

Міністерство освіти і науки України
Західноукраїнський національний університет
Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем

ЛИЗУН Руслан Ігорович

**АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ
КАМЕРНОЮ СУШАРКОЮ / AUTOMATED CONTROL
SYSTEM FOR A CHAMBER DRYER**

спеціальність: Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка
освітньо-професійна програма – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології

Випускна кваліфікаційна робота

Виконав студент групи АКІТ-41
В.М.Легета

Науковий керівник:
к.е.н., доц. А.М.Шевчук

Випускну кваліфікаційну роботу
допущено до захисту:
"___" _____ 20__ р.

Завідувач кафедри
_____ А.І.Сегін

Тернопіль 2025

Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем
Ступінь вищої освіти "бакалавр"
Спеціальність: 151 - Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
Освітньо-професійна програма – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Завідувач кафедри СКС

_____ А.І.Сегін
“ ____ ” _____ 2024 р.

З А В Д А Н Н Я
НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

ЛИЗУН Руслан Ігорович

(прізвище, ім'я по-батькові)

1. Тема випускної кваліфікаційної роботи

_____ Автоматизована система управління камерною сушаркою / Automated control system for a chamber dryer

керівник роботи _____ А.М.Шевчук

затверджені наказом по університету від "28" листопада 2024 р. № 938

2. Строк подання студентом закінченої кваліфікаційної роботи:

06 травня 2025р.

3. Вихідні дані до випускної кваліфікаційної роботи:

_____ 1. Технологічна схема камерної сушарки КСФ50-6

_____ 2. Характеристики камерної та конвективної сушарок

_____ 3. Характеристики мікроконтролера МІК-51

4. Основні питання, які потрібно розробити:

_____ 1. Аналіз технологічного процесу сушіння деревини

_____ 2. Розроблення функціональної схеми автоматизації

_____ 3. Розрахунок параметрів системи автоматичного управління та аналіз її роботи

5. Перелік графічного матеріалу у роботі:

_____ 1. Технологічна схема

_____ 2. Функціональна схема автоматизації

_____ 3. Схема теплообмінника

_____ 4. Структурна схема каналу регулювання

6. Консультанти розділів випускної кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1	Шевчук А.М.		
2	Шевчук А.М.		
3	Возна Н.Я.		

7. Дата видачі завдання 28 листопада 2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назви етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технологічного процесу сушіння деревини	12.2024р. – 01.2025р.	
2	Розроблення функціональної схеми автоматизації	02.2025р. – 03.2025р.	
3	Розрахунок параметрів системи автоматичного управління та аналіз її роботи	04.2025р. – 05.2025р.	

АНОТАЦІЯ

Лизун Р.І. Автоматизована система управління камерною сушаркою. – Рукопис.

Дослідження на здобуття освітнього ступеня «бакалавр» за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», освітньо-професійна програма. – Західноукраїнський національний університет, Тернопіль, 2025.

У кваліфікаційній роботі досліджено питання автоматизації процесу сушіння деревини в камерній сушарці на базі ПЛК МІК-51. Проведено аналіз технологічного процесу сушіння, фізико-механічних властивостей деревини та основних факторів, що впливають на якість кінцевого матеріалу. Розроблено функціональну схему автоматизованої системи управління, яка включає контури регулювання температури та вологості, а також контроль вологості пиломатеріалів. Реалізовано програмну модель системи в середовищі SCADA Trace Mode із забезпеченням моніторингу та візуалізації параметрів процесу. Впровадження запропонованої системи дозволяє підвищити якість сушіння, зменшити енергоспоживання та оптимізувати виробничий процес у деревообробній промисловості.

ABSTRACT

Lyzun R.I. Automated control system for a chamber dryer. - Manuscript.

Research on obtaining a bachelor's degree in the specialty 151 "Automation and computer-integrated technologies", educational and professional program. – West Ukrainian National University, Ternopil, 2025.

This thesis investigates the automation of the wood drying process in a chamber kiln using a PLC MIK-51. The technological process of drying, the physico-mechanical properties of wood, and key factors affecting the quality of the final product are analyzed. A functional automation scheme has been developed, including temperature and humidity control loops as well as moisture monitoring of lumber. A software model of the system has been implemented in the SCADA Trace Mode environment, providing real-time monitoring and visualization of process parameters. The proposed system improves drying quality, reduces energy consumption, and optimizes the production process in the woodworking industry.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ДЕРЕВИНИ...	8
1.1 Аналіз технології сушіння деревини.....	8
1.2 Способи сушіння деревини.....	10
1.3 Фізичні властивості деревини.....	11
1.4 Чинники, що впливають на якість деревини.....	14
1.5 Методи визначення вологості деревини.....	19
1.6 Параметри якості сушіння пиломатеріалів.....	20
1.7 Обґрунтування вибору сушарки.....	24
2 РОЗРОБЛЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ....	26
2.1 Технологічний процес сушіння сировини в камерній сушарці....	26
2.2 Характеристики та технологія роботи камерної сушарки.....	28
2.3 Розроблення функціональної схеми автоматизації.....	31
2.4. Вибір технічних засобів автоматизації.....	36
3 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ ТА АНАЛІЗ ЇЇ РОБОТИ.....	49
3.1 Визначення параметрів системи автоматичного управління.....	49
3.2 Комп'ютерне моделювання системи автоматичного управління...	55
ВИСНОВКИ.....	60
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	62
ДОДАТКИ.....	64

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасні технології висушування деревини потребують ефективних автоматизованих систем управління, що дозволяють підвищити якість продукції та знизити енергетичні витрати. Камерна сушка є одним із найбільш поширених методів обробки деревини, проте її ефективність значною мірою залежить від точності регулювання параметрів процесу. Автоматизація цього процесу дозволяє значно покращити його характеристики, зменшити вплив людського фактору, а також оптимізувати використання ресурсів.

Автоматизація процесу камерної сушки деревини є актуальним завданням у деревообробній промисловості, оскільки дозволяє забезпечити рівномірне висушування матеріалу, запобігти його деформаціям і зменшити тривалість сушіння. Крім того, використання програмованих логічних контролерів (ПЛК) та сучасних систем управління забезпечує зниження енергетичних витрат і підвищення продуктивності виробництва. Враховуючи це, розробка та впровадження автоматизованої системи управління процесом сушіння деревини є важливим завданням для підвищення ефективності технологічних процесів у галузі.

Мета роботи. Метою дипломної роботи є розробка та дослідження системи автоматизованого управління процесом камерної сушки деревини з використанням програмованого логічного контролера ПЛК МІК-51 та математичне моделювання процесу.

Завдання роботи. Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

- провести аналіз існуючих методів управління процесом сушіння деревини та визначити їх недоліки;
- розробити математичну модель процесу теплопередачі в сушильній камері;

- спроектувати систему автоматичного регулювання температури та вологості в камері на базі ПЛК;
- виконати вибір апаратних засобів для реалізації системи керування;
- розробити алгоритм управління процесом сушіння та його програмну реалізацію в середовищі MatLab;
- провести моделювання процесу нагріву повітря в камері та оптимізацію параметрів регулятора;
- реалізувати взаємодію контролера з персональним комп'ютером через OPC-сервер для моніторингу параметрів процесу.

Об'єктом дослідження є процес камерної сушки деревини та його автоматизована система управління.

Предметом дослідження є методи і засоби управління процесом сушіння деревини, зокрема алгоритми регулювання параметрів середовища в камері та технічні засоби їх реалізації.

Практичне значення роботи. Розроблена система автоматизованого управління процесом камерної сушки деревини може бути впроваджена на підприємствах деревообробної промисловості з метою підвищення ефективності сушіння, зменшення енергетичних витрат і покращення якості кінцевої продукції. Використання програмованого логічного контролера дозволяє забезпечити точне регулювання температури та вологості, а також оперативне реагування на зміну параметрів процесу. Крім того, реалізована система моніторингу та візуалізації процесу в SCADA-системі надає оператору можливість ефективно керувати сушильною камерою в реальному часі.

Апробація. Руслан Лизун Автоматизація процесу сушіння деревини в камерній сушарці з використанням ПЛК / Р.Лизун // Збірник матеріалів всеукраїнської науково-практичної конференції «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» (АКІТ - 2025), Тернопіль, 2025. -С.14-17.

1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ДЕРЕВИНИ

1.1. Аналіз технології сушіння деревини

У процесі сушіння деревина перетворюється з природного матеріалу на промисловий, який відповідає широкому спектру вимог, що висуваються до нього в різних сферах виробництва та побуту. Зменшення рівня вологості покращує її фізико-механічні характеристики та експлуатаційні властивості. Відомо, що зміна вмісту води в деревині спричиняє зміну її розмірів та форми. Якщо для виробів з деревини необхідна стабільність цих параметрів, рівень води слід заздалегідь довести до показників, що відповідають умовам використання, тобто до експлуатаційної вологості.

Деревина з високим вмістом води легко уражається грибками, що призводить до її псування та загнивання. Натомість сухий матеріал має значно вищу стійкість. Крім того, зменшення вологості знижує вагу деревини, водночас підвищуючи її міцність. На відміну від сирової, суха деревина краще піддається обробці та легко склеюється. Контроль кінцевої вологості є ключовим фактором у процесі сушіння.

На підприємствах деревину сушать у вигляді пиломатеріалів (дошок, брусів, заготовок), шпону (тонкого листового матеріалу), трісок, стружки та волокон. Іноді сушінню підлягають і круглі лісоматеріали, такі як деталі опор ліній електропередач, будівельні конструкції та інші елементи.

Основними цілями сушіння є: забезпечення стабільності розмірів і форми деталей; захист від псування та загнивання; підвищення питомої міцності; покращення якості обробки та склеювання [1-3].

Метод сушіння та тип сушильного обладнання визначаються низкою факторів, зокрема породою деревини, сортаментом пиломатеріалів, вартістю енергоносіїв, продуктивністю виробництва та фінансовими можливостями підприємства. Використання сушильних камер із енергоощадними технологіями є важливою умовою економічно вигідного виробництва.

Сушка пиломатеріалів здійснюється при визначеному температурному і вологісному режимах, що включає чергування процесів температурної та вологоємнісної дії на деревину, відповідно до її вологості та часу сушки. Під час цього процесу температура повітря в сушильній камері поступово підвищується, а відносна вологість сушильного матеріалу зменшується. Режими сушки визначають з урахуванням породи деревини, товщини пиломатеріалів, бажаної кінцевої вологості, категорії якості матеріалів та типу камер. В залежності від призначення пиломатеріалів, існують два основних процеси: низькотемпературний і високотемпературний. При низькотемпературному режимі на першому етапі сушки використовують вологе повітря з температурою менше 100°C. Залежно від вимог до пиломатеріалів, розрізняють такі режими:

- м'який (М) — сушіння проходить без дефектів, зберігаються фізико-механічні властивості та колір деревини;
- нормальний (Н) — досягається бездефектна сушка, але можливі незначні зміни кольору у хвойної деревини при збереженні її міцності.

Низькотемпературний процес сушки передбачає триступеневу зміну параметрів сушильного матеріалу, при цьому перехід на наступний ступінь можливий лише після досягнення необхідної вологості матеріалу. Високотемпературні режими використовують для сушки деревини, що призначена для виготовлення несучих конструкцій, де допускаються зниження міцності та потемніння матеріалу. Категорії якості висушеної деревини та її використання наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Класифікація категорій якості висушеної деревини та її використання

Рівень категорії	Назва категорії	Місце використання
1	Високоякісна	Точне машино- і приладобудування, виробництво авіаційних деталей, музичних інструментів, лиж і т.п.

2	Підвищеної якості	Виробництво меблів
3	Середньої якості	Виробництво вікон, дверей, дошок для покриття підлоги, плінтусів, деталей, що фрезеруються
4	Рядова	Виробництво виробів для будівельних підприємств

Сушіння матеріалів є енергоємним процесом, зв'язаним зі значною витратою палива, пару, а також електроенергії, а отже використання високоточної автоматики дозволить значно скоротити терміни сушіння та знизити енергетичні затрати.

1.2. Способи сушіння деревини

Сушка деревини є складним процесом, що характеризується одночасним протіканням кількох фізичних явищ [1-3]. Основні з них включають:

- теплообмін (полягає в передачі тепла від джерела теплової енергії до матеріалу),
- теплопровідність (переміщення тепла всередині матеріалу),
- вологопередача (випаровування вологи з поверхні матеріалу в навколишнє середовище),
- вологоперенос (переміщення вологи всередині матеріалу).

Класифікація способів сушки залежить від характеру теплообміну між матеріалом і середовищем. З цієї ознаки розрізняють чотири основні способи сушки.

Конвективна сушка ґрунтується на передачі тепла матеріалу через конвекцію від газоподібного або рідкого середовища. Основні методи конвективної сушки включають: газопарова — процес сушки деревини за допомогою нагрітих газів у спеціальних сушильних пристроях при атмосферному тиску; атмосферна — сушка деревини на відкритих складах або під навісом без підігріву повітря; рідинна — сушка деревини в нагрітих

гідрофобних рідинах або сольових водних розчинах; вакуумна — газопарова сушка деревини за допомогою нагрітого повітря при тиску, нижчому за атмосферний.

Кондуктивна сушка. Цей метод базується на передачі тепла деревині через теплопровідність під час контакту з нагрітими поверхнями.

Радіаційна сушка. В основі цього способу лежить передача тепла матеріалу шляхом випромінювання теплової енергії, в основному від джерел інфрачервоного випромінювання. Такий метод часто використовується для сушки лакофарбових покриттів.

Діелектрична сушка полягає у сушінні в електричному полі високої частоти, при якому тепло передається через діелектричні втрати матеріалу.

Кожен із цих способів має свої переваги та обмеження, що обумовлюють вибір методу в залежності від типу деревини та вимог до її якості.

1.3. Фізичні властивості деревини

Фізичні властивості деревини визначаються її структурою та складом і мають значний вплив на використання дерева в будівництві, виготовленні меблів та інших виробів [4-6]. До основних фізичних властивостей деревини слід віднести:

- щільність;
- вологість;
- модуль пружності;
- міцність на злам і розтягування;
- теплопровідність;
- звукоізоляційні властивості ;
- пожежна безпека;
- колір.

Ці фізичні властивості деревини значно впливають на її застосування в різних галузях і визначають її ефективність у використанні

Щільність.

Щільність деревини — це маса матеріалу на одиницю об'єму (кг/м^3). Це одна з основних характеристик, яка визначає її міцність, механічні властивості, а також здатність до обробки. Щільність деревини залежить від: породи, дуб та бук мають високу щільність, тоді як сосна та ялина — низьку; вологи, вологе дерево буде важчим за сухе, оскільки вода має більшу масу, ніж деревина; структури деревини, від щільності клітинної структури залежить її загальна щільність.

Щільність деревини впливає на її механічні властивості, теплопровідність, оброблюваність, а також має істотне значення при обробці її ріжучими інструментами: при фрезеруванні, розпилюванні.

Вологість.

Вологість деревини — це кількість води, що міститься в деревині, виражена у відсотках від маси сухої деревини. Вона є критично важливою для визначення поведінки деревини при сушінні та її використанні в конструкціях. Розрізняють початкову та кінцеву вологість дерева. Початкова вологість — це той рівень вологості, який дерево має після його заготівлі (вона може бути високою в свіжозрубаному дереві). Кінцева — це вологість, яку деревина повинна мати для використання в конкретному процесі. Для меблевих виробів кінцева вологість може бути близько 10-12%, а для будівельних матеріалів — 18-20%.

Вологість істотно впливає на механічні властивості (при високій вологості деревина м'якша, що знижує її міцність, зі зменшенням вологості деревина твердіє, але стає більш схильною до тріщин і деформацій) та розміри деревини (деревина здатна змінювати свої розміри при зміні вологості, наприклад, при висиханні деревина втрачає обсяг і може тріскатися або викривлятися).

Модуль пружності.

Модуль пружності — це фізична величина, що показує, яку силу треба прикласти до деревини для її деформації на певну величину (зазвичай у відсотках від початкової довжини або форми). Даний параметр визначає: гнучкість і міцність деревини під час навантаження та застосування: Для конструкційних елементів, таких як балки та стійки, модуль пружності є важливим для визначення їх здатності витримувати навантаження.

Чим вище модуль пружності, тим більш стійким є матеріал до деформацій. Вони залежать від породи дерева, вологості та напрямку волокон.

Міцність на злам і розтягування.

Це показники, які визначають, яку максимальну силу деревина здатна витримати перед тим, як почне руйнуватися або деформуватися. Міцність на розтягування — це здатність деревини витримувати навантаження на розтягування. Деревина на розтягування є сильною по волокнах, але слабшою в поперечному напрямку. Міцність на злам — це здатність деревини витримувати злам при навантаженні на зсув або вигин.

Ці властивості залежать від породи дерева та вологості.

Теплопровідність

Теплопровідність деревини визначає її здатність проводити тепло. Деревина є хорошим ізолятором, оскільки її клітинна структура має пори, що затримують тепло. Легкі породи деревини, як-от бальза, мають низьку теплопровідність. Теплопровідність зменшується зі збільшенням щільності і вологості.

Ця властивість важлива для використання деревини як ізоляційного матеріалу в будівництві та виготовленні меблів.

Звукоізоляційні властивості.

Звукоізоляційні властивості деревини залежатимуть від її щільності та структури. Порід деревини з низькою щільністю зазвичай мають хорошу здатність до поглинання звуків. Вони використовуються в якості матеріалів для створення звукоізоляції в приміщеннях, таких як студії звукозапису.

Пожежна безпека.

Деревина є горючим матеріалом, тому її вогнестійкість є важливим фактором у будівництві. Висока вологість знижує здатність деревини до горіння. Сушене дерево горить швидше, оскільки в ньому менше вологи, що перешкоджає процесу горіння.

Тому для підвищення пожежної безпеки деревина може піддаватися спеціальній обробці або покриттям, що знижує її горючість.

Колір

Колір деревини є важливою естетичною характеристикою. Він залежить від породи та віку дерева. Деревина може змінювати колір із часом через вплив світла, повітря та інших факторів. Наприклад, дуб має світло-коричневий колір, а червона деревина, як червоне дерево, може мати насичений червоний відтінок. Деякі види деревини (наприклад, сосна) можуть змінювати колір із часом, темніючи при старінні або впливі ультрафіолетових променів.

Ці фізичні властивості визначають поведінку деревини в різних умовах і впливають на її використання в різних галузях.

1.4. Чинники, що впливають на якість деревини

1.4.1. Фактори руйнування деревини

Руйнування деревини може відбуватися під впливом різних факторів, які можуть бути біологічними, фізичними, хімічними та механічними (рисунок 1.1). Вони впливають на структуру, міцність та довговічність деревини, що особливо важливо при її використанні в будівництві, меблевому виробництві та інших сферах [2, 3, 7].

Біологічне руйнування деревини викликається живими організмами, такими як гриби, бактерії та комахи-шкідники. Бура гниль руйнує целюлозу, залишаючи лігнін, через що деревина стає крихкою та розсипчастою. Біла гниль руйнує і целюлозу, і лігнін, через що деревина стає волокнистою та втрачає міцність. Синьова гниль змінює колір деревини, але не знижує її механічні властивості (псує естетичний вигляд). Коріди прогризають ходи в

деревині, що зменшує її міцність та сприяє проникненню вологи. Деревоточці (личинки жуків) пошкоджують структуру деревини, роблячи її менш щільною та міцною. Термити повністю знищують деревину, перетворюючи її на порошок. Запобігати біологічним факторам руйнування деревини можна через обробку антисептиками, просочення хімічними розчинами, лакофарбове покриття, термічну обробку.

ФАКТОРИ РУЙНУВАННЯ ДЕРЕВИНИ	· — БІОЛОГІЧНІ	→ Гриби та гнилі Комахи-шкідники Термити
	· — ФІЗИЧНІ	→ Зміни вологості Перепади температур Вплив ультрафіолету Атмосферні опади
	· — ХІМІЧНІ	→ Кислотна корозія Лужне руйнування Атмосферний вплив
	· — МЕХАНІЧНІ	→ Деформації під навантаженням Удари та стирання Тріщини та розшарування
	· — РУЙНУВАННЯ ВОГНЕМ	→ Загоряння Повільне тління Вуглеутворення Термічне руйнування Зниження міцності через обвуглення

Рисунок 1.1 - Фактори руйнування деревини

Фізичні процеси можуть викликати деформацію, тріщини та інші пошкодження деревини. Зміни вологості та температури приводять до набухання, коли деревина вбирає вологу, збільшуючись у розмірах; усихання, коли втрата вологи призводить до усадки та появи тріщин; перепади температур – викликають внутрішні напруження, що можуть призвести до розтріскування. Запобігти фізичним факторам можливо через контроль

вологості, правильне сушіння, лакування, використання стабілізуючих покриттів.

Хімічне руйнування деревини відбувається під впливом агресивних речовин: кислот, лугів, газів та інших хімічних сполук. Кислотні випари (наприклад, від виробництва хімічних речовин) розщеплюють целюлозу та руйнують структуру деревини. Надлишок лугу розчиняє лігнін, що робить деревину ламкою. Атмосферний вплив (викиди SO_2 , NO_x) викликає зміни кольору та зменшення міцності деревини. До способів захисту від хімічного руйнування можливо віднести спеціальні просочення, фарбування, захисні лаки.

Механічне руйнування деревини пов'язане з навантаженням, тертям і ударами. При постійних навантаженнях деревина може гнутися, змінювати форму або навіть ламатися. Удари та стирання є особливо актуальними для підлог, меблів та конструкцій, що піддаються постійному впливу. Тріщини та розшарування з'являються через нерівномірне висихання або різкі зміни умов експлуатації. При правильному виборі деревини, армування, покриття захисними матеріалами можна вберегти деревину від механічного руйнування.

Руйнування вогнем є одним із найнебезпечніших факторів, оскільки воно не лише знищує деревину, а й може призвести до пожеж. Захист включає обробку антипіренами, просочення вогнезахисними засобами та застосування негорючих покриттів.

Деревина може руйнуватися через біологічні, фізичні, хімічні та механічні фактори. Її довговічність залежить від умов експлуатації, обробки та догляду. Захист деревини включає правильну сушку, обробку антисептиками, використання лаків та фарб, а також контроль за вологістю та механічним навантаженням.

1.4.2. Вплив сушіння на властивості деревини

Під час сушіння на сиру деревину впливають пара, нагріте сухе та вологе повітря, струми високої частоти та інші фактори, що в кінцевому підсумку призводять до зменшення кількості як вільної, так і зв'язаної води.

Правильно виконане камерне сушіння забезпечує матеріал, який за своїми характеристиками не поступається деревині, висушений природним шляхом. Проте надто швидке сушіння в камерах при високих температурах може привести до утворення тріщин, значних залишкових напружень та навіть негативно вплинути на механічні властивості деревини.

За даними досліджень [1, 3, 4, 9], високотемпературне сушіння при кінцевій температурі 105–110°C дозволяє скоротити його тривалість у 1,5–2 рази порівняно з атмосферним методом. Однак це супроводжується зниженням міцності соснової деревини (при товщині дощок 30–60 мм): при стисненні волокон поздовж на 0,8–8,7%, при радіальному розколюванні на 1–12%, а ударна в'язкість зменшується на 5–10,5%.

1.4.3. Вплив високих температур

Підвищення температури призводить до зниження міцності та інших фізико-механічних характеристик деревини. Якщо температура не перевищує 100°C і діє протягом короткого часу, ці зміни зазвичай оборотні, тобто після повернення до початкових умов властивості деревини відновлюються.

Однак тривалий вплив температур вище 50°C викликає незворотні зміни, які залежать не лише від температурного режиму, а й від рівня вологості деревини. При температурі 80–100°C протягом 16 діб межа міцності при стисненні волокон знижується на 5–10%, а ударна в'язкість – на 15–30%. Найбільше зниження міцності спостерігається у дуба, найменше – у сосни. Найбільш значні втрати міцності відбуваються в перші 2–4 доби нагрівання.

Дослідження показали, що механічні властивості деревини погіршуються зі збільшенням температури, часу її впливу та рівня вологості. Особливо це помітно в діапазоні температур 80–140 °C.

1.4.4. Вплив низьких температур

При зниженні температури деревина стає міцнішою: її заморожений стан сприяє підвищенню механічної стійкості. Це пояснюється тим, що лід зміцнює стінки клітин, що призводить до зростання міцності на вигин, стиснення та розколювання.

1.4.5. Вплив іонізуючого випромінювання

Іонізуюче випромінювання негативно впливає на міцність деревини, оскільки викликає розпад її органічних складових (радіоліз). Однак застосування радіоізотопів для неруйнівного контролю дерев'яних деталей та їх стерилізації не шкодить механічним властивостям матеріалу, оскільки рівень випромінювання в цих випадках залишається недостатнім для значного руйнування структурних компонентів деревини.

1.4.6. Вплив агресивних рідин і газів

Кислоти та луги можуть викликати зміну кольору деревини та її поступове руйнування. Смолянисті речовини, що містяться у хвойних породах, частково захищають матеріал від впливу агресивного середовища. Саме тому модрина виявляється більш стійкою до хімічного впливу, тоді як листяні породи (особливо м'які) руйнуються у 2–3 рази швидше. Деревина, уражена синявою, ще більш вразлива до хімічної деструкції, ніж здорова.

1.4.7. Вплив води

Тривале перебування деревини у річковій воді (від 10 до 30 років) практично не змінює її міцності. Проте при ще довшому контакті верхній шар товщиною 10-15 мм поступово слабшає та руйнується. Водночас внутрішні шари деревини залишаються міцними та зберігають характеристики здорового матеріалу.

Якщо деревина перебуває у воді кілька століть, її властивості значно змінюються, і ступінь цих змін залежить від породи. Найкраще це спостерігається на прикладі дуба. Морений дуб набуває темного зеленувато-

чорного або вугільного забарвлення через хімічну реакцію між дубильними речовинами та солями заліза. У насиченому вологою стані така деревина залишається гнучкою, але після висушування стає твердою й крихкою. При сушінні морений дуб розтріскується більше, ніж звичайний, оскільки його клітини мають тонші стінки та стискаються (колапсують) сильніше. Через це його міцність на стиснення і вигин зменшується приблизно в 1,5 рази.

Дія морської води може впливати на деревину по-різному. Наприклад, твердість модрина після тривалого перебування у морській воді значно підвищується. Це підтверджує досвід будівництва Венеції, де для зміцнення фундаментів використовували близько 400 тисяч модринових паль. Пізніше дослідження показали, що вони майже "окам'яніли" і зберегли високу міцність. Водночас соснові палі, які використовувалися в портових конструкціях, за 30 років експлуатації втратили від 40% до 70% своєї міцності.

1.5 Методи визначення вологості деревини

Існує два основних методи вимірювання вологості деревини:

- гравіметричний (метод висушування);
- електрофізичний (кондуктометричний метод).

Метод висушування ґрунтується на випаровуванні вологи з деревини при нагріванні до 103°C у сушильній шафі. Висушувані зразки розміщують у спеціальних скляних ємностях з герметичними кришками. Під час сушіння кришки знімають, а під час зважування — закривають, щоб уникнути впливу зовнішньої вологи.

Перше зважування виконують через 6-10 годин, а потім кожні дві години, поки різниця між двома послідовними зважуваннями не стане меншою за 0,002 г. Це означає, що досягнуто абсолютно сухого стану деревини. Перед кожним зважуванням бюкси з відкритими кришками охолоджують у закритій ємності (ексикаторі) з безводним хлоридом кальцію, який поглинає залишкову вологу з повітря.

До переваг даного методу відносяться висока точність та надійність вимірювань, до недоліків - значна тривалість процесу, що робить його малопридатним для експрес-аналізу.

Кондуктометричний метод заснований на залежності електричного опору деревини від її вологості. Для вимірювання використовуються електровологоміри, які фіксують зміни опору між електродами (голками або пластинами), введеними в деревину на певну глибину. Чим більше вологи міститься в матеріалі, тим нижчий його електричний опір.

Перевагами методу є швидкість вимірювання, що дозволяє оперативно отримати результати. До недоліків відносяться порівняно невисока точність (похибка до 1-2%), залежність результатів від щільності деревини та її хімічного складу.

Крім цих основних методів, у сучасній практиці також застосовуються інші способи визначення вологості деревини, такі як діелектричний метод (вимірювання ємності конденсатора, в якому деревина виступає діелектриком) та інфрачервона спектроскопія (аналіз поглинання інфрачервоного випромінювання молекулами води).

1.6 Параметри якості сушіння пиломатеріалів

Якість процесу сушіння деревини оцінюється за кількома ключовими параметрами, серед яких:

- наявність видимих дефектів після сушіння;
- середнє значення кінцевої вологості;
- рівномірність вологості в матеріалі;
- різниця вологості між поверхневими та внутрішніми шарами;
- залишкові внутрішні напруження.

Ці показники визначаються для певної партії матеріалу, за яку зазвичай приймають окремий штабель дощок або заготовок.

1.6.1 Візуальні дефекти.

Висушений матеріал повинен бути вільним від видимих дефектів незалежно від його подальшого призначення. Основними дефектами, що можуть виникати під час сушіння, є розтріскування та короблення. Розтріскування може бути зовнішнім, внутрішнім, торцевим або радіальним.

На початковому етапі сушіння, коли вологість деревини по всьому об'єму перевищує межу насичення клітинних стінок, усадка ще не починається, і, відповідно, напруження відсутні (рисунк 1.2, а). У поверхневих шарах починається випаровування вологи, тоді як внутрішні шари ще залишаються вологими. Однак, коли вологість поверхневих шарів зменшується нижче цієї межі, вони починають стискатися. Оскільки внутрішні шари ще зберігають високу вологість, вони чинять опір усиханню поверхневих шарів. У результаті цього на поверхні деревини виникають розтягувальні напруження, тоді як у внутрішніх шарах формуються стискувальні напруження (рис.1.5, б). На цьому етапі поки що немає видимих тріщин, але починає формуватися різниця у вологості між поверхнею та внутрішніми шарами.

В результаті розвитку внутрішніх напружень поверхневі шари деревини починають подовжуватися, а внутрішні стискатися (рисунк 1.2, б).

Якщо на цьому етапі розколоти зразок уздовж товщини, можна побачити викривлення деревини.

Якщо розтягуючі напруження на поверхні перевищують межу міцності деревини на розрив уперек волокон, то виникають поверхневі тріщини (рисунк 1.2, в). Такі тріщини зазвичай радіальні та проходять від поверхні до внутрішніх шарів.

У кінці сушіння внутрішні шари також втрачають вологу, і розподіл напружень змінюється: на поверхні залишаються стискуючі напруження, всередині матеріалу зберігаються розтягуючі напруження (рисунк 1.2, г).

Якщо внутрішні розтягуючі напруження перевищують міцність деревини, можуть з'явитися внутрішні тріщини (рисунк 1.2, д, е).

Ці тріщини також можуть мати радіальний напрямок, але вони розташовані глибше всередині матеріалу. Додатково можуть виникати торцеві тріщини, якщо кінці деревини висихають швидше, ніж середня частина.

1.6.2 Деформації деревини.

Якби деревина була абсолютно пружним матеріалом, ці напруження поступово зникали б у міру зниження вологості. Однак деревина має пластичні властивості, і в ній розвиваються залишкові деформації. Під час висихання деревина стає жорсткішою, що сприяє перетворенню пружних деформацій на залишкові.

У процесі сушіння у поверхневих шарах залишаються подовжувальні деформації, тоді як у внутрішніх – стискувальні. Наприкінці процесу це призводить до того, що поверхневі шари виявляються дещо більшими за розміром порівняно з внутрішніми. У результаті в матеріалі формуються зовнішні стискуючі напруження та внутрішні розтягувальні (рисунок 1.2, г).

Якщо розтягувальні напруження перевищують межу міцності деревини на розтяг поперек волокон, це призводить до розтріскування. На початковому етапі сушіння тріщини з'являються на поверхні, а ближче до завершення процесу – всередині матеріалу. Такі тріщини називаються усадочними і зазвичай мають радіальний напрямок.

1.6.3 Запобігання деформаціям

Хоча повністю усунути внутрішні напруження при деяких методах сушіння неможливо, їх можна зменшити до рівня, що не призводить до руйнування структури деревини.

Одним із поширених дефектів є торцеві тріщини, які виникають через швидше висихання торців матеріалу у порівнянні з його серединою. Найефективнішим способом запобігання цьому явищу є герметизація торців спеціальними вологонепроникними складами. Проте цей метод є трудомістким, тому в промислових масштабах застосовується рідко.

Найбільш практичним способом зменшення торцевого розтріскування є правильне укладання пиломатеріалів у штабелі:

- вирівнювання торців дощок;
- розташування крайніх прокладок врівень із торцями матеріалу;
- формування штабелів повного розміру.

При дотриманні цих заходів торцеві тріщини будуть неглибокими, що зменшить втрати деревини при подальшій механічній обробці.

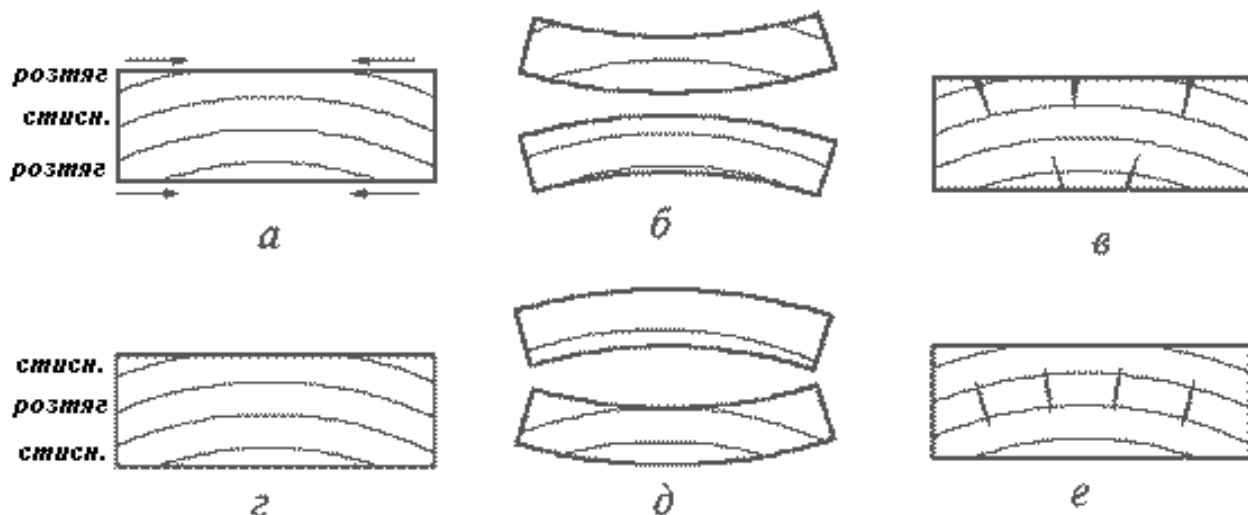


Рисунок 1.2 - Схема розвитку пошкоджень при сушінні.

Зміна форми пиломатеріалів і заготовок при сушці, а також випилюванні і неправильному зберіганні називається викривленням. Частіше всього викривлення відбувається через різну ступінь усихання по різних структурних напрямках. Розрізняють поперечне і поздовжнє короблення. Поздовжнє короблення буває: по кромці, по пласті і криловатість.

Викривлення може виникати при механічній обробці сухих пиломатеріалів: при несиметричному струганні, ребровому діленні через порушення рівноваги залишкових напруг.

Для того щоб запобігти поперечному і подовжньому коробленню дощок, їх варто сушити в затиснутому стані, дотримуватись правила формування штабеля (укладати в один ряд дошки строго однакової товщини, застосовувати стандартні стругані прокладки, кожен ряд яких повинен знаходитися в одній вертикальній площині).

Висушена деревина повинна відповідати по якості сушіння своєму призначенню. Призначення деревини різноманітне, і тому різні і вимоги, щодо якості сушіння.

Необхідна величина середньої кінцевої вологості деревини після сушіння коливається для різних виробів у широких межах і регламентується стандартами і технічними умовами. Наприклад, для меблів вона складає 7–8%, для столярно-будівельних виробів 10–12%, для тари 15–20% [7].

1.7 Обґрунтування вибору сушарки

Для висушування деревини використовуються камерна та конвективна сушарки. Однак вони мають суттєві відмінності у принципі роботи та ефективності процесу, описані в таблиці 1.2 [3, 7].

Таблиця 1.2 – Аналіз порівняльних характеристик камерної та конвективної сушарок

Характеристика	Камерна сушарка	Конвективна сушарка
Принцип роботи	Відбувається контрольоване висушування деревини в ізолюваній камері з регульованими параметрами середовища (температура, вологість, циркуляція повітря).	Використовує нагріте повітря, яке циркулює всередині камери або приміщення, видаляючи вологу з деревини.
Тип теплообміну	Поєднання конвекції, радіації та в деяких випадках кондуктивного теплообміну.	Головний механізм передачі тепла – конвекція, тобто тепло передається через потоки гарячого повітря.
Контроль параметрів	Повністю автоматизований контроль температури, вологості та швидкості циркуляції повітря.	Обмежений контроль параметрів, оскільки процес залежить від природної або примусової вентиляції.

Швидкість сушіння	Висока, сушіння триває від кількох днів до кількох тижнів.	Повільніший процес, може тривати тижні або навіть місяці.
Якість висушеної деревини	Висока якість без значних внутрішніх напружень та мінімальні ризики деформації.	Можливі внутрішні напруження, тріщини та нерівномірне висушування.
Енергоефективність	Вимагає більше енергії через складність системи управління.	Менші витрати енергії, але довший час сушіння може збільшити загальні витрати.
Область застосування	Використовується для масового промислового сушіння пиломатеріалів, паркету, меблевих заготовок.	Часто застосовується для сушіння менш критичних виробів або в умовах з обмеженими ресурсами.

Камерна сушарка забезпечує більш контрольований і швидкий процес висушування деревини з високою якістю кінцевого матеріалу. Вона ефективна для промислового виробництва, де важлива точність та мінімізація дефектів. Конвективна сушарка є більш економічним варіантом, але може призводити до нерівномірного висихання та утворення дефектів, тому її частіше застосовують у менш вимогливих процесах.

2. РОЗРОБЛЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

2.1 Технологічний процес сушіння сировини в камерній сушарці

2.1.1 Опис технологічного процесу камерної та атмосферної сушки пиломатеріалів.

Камерна сушка є основним технологічним методом видалення вологи з пиломатеріалів, що здійснюється у спеціальних сушильних камерах, обладнаних сучасними приладами для контролю та регулювання температури, відносної вологості та циркуляції повітря. Завдяки цьому забезпечується рівномірне висихання деревини та зниження внутрішніх напружень, що запобігає утворенню тріщин і деформацій. Зовнішній вигляд камерної сушарки показано на рисунку 2.1.



Рисунок 2.1 – Зовнішній вигляд камерної сушарки

Атмосферна сушка зазвичай використовується як попередній етап перед камерною обробкою деревини. Вона дозволяє знизити початкову вологість

пиломатеріалів до оптимального рівня, що суттєво скорочує тривалість подальшої камерної сушки, зменшуючи енергетичні витрати.

Для правильного сушіння пиломатеріали укладають у штабелі або штучним способом, коли дошки розміщують поштучно з прокладками між рядами, або пакетним, коли дошки попередньо групуються у пакети, що спрощує завантаження в сушильну камеру.

При формуванні штабелю штучним способом між рядами дошок розміщують спеціальні прокладки, виготовлені з деревини хвойних або листяних порід із вологістю не більше 18%. Прокладки повинні мати перетин 25×40 мм та довжину, що дорівнює ширині штабелю. Їх розташовують суворо перпендикулярно дошкам, а по висоті штабелю – одна над одною у вертикальній площині.

Формування штабеля виконується з пиломатеріалів однакової породи та товщини.

Дотримання цих вимог сприяє ефективному та якісному сушінню пиломатеріалів, зменшує ймовірність появи дефектів та підвищує довговічність кінцевого матеріалу.

2.1.2 Рекомендації до проведення камерної сушки деревини

Під час камерного сушіння доцільно вести спеціальні журнали та карти сушіння, рекомендовані у “Керівних матеріалах з камерного сушіння пиломатеріалів” [2]. У ці документи заносять такі відомості:

- фактичний стан середовища в камері порівняно з рекомендованим режимом (дані фіксують щогодини);
- характеристики пиломатеріалів та їхню кількість;
- результати перевірки поточної вологості пиломатеріалів;
- аналіз внутрішніх напружень і залишкових деформацій;
- оцінку якості проведеного сушіння;
- причини простою сушильної камери та інші важливі факти, що стосуються процесу сушіння.

2.2 Характеристики та технологія роботи камерної сушарки

Лісосушильні камери серії КСФ від компанії «Горлуш Ко» є сучасними установками, призначеними для ефективного та якісного сушіння деревини [10]. Ці камери відзначаються високою енергоефективністю, надійністю та забезпечують рівномірне висушування пиломатеріалів, що є критично важливим для збереження їхніх фізико-механічних властивостей.

Основні характеристики лісосушильних камер серії КСФ наступні:

- конструкція та матеріали (камери виготовлені з високоякісних матеріалів, що забезпечують довговічність, а також стійкість до корозії. Теплоізоляція стін та дверей мінімізує тепловтрати, підвищуючи загальну енергоефективність;
- система управління (сучасні автоматизовані системи управління дозволяють точно регулювати параметри сушіння - температуру, вологість, швидкість повітряного потоку. Така система забезпечує умови, оптимальні для будь-якої породи деревини та товщини пиломатеріалів;
- енергоефективність (камеру можна назвати низьким споживачем енергії через високоякісну теплоізоляцію та використання інноваційних технологій, що є низьким у порівнянні з більш традиційною моделлю, що потребує нижчих експлуатаційних витрат;
- ємність та модифікації (у серії КСФ є декілька моделей з різною вантажопідйомністю, серед яких можна підібрати оптимальний варіант у зв'язку з обсягом виробництва та специфікою підприємства.

Завдяки цим характеристикам, лісосушильні камери «Горлуш Ко» серії КСФ [11] є відмінним вибором для підприємств деревообробної галузі, які прагнуть забезпечити високу якість продукції та оптимізувати процес сушіння деревини.

У своїй роботі я використовуватиму лісосушильну камеру КСФ50-6 – це сучасна високопродуктивна установка для сушіння деревини, яка відповідає сучасним вимогам енергоефективності, рівномірності сушіння та

автоматизації процесу.

Технічні характеристики КСФ50-6:

- завантажувальний об'єм: 53 м³;
- тип конструкції: модульна, що забезпечує легкість транспортування та монтажу;
- матеріал корпусу: високоякісна нержавіюча сталь з антикорозійним покриттям;
- теплоізоляція: сендвіч-панелі товщиною 100мм з наповнювачем з мінеральної вати, що мінімізує тепловтрати;
- система обігріву: водяна або парова, з можливістю підключення до існуючих джерел тепла;
- система вентиляції: реверсивна, з автоматичним регулюванням швидкості повітряного потоку для рівномірного сушіння;
- система зволоження: форсункова, для точного контролю вологості всередині камери;
- система управління: автоматизована, з можливістю програмування режимів сушіння та дистанційного моніторингу процесу;
- енергоспоживання: оптимізоване, з використанням енергоефективних компонентів;
- потребує теплова потужність: 160 кВт;
- час сушіння: залежно від породи деревини, початкової вологості та бажаного кінцевого результату, в середньому становить від 7 до 15 діб.

Внутрішні розміри камери: довжина – 6.5 м, ширина – 7.35 м, висота – 5.15 м.

Габаритні розміри штабелів: довжина – 6 м, ширина – 1.2 м, висота – 1.2 м.

Кількість штабелів: по глибині – 4 шт., по висоті – 3 шт.

Технологічна схема камерної сушарки КСФ50-6 приведена на рисунку 2.2.

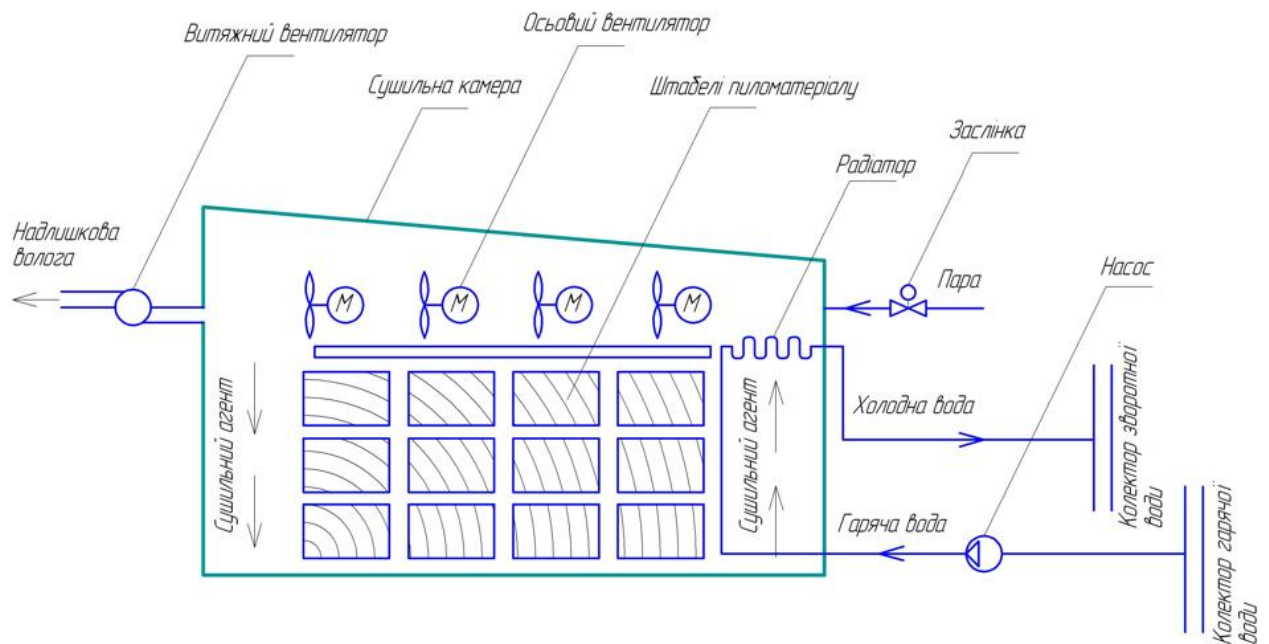


Рисунок 2.2 - Технологічна схема камерної сушарки КСФ50-6.

Лісосушильна камера КСФ50-6 забезпечує високу якість сушіння пиломатеріалів, ефективне використання енергії та довговічність конструкції.

Сушіння деревини в камерній сушарці КСФ50-6 здійснюється за допомогою автоматизованого контролю температури, вологості та циркуляції повітря, що забезпечує рівномірне висихання матеріалу без значних внутрішніх напружень і дефектів. Процес розпочинається з вибору режиму сушки. Вибір режиму сушки пиломатеріалів здійснюється в залежності від породи деревини, початкової вологості і товщини пиломатеріалів. Кожен режим складається з декількох послідовних етапів відповідно до заданих параметрів.

1. Підготовчий етап включає завантаження штабелів деревини у сушильну камеру; контроль вологості вихідного матеріалу за допомогою вологомірів; вибір оптимального режиму сушіння відповідно до породи деревини, її початкової вологості та кінцевих вимог; запуск системи нагріву, вентиляції та зволоження.

2. Початковий етап сушіння. Сюди відноситься підвищення температури в камері для прогрівання деревини; підтримання високої відносної вологості для запобігання поверхневим тріщинам.

3. Основний етап сушіння. На цьому етапі температура поступово підвищується, забезпечуючи випаровування вологи з внутрішніх шарів деревини; реверсивна система вентиляції рівномірно розподіляє гаряче повітря по всьому об'єму камери; вологість повітря контролюється системою зволоження для запобігання різкому перепаду вологості всередині матеріалу; ведеться постійне вимірювання поточної вологості деревини та коригування параметрів сушіння.

4. Фінальний етап сушіння, при якому знижується температура та проводиться контрольна перевірка рівномірності сушіння по всьому перерізу деревини, вирівнюється вологість всередині матеріалу шляхом короткочасного зволоження (кондиціювання), вимірюються залишкові внутрішні напруження.

5. Охолодження та вивантаження. На цьому етапі відбувається поступове зниження температури до навколишнього рівня, відкриття камери та вивантаження висушеної деревини, перевірка якості сушіння та контрольні вимірювання вологості.

2.3 Розроблення функціональної схеми автоматизації

2.3.1 Функціональна схема автоматизації: призначення, методика розробки та основні принципи.

Функціональні схеми визначають структуру систем автоматичного контролю, управління та регулювання технологічних процесів. Вони деталізують взаємодію вузлів автоматизації, засобів вимірювання та виконавчих механізмів, необхідних для ефективного функціонування виробничого процесу. Основні завдання функціональних схем полягають у:

- отриманні первинних даних про стан технологічного процесу;

- управлінні технологічними параметрами та їх стабілізації;
- здійсненні контролю, реєстрації та передачі інформації про стан обладнання.

Розроблення схем передбачає вибір методів вимірювання параметрів, визначення виконавчих механізмів і оптимальне розташування засобів автоматизації. Проектування систем автоматизації здійснюється з урахуванням особливостей технологічного процесу та вимог безпеки.

Принципи побудови функціональних схем наведені далі.

1. Автоматизація повинна враховувати можливість подальшої модернізації.
2. Вибір технічних засобів здійснюється з урахуванням характеристик середовища, точності вимірювань та умов експлуатації.
3. Для уніфікації та взаємозамінності проектування системи автоматизації необхідно здійснювати на базі серійного обладнання.
4. Використання автоматичних датчиків та приладів, що відповідають державним стандартам.
5. При відсутності серійного обладнання допускається розробка спеціалізованих засобів автоматизації.
6. Вибір джерел допоміжної енергії (електричної, пневматичної, гідравлічної) залежить від умов безпеки та швидкодії системи.
7. Кількість контрольно-вимірювальних приладів на пультах управління повинна бути оптимальною для зручності експлуатації.

Застосування цих принципів дозволяє створювати ефективні та надійні системи автоматизації, що сприяють підвищенню продуктивності та якості виробництва.

2.3.2 Розроблення функціональної схеми автоматизації технологічного процесу сушки деревини в камерній сушарці

Для створення функціональної схеми автоматизації необхідно визначити, які параметри технологічного процесу підлягають регулюванню,

контролю та сигналізації [12, 13]. Для цього спочатку складається карта технологічних параметрів, що базується на аналізі фізичних процесів, які відбуваються в камерній сушарці. Опис цього процесу наведений у другому розділі.

Технологічна карта містить інформацію про параметри, які контролюються та регулюються у різних зонах камери, зокрема: подача теплоносія, температура і вологість повітря, вологість пиломатеріалу, циркуляція сушильного агента, подача пари та видалення надлишкової вологи.

Функціональна схема автоматизації розробляється на основі технологічної карти параметрів та загальної технологічної схеми автоматизації. Вона повинна відповідати всім вимогам і функціям, передбаченим у технологічній карті [13-15].

Функціональна схема автоматизації технологічних процесів є ключовим документом, що визначає структурну організацію системи автоматизації, її основні компоненти та їх взаємозв'язки. Вона містить спрощене зображення обладнання, яке підлягає автоматизації, а також засоби керування та контролю, позначені згідно з діючими стандартами, з відповідними лініями зв'язку.

У випадку сушіння пиломатеріалів функціональна схема автоматизації (рисунк 2.3) містить два контури регулювання та один контур контролю.

Система управління процесом базується на контролері "МК-51". Сигнали від датчиків надходять на аналогові входи контролера, де обробляються і перетворюються, після чого дискретні та аналогові сигнали виводу передаються на виконавчі механізми для управління процесом.

Функціональна схема автоматизації містить такі основні технічні засоби:

- 2 датчики температури: один "сухий" (для вимірювання температури в камері) і один "вологий" (разом із сухим використовується для визначення вологості повітря в камері за психрометричним методом);
- 4 голчастих датчики для контролю вологості пиломатеріалів;

- 4 осьові вентилятори, що забезпечують циркуляцію сушильного агенту;
- насос для подачі теплоносія;
- витяжний вентилятор, призначений для видалення надлишкової вологи;
- регулюючий клапан, який керує подачею пари для збільшення вологості.

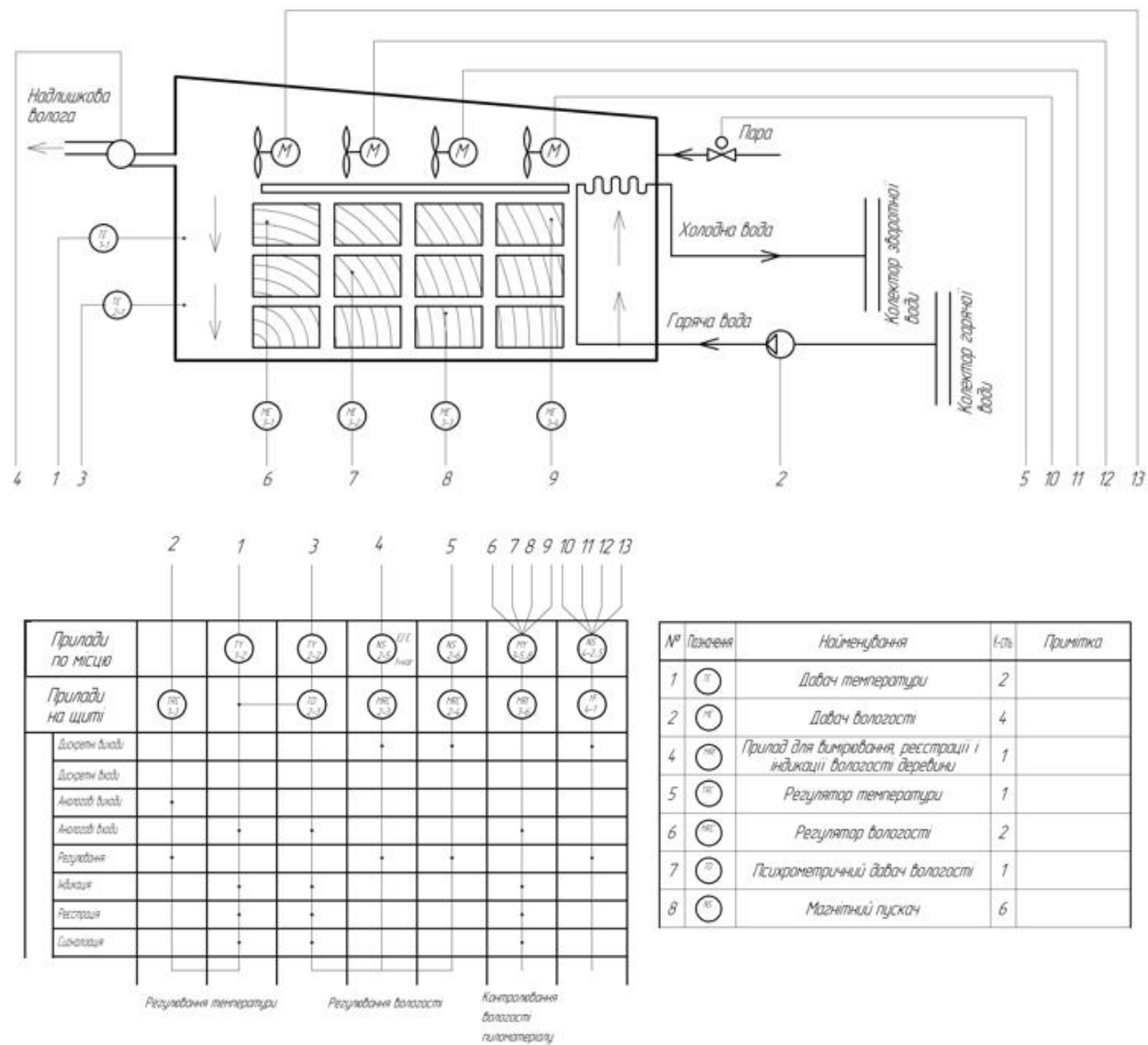


Рисунок 2.3 - Функціональна схема автоматизації технологічного процесу сушки деревини

Опис контурів здійснюється на основі функціональної схеми автоматизації (рисунок 2.3).

Контур №1.

Регулювання температури в камері.

Основною метою регулювання є підтримання необхідної температури в

сушильній камері. Вимірювання здійснюється за допомогою температурного датчика («сухого» датчика температури), сигнал з якого передається на аналоговий вхід контролера МІК-51. Контролер обробляє отримане значення за допомогою FBD-програм і порівнює його з установленими межами. У разі відхилення параметра формуються коригувальні сигнали, які передаються на аналоговий вихід. Далі керуючий сигнал надходить на перетворювач частоти, що регулює швидкість обертання двигуна насоса, який подає теплоносій.

Контур №2.

Регулювання вологості в камері.

Контроль вологості в камері здійснюється психрометричним методом, використовуючи два температурні датчики, один з яких є «вологим». Сигнал від «вологого» датчика надходить на аналоговий вхід контролера МІК-51, де він порівнюється з показаннями «сухого» датчика. Далі отримані значення обробляються за допомогою FBD-програм і співставляються з встановленими межами. У разі відхилення вологості формуються керуючі сигнали, які подаються на дискретні виходи. Залежно від необхідності підвищення або зниження вологості, сигнал спрямовується або на регулюючий клапан подачі пари (для збільшення вологості), або на перетворювач частоти, який регулює швидкість обертання двигуна витяжного вентилятора (для видалення надлишкової вологи).

Контрольовані параметри.

Контроль вологості пиломатеріалу.

У процесі сушіння ключовим контрольованим параметром є вологість пиломатеріалів. Її вимірювання здійснюється за допомогою чотирьох голчастих датчиків температури, сигнал від яких надходить на аналогові входи чотирьохканального вимірювача вологості. Після обробки дані передаються через аналоговий вихід на вхід контролера МІК-51, де здійснюється контроль та відображення значення вологості.

2.4. Вибір технічних засобів автоматизації [16, 17]

2.4.1 Вимірювання температури в камері

Для вимірювання температури в камері обираємо давач вітчизняного виробництва ТСМ-1088, що призначений для вимірювання температури рідких і газоподібних середовищ в різних галузях промисловості (рисунок 2.4).



Рисунок 2.4 – Давач температури ТСМ-1088.

Термоперетворювач опору ТСМ-1088 використовується для вимірювання температури рідких і газоподібних середовищ у промисловості, енергетиці та житлово-комунальному господарстві, а також - в якості давачів для вимірювання температури і вологості в сушильній камері психрометричним методом. Він працює в діапазоні температур від -50 до +180 °С та відповідає номінальним статичним характеристикам 50П або 100П згідно з ДСТУ 2858:2015. Пристрій має високу точність вимірювання та може належати до класу А або В.

Підключення термоперетворювача може здійснюватися за 2-, 3- або 4-провідною схемою. Він може містити один або два чутливих елементи. Час термічної інерції залежить від конструктивного виконання: для одних варіантів він не перевищує 40 секунд, для інших – 20 секунд. Пристрій витримує робочий тиск до 10 МПа, якщо використовується у варіантах із міцнішою конструкцією, або до 0,4 МПа у більш легких виконаннях.

Корпус термоперетворювача виготовлений із нержавіючих сталей 08X13, 12X18Н10Т або Х23Ю5, що забезпечує його довговічність і стійкість до агресивних середовищ. Головка приладу виконана з пресматеріалу АГ-4В, що надає їй необхідну механічну міцність, а рівень захисту IP54 забезпечує надійний захист від пилу і вологи.

Габаритні розміри пристрою залежать від конкретного виконання і можуть варіюватися від 80 мм до 3150 мм. Для більшої адаптації до умов експлуатації ТСМ-1088 може комплектуватися захисними гільзами або рухомими штуцерами. Завдяки високій точності, надійності та стійкості до несприятливих умов, цей термоперетворювач широко застосовується у вимірювальних системах різних технологічних процесів.

Чутливий елемент датчика 50М зазвичай являє собою дротяну обмотку, виготовлену з тонкого мідного дроту певної марки. Його електричний опір змінюється залежно від температури, причому максимальна робоча температура зазвичай не перевищує 180 °С.

Число 50 у маркуванні означає, що при температурі 0°С ідеальний чутливий елемент має опір 50 Ом. Проте у реальних датчиках можливі невеликі відхилення через похибки виробництва, а також додатковий опір сполучних проводів. Для мідних датчиків температури характерний коефіцієнт зміни опору $W_0/100=1,428$, що визначається як відношення опору при 100°С до опору при 0°С.

На основі чутливого елемента 50М можуть виготовлятися різні типи термодатчиків, зокрема голчасті, із клемною головкою, а також датчики із захисною гільзою або з під'єднувальним дротом.

Датчики виконуються у трьох конструктивних варіантах:

- без штуцера;
- з плаваючим штуцером (з привареною шайбою);
- з привареними штуцерами.

2.4.2. Вимірювання вологості в камері

За високої вологості повітря рекомендується використовувати

психрометричні датчики, які складаються з двох узгоджених термоперетворювачів опору, виготовлених із міді або платини. Один із них, так званий «вологий», контактує з гнотом, що з'єднаний із резервуаром, наповненим дистильованою водою.

Суть психрометричного методу полягає у визначенні різниці температур між «сухим» і «вологим» датчиками, причому температура останнього завжди нижча через випаровування води з поверхні гнота. Чим сухіше повітря, тим інтенсивніше випаровування, що, відповідно, знижує температуру «вологого» термометра.

Для розрахунку відносної вологості (Ψ , %) використовують загальноприйняту формулу, отриману на основі напівемпіричних психрометричних рівнянь:

$$\Psi = \frac{E_m}{E_c} - \frac{A \cdot p \cdot (T_c - T_m)}{E_c},$$

де:

E_m – найбільший можливий парціальний тиск водяної пари за температури повітря T_m , °C;

E_c – найбільший можливий парціальний тиск водяної пари за температури повітря T_c , °C;

p – атмосферний тиск;

T_c – температура «сухого» термометра, °C;

T_m – температура «вологого» термометра, °C;

A – психрометричний коефіцієнт (постійна психрометра).

Психрометричний коефіцієнт визначається багатьма факторами, які впливають на процес тепло- та масообміну між чутливим елементом «вологого» термометра та навколишнім середовищем. До них належать розміри та форма самого чутливого елемента, характеристики змочувального гнота, температура використовуваної води та її теплопровідність, а також вплив теплового випромінювання.

Серед зовнішніх факторів найбільший вплив має швидкість руху

повітря. При збільшенні швидкості повітряного потоку коефіцієнт A поступово зменшується, а при швидкості понад 2,5 м/с досягає стабільного значення. Тому доцільно застосовувати вентилятори, що забезпечують швидкість повітряного потоку не менше 2,5 м/с.

Для ефективного змочування ґніт повинен мати високу здатність до поглинання вологи. Найчастіше для цього використовують тонкі бавовняні тканини, такі як марля, батист або мусліні. Перед використанням тканину рекомендується прокип'ятити для видалення фабричних домішок.

ґніт виготовляється з відрізка марлі (4–6 шарів), одного боку якого має вистачати для повного покриття датчика температури, а іншого - для занурення в резервуар з водою. Тканину складають удвічі, зшивають або замітають у місці перегину, утворюючи петлю для просування через отвір у датчику. Марля повинна щільно прилягати до датчика. При відсутності марлі можна використовувати інші більш щільні матеріали, складені у 2–3 шари.

Якщо можливості покрити ґнтом всю довжину датчика немає, важливо, щоб хоча б його кінець був закритий на відстань не менше 6 см, оскільки саме там розташований чутливий елемент.

Температурні датчики слід розташовувати один над одним із проміжком 50–100 мм, закріплюючи їх або перпендикулярно до стінки резервуара (рисунки 2.5 а), або паралельно їй (рисунки 2.5 б). Під «вологим» термометром необхідно встановити ємність з водою таким чином, щоб відстань до її поверхні становила 60–100 мм.

Для виготовлення резервуара можна використовувати будь-який матеріал, який стійкий до умов експлуатації. Підходять нержавіюча сталь, оцинковане залізо, термостійкий пластик, скло або інші матеріали, що не піддаються руйнуванню і не виділяють шкідливих речовин у заданих умовах.

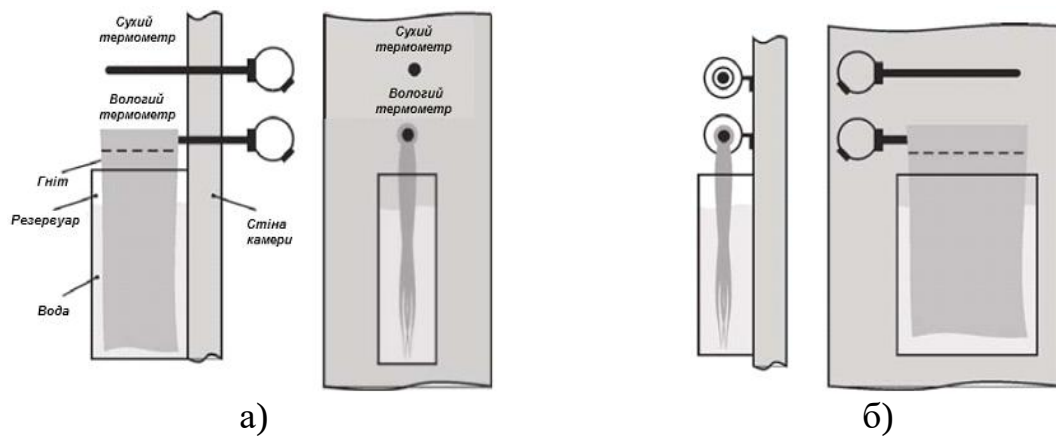


Рисунок 2.5 - Монтаж давачів температури:

а) – перпендикулярно, б) – паралельно

Збільшити запас води в резервуарі можна двома методами: або збільшивши його глибину, або розширивши його ширину. У першому випадку необхідно подовжити гніт, проте це може призвести до його пересихання. У другому випадку зростає площа випаровування води. Щоб зменшити випаровування, доцільно використовувати резервуар з вузьким горлечком, що нагадує форму пляшки (рисунок 2.6 а). Це дозволяє збільшити ширину резервуара в 3–4 рази (до 150–200 мм) без значного збільшення випаровувальної поверхні.

Якщо необхідно поповнювати запас води в резервуарі без входу в робочу камеру, можна встановити додатковий резервуар поза камерою та з'єднати його з основним (рисунок 2.6 б). Це забезпечить безперервне постачання води без необхідності втручання в робочий процес.

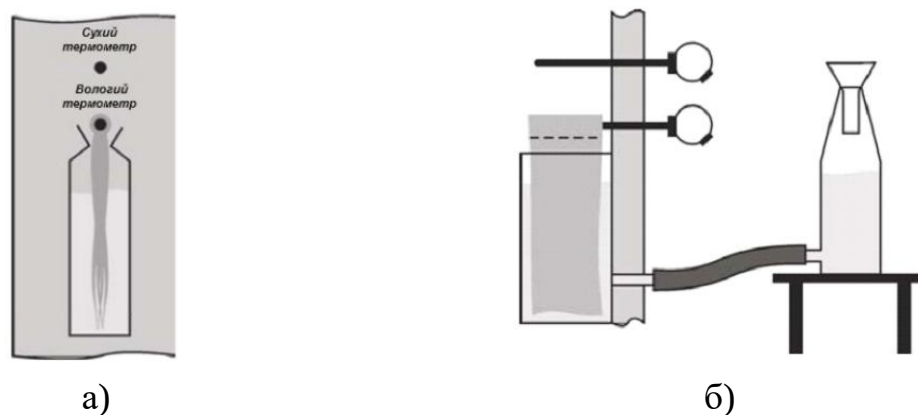


Рисунок 2.6 - Форма резервуару:

а) – з бутлковим горлом, б) – поза камерою

Отже для вимірювання вологості в камері використаємо два датчі TCM 1088, де один - буде виконувати роль “сухого”, а інший - “мокрого” термоперетворювачів.

2.4.3 Контроль вологості деревини

Вимірювальний прилад SH-0453 (рисунок 2.7), що працює від мережі, призначений для визначення та цифрової індикації рівня вологості деревини за допомогою голчастого датчика, зокрема в умовах сушильної камери. Він дозволяє здійснювати вимірювання вологості хімічно необробленої деревини різних порід, таких як сосна, береза, дуб, бук і модрина.



Рисунок 2.7 - Вимірювач вологості деревини SH-0453

Вимірювач вологості деревини SH-0453 призначений для інтеграції в систему контрольно-вимірювального обладнання користувача. Його голчастий датчик складається з електродів стандартних розмірів, розташованих на фіксованій відстані один від одного.

Для проведення вимірювань датчик встановлюється на досліджуваний зразок пиломатеріалів так, щоб електроди були орієнтовані вздовж волокон деревини. Голки датчика занурюються в матеріал приблизно на 10 мм (рисунок 2.8).

Оскільки електропровідність деревини змінюється залежно від рівня її вологості, мікроструми між електродами перетворюються електронною вимірювальною схемою на напругу, яка становить приблизно 1000 мВ на кожні 100% вологості.

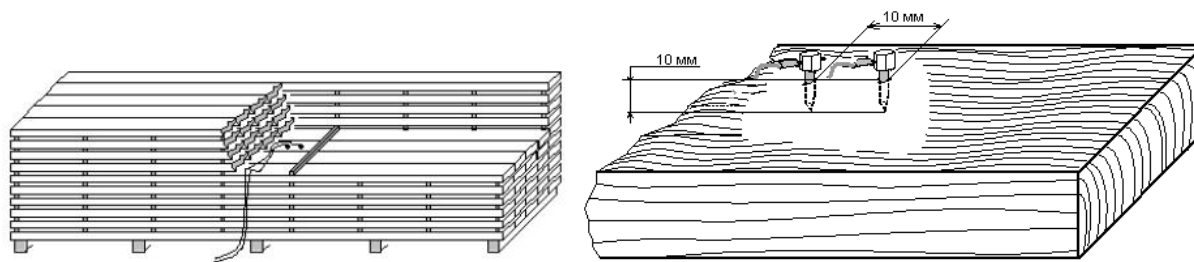


Рисунок 2.8 - Схема розміщення електродів

Отримане значення подається на цифровий вольтметр, розташований на передній панелі приладу.

2.4.4 Контроль подачі теплоносія

Регулювання подачі теплоносія здійснюватиметься шляхом зміни швидкості обертання електроприводу насоса за допомогою частотного перетворювача. Цей пристрій забезпечує плавне, безступеневе регулювання швидкості трифазного асинхронного двигуна, змінюючи частоту змінного струму на своєму виході.

Частотний перетворювач дозволяє контролювати та відображати на цифровому дисплеї основні параметри системи, зокрема швидкість, вихідну частоту, струм, напругу двигуна, потужність, момент, стан дискретних входів і загальний час роботи пристрою.

Принцип частотного регулювання швидкості асинхронного двигуна ґрунтується на зміні частоти f_1 живильної напруги, що дозволяє регулювати кутову швидкість магнітного поля статора при фіксованій кількості пар полюсів p :

$$\omega_0 = \frac{2\pi \times f_1}{p}$$

Такий метод забезпечує точне та стабільне регулювання швидкості у широкому діапазоні без значного збільшення ковзання, що мінімізує втрати потужності.

Для досягнення високих енергетичних характеристик двигуна, таких як високий коефіцієнт потужності, ефективність та здатність витримувати перевантаження, разом із частотою необхідно регулювати й напругу. Закон зміни напруги визначається характером моменту навантаження:

При постійному моменті навантаження $M_c = \text{const}$ напруга повинна змінюватися пропорційно частоті:

$$\frac{U_1}{f_1} = \text{const}$$

Для вентиляторного типу навантаження застосовується відповідна залежність напруги від частоти:

$$\frac{U_1}{f_1^2} = \text{const}$$

Якщо момент навантаження обернено пропорційний швидкості, застосовується інша закономірність регулювання:

$$\frac{U_1}{\sqrt{f_1}} = \text{const}$$

Таким чином, частотний перетворювач забезпечує ефективне та безперервне регулювання швидкості обертання вала асинхронного двигуна, синхронно змінюючи частоту та напругу живлення статора.

Застосування регульованого електропривода сприяє енергозбереженню та надає нові можливості для вдосконалення роботи систем і обладнання. Значне скорочення споживання електроенергії досягається завдяки можливості керування різними технологічними параметрами. Наприклад, у випадку транспортерів і конвеєрів можна змінювати швидкість їх руху, а для насосів і вентиляторів (як у нашому випадку) – підтримувати необхідну температуру або регулювати продуктивність.

Порівняємо технічні характеристики декількох виробників частотних перетворювачів (таблиця 2.1).

Таблиця 2.1 - Порівняльні характеристики частотних перетворювачів

Виробник		LS Industrial Systems	Delta Electronics	Schneider Electric
Модель		SV015 iC5-1	VFD015B21 A	ATV12HU15M2
Потужність двигуна, кВт		1.5	1.5	1.5
Вихідні параметри	Номінальна вихідна потужність, кВА	3	2.8	6.2
	Номінальний вихідний струм, А	8	7	7,5
	Максимальна вихідна напруга, В	Три фази, 200 - 230	Три фази, 200 - 230	Три фази, 200 - 240
	Діапазон регулювання вихідної частоти, Гц	0 – 400	1 - 400	0 - 400
Вхідні параметри	Напруга	Одна фаза, 200 – 230	Одна фаза, 180 – 264	Одна фаза, 200 – 240
	Частота	50–60 Гц	50–50 Гц	50–60 Гц

Серед проаналізованих перетворювачів найнайдійнішим варіантом буде частотний перетворювач фірми Schneider Electric марки Altivar12 ATV12HU15M2 (рисунок 2.9).



Рисунок 2.9 - Частотний перетворювач Altivar12 ATV12HU15M2

2.4.6 Керування подачею пари

Для керування подачею пари застосовується регулюючий клапан, який є одним із видів трубопровідної арматури, що забезпечує регулювання потоку. Це найпоширеніший тип регулюючої арматури, який використовується як для аналогового, так і для дискретного регулювання витрати та тиску.

Регулювання здійснюється шляхом зміни прохідного перетину, що впливає на витрату середовища.

Залежно від умов експлуатації та сфери застосування, регулюючі клапани можуть мати різні типи керування. Найчастіше для цього використовуються спеціальні приводи, що працюють під управлінням промислових мікроконтролерів, які отримують команди від датчиків, що контролюють параметри потоку в трубопроводі. Приводи клапанів можуть бути електричними, пневматичними, гідравлічними або електромагнітними.

Для вибору оптимального варіанту розглянемо технічні характеристики двох різних моделей електричних клапанів та визначимо найбільш підходящий (таблиця 2.2).

Таблиця 2.2 - Технічні характеристики електричних клапанів

Виробник	Danfoss	Samson
Модель	VFS-2	241-4
Кодовий номер	065B1550	
Діаметр	50 мм	50 мм
Умовний тиск P_y , бар	25	25
Температура регульованого середовища T , °C	від 2 до 200°C;	від 2 до 200°C;
Характеристика регулювання	Логарифмічна	Лінійна
Регульоване середовище	Вода, водяна пара (при $\Delta P_{кл}=6$ бар), 50% водний розчин гліколю	Вода, водяна пара (при $\Delta P_{кл}=6$ бар), 50% водний розчин гліколю
K_{vs} , м ³ /год	40	25
Час ходу, с	40	60
Протікання через закритий клапан, % від K_{vs}	Не більше 0,05	Не більше 0,1
Стандарт фланців	ISO 7005-2	
Електродвигун	AMV(E) 25(SU/SD)	3274
Макс. допустимий і рекомендований перепад тисків, бар	3	12
Хід клапана, мм	15	15

З поміж представлених моделей надійнішим варіантом для регулювання подачі пари в камерну сушарку обираємо модель VFS-2 фірми Danfoss (рисунок 2.10).



Рисунок 2.10 - Електричний клапан Danfoss VFS-2

2.4.7 Вибір програмованого логічного контролера

Одним із ключових компонентів ефективного керування процесом сушіння є застосування програмованого логічного контролера. Його використання дає змогу мінімізувати вплив людського фактора на процес та забезпечити його повну або часткову автоматизацію.

Для вибору оптимального рішення розглянемо технічні характеристики двох найбільш поширених моделей мікроконтролерів (таблиця 2.3).

Таблиця 2.3 - Технічні характеристики мікроконтролерів

Виробник	Мікрол	ОВЕН
Модель	МИК-51	МПР51-Щ4
Кількість каналів регулювання	4	3
Період вимірювання	не більше 0,1 с	6,5 с
Період оновлення інформації на дисплеї	не більше 0,5 с	не більше 1,5 с
Роздільна здатність цифрової індикації	$\pm 0,01\%$	$\pm 0,01\%$
Кількість розрядів цифрового індикатора	4 (на кожен канал)	3 (на кожен канал)

Висота цифр світлодіодних індикаторів	10 мм	13 мм
Температура навколишнього середовища	від -40 ° С до +70 ° С	від +1...+50 °С
Відносна вологість	20...95 %	30...80 %
Напруга живлення	від мережі змінного струму ~ (220 ± 22) В, (50 ± 1) Гц	від мережі змінного струму ~ (90...245 В), (47...63 Гц)
Споживана потужність	не більше 8,5 Вт	не більше 12 Вт
Корпус (ВхШхГ)	щитовий 96х96х170 мм	щитовий 96×96×145 мм,
Монтажна глибина	190 мм	95 мм
Тип інтерфейсу	RS-485	RS-232 або RS-485
Тип кабеля	екранована вита пара	екранована вита пара
Маса блока	не більше 1 кг	не більше 1 кг
Ступінь захисту корпусу	IP30	IP54

Виходячи з технічних характеристик обираємо МІК-51, як більш високоточний та надійний (рисунок 2.11).



Рисунок 2.11 - Мікроконтролер МІК-51

Контролер МІК-51 призначений для встановлення всередині вертикальної панелі щита або пульта керування шляхом зануреного монтажу.

Клемні з'єднувачі, які є частиною конструкції контролера, передбачені для монтажу на DIN-рейку.

Пристрій має розміщуватися у приміщенні, яке відповідає вимогам вибухо- та пожежобезпеки.

Умови експлуатації контролера повинні відповідати таким параметрам:

- температурний діапазон від -40 до +70 °С;
- відносна вологість повітря від 40 до 95%;
- атмосферний тиск у межах 85–106,7 кПа;
- захист від впливу зовнішніх магнітних полів з інтенсивністю понад 400 А/м;
- відсутність вібрацій із частотою понад 25 Гц та амплітудою більше 0,1 мм;
- навколишнє середовище не повинно містити агресивних газів або парів.

З'єднання контролера МІК-51 із датчиками та виконавчими механізмами здійснюється через клемні блоки відповідно до проекту автоматизації, використовуючи кабельні з'єднання та джгути вторинної комутації.

Підключення проводиться за допомогою безгвинтових плоско-пружинних клем, інтегрованих у відповідні клемні блоки. До цих клем можна підключати різні типи провідників: одножильні, багатожильні, тонкопровідникові багатожильні (зокрема з ущільненими жилами), а також тонкопровідникові з кінцевими втулками або штифтовими кабельними наконечниками.

3. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ ТА АНАЛІЗ ЇЇ РОБОТИ

3.1 Визначення параметрів системи автоматичного управління

Коли теплоносіє проходить через теплообмінник сушильної камери, він передає частину своєї енергії повітрю, яке знаходиться всередині камери. Оскільки температура повітря нижча за температуру стінок теплообмінника, вони починають нагрівати повітря.

Процес передачі тепла відбувається поетапно: спочатку теплоносіє передає енергію стінкам теплообмінника, а потім ці стінки передають її повітрю, яке, у свою чергу, нагріває деревину та стіни камери.

Щоб спростити математичну модель нагрівання повітря, приймемо такі припущення:

- передача енергії від теплоносія до повітря відбувається без тепловтрат; уся теплова енергія, яку поглинає конструкція теплообмінника, спрямовується на нагрівання повітря;
- густина і теплоємність повітря залишаються незмінними незалежно від температури;
- теплоємність теплоносія також не змінюється при зміні температури.

Виходячи з цього, математичну модель динаміки зміни температури конденсату в газовому сепараторі можна отримати на основі рівняння теплового балансу [18-21].

$$Q_{\text{ПД}} - Q_{\text{ВД}} = \Delta Q, \quad (3.1)$$

де $Q_{\text{ПД}}$, $Q_{\text{ВД}}$ - кількість теплоти відповідно підведена та відведена від об'єкта, Дж;

ΔQ - кількість теплоти накопичена або акумульована об'єктом, Дж.

У сталому (статичному) режимі $\Delta Q = 0$ та рівняння і (3.1) має вигляд:

$$Q_{\text{ПД}} - Q_{\text{ВД}} = 0 \quad (3.2)$$

Величина ΔQ для повітря з переходом до диференціалів визначається наступним чином:

$$\frac{dQ}{dt} = C_{\Pi} \cdot m_{\Pi} \cdot \frac{dT_{\Pi}}{dt}, \quad (3.3)$$

де C – питома теплоємність повітря, що знаходиться в камері;

Підведена кількість тепла визначається:

$$Q_{\PiД} = m_B C_B (T_2 - T_1), \quad (3.4)$$

де m_B – маса води у якості теплоносія;

C_B – теплоємність води;

T_2, T_1 – температура теплоносія відповідно початкова і кінцева.

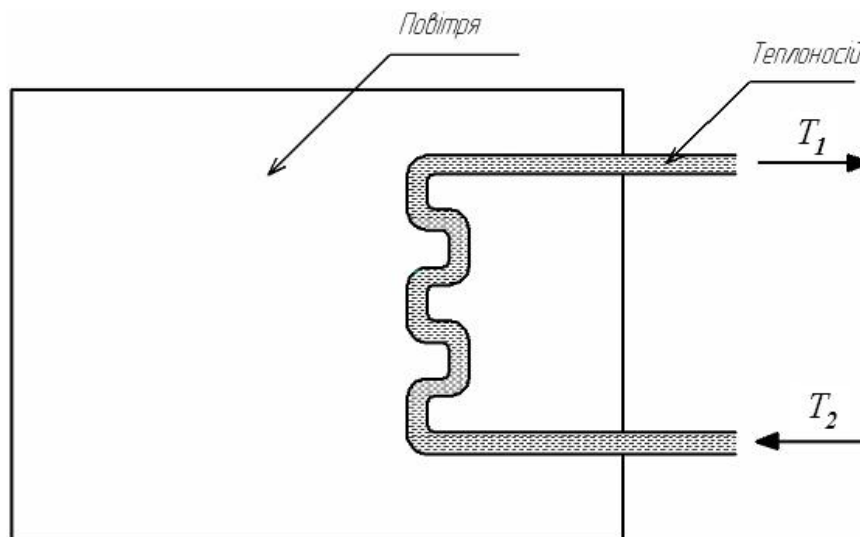


Рисунок 3.1. - Схема теплообмінника

Кількість тепла, що була віддана, визначається за формулою:

$$Q_{ВД} = \alpha \cdot F \cdot \Delta t \cdot \Delta T \quad (3.5)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі;

F – площа поверхні, яка приймає участь у теплообміні;

Δt – час на протязі якого відбувалася теплопередача;

ΔT – різниця температур між стіною та повітрям.

Математична модель нагрівання повітря в камері формується шляхом підстановки виразу 3.4 та 3.5 у рівняння 3.3:

$$m_{II} \cdot C_{II} \cdot \frac{dT_{II}}{dt} = \frac{m_B \cdot C_B}{dt} \cdot (T_2 - T_1) - \alpha \cdot F \cdot T_{II} \quad (3.6)$$

де G_B – витрата теплоносія;

Дане рівняння можна записати наступним чином:

$$m_{II} \cdot C_{II} \cdot \frac{dT_{II}}{dt} - \alpha \cdot F \cdot T_{II} = G_B \cdot C_B \cdot (T_2 - T_1) \quad (3.7)$$

де G_B – витрата теплоносія

Рівняння (3.7) являє собою математичну модель об'єкта за каналом керування: витрата теплоносія $\rightarrow$ температура повітря в камері.

Якщо виразити рівняння (3.7) наступним чином:

$$\frac{m_{II} C_{II}}{\alpha F} \cdot \frac{dT_{II}}{dt} - T_{II} = G_B \cdot \frac{C_B (T_2 - T_1)}{\alpha F}, \quad (3.8)$$

то, застосувавши перетворення Лапласа, отримаємо:

$$\left(\frac{m_{II} C_{II}}{\alpha F} \cdot p + 1 \right) \cdot T_{II}(p) = \frac{C_B (T_2 - T_1)}{\alpha F} \cdot G_B(p).$$

Передавальна функція об'єкта керування (ОК) матиме вигляд:

$$W(p) = \frac{T_{кон}(p)}{G_B(p)} = \frac{\frac{C_B \cdot (T_2 - T_1)}{\alpha \cdot F}}{\frac{m_{II} \cdot C_{II}}{\alpha \cdot F} \cdot p + 1} = \frac{K}{Tp + 1},$$

де $K = \frac{C_B \cdot (T_2 - T_1)}{\alpha \cdot F}$ – коефіцієнт передавання;

$T = \frac{m_{II} \cdot C_{II}}{\alpha \cdot F}$ – стала часу ОК.

$$T = \frac{76,89 \text{ кг} \cdot 1005 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}}{1,44 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 80 \text{ м}^2} = 670,79 \text{ с};$$

$$[T] = \frac{1 \text{ кг} \cdot 1 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}}{1 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 1 \text{ м}^2} = 1 \text{ с}$$

Визначимо кількісне значення коефіцієнта передавання ОК:

$$K = \frac{4200 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 35 ^\circ\text{C}}{1,44 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 80 \text{ м}^2} = 1276,04 \frac{\text{с} \cdot ^\circ\text{C}}{\text{кг}};$$

$$[K] = \frac{1 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 1 ^\circ\text{C}}{1 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 1 \text{м}^2} = \frac{1 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}}{1 \frac{\text{Вт}}{^\circ\text{C}}} = \frac{1 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}}{1 \frac{\text{Дж}}{\text{с}}} = 1 \frac{\text{с} \cdot ^\circ\text{C}}{\text{кг}}$$

Побудуємо структурну схему каналу регулювання [18] (рисунок 3.2):

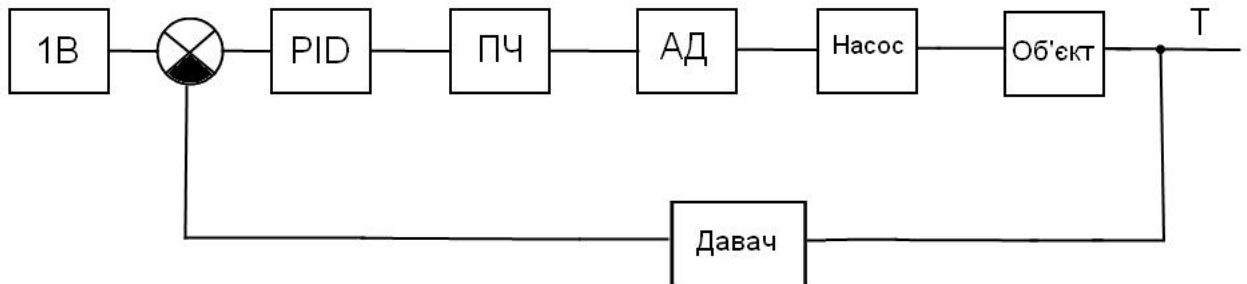


Рисунок 3.2 - Структурна схема каналу регулювання

Математична модель асинхронного двигуна (АД) і перетворювача частоти (ПЧ) набуде наступного виду (рисунок 3.3):

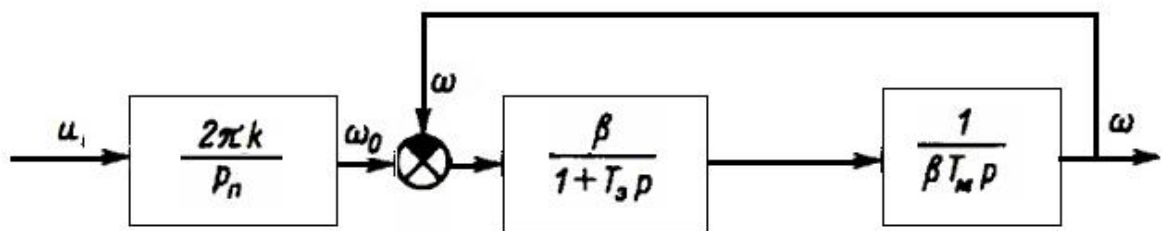


Рисунок 3.3 - Структурна схема системи ПЧ-АД

Для системи ПЧ-АД:

p_n – кількість пар полюсів;

$k_{y,ч}$ – коефіцієнт передачі перетворювача частоти;

$T_E = \frac{1}{\omega_{0,ЕЛ.НОМ} \cdot s_K}$ – електромагнітна стала часу (0,06...0,0006 с);

$\beta = \frac{2M_K}{\omega_{0,НОМ} \cdot s_K}$ – модуль механічної характеристики;

$T_M = \frac{J\omega_{0,НОМ}}{M_{II}}$ – електромеханічна стала часу.

При керуванні по аналоговому сигналу 10 В коефіцієнт передачі перетворювача частоти становитиме:

$$k_{y.ч} = \frac{X_{BHX}}{X_{BX}} = \frac{50\Gamma\mathcal{U}}{10B} = 5 \frac{\Gamma\mathcal{U}}{B}.$$

Характеристики двигуна представлені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Технічні характеристики двигуна

Тип двигуна	Потуж- ність, кВт	Частота обертання, об/хв.	КП Д, %	Коефіцієнт потужн.	$\frac{M_{max}}{M_{nom}}$	$\frac{M_n}{M_{nom}}$	Момен т інерції, кг·м ²	Маса, кг
MDXM A 90-32	1,5	1410	95,6	0,89	2,81	2,5	0,0034	17,2

Оскільки обертова швидкість магнітного поля статора визначається за формулою $n = \frac{60f}{p_n}$, то кількість пар полюсів становить: $p_n = \frac{60f}{n} = \frac{3000}{1500} = 2$.

При розрахунках прийmemo момент інерції помпи $J = 1.9 \cdot J_\partial$. Тоді загальний момент інерції становитиме $J = J_n + J_\partial = 2,9 \cdot J_\partial = 2,9 \cdot 0,0034 = 0,00986 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

З рівняння:

$$M_H = \frac{2M_K}{\frac{s_n}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s_n}}$$

знайдемо величину ковзання:

$$s_{кр} = s_n \left(\lambda \pm \sqrt{\lambda^2 - 1} \right),$$

де $\lambda = \frac{M_K}{M_H} = 2,4$ для асинхронного двигуна, що приводить в рух помпу.

Величина номінального ковзання рівна:

$$s_n = \frac{n_0 - n}{n_0} = \frac{1500 - 1410}{1500} = 0.06.$$

Визначимо величину критичного ковзання:

$$s_{кр} = s_n \cdot \left(\lambda \pm \sqrt{\lambda^2 - 1} \right) = 0.06 \cdot \left(2.81 \pm \sqrt{2.81^2 - 1} \right) = 0.06 \cdot (2.81 - 2.63) = 0,0108,$$

$$\omega_{0.EL.HOM} = \frac{n}{60} \cdot 2\pi = \frac{1500 \text{ об/хв}}{60} \cdot 2\pi = 157 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

$$T_E = \frac{1}{\omega_{0.EL.HOM} \cdot s_K} = \frac{1}{157 \cdot 0,0108} = 0,59 \text{ с}$$

$$\omega_{0.HOM} = \frac{1410}{60} \cdot 2\pi = 147,58 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

Відповідно до технічних характеристик двигуна (таблиця 3.1):

$$M_H = \frac{1500 \text{ Вт}}{147,58 \frac{\text{рад}}{\text{с}}} = 10,16 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

$$M_{кр} = 2,81 \cdot M_H = 2,81 \cdot 10,16 = 28,55 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

$$M_{II} = 2,5 \cdot M_H = 2,5 \cdot 10,16 = 25,4 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Розрахуємо значення жорсткості механічної характеристики та електромеханічну сталу часу:

$$\beta = \frac{2M_K}{\omega_{0.HOM} \cdot s_K} = \frac{2 \cdot 28,55}{147,58 \cdot 0,0108} = 35,91 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\frac{\text{рад}}{\text{с}}};$$

$$T_M = \frac{J\omega_{0.HOM}}{M_{II}} = \frac{0,00986 \cdot 147,58}{25,4} = 0,057 \text{ с}.$$

Визначимо передавальні функції регулюючого органу та термоопору:

- регулюючий орган (насос) є пропорційною ланкою з коефіцієнтом передачі:

$$K_{PO} = \frac{B_{yx}}{B_x} = \frac{Q_{\text{випр}}}{\omega_{\text{ном}}} = \frac{0,0022222 \text{ м}^3/\text{с}}{147,58 \frac{\text{рад}}{\text{с}}} = 0,00002 \frac{\text{м}^3}{\text{с} \cdot ^\circ \text{C}}$$

- термоперетворювач і нормуючий пристрій являють собою аперіодичну ланку, стала часу якої складає 15 сек. і коефіцієнт передачі:

$$K_{TP} = \frac{B_{yx}}{B_x} = \frac{10 \text{ В}}{50^\circ \text{C}} = 0,2 \frac{\text{В}}{^\circ \text{C}}$$

3.2 Комп'ютерне моделювання системи автоматичного управління

Щоб змодельовати процес нагрівання повітря в сушильній камері через канал регулювання в середовищі MatLab, потрібно створити відповідну структурну схему (рисунк 3.4) [22, 23].

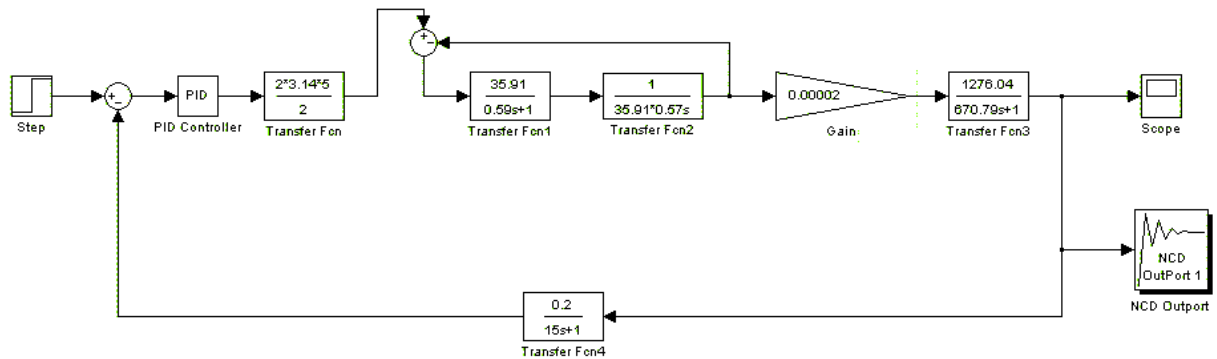


Рисунок 3.4 - Структурна схема каналу регулювання

Для визначення оптимальних налаштувань регулятора слід використати блок оптимізації NCD Outport (рисунк 3.5). У цьому блоці необхідно вказати параметри, за якими буде проводитися оптимізація, зокрема коефіцієнти передачі пропорційної, інтегральної та диференціальної складових регулятора. Основними критеріями оптимальності перехідного процесу є перерегулювання та час регулювання. Тому в діалоговому вікні блоку NCD Outport можна задати відповідні параметри.

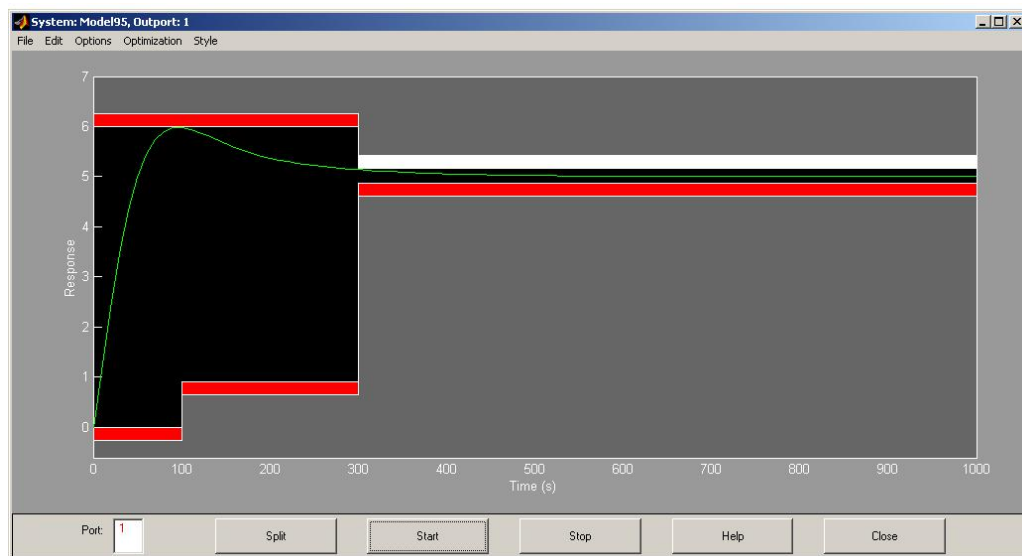


Рисунок 3.5 - Діалогове вікно блоку NCD Outport

Необхідно задати початкові налаштування ПД-регулятора ($K_p=0,01$, $K_i=0,01$, $K_d=0,01$) перед початком оптимізації. Далі в меню блоку Optimization->Parameters необхідно заповнити діалогове вікно наступним чином (рисунк 3.6).

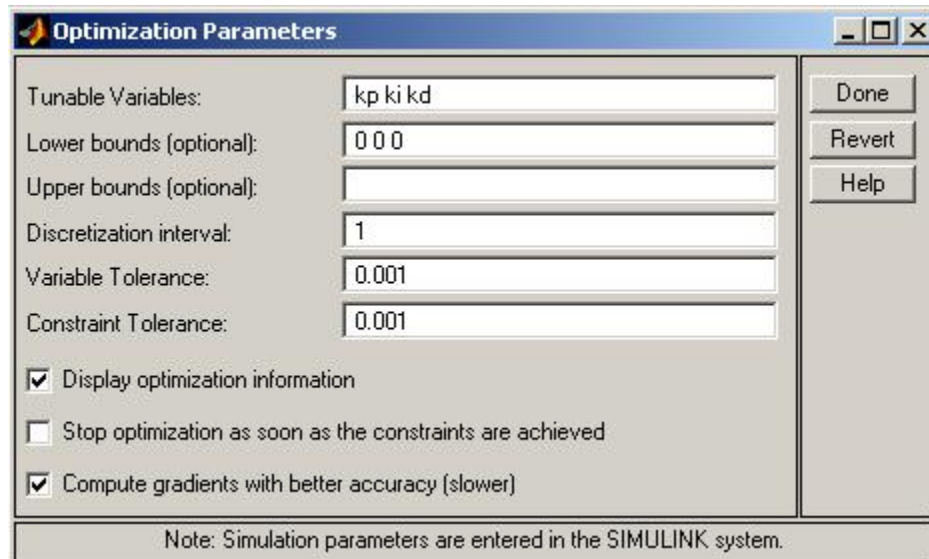


Рисунок 3.6 - Діалогове вікно блоку Optimization->Parameters

Для коректної оптимізації необхідно зазначити нижню межу коефіцієнтів передачі (Lower bounds). Змінити час регулювання і перерегулювання можна шляхом переміщення червоних ліній у діалоговому вікні блоку.

Після проведення оптимізації отримали наступні коефіцієнти регулятора:

$K_p=19.1918$;

$K_i=0.1320$;

$K_d=0.0026$.

Перехідна характеристика за каналом регулювання (рисунк 3.7) при стрибкоподібній зміні задаючого сигналу на 1В буде мати наступний вигляд [22, 23]:

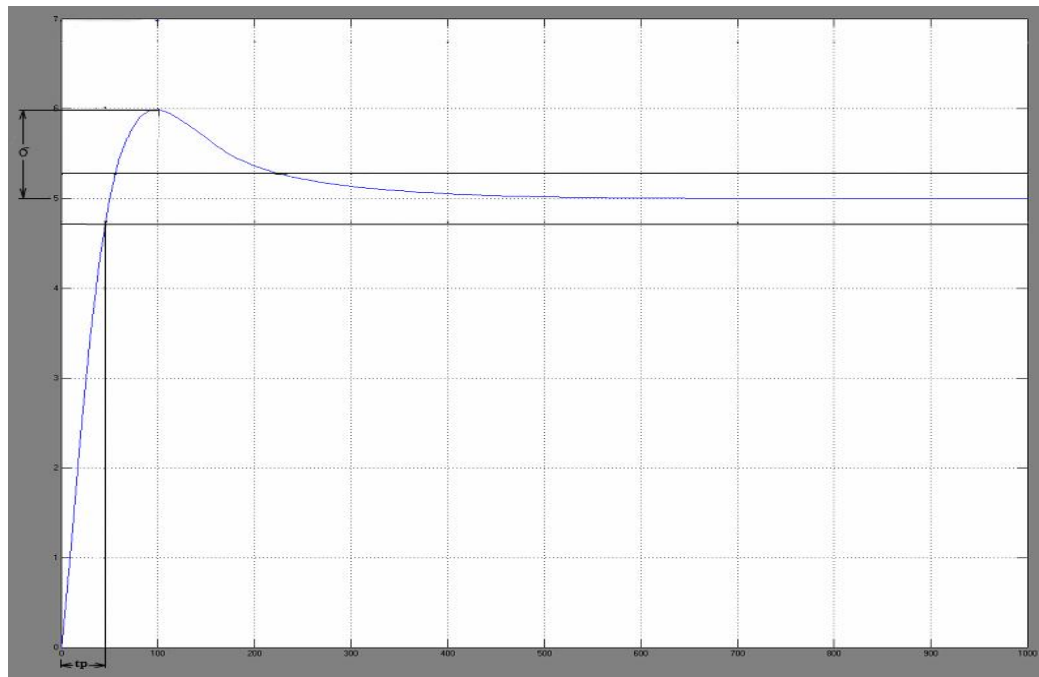


Рисунок 3.7 - Діалогове вікно Score.

Показники якості перехідного процесу:

- перерегулювання $\sigma = 20\%$;
- час регулювання $t_{рег} = 45 \text{ сек}$.

