

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
(повне найменування вищого навчального закладу)

Навчально-науковий інститут інформаційних технологій і робототехніки

(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра автоматики, електроніки та телекомунікацій

(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи

магістр

(ступінь вищої освіти)

на тему Автоматизація системи стабілізації параметрів технологічного процесу скручування чайного листа в електромеханічному ролері

Виконав: студент б курсу, групи 601МЕ
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Тарасовський О.О.

(прізвище та ініціали)

Керівник Сільвестров А.М.

(прізвище та ініціали)

Рецензент Єрмілова Н.В.

(прізвище та ініціали)

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
Інститут Навчально-науковий інститут інформаційних технологій і робототехніки
Кафедра Автоматики, електроніки та телекомунікацій
Ступінь вищої освіти Магістр
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

**Завідувач кафедри автоматичної,
електроніки та телекомунікацій**

О.В. Шефер

“ 03 ” вересня 2021 р.

З А В Д А Н Н Я НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Тарасовському Олегу Олександровичу

1. Тема проекту (роботи) «Автоматизація системи стабілізації параметрів технологічного процесу скручування чайного листа в електромеханічному ролері».

керівник проекту (роботи) Сільвестров А.М., д.т.н., професор

затверджена наказом вищого навчального закладу від “25” серпня 2021 року №688фа.

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 15.12.2021 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) температура у чайній масі не перевищує $34 \pm 2^\circ\text{C}$; час технологічного процесу скручування – 4,5 хв.; тиск преса в межах 0,1-0,27 МПа.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Технологічний процес виробництва чорного чаю. Принцип дії електромеханічного пристрою для скручування зав'язаного чайного листа. Основні проблеми автоматизації електромеханічних ролері і вимоги до системи керування. Визначення об'єкта керування. Розрахункові схеми і рівняння руху узагальненого об'єкту керування. Особливості чайної маси як елемента об'єкта керування. Теплові процеси в чайній масі. Обчислювальна модель об'єкта керування. Спрощена математична модель об'єкта керування. Критерії оптимізації. Структурний синтез цифрової системи автоматичного керування. Области досяжних показників якості і параметрична оптимізація регуляторів системи керування. Програмно-апаратна реалізація системи керування. Розрахунок економічної ефективності.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових плакатів):

1. Кінематичні схеми чайних ролерів ЧРО та ЧРП.

2. Електромеханічний ролер як об'єкт керування.

3. Структурна схема об'єкта керування.

4. Особливості чайної маси як елемента об'єкта керування.

5. Обчислювальні моделі об'єкта керування в Matlab.

6. Графіки перехідних процесів.

7. Функціональна схема системи керування ролером.

8. Функціональна схема системи автоматичного керування технологічним процесом скручування.

9. Алгоритм програмної реалізації системи керування.

10. Таблиця техніко-економічних показників.

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Економіка	Григор'єва Олеся Володимирівна, к.е.н., доцент		

7. Дата видачі завдання 03.10.2021 р.**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

Пор. №	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи			Примітка (плакати)
		Дата початку	Термін	Відсоток виконання	
1	Технологічний процес виробництва чорного чаю. Принцип дії електромеханічного пристрою для скручування зав'ялого чайного листа	10.10.21		10%	Пл. 1
2	Основні проблеми автоматизації електромеханічних ролері і вимоги до системи керування	15.10.21		20%	Пл. 2
3	Визначення об'єкта керування. Розрахункові схеми і рівняння руху узагальненого об'єкту керування	27.10.21	I	30%	Пл. 3
4	Особливості чайної маси як елемента об'єкта керування	02.11.21		40%	Пл. 4
5	Теплові процеси в чайній масі. Обчислювальна модель об'єкта керування. Спрощена математична модель об'єкта керування	10.11.21		50 %	Пл. 5
6	Критерії оптимізації. Структурний синтез цифрової системи автоматичного керування	24.11.21	II	60%	Пл. 6
7	Області досяжних показників якості і параметрична оптимізація регуляторів системи керування	30.11.21		70%	Пл. 7
8	Програмно-апаратна реалізація системи керування	04.12.21		80%	Пл. 8
9	Розрахунок економічної ефективності	10.12.21		90%	Пл. 9
10	Оформлення магістерської роботи	15.12.21	III	100%	Пл. 10

Магістрант _____
(підпис)

Тарасовський О.О.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

Сільвестров А.М.
(прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

	стор.
ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	
1.1 Технологічний процес виробництва чорного чаю	8
1.2 Принцип дії електромеханічного пристрою для скручування зав'яленого чайного листа	14
1.3 Основні проблеми автоматизації електромеханічного ролері і вимоги до системи керування	19
РОЗДІЛ 2 МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ СКРУЧУВАННЯ ЧАЙНОГО ЛИСТА В РОЛЕРІ ЯК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ	
2.1 Визначення об'єкта керування	21
2.2 Розрахункові схеми і рівняння руху узагальненого об'єкту керування	26
2.3 Особливості чайної маси як елемента об'єкта керування	32
2.4 Теплові процеси в чайній масі	35
2.5 Обчислювальна модель об'єкта керування	48
2.6 Спрощена математична модель об'єкта керування	52
РОЗДІЛ 3 СИНТЕЗ САК СКРУЧУВАННЯ ЧАЙНОГО ЛИСТА	
3.1 Розробка функціональної схеми автоматизації	56
3.2 Структурний синтез цифрової системи автоматичного керування	59
3.3 Області досяжних показників якості і параметрична оптимізація регуляторів системи керування	73
3.4 Програмно-апаратна реалізація системи керування	78
РОЗДІЛ 4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА	
4.1 Техніко-економічне обґрунтування	82
4.2 Визначення витрат на удосконалення САК скручування чайного листа	82
4.3 Розрахунок річного фонду роботи ролера	84
4.4 Розрахунок річної експлуатаційної продуктивності	85

4.5 Розрахунок поточних річних витрат	85
4.6 Розрахунок вартості машино–години роботи ролера	88
4.7 Розрахунок вартості технологічної операції на одиницю продукції	88
4.8 Розрахунок економічного ефекту від проведення модернізації	89
ВИСНОВКИ	91
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	93
ДОДАТКИ	

ВСТУП

Незважаючи на те, що історія чаю і його переробки налічує сторіччя, технологія і пристрої виробництва високоякісних сортів, що користуються найбільшим попитом, не зазнала значних змін за останні 100 років. Навіть на великих фабриках первинної переробки чаю використовують пристрої з малим ступенем механізації і автоматизації.

Відсутність невеликих ефективних агрегатів, що дозволяють здійснювати первинну переробку чаю на мінімальних відстанях від плантацій, є серйозним стримуючим фактором широкого розвитку вирощування і виробництва чаю в Україні.

Таким чином, створення високотехнологічних установок автоматичного скручування чаю (ролерів), що дозволяють максимально наблизити виробництво чаю до місць його вирощування, і, тим самим, підвищують конкурентоспроможність вітчизняної чайної промисловості, є актуальним завданням.

Процес скручування характеризується не тільки наданням листу певної форми, а й початком процесу ферментації, пов'язаного зі складними біохімічними перетвореннями клітинного соку і ферментів чаю, а також не стаціонарністю фізико-механічних і теплофізичних властивостей чаю. Тому питання автоматизації заданого режиму технологічного процесу скручування залишається відкритим. Це пояснюється, перш за все, відсутністю адекватних математичних моделей ролерів як об'єктів керування. Найбільