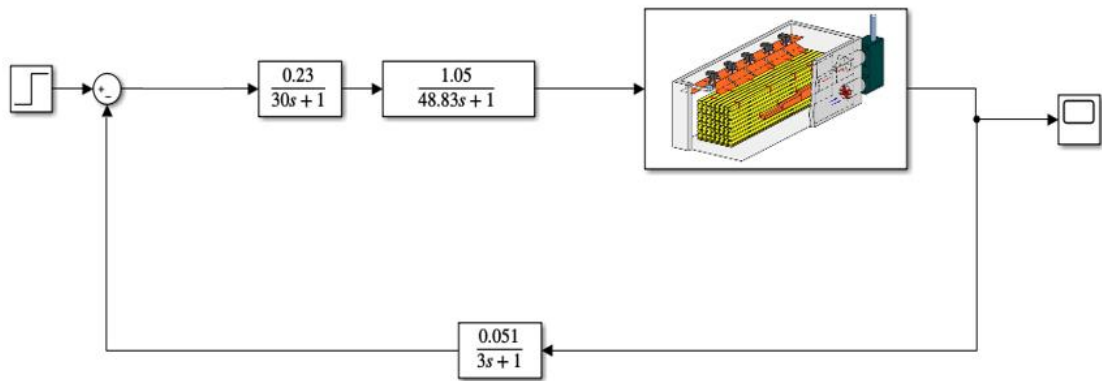


Рисунок 4.4 - Модель контуру автоматичного регулювання вологою по відхиленню

Додамо данні початкової та кінцевої вологості, а також подачі матеріалу, які і будуть нашим збуренням, модель матиме вигляд як представлено на рис. 4.5.

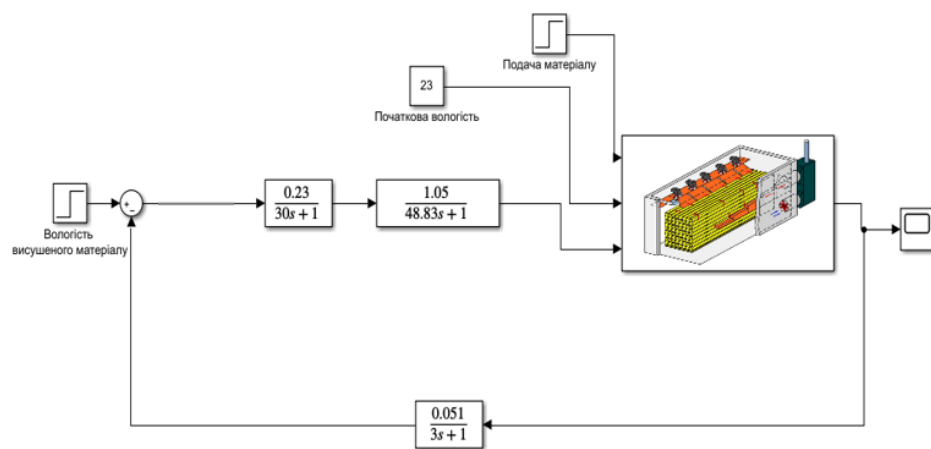


Рисунок 4.5 – Схема зі збуреннями від початкової та кінцевої вологи без регулятора

Отримуємо характеристику перехідного процесу по заданій початковій вологості як показано на рис. 4.6.

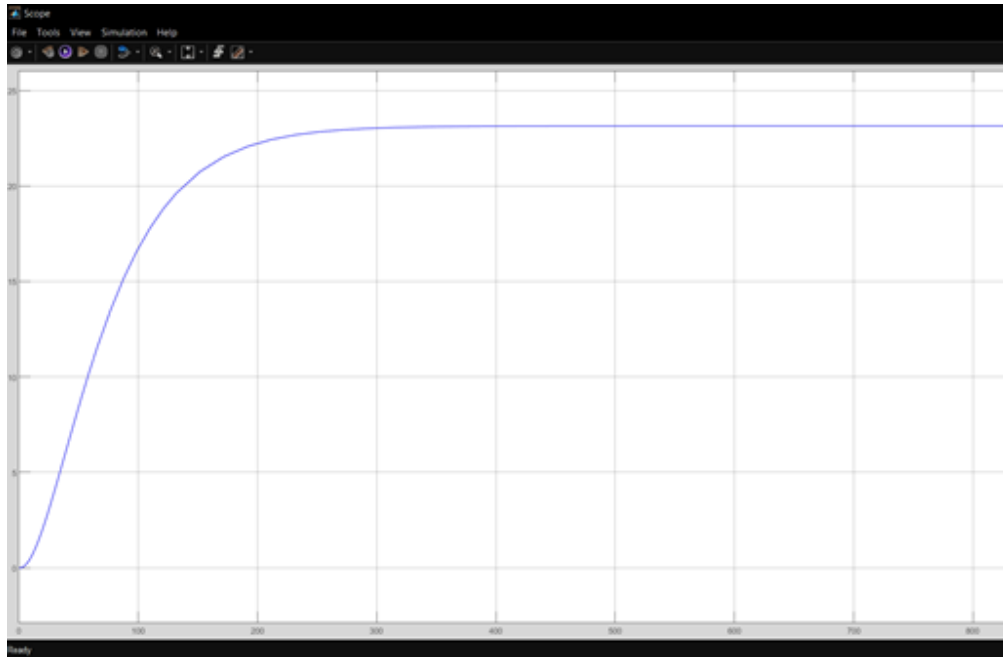


Рисунок 4.6 – перехідна характеристика системи без регулятора

Як можна побачити з графіку перехідний процес відбувається дуже довго, а саме 7 хвилин, тому було вирішено додати до схеми ПІД регулятор для оптимізації параметру, адже це пристрій, що застосовується в контурах управління, оснащених ланкою зворотного зв'язку. Дані регулятори використовують для формування сигналу управління в автоматичних системах, де необхідно досягти високих вимог щодо якості та точності перехідних процесів, а саме такі цілі поставлено. Тому додаємо ПІД регулятор до нашої схеми і повна схема з регулятором матиме вигляд як на рис. 4.7.