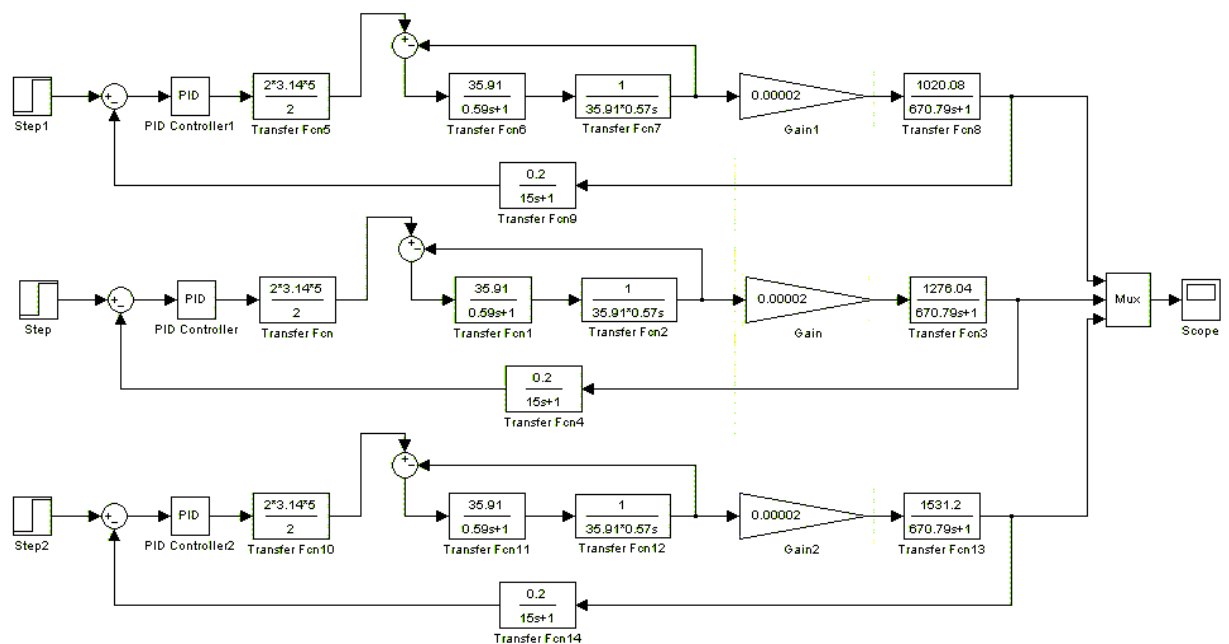


Рисунок 3.8 - Модель для дослідження чутливості САР температури при зміні коефіцієнта передачі об'єкта

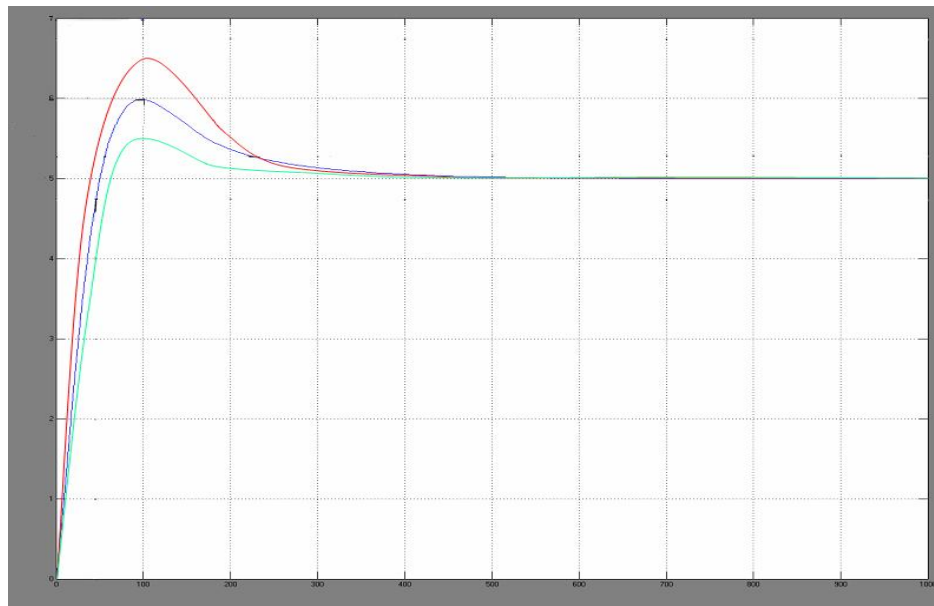


Рисунок 3.9 - Моделювання системи управління при зміні коефіцієнта передачі об'єкта

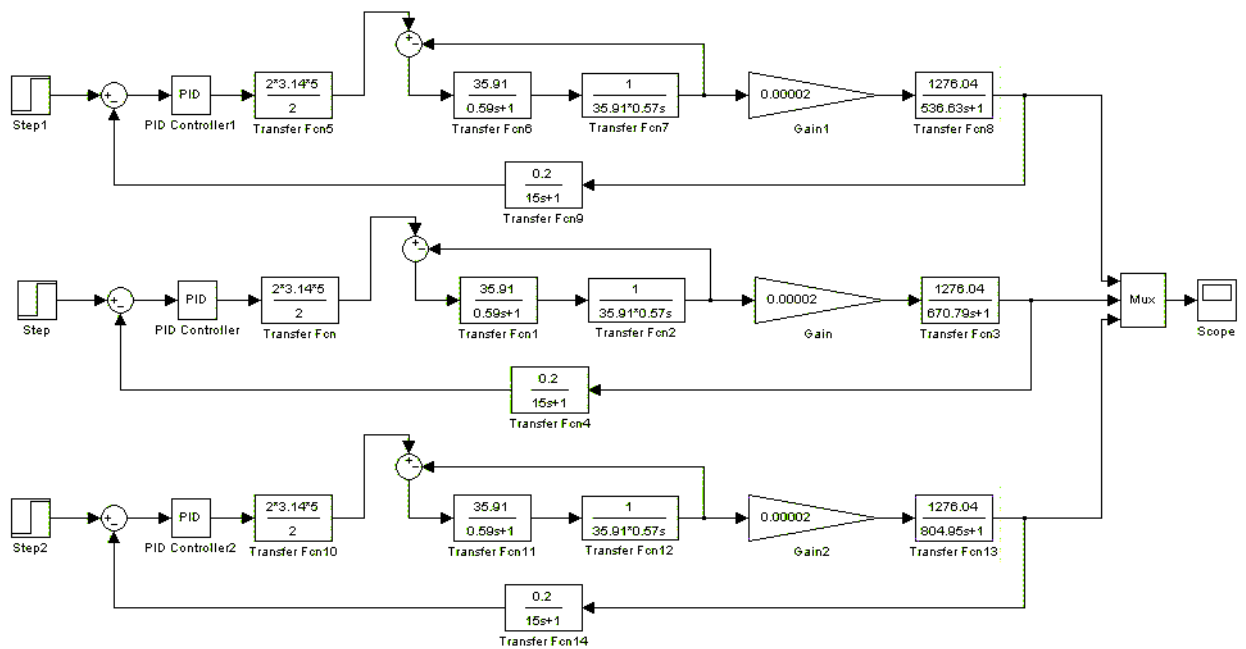


Рисунок 3.10 - Модель для дослідження чутливості САР температури при зміні сталої часу об'єкта

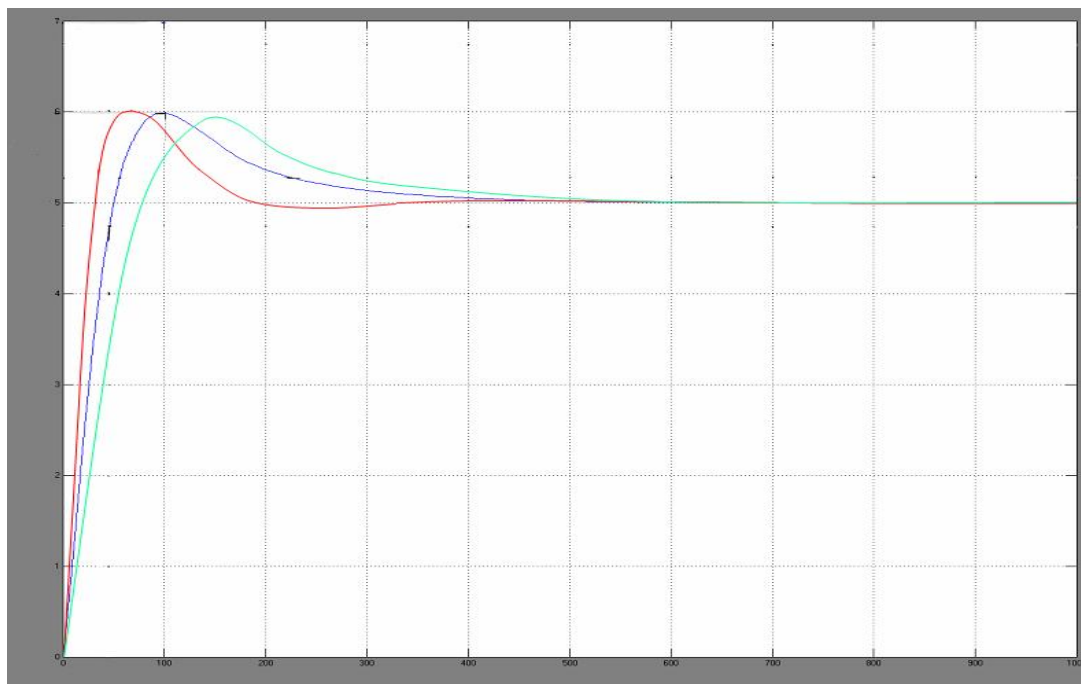


Рисунок 3.11 - Моделювання системи управління при зміні сталої часу
об'єкта

З отриманих результатів робимо висновок, що система є чутливою до зміни коефіцієнта передачі об'єкта регулювання і не чутливою до зміни сталої часу.

ВИСНОВКИ

Завданням даної випускної роботи були дослідження та розробка системи управління процесом камерної сушки деревини, підбір апаратних засобів для її реалізації та математичне моделювання процесу. У ході роботи було проведено аналіз технологічного процесу сушіння, визначено основні параметри, що впливають на ефективність процесу, а також обґрунтовано доцільність використання ПЛК для автоматизації управління.

В результаті виконання роботи було досліджено залежність зміни температури в сушильній камері від витрати теплоносія та розроблено систему управління процесом камерної сушки на базі ПЛК МІК-51. Це дозволило забезпечити стабільність температурного режиму та оптимізувати витрати енергоресурсів.

Основними складовими розробленої системи є такі пристрої:

- проміжний перетворювач;
- програмований логічний контролер МІК-51;
- персональний комп'ютер;
- регулюючий клапан для подачі теплоносія;
- датчик температури та вологості.

Для забезпечення ефективного регулювання подачі теплоносія в систему впроваджено використання частотного перетворювача, що дозволяє змінювати частоту обертання електроприводу насоса. Це дозволяє не лише покращити якість сушіння, але й суттєво знизити витрати електроенергії порівняно з традиційними методами регулювання, такими як заслінки або регулюючі клапани.

Важливою складовою автоматизованої системи є забезпечення зв'язку між ПЛК та персональним комп'ютером, що реалізовано за допомогою OPC-сервера. Це дозволяє оператору в реальному часі відстежувати технологічні параметри процесу, своєчасно реагувати на їх відхилення від номінальних значень та вносити необхідні коригування. Також, завдяки математичному

моделюванню процесу нагріву повітря в сушильній камері, була складена структурна схема регулювання в середовищі MatLab, що дозволило оптимізувати роботу системи управління.

Для досягнення найкращих показників регулювання використано блок оптимізації NCD Outport, що дало змогу підібрати оптимальні значення коефіцієнтів пропорційної, інтегральної та диференціальної складових регулятора. Це дозволило мінімізувати перерегулювання та скоротити час перехідного процесу.

Розроблена система управління камерною сушкою деревини є енергоефективним рішенням, яке підвищує продуктивність процесу, знижує експлуатаційні витрати та покращує якість висушеної деревини. Автоматизація процесу дозволяє значною мірою усунути вплив людського фактора, підвищити стабільність роботи сушильної камери та забезпечити високу точність контролю технологічних параметрів. Отримані результати можуть бути використані для подальшого вдосконалення системи сушіння, а також для розширення її функціональних можливостей, зокрема, впровадження адаптивного керування процесом сушіння залежно від характеристик конкретного матеріалу.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Білей П.В. Сушіння та захист деревини / П.В.Білей, В.М.Павлюст.- Львів:2008.-312 с.
2. Керівні технічні матеріали з технології камерного сушіння пиломатеріалів / За ред. проф. П.В. Білея – Львів: РВЦ УкрДЛТУ, 2003. – 72с.
3. Керівні технічні матеріали з технології камерного сушіння пиломатеріалів / Білей П.В., Соколовський І.А., Павлюст В.М., Кунинець Є.П. – Ужгород: Карпати, 2010.–140 с.
4. Ramos MM, Carra CA. Trends and opportunities of industry 4.0 in wood manufacturing processes. In M. Gong, Engineered Wood Products for Construction; 2021. DOI: 10.5772/intechopen.99581. University of New Brunswick.
5. 360iResearch. Wood & Wood Products Market by Type Global Forecast 2023- 2030 / research journal, 2023. С – 3-25.
6. Abdulah L. Suhendang E. Purnomo H. Matangaran R. J. The role of urban household wood product consumption on forest management and its impact: a system modelling simulation approach in Bogor City / Article, 2021. С - 1-12.
7. Губер Ю.М. Рекомендації з технології сушіння пиломатеріалів у конвективних сушарках. - Львів: РВВ НЛТУ України, 2003. – 28с.
8. Goldhahn, C.; Cabane, E.; Chanana, M. Sustainability in wood materials science: An opinion about current material development techniques and the end of lifetime perspectives. Philos. Trans. R. Soc. A 2021,379, 20200339.
9. Пінчевська О.О. Сучасне лісосушильне та лісопильне устаткування / О.О.Пінчевська, З.С.Сірко, В.С.Коваль, Н.В.Марченко. – Харків: ПФ «Центр-інформ», 2005. – 176 с.
10. Завод універсальних машин [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.gorlush.com.ua/>
11. Сушильні камери для деревини [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.gorlush.com.ua/sush-kamery.aspx>

12. Рокун, Р. Основні технології пропарювання та сушіння деревини. Науковий вісник НЛТУ України, 27(1), 2017. С - 168-171.
13. Іванишин Т. В., Мазепа С. С. Основи автоматики та автоматизація виробничих процесів лісових і деревообробних підприємств : Навч. посіб. – Львів: “Магнолія 2006”, 2025. – 354 с.
14. Автоматизація технологічних процесів і системи автоматичного керування / О.В.Барало, П.Г.Самойленко, С.Є.Гранат, В.О.Ковальов - Київ: Аграрна освіта, 2010. - 557 с.
15. Intelligent Control of Robotic Systems / Laxmidhar Behera [and others]. CRC Press, 2020. – 696 p.
16. Поліщук Є.С., Ванько В.М. Вимірювальні перетворювачі (сенсори). – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2015. – 584с.
17. Бочков В.М. Обладнання автоматизованого виробництва / В.М.Бочков, Р.І.Сілін. - Львів: В-во Львівської політехніки, 2015. - 404 с.
18. Методи сучасної теорії управління. Підручник / Ладанюк А.П., Луцька Н.М., Кишенько В.Д. [та ін.] / К.: Ліра-К, 2019. – 368 с.
19. Ладанюк, А. П. Теорія автоматичного керування технологічними об'єктами : навч. посіб. / А.П. Ладанюк, К.С. Архангельська , Л.О. Власенко — К.: НУХТ, 2014. — 274 с.
20. Синєглазов В.М. Автоматизація технологічних процесів / В.М.Синєглазов, І.Ю.Сергєєв - К.: Київ, 2015. – 444 с.
21. Віктор Трегуб Автоматизація об'єктів періодичної дії. Підручник / Віктор Трегуб – Київ: Ліра-К, 2017. – 136 с.
22. Коржик М. В. Моделювання об'єктів та систем керування засобами MatLab: навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. / М. В. Коржик. – Київ : НТУУ “КПІ”, 2016. – 174 с.
23. Жученко А.І. Ладієва Л.Р.,Дубік Р.М. Динамічна оптимізація з використанням MATLAB та SIMULINK Київ, СПД Моляр, 2010 - 230 С.