

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

**ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

**ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ**

**В.о. завідувача кафедри**

**автоматики та робототехнічних систем**

**ім. акад. І.І. Мартиненка**

(назва кафедри)

К.Т.Н., доц. \_\_\_\_\_

(підпис)

О.О. Опришко

(ПІБ)

" \_\_\_\_ "

\_\_\_\_\_ 2025 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА**

на тему **"КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНА СИСТЕМА  
АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ  
ПАРАМЕТРАМИ В КАМЕРІ СУШІННЯ ДЕРЕВИНИ ПРИ  
ВИРОБНИЦТВІ ШПОНУ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ КОМПЛЕКСУ  
ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ОВЕН"**

Спеціальність: 151 - "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології"

**Гарант освітньої програми**

Д.Т.Н., проф.

(науковий ступінь та вчене звання)

\_\_\_\_\_

(підпис)

Заєць Н.А.

(П.І.Б.)

**Керівник кваліфікаційної бакалаврської роботи**

Д.Т.Н., професор

(науковий ступінь та вчене звання)

\_\_\_\_\_

(підпис)

Шворов С.А.

(П.І.Б.)

**Виконав**

\_\_\_\_\_

(підпис)

Сагач А.О.

(П.І.Б.)

**КИЇВ – 2025**

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

**ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**В.о. завідувача кафедри**

автоматики та робототехнічних систем

ім. акад. І.І. Мартиненка

(назва кафедри)

К.Т.Н., доц. \_\_\_\_\_ О.О. Опришко  
(підпис) (ПІБ)

" \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2025 р.

**ЗАВДАННЯ**

**на виконання кваліфікаційної бакалаврської роботи студенту**

**Сагачу Артему Олександровичу**

(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність: 151 - "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології"

1. Тема кваліфікаційної бакалаврської роботи: "Комп'ютерно-інтегрована система автоматичного керування технологічними параметрами в камері сушіння деревини при виробництві шпону із використанням комплексу технічних засобів ОВЕН",

затверджена наказом ректора НУБіП України від "18" 11 2024 р. № 2056"С"

2. Термін подання завершеної роботи на кафедру "29" травня 2025 р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної бакалаврської роботи:

3.1. Завдання кафедри на виконання кваліфікаційної бакалаврської роботи.

3.2. Нормативні документи по проектуванню об'єктів автоматизації.

3.3. Наукова література з тематики кваліфікаційної бакалаврської роботи.

4. Перелік питань, які необхідно розробити:

4.1. Технологія і промислове обладнання для виробництва натурального деревного шпону.

4.2. Розробка та дослідження математичної моделі процесу сушіння шпону.

4.3. Вибір регулятора та обґрунтування параметрів його налаштувань.

4.4. Розробка цифрової системи керування.

4.5. Схеми системи автоматизації.

4.6. Техніко-економічне обґрунтування.

5. Перелік графічних документів:

- 5.1. Функціональна схема автоматизації системи керування температурою в роликовій сушарці для сушіння деревного шпону.
- 5.2. Система автоматизації процесу сушіння шпону в роликовій сушарці. Схема електрична принципова.
- 5.3. Система автоматизації процесу сушіння шпону в роликовій сушарці. Схема електрична з'єднань.
- 5.4. Система автоматизації процесу сушіння шпону в роликовій сушарці. Схема електрична підключень.
- 5.5. Система автоматизації процесу сушіння шпону в роликовій сушарці. Зовнішній вид щита керування.

Дата видачі завдання "21" листопада 2024 року

**Керівник  
кваліфікаційної  
бакалаврської роботи**

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Шворов С.А.  
(П.І.Б.)

**Завдання прийняв до  
виконання**

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Сагач А.О.  
(П.І.Б.)

## ЗМІСТ

Вступ .....	5
РОЗДІЛ 1. Технологія і промислове обладнання для виробництва натурального деревного шпону .....	8
1.1. Загальні відомості про шпон .....	8
1.1.1. Струганий шпон .....	9
1.1.2. Лущений шпон .....	12
1.2. Сушіння шпону: технологія і обладнання .....	13
1.3. Постановка задачі автоматизації .....	23
1.4. Розробка функціональної схеми автоматизації системи керування роликовою сушаркою для шпону .....	24
РОЗДІЛ 2. Розробка та дослідження математичної моделі процесу сушіння шпону .....	27
2.1. Математична модель конвективного сушіння шпону .....	27
2.2. Визначення передатної функції роликової сушарки для шпону для каналу керування температурою теплоносія .....	39
РОЗДІЛ 3. Вибір регулятора та обґрунтування параметрів його налаштувань .....	42
3.1. Вибір алгоритму керування .....	42
3.2. Реалізація алгоритму керування .....	44
3.2.1. Вибір програмованого логічного контролера .....	45
3.2.2. Вибір частотного перетворювача .....	49
3.2.3. Обґрунтування вибору датчика температури .....	52
3.2.4. Вибір датчика вологості повітря .....	54
3.2.5. Вибір регулюючого органу та виконавчого механізму САК роликовою сушаркою для шпону для каналу керування температурою теплоносія .....	55
РОЗДІЛ 4. Розробка цифрової системи керування .....	61
4.1. Визначення періоду квантування сигналів ЦСК .....	61
4.2. Визначення показників якості роботи цифрової системи керування .....	64
РОЗДІЛ 5. Схеми системи автоматизації .....	69
5.1. Розробка схем електричних принципової, з'єднань та підключень системи керування роликовою сушаркою для шпону .....	69
5.2. Вибір апаратури захисту та керування .....	70
5.2.1. Вибір автоматичних вимикачів та електромагнітних пускачів для керування електродвигунами М1 та М2 .....	71
5.2.2. Вибір електротехнічного обладнання кола керування .....	74
5.3. Вибір проводів та кабелів .....	76
5.4. Розробка засобів візуалізації технологічного процесу .....	78
РОЗДІЛ 6. Техніко-економічне обґрунтування .....	82
Висновки .....	87
Література .....	88
Додатки .....	90

## ВСТУП

*Актуальність теми.* Натуральні матеріали завжди були фаворитами при облаштуванні домашніх інтер'єрів. Природно це обумовлено відсутністю інших альтернатив у наших предків, що підтверджує незчисленна кількість розкопок і археологічних експедицій. Натуральна деревина була зручним матеріалом при побудові будинків, створенні меблів у них і навіть посуду. Часи минають, а тенденція на використання деревини не слабне, а навпаки – зростає. У епоху, коли новобудови заселяють міста, а природних ландшафтів і парків стає все менше, у епоху дешевих виробів із пластику, людям важливо оточувати себе чимось наближеним до їх істинного – до природи. Будинки намагаються облаштувати в стилі еко, а меблі вибирають з натуральних матеріалів. Але цілісна деревина коштує дорого, і на створення одного предмету меблів необхідно інколи використати цілу колоду дерева. З екологічної точки зору – це згубно для оточуючого середовища. Одним із способів вирішення цієї проблеми, коли людина намагається придбати додому меблі з натуральної деревини, із одночасною турботою про екологію, є використання натурального шпону.

Шпон – натуральний матеріал, який часто використовується у меблевій промисловості: лушений у якості напівфабрикату для виробництва фанери та деревинношаруватих матеріалів; струганий та пиляний – як личкувальний матеріал.

Технологія виготовлення натурального шпону має свої особливості [2,3]. Для підвищення пластичності матеріалу та полегшення його обробки, сировину для виробництва шпону – кряжі та бруси (ванчеси) – піддають такій стадії, як пропарювання та проварювання. Внаслідок цього вологість кряжів і брусів зростає. Вологість шпону, який отриманий шляхом стругання або луцення, знаходиться у межах від 40 до 120% і залежить від технології його виробництва і від породи деревини. Кінцева вологість повинна знаходитись у межах від 6 до

12%, її значення визначають технологічні умови виготовлення цієї продукції, для якої він призначений [4]. Висушування шпону є процесом енергоємним. Так, доля енергетичних витрат на зневоднення шпону до вологості  $8\pm 2\%$  для технологічного процесу виробництва фанери складають від загальних 60% [16].

У промислових умовах для сушіння шпону використовують такі методи, як конвективний, контактний та радіаційний. Комбінування названих методів дозволяє суттєво інтенсифікувати технологічний процес сушіння шпону. Так, у *сушарках роликового типу*, які розглядаються у даній кваліфікаційній бакалаврській роботі, теплота передається до матеріалу одночасно за допомогою конвекції (обдуванням теплоносієм – гарячим повітрям), випромінювання від нагрітих поверхонь та теплопровідності (контактування шпону із нагрітими елементами сушарки – роликами).

Як буде показано далі, за напрямком руху сушильного агента відносно матеріалу, роликові сушарки бувають із сопловим дуттям, із поперечною або повздовжньою циркуляцією. На теперішній час сушарки із сопловим дуттям вважаються найбільш продуктивними установками для сушіння шпону, однак мають один недолік: великий динамічний напір призводить до значних витрат електроенергії на створення інтенсивної циркуляції сушильного агента. Тому питання удосконалення систем автоматичного керування, які можуть забезпечити високу інтенсивність і якість сушіння шпону із одночасним зниженням енергозатрат, є актуальними завданнями.

**Об'єктом дослідження** є процес сушіння шпону у роликовій сушарці із сопловим дуттям.

**Предметом дослідження** є взаємозв'язки і закономірності температурних режимів сушіння деревного шпону та їх вплив на якість кінцевого продукту.

**Метою бакалаврської кваліфікаційної роботи** є удосконалення системи автоматичного керування температурним режимом сушіння деревного шпону в роликовій сушарці, яка забезпечить підвищення якості продукції та ефективності роботи обладнання установки.

Задачі бакалаврської кваліфікаційної роботи:

- на основі вивчення літературних джерел та проведення аналізу роlikової сушарки як об'єкта керування здійснити пошук шляхів покращення управління процесом сушки в роlikовій сушарці VTS-4-4200;
- розробити функціональну схему автоматизації системи керування роlikовою сушаркою для шпону;
- дослідити кінетику сушіння зразків шпону та визначити передатну функцію установки для каналу керування температурним режимом сушіння;
- обґрунтувати вибір алгоритму керування та технічних засобів для реалізації САК;
- дослідити показники якості роботи САК;
- розробити електричні схеми системи керування та створити операторський інтерфейс системи контролю та керування роlikовою сушаркою для шпону;
- здійснити техніко-економічне обґрунтування прийнятих інженерних рішень.

# РОЗДІЛ 1

## ТЕХНОЛОГІЯ І ПРОМИСЛОВЕ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА НАТУРАЛЬНОГО ДЕРЕВНОГО ШПОНУ

### 1.1. Загальні відомості про шпон

Шпоном (нім. *Span* – "тріска, уламок, скіпка") називають тонкі листи деревини визначеної товщини (тонка дошка), які використовуються при обробці деревини для личкування виробів, виробництва клеєної шаруватої деревини (фанери, фанерних плит і труб, деревинно-шаруватих пластиків, різноманітних гнуто-клеєних деталей) і напівфабрикатів з деревини та деревних матеріалів з метою покращення їх зовнішнього вигляду та механічних властивостей.



Рис. 1.1. Полоси деревного шпону

Натуральний шпон має ряд переваг:

- простота у виробничому процесі: усе виробництво полягає у правильній та якісній обрізці листів необхідного розміру матеріалу;
- висока міцність;
- довгий строк експлуатації;
- унікальність та оригінальність малюнка, надзвичайні естетичні властивості;
- екологічність;
- велика різноманітність кольорової палітри;

- високий рівень водостійкості;
- легкість матеріалу.

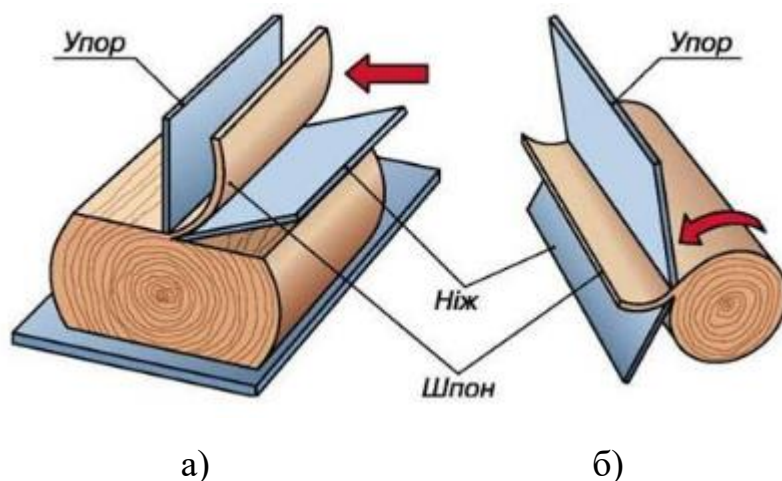


Рис. 1.2. Способи отримання шпону: а) струганий шпон; б) луцений шпон

За способом отримання розрізняють шпон *струганий* (рис. 1.2, а), *пиляний* та *луцений* (рис. 1.2, б). Текстура (малюнок поверхні шпону), яка утворена елементами будови деревини, у струганого шпону красивіша, ніж у луценого. Тому, починаючи із ХІХ ст. струганий шпон отримав широкого використання для личкування меблевих елементів та деталей.

### 1.1.1. Струганий шпон

*Струганий шпон* (форнер) виробляють із колод різних порід дерева, що мають гарну текстуру (із листяних розсіяносудинних порід: береза, бук, граб, груша, клен, липа, вільха, горіх, осика, тополя; кільцесудинних: в'яз, дуб, каштан, ясен; із хвойних: модрина, сосна) шляхом стругання пропарених брусів (ванчесів) на спеціальних стругальних верстатах.

У виробництві натурального шпону відомо більше 300 порід дерева, але найбільш популярних і доступних є 11 видів (додаток А1). Основні характеристики струганого шпону наведені у додатку А2. Схема технологічного процесу виготовлення струганого шпону наведена на рис. 1.3-1.5.

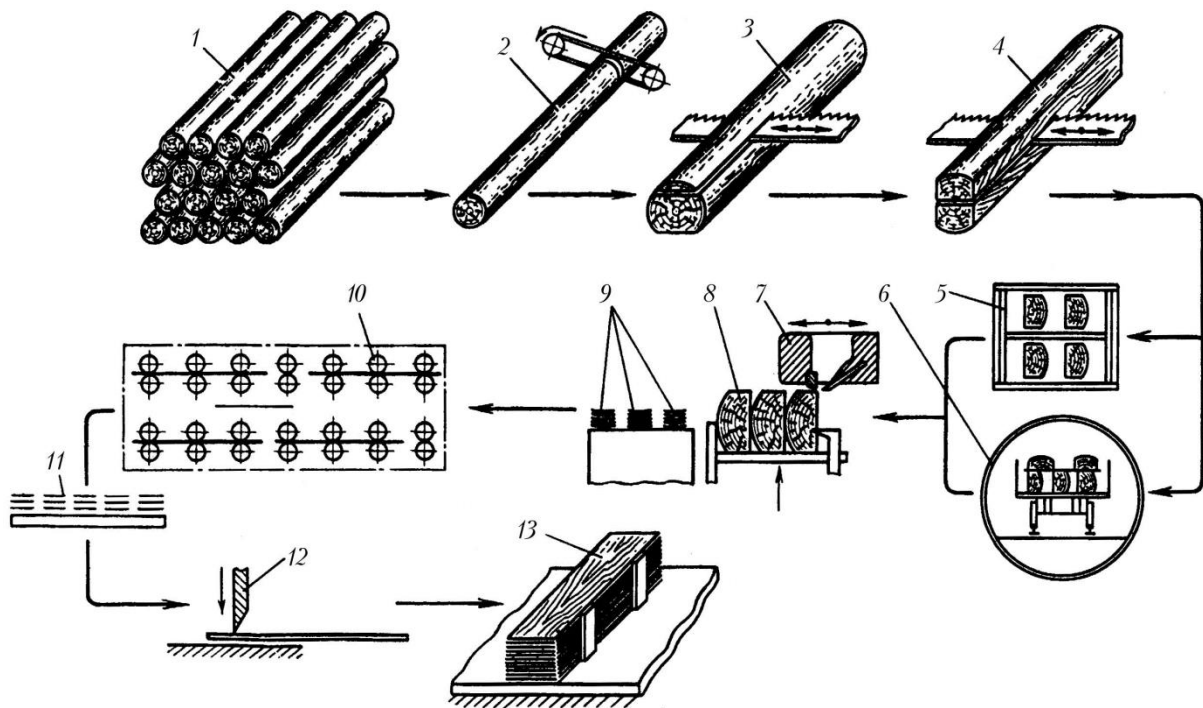


Рис. 1.3. Схема технологічного процесу виготовлення струганого шпону:

1 – штабель фансировини, 2 – розкрязування колод, 3, 4 – випилювання ванчесів, 5, 6 – пропарювання ванчесів, 7, 8 – стругання шпону, 9 – складання кнолів, 10 – сушіння шпону, 11 – складання сухого шпону у пачки, 12 – обрізання шпону у розмір на гільйотині, 13 – пакування шпону

Пропарювання ванчесів здійснюють у спеціальних автоклавах.

У сучасному виробництві шпону розповсюджені шпоностругальні верстати із горизонтальною і вертикальною схемами стругання (рис. 1.4), а також ротаційні верстати (для отримання тангенційного шпону) (рис. 1.5).

Ще один варіант натурального шпону – це *пиляний шпон*. Такий шпон відомий вже не одну сотню років, і вважається справжнім відтворенням мистецтва. Товщина пиляного шпону від 1 до 10 мм, виробляють його найчастіше з хвойних порід: іли, ялиці, кедр. Виготовляється шпон на фанеропільних верстатах або горизонтальних лісопільних рамках. Такий шпон має унікальні високі властивості. Використовують його для виготовлення музичних інструментів, а також елітних декоративних виробів.

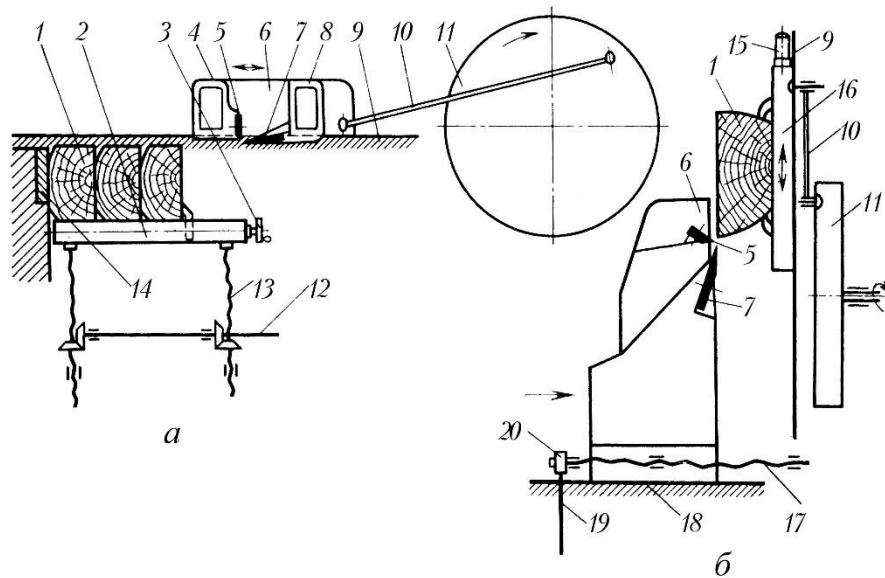


Рис. 1.4. Принципові схеми шпоностругальних верстатів:

*a* – горизонтального; *б* – вертикального; 1 – брус; 2 – стіл; 3 – маховик механізму закріплення бруса; 4 – траверса притискної лінійки; 5 – притискна лінійка; 6 – супорт; 7 – ніж; 8 – ножова траверса; 9 – напрямна супорта; 10 – шатун; 11 – маховик; 12 – вал механізму підймання стола; 13 – гвинт підймання стола; 14 – упорна стінка; 15 – електродвигун механізму затискання бруса; 16 – каретка; 17 – ходовий гвинт; 18 – напрямна супорта; 19 – вал механізму переміщення супорта; 20 – черв'ячна передача

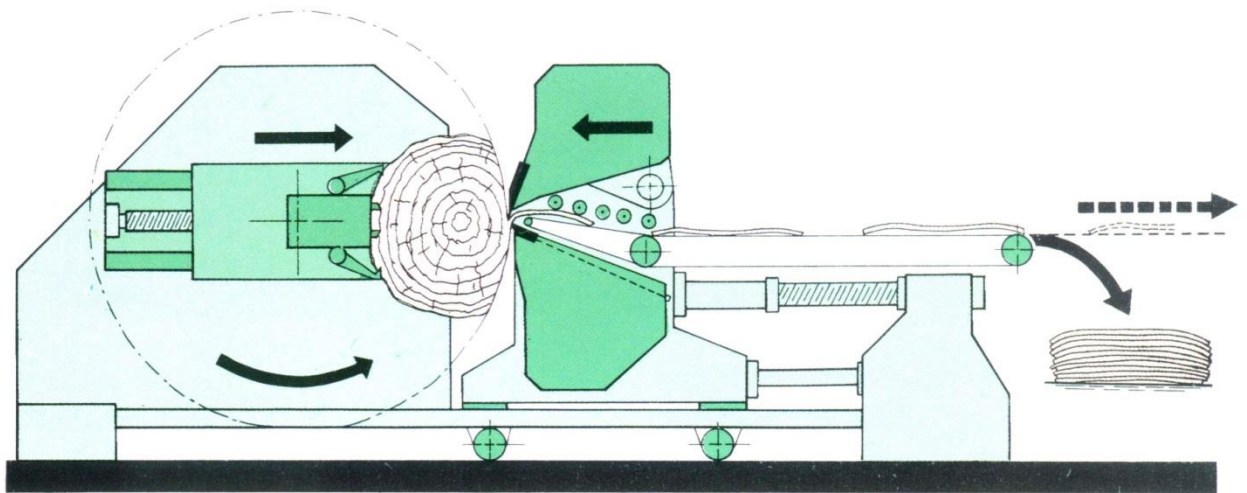


Рис. 1.5. Схема ротаційного шпоностругального верстата

### 1.1.2. Луцений шпон

Луцений шпон виготовляється із деревини листяних та хвойних порід з сировини 1 та 2 сортів. Виготовляють луценням (обточуванням) колоди, що обертається (рис. 1.2, б). Тому під зріз потрапляє спочатку заболонь, а потім ядро. Внаслідок цього шпон одноколірний і не має такої красивої текстури, як струганий. Залежно від якості деревини і обробки шпон поділяють на п'ять сортів: Е(еліта), І, ІІ, ІІІ, ІV – для листяних порід; Ех, Іх, ІІх, ІІІх, ІVх – для хвойних порід.

Використовують його для виготовлення фанери та облицьовування столярних, стружкових, фанерних та інших плит.

Основні характеристики луценого шпону наведені у додатку А3. Схема технологічного процесу виготовлення луценого шпону наведена на рис. 1.6.

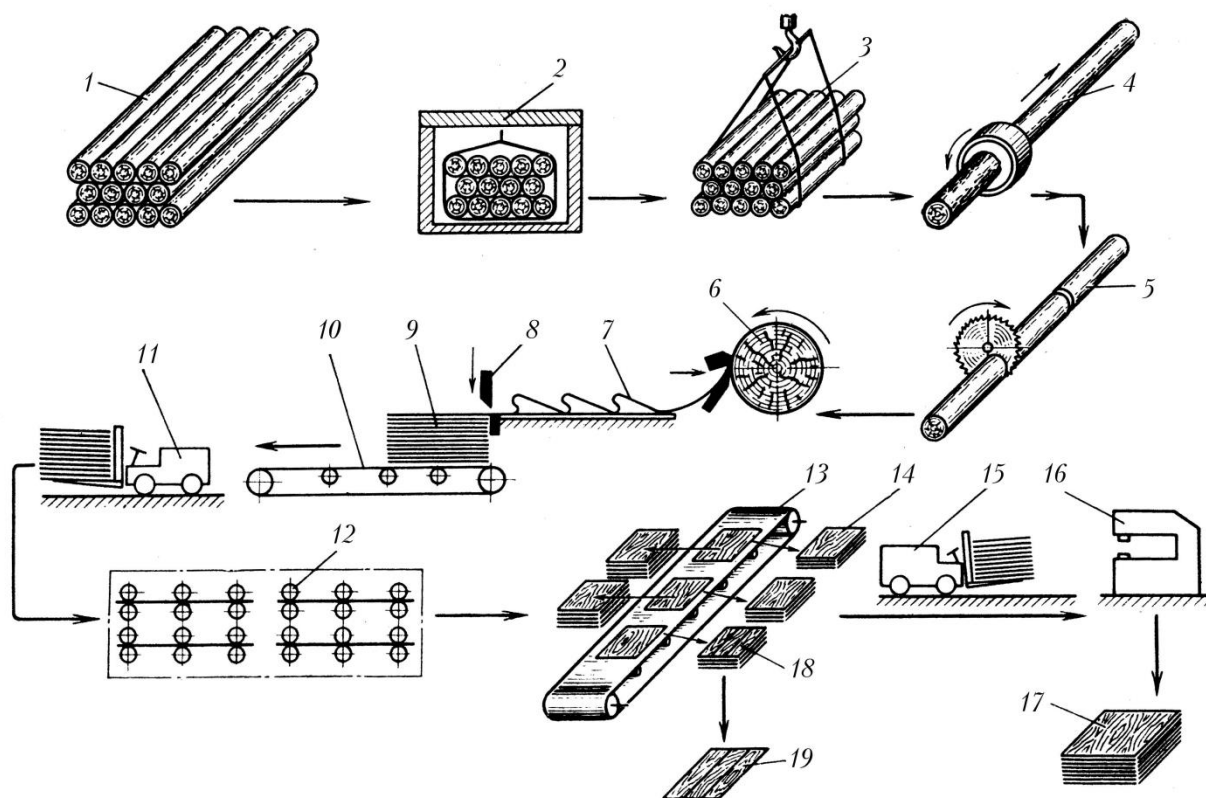


Рис. 1.7. Схема технологічного процесу виготовлення луценого шпону

## 1.2. Сушіння шпону: технологія і обладнання

Від якості шпону напряду залежить якість готового продукту. Одним із основних параметрів, якому приділяється найбільша увага на етапі виробництва – це *сушіння шпону*. Розглянемо особливості сушіння шпону, основні технології та типи сушарок, які використовуються в процесі виробництва деревного шпону.

Основною операцією у виготовленні сухого деревного шпону є сушіння, процес якого характеризується швидкістю висихання, зміною вологості та температури шпону.

Сушіння деревини – процес виділення вологи з деревини шляхом випаровування. Середовище, у якому відбувається процес сушіння, є сушильним агентом, який забезпечує передачу теплоти до деревини і поглинає вологу, яка випаровується. Сушильним агентом можуть бути топкові гази, водяна перегріта пара, атмосферне повітря, їх суміші, вакуум.

Початкова вологість шпону залежить здебільше від способу постачання деревини на переробний завод. Так, при постачанні залізною дорогою вона складає 50...90%, при постачанні водними шляхами самосплавом – 90...130% і більше. Також на початкову вологість впливають порода деревини, умови зростання і заготівлі. Шпон із різною початковою вологістю необхідно сушити при різних режимах.

Кінцева вологість шпону визначається необхідною вологістю готового продукту, родом клейового матеріалу та особливостями власне самого процесу склеювання.

Особливості сушіння шпону:

1. Шпон необхідно висушувати одразу після його виготовлення. Зберігання у вологому стані призводить до швидкого псування і необхідності утилізації.

2. Шпон висихає дуже швидко, оскільки має малу товщину і велику площу випаровування вологи. Сушіння шпону займає декілька хвилин.

3. Під час сушіння шпон може витримувати жорсткі умови при високих температурах (до 300°C).

4. При неправильному сушінні шпон сильно деформується і коробиться.

На якість та швидкість сушіння шпону впливають такі фактори:

- температура агента сушіння; оптимальна температура на першому етапі сушіння – до 250°C, на другому – до 200°C;
- напрям руху потоку сушильного агенту;
- швидкість руху сушильного агенту (повітря або газоповітряної суміші);
- породи деревини, з якої виготовлений шпон;
- товщина шпону;
- вологість повітря в сушарці.

Сушіння шпону здійснюється за допомогою трьох основних методів:

1. Кондуктивний (контактний). Сушіння шпону відбувається при його взаємодією із нагрітою до 120...180°C поверхнею.

2. Конвективний. Сушіння шпону при використанні конвективного методу передбачає випаровування вологи із волокон деревини після її нагрівання за допомогою топкових газів або гарячого повітря.

3. Контактно-конвективний, або комбінований. Комбінований метод сушіння шпону передбачає використання і гарячого повітря або газоповітряної суміші, і контакту із нагрітою поверхнею.

Для кожного із перелічених методів сушіння використовується відповідне обладнання.

### ***Обладнання для сушіння шпону.***

При контактному способі сушіння шпону використовують такий пристрій для періодичної дії, як *дихальний прес*. Прес (додаток Б1) оснащений сталевими листами, які нагріваються за допомогою пари, що курсує по спеціальним трубкам всередині листів. Шпон затискається між листами, які періодично розжимаються, щоб дати вийти волозі. Основним режимним фактором при сушінні шпону є тривалість знаходження листів між плитами пресу. Обслуговує

прес бригада, що складається з 3-4 працівників. На сьогоднішній день таке обладнання набуло певного поширення внаслідок низької вартості, невеликої виробничої площі, що займає сушарка, та простоті її конструкції. Основні недоліки дихальних пресів пов'язані з важкими умовами роботи для оператора та низькою якістю шпону на виході [6].

Застосовують також метод зневоднення шляхом витискання вологи за допомогою вальців під тиском від 2 до 3 МПа, коли вологість шпону знижується зі значення 80...120% до 50...55% [5,6,7].

*Стрічкові сушарки* являють собою конвективні сушильні пристрої неперервної дії (додаток Б2). Сушильним агентом у ній є нагріте повітря, що циркулює поперек сушарки. Сушарка являє собою камеру довжиною близько 30м, яка виготовлена з цегли або залізобетону. З обох її боків розташовані коридори, всередині яких знаходяться осьові вентилятори і парові калорифери. Для досягнення необхідної рівномірності сушіння камера по довжині розділена на дві частини, в кожній з яких повітря рухається у протилежних напрямках. Всього з кожного боку камери встановлено по 11 вентиляторів.

Для проходження шпону через сушарку всередині її розміщені 4-5 горизонтальних рядів нескінченної стрічки із дроту спеціального плетіння, яким передається рух від приводу, який забезпечує можливість регулювання часу проходження шпону через сушарку. Обслуговують сушарку 3-4 працівники.

У сучасному виробництві шпону широкого поширення набули високопродуктивні *роликові сушарки* неперервної дії для комплексного сушіння шпону, які забезпечують необхідну якість матеріалу.

Роликова сушарка являє собою камеру довжиною від 11 до 32 м, всередині якої розташовуються по висоті чотири-п'ять подвійних рядів роликів, які призначені для переміщення шпону. У кожній парі один ролик є привідним, а другий – притискним. Сушильним агентом, який безперервно циркулює всередині камери, виступає газоповітряна або пароповітряна суміш із визначеною температурою. Частка теплоти, що передається до шпону під час сушіння шляхом радіації високими температурами 180...200°C складає 50...60%,

низькими температурами  $100\dots 130^{\circ}\text{C}$  –  $20\dots 30\%$ . Хоча роликові сушарки мають великі габаритні розміри, вони забезпечують необхідну якість шпону і є високопродуктивними [7].

Виділяють декілька різновидів роликових сушарок для шпону, які розрізняються напрямком руху сушильного агента – із поздовжньою, поперечною циркуляціями та сопловим дуттям (рис. 1.8).

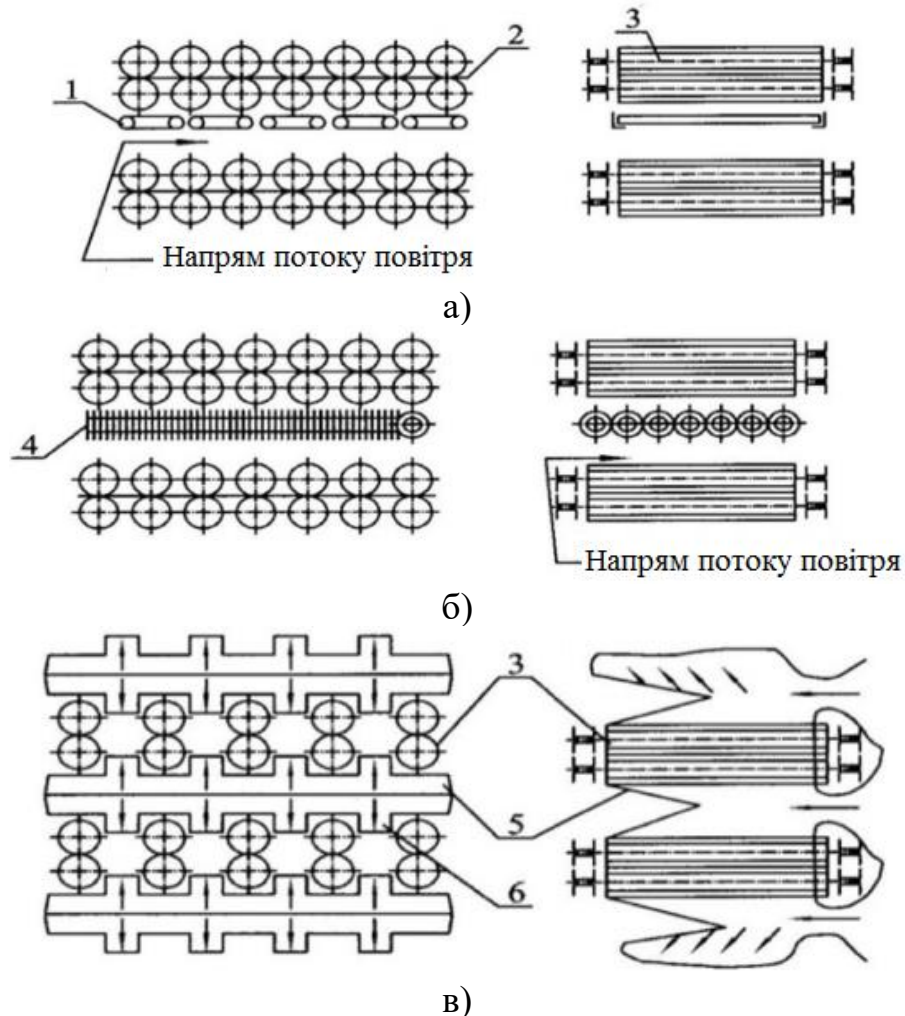


Рис. 1.8. Принципові схеми сушарок для шпону:

а) з поздовжньою циркуляцією; б) з поперечною циркуляцією повітря; в) із сопловим дуттям; 1 – змійоподібний калорифер; 2 – шпон; 3 – ролик; 4 – ребристий калорифер; 5 – газохід; 6 - сопло

У роликових сушарках із *поздовжнім переміщенням матеріалу і теплового агента* (СУР-3, СРГ-25) (рис. 1.9) потік спрямований паралельно до площини листів шпону вздовж сушарки (рис. 1.10). У цьому випадку ролики заважають рівномірному розподілу сушильного агента по площі матеріалу. Крім цього, швидкість його руху біля поверхні шпону є незначною.

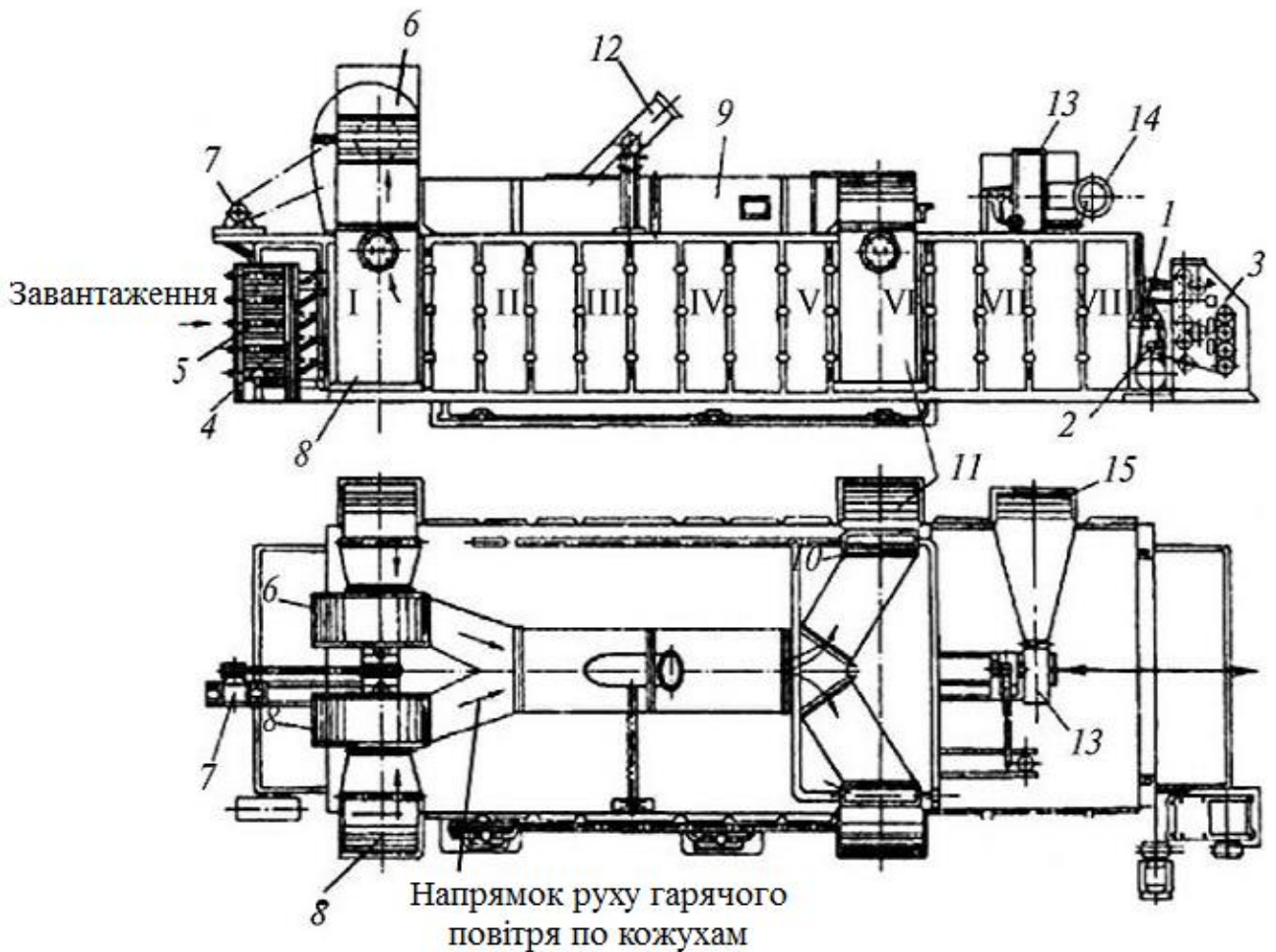


Рис. 1.9. Роликова сушарка для шпону СУР-3:

1 – електродвигун приводу роликів; 2 – регулятор швидкості; 3 – лебідка; 4 – зірочки для приводу; 5 – натяжні пристрої ланцюгів; 6 – циркуляційні відцентрові вентилятори; 7 – електродвигуни вентиляторів; 8 – бічні повітропроводи; 9 – верхній повітропровід; 10 – пластинчасті калорифери; 11 – бічні повітропроводи; 12 – вихлопна труба; 13 – відцентровий вентилятор камери охолодження; 14 – бічний повітропровід припливу холодного повітря; 15 – бічний повітропровід камери охолодження

Рух шпону у сушарці СУР-3 здійснюється зліва направо, а повітря – справа наліво. Секції I-VI призначені для сушки, VII та VIII – для охолодження шпону. Необхідна швидкість передається повітряю вентилятором 6, який засмоктує його із сушарки по боковим повітропроводам 8 та, проганяючи по верхньому повітропроводу 9, знову нагнітає у камеру.

Для нагрівання повітря сушарка має два пластинчастих калорифера 10 і систему гладких змієвиків, що розміщені між рядами роликів.

Ролики приводяться в рух електродвигуном 1 через регулятор швидкості 2 і лебідку 3. Шпон, який виходить із сушарки через камеру охолодження (секції VII та VIII), всередині якої циркулює охолоджене повітря, що нагнітається туди вентилятором 13.

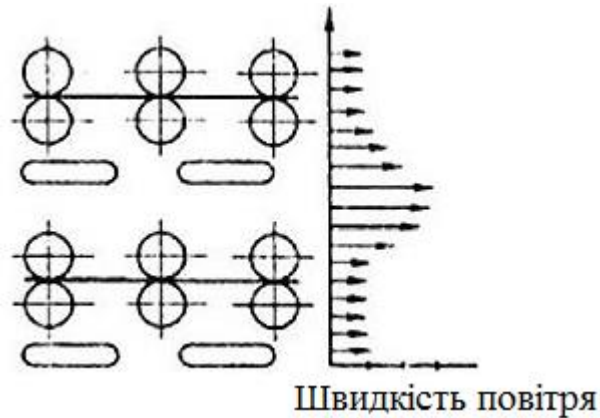


Рис. 1.10. Рух та розподіл швидкості переміщення теплового агента в сушарці СУР-3

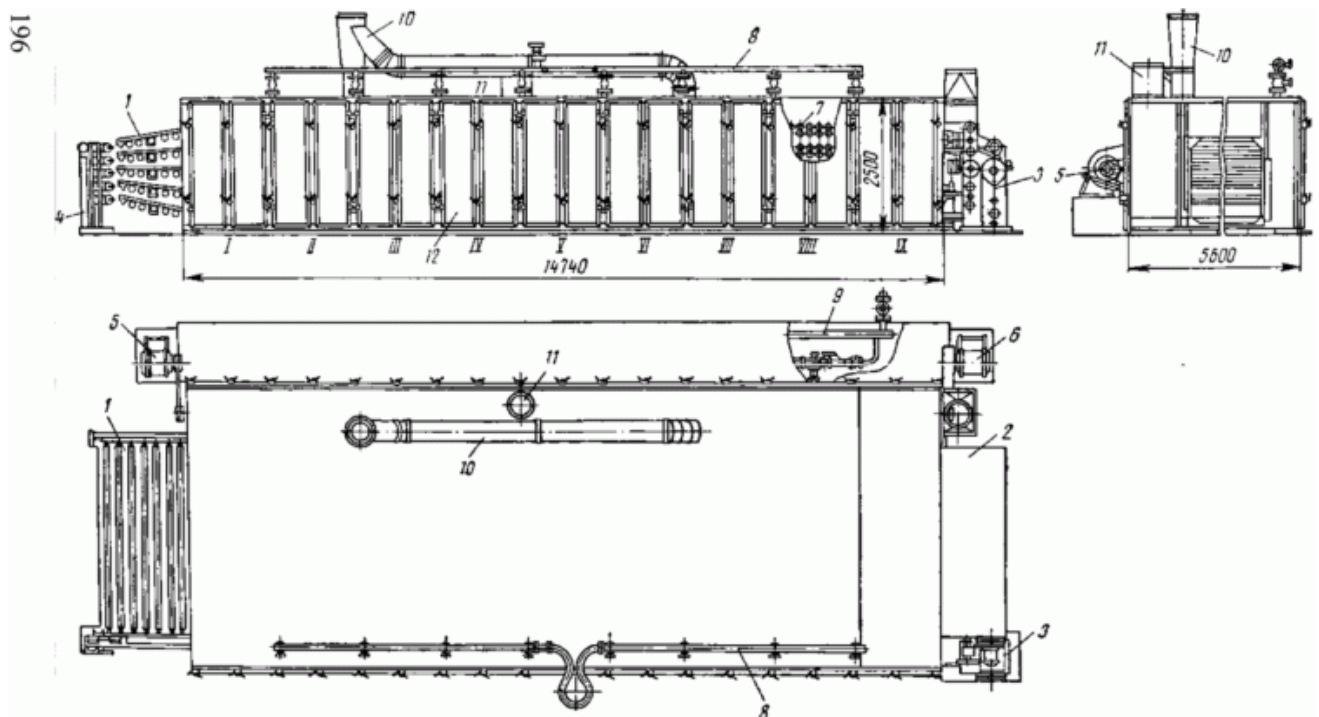


Рис. 1.11. Роликова сушарка із поперечною циркуляцією сушильного агента СУР-4:

I-VIII – секції сушарки; IX – секція охолодження; 1 – завантажувальна етажерка; 2 – вивантажувальна етажерка; 3 – привід сушарки; 4 – натяжна станція привідних ланцюгів; 5 – електродвигун приводу вентиляторів сирого кінця; 6 – електродвигун приводу вентиляторів сухого кінця; 7 – ролики сушарки; 8 – парова магістраль; 9 – конденсаційна магістраль; 10 – повітропроводи викидання повітря; 11 – труба припливу свіжого повітря; 12 – навісні дверцята

У сушарках із поздовжнім переміщенням матеріалу і позонною *поперечною циркуляцією теплового агенту* (сушарки СУР-4, СУР-5) потік нагрітого повітря рухається з більшою швидкістю у напрямку вздовж роликів, перпендикулярно до напрямку руху шпону, тому інтенсивність сушіння зростає на 15-30% [8].

Сушарка СУР-4 (рис. 1.11) складається із завантажувальної етажерки із привідними роликами, восьми секцій сушіння, однієї секції охолодження і вивантажувальної етажерки. Будова каркасу роликової сушарки СУР-4 майже не відрізняється від будови каркасу сушарки СУР-3. Відмінною особливістю сушарки СУР-4 є вентиляторна установка і конструкція калориферів.

Схема розташування вентиляторів для поперечної циркуляції повітря в сушарці наведена на рис. 1.12.

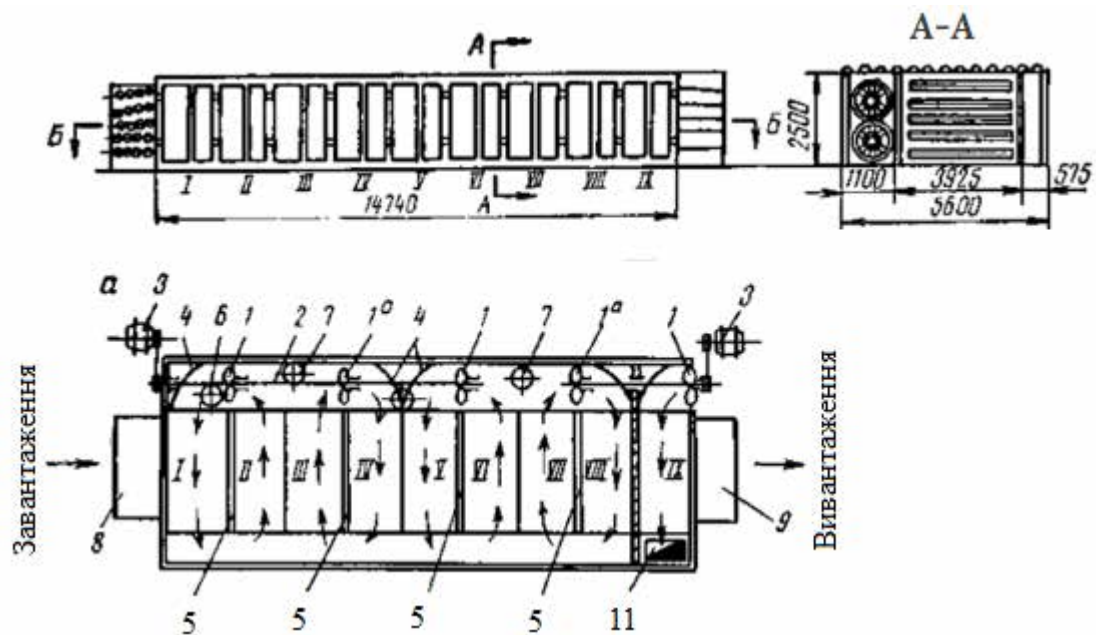


Рис. 1.12. Схема розташування вентиляторів для поперечної циркуляції повітря в сушарці СУР-4:

1<sup>а</sup> – ліві осьові вентилятори; 2 – вал; 3 – електродвигун; 4 – направляючі екрани; 5 – перегородка; 6,7 – труба; 8 – завантаження шпону; 9 – вивантаження шпону; 10 – повітропровід; 11 – всмоктувальна труба

Вентиляторна установка складається з чотирьох правих шестилопатевих осьових вентиляторів 7, чотирьох лівих осьових вентиляторів 1<sup>а</sup> і двох правих трьохлопатевих осьових вентиляторів, розташованих у лівому бічному коридорі

сушарки. Вентилятори насаджені на чотири вали 2, розташованих вздовж коридору сушарки. Кожна пара валів встановлена паралельно по висоті сушарки.

У сушильних камерах *із сопловим дуттям* (СУР-8, VMS, СГС) тепловий агент подається з обох боків шпону перпендикулярно до площини листів через щілини соплових коробів, які розміщені в проміжках між роликами. Висока швидкість руху повітря (10-16 м/с) сприяє істотній інтенсифікації процесу (в 2-3 рази, порівняно зі сушарками з поперечною циркуляцією) завдяки збільшенню коефіцієнтів тепло- та масовіддачі між листом шпону і тепловим агентом. Сьогодні сушарки із сопловим дуттям є найбільш продуктивним обладнанням для висушування шпону, однак вони мають таку ваду: великий динамічний напір спричиняє великі витрати електроенергії на створення інтенсивної циркуляції агента сушіння. Таким чином, впровадження у виробництво сушарок, які забезпечували б інтенсивне сушіння шпону та високу його якість за мінімальних енергетичних затрат, є актуальним завданням.

Роликова сушарка шпону VTS-4-4200 (рис. 1.13) є конвективно-контактного типу неперервної дії із сопловим дуттям. Агентом сушки є перегріта пара, яка здійснює багатократну поздовжню циркуляцію по сушарці. Шпон, що подається в сушарку обертовими роликами, транспортується по сушарці, віддає свою вологу і виходить з неї із заданою вологістю.



Рис. 1.13. Роликова сушарка шпону VTS-4-4200

Технологічний процес сушіння матеріалу в роликовій сушарці проходить такі стадії.

На ланцюговий транспортер буферного запасу навантажувачем подаються два стоси шпону розмірів 1320x1445 мм і 1320x2800 мм або три стоси шпону розміром 1320x1445 мм. Листи шпону в стосах повинні бути однакової товщини і породи дерева. Висота стосів не повинна перевищувати 520 мм і різнитися між собою більше, ніж на 20 мм.

Сушильник за допомогою ланцюгового транспортера переміщує стоси на підйомний стіл з приводним роликовим конвеєром. Для запобігання напусток шпону при завантаженні в сушарку, стоси повинні бути віддалені один від одного на віддаль не менше 100 мм.

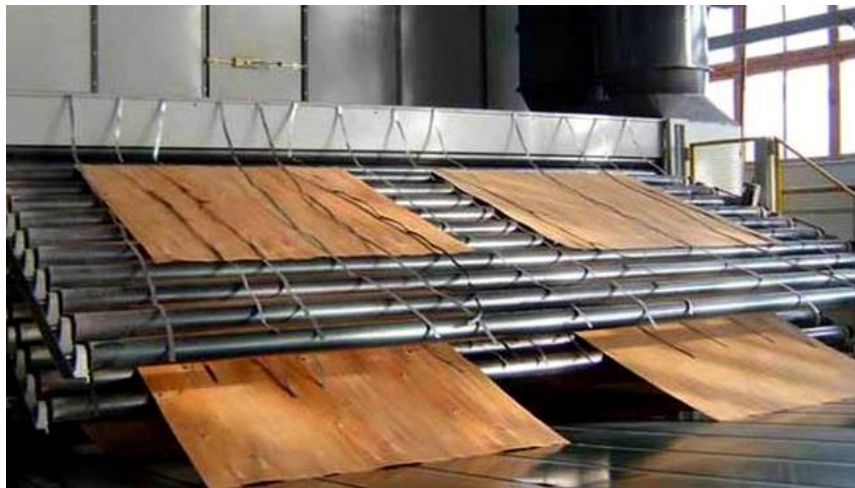


Рис. 1.14. Подача шпону в роликовий конвеєр сушарки для шпону VTS-4-4200

Листи шпону подаються в сушарку поштучно в напрямку вздовж волокон за допомогою завантажувального пристрою з вакуумприсмоктувачами KSA4800. Після цього розподільчим ролгангом SR4800-4 вони розподіляються по 4-х поверхах сушарки. За допомогою парних роликів, що обертаються, шпон проходить через **17 секцій сушіння і 3 секції охолодження**. Нижні ролики є приводними, для цього передбачено приводний пристрій, який обладнано редуктором, що регулює швидкість. Верхні ролики приводяться в рух від нижніх за допомогою зубчастої передачі. Вони притискають власною вагою шпон до нижніх роликів, чим забезпечують його переміщення.

Волога з листів видаляється під дією агенту сушіння – циркулюючого гарячого повітря, яке нагрівається паро-повітряною сумішшю від спеціального калорифера-змішувача, встановленого по одному на кожну секцію сушарки. Калорифери-змішувачі розміщені над конвеєром у верхній частині гарячої ділянки. Сушіння шпону проводиться під **тиском пари 18 бар**.

З парового колектора, який знаходиться поруч із сушаркою, пара розподіляється по секціям сушарки за допомогою вентилів регулювання подачі пари. Конденсат із калориферів видаляється в збірники конденсату, а конденсаційна вода – в колектор конденсату.

Циркуляція повітря в сушарці, що проходить поперек напрямку руху шпону, забезпечується аксіальними повітродувками, які встановлені по одній у кожній секції. Повітродувка обертається від двигуна за допомогою клинопасової передачі і нагнітає в соплові коробки повітря з **витратою 20,8 м<sup>3</sup>/с**. З коробів повітря виходить з великою швидкістю в напрямку, перпендикулярному поверхні шпону і вбирає в себе вологу, що видаляється з деревини. Через канали між сопловими коробками і роликами, повітря повертається до повітродувки рециркуляції.

Рециркуляційна вентиляційна система має вирішальний вплив на розподіл температури і відносної вологості повітря в сушильному просторі, в значній мірі вирівнює температурне поле по ширині і по довжині камери, створює умови ефективної тепловіддачі блоку підігріву повітря і забезпечує малу величину транспортного запізнення передачі збуджуючих і управляючих дій через повітряне середовище на матеріал.

Охолодження листів шпону здійснюється в камерах охолодження за допомогою циркулюючого повітря, яке забирається з атмосфери повітродувками.

Час проходження шпону через сушарку залежить від породи деревини, товщини шпону, початкової вологості, температурного режиму в сушарці.

### **Основні технологічні параметри:**

- температура повітря на вході сушарки -  $+100-195^{\circ}\text{C}$ ;
- температура повітря в секції 1 сушарки -  $+140-200^{\circ}\text{C}$ ;
- температура повітря в секції 2 сушарки -  $+135-200^{\circ}\text{C}$ ;
- температура повітря в секції 3 сушарки -  $+120-195^{\circ}\text{C}$ ;
- початкова вологість шпону –  $100-80\%$ ;
- кінцева вологість шпону –  $2-6\%$ .

### **1.3. Постановка задачі автоматизації**

Кінцевим результатом процесу сушіння є отримання на виході шпону із заданою усталеною вологістю, що значною мірою відбивається на якості подальших процесів (наприклад, клеєння) та якості самої готової продукції (фанери) – на її міцності.

В існуючій системі керування процес сушки здійснюється за рахунок зміни температурних режимів, в результаті чого на виході отримується шпон різної вологості. Дана система не забезпечує необхідної якості сушіння, в результаті чого шпон може бути або недосушеним (тоді його повертають на досушування, що в свою чергу збільшує тривалість самого процесу), або пересушеним, який подальшій обробці вже не підлягає (брак).

*Вдосконалити систему автоматизації можна шляхом стабілізації температури у секціях сушарки, а також зміни швидкості роликового конвеєра в залежності від кінцевої вологості матеріалу. Внаслідок цього вдасться підвищити якість шпону, зменшити вихід бракованої продукції, скоротити час процесу сушіння.*

Роликову сушарку як об'єкт керування можна представити у такому вигляді (рис. 1.15). Тривалість сушіння шпону  $t$  обернено пропорційна швидкості сушильного агента в сушарці  $v_c$  і його температурі  $\theta_c$ . Результатом сушки шпону є отримання сухого шпону з рівномірною вологоємністю листа і однаковою вологоємністю усіх листів шпону.

Кінцева вологість шпону після його сушіння коливається в значних межах і залежить як від рівномірності початкової вологості шпонку, так і від процесу сушки, на який впливають температура, вологість, напрям і швидкість агента сушки, товщина шпону і порода деревини.

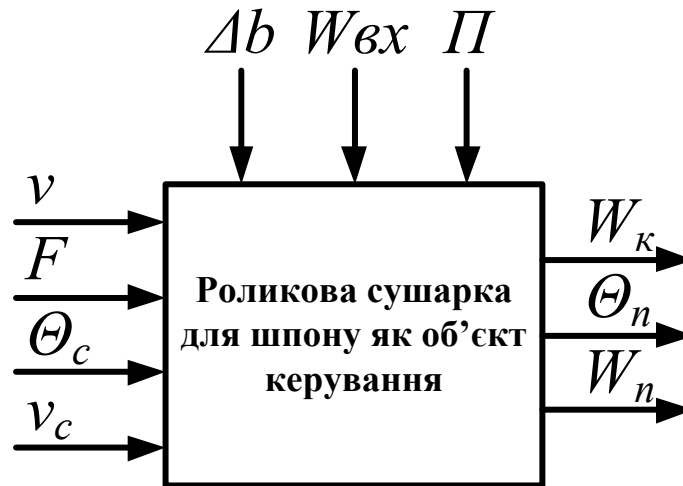


Рис. 1.15. Параметрична схема роликової сушарки як об'єкта керування

Отже, *регульованими* (вихідними) величинами для даного процесу є вологість матеріалу на виході із сушарки  $W_k$ , температура  $\Theta_n$  і вологість повітря  $W_n$  в сушарці; *збурюючими* – вологість матеріалу на вході в сушарку  $W_{ex}$ , товщина матеріалу  $\Delta b$ , його порода  $\Pi$ ; *регулюючими* (вхідними) величинами є швидкість переміщення шпону в сушарці  $v$ , витрата пари  $F$ , температура сушильного агента  $\Theta_c$  та інтенсивність циркуляції сушильного агента  $v_c$ .

#### 1.4. Розробка функціональної схеми автоматизації системи керування роликовою сушаркою для шпону

Функціональна схема автоматизації системи керування роликовою сушаркою для сушіння шпону наведена на листі №1 графічної частини бакалаврської кваліфікаційної роботи.

Система складається із датчиків параметрів технологічного процесу, програмованого логічного контролера, частотного перетворювача, виконавчих механізмів, електротехнічного обладнання для пуску та захисту.

Інформацію про перебіг технологічного процесу отримують від наступних датчиків:

TE (1-1) – датчик температури паро-повітряної суміші, яка подається в роликову сушарку як сушильний агент; TE (1-2) – датчик температури пари, який встановлюється на вхідному паропроводі; TE (1-5) – датчик температури, встановлений у відповідній секції сушіння шпону; TE (1-7) – датчик температури, встановлений в останній секції сушарки – секції охолодження;

FE (1-3) – датчика витрати пари, встановлений на вхідному паропроводі;

FE (1-4) – датчик витрати повітря, встановлений у вхідному повітропроводі;

ME (1-6) – датчик вологості повітря у відповідній секції сушіння шпону;

ME (1-8) – датчик вологості шпону на виході сушарки.

Сигнали від вказаних датчиків надходять на програмований логічний контролер UIRC (1-9), який формує керуючі сигнали для:

- регулюючого клапану подачі пари через електромагнітний пускач NS (1 - 10) – вихідний сигнал 9;

- регулюючого клапану подачі повітря через електромагнітний пускач NS (1 - 11) – вихідний сигнал 10;

- електродвигуна приводу відцентрового вентилятора подачі паро-повітряної суміші (сушильного агенту) у відповідну секцію роликової сушарки для шпону електромагнітний пускач NS (1-12) – вихідний сигнал 11;

- частотного перетворювача SIC (1-14), який керує обертами електродвигуна приводу роликової системи, встановлюючи тим самим експозицію сушіння шпону в сушарці (тобто змінює швидкість руху листів шпону в сушарці та час перебування листів шпону в усіх секціях сушарки).

Як було зазначено, роликові сушарки в залежності від модифікації комплектуються різною кількістю секцій. Відповідно, кількість контурів створення паро-повітряної суміші дорівнює кількості секцій сушарки.

Система працює наступним чином. Після вмикання системи керування програмований логічний контролер починає отримувати інформацію від відповідних датчиків технологічного процесу. Разом з цим, відкриваються регулюючі клапани подачі пари і повітря, утворюється паро-повітряна суміш необхідної температури як агенту сушіння. Коли температура в секціях досягає необхідного значення, вмикається частотний перетворювач, який керує роликовою системою переміщення шпону в сушарці, і оператори починають завантажувати листи вологого шпону для сушіння.

При змішуванні пари і повітря з навколишнього середовища може утворюватись конденсат, який відводиться із збірників конденсату.

Отже, температура сушильного агенту регулюється за допомогою зміни співвідношення "пара – повітря". Вологість у секціях сушарки регулюється за допомогою зміни витрати пари. Для забезпечення оптимальної насиченості повітря вологою частина сушильного агенту відводиться в атмосферу через випускні канали, в яких встановлені пелюсткові шибері (на функціональній схемі не показані).

Кінцевим продуктом є висушений шпон. Тому на виході з сушарки вимірюється вологість шпону, сигнал з якого подається на частотний перетворювач, який змінює швидкість двигуна роликового конвеєра, а, отже, і час перебування шпону в сушарці.

Зміна швидкості конвеєра також здійснюється за показами датчика температури в сушарці, який вказує на зміну температурного режиму сушіння. Причому швидкодія регулятора температури значно перевищує швидкодію регулятора вологості, що дозволяє послабити коливання значення кінцевої вологості шпону при дії збурень, викликаючих відхилення температури від заданого значення.

## РОЗДІЛ 2

### РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ШПОНУ

#### 2.1. Математична модель конвективного сушіння шпону

Розробку математичної моделі конвективного сушіння шпону проводимо за методикою, що розроблена авторами досліджень [8].

Відомо [5], що в умовах конвективного сушіння сировини протягом першого періоду сушки на швидкість протікання процесу впливають:

- швидкість підведення теплоти до поверхні висушуваного матеріалу;
- швидкість відведення вологи, яка випаровується з його поверхні.

Швидкість підведення теплоти до поверхні сировини визначається коефіцієнтом тепловіддачі  $\alpha$  та різницею між температурами теплоносія і поверхні сировини. При цьому визначення коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha$  є складною задачею: аналітично отримати розрахункову формулу для визначення  $\alpha$  практично неможливо внаслідок складної залежності коефіцієнта тепловіддачі від великої кількості факторів. Лише за допомогою узагальнення дослідних даних із використанням теорії подібності можна отримати узагальнену формулу для типових випадків тепловіддачі, яка дозволяє розраховувати значення  $\alpha$  для умов конкретної задачі.

Для отримання коефіцієнта тепловіддачі потрібно визначити градієнт температури біля поверхні сировини. Вихідною залежністю для узагальнення дослідних даних щодо тепловіддачі є загальний закон розподілу температур в потоці, що може бути вираженим диференціальним рівнянням конвективного теплообміну [3].

Отримаємо таке рівняння, виходячи з наступних умов.

Виділимо у потоці теплоносія елементарний паралелепіпед із ребрами  $dx$ ,  $dy$ ,  $dz$ . Для спрощення подальших розрахунків приймемо, що питома теплоємність  $C_p$ , коефіцієнт теплопровідності  $\lambda$  і густина теплоносія  $\rho$  є незмінними. Температура потоку змінюється вздовж граней паралелепіпеда. Позначимо проекції швидкості руху потоку  $\omega$  на вісі координат  $x$ ,  $y$ ,  $z$  відповідно як  $\omega_x$ ,  $\omega_y$ ,  $\omega_z$ . Уся теплота, яка підводиться до потоку, спрямовується на зміну ентальпії. Теплота переноситься у потоці за допомогою теплопровідності і конвекції [5].

Кількість теплоти, яка вноситься у об'єм  $dV$  виразимо такою залежністю [8]

$$dQ_{\text{кон}} = -\rho \cdot C_p \left( \frac{dt}{dx} \omega_x + \frac{dt}{dy} \omega_y + \frac{dt}{dz} \omega_z \right) dV \cdot d\tau. \quad (2.1)$$

Кількість теплоти, яка вноситься у паралелепіпед протягом часу  $\tau$  за допомогою теплопровідності, описується рівнянням

$$dQ_{\text{тепл}} = \lambda \left( \frac{d^2 t}{dx^2} + \frac{d^2 t}{dy^2} + \frac{d^2 t}{dz^2} \right) dV \cdot d\tau. \quad (2.2)$$

Всередині сушарки для шпону кількість теплоти, що підводиться за допомогою конвекції та теплопровідності, визначається як

$$dQ_{\text{кон}} + dQ_{\text{тепл}} = -\rho \cdot C_p \left( \frac{dt}{dx} \omega_x + \frac{dt}{dy} \omega_y + \frac{dt}{dz} \omega_z \right) dV \cdot d\tau + \\ + \lambda \left( \frac{d^2 t}{dx^2} + \frac{d^2 t}{dy^2} + \frac{d^2 t}{dz^2} \right) dV \cdot d\tau. \quad (2.3)$$

Підведена кількість теплоти дорівнює зміні ентальпії паралелепіпеда [8]

$$dQ = C_p \cdot \rho \cdot dV \cdot \frac{dt}{d\tau} \cdot d\tau, \quad (2.4)$$

Після відповідних перетворень отримаємо

$$\frac{dt}{d\tau} + \frac{dt}{dx} \omega_x + \frac{dt}{dy} \omega_y + \frac{dt}{dz} \omega_z = a \left( \frac{d^2 t}{dx^2} + \frac{d^2 t}{dy^2} + \frac{d^2 t}{dz^2} \right), \quad (2.5)$$

де  $a = \lambda / (C \cdot \rho)$  – коефіцієнт температуропровідності,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

Рівняння (2.5) у найбільш загальному вигляді подає температурний розподіл у рухомому середовищі. Аналітично розв'язати рівняння (2.5) у

загальному вигляді неможливо, але за допомогою теорії подібності [8] його можна замінити рівнянням критеріальним, тобто

$$Nu = f\left(Re, Pr, \frac{L_1}{L_0}, \dots, \frac{L_n}{L_0}\right); \quad Nu = \frac{a \cdot d}{\lambda}; \quad Pr = \frac{c \cdot \mu}{\lambda}, \quad (2.6)$$

де  $Nu$  – критерій Нуссельта;  $Pr$  – критерій Прандтля;  $L_1, \dots, L_n$  – основні геометричні розміри.

Критеріальні рівняння можна представити за допомогою величин  $C, m, n, p$ , які визначаються експериментально:

$$Nu = \frac{a \cdot d}{\lambda} = C \cdot Re^m \cdot Pr^n \cdot \left(\frac{l}{d}\right)^p. \quad (2.7)$$

Диференційне рівняння конвективного масообміну має такий вигляд

$$\frac{dC}{dx} \omega_x + \frac{dC}{dy} \omega_y + \frac{dC}{dz} \omega_z = D \left( \frac{d^2C}{dx^2} + \frac{d^2C}{dy^2} + \frac{d^2C}{dz^2} \right), \quad (2.8)$$

Воно виражає закон розподілу концентрації певного компонента у рухомому середовищі при встановленому потоці масообміну.

Вираз (2.8) є аналогічним рівнянню конвективного теплообміну (2.5) за своєю структурою, але відрізняється градієнтом (градієнт концентрації замість градієнта температури). Окрім змінної концентрації, у диференційному рівнянні масообміну в рухомому середовищі (2.8), змінною є також і швидкість потоку.

*При протіканні процесу і у першому і в другому періодах сушіння (кінетична крива складається з періоду сталої (лінійна) та спадаючої (експоненціальна) швидкості), проходить поверхнею матеріалу, пара, що утворюється, дифундує в оточуюче середовище.* Отже, характер протікання процесу визначається як механізмом переносу вологи у матеріалі, так і механізмом переносу вологи з поверхні сировини в оточуюче середовище через шар, що розташований у поверхні матеріалу (пограничний шар). При цьому потік вологи в сировині можна описати такою залежністю

$$j = \alpha_m \cdot \rho_0 \cdot \nabla u - \alpha_m^T \cdot \rho_0 \cdot \nabla T - K_P \cdot \nabla P, \quad (2.9)$$

де  $\alpha_m$  – коефіцієнт дифузії вологи,  $m^2/s$ ;  $\rho_0$  – густина сухого скелету тіла,  $kg/m^3$ ;  $K_P$  – величина, що характеризує молярне перенесення вологи під впливом градієнту тиску;  $\alpha_m^T$  – коефіцієнт термодифузії у вологому тілі,  $m^2/s$ ;  $\nabla P$  –

градієнт парціального тиску парів води, Па;  $\nabla u$  та  $\nabla T$  – відповідно фіксовані значення вологості і температури, % та град. Цельсія.

При незначних перепадах температурах в ізотермічних умовах у пограничному шарі вологого повітря різницю хімічних потенціалів можливо замінити різницею парціальних тисків [8]

$$j = \alpha_p \cdot (P_n - P_c), \quad (2.10)$$

де  $\alpha_n$  – коефіцієнт обміну води, с/м;  $(P_n - P_c)$  – різниця парціальних тисків, Па.

Густина потоку тепла  $q_n$ , Вт/м<sup>2</sup>, що підводиться до поверхні сировини при постійній швидкості в процесі конвективного теплообміну можна виразити [8]

$$q_n = \alpha_q \cdot (t_c - t_n), \quad (2.11)$$

де  $\alpha_q$  – коефіцієнт теплообміну, Вт/(м<sup>2</sup>·°C);  $t_c$  – температура теплоносія, °C;  $t_n$  – температура поверхні сировини, °C.

Отже, існує тісний взаємозв'язок між залежностями масообміну і теплообміну у період постійної швидкості сушіння. За умови, що уся теплота, яка необхідна для випаровування води, підводиться з оточуючого середовища тільки за рахунок конвективного теплообміну, а температура сировини є незмінною (тобто  $dt/d\tau = 0$ ), то інтенсивність випаровування є пропорційною густині потоку теплоти на поверхні сировини [8]

$$j_n = \frac{q_n}{r} = \frac{N}{100} R_v \frac{\rho_0}{r} = \left( \frac{dW}{d\tau} \right)_0 \cdot \frac{R_v \cdot \rho_0}{100 \cdot r}, \quad (2.12)$$

де  $N$  – швидкість сушіння у період постійної швидкості, %/с;

$$N = \left( \frac{dW}{d\tau} \right)_0.$$

$R_v$  – відношення об'єму тіла до площі його поверхні, м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>;

$\rho_0$  – густина сировини, кг/м<sup>3</sup>;

$r$  – питома теплота пароутворення, кДж/кг.

Після відповідних перетворень, представимо рівняння (2.12) як

$$\frac{q_q}{r} \cdot (t_c - t_n) = \alpha_p \cdot (P_n - P_c) = \frac{R_v \cdot \rho_0 \cdot N}{100 \cdot r}. \quad (2.13)$$

Рівняння (2.13) показує, що швидкість сушіння у першому періоді можна визначити як за функцією Ньютона, так і за функцією Дальтона. Найбільше значення величини швидкості руху теплоносія обумовлене співвідношенням енергетичних затрат на сушіння і швидкістю процесу. Найбільше значення температури теплоносія обумовлене як технологічними показниками, так і термічною стійкістю сировини, що сушиться, та енергетичними затратами.

У разі сушіння сировини у першому періоді, інтенсивність процесу можна прирівняти до інтенсивності випаровування вологи з вільної поверхні при тотожних режимах. Такий тепловий масообмінний процес можна описати такою системою рівнянь

$$\begin{cases} q_n = \alpha_n \cdot (t_c - t_n) = Nu_q \cdot \frac{\lambda_B}{l} \cdot (t_c - t_n); \\ j_n = \alpha_p \cdot (P_n - P_c) = Nu_m \cdot \frac{D_p}{l} \cdot (P_n - P_c), \end{cases} \quad (2.14)$$

де  $\lambda_B$  – коефіцієнт теплопровідності вологого повітря, Вт/(м·°С);

$D_p$  – коефіцієнт дифузії пари у повітрі, віднесений до різниці тисків, с/м;

$l$  – довжина поверхні сировини вздовж потоку теплоносія, м;

$n$  і  $c$  – індекси, які означають поверхню тіла і навколишнє середовище.

Протягом періоду постійної швидкості сушіння температура сировини є постійною, і усе тепло, яке передається сировині, витрачається на випаровування вологи. Відповідно закону збереження енергії отримаємо, що

$$q_n = j_n \cdot r, \quad (2.15)$$

або

$$q_n = r \cdot \rho_0 \cdot R_v \cdot N \cdot \frac{1}{100}, \quad (2.16)$$

де  $q_n$  – інтенсивність теплообміну, Вт/м<sup>2</sup>;  $j_n$  – інтенсивність випаровування, %/(с·м<sup>2</sup>);  $N$  – швидкість сушіння у першому періоді, %/с.

За величиною інтенсивності теплообміну  $q_n$  можливо розрахувати швидкість сушіння  $N$ , і навпаки, знаючи швидкість сушіння  $N$  можливо розрахувати інтенсивність теплообміну  $q_n$ .

Враховуючи ці фактори, дослідники [5] приводять критеріальну залежність для визначення постійної швидкості сушіння

$$Ki_{q0} = Ki_{m0} \cdot Lu \cdot Ko. \quad (2.17)$$

Теплообмінний і масообмінний критерії Кірпічова визначаються як

$$Ki_{q0} = \frac{q_n \cdot R_v}{\lambda \cdot T_c}; \quad (2.18)$$

$$Ki_{m0} = \frac{j_n \cdot R_v}{\alpha_m \cdot \rho_0 \cdot \bar{U}_0}, \quad (2.19)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності вологого тіла, Вт/(м·°С);

$\bar{U}_0$  – вологовміст тіла, кг/кг.

У формулі (2.17) змінні  $Lu$  та  $Ko$  розраховуються за виразами

$$Lu = \frac{\alpha_m}{\alpha}, \quad (2.20)$$

$$Ko = \frac{r \cdot \bar{U}_0}{C \cdot T_c}, \quad (2.21)$$

де  $Lu$  – критерій Ликова;  $Ko$  – критерій Косовича;  $\alpha$  – коефіцієнт теплопровідності вологого тіла, м<sup>2</sup>/с;  $C$  – питома теплоємність вологого тіла, Дж/(кг·°С).

Формули (2.15) та (2.16) є основними залежностями для періоду постійної швидкості і досить складними для практичного застосування. Причини названих складностей полягають у тому, що вони повинні доповнюватись формулами для визначення  $q_n$  та  $j_n$ , які по-своєму залежать не тільки від швидкості руху теплоносія, але і від фізичних властивостей газового потоку, вологого тіла, його геометричних розмірів, а також від методу контактування із потоком. До складу критерію  $Ki$  входить значення інтенсивності сушіння  $j_n$  у першому періоді, яке певним чином залежить від  $q_n$ , а якщо прийняти за основу швидкість сушіння  $N$  у першому періоді, то потрібно володіти залежностями, що характеризують її взаємозв'язок із параметрами сушіння. Окрім цього, із зміною вологості сировини будуть змінюватися у часі такі складові критерію, як  $\lambda$ ,  $\alpha$ ,  $C$ . Тому, враховуючи названі обставини, виникає потреба у додаткових залежностях, які

необхідні для використання формули (2.17) у інженерних розрахунках при прогнозуванні кінетики сушіння у першому періоді.

Якщо для досліджуваної сировини кінетика процесу характеризується наявністю як першого, так і другого періоду, то для узагальнення результатів у другому періоді використовують наближене рівняння сушіння з мінімальною кількістю констант. Для можливості використання основного рівняння кінетики сушіння, потрібно знати, яким чином вологість сировини залежить від часу [8]. Таку залежність можливо отримати, розв'язавши систему диференціальних рівнянь тепло- і вологопереносу, для чого, в свою чергу, необхідно отримати коефіцієнти зміни температури і переносу вологи. У аналітичному відношенні така задача є складною внаслідок її нелінійності. Тому вирішення такої задачі має практичну цінність: отримання достатньо надійної, хоча і наближеної, залежності з мінімальною кількістю експериментально визначених констант, яка добре описує процес зміни вологості сировини в другому періоді процесу.

Спираючись на сказане, узагальнення результатів кінетики сушіння в умовах спадаючої швидкості ґрунтується на наближеному рівнянні сушіння для другого періоду та узагальненні швидкості сушіння в першому періоді у виді степеневій функції. Рівняння сушіння в другому періоді процесу виглядає як

$$-\frac{dW}{d\tau} = K \cdot (W - W_p); \quad (2.22)$$

$$K = \frac{N}{W_{kp} - W_p} = \chi \cdot N, \quad (2.23)$$

де  $N$  – швидкість сушіння у першому періоді, %/с;  $K$  – коефіцієнт сушіння, який прямо пропорційний швидкості сушіння у першому періоді і залежить від режиму сушіння, 1/с;  $W$ ,  $W_p$ ,  $W_{kp}$  – відповідно поточне, рівноважне та критичне значення вологості, %;  $\chi$  – відносний коефіцієнт сушіння, який залежить від властивостей матеріалу та початкової вологості, 1/%.

Якщо проінтегрувати вираз (2.22), отримаємо такий вираз

$$\frac{W - W_p}{W_{kp} - W_p} = \exp(-K(\tau - \tau_{kp})) = \exp(-\chi \cdot N(-\tau_{kp})). \quad (2.24)$$

Для того, щоб розрахувати значення коефіцієнта  $K$ , необхідно рівняння (2.24) представити у координатах  $\lg(W - W_{kp}) = f(\tau)$ . Тоді коефіцієнт сушіння  $K$  визначатиметься як тангенс кута нахилу прямої.

$$K = \frac{2,3 \cdot [\lg(W_1 - W_p) - \lg(W_2 - W_p)]}{\tau_2 - \tau_1}, \quad (2.25)$$

де  $W_1, W_2$  – поточні значення вологості у другому періоді у моменти часу відповідно  $\tau_1$  і  $\tau_2$ .

Кінетику сушіння матеріалу у *першому періоді* описуємо формулою, яка є дійсною для умов  $W \geq W_{kp}$ :

$$W = W_0 - N \cdot \tau, \quad (2.26)$$

де  $W_0$  – початкова вологість, %;  $W$  – поточна вологість, %.

В момент досягнення  $W_{kp}$

$$W_{kp} = W_0 - N \cdot \tau_{kp}. \quad (2.27)$$

Час, якому відповідає  $W_{kp}$ , отримують з виразу

$$\tau_{kp} = \frac{W_0 - W_{kp}}{N}. \quad (2.28)$$

Для того, щоб узагальнити результати кінетики сушіння у *другому періоді*, потрібно розрахувати відносний коефіцієнт сушіння  $\chi$  із графіка функції  $K = f(N)$ , звідки  $\operatorname{tg} \alpha = \chi$  (рис. 2.1). Отже, шукане кінетичне рівняння виглядатиме

$$\frac{W - W_{kp}}{W_{kp} - W_p} = e^{-K \cdot (\tau - \tau_{kp})} = e^{\chi \cdot N \cdot (\tau - \tau_{kp})}. \quad (2.29)$$

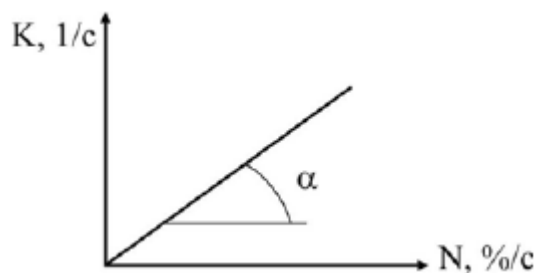


Рис. 2.1. Визначення відносного коефіцієнта сушіння  $\chi$

Вираз (2.29) справедливий за умови  $W < W_{kp}$ . Для можливості використання виразу (2.29) необхідно визначити, яким чином швидкість сушіння у першому періоді (справедлива умова  $W \geq W_{kp}$ ) залежить від параметрів процесу. Таку залежність у загальному вигляді можна виразити рівнянням

$$N = A \cdot t^m \cdot \omega^n, \quad (2.30)$$

де  $A$ ,  $m$ ,  $n$  – коефіцієнт пропорційності і показники степені відповідно;  $\omega$  – швидкість руху теплоносія, м/с;  $t$  – температура теплоносія, °С.

Дослідники [8] вивчали кінетику сушіння зразків шпону із початковою вологістю  $W_0 = 58\%$ , діаметром  $d = 10 \cdot 10^{-2}$  м при різних товщинах стінки зразків, різних температурах та швидкостях руху теплоносія. Дослідження проводились на роликівій сушарці для шпону VTS-4-4200 конвективно-контактного типу неперервної дії із сопловим дуттям. Результати дослідження кінетики сушіння зразків шпону для різних параметрів технологічного процесу наведені на рис. 2.2 (а, б), 2.3, які показують, що процес характеризується присутністю і першого, і другого періодів. Графік зміни температури теплоносія при майже стрибкоподібній зміні подачі пари у паро-повітряну суміш наведений на рис. 2.4.

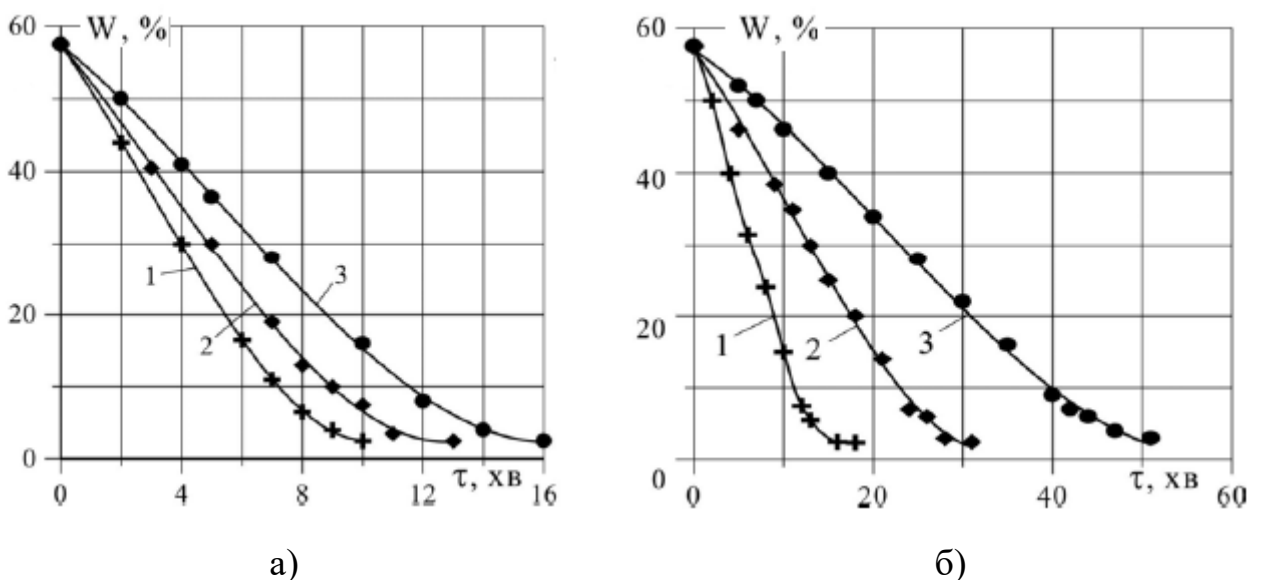


Рис. 2.2. Вплив параметрів технологічного процесу на кінетику сушіння:

а: вплив швидкості теплоносія на кінетику сушіння шпону:

$t = 120^\circ\text{C}$ ,  $H = 1,5 \cdot 10^{-3}$ ; 1 –  $\omega = 3$  м/с; 2 –  $\omega = 2$  м/с; 3 –  $\omega = 1$  м/с

б: вплив температури на кінетику сушіння шпону:

$\omega = 1$  м/с;  $H = 1,5 \cdot 10^{-3}$ ; 1 –  $t = 120^\circ\text{C}$ ; 2 –  $t = 86 \dots 90^\circ\text{C}$ ; 3 –  $t = 50^\circ\text{C}$

Рис. 2.2, а, відбиває результати дослідження впливу на кінетику сушіння швидкості руху теплоносія. Бачимо, що при однаковій температурі при збільшенні швидкості руху теплоносія з 1 до 3 м/с тривалість сушіння зменшується з 16 до 9 хв. (з 960 до 540 с) до досягнення рівноважної вологості. При цьому в досліджуваному діапазоні змін швидкостей, швидкість сушіння у першому періоді суттєво залежить від гідродинамічних умов. До другого періоду це відноситься меншою мірою.

Температура теплоносія має також суттєвий вплив на кінетику сушіння (рис. 2.2, б). Бачимо, що підвищення температури не однаково впливає на швидкість сушіння на усьому діапазоні зміни вологості. Так, тривалість сушіння шпону від початкової  $W_0 = 57\%$  до вологості  $W_0 = 25\%$  (в першому періоді) при підвищенні температури на  $30^\circ\text{C}$  (з  $50$  до  $80^\circ\text{C}$ ) зменшується з 28 до 15 хв. (з 1680 до 900 с); при підвищенні з  $80$  до  $120^\circ\text{C}$  тривалість сушіння зменшується з 15 до 8 хв. (з 900 до 480 с). Необхідно зазначити, що підвищення температури теплоносія впливає на процес і в другому періоді (рис. 2.2, б). Підвищення швидкості сушіння у першому періоді зі збільшенням температури і швидкості руху теплоносія призводить до того, що в процесі сушіння здійснюється безперервне підведення вологи із внутрішніх шарів шпону до його поверхні, внаслідок чого знижується вологість не тільки на поверхні, але і у внутрішньому об'ємі. В самому простому випадку, випаровування відбувається на поверхні шпону, а пара, яка утворилася, дифундує у зовнішнє середовище.

Рис. 2.3 відбиває вплив товщини стінки на протікання процесу сушіння. Зміна товщини стінки шпону суттєво впливає на тривалість сушіння. Зразок шпону товщиною  $H = 1,5 \cdot 10^{-3}$  м висушують за 18 хв. (1080 с), товщиною  $3 \cdot 10^{-3}$  м – за 32 хв. (1920 с), а висушування шпону із товщиною  $H = 4,5 \cdot 10^{-3}$  м займає 48 хв. (2880 с). Іншими словами можна зазначити, що збільшення товщини стінки шпону в 3 рази збільшує час конвективного сушіння в 3,4 рази. Це явище можна пояснити як механізмом переносу вологи, так і фізико-хімічними властивостями самого шпону. Потовщення стінки шпону призводить до підвищення опору переносу вологи до поверхні сировини, що, в свою чергу, негативно впливає на

зовнішній масообмін. Шпон має теплоізоляційні властивості, і коефіцієнт теплопровідності залежить від вологості шпону. Коли на поверхні листа шпону зменшується вологість, теплопровідність верхнього шару знижується, а температура зростає. Перепад температур оточуючого середовища і поверхні шпону знижується, відповідно знижується інтенсивність конвективного підведення теплоти до поверхні листа шпону. Це викликає зменшення інтенсивності випаровування вологи з поверхні шпону (формули 2.12, 2.13).

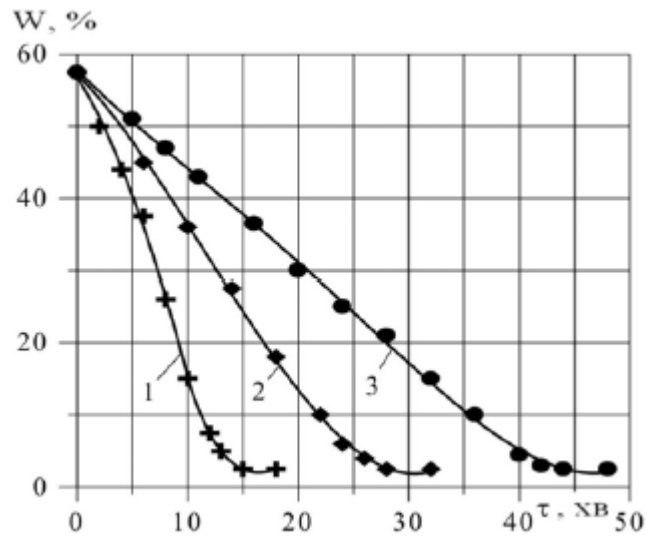


Рис. 2.3. Вплив товщини шпону на кінетику сушіння:

$\omega = 1 \text{ м/с}$ ;  $t = 120^\circ\text{C}$ ; 1 –  $H = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ; 2 –  $H = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ; 3 –  $H = 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$

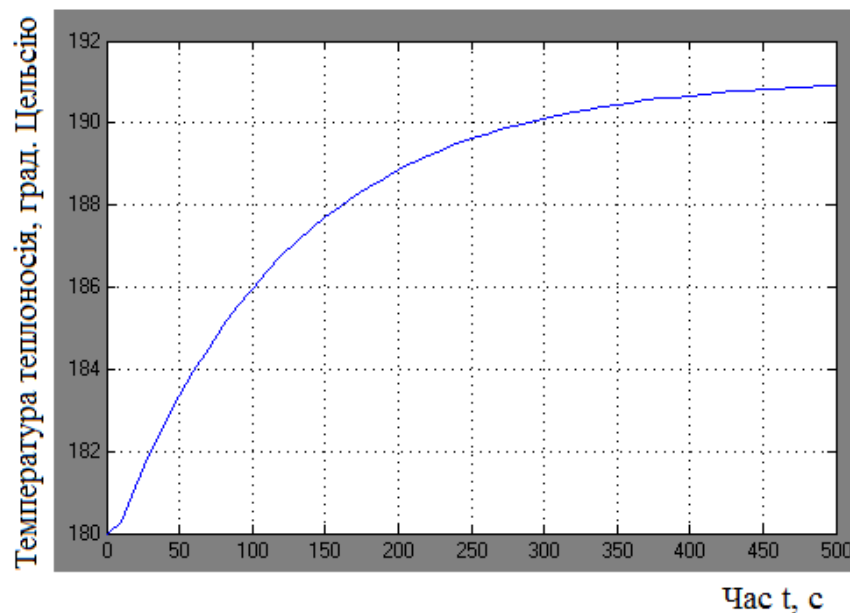


Рис. 2.4. Графік зміни температури теплоносія (паро-повітряної суміші) в сушарці для шпону при стрибкоподібній зміні подачі пари

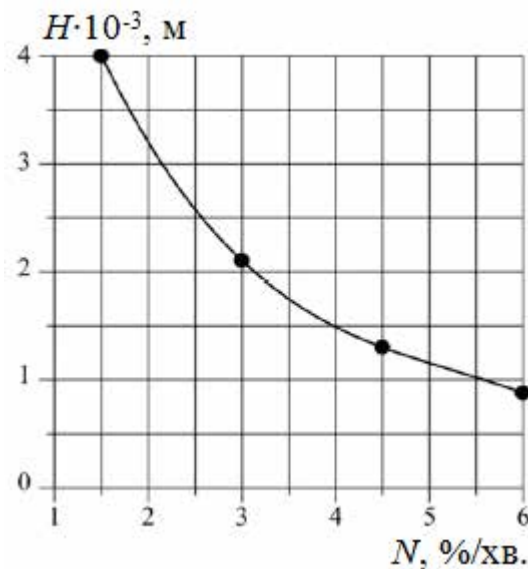


Рис. 2.5. Вплив товщини стінки шпону на швидкість сушіння в 1 періоді:

$$\omega = 1 \text{ м/с}; t = 120^{\circ}\text{C}$$

Графічна залежність зміни швидкості сушіння у першому періоді від товщини стінки шпону (рис. 2.5) вказує на великий вплив геометричних розмірів зразків шпону на кінетику процесу. Швидкість сушіння при товщині стінки  $1,5 \cdot 10^{-3}$  м дорівнює 4,25 %/хв., при  $H = 4,5 \cdot 10^{-3}$  м швидкість сушіння  $N = 1,25$  %/хв.

Наведені дані показують, що параметри теплоносія, режими сушіння та геометричні розміри шару шпону суттєво впливають на тривалість сушіння.

Для опису кінетики сушіння шпону у першому періоді будемо використовувати рівняння (2.26), яке справедливе для умов  $W > W_{кр}$ . Значенню критичної вологості на кінетичній кривій відповідає критичне значення часу, що розраховується за формулою (2.28). Отже, невідомими є дві величини  $\tau_{кр}$  та  $W_{кр}$ .

За наведеними графіками (рис. 2.2, а,б, рис. 2.3) отримуємо швидкість сушіння в першому періоді. На основі узагальнення результатів кінетики процесу в першому періоді одержуємо розрахункову залежність

$$N = 3,8 \cdot 10^{-3} \cdot t^{1,43} \cdot \omega^{0,44}, \quad (2.31)$$

за допомогою якої може бути прогнозований процес сушіння у 1 періоді для шпону товщиною  $1,5 \cdot 10^{-3}$  м до рівня вологості  $W > 20\%$ .

Після того, як для кожної з кінетичних кривих визначені значення  $K$  та  $N$ , необхідно побудувати залежність в координатах  $K - N$  і розрахувати значення відносного коефіцієнта  $\chi$ . Для досліджуваного матеріалу  $\chi = 0,0591\%$  ( $K = \chi \cdot N$ ).

Для визначення  $\tau = \tau_{кр}$ , які для різних умов є різними, тому що  $\tau_{кр}$  залежить від швидкості сушіння у 1 періоді (формула 2.28), потрібно отримати значення критичної вологості, що переважно є величиною сталою. Для отримання коефіцієнта сушіння  $K$  і значення  $W_{кр}$  будуюмо графічні залежності у координатах  $lg(W - W_{кр}) - \tau$  і визначаємо критичну вологість, яка для досліджуваного матеріалу складає приблизно  $W_{кр} \approx 20\%$ . Значення рівноважної вологості для досліджуваного інтервалу температур, дорівнює  $W_p \approx 2\%$ . За графіком в координатах  $lg(W - W_{кр}) - \tau$  за допомогою рівняння (2.33), отримуємо коефіцієнта  $K$  сушіння для різних режимів процесів.

Отже, вираз, що описує зміну вологості шпону в другому періоді, виглядає наступним чином

$$\frac{W - W_p}{20 - W_p} = e^{-0,059 \cdot N \cdot (\tau - \tau_{кр})}; \quad (2.32)$$

$$\frac{W - W_p}{18} = e^{-0,059 \cdot 3,8 \cdot 10^{-3} \cdot t^{1,43} \cdot \omega^{0,44} \cdot (8 - \tau_{кр})}; \quad (2.33)$$

Зазначені вирази (2.31) та (2.33) дозволяють прогнозувати кінетику конвективного сушіння із відносною похибкою, яка не перевищує 12-15%.

## **2.2. Визначення передатної функції роликів сушарки для шпону для каналу керування температурою теплоносія**

Визначимо такі параметри передатної функції сушарки для шпону для каналу керування температурою теплоносія (паро-повітряної суміші), як час транспортного запізнення  $\tau_{oy}$ , коефіцієнт передачі  $k_{oy}$  та постійна часу об'єкта  $T_{oy}$ . Для визначення передатної функції теплиці для каналу керування температурним режимом був використаний графічний метод.

Для цього розгінна характеристика була пронормована за виразом

$$h(t_i) = \frac{\theta_B(t_i) - \theta_B(0)}{\theta_B(t_{\max}) - \theta_B(0)} = \frac{\theta_B(t_i) - 180}{191 - 180} \quad (2.34)$$

де  $\theta_B(t_i)$  – проміжне значення параметра в  $i$ -й момент часу  $t_i$ ;  $\theta_B(0)$  – початкове значення параметра;  $\theta_B(t_{\max})$  – кінцеве значення параметра в усталеному режимі;  $h(t_i)$  – значення нормованої кривої розгону в  $i$ -й момент часу.

Коефіцієнт передачі об'єкта розраховується як відношення різниці температури  $\Delta t$  паро-повітряної суміші на вході в сушарку в залежності від стрибкоподібної подачі пари  $\Delta G_g$ , тобто від зміни співвідношення "пара – повітря" при створенні паро-повітряної суміші:

$$k = \frac{\Delta t}{\Delta G_g}. \quad (2.35)$$

За виразом (2.35), враховуючи технічні характеристики котлоагрегату (таблиця 1.1), отримаємо, що  $k = (190 - 50) / 210 = 0,67 \text{ } ^\circ\text{C}/(\text{м}^3/\text{кг})$ .

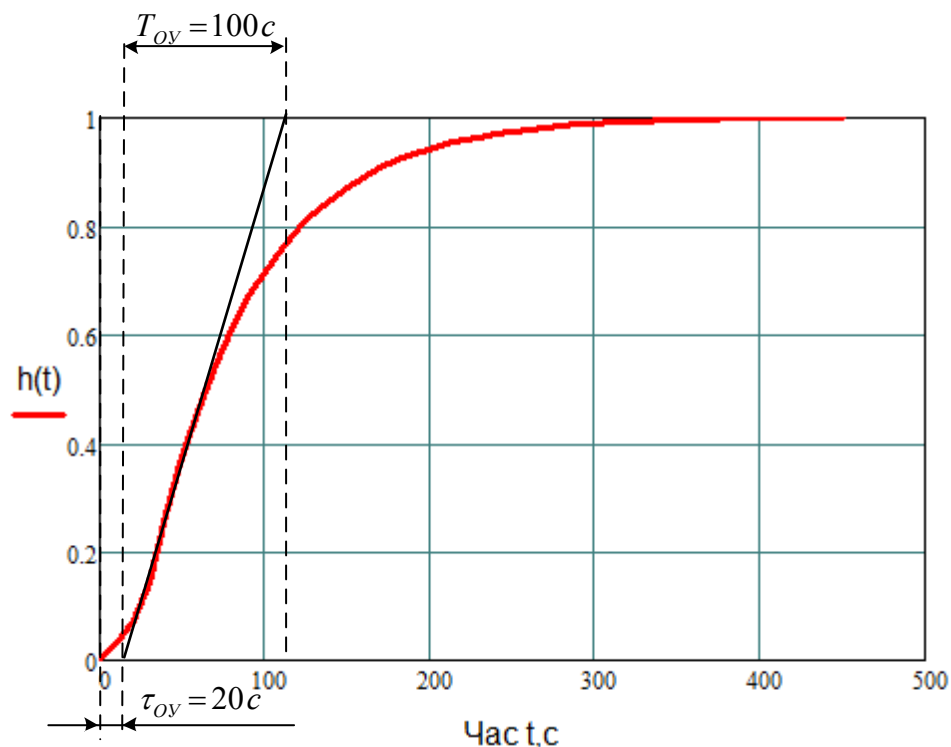


Рис. 2.6. Нормована розгінна характеристика роликової сушарки для шпону для каналу керування температурою теплоносія

Чисельне значення постійної часу  $T_{ov}$  та часу запізнення  $\tau_{ov}$  об'єкта знаходять за допомогою дотичної, яку проводять до точки перегину розгінної характеристики (рис. 2.6). Точка перегину відповідає середині відрізка часу, на якому спостерігається максимальний приріст ординати кривої розгону.

Передатна функція котлоагрегату для каналу керування температурою пари на виході котлоагрегату має вигляд

$$W_{ov}(s) = \frac{0,67 \cdot e^{-20 \cdot s}}{100 \cdot s + 1} \quad (2.36)$$

## РОЗДІЛ 3

### ВИБІР РЕГУЛЯТОРА ТА ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЙОГО НАЛАШТУВАНЬ

#### 3.1. Вибір алгоритму керування

Для визначення алгоритму керування визначимо динамічні властивості об'єкта та показники якості, які повинні бути забезпечені по технологічним вимогам.

Алгоритм керування вибирають за величиною відношення часу запізнення до постійної часу об'єкта  $\frac{\tau_{ov}}{T_{ov}}$  [15]:

- якщо  $\frac{\tau_{ov}}{T_{ov}} < 0,2$ , перевагу віддають позиційному (релейному)

алгоритму керування, але можливе використання і неперервного алгоритму. Рішення приймається в залежності від технологічних вимог до процесу управління.

- якщо  $0,2 < \frac{\tau_{ov}}{T_{ov}} < 1,0$ , перевагу віддають неперервному або цифровому

алгоритму керування (П-, ПІ- або ПІД-алгоритм керування)

- якщо  $\frac{\tau_{ov}}{T_{ov}} > 1,0$ , вибирають спеціальний цифровий регулятор з

екстраполятором, який компенсує запізнювання в контурі керування.

Крім того, для обґрунтування алгоритму керування і вибору регулятора, який реалізує такий алгоритм, необхідно знати не тільки властивості об'єкта та вимоги до технологічного процесу, але й деякі конструктивні особливості самих регуляторів. Промислові регулятори реалізують алгоритм керування з певною похибкою, що обов'язково повинно враховуватись при виборі усіх технічних засобів, що входять до складу системи автоматичного керування.

В даному випадку за отриманою передатною функцією (2.36)

$$\frac{\tau_{OV}}{T_{OV}} = \frac{20}{100} = 0,2.$$

За вказаною методикою необхідно обрати неперервний алгоритм керування. Крім того, необхідно врахувати особливості роботи самої роликової сушарки для шпону VTS-4-4200 – це установка конвективно-контактного типу неперервної дії із сопловим дуттям. Процес сушіння шпону відбувається неперервно конвеєрним способом: оператор здійснює подачу вологого шпону в роликові затискачі, і далі лист шпону рухається сушаркою, втрачаючи вологу. Тому алгоритм керування виконавчим механізмом повинен бути неперервним.

Методика вибору найкращого алгоритму керування для певного об'єкта полягає у визначенні динамічного коефіцієнта регулювання.

Для статичних об'єктів:

$$R_D = \frac{y_1}{K_{OV} \cdot u_{МАКС}}, \quad (3.1)$$

де  $K_{OV}$  – коефіцієнт передачі об'єкта керування;

$u_{МАКС}$  – макс. допустиме збурення по навантаженню, в % ходу РО;

$y_1$  – максимальне динамічне відхилення, %.

Проведемо розрахунки за умов наступних значень показників якості:

- максимальне динамічне відхилення  $y_1 = 1,5\%$ ;
- статична похибка  $\Delta y = 2,0^\circ\text{C}$ ;
- допустимий час регулювання  $t_p = 500$  с;
- перерегулювання за збуренням  $\sigma = 0,2$ ;
- допустиме можливе значення збурення за навантаженням (у % переміщення регульовального органу)  $u_{МАКС} = 20\%$ .

За вихідними значеннями величина динамічного коефіцієнту

$$R_D = \frac{1,5}{0,67 \cdot 20} = 0,12.$$

Вибираємо для даного об'єкта перехідний процес із 20% перерегулюванням.

За графічними залежностями [15], визначаємо алгоритм керування – це ПІ-алгоритм.

Перевіримо, чи забезпечуватиметься при цьому необхідний час регулювання за виразом

$$t = \psi \cdot \tau, \quad (3.2)$$

де  $\psi$  - відносний час регулювання, для статичного об'єкту із ПІ-алгоритмом керування  $\psi = 12$  (Додаток В1).

Тоді  $t_{р.п} = \psi \cdot \tau = 12 \cdot 20 = 240$ , видно, що  $240 < 500$ , тобто необхідний час регулювання забезпечується.

Перевіримо на виникнення при цьому статичної похибки.

За графічними залежностями [15], визначаємо

$$\frac{\Delta y}{k_{OY} \cdot y_{МАКС}} = 0,14, \quad \Delta y = k_{OY} \cdot y_{МАКС} \cdot 0,14 = 0,67 \cdot 20 \cdot 0,14 = 1,876^\circ C. \quad (3.3)$$

Умова  $1,876^\circ C < 2,0^\circ C$  виконується, тобто ПІ-алгоритм керування задовольняє технологічні вимоги до процесу керування температурою теплоносія в роликівій сушарці для шпону.

### 3.2. Реалізація алгоритму керування

Згідно із описом функціональної схеми автоматизації (п.1.4, лист №1 графічної частини бакалаврської кваліфікаційної роботи), система керування роликівією сушаркою для шпону складається з:

- програмованого логічного контролера (ПЛК), який виконує функції керування різними контурами в залежності від інформації від різноманітних датчиків технологічного процесу сушіння шпону;
- датчиків температури, вологості та витрати;
- виконавчих механізмів (регулюючих клапанів неперервної дії), а також електрообладнання для керування цими виконавчими механізмами;

- частотного перетворювача керування електродвигуном приводу роликового механізму переміщення шпону сушаркою.

Детальний вибір електрообладнання для пуску та захисту виконавчих механізмів, комутації кіл керування, ручного керування та світлової сигналізації розглядається у розділі 5 бакалаврської кваліфікаційної роботи, а вибір програмованого логічного контролера, датчика температури, датчика вологості повітря, виконавчого механізму (регулюючого клапану), частотного перетворювача викладений у подальшому матеріалі.

### 3.2.1. Вибір програмованого логічного контролера

Згідно із завданням на бакалаврську кваліфікаційну роботу, для реалізації системи керування роликовою сушаркою для шпону необхідно використати пристрої керування (програмований логічний контролер та частотний перетворювач) фірми ОВЕН.

Для технічної реалізації системи автоматичного керування роликовою сушаркою для шпону обраний програмований логічний контролер **ОВЕН ПЛК160** (рис. 3.1).

ОВЕН ПЛК160 – лінійка програмованих лінійних моноблокових контролерів із дискретними та аналоговими входами/виходами на борту для автоматизації систем середнього рівня та розподілених систем керування.

Рекомендується для використання у системах керування кліматичним обладнанням, у системах HVAC, у сфері ЖКГ (ІТП, ЦТП), в АСК водоканалів (водопідготовка, насосні станції), для керування харчопереробними та пакувальними апаратами, а також у сфері виробництва будівельних матеріалів.

Відмінними особливостями лінійки контролерів ПЛК160 є:

- потужні обчислювальні ресурси та великий об'єм пам'яті;
- наявність дискретних та аналогових входів/виходів на борту контролера;

- наявність послідовних портів (RS-232, RS 485) на борту контролера;
- наявність порту Ethernet для увімкнення у локальні або глобальні мережі верхнього рівня;
- підтримання протоколів обміну Modbus (RTU, ASCII), OVEN, DCON;
- можливість роботи безпосередньо з портами контролера, що дозволяє підмикати зовнішні пристрої з нестандартними протоколами.

Крім того, контролер має вбудований годинник, що дозволяє створювати системи керування з урахуванням реального часу, а також вбудований акумулятор, який дозволяє організувати низку додаткових сервісних функцій (можливість короткочасного переключення зникнення живлення, переведення вихідних елементів у безпечний стан).

Технічні характеристики програмно-логічного контролера OVEN ПЛК160 наведені в додатках Г1, Г2.



Рис. 3.1. Програмований логічний контролер OVEN ПЛК160

## Розробка програми реалізації алгоритму керування технологічним обладнанням роликової сушарки для шпону

Програмна реалізація виконується за допомогою програмного середовища CoDeSys v.2.3, яке розроблене для програмування лінійки контролерів ОВЕН.

Першим кроком при створенні програми було необхідно обрати технічні засоби в блоці Hardware Config (рис. 3.2).

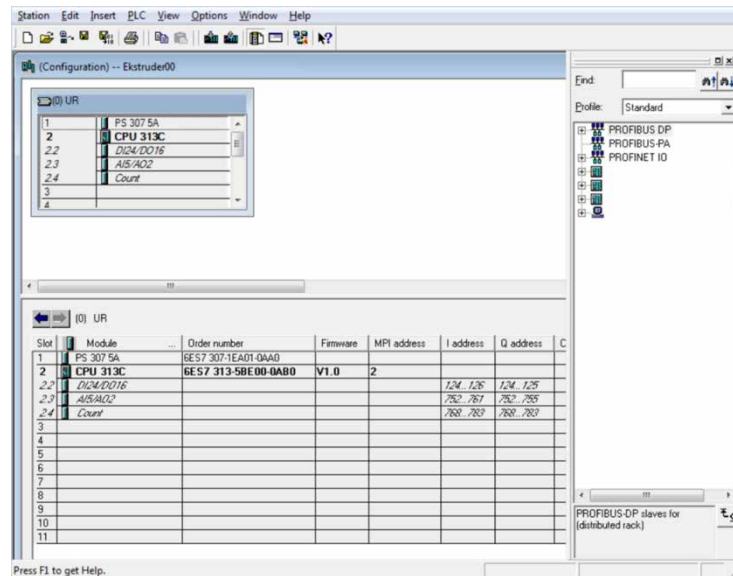


Рис. 3.2. Загальний вигляд вікна CoDeSys v.2.3 Hardware Config

Наступним кроком оголошуються змінні та їх адреси, які будуть використовуватись при розробці програми (рис. 3.3).

Основний текст блоку програми написано на мові LAD (рис. 3.4).

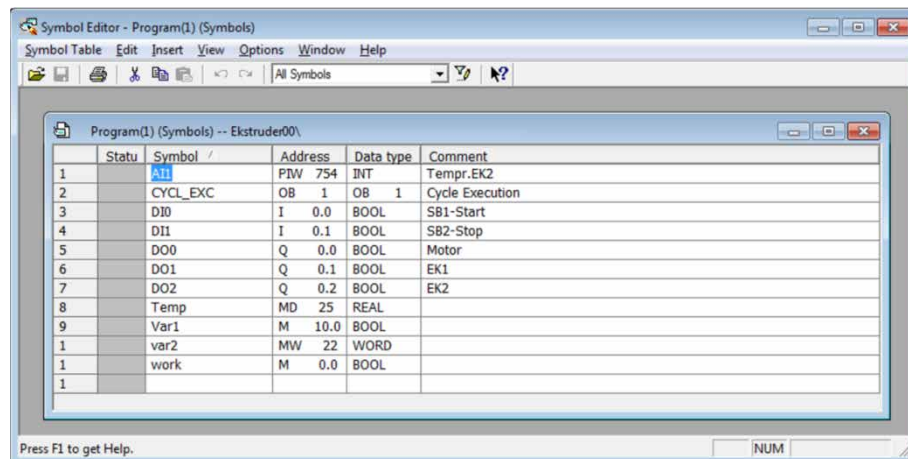


Рис. 3.3. Загальний вид вікна CoDeSys v.2.3 Symbol Editor

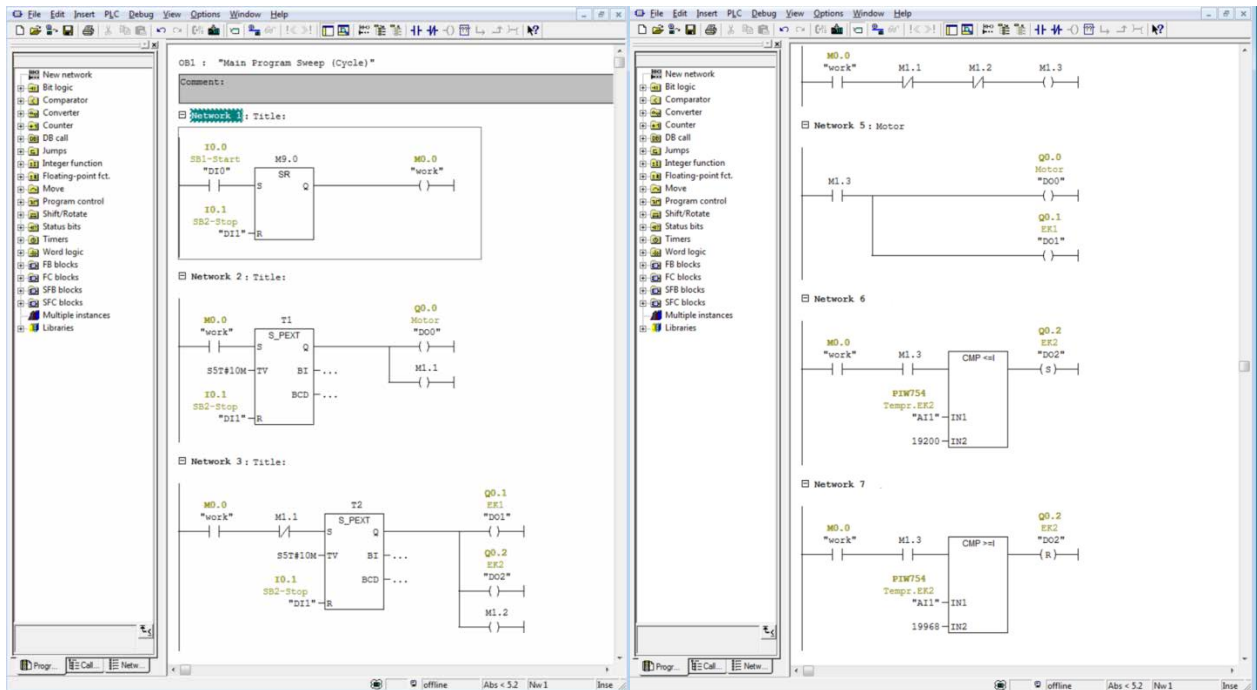


Рис. 3.4. Фрагменти програми керування роликовою сушаркою для шпону у середовищі CoDeSys v.2.3

Для перевірки працездатності САК використовувалась симуляція логічного контролера ОВЕН ПЛК160 із завантаженою програмою (рис. 3.5).

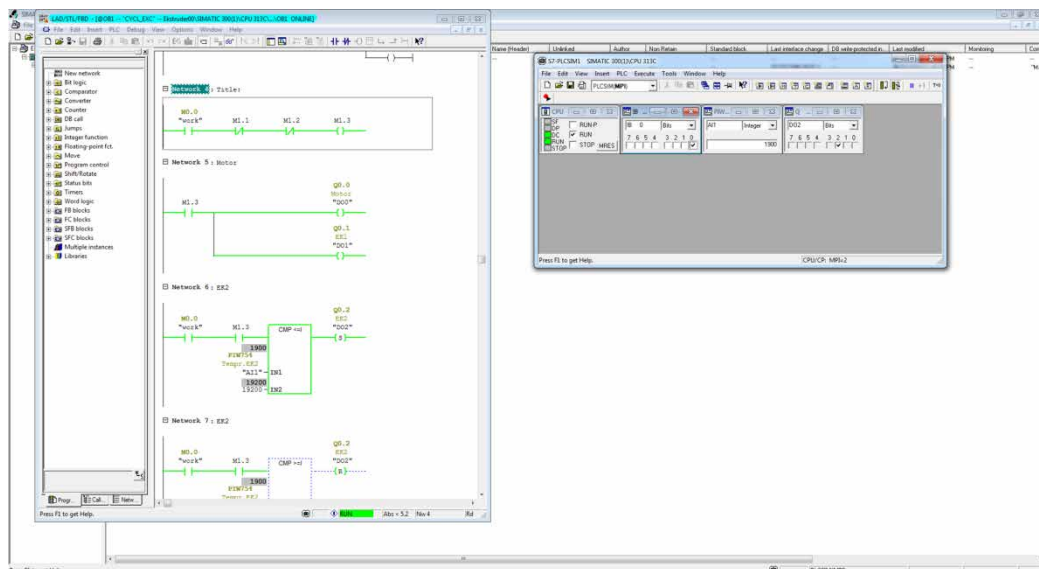


Рис. 3.5. Вікно CoDeSys v.2.3: симуляція роботи ПЛК160 із завантаженою програмою

Симуляція виконання розробленої програми керування технологічним обладнанням роликової сушарки для шпону підтвердила свою працездатність та може бути використана при програмуванні на виробництві.

### 3.2.2. Вибір частотного перетворювача

Як було зазначено, для керування електродвигуном приводу роликового транспортеру для переміщення шпону секціями сушарки використовується частотний перетворювач.

Типорозмір частотного перетворювача обирається в залежності від потужності електродвигуна або групи електродвигунів, яким керує частотний перетворювач. Технічні характеристики електродвигуна приводу роликового транспортеру наведені у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1.

Технічні характеристики електродвигуна приводу роликового транспортера

Назва показника	Значення показника
Марка електродвигуна	<b>AIP80B2U2</b>
Потужність, кВт	2,2
Напруга живлення, В	3ф,220/380,50Гц
Номінальний струм, А	4,85
Частота обертання поля статора, об/хв.	3000
Частота обертання валу, об./хв.	2855
ККД, %	81,0
Номінальний крутний момент, Нм	7,346
Відношення моментів $M_{\text{пуск}}/M_{\text{н}}$	2,2
Відношення моментів $M_{\text{мах}}/M_{\text{н}}$	2,3
Відношення струмів $I_{\text{пуск}}/I_{\text{н}}$	7,0
Момент інерції, кг·м <sup>2</sup>	0,0018
Режим роботи	Тривалий, S1
Термічний клас ізоляції обмоток	F – до 150°C
Ступінь захисту від вологи та пилу	IP54
Вага, кг	24,8

Оскільки, згідно із завданням на бакалаврську кваліфікаційну роботу необхідно використати частотний перетворювач фірми ОВЕН, для керування зазначеним електродвигуном був обраний частотний перетворювач серії **ОВЕН ПЧВ3** (рис. 3.6).

Перетворювачі серії **ОВЕН ПЧВЗ** оснащені вбудованим модулем реалізації ПІ- або ПІД-алгоритму керування.

Частотні перетворювачі (інвертори) служать для плавного, безступінчастого регулювання швидкості трифазних асинхронних електродвигунів. Регулювання відбувається за рахунок створення на виході трифазного струму змінної частоти. Перетворювач дозволяє відстежувати і відображати на цифровому табло основні параметри – задану швидкість, вихідну частоту, струм і напругу двигуна, вихідну потужність і момент, стан дискретних входів, загальний час роботи перетворювача і т.д.



Рис. 3.6. Зовнішній вигляд частотного перетворювача ПЧВЗ ОВЕН

Технології, реалізовані у частотних перетворювачах типу ПЧВЗ ОВЕН, роблять дану серію однією з самих досконалих розробок в даному класі. Серія ПЧВЗ охоплює діапазон потужності від 0,75 до 90 кВт.

Перетворювачі даної серії відрізняються невеликими габаритами при різноманітні функцій і широко використовуються у промисловості та сільському господарстві.

Можливості перетворювача серії ПЧВЗ:

- діапазон вихідних частот: 0,2-400 Гц;
- 15 програмованих установок швидкості;

- векторне керування із самоналагодженням на двигун або  $U/f$  - керування (поєднання векторного керування та функції компенсації ковзання дозволяє забезпечувати не менше 150% від початкового моменту двигуна, починаючи з частоти 1 Гц);
- функція оптимізації часу розгону/гальмування;
- вбудований ПІ- (ПІД-) регулятор (із прямою та зворотною характеристикою) може бути використаний, наприклад, для регулювання температури, витрати або тиску;
- передбачено два способи зупинки двигуна: контрольованим гальмуванням або вільним вибігом;
- автоматичний перезапуск після провалу живлення із можливістю пуску на двигун, що обертається;
- вбудований електронний захист від перевантаження за струмом, захист від низької напруги;
- вбудований інтерфейс RS-485 зв'язку з ПК (швидкість обміну даними складає до 19500 бод).

Потужність перетворювача частоти визначається за таблицею 3.2.

Таблиця 3.2.

Технічні характеристики моделей перетворювачів частоти  
серії ПЧВ3 фірми ОВЕН (ступінь захисту IP54)

Номер за каталогом	Потужність, кВт	Струм в усталеному режимі, А	Перевантаження за струмом, 60 сек., А	Габарити, ВхШхГ	Маса, кг
ПЧВ3-К75-В-54	0,75	2,2	2,4	143x107x150	2
ПЧВ3-1К5-В-54	1,5	3,7	4	143x107x150	2
ПЧВ3-2К2-В-54	2,2	5,3	5,6	143x107x150	2
ПЧВ3-3К0-В-54	3	7,2	7,9	184x142x150	3,350
ПЧВ3-5К5-В-54	5,5	12	13,2	184x142x150	3,350
ПЧВ3-7К5-В-54	7,5	15,5	17,6	232x180x170	6,450
ПЧВ3-11К-В-54	11	24	24,8	232x180x170	6,450
ПЧВ3-15К-В-54	15	32	33,6	232x180x170	11,650
ПЧВ3-18К-В-54	18	37,5	40,7	330x245x190	11,650
ПЧВ3-22К-В-54	22	44	47,9	330x245x190	26,400

Для керування електродвигуном АИР80В2У2, потужність якого складає 2,2 кВт, згідно з табл. 3.2 необхідно використати перетворювач ПЧВ3-2К2-В-54.

### 3.2.3. Обґрунтування вибору датчика температури

Вибір датчика температури перегрітої пари на виході котлоагрегату для системи керування проводимо за методикою [15].

Так, за технічними характеристиками роlikової сушарки для шпону робоча температура паро-повітряної суміші у різних секціях відрізняється, але у першій секції є найвищою (до 250°C), у другій секції нижче – 200°C (п. 1.2, розділ 1).

Для того, щоб датчик у процесі вимірювання температури на заданому рівні не вносив недопустиму динамічну похибку вимірювання, його постійна часу  $T_{CE}$  повинна бути на порядок меншою від постійної часу об'єкта  $T_{OY}$ .

Постійна часу сушарки для каналу керування температурним режимом сушіння шпону  $T_{OY} = 100\text{с}$ . З огляду на сказане, постійна часу датчика повинна бути не більше 10 с.



Рис. 3.7. Термоперетворювач опору з уніфікованим вихідним сигналом  
Siemens Simatic S7-300

Враховуючи вимоги за діапазоном вимірювання та інерційністю, а також особливості підключення датчиків температури до програмованих логічних контролерів ОВЕН ПЛК160, для вимірювання температури паро-повітряної суміші у секціях сушарки для шпону обраний термоперетворювач опору загальнопромислового виконання Siemens Sitrans TS500-3G (рис. 3.7), технічні характеристики якого наведені в таблиці 3.3.

Датчик Siemens Sitrans TS500-3G широко використовується у хімічній, нафтохімічній промисловості, в енергетиці, у системах водопідготовки та водовідведення.

Термоперетворювачі з уніфікованим вихідним сигналом Siemens Sitrans TS500-3G призначені для неперервного перетворювання температури різних середовищ у пропорційний струмовий сигнал 4-20 мА дистанційної передачі. Датчик складається із вбудованого в головку вимірювального перетворювача із вихідним сигналом 4-20 мА та термозонду.

Таблиця 3.3.

Технічні характеристики термоперетворювача Siemens Sitrans TS500-3G [20]

Характеристика	Значення
Діапазон вимірюваних температур, °С	-30...+400
Показник теплової інерції, с	7
Клас допуску за ДСТУ 6651	А,В,С
Номінальна статична характеристика (НСХ)	Pt100
Клас точності	0,25%, (Pt100)
Кількість чутливих елементів, шт.	1
Схема внутрішніх з'єднань провідників	двохпровідна, трьохпровідна, чотирьохпровідна
Матеріал захисної арматури	сталь 12х1810Т
Ступінь захисту	IP54, IP67

Вимірюваний параметр – температура – лінійно перетворюється термочутливим елементом у пропорційну зміну омичного опору, який, в свою чергу, перетворюється вимірювальним перетворювачем у струмовий вихідний сигнал.

За динамічними властивостями датчик є інерційною ланкою, передатна функція якого має вигляд  $W_{CE}(s) = \frac{k_{CE}}{T_{CE} \cdot s + 1}$ .

Коефіцієнт передачі  $k_{CE}$  (чутливість), визначається за формулою

$$k_{CE} = \frac{\Delta I}{\Delta T} = \frac{20 - 4}{400 - (-30)} = 0,037 \text{ mA}/^{\circ}\text{C} \quad (3.4)$$

де  $\Delta T$  – різниця значень вимірюваних датчиком температур,  $^{\circ}\text{C}$  (таблиця 3.3);

$\Delta I$  – різниця струмів, що відповідає значенням температур в робочому діапазоні, mA;

Враховуючи, що показник теплової інерції сприймаючого елемента складає 7 с (таблиця 3.3), передатна функція датчика Siemens Sitrans TS500-3G

$$W_{CE}(s) = \frac{k_{CE}}{T_{CE} \cdot s + 1} = \frac{0,037}{7 \cdot s + 1} \quad (3.5)$$

### 3.2.4. Вибір датчика вологості повітря

Для моніторингу вологості повітря в секціях роликової сушарки для шпону обраний датчик вологості повітря Овен ПВТ100 (рис. 3.8).



Рис. 3.8. Датчик вологості повітря Овен ПВТ100

Основні технічні характеристики датчика вологості повітря Овен ПВТ100 наведені в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4.

Основні технічні характеристики датчика вологості повітря Овен ПВТ100

Діапазони вимірювання відносної вологості RH	Абсолютна похибка вимірювання вологості	Ступінь пиловологозахисту	Інтерфейси та протоколи, що підтримуються
0-100%RH	RH 2%	IP65	Аналоговий вихід 4...20 мА

### 3.2.5. Вибір регулюючого органу та виконавчого механізму САК роликвою сушаркою для шпону для каналу керування температурою теплоносія

Регулюючим органом і виконавчим механізмом САК температурою пароповітряної суміші для сушіння шпону в роликвій сушарці є відповідно регулюючий клапан зміни подачі пари і сервопривод, який обертає цей клапан.

Регулюючий орган – один із самих відповідальних елементів САК (від його працездатності багато в чому залежать надійність системи в цілому і надійність регулювання), безпосередньо діючих на об'єкт управління.

Вихідними даними для вибору регулюючого органу (РО) є:

$\gamma = 1 \text{ г/см}^3$  – об'ємна маса пари;

$\nu = 0,2$  – в'язкість пари;

$Q_{\max} = 100 \text{ м}^3/\text{год.}$ ,  $Q_{\min} = 20 \text{ м}^3/\text{год.}$  – максимальна та мінімальна об'ємна витрати водяної пари;

$P_1 = 15 \text{ кг/см}^2$  – абсолютний тиск в системі постачання пари до РО;

$\Delta P_c = 10 \text{ кг/см}^2$  – перепад тиску в системі;

$\Delta P_{\text{Л max}} = 4 \text{ кг/см}^2$  – максимальний перепад тиску в лінії.

Під час вибору регулюючих органів є певна послідовність розрахунків:

1. Обчислюють максимальну пропускну здатність регулюючого органу та його умовний діаметр.
2. Визначають робочий відрізок витратної характеристики.
3. Знаходять теоретичну витратну характеристику (для клапанів).
4. Визначають для рідини робочу ділянку кривої зміни перепаду тиску (для газу та пари знаходять максимальний та мінімальний перепади тиску).

Обчислюємо максимальну пропускну здатність РО:

$$K_{\gamma \max} = Q_{\max} \cdot \sqrt{\frac{\gamma}{\Delta P_{\min}}} = Q_{\max} \cdot \sqrt{\frac{\gamma}{\Delta P_c - \Delta P_{\text{л max}}}} = 100 \cdot \sqrt{\frac{1}{10-4}} = 41 \text{ м}^3/\text{год.} \quad (3.6)$$

Регулювальний орган вибирають за умови, що

$$K_{\gamma} > 1,2 \cdot K_{\gamma \max}. \quad (3.7)$$

Тоді  $K_{\gamma} \geq 1,2 \cdot K_{\gamma \max} = 1,2 \cdot 41 = 49,2 \text{ м}^3/\text{год.}$

Таблиця 3.5.

Формули для розрахунку пропускну здатності [15]

Вид гідравлічного опору	Перепад тиску	Витрата		
		рідини Q	газу G	пари G
ВП	$\Delta P < P_1/2$	$K_{\gamma} = Q \cdot \sqrt{\frac{\gamma}{\Delta P}}$	$K_{\gamma} = \frac{G}{514} \cdot \sqrt{\frac{T_1}{\Delta P \cdot P_2 \cdot \gamma_n}}$	$K_{\gamma} = \frac{G}{31,6} \cdot \sqrt{\frac{V_2}{\Delta P}}$
	$\Delta P \geq P_1/2$		$K_{\gamma} = \frac{G}{257 \cdot P_1} \cdot \sqrt{\frac{T_1}{\gamma_n}}$	$K_{\gamma} = \frac{G}{22,4} \cdot \sqrt{\frac{V}{\Delta P}}$
Лінія	$\Delta P_{\text{л}} < P_2/2$	$K_{\gamma \text{л}} = Q \cdot \sqrt{\frac{\gamma}{\Delta P_{\text{л}}}}$	$K_{\gamma \text{л}} = \frac{G}{514} \cdot \sqrt{\frac{T_2}{\Delta P_{\text{л}} \cdot P_3 \cdot \gamma_n}}$	$K_{\gamma \text{л}} = \frac{G}{31,6} \cdot \sqrt{\frac{V_3}{\Delta P_{\text{л}}}}$
	$\Delta P_{\text{л}} \geq P_2/2$		$K_{\gamma} = \frac{G}{257 \cdot P_2} \cdot \sqrt{\frac{T_2}{\gamma_n}}$	$K_{\gamma \text{л}} = \frac{G}{2,4} \cdot \sqrt{\frac{V_1}{P_2}}$

За довідниковими даними [15] вибираємо регулювальний клапан з умовним діаметром  $D_y = 50\text{мм}$  і пропускну здатністю  $K_{\gamma \text{РО}} = 50 \text{ м}^3/\text{год.}$

В якості регулюючого елемента в клапані, зазвичай, застосовується або шток спеціальної конструкції, який може рухатися у вертикальному напрямку,

або куля чи заслінка яка може повертатися навколо осі. При цьому регулюючий елемент не здійснює повне перекриття клапана, а перерозподіляє потоки рідин, тим самим виробляючи їх змішування.

Поправки на в'язкість не вводимо, оскільки індекс в'язкості:

$$z = 420 \cdot \frac{Q_{\max}}{\nu \cdot \sqrt{K_{\gamma \max}}} = 420 \cdot \frac{100}{0,2 \cdot \sqrt{41}} = 32813 > 1000. \quad (3.8)$$

Знаходимо робочу ділянку витратної характеристики вибраного регулюючого органу. Для цього скористуємось виразом з таблиці 3.5:

$$K_{\gamma Л} = Q_{\max} \sqrt{\frac{\gamma}{\Delta P_{Л \max}}} = 100 \cdot \sqrt{\frac{1}{4}} = 50 \text{ м}^3/\text{год}. \quad (3.9)$$

Визначаємо відношення перепаду тиску на РО при максимальній витраті до перепаду тиску в лінії:

$$n = \frac{K_{\gamma РО}}{K_{\gamma Л}} = \frac{50}{50} = 1. \quad (3.10)$$

Уточнюємо перепад тиску на виконавчому пристрої:

$$\Delta P_{ВП} = \frac{\Delta P_C}{1+n^2} = \frac{10}{1+1^2} = 5 \text{ кгс/см}^2. \quad (3.11)$$

Визначаємо витрату рідини через виконавчий пристрій в разі перепаду тиску на ньому:

$$Q_{ВП} = K_{\gamma РО} \sqrt{\frac{\Delta P_{ВП}}{\gamma}} = 50 \cdot \sqrt{\frac{5}{1}} = 112 \text{ м}^3/\text{год}. \quad (3.12)$$

Знаходимо відносну максимальну та мінімальну витрату рідини:

$$\mu_{\max} = \frac{Q_{\max}}{Q_{ВП}} = \frac{100}{112} = 0,89; \quad \mu_{\min} = \frac{Q_{\min}}{Q_{ВП}} = \frac{20}{158} = 0,18. \quad (3.13)$$

За графіком (додаток Д1) вибираємо витратну характеристику ВМ, згідно якої відносний хід затвора регулювального органу (плунжера):

$$l_{\min}=0,12; \quad l_{\max}=0,8.$$

При цьому відношення перепаду тиску на РО до перепаду тиску в системі змінюється від  $\beta_{\max}=0,95$  до  $\beta_{\min}=0,68$  (додаток Д2), що відповідає наступним перепадам:

$$\beta_{\max} = \frac{\Delta P_{\max}}{\Delta P_c}; \beta_{\min} = \frac{\Delta P_{\min}}{\Delta P_c}. \quad (3.14)$$

Потім розраховуємо значення:

$$\Delta P_{\max} = \beta_{\max} \cdot \Delta P_c = 0,95 \cdot 10 = 9,5 \text{ кг/см}^2; \quad (3.15)$$

$$\Delta P_{\min} = \beta_{\min} \cdot \Delta P_c = 0,68 \cdot 10 = 6,8 \text{ кг/см}^2. \quad (3.16)$$

Таким чином, після розрахунку необхідного регулюючого органу, отримуємо дані для вибору виконавчого механізму.

**Вибір виконавчого механізму САК температурою пари на виході котлоагрегату.** Виконавчим механізмом (ВМ) називається пристрій автоматики, який діє безпосередньо або через погоджуючі елементи на регулюючий орган об'єкта управління. ВМ, як частина системи автоматичного керування, призначений для відпрацювання управляючого сигналу, який формується управляючими елементами автоматики таким чином, щоб відхилення регулюючої величини від заданого значення становило якнайменше значення. Виконавчі механізми, які з'єднані безпосередньо з регулюючими органами, переміщують їх відповідно до сигналу, що надходить від пристрою, який формує алгоритм керування.

До ВМ пред'являють ряд вимог:

- здатність розвивати необхідне переставне зусилля або момент, достатні для перестановки регулюючого органу об'єкта,
- забезпечити перестановку регулюючого органу на потрібну величину,
- забезпечити потрібну швидкість і прискорення переміщення регулюючого органу,
- мати високі техніко-економічні показники (надійність, ціна та ін.).

ВМ обираються залежно від величини обертального моменту необхідного для переміщення регулюючого органу [15]:

$$M_z = k \cdot (M_p + M_m), \quad (3.17)$$

де  $M_p$  – реактивний момент:

$$M_p = 0,07 \cdot \Delta P_{\max} \cdot D_y^3 = 0,07 \cdot 9,5 \cdot 10^4 \cdot (50 \cdot 10^{-3})^3 \approx 0,83 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_m = 0.785 \cdot \Delta P_{\max} \cdot D_y^2 \cdot r_m \cdot \lambda = 0.785 \cdot 9.5 \cdot 10^4 \cdot (50 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 1 \cdot 10^{-2} \cdot 0.15 \approx 0.28 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_3 = 2 \cdot (0.83 + 0.28) = 2.22 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Момент обертання валу обраного виконавчого механізму повинен бути більшим за момент, необхідний для обертання заслінки:  $M_H > M_3$ .

В якості електроприводу, яким комплектується регулюючий клапан, виступає сервопривод, побудований на електродвигуні невеликої потужності і системі передач.

Для приводу клапана обраний сервопривод BELIMO LM24A-SZ-TPC (рис. 3.9), що за технічними характеристиками задовольняє зазначені умови.

Передатна функція виконавчого механізму (сервоприводу) є інтегруючою ланкою

$$W_{BM}(s) = \frac{k_{BM}}{s}, \quad (3.18)$$

де  $k_{BM}$  - коефіцієнт передачі виконавчого механізму, град./с.;

$$k_{BM} = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}, \quad (3.19)$$

$\Delta t$  - проміжок часу, с;

$\Delta\varphi_{OB}$  - кут повороту вихідного валу за проміжок часу  $\Delta t$ , град.

Таблиця 3.6.

Технічні характеристики сервоприводу BELIMO LM24A-SZ-TPC

Тип	Максимальний момент навантаження, Н·м	Час повного ходу, сек./90°	Температура навколишнього середовища, °С	Ступінь захисту	Маса, кг
LM24A	10	58	0...+60	IP65	3,5



Рис. 3.9. Виконавчий механізм - сервопривод BELIMO LM24A-SZ-TPC

Напруга живлення 220 В.

$$k_{BM} = \frac{90}{58} = 1,56 \frac{\text{град}}{\text{сек}}.$$

$$W_{BM}(s) = \frac{1,56}{s}.$$

Оскільки конструктивно у сервоприводі реалізований зворотний зв'язок за положенням (реостатний датчик положення), то остаточною передатною функцією виконавчого механізму визначається як

$$W_{BM}(s) = \frac{W_{CEEP}(s)}{1 + W_{CEEP}(s)} = \frac{\frac{1,56}{s}}{1 + \frac{1,56}{s}} = \frac{1,56}{s + 1,56} = \frac{1}{\frac{1}{1,56} \cdot s + 1} = \frac{1}{0,64 \cdot s + 1}.$$

## РОЗДІЛ 4

### РОЗРОБКА ЦИФРОВОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

Цифрові системи керування – це системи, в яких безперервні сигнали перетворюються в цифрові коди і керування здійснюється з використанням алгоритмів обробки цифрової інформації.

Цифрові системи керування передбачають перетворення безперервних сигналів у цифрові коди та зворотне перетворення цифрових кодів у безперервні сигнали. Такі перетворення здійснюють аналогово-цифрові (АЦП) і цифро-аналогові (ЦАП) перетворювачі. У таких перетворювачах здійснюється квантування як за часом так і за рівнем.

#### 4.1. Визначення періоду квантування сигналів ЦСК

Дискретизація (квантування) – заміна неперервного сигналу тими чи іншими дискретними значеннями.

Види дискретизації:

- за часом
- за рівнем
- одночасна дискретизація за рівнем і за часом

Задача вибору раціонального періоду квантування  $T_k$  є однією з основних проблем реалізації ЦСК. При зменшенні часу керування точність керування цифровою системою збільшується, але при цьому зростає завантаження мікроЕОМ масивами інформації. При збільшенні часу квантування втрачається важлива інформація про сигнал, що може призвести до неможливості відтворення вихідного сигналу за дискретними вибірками. Тому виникає проблема пошуку раціонального часу квантування  $T_k$ , який задовольнив би такі суперечливі вимоги.

Згідно з теоремою Котельникова, для можливості безпомилкового відтворення сигналу, як показує аналіз амплітудних спектрів імпульсної системи, найменша частота квантування повинна дорівнювати  $2\omega_c$ , де  $\omega_c$  – найвища частота вихідного сигналу, яка має місце в амплітудно-частотній характеристиці неперервної частини системи.

Теорема стверджує: якщо сигнал не містить в собі частот вище, ніж  $\omega_c$  рад/с, він повністю описується своїми значеннями, вимірними у дискретні моменти часу за інтервалом  $T_k = \pi / \omega_c$ .

При подальших розрахунках нехтуємо передатною функцією виконавчого механізму внаслідок його малої інерційності.

Визначення передатної функції неперервної частини розімкнутої системи

$$W_{PO3}^{HЧ}(s) = \frac{k_{CE}}{T_{CE} \cdot s + 1} \cdot \frac{k_{OY}}{T_{OY} \cdot s + 1} \cdot e^{-\tau \cdot s} = \frac{k_{CE} \cdot k_{OY} \cdot e^{-\tau \cdot s}}{T_{CE} \cdot T_{OY} \cdot s^2 + (T_{CE} + T_{OY}) \cdot s + 1} \quad (4.1)$$

$$W_{PO3}^{HЧ}(s) = \frac{0,024 \cdot e^{-20 \cdot s}}{700 \cdot s^2 + 107 \cdot s + 1}.$$

Передатна функція замкненої неперервної частини

$$W_{3AM}^{HЧ}(s) = \frac{W_{PO3}^{HЧ}(s)}{1 + W_{PO3}^{HЧ}(s)}. \quad (4.2)$$

$$W_{3AM}^{HЧ}(s) = \frac{0,024 \cdot e^{-20 \cdot s}}{(700 \cdot s^2 + 107 \cdot s + 1) + 0,024 \cdot e^{-20 \cdot s}}.$$

У результаті розв'язання рівняння

$$\frac{k_{CE} \cdot k_{OY}}{\sqrt{(-T_{CE} \cdot T_{OY} \cdot \omega^2 + 1 + k_{CE} k_{OY})^2 + (T_{CE} \cdot T_{OY})^2 \cdot \omega^2}} = 0,01 \cdot A(\omega = 0). \quad (4.3)$$

отримаємо в кінцевому рахунку час квантування.

Скориставшись математичним пакетом Mathcad, отримаємо значення частоти (рис. 4.1) та періоду квантування.

$j := \sqrt{-1}$   
 $\omega := 0, 0.001.. 0.8$   
 $W1(\omega) := \frac{0.67}{100-j \cdot \omega + 1} \cdot e^{-20 \cdot j \cdot \omega}$   
 $W2(\omega) := \frac{0.037}{j \cdot \omega \cdot 7 + 1}$   
 $Wr(\omega) := W1(\omega) \cdot W2(\omega)$   
 $Wz(\omega) := \frac{Wr(\omega)}{1 + Wr(\omega)}$   
 $A(\omega) := |Wz(\omega)|$   
 $\omega := 0.1$  При  $\omega=0$   $A(0)=0,024$   
 Given 1 % від  $A(\omega=0)$  дорівнює 0,00024  
 $A(\omega) = 0.00024$   $\omega_s := 0.371$  Час квантування складає:  $T_s := \frac{\pi}{\omega_s} = 8.468$   
 $\text{Find}(\omega) = 0.371$

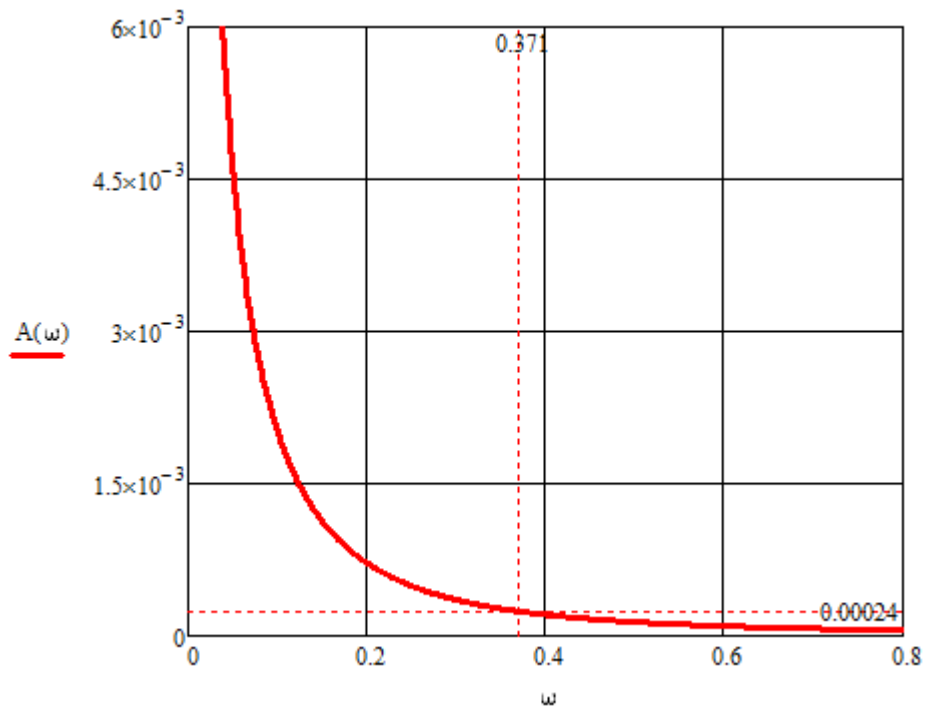


Рис. 4.1. Визначення періоду квантування ЦСК у пакеті Mathcad

$$\omega_c = 0,371.$$

Період квантування

$$T_K = \frac{\pi}{\omega_c} = 8,468 \text{ c.} \quad (4.4)$$

## 4.2. Визначення показників якості роботи цифрової системи керування

Аналогічно з неперервними системами, в цифрових системах можна реалізувати ПІ-алгоритм керування (рис 4.2).

Синтез ПІ-регулятора полягає у знаходженні параметрів  $K_p, K_i$ .

Параметр інтегральної складової регулятора, який залежить від добротності за швидкістю  $K_v$  неперервної частини, визначається за виразом

$$K_i = \frac{K_v}{\lim_{z \rightarrow 1} W_{н.ч.}(z)} \quad (4.5)$$

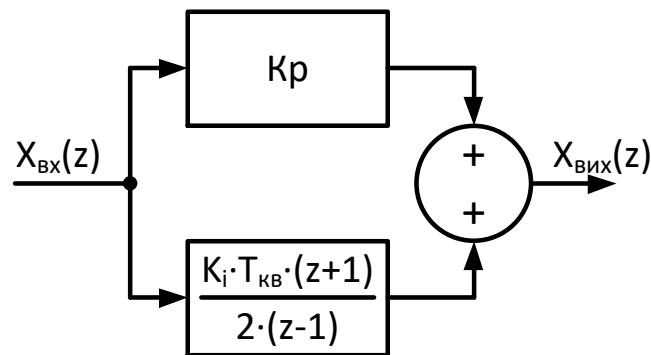


Рис. 4.2. Структурно-алгоритмічна схема цифрового ПІ-регулятора:  
 $K_p, K_i$  – параметри відповідно пропорційної та інтегральної складових ПІ-регулятора,  $T_{кв}$  – період квантування

Добротність за швидкістю визначається залежно від постійної часу об'єкта (табл. 4.1).

Таблиця 4.1.

Визначення добротності за швидкістю

$T_o, c$	$K_v$
~1	3...10
~10	0,3...1
~100	0,01...0,04
~1000	0,004...0,012

Згідно з таблицею  $K_v = 0,025$ , оскільки  $T_{oy} = 100$  с.

Для визначення передатної функції  $W_{н.ч.}(z)$  застосовуємо пакет імітаційного моделювання MATLAB (Лістинг 4.1), використовуючи операції завдання передатної функції неперервної системи  $w = \text{tf}([K_0], [T_B \cdot T_0 \ T_B + T_0 \ 1])$  та Z-перетворення неперервної передатної функції на дискретну  $Wz = \text{c2d}(w, T_K)$ , де  $w$  – змінна, що отримала вираз неперервної передаточної функції,  $T_K$  – період квантування.

```
>> Wou=tf([0.67],[100 1],'OutputDelay',20)

Transfer function:
      0.67
exp(-20*s) * -----
      100 s + 1

>> Wce=tf([0.037],[7 1])

Transfer function:
  0.037
-----
  7 s + 1

>> W=Wou*Wce

Transfer function:
      0.02479
exp(-20*s) * -----
      700 s^2 + 107 s + 1

>> Wz=c2d(W,8.468)

Transfer function:
0.0002933 z^2 + 0.03046 z + 0.008044
-----
      z^3 - 0.8239 z^2 + 0.04038 z

Sampling time: 8.468
```

Лістинг 4.1. Z-перетворення неперервної частини розімкненої САК у MATLAB

При синтезі ПІ-регулятора ми нехтуємо малою постійною часу СЕ, оскільки ПІ-регулятор компенсує лише один полюс Z-перетворення неперервної частини:

```

>> Wou=tf([0.67],[100 1])

Transfer function:
  0.67
-----
100 s + 1

>> Wouz=c2d(Wou,8.468)

Transfer function:
  0.0544
-----
z - 0.9188

Sampling time: 8.468

```

Лістинг 4.2. Поліус Z-перетворення неперервної частини,  
що компенсується регулятором у MATLAB

Тоді

$$K_i := \frac{0.025}{\left( \frac{0.0002933 \cdot 1^2 + 0.03046 \cdot 1 + 0.008044}{1^3 - 0.8239 \cdot 1^2 + 0.04038 \cdot 1} \right)} = 0.179$$

Після знаходження  $K_i$  параметр  $K_p$  визначаємо таким чином, щоб компенсувати поліус Z-перетворення неперервної частини системи.

Передатна функція ПІ-регулятора має вигляд:

$$\begin{aligned}
 W_{\text{ПІ}}(z) &= \frac{K_i \times T z + 1}{2} \frac{1}{z - 1} = \frac{2 \times K_p \times z - 2 \times K_p + K_i \times T \times z + K_i \times T}{2z - 2} = \\
 &= \frac{(2 \times K_p + K_i \times T)z + (K_i \times T - 2 \times K_p)}{2(z - 1)} = \\
 &= \frac{(2 \times K_p + K_i \times T) \left[ z + \frac{K_i \times T - 2 \times K_p}{2 \times K_p + K_i \times T} \right]}{2(z - 1)}
 \end{aligned} \tag{4.6}$$

Для компенсації полюсу необхідно знайти такий  $K_p$ , який би задовольняв рівняння:

```

Kp := 1

Given

(Ki*Ts - 2*Kp) / (Ki*Ts + 2*Kp) = -0.7716

Find(Kp) = 16.357

```

Лістинг 4.3. Знаходження параметра  $K_p$  цифрового ПІ-регулятора  
у пакеті Mathcad

Для дослідження показників якості роботи цифрової системи використана модель у пакеті імітаційного моделювання MATLAB/Simulink (рис. 4.3) та отримаємо перехідний процес цифрової системи з ПІ-регулятором (рис. 4.4).

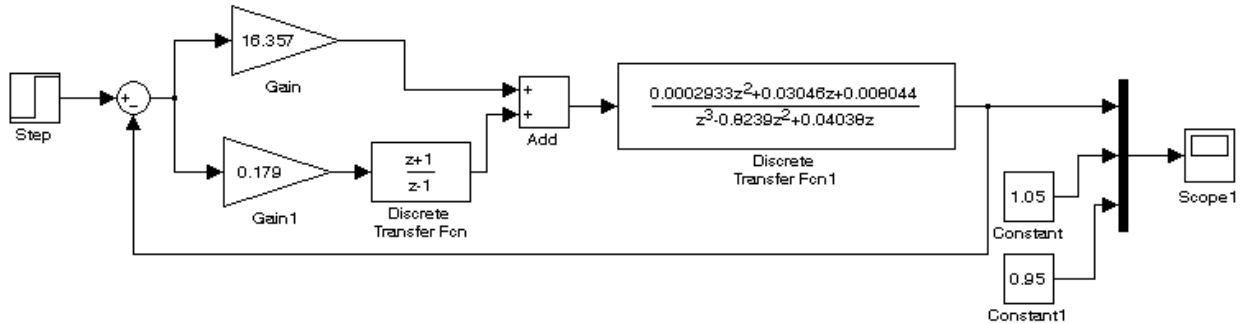


Рис. 4.3. Структурно-алгоритмічна схема цифрової системи керування температурою пари у пакеті імітаційного моделювання MATLAB/Simulink

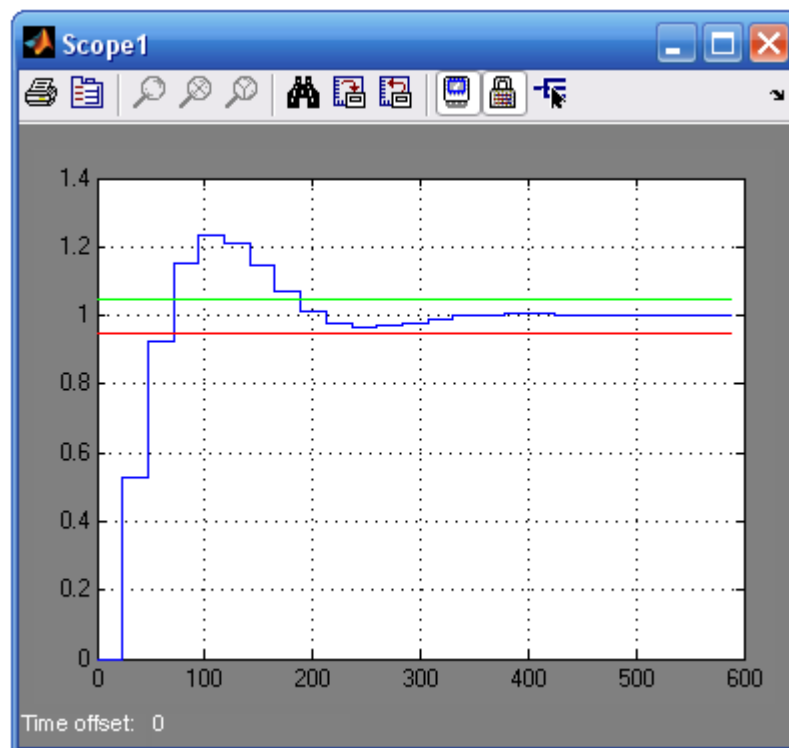


Рис. 4.4. Перехідний процес цифрової САК роликвою сушаркою для шпону для каналу керування температурою теплоносія

За характером перехідного процесу видно, що система є стійкою із наступними показниками якості роботи:

- час регулювання  $t_p = 180$  с;
- перерегулювання  $\sigma = 23\%$ ;
- коливальність  $n=1$ ;
- відсутня статична похибка.

Отримані показники задовольняють технологічні вимоги до процесу керування температурою паро-повітряної суміші в роликовій сушарці для сушіння шпону.

## РОЗДІЛ 5

### СХЕМИ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

#### 5.1. Розробка схем електричних принципової, з'єднань та підключень системи керування роликовою сушаркою для шпону

Схеми електричні принципова, з'єднань та підключень виконані згідно з ДСТУ ГОСТ 2.702:2013 "Єдина система конструкторської документації. Правила виконання електричних схем (ГОСТ 2.702-2011, IDT)".

Схема електрична принципова системи керування роликовою сушаркою VTS-4-4200 зображена на листі 2 графічної частини бакалаврської кваліфікаційної роботи.

У системі керування передбачені "Автоматичний" і "Ручний" режими роботи, що забезпечується встановленням перемикача **SA1** у відповідне положення.

В автоматичному режимі інформація про хід технологічного процесу надходить до програмованого логічного контролера **A1** від датчиків температури **RK1, RK2, RK3, RK4**; датчиків вологості повітря **RH1, RH2**; датчиків витрати пари **DK1** та витрати повітря **DK2**, встановлених у відповідних частинах установки, і формує сигнали керування відповідними виконавчими механізмами.

Програмований логічний контролер порівнює значення температури та вологості повітря у секціях сушарки для шпону, і якщо ці значення не відповідають заданому значенню, формує сигнал керування на регулюючі клапани **M3** зміни витрати пари та **M4** зміни витрати повітря, формуючи тим самим необхідні показники паро-повітряної суміші, яка подається в сушарку для сушіння шпону у відповідну секцію.

Електродвигун приводу відцентрового вентилятора **M2** працює з незмінною продуктивністю, забезпечуючи подачу паро-повітряної суміші в секції сушарки.

Експозиція сушіння регулюється за допомогою частотного перетворювача **A2**, який змінює швидкість обертання валу електродвигуна **M1** приводу роликового транспортеру, тобто змінює час, який витрачається на перебування листа шпону в сушарці. Керування самим частотним перетворювачем здійснює програмований логічний контролер за допомогою протоколу передачі даних RS485/

В ручному режимі керування виконавчими механізмами та електродвигунами здійснюється за допомогою кнопок керування **SB3-SB12**.

Схема електрична з'єднань для шафи керування роликовою сушаркою VTS-4-4200, яка показує з'єднання складових частин установки та визначає проводи і кабелі, якими здійснюються ці з'єднання, а також місця їх приєднання і вводу, зображена на листі №3 графічної частини. Схема з'єднань (монтажна) виконана адресним способом. Схема електрична підключень, яка показує зовнішні підключення до клемних збірок шафи керування – на листі №4 графічної частини бакалаврської кваліфікаційної роботи.

## 5.2. Вибір апаратури захисту та керування

Згідно зі схемою електричною принциповою САК роликовою сушаркою VTS-4-4200, для керування та захисту використовується наступне обладнання:

- для подачі живлення на систему керування та захисту її від коротких замикань використовується автоматичний вимикач **QF1**;

- для подачі живлення на електродвигуни **M1**, яким керує і захищає від порушень режиму роботи частотний перетворювач згідно своїх технічних характеристик використовується електромагнітний пускач **KM1**; для вимикання з мережі цього електродвигуна використовується автоматичний вимикач **QF2**;

- для подачі живлення на електродвигун **M2** використовується електромагнітний пускач **KM2**;

- для керування та реверсу (зміни напрямку обертання) сервоприводами **М3** та **М4** використовуються електромагнітні пускачі **КМ3**, **КМ4** (для **М3**) та **КМ5**, **КМ6** (для **М4**) відповідно;

- для захисту електродвигуна **М2** від перевантажень використовується теплове реле **КК1**;

- для захисту кола керування використовується автоматичний вимикач **QF3**;

- для зміни режимів роботи використовується перемикач режимів роботи **SA1**;

- для ручного керування використовуються кнопки керування **SB1-SB12**; для світлової сигналізації використовуються лампи сигнальні **HL1-HL3**.

### **5.2.1. Вибір автоматичних вимикачів та електромагнітних пускачів для керування електродвигунами М1 та М2**

Для вибору автоматичних вимикачів **QF1** та **QF2**, електромагнітних пускачів **КМ1** та **КМ2** для захисту та керування електродвигунами **М1** та **М2** скористаємося технічними характеристиками цих електродвигунів, які наведені у таблиці 5.1 [19].

Згідно зі схемою електричною принциповою, для захисту електродвигунів **М1** та **М2** використовуються автоматичні вимикачі з комбінованим (електромагнітним і тепловим) розчіплювачами.

Відповідно до умов, вибрані такі автоматичні вимикачі:

**QF1** – **GV2ME15** (Schneider Electric) – автоматичний вимикач без затримки спрацювання, розроблений для захисту електродвигунів, обладнаний комбінованим (електромагнітним і тепловим) розчіплювачем, який забезпечує захист двигуна від коротких замикань, перевантаження, асиметрії і обриву фаз).

QF2 – GV2ME10 (Schneider Electric) – автоматичний вимикач, аналогічний попередньому, розроблений для захисту електродвигунів потужністю 2,2 кВт.

Таблиця 5.1.

Технічні характеристики асинхронних трифазних електродвигунів M1 та M2

Характеристика електродвигуна	Позначення на схемі	
	M2	M1
	Марка електродвигуна	
	AIP80A2Y2	AIP80B2Y2
Потужність, кВт	1,5	2,2
Напруга живлення, В	3ф,220/380,50Гц	3ф,220/380,50Гц
Номинальний струм, А	3,46	4,85
Частота обертання поля статора, об/хв.	3000	3000
Частота обертання валу, об./хв.	2850	2855
ККД, %	78,6	81,0
Номинальний крутний момент, Нм	4,974	7,346
Відношення моментів $M_{пуск}/M_n$	2,2	2,2
Відношення моментів $M_{max}/M_n$	2,3	2,3
Відношення струмів $I_{пуск}/I_n$	7,0	7,0
Момент інерції, $кг \cdot м^2$	0,0011	0,0018
Режим роботи	Тривалий, S1	Тривалий, S1
Термічний клас ізоляції обмоток	F – до 150°C	F – до 150°C
Ступінь захисту від вологи та пилу	IP54	IP54
Вага, кг	17,8	24,8

Таблиця 5.2.

Відповідність технічних характеристик умовам вибору QF1 та QF2

№ умови	QF1 GV2ME16	QF2 GV2ME10
1.	$U_{H\text{ АВТ}} \geq U_{\text{МЕР}}$ 400 В > 380 В	$U_{H\text{ АВТ}} \geq U_{\text{МЕР}}$ 400 В > 380 В
2.	$I_{H\text{ АВТ}} \geq I_{\text{ТР}}$ 16 А > 3,46+4,85 А (табл. 5.1)	$I_{H\text{ АВТ}} \geq I_{\text{ТР}}$ 6,3 А > 4,85 А (табл. 5.1)
3.	Кількість полюсів - 3	Кількість полюсів - 3
4.	$I_{\text{Т РОЗЧ}} \geq \frac{I_{\text{ТР}}}{K_N \cdot K_T}$ $16 \text{ А} \geq \frac{3,46 + 4,85}{0,83 \cdot 1,04} = 9,6 \text{ А}$	$I_{\text{Т РОЗЧ}} \geq \frac{I_{\text{ТР}}}{K_N \cdot K_T}$ $6,3 \text{ А} \geq \frac{4,85}{0,83 \cdot 1,04} = 5,62 \text{ А}$
5.	Клас С ((5...10) $I_n$ розч) $I_{\text{пуск}}/I_n = 7$ (таблиця 5.1)	Клас С ((5...10) $I_n$ розч) $I_{\text{пуск}}/I_n = 7$ (таблиця 5.1)
6.	$I_{\text{ЕМ РОЗЧ}} \geq (1,5 \div 1,6) \cdot I_{\text{ПУСК}}$ 100 А > 1,6·(3,46+4,85)·7 = 93,07 А	$I_{\text{ЕМ РОЗЧ}} \geq (1,5 \div 1,6) \cdot I_{\text{ПУСК}}$ 60 А > 1,6·4,85·7 = 54,32 А
7.	Ступінь захисту IP20 Робоча температура навкол. серед. -20°C...+60°C	Ступінь захисту IP20 Робоча температура навкол. серед. -20°C...+60°C

Автоматичні вимикачі відповідають стандартам МЕК 60947-2-98 та ІЕС 60947-4-1-2000 [24].

Відповідність умовам 1-7 (додаток Е1) відображена у таблиці 5.2.



Рис. 5.1. Автоматичні вимикачі QF1 та QF2

Відповідно до умов (додаток Е2), для пуску і зупинки трифазних асинхронних електродвигунів М1 та М2 вибрані електромагнітні пускачі ПМ 2-25-10 М7 230В (LC1-D2510) (АСКО УкрЕМ) (рис. 5.2). Електромагнітні пускачі відповідають стандарту ДСТУ EN 60947-4-1 [21]. Відповідність умовам 1-8 (додаток Е2) відображена у таблиці 5.3.

Таблиця 5.3.

Відповідність технічних характеристик умовам вибору КМ1 та КМ2

№ умови	КМ1, КМ2 ПМ 2-25-10 М7 230В (LC1-D2510)
1.	$U_{н\text{ ЕМП}} \geq U_{н\text{ ЕР}},$ $400\text{ В (50Гц)} > 380\text{ В (50 Гц)}$
2.	Величина електромагнітного пускача 2 ( $I_{н\text{ ЕМП}} = 25\text{ А}$ ) $I_{н\text{ ЕМП}} \geq I_p, 25\text{ А} > 3,46\text{ А}, 25\text{ А} > 4,85\text{ А}$ Категорія застосування АС-3, АС4
3.	Напруга електромагнітної котушки (напруга кола керування) $U_{к\text{ кер}} = 220\text{ В}$
4.	Без теплового реле
5.	За наявністю додаткових контактів: 1NO
6.	Без додаткових контактів для реверсування
7.	Ступінь захисту корпусу IP20
8.	Зносостійкість електрична: 2 000 000 циклів Зносостійкість механічна: 20 000 000 циклів Номинальний умовний струм к.з.: 5 кА



Рис. 5.2. Пускач електромагнітний ПМ 2-25-10 М7 230В (LC1-D2510)

Для керування серводвигунами М3 та М4 вибрані такі ж самі електромагнітні пускачі.

### 5.2.2. Вибір електротехнічного обладнання кола керування

Для захисту кола керування використовується однополюсний автоматичний вимикач QF3.

Відповідно до умов (додаток Е3), вибране таке обладнання для кола керування.

Для перемикання режимів роботи у колі керування вибрані перемикачі пакетні ПКП Е9 32А/3.833 ("1-0-2") (АСКО УкрЕМ) на 3 полюси (рис. 5.3, а).

Для ручного керування електродвигунами М1 та М2 у колі керування вибрані кнопки керування РВ0-АА21 (Plastim) без фіксації, для монтажу на панель, щиток (рис. 5.3, б). Технічні характеристики пакетних перемикачів та кнопок керування наведені у таблиці 5.4 [22,23].

Для технічної реалізації функцій, покладених на кнопки SB3, SB4 за принциповою схемою, вибрані кнопки керування РВ0-АА21 (Plastim) без фіксації, для монтажу на панель, щиток (рис. 5.3, в). Технічні характеристики кнопок керування РВ0-АА21 аналогічні характеристикам кнопкових постів РВ0-АЛ73415 [23].

Таблиця 5.4.

## Технічні характеристики пакетних перемикачів та кнопкових постів

Прилад	ПКП Е9 32А/3.833 ("1-0-2")	PB0-AA21
Номинальна робоча напруга, $U_n$ , В	400	660 В
Номинальний тепловий струм, А	34	10
Категорія застосування	АС3, АС4	АС3
Номинальний струм: АС3 (АС4)	22 (11)	10
Зносостійкість, циклів	механічна	600 000
	електрична	200 000
Температура експлуатації, °С	-20...+45	-20...+45



Рис. 5.3. Електротехнічне обладнання кола керування:

а – перемикач пакетний ПКП Е9 32А/3.833 ("1-0-2"); б – кнопка керування РВ0-АА21

Для світлової сигналізації у схемі керування вибрана така світлосигнальна апаратура:

HL1, HL2, HL3: Арматура світлосигнальна AD22-22DS (АСКО УкрЕМ); (червона), світлодіодна матриця, живлення 220В (50 Гц); ступінь захисту IP54, струм споживання 7 мА

Для вибору автоматичного вимикача захисту кола керування за вказаними вище умовами обраний однополюсний автоматичний вимикач іС60N 1P 3A В Schneider Electric (A9F73203). Автоматичний вимикач відповідає стандартам МЕК 60947-2-98 та IEC 60947-4-1-2000 [24].

### 5.3. Вибір проводів та кабелів

Площу поперечного перерізу жил проводів і кабелів вибирають, спираючись на умови гранично допустимого нагріву під дією струму навантаження, а також необхідної механічної міцності. Крім того, необхідно враховувати спосіб прокладання (відкрито, в трубі, в коробах, на тросах, і т.д.), умови оточуючого середовища (вологість повітря, агресивність середовища тощо). При розрахунку кількості провідників, що прокладаються в одній трубі або коробі (або при використанні багатожильного кабелю), нульові та заземлюючі проводи не враховують.

При виборі проводів для підключення датчиків необхідно передбачити наявність сигнальних перешкод і можливого впливу електромагнітних полів (тобто необхідність екранування сигнального проводу).

Умови вибору проводів і кабелів наведені в додатку Е4 на основі [17]. Згідно із цими умовами, а також значеннями струмів споживання електродвигунів (таблиця 5.1), схеми керування в цілому та її окремих складових (таблиця 5.5), для з'єднання усієї схеми вибрані такі проводи і кабелі.

Для підключення електродвигунів М1 та М2 вибраний кабель чотирьохжильний АВВГ 4x2,5 мм<sup>2</sup> (L1,L2,L3+PE) [25] – із монолітними алюмінієвими круглими жилами перерізом 2,5 мм<sup>2</sup>, ізолюваними полівінілхлоридним (далі ПВХ) пластиком, із зовнішньою ізоляцією з ПВХ пластикату. Тривалий допустимий струм такого кабелю дорівнює  $I_{\text{тр.доп}} = 19 \text{ А}$  [25].

Для підключення кола керування (автоматичного вимикача захисту QF3) вибраний трижильний кабель ПВС 3x0,75 мм<sup>2</sup> (L+N+PE) [25] – із багатодротовими мідними жилами, ізолюваними ПВХ пластиком, із зовнішньою ізоляцією з ПВХ пластикату. Тривало допустимий струм такого кабелю  $I_{\text{тр.доп}} = 15 \text{ А}$  [25].

Для підключення електротехнічного обладнання до ПЛК в колі керування вибраний провід ПВЗ 1x0,5 [25] – із мідною багатодротовою жилою підвищеної

гнучкості, ізолюваною ПВХ пластикатом. Тривало допустимий струм такого проводу  $I_{\text{тр.доп}} = 11 \text{ А}$  [25].

Для підключення датчиків температури до ПЛК вибраний трижильний екранований кабель LiYCY 3x0,25 (SptcialCavi Baldassari) [25] – із мідними багатодротовими жилами перерізом  $0,25 \text{ мм}^2$  п'ятого класу гнучкості. Використовується в якості контрольного, сигнального кабелю для передачі аналогових і цифрових сигналів у вимірювальних, керуючих електронних пристроях і комп'ютерних системах з робочою напругою до 250 В частотою до 3 кГц змінного струму або робочою напругою до 350 В постійного струму. Кабелі стійкі до вібраційних, ударних і лінійним навантаженням, також до акустичних шумів та електромагнітних завад.

Для підключення установки до мережі живлення визначимо сумарний струм споживання за принциповою схемою. Оскільки електродвигуни і коло керування працюють одночасно, значення коефіцієнту одночасності приймається  $K_0 = 1$ . Тоді

$$I_{\text{розр}} = K_0 \cdot \sum I_{\text{н}} = 1(3,46 + 4,85 + 0,547) = 8,857 \text{ А.}$$

Отже, для підключення установки до мережі живлення використаємо кабель чотирьохжильний АВВГ 4x2,5 мм<sup>2</sup> [25] – із монолітними алюмінієвими круглими жилами перерізом  $2,5 \text{ мм}^2$ , ізолюваними ПВХ пластикатом, із зовнішньою ізоляцією з ПВХ пластикату. Тривалий допустимий струм такого кабелю дорівнює  $I_{\text{тр.доп}} = 19 \text{ А}$  [25].

## 5.4. Розробка засобів візуалізації технологічного процесу

Візуалізація - метод подання інформації у вигляді оптичного зображення (наприклад, у вигляді малюнків і фотографій, графіків, діаграм, структурних схем, таблиць, карт і т. д.).

При візуалізації керування використовують такі підходи:

- SCADA SYSTEM (TRACE MODE, Genesis);
- контролер з панеллю оператора;
- контролер з дисплеєм.

Вибір технічних засобів для забезпечення візуалізації залежить від кількості інформації та величини ОК. У разі масштабних об'єктів використовують SCADA-системи.

SCADA – програмний комплекс для візуалізації та диспетчеризації технологічних процесів. SCADA-система дає наочне уявлення процесу і надає, як правило, графічний інтерфейс оператору для контролю і керування.

Інтерфейс HMI (*англ. Human Machine Interface* – людино-машинний інтерфейс) для нашої системи автоматизації розроблений з використанням програмного забезпечення Zenon Scada від компанії COPA-DATA. Zenon є програмним забезпеченням для візуалізації, управління, збору та аналізу даних. Система Zenon SCADA є основним продуктом австрійської компанії COPA-DATA GmbH. Вперше розроблена в середині 80-х років, це було перше комплексне рішення графічної візуалізації для систем Windows. Завдяки постійній модернізації, вдосконаленню та впровадженню новітніх технологій, Zenon утримує лідерські позиції на ринку систем HMI / SCADA. Zenon повністю вирішує всі можливі завдання, що стоять перед системами HMI / SCADA. Дозволяє здійснювати зручне та візуальне управління, точну взаємодію всіх інженерних комплексів, автоматичну адаптацію, інтелектуалізацію режимів роботи підсистем. Він базується на стандартних зовнішніх технологіях і пропонує величезний набір простих у використанні графічних функцій для побудови систем візуалізації.

Першим кроком у створенні системи візуалізації у названому середовищі є вибір типу та конфігурування контролера. Для цього використовується вкладка "Конфігурація". Для підключення аналогових датчиків визначаються вбудовані аналогові входи (рис. 5.4).

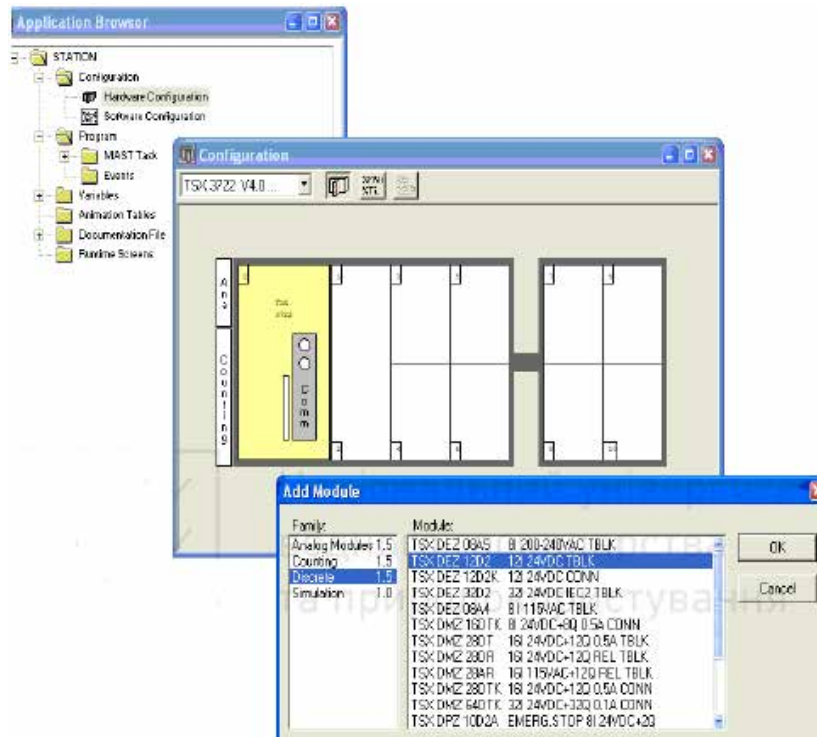


Рис. 5.4. Вікно конфігурування контролера

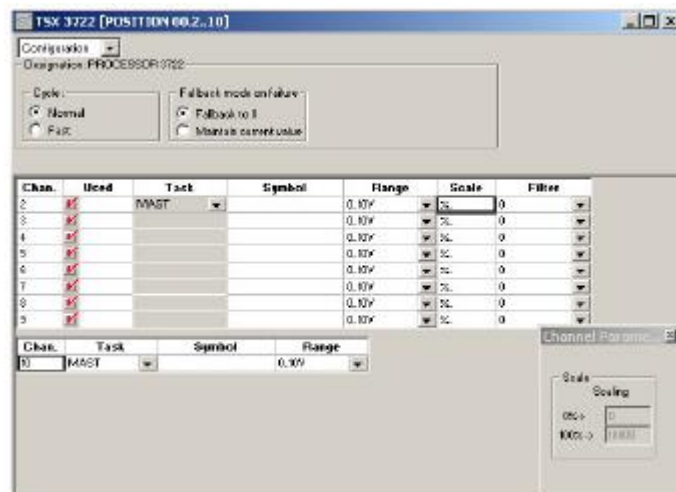


Рис. 5.5. Вікно конфігурування вбудованих аналогових входів

Розробимо програми керування роботою сушарки. Все програмне забезпечення розділимо на декілька секцій і присвоїмо їх основній задачі

"MAST". Для написання програм використаємо мову структурованого тексту ST (Structured Text). Дерево проекту зображене на рис. 5.6.

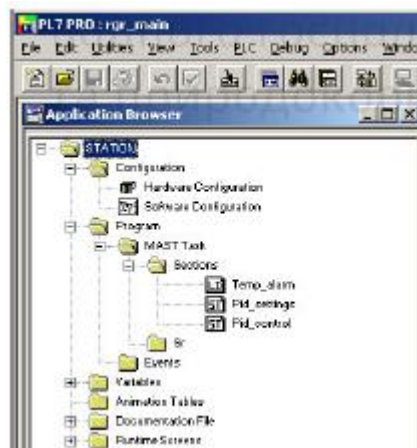


Рис. 5.6. Дерево проекту

```
PID('PID_K_out', '%', %IWO.7, %MW43, %I3.0, %MV0:43);
PID('PID_K_in', 'grad C', %IWO.4, %MW87, %I3.0, %MV44:43);
%QW0.10:=%MW87/1000;

PID('PID_Ksush_out1', '%', %IWO.6, %MW131, %I3.0, %MW88:43);
PID('PID_Ksush_in1', 'grad C', %IWO.8, %MV175, %I3.0, %MW132:43);
%QW5.0:=%MV175/1000;

PID('PID_Ksush_out2', '%', %IWO.9, %MW219, %I3.0, %MW176:43);
PID('PID_Ksush_in2', 'grad C', %IU7.0, %MV263, %I3.0, %MW220:43);
%QW5.1:=%MV263/1000;

PID('PID_Ksush_out3', '%', %IU7.1, %MV307, %I3.0, %MW264:43);
PID('PID_Ksush_in3', 'grad C', %IU7.2, %MV351, %I3.0, %MW308:43);
%QW5.2:=%MV351/1000;
```

Рис. 5.7. Фрагмент програми реалізації ПІ-регулятора

Графічне представлення ходу технологічного процесу розробимо засобами програмного забезпечення Zenon SCADA. При цьому зобразимо мнемосхему процесу, відобразимо дані основних технологічних параметрів (рис. 5.8).

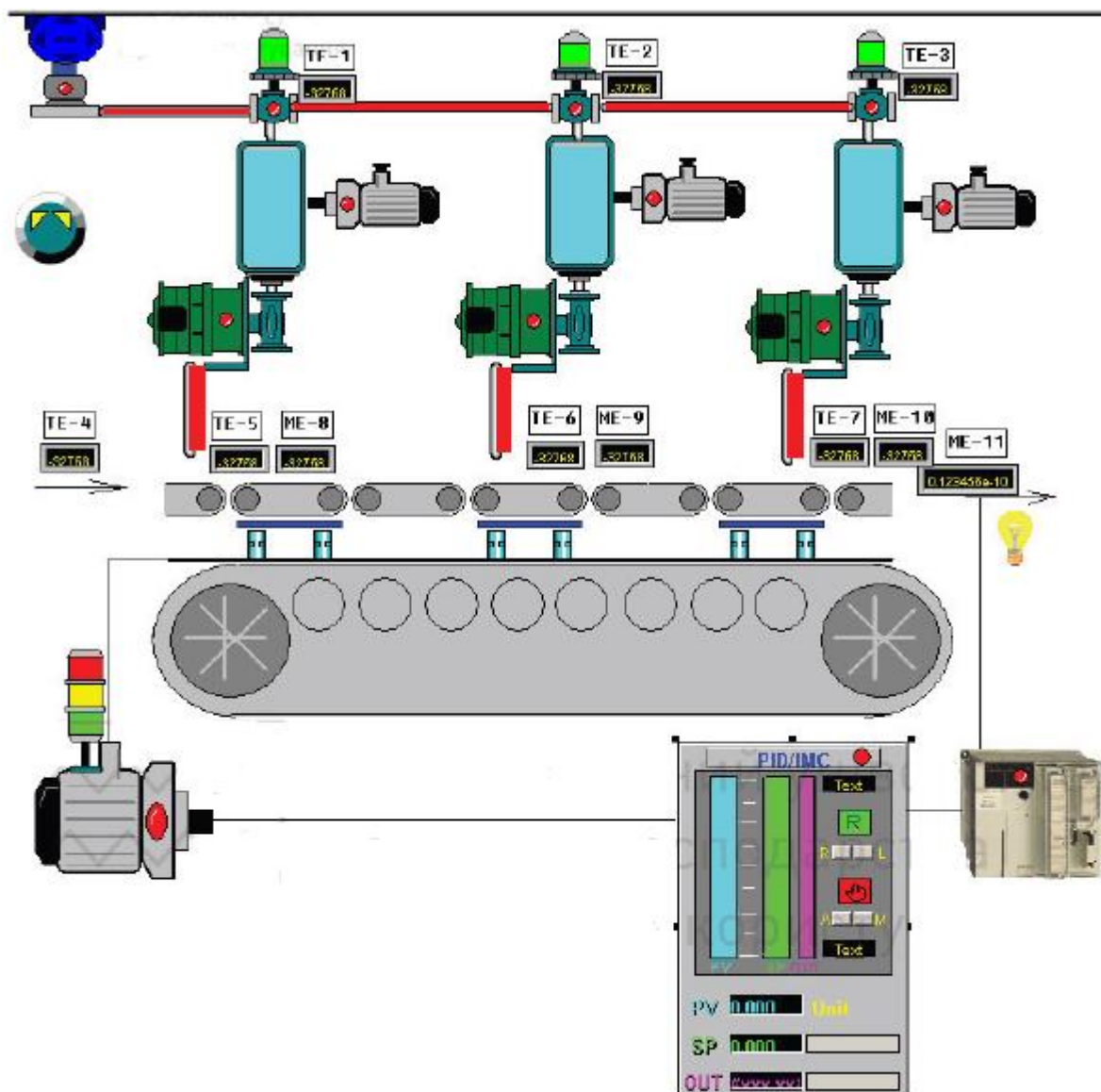


Рис. 5.8. Графічне представлення ходу технологічного процесу

## РОЗДІЛ 6

### ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ

Технічний рівень засобів електрифікації автоматизації виробничих процесів визначає економічну ефективність використання їх в сільськогосподарському виробництві. Автоматизація технологічних процесів має забезпечувати збільшення виробництва продукції, підвищення продуктивності в праці (зменшення втрат праці), зменшення енергомісткості і собівартості продукції, терміну окупності капітальних витрат.

Економічна ефективність автоматизації вимірюється ступенем зменшення сукупної живої і минулої праці, що витрачається на виробництво одиниці продукції. Узагальнюючим показником економічної ефективності з капітальних вкладень є строк окупності капітальних вкладень в систему автоматичного управління. Отже для розрахунку показників економічної ефективності визначимо строк окупності капітальних вкладень в систему автоматизації керування роликовою сушаркою для шпону за формулою:

$$T = \frac{K}{\Delta E}; \quad (6.1)$$

де  $K$  — капітальні вкладення на здійснення автоматизації, грн.;

$\Delta E$  — річна економія експлуатаційних витрат, грн./рік.

Капітальні вкладення на удосконалення САК роликовою сушаркою для сушіння шпону визначаємо за формулою:

$$K = K_z + K_{тт} + K_m + K_{пр} + K_i; \quad (6.2)$$

де  $K_z$  — загальна вартість технічних засобів автоматизації, грн.;

$K_{тт}$  — торгівельно-транспортні втрати, грн.;

$K_m$  — витрати на монтаж технічних засобів, грн.;

$K_{пр}$  — витрати на прокладення проводок, грн.;

$K_i$  — інші витрати, грн.

Річна економія експлуатаційних витрат визначається як:

$$\Delta = E_{p.2024} - E_p; \quad (6.3)$$

В даному випадку загальна вартість технічних засобів автоматизації становить:

$$K_3 = K_{дт} + K_{дв} + K_{рег} + K_{кл} + K_{пр} + K_{прив}; \quad (6.4)$$

де:  $K_{дт}$  — вартість датчика температури 250 грн.;

$K_{рег}$  — вартість регулятора, 6879 грн.;

$K_{кл}$  — вартість клапана, 2200 грн.;

$K_{прив}$  — вартість приводу, 1120 грн.;

$K_{пр}$  — вартість проводки, 8грн/м.

Тоді згідно формули загальна вартість технічних засобів автоматизації будуть складати:

$$K_3 = 250 + 6879 + 2200 + 1120 + 8 = 10459, \text{ грн.}; \quad (6.5)$$

Торгівельно-експортні втрати будуть становити 11% від загальної вартості технічних засобів автоматизації:

$$K_{тт} = 0.11 * K_3 = 10459 * 0.11 = 1150, \text{ грн.}; \quad (6.6)$$

Витрати на монтаж технічних засобів автоматизації становлять 17% від загальної вартості технічних засобів автоматизації:

$$K_{м} = 0.17 * K_3 = 10459 * 0.17 = 1778, \text{ грн.}; \quad (6.7)$$

Витрати на прокладення проводок:

$$K_{пр} = K_{пр} * l = 15 * 60 = 900, \text{ грн.}; \quad (6.8)$$

$K_{пр}$  — вартість проводки та монтажу, 15грн\*м;

$l$  — довжина проводки.

Інші витрати будуть становити 2% від суми технічних засобів автоматизації:

$$K_i = 10459 * 0.02 = 209, \text{ грн.}; \quad (6.9)$$

Отже, згідно (6.2) капітальні вкладення на удосконалення САК роликовою сушаркою для сушіння шпону будуть:

$$K = 10459 + 1150 + 1778 + 900 + 209 = 14496, \text{ грн}; \quad (6.10)$$

Далі знайдемо річні експлуатаційні витрати, визначаємо за формулою:

$$E_p = Z_{\text{утр}} + Z_{\text{ел}} + Z_{\text{п}} + Z_{\text{ін}}; \quad (6.11)$$

де:  $Z_{\text{п}}$  — річний фонд заробітної плати за обслуговування;

$Z_{\text{утр}}$  — затрати на утримання основних засобів виробництва;

$Z_{\text{ел}}$  — вартість електроенергії;

$Z_{\text{ін}}$  — інші витрати;

$$Z_{\text{п}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{дод}} + Z_{\text{н}}; \quad (6.12)$$

де:  $Z_{\text{осн}}$  — основна оплата;

$Z_{\text{дод}}$  — додаткова оплата;

$Z_{\text{н}}$  — нарахування.

Визначимо основну оплату:

$$Z_{\text{осн}} = T_{\text{ст}} + D * t * n; \quad (6.13)$$

де:  $T_{\text{ст}}$  — тарифна ставка, 22 грн./год.

$D$  — кількість днів роботи, 140 днів;

$T$  — кількість годин роботи за день, 6 год.;

$N$  — кількість робітників.

$$Z_{\text{осн}} = 22 * 140 * 6 * 1 = 18480, \text{ грн}; \quad (6.14)$$

Визначимо додаткову оплату:

$$Z_{\text{дод}} = \frac{Z_{\text{осн}} * 10\%}{100\%} = \frac{18480 * 10\%}{100\%} = 1848, \text{ грн};$$

Визначаємо нарахування:

$$Z_{\text{н}} = \frac{(Z_{\text{осн}} + Z_{\text{дод}}) * (32\% + 2\% + 1.5\% + 1\%)}{100\%}; \quad (6.15)$$

$$Z_{\text{н}} = \frac{(18480 + 1848) * 36.5\%}{100\%} = 7419, \text{ грн};$$

Отже річний фонд заробітної плати на обслуговування згідно (6.12) буде:

$$З_{\pi} = 18480 + 1848 + 7419 = 27747, \text{ грн.};$$

Затрати на утримання основних засобів:

$$З_{\text{утр}} = A_{\text{м}} + P_{\pi}; \quad (6.16)$$

де:  $A_{\text{м}}$  – амортизаційні відрахування;

$P_{\pi}$  – відрахування на поточний ремонт.

Відрахування на амортизацію будуть становити 20% від капітальних вкладень:

$$A_{\text{м}} = 0.2 * K = 0.2 * 14496 = 2899, \text{ грн.} \quad (6.17)$$

Витрати на поточний ремонт будуть становити 25% від капітальних вкладень:

$$P_{\pi} = 0.25 * K = 0.25 * 14496 = 3624, \text{ грн.} \quad (6.18)$$

$$З_{\text{утр}} = 2899 + 3624 = 6523, \text{ грн}$$

Вартість електроенергії:

$$З_{\text{ел}} = P * \Gamma * D * \text{Ц}; \quad (6.19)$$

де:  $P$  – потужність автоматизації, 25 кВт;

$\Gamma$  – кількість годин роботи, 24 год.;

$\text{Ц}$  – ціна електроенергії 2,83 грн./кВт;

$D$  – кількість днів роботи на рік 140 днів.

Отже:

$$З_{\text{ел}} = 25 * 24 * 2,83 * 140 = 157080, \text{ грн.}$$

Інші витрати будуть складати 2% від суми річного фонду заробітної плати, затрати на утримання основних засобів виробництва та вартості електроенергії, тобто:

$$З_{\text{ін}} = (З_{\pi} + З_{\text{утр}} + З_{\text{ел}}) * 0.02 = 3827, \text{ грн.} \quad (7.20)$$

Отже річні експлуатаційні витрати будуть становити:

$$E_{\text{р}} = 18480 + 27747 + 157080 + 3827 = 203307, \text{ грн.} \quad (7.21)$$

По даних виробника річні експлуатаційні витрати на утримання САК сушаркою для деревного шпону у 2023 р. склали – 383453, грн.

Знайдемо річну економію експлуатаційних витрат згідно (6.3) вона буде:

$$\Delta E = E_{p.2013} - E_p = 2383453 - 203307 = 180146, \text{ грн.} \quad (6.22)$$

Таким чином, строк окупності капітальних вкладень в систему автоматичного керування складе:

$$T = \frac{K}{\Delta E} = \frac{157080}{180146} \approx 1 \text{ рік.}$$

## ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз сучасного стану автоматизації технологічних процесів виробництва деревного шпону VTS-4-4200 конвективно-контактного типу неперервної дії із сопловим дуттям.

2. На основі вивчення літературних джерел, проведеного аналізу роlikової сушарки як об'єкта керування було здійснено пошук шляхів покращення управління процесом сушки в роlikовій сушарці VTS-4-4200. Запропоновано здійснювати контроль температури у секціях сушарки, керування кінцевою вологістю шпону здійснювати шляхом зміни швидкості конвеєра, а, отже, часу перебування шпону в сушарці; керування відносною вологістю повітря у секціях сушарки здійснювати шляхом зміни температури сушильного агенту за допомогою зміни витрати пари, що йде на підігрів сушильного агенту (паро-повітряної суміші). Розроблена функціональна схема автоматизації системи керування роlikовою сушаркою для шпону.

3. Дослідження кінетики сушіння зразків шпону показали, що параметри теплоносія, режими сушіння та геометричні розміри шару шпону суттєво впливають на тривалість сушіння. Отримані динамічні характеристики роlikової сушарки для шпону та визначена передатна функція для каналу керування температурою теплоносія.

4. Перевірка якості функціонування САК виявила, що система є стійкою, час регулювання складає 180 с, перерегулювання 23%, відсутня статична похибка.

5. Для реалізації системи керування сушаркою для шпону VTS-4-4200 обґрунтовано вибір технічних засобів автоматики з використанням програмованого логічного контролера ОВЕН ПЛК160, розроблені електричні схеми: принципова, з'єднань, підключень, та необхідне програмне забезпечення.

6. Економічними розрахунками обґрунтована доцільність прийнятих технічних рішень, строк окупності розробленої САК складає 1 рік.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Атаманюк В.М. Дисперсні матеріали. Механізм і кінетика фільтраційного сушіння / В.М. Атаманюк // Хімічна промисловість України : зб. наук. праць. – К., 2007. – № 4. – С.24-29.
2. Бехта П.А. Виробництво і оброблення лущеного та струганого шпону / П.А. Бехта. – К.: Вид-во УкрДЛТУ, 2005. – 296 с.
3. Бехта П.А. Виробництво шпону: підручник / П.А. Бехта. – К.: Вид-во "Основа", 2003. – 256 с.
4. Бехта П.А. Виробництво фанери / П.А. Бехта. – К.: Вид-во "Основа", 2003. – 320 с.
5. Білей П.В. Сушіння та захист деревини: підручник / П.В. Білей, В.М. Павлюст. – Львів: Вид-во "Кольорове небо", 2008. – 312 с.
6. Білей П.В. Теплові процеси деревооброблення: навч. посібн. / П.В. Білей, І.М. Озарків, В.М. Максимів, І.А. Соколовський та ін. – Львів: РВВ НЛТУ України, 2008. – 264 с.
7. Білей П.В. Ефективність використання теплової енергії під час виготовлення шпону і фанери / П.В. Білей, І.В. Петришак, І.А. Соколовський // Науковий вісник НЛТУ України: зб. наук.-техн. праць. – Львів: РВВ НЛТУ України. – 2008. – Вип.18.9. – С.118-121.
8. Білей П.В. Методика дослідження фільтраційного сушіння пакета шпону / П.В. Білей, Б.М. Микичак, Д.П. Кіндзера // Науковий вісник НЛТУ України. – 2012. – Вип. 22.4. С.123-127.
9. Електропривід сільськогосподарських машин, агрегатів та поточкових ліній: Підручник / Є.Л. Жулай, Б.В. Зайцев, Ю.М. Лаврінченко, О.С. Марченко, Д.Г. Войтюк; За ред. Є.Л. Жулая. – К.: Вища освіта, 2001. – 288 с.: іл.
10. Кіндзера Д.П. Пакетне сушіння шпону фільтраційним методом / Д.П. Кіндзера, Б.М. Микичак // 2-й Міжнар. конгрес "Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування". – Львів, 19–20 вересня 2012 р. НУ "ЛП". – Львів: ЗУКЦ 2012. – С. 104.
11. Мартиненко І.І., Лисенко В.П., Тищенко Л.П., Болбот І.М., Олійник П.В. Проектування систем електрифікації та автоматизації АПК: підручник. – К.: "Інтас", 2008. – 330 с.
12. Методичні вказівки до виконання розрахунково-графічної роботи з дисципліни "Супервізорні системи керування та збору даних" для студентів напряму підготовки "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології" денної форми навчання / А.М. Стеценко. – Рівне: НУВГП, 2011. – 28 с.
13. Микичак Б.М. Інтенсифікація процесу сушіння листових деревинних матеріалів / Б.М. Микичак, Я.М. Ханик, В.М. Гербей // Науковий вісник УкрДЛТУ: зб. наук.-техн. праць: Розроблення сучасних технологій деревооброблення. – Львів : Вид-во УкрДЛТУ. – 2001. – Вип. 11.2. – С. 82-84.

14. Основи автоматики: теорія і практика (ч.1) / Лисенко В.П., Решетюк В.М., Цигульов І.Т. – К.: Освіта України, 2012. – 540 с.
15. Основні методи і методики підготовки кваліфікаційної роботи бакалавра / В.П. Лисенко, А.О. Дудник, В.О. Мірошник, А.А. Руденський, Н.А. Заєць. – Київ: "Компринт". 2023. – 303 с. для студентів зі спеціальності 151 – "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології" Навчальний посібник.
16. Ортинська Г.Є. Розроблення режимів склеювання шпону підвищеної вологості: автореф. дис. на здобуття наук. ст. канд. техн. наук / Г.Є. Ортинська. – Львів, 2011. – 20 с.
17. Правила улаштування електроустановок. Видання офіційне. Міненерговугілля України, Київ, 2017 р.  
Електронне видання. Режим доступу:  
<https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/pue.pdf>
18. Обладнання і технології сушіння шпону.  
Електронний ресурс. Режим доступу:  
<https://atmwood.com.ua/2019/02/20/sushka-shpona-oborudovanie-i-technologii/>
19. Електродвигун асинхронний АИР80А2У2  
Електронний ресурс. Режим доступу:  
[https://xn--80aqy.com.ua/katalog\\_elektrodivigatelei\\_air/air-80a2-1-5-kvt-3000-ob-min/](https://xn--80aqy.com.ua/katalog_elektrodivigatelei_air/air-80a2-1-5-kvt-3000-ob-min/)  
Електродвигун асинхронний АИР80В2У2  
Електронний ресурс. Режим доступу:  
[https://xn--80aqy.com.ua/katalog\\_elektrodivigatelei\\_air/air-80v2-2-2-kvt-3000-ob-min/](https://xn--80aqy.com.ua/katalog_elektrodivigatelei_air/air-80v2-2-2-kvt-3000-ob-min/)
20. Сенсори температури Siemens Simatic S7-300. Електронний ресурс.  
Режим доступу <https://gms-instruments.com/product/sitrans-ts500-temperature-sensor/>
21. Пускач електромагнітний ПМ 2-25-10 М7 230В.  
Електронний ресурс. Режим доступу:  
[https://www.acko.ua/e-store/xml\\_catalog/kontaktori\\_malogabaritni\\_serii\\_pm/22570/](https://www.acko.ua/e-store/xml_catalog/kontaktori_malogabaritni_serii_pm/22570/)
22. Перемикач пакетний типу ПКП. Електронний ресурс. Режим доступу:  
[https://www.acko.ua/e-store/xml\\_catalog/paketni\\_peremikachi\\_serii\\_pkr\\_e9/22730/](https://www.acko.ua/e-store/xml_catalog/paketni_peremikachi_serii_pkr_e9/22730/)
23. Кнопка керування РВ0-АА21. Електронний ресурс. Режим доступу:  
<https://principal.ua/p507102148-knopka-upravleniya-dlya.html>
24. Вимикач автоматичний іС60N 2Р 3А В.  
Електронний ресурс. Режим доступу:  
<https://schneider.kiev.ua/avtomatichnij-vimikach-ic60n-2p-3a-b-schneider-electric-a9f73203>
25. Проводи і кабелі. Електронний ресурс. Режим доступу:  
[https://elektrika.ua/catalog/kabel\\_i\\_provod/](https://elektrika.ua/catalog/kabel_i_provod/)

## ДОДАТКИ

## ДОДАТОК А1

Основні породи деревини натурального шпону та їх властивості

Порода деревини	Колір шпону	Властивості шпону	Застосування шпону
Береза	Від світло-жовтого до світло-коричневого	Прекрасно фарбується і тонується; Слабка стійкість до вологи; Річні властивості слабо виражені	Міжкімнатні двері, меблева промисловість
Карельська береза	Бежевий з темно-коричневими точками і візерунками	Рідкісний і дорогий матеріал	Мозаїки, виробний матеріал, інкрустації
Вишня	Червоно-коричневий	Відмінно піддається будь-якій обробці, включаючи полірування	Меблева промисловість, виготовлення ексклюзивної продукції
Горіх	Світло або темно-коричневий	Піддається будь-якій обробці	Меблева промисловість
Дуб білий	Від світло-коричневого до пісочного	Високий рівень міцності; Добре піддається обробці	Меблева промисловість, облицювання паркету і ступенів
Сосна	Світлий з однорідною структурою	Стійкість до грибків; Низька зносостійкість	Застосовується в обробці меблів (економ-клас)
Клен американський	Від світлого до темно-коричневого	Високий рівень зносостійкості	Застосовується в обробці підлоги
Анегри	Від біло-коричневого до пісочно-бурого з вираженим блиском	Відмінно піддається фарбуванню і поліруванню	Застосовується у виробництві меблів і музичних інструментів
Бубінга	Від фіолетово-червоного до коричневого	Висока міцність	Виготовлення елітних меблів
Макоре	Червоний	Висока міцність	Столярні вироби й облицювання дверей
Венге	Темно-коричневий зі світлою основою	Стійкість до тиску і навантажень	Застосовується в обробці будинку і меблів (елітний клас)

## ДОДАТОК А2

### Основні характеристики струганого шпону

Товщина струганого шпону  $h=0,4; 0,5; 0,55; 0,6; 0,8; 1,0$  мм;  
точність вимірювання товщини 0,1 мм.

Ширина мінімальна:

для 1-го сорту – 120 мм;

для 2-го сорту – 90 мм;

для 3-го сорту – 80 мм;

для тангенційно-торцевого шпону – 100 мм;

точність вимірювання ширини 1 см.

Довжина  $L=0,3; 0,4; 1,0$  м і далі – з градацією 0,1 м. Точність вимірювання довжини 0,1 м.

Вологість шпону  $W=8\pm 2$  %.

Кількість аркушів у пакунку (кнолі) – 10-32 шт.

Залежно від текстури струганий шпон ділять на такі види:

- радіальний (Р) – річні шари мають вигляд паралельних прямих ліній на всій поверхні аркуша, а серцевинні промені добре видно у вигляді смуг і розташовані не менше, ніж на  $3/4$  площі аркуша;

- напіврадіальний (НР) – характерні річні шари у вигляді прямих паралельних ліній, що займають не менше  $3/4$  площі аркуша, і серцевинні промені у вигляді похилих або поздовжніх смуг, розташованих не менше, ніж на  $1/2$  площі аркуша;

- тангентальний (Т) – річні шари мають вигляд конуса наростання, кутів або кривих ліній, а серцевинні промені - вигляд поздовжніх або похилих рисок або ліній;

- тангентально-торцьовий (ТТ) – отримується з наростів дерева, текстуру якого визначають річні шари у вигляді замкнених кривих ліній і серцевинні промені у вигляді кривих ліній або рисок.

Шпон підрозділяють на вісім сортів: А, АВ, В, ВВ, С, 1, 2, 3 (у порядку убування якості).

## ДОДАТОК АЗ

### Основні характеристики луценого шпону

Луцений шпон та фанера загального призначення виробляється, транспортується та зберігається відповідно до вимог чинних на території України стандартів:

- ГОСТ 99-96 «Шпон луцений. Технічні умови»,
- ГОСТ 3916.1-96 «Фанера загального призначення із зовнішніми шарами із шпону листових порід. Технічні умови»,
- ГОСТ 3916.2-96 «Фанера загального призначення із шпону хвойних порід. Технічні умови».

Довжина аркушів шпону коливається в межах від 0,8 до 3,75 м (з градацією 100 мм),

Ширина - від 0,15 до 0,75 м (з градацією 50 мм) і від 0,8 до 3,75 м (з градацією 100 мм),

Товщина шпону:

Листяних порід 0,55; 0,75; 0,95; 1,15; від 1,25 до 4,0 мм (з градацією 0,25 мм),

Шпилькових порід від 1,2 до 4,0 мм (з градацією 0,4 мм); від 4,0 до 6,5 мм (з градацією 0,5 мм).

З луценого шпону виготовляють переважно клеєну фанеру, на одну із сторін якої (лицьову) зазвичай йде шпон кращої якості, а на зворотну – гіршої. Фанера буває тришарова (рис. АЗ.1), п'ятишарова і багатошарова. Випускають фанеру п'яти сортів: А/АВ, АВ/В, В/ВВ, ВВ/С, С/С (у порядку зниження якості).

• Бакелізована (водостійка) фанера ФБС, ФБВ, ФБС-А та ін. склеєна бакелітовим клеєм, тому вона не розшаровується у воді.

• Декоративна фанера ФОФ і ФОК оклеєна з однієї або з обох сторін струганими шпонами цінних порід деревини. Вона буває шліфувана і не шліфувана.

• Декоративна фанера ДФ-1, ДФ-2, ДФ-3, ДФ-4 покрита з одного або обох сторін декоративним папером або плівкою, що імітує текстуру цінної деревини.

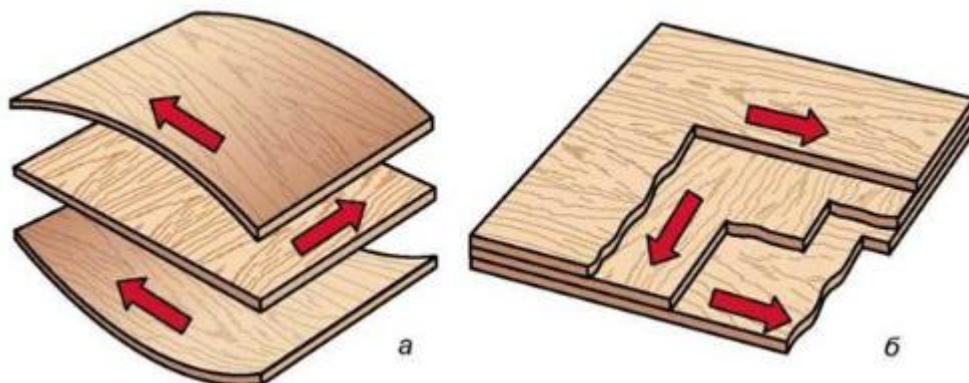


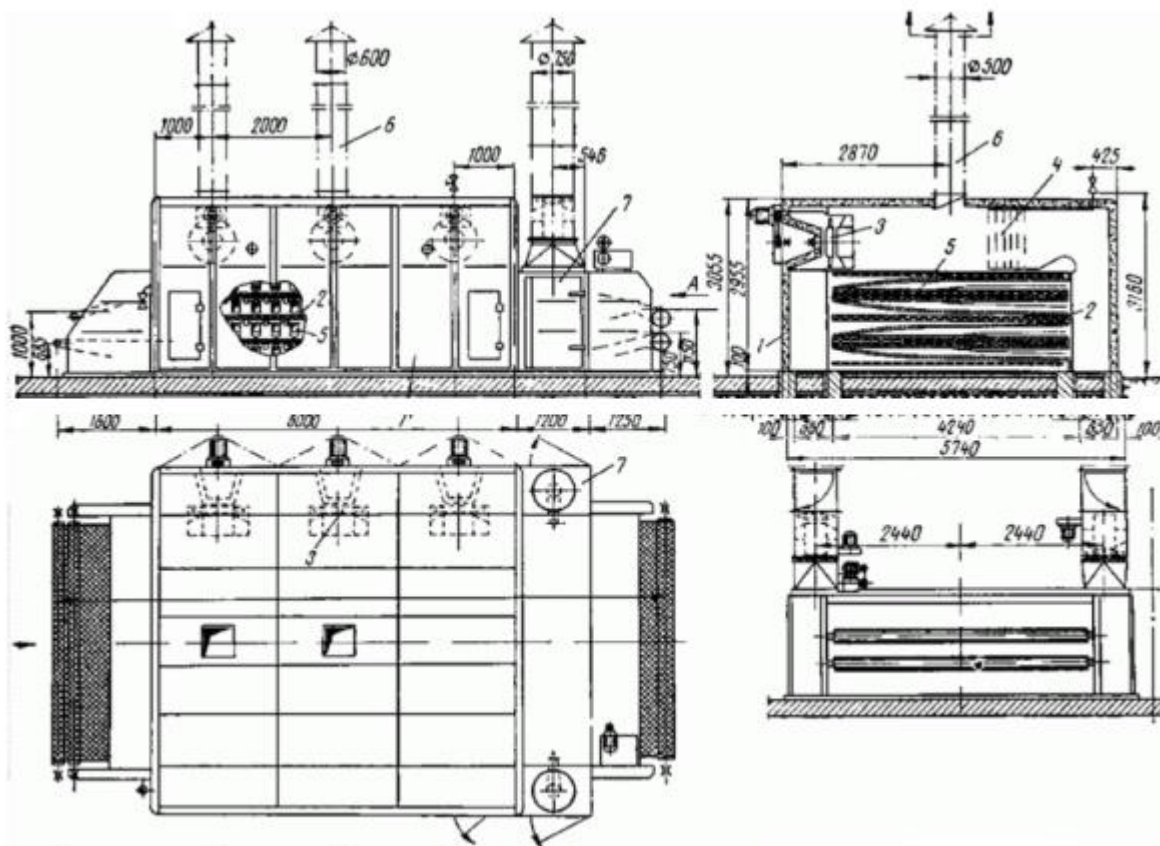
Рис. АЗ.1. Схема утворення тришарової фанери:

а - напрямки розміщення листів шпону; б - уцілювання листів шпону



## ДОДАТОК Б2

## Стрічкова двоповерхова сушарка із сопловим дуттям



- 1 – корпус сушарки; 2 – металеві сітки; 3 – осьовий вентилятор; 4 – калорифер;  
5 – сопловий короб; 6 – вихлопна труба; 7 – камера охолодження

## ДОДАТОК В1

## Визначення відносного часу регулювання

Алгоритм керування	Об'єкт	Відносний час регулювання		
		аперіодичний	із 20% перерегулюванням	із мінімальним інтегральним критерієм
Пропорційний	Статичний	4,5	6,5	9,0
	Астатичний	6,0	8,0	-
Пропорційно-інтегральний	Статичний	8,0	12,0	16,0
	Астатичний	14,0	16,0	18,0
Пропорційно-інтегрально-диференційний	Статичний	5,5	7,0	10,0
	Астатичний	9,0	12,0	13,0

## Додаток Г1

### Технічні характеристики програмованого логічного контролера ОВЕН ПЛК160

#### Загальні відомості

Габаритні розміри, не більше	(208 × 110 × 73) ± 1 мм
Вага, не більше	0,75 кг
Ступінь захисту корпусу за ГОСТ 14254-96	IP20 зі сторони передньої панелі, IP00 зі сторони клем
Індикація на передній панелі	Світлодіодна
Середнє напрацювання на відмову	100 000 год.
Середній термін служби	10 років

#### Живлення

Напруга живлення: ПЛК160-24.X-X	з 22 по 28 В постійного струму (номінальна 24 В)
ПЛК160-220.X-X	від 90 до 264 В змінного струму (номінальна 110/220 В) частотою 47-63 Гц (номінальне значення 50 Гц)
Споживана потужність, не більше	40 ВА
Параметри вбудованого джерела живлення	Вихідна напруга 24±3 В, струм споживання не більше 400 мА
Акумулятор резервного живлення	LIR2477 (термін служби залежить від умов експлуатування, але не більше 5 років)

#### Цифрові (дискретні входи)

Кількість входів	16
із них швидкодіючих	4 (DI1-DI4)
Тип входів за ГОСТ р 52931-2008	1 і 2
Напруга живлення дискретних входів	24 ± 3 В
Максимальний вхідний струм дискретного входу	не більше 7 мА при живленні 24 В, не більше 8,5 мА при живленні 27 В
Сигнал "логічної одиниці", який відповідає стану "Увімкнено", дискретних виходів для постійної напруги (струм у колі)	від 15 до 30 В (струм від 3 до 15 мА)
Сигнал "логічного нуля", який відповідає стану "Вимкнено", дискретних входів для постійної напруги (струм у колі)	від мінус 3-5 В (струм 15 мА)
Мінімальна тривалість імпульсу,	

який сприймається дискретним входом	
– для звичайних входів	1 мс
– для швидкодіючих	0,02 мс
Вхідні пристрої, які підмикаються	– комутаційні пристрої (контакти кнопок, вимикачів, герконів, реле, тощо); – датчики, які мають на виході транзистор n-p-n або p-n-p– типу з відкритим колектором; – дискретні сигнали $24 \pm 3$ В
Гальванічна розв'язка	Групова
Електрична міцність ізоляція між групою дискретних входів та:	
– колами живлення	1780 В
– групами кіл дискретних виходів	1780 В
– групами інших кіл	560 В
<b>Дискретні виходи (контакти електромагнітних реле)</b>	
Кількість релейних вихідних каналів	12
Гальванічна розв'язка	Індивідуальна (для DO1-DO8), групова (DO9-DO10), групова (DO11-DO12)
Електрична міцність ізоляції між групами дискретних виходів та групами інших кіл	1780 В
Максимальний струм, який комутований контактами реле, не більше	3 А (для змінної напруги не більше 250 В, частотою 50 Гц та $\cos \varphi > 0,4$ – навантаження для категорії використання АС-15 за ГОСТ р 50030.1-2000) 3 А (для постійної напруги не більше 30 В – навантаження для категорії використання DC-13 за ГОСТ р 50030.1-2000)
Час перемикання контактів реле із стану «лог. 0» у «лог. 1» та назад, не більше	50 мс (виходи DO1-DO12)
Механічний ресурс реле	- не менше 300 000 циклів перемикань при максимальному комутваному навантаженні; - не менше 500 000 циклів перемикання при комутації навантаження менше половини від

	максимального
<b>Аналогові входи</b>	
Кількість аналогових входів	8
Тип уніфікованих сигналів, що підтримуються	Струм від 0 (4) 20 мА; Струм від 0 до 5 мА; Напруга від 0 до 10 В; 14 біт
АЦП	
Вхідний опір:	
У режимі вимірювання струму	Не більш ніж 170 Ом
У режимі вимірювання напруги	Не менше 200 кОм
Період опитування аналогових входів	10 мс
Межа основної зведеної похибки перетворення	$\pm 0,25\%$
Межа додаткової зведеної похибки перетворення на кожні 10 градусів змінення температури	$\pm 0,05\%$
Гальванічна ізоляція аналогових входів	Групова (8 входів)
Електрична міцність ізоляції між групою аналогових виходів та:	
– колами живлення	1780 В
– групами кіл дискретних виходів	1780 В
– групами інших кіл	560 В

<b>Аналогові виходи</b>	
Кількість аналогових виходів	4
Тип вихідного сигналу (залежно від модифікації)	Універсальний, струм від 4 до 20 мА, напруга від 0 до 10 В
Межа основної зведеної похибки ЦАП	$\pm 0,5\%$
Розрядність ЦАП	ПЛК160-Х.А – 12 біт ПЛК160-Х.У – 10 біт ПЛК160-Х.И – 10 біт
Мінімальний період оновлення виходів	100 мс
Живлення аналогових виходів	Зовнішнє ( $24 \pm 3$ В)
Гальванічна ізоляція аналогових виходів	Індивідуальна
Електрична міцність ізоляції між групами аналогових виходів та групами інших кіл	1780 В
Межа допустимої додаткової зведеної похибки аналогових виходів, яка викликана зміненням температури	не більше 0,5 межі допустимої осно- вної зведеної похибки аналогових ви- ходів

навколишнього повітря від  
нормальної на кожні 10°C змінення  
температури

### Інтерфейси зв'язку

#### RS-485

Кількість	1
Гальванічна розв'язка	Індивідуальна
Електрична міцність ізоляції	1780 В (між інтерфейсом RS-485 та іншими групами кіл)

#### Ethernet 100 Base-T

Кількість	1
Гальванічна розв'язка	Індивідуальна
Електрична міцність ізоляції	1780 В (між інтерфейсом RS-485 та іншими групами кіл)

#### RS-232 \*\*

Кількість	1
Гальванічна розв'язка	Відсутня

#### RS-232-Debug \*\*

Кількість	1
Гальванічна розв'язка	Відсутня

#### USB-пристрій \*

Кількість	1
Гальванічна розв'язка	Відсутня

\* – точність вказана без застосування програмної корекції.

\*\* – кола зазначених інтерфейсів не мають між собою гальванічної ізоляції.

Електрична міцність ізоляції між групою зазначених кіл:

- колами живлення –1780 В;
- групами кіл дискретних виходів – 1780 В;
- групами інших кіл –560 В.

### Ресурси та додаткове обладнання

Центральний процесор	RISC-процесор на базі ядра ARM-9, 32 розряду, 180МГц
Об'єм оперативної пам'яті (тип пам'яті)	8 Мб (SDRAM), із них 1 Мб для коду користувальницької програми, 128 кб для змінних користувальницької програми
Об'єм енергонезалежної пам'яті	4 Мб (DataFlash), із них 3 Мб доступно для зберігання файлів та архівів
Розмір Retain-пам'яті	не більше 16 кб (за умовчанням встановлено значення 4 кб.)
Час виконання одного циклу програми	– Мінімальний (що не стабілізується) -250 мкс; – встановлений за умовчанням (стабілізований) -1 мс (налаштовується у вікні "Конфігурація ПЛК

## Додаткове обладнання

(PLC Configuration) ПЗ CoDeSys

- Годинник реального часу з автономним акумуляторним живленням (точність ходу – не більше 3 хв. на добу);
- Вбудоване джерело видавання звукового сигналу;
- Функціональна кнопка на передній панелі контролера

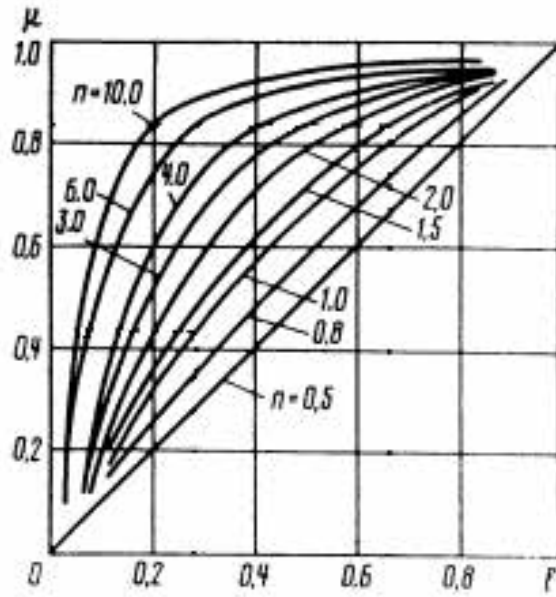
## Додаток Г2

## Інтерфейси зв'язку та програмування контролера ОВЕН ПЛК160

Інтерфейси зв'язку	Протоколи (тип зв'язку та особливості роботи)	Формат передавання даних	Швидкість передавання	Довжина кабелю, м, не більше	Рекомендований тип кабелю
RS-485	Modbus-RTU, ModBus ASCII-DCON, ОВЕН	7 або 8 біт, парність є\немає\не використовується, 1 або 2 стоп біти	2400, 4800, 9600, 14400, 19200, 28800, 38400, 57600, 115200 біт/с	1200	КИПЭВ 1×2×0,6 (ТУ 16.К99-008-2001) або аналогічні
RS-232	Modbus-RTU, ModBus ASCII-DCON, ОВЕН	7 або 8 біт, парність є\немає\не використовується, 1 або 2 стоп біти	1200, 2400, 4800, 9600, 14400, 19200, 28800, 38400, 57600, 115200 біт/с	3	-
RS-232-Debug	ModBus-RTU (тільки slave), ModBus-ASCII, DCON, Gateway (тільки для Debug RS-232), ОВЕН	тільки 8 немає 1	1200, 2400, 4800, 9600, 14400, 19200, 28800, 38400, 57600, 115200 біт/с	1,8	-
Ethernet 100 Base-T	ModBus-TCP Gateway TCP-IP, UDP-IP, Codesys Network Variables (over UDP)	-	10, 100 Мбіт/с	100	Категорія 5 тип УТР (звиті пари без екрану), STP або FTP (звиті пари в екрані)
USB-Device	CDC	-	115200 біт/с	1,8	Стандартний із з'єднувачами типу А та В

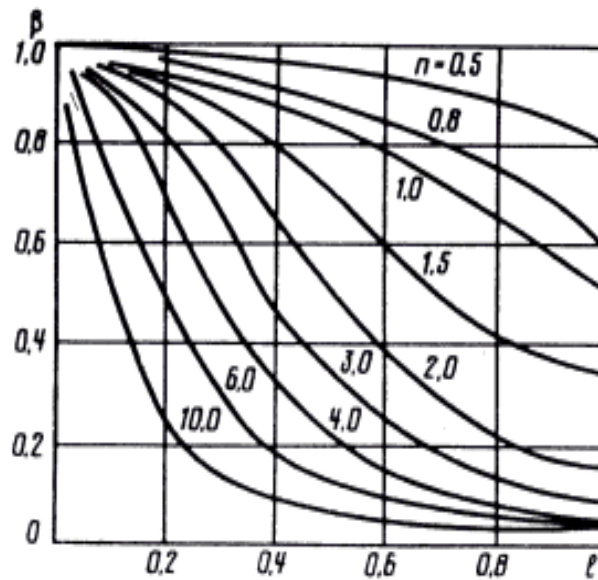
## ДОДАТОК Д1

Робочі витратні характеристики для регулювальних клапанів



## ДОДАТОК Д2

Зміни перепадів тисків на ВМ для регулювальних клапанів



## ДОДАТОК Е1

### Умови вибору автоматичних вимикачів

Модульні багатополюсні (двох-, трьох- та чотирьохполюсні) автоматичні вимикачі (далі модульні АВ) складаються із відповідної кількості однополюсних вимикачів (модулів). Зазвичай, такі вимикачі містять комбінований розчіплювач (електромагнітний – для захисту від струмів короткого замикання і тепловий – для захисту від перевантажень).

Вибір модульних автоматичних вимикачів здійснюється за наступними умовами:

1. За номінальною напругою: номінальна напруга модульного АВ повинна відповідати напрузі мережі

$$U_{Н АВТ} \geq U_{МЕР}$$

2. За номінальним струмом автоматичного вимикача: номінальний струм модульного АВ повинен відповідати тривалому (розрахунковому) струму електроприймача або лінії

$$I_{Н АВТ} \geq I_{ТР}$$

Для одиночного однофазного споживача

$$I_{ТР} = \frac{P}{U \cdot \cos\varphi}$$

де  $P$  – потужність приладу-споживача, Вт;

$U$  – напруга однофазної мережі (220 В);

$\cos\varphi$  – для ламп розжарювання, нагрівальних приладів приймається  $\cos\varphi = 1$ ;

для інших приладів побутових споживачів приймається  $\cos\varphi = 0,96 \dots 0,98$ .

Для одиночного споживача трифазної мережі

$$I_{ТР} = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \eta \cdot \cos\varphi}$$

де  $U$  – напруга трифазної мережі (380 В);

$\eta$  – номінальний ККД приладу-споживача.

Групова потужність групи трифазних споживачів визначається як

$$P_{РОЗР} = K_C \cdot \sum_{i=1}^n P_n$$

де  $K_C$  – коефіцієнт, значення якого залежить від кількості пристроїв-споживачів у групі.

Кількість пристроїв	1	2	3	4-200
$K_C$	1	0,8	0,75	0,7

3. За кількістю полюсів автоматичного вимикача.

Для однофазної мережі змінного струму обирають однополюсний вимикач, якщо проводи  $N$  та  $PE$  об'єднані, та  $1+N$  (двохполюсний) вимикач, якщо нульовий провід  $N$  відокремлений від заземлюючого  $PE$  провідника.

Для трифазної мережі змінного струму при відсутності однофазних споживачів використовують трьохполюсні АВ та  $3+N$  (4-полюсні) вимикачі, якщо у трифазній мережі є однофазні споживачі і провідники  $N$  та  $PE$  розділені.

4. За номінальним струмом теплового розчіплювача (за наявності). В модульних АВ тепловий розчіплювач (у деяких моделях регулюється, у деяких моделях – ні) входить до складу комбінованого розчіплювача. Номінальний струм теплового розчіплювача визначається як

$$I_{Т РОЗЧ} \geq \frac{I_{ТР}}{K_N \cdot K_T}$$

де  $I_{ТР}$  – тривалий (розрахунковий струм електроприймача або лінії, А;

$K_N$  – коефіцієнт, значення якого залежить від кількості пар полюсів:

1 полюс	2 полюси	3 полюси	4 полюси
$K_N = 1$	$K_N = 0,875$	$K_N = 0,83$	$K_N = 0,81$

$K_T$  – коефіцієнт, значення якого залежить від температури навколишнього середовища

-10°C	+10°C	+30°C	+40°C	+50°C
$K_T = 1,1$	$K_T = 1,04$	$K_T = 1,0$	$K_T = 0,99$	$K_T = 0,97$

5. За класом (типом) електромагнітного (миттєвого) розчіплювача. Для модульних АВ діапазон спрацювання електромагнітного розчіплювача по відношенню до номінального струму теплового розчіплювача зазначається літерою (А, В, С, D, К, Z).

А	В	С
(2...3) $I_{H \text{ РОЗЧ}}$	(3...5) $I_{H \text{ РОЗЧ}}$	(5...10) $I_{H \text{ РОЗЧ}}$

D	К	Z
(10...20) $I_{H \text{ РОЗЧ}}$	(8...12) $I_{H \text{ РОЗЧ}}$	(2.5...3.5) $I_{H \text{ РОЗЧ}}$

Вибір класу електромагнітного розчіплювача здійснюється із урахуванням максимальних або пускових струмів у мережі

$$K_{EM \text{ min}} = \frac{K_H \cdot I_{max}}{I_{H \text{ РОЗЧ}}}$$

де  $K_{EM \text{ min}}$  – мінімальна кратність спрацювання електромагнітного розчіплювача відповідного класу (для В  $K_{EM \text{ min}} = 3$ ; для С  $K_{EM \text{ min}} = 5$ ; для D  $K_{EM \text{ min}} = 10$ );

$K_H$  – коефіцієнт надійності максимального розчіплювача,  $K_H = 1,25 \dots 1,4$ ;

$I_{max}$  – максимальний короточасний струм електроприймача або лінії, А;

$I_{H \text{ РОЗЧ}}$  – номінальний струм теплового розчіплювача, А.

6. За струмом відсічки електромагнітного розчіплювача, який повинен становити не менше 1,5...1,6 від пускового струму електродвигуна  $I_{ПУСК}$

$$I_{EM \text{ РОЗЧ}} \geq (1,5 \div 1,6) \cdot I_{ПУСК}$$

Якщо автоматичний вимикач захищає лінію, яка живить декілька електродвигунів

$$I_{EM \text{ РОЗЧ}} \geq 1,8 \cdot \left( \sum_{i=1}^n I_{НОМ i} + I_{ПУСК \text{ МАХ}} \right)$$

де  $I_{НОМ i}$  – номінальний струм і-го електродвигуна, А;

$I_{ПУСК \text{ МАХ}}$  – пусковий струм найбільшого за пусковим струмом електродвигуна, А.

7. За ступенем захисту АВ від впливу навколишнього середовища та від дотику людини до струмопровідних частин, за кліматичним виконанням, за категорією розміщення модульні АВ обирають так само, як і АВ загального призначення.

## ДОДАТОК Е2

### Умови вибору електромагнітних пускачів

Електромагнітні пускачі (далі ЕМП) вибирають за такими параметрами:

1. За *номінальною напругою*: номінальна напруга ЕМП повинна відповідати напрузі мережі

$$U_{HEMP} \geq U_{MER}$$

2. За *величиною ЕМП* за встановленим номінальним струмом, що обумовлене перерізом проводів, які приєднуються до клемника ЕМП.

$$I_{HEMP} \geq I_p,$$

$I_p$  – робочий струм навантаження, А.

Величина	0	1	2	3	4
$I_{HEMP}$ , А	< 6,3	10...16	25	40	63

При струмах навантаження, що перевищують 63 А, використовуються електромагнітні контактори.

3. За *напругою електромагнітної котушки*, або за напругою кола керування.

$U_{AC}$ , В	24	36	42	110	220	380
$U_{DC}$ , В	12	24	48	110	220	-

4. За наявністю *теплового реле*. При наявності теплового реле для захисту електродвигуна:

- за струмом теплового реле

$$I_{HTR} \geq I_{HDV}$$

- за струмом неспрацювання теплового реле із подальшим регулюванням струму неспрацювання

$$I_{HNSPR} \geq I_{HDV}$$

5. За наявністю *додаткових контактів* (замикаючих і розмикаючих):

NO (normal open) – нормально розімкнені контакти;

NC (normal closed) – нормально замкнені контакти.

6. За наявності додаткових контактів, за допомогою яких реалізується *реверс* електродвигунів.

7. За ступенем захисту корпусу ЕМП (IP00, IP40, IP54 та ін.)

8. За класом зносостійкості.

## ДОДАТОК Е3

### Умови вибору перемикачів, кнопкових постів, кнопок керування, сигнальної арматури

Пакетні вимикачі та перемикачі вибирають номінальною напругою ділянки встановлення, характеру комутованого навантаження та за номінальним струмом. Їх гранична комутаційна здатність знаходиться в межах (3,5...9,0)  $I_n$ .

Кнопки керування та кнопкові пости, пристрої світлової та звукової сигналізації вибирають за напругою кола керування  $U_{KER}$ .

## ДОДАТОК Е4

### Умови вибору проводів і кабелів

Поперечний переріз жил проводу або кабелю за тривало допустимим струмом вибирають за такою умовою

$$I_{\text{ТР.ДОП}} \geq I_{\text{РОЗР}},$$

де  $I_{\text{РОЗР}}$  – розрахунковий струм ділянки електромережі, А.

Для відгалужень до окремих споживачів електроенергії, за  $I_{\text{ТР.ДОП}}$  приймають значення їх номінальних струмів, які можна визначити наступним чином:

- однофазний споживач електроенергії

$$I_{\text{Н}} = \frac{P_{\text{Н}}}{U_{\text{Н}} \cdot \cos\varphi_{\text{Н}}}$$

- трифазний споживач

$$I_{\text{Н}} = \frac{P_{\text{Н}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{Н}} \cdot \cos\varphi_{\text{Н}}}$$

- трифазний асинхронний електродвигун із к.з. ротором

$$I_{\text{Н}} = \frac{P_{\text{Н}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{Н}} \cdot \eta_{\text{Н}} \cdot \cos\varphi_{\text{Н}}}$$

Розрахунковий струм магістралі, від якої живиться декілька споживачів електроенергії, розраховується за виразом

$$I_{\text{РОЗР}} = K_{\text{О}} \cdot \sum I_{\text{Н}}$$

де  $K_{\text{О}}$  – коефіцієнт одночасності роботи споживачів електричної енергії;

$I_{\text{Н}}$  – номінальні струми споживачів магістралі.

Значення тривало допустимих струмів для різних проводів і кабелів (відповідно способу прокладання, поперечному перерізу та матеріалу виконання (мідний, алюмінієвий та ін.) наведені в ПУЕ.