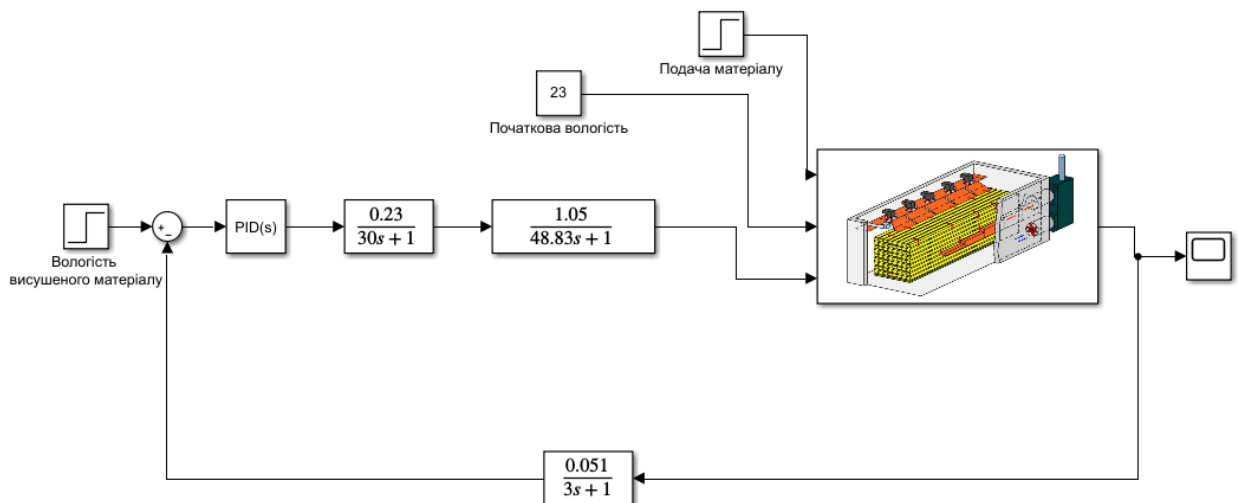


Рисунок 4.7 – Схема контуру управління вологою з ПІД регулятором  
Моделюємо перехідний процес як показано на рис. 4.8.

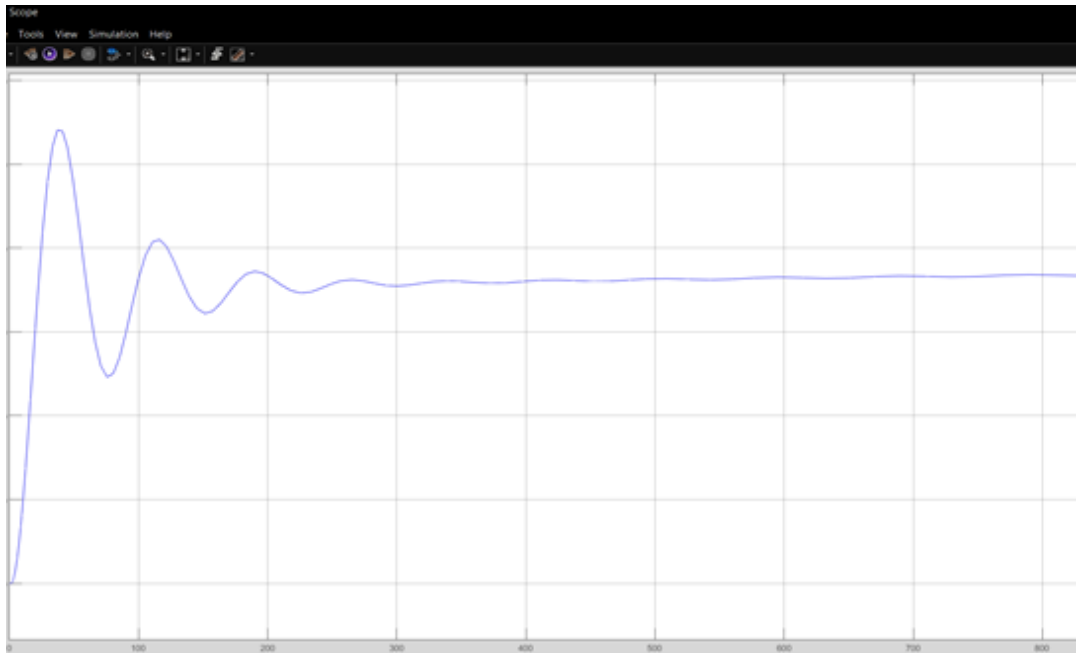


Рисунок 4.8 – Перехідний процес з не налаштованим ПІД регулятором

Такий перехідний процес не задовольняє умови оптимізації процесу, адже з рис. 4.8 видно, що перехідний процес відбувається з небажаними коливаннями, а також з великим % перерегулювання, тому треба налаштувати регулятор та отримати кращий результат перехідного процесу.

Після налаштування регулятора перехідний процес має вигляд представлений на рис. 4.9

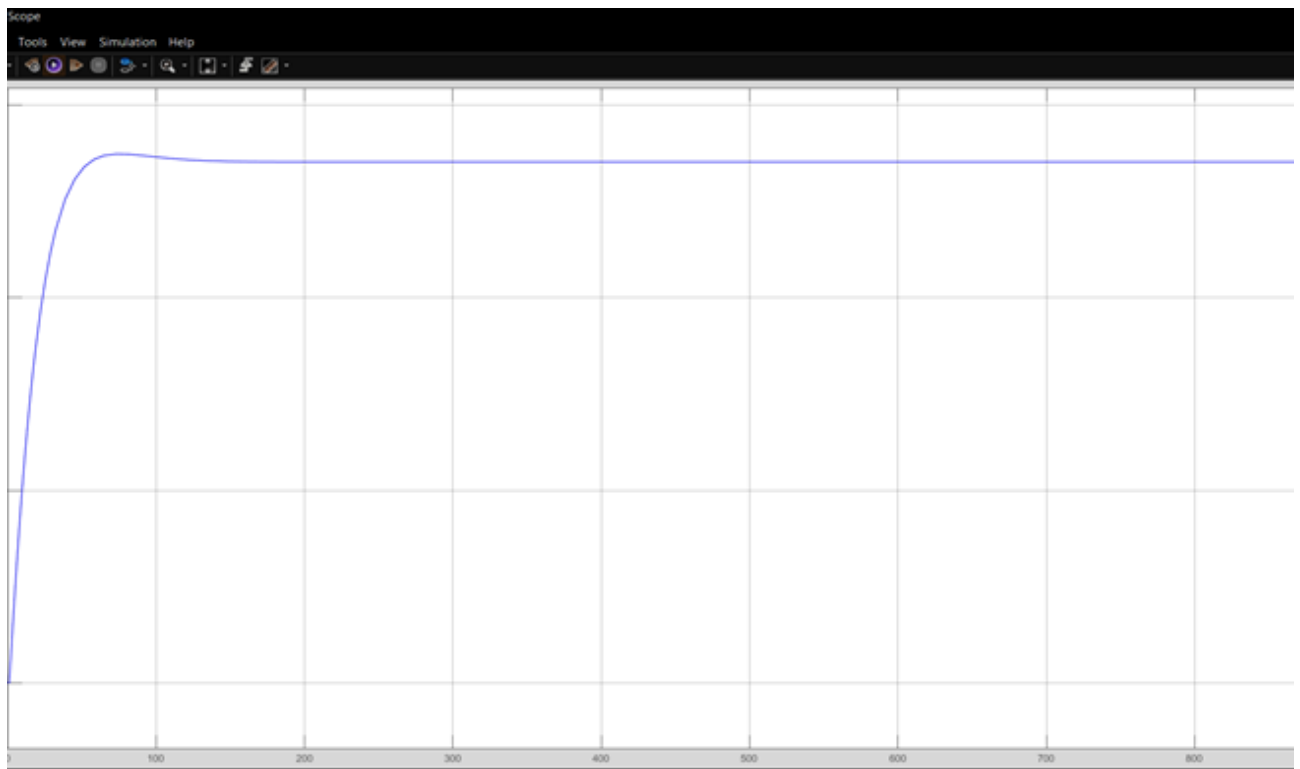


Рисунок 4.9 – Перехідна характеристика з налаштованим ПІД регулятором

З рис. 4.9 видно, що тривалість перехідного процесу у випадку використання ПІД-регулятора зменшилася майже в 3 рази і становить 2,5 хвилини порівняно з 7 хвилинами без ПІД-регулятора, що означає те, що ми досягнули поставленої цілі з оптимізації перехідного процесу.

Для аналізу перехідного процесу з використанням ПІД-регулятора визначимо перерегулювання  $\sigma$  розробленого ПІД-регулятора за перехідною характеристикою, яку безпосередньо наведено на рис. 4.10.



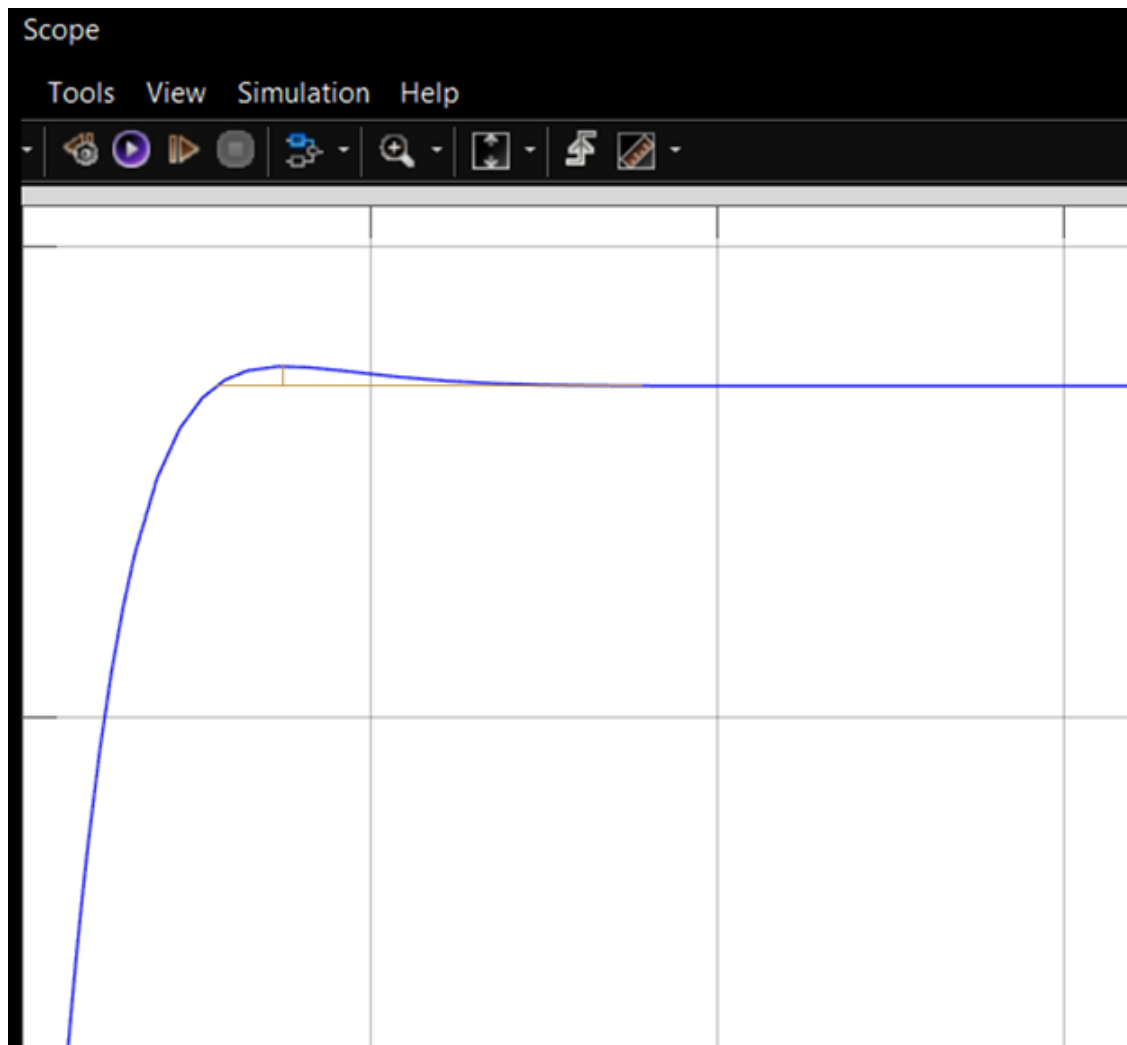


Рисунок 4.10 – Перерегулювання перехідної характеристики з налаштованим ПД-регулятором

$$\sigma = \frac{h_{max} - h_{уст}}{h_{уст}} = \frac{23,48 - 23}{23} = 0,0208 \quad (28)$$

Як видно з розрахунку перерегулювання приблизно становить 2% , а отже оптимізація регулятора працює

Перевіряємо роботу системи з ПД-регулятором під час активних впливів зовнішніх збурень. В результаті дії активних збурень отримуємо перехідний процес представлений на рис. 4.11.

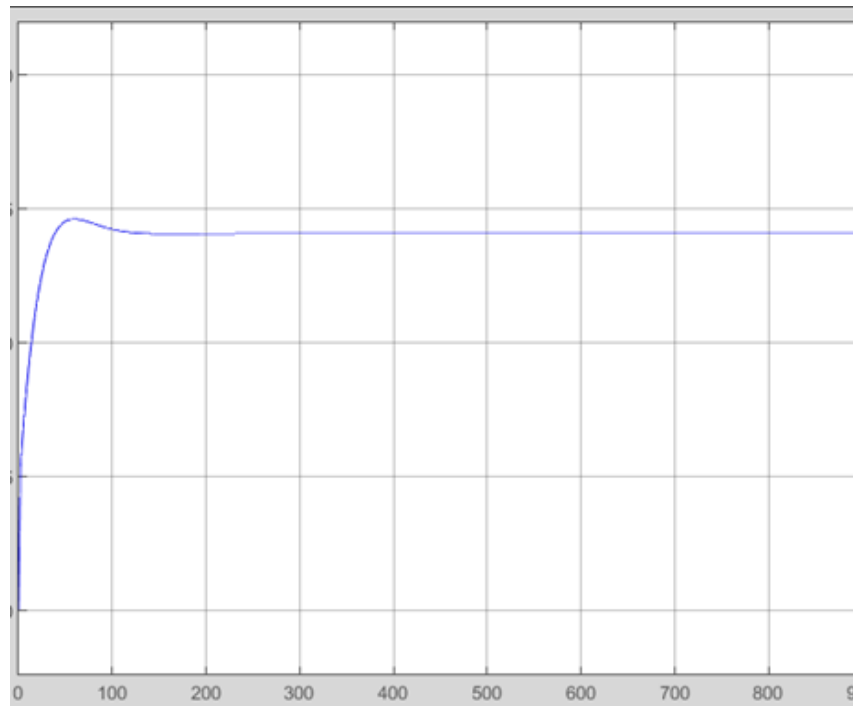


Рисунок 4.11 – Перехідна характеристики з налаштованим ПІД-регулятором та активними збуреннями

Як можемо бачити додалися незначні коливання в зоні від 140 до 220 с, та підвищився % перерегулювання до 4,1%, але далі все працює стабільно і регулятор відпрацьовує збурення які є в системі, а отже, систему оптимізовано

## 5. РОЗРОБКА МНЕМОСХЕМИ SCADA СИСТЕМИ

Щоб систем керування об'єктом працювала коректно в реальному часі необхідно враховувати можливість для взаємодії з ним оператора, який буде контролювати роботу системи. Саме для цих потреб розроблено мнемосхему SCADA системи.

SCADA система – це програмний пакет, що призначається для розробки або забезпечення в реальному часі систем збору, обробки, відображення та архівування інформації про об'єкт управління.

SCADA система потрібна для:

- Контролю, за процесами в реальному часі;
- Збору інформації в бази даних;
- Обміну даними між виконавчими механізмами та ПЛК;
- Логічного керування процесами;
- Забезпечення зв'язку з зовнішніми додатками[15].

SCADA система камеру сушіння деревини повинна задовольняти всі вище показані потреби, при реалізації мнемосхеми потрібно орієнтуватися на звичайного оператора який повинен легко зрозуміти як керувати технологічним процесом.

Мнемосхема повинна мати:

- Інтуїтивно зрозумілий інтерфейс, це завдання номер 1, всі елементи мнемосхеми повинні бути інтуїтивно зрозумілими оператору не залежно від його кваліфікації,
- Набір головних функцій, потрібно вивести на екран якнайбільше керованих величин які є головними в процесі сушіння деревини,
- Простота використання, всі керуючі органи повинні бути структуровано розподілені на головному екрані.

Для розробки мнемосхеми SCADA системи будемо використовувати програмне забезпечення Simple-Scada (demo64).

Simple-Scada – призначена для розробки та забезпечення роботи в реальному часі систем збирання, обробки, відображення та архівування інформації про об'єкт моніторингу або керування. Головна мета проекту – це простота та зручність для кінцевого користувача.

Чому саме Simple-Scada:

- Система скриптів з великим набором готових процедур та функцій,
- Широкий набір компонентів для швидкого створення мнемосхем,
- Вбудований OPC UA-сервер,
- Робота з СУБД MySQL,
- Повний доступ до БД із скриптів, виконання SQL-запитів,
- Імпорт/експорт змінних із XLSX, XLS, CSV файлів,
- Угруповання трендів, повідомлень, вікон, змінних, текстур, скриптів,
- Звукове сповіщення при аварійних та попереджувальних повідомленнях.
- Бібліотека графіки із зображеннями в єдиному мінімалістичному стилі.

Для початку побудови мнемосхеми треба було обрати форм-фактор камери сушіння, оптимальної буде класична прямокутна камера з мінімальним набором елементів. Головні елементи – це штабелі деревини для сушіння, вентилятор, калорифер, заслінка та виділене місце для калорифера і вентилятора, таке яке дає змогу рівномірно прогрівати штабелі деревини для того, щоб волога рівномірно виходила з усього об'єму сушильного матеріалу[16].

Даний набір елементів позначено на рис. 5.1.

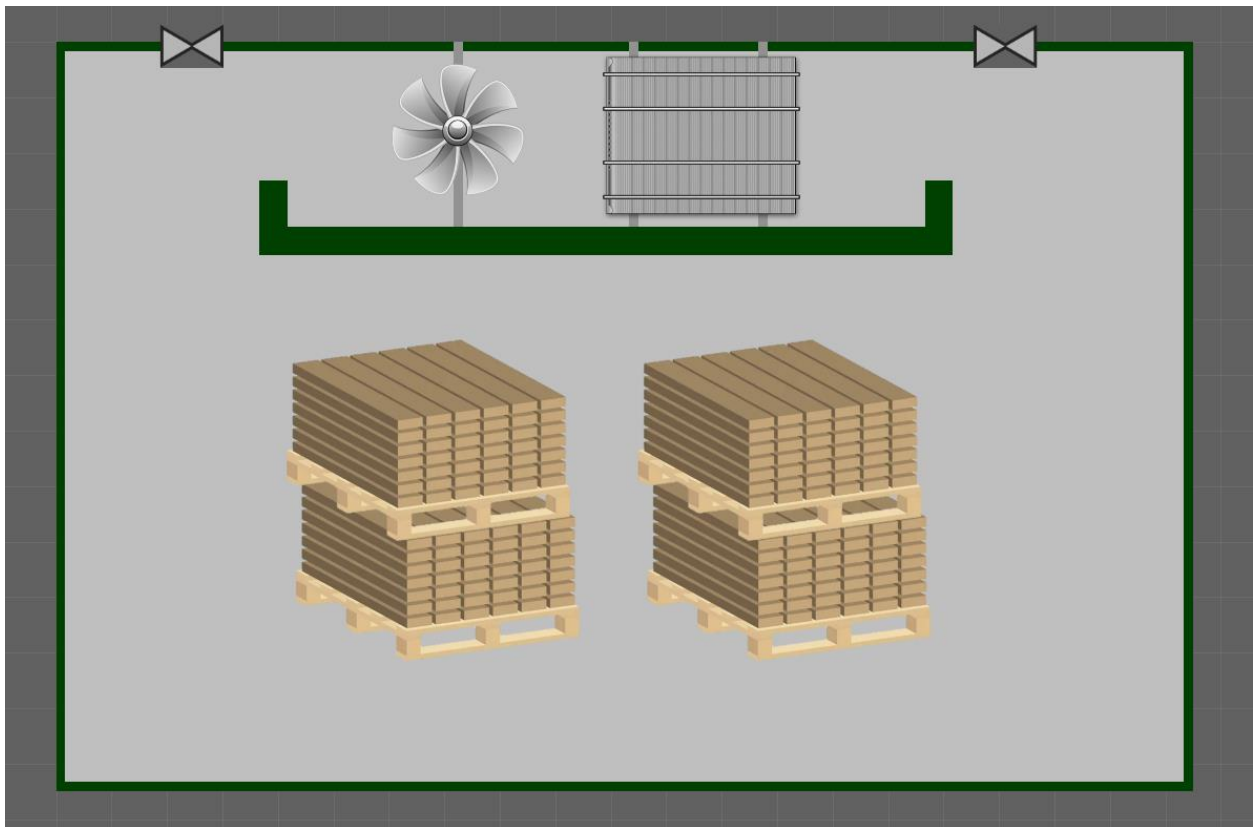
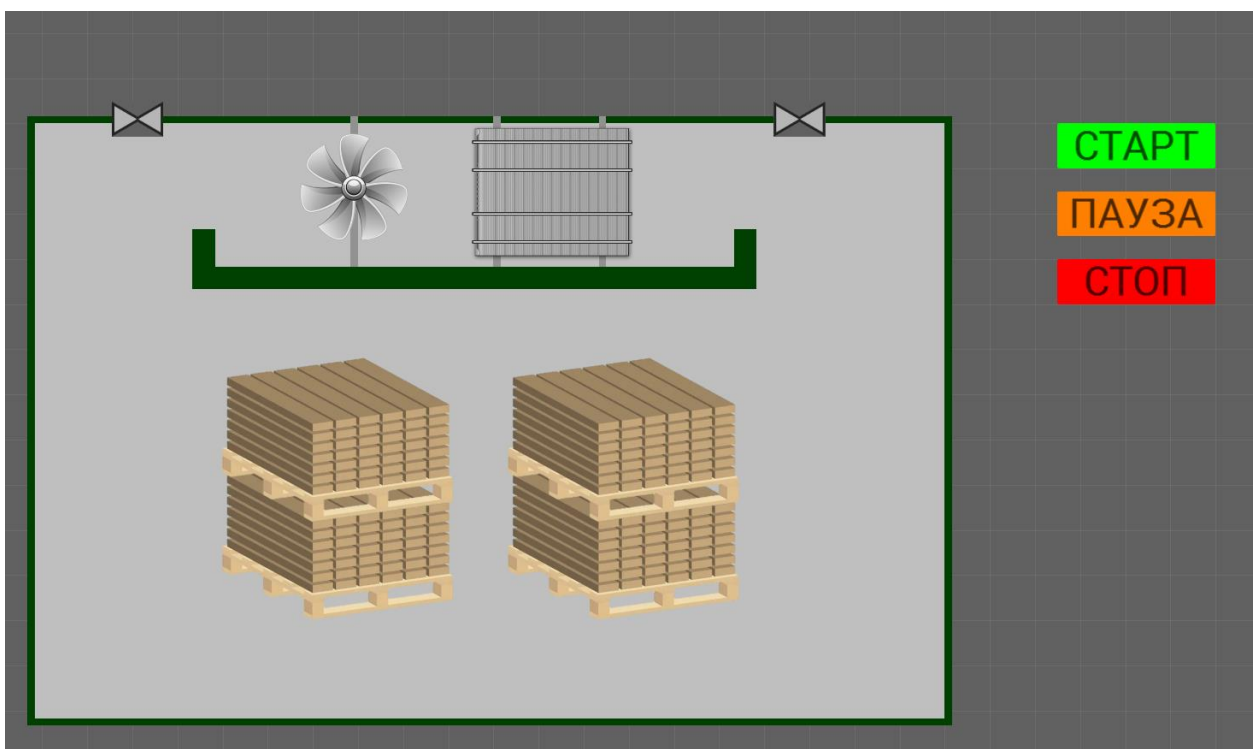


Рисунок 5.1 – початкова мнемосхема сушильної камери деревини  
Наступним етапом є додавання основних керуючих кнопок, які є основним органом керування для оператора, даний блок представлено на рис. 5.2.



Рисунко 5.2 – мнемосхема сушильної камери з блоком кнопок для управління

При сушіння деревини треба враховувати основні параметри, а саме температуру та вологу, так як основним параметром даної роботи є волога, то і основним параметром на мнемосхемі є волога, тому додано блоку слідкування за температурою та вологістю в камері, а також поле для введення початкової та кінцевої вологи, також завдяки алгоритму програми для вирахування часу сушіння повна SCADA система матиме змогу розрахувати повний час сушіння, блок технологічних параметрів наведено на рис. 5.3.



Рисунок 5.3 – Блок технологічних параметрів мнемосхеми сушильно камери  
Далі для отримання інформації про зміну даних величин, а також налаштування швидкості вентилятора позначимо на мнемосхемі давачі та опишемо виконавчі механізми, особливо заслінку яка є одним з ключових елементів всієї схеми сушіння, мнемосхема з описаними виконавчими механізмами представлена на рис. 5.4.

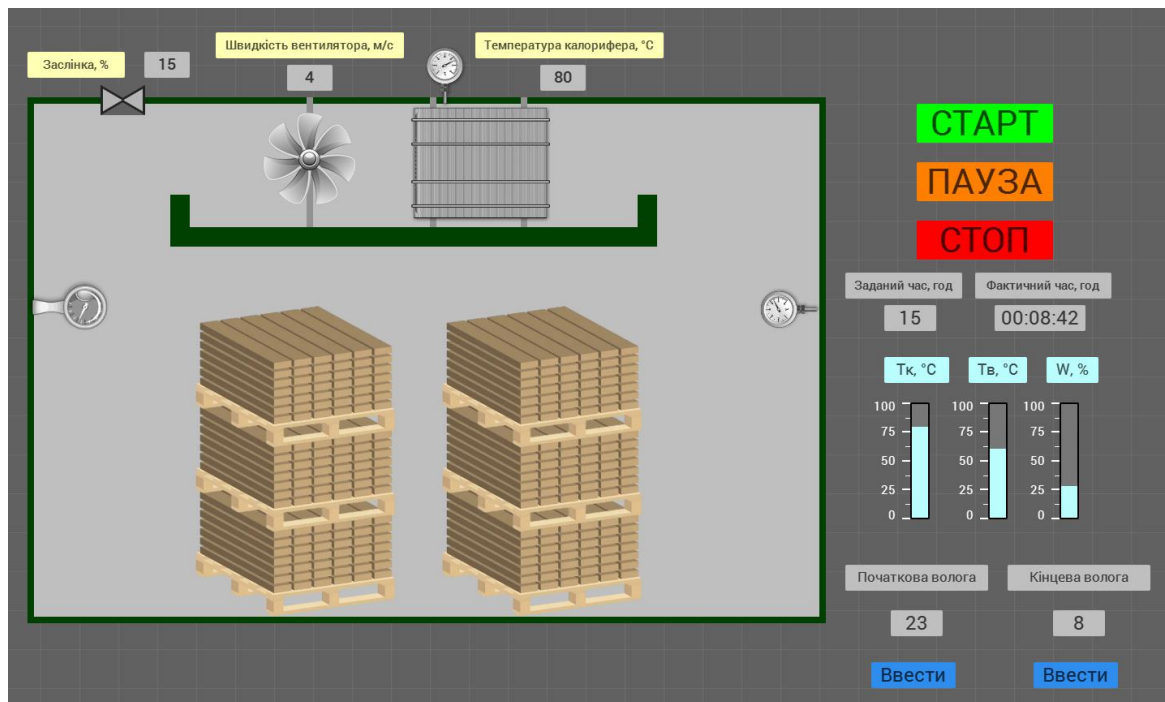


Рисунок 5.4 – мнемосхема з описаними виконавчими механізмами

Останнім етапом є додання графічного блоку до мнемосхеми на якому будуть відображатися графіки зміни технологічних параметрів на всьому часовому проміжку процесу сушіння деревини, на даному блоці оператор зможе побачити криву зміни температури та вологості в процесі сушіння. Повна мнемосхеми SCADA системи для сушіння деревини представлено на рис. 5.5.

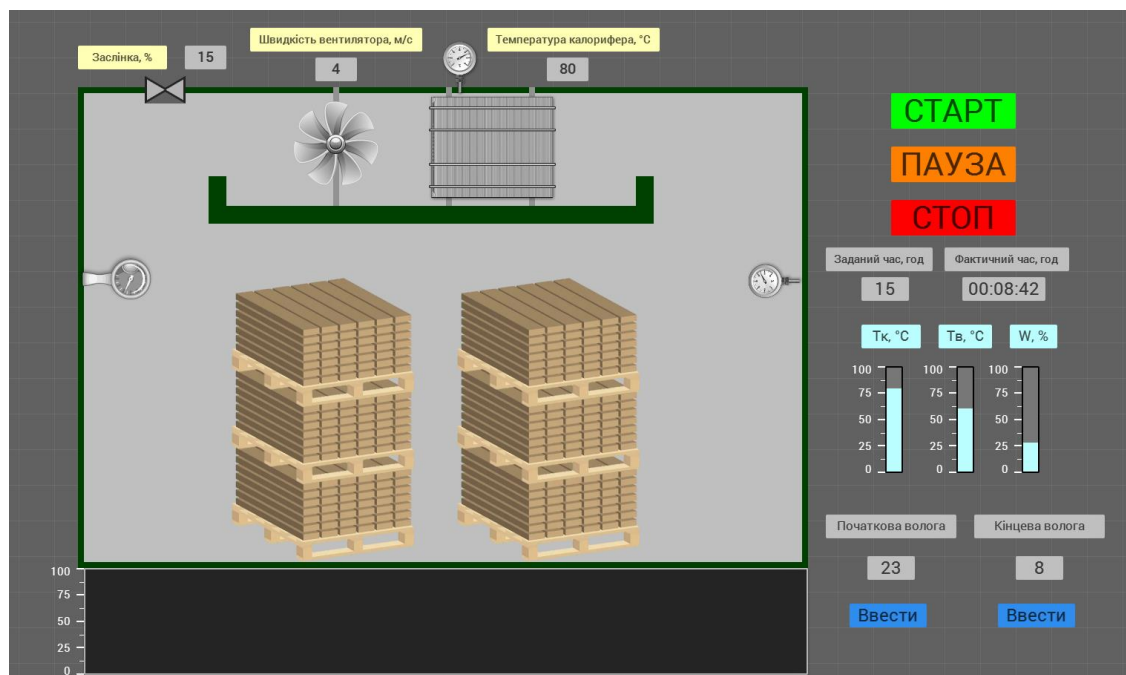


Рисунок 5.5 - Повна мнемосхеми SCADA системи для сушіння деревини

## 6. ВИСНОВКИ

Розглянуто технологічні характеристики процесу сушіння деревини та об'єкта оптимізації, в процесі чого розглянуто особливості камери сушіння як об'єкту оптимізації, досліджено технологічний процес сушіння деревини для різних категорій деревини та різних режимів сушки в конвективних камерах, виділено 2 основних контури керування такі як: контур подачі гарячої пари, та контур виведення відпрацьованої пари, та задано основні критерії для оптимізації системи керування.

Розроблено математичну модель сушіння деревини, яка базується на законах тепло та масопереносу в деревині, отримана математична модель показує що об'єкт піддається оптимізації, а також показує процес виведення вологи з деревини відносно часу сушіння, враховуючі внутрішні процеси, що відбуваються з деревиною. А саме небажані напруженості які призводить до великого відсотку браку кінцево продукту для виробництва меблів

На базі експериментальної математичної моделі було розроблено програму в програмному середовищі Matlab для визначення часу сушіння по введеним даним початкової та кінцевої вологості, за основу були взяті дані сушки 20-ти партій деревини за однакових умов та закони нечіткої логіки, завдяки даній програмі можна оптимізувати використання енергоресурсів таких як природного газу, електрики та повітря.

Розглянуто багатовимірну систему керування сушильним агрегатом, виділено основний регулюючий контур системи для даної роботи. Завдяки пакету Simulink, що входить до складу програмного забезпечення Matlab розглянуто контур зі зворотнім зв'язком регулювання вологи, розроблено ПІД-регулятор для даного контуру який пришвидшив перехідний процес майже в 3 разу порівняно з системою без регулятора, а також система стала більш стабільною до активних збурень.

Розроблено мнемосхему процесу сушіння деревини в конвективній камері в програмному забезпеченні Simple-Scada для побудови сучасних візуалізованих систем управління технологічними процесами, в якій враховано основні потреби



операторів які користуються в роботі даними системами, створено інтуїтивно зрозумілий інтерфейс та виведені основні керуючі впливи, також додано графічний блок для відслідковування зміни технологічних параметрів режимі реального часу.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. В.М.Гербей. Основы проектирования сушильных цехов в деревообработной промышленности. - Л.: - 1996ю -226 с.
2. A Decade of Improved Lumber Drying Technology [Электронный ресурс] // Springer Link. – 2017. – Режим доступа до ресурсу: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40725-016-0034-z>.
3. John D. Drying Wood with a Solar Kiln - Plans Included / Davidson John., 2016. – 55 с.
4. Milota, M.; Puettmann, M. 2017. Life-cycle assessment for the cradle-to-gate production of softwood lumber in the Pacific Northwest and southeast regions. Forest Products Journal. 67(5/6): 331–342
5. Гидротермическая обработка и консервирование древесины: учебное пособие по дисциплине для студентов специальности 250403 и направления 250400 «Технология лесозаготовительных и деревоперерабатывающих производств» / С. И. Акишенков, В. И. Корнеев, А. М. Артеменков. – СПб.: СПбГЛТУ, 2013. – 68 с.
6. Automation of the drying process of agricultural raw materials to obtain products of high nutritional value I V Altukhov, S M Bykova, G V Lukina and V D Ochirov 2020
7. Development of the temperature prediction algorithm for smart thermostat – [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://hdl.handle.net/10995/94223> (дата останнього звернення 10-12-2020)
8. Espinoza, O., & Bond, B. (2016). Vacuum Drying of Wood—State of the Art. Current Forestry Reports, 2(4), 223-235. <https://doi.org/10.1007/s40725-016-0045-9>
9. Сушильна камера Incoplan 3000 [Электронный ресурс]. – 2019. – Режим доступа до ресурсу: <https://leadermash.ru/product/derevoobrabotka/sushilnye-kamery-i-kotly/sushilnye-kamery-incoplan-topline-konvektivnogo-tipa/sushilnaya-kamera-incoplan-sm3000-40m3/>

10. Автоматика управление сушильными камерами древесины [Электронный ресурс]. -2020. – Режим доступа до ресурсу:  
<https://www.gorlush.com.ua/electronics.aspx>
11. Uduak Umoh, Udoinyang G. Inyang, and Emmanuel E. Nyoho. Interval Type-2 Fuzzy Logic for Fire Outbreak Detection. International Journal on Soft Computing, Artificial Intelligence and Applications (IJSCAI). August 2019. Vol.8. No.3. pp. 27–46.
12. Уразбахтин Ф. А. Експериментальне отримання параметрів сушки деревини / Ф. А. Уразбахтин, А. Р. Хабиров, М. А. Святський // Будівничі матеріали. – 2008. – №4, С. 42-45.
13. Asdrubali, F. A review of structural, thermo-physical, acoustical, and environmental properties of wooden materials for building applications / F. Asdrubali, B. Ferracuti, L. Lombardi, C. Guattari, L. Evangelisti, G. Grazieschi // Building and Environment. – 2017. – Т. 114. – С. 307-332.
14. Herrera-Díaz, R. Effect of wood drying and heat modification on some physical and mechanical properties of radiata pine / R. Herrera-Díaz, V. SepúlvedaVillarroel, N Pérez-Peña, L. Salvo-Sepúlveda, C. Salinas-Lira, R. Llano-Ponte, R.A. Ananías. // Drying Technology 36(5), 537–544 (2018).  
<https://doi.org/10.1080/07373937.2017.1342094>
15. Сичевский, В.А. Моделирование технологического процессу конвективной сушки пиломатериалів / В.А. Сичевский // Науковий журнал// Серія фізико-технічних наук. 2018. Т. 63. № 4. С. 424- 434.
16. Zukunftsinstitut Osterreich GmbH (2017). The future of timber construction – CLT [pdf]. Available: <https://www.clt.info/wp-content/uploads/2017/06/Stora-Enso-The-future-of-timber-construction-EN.pdf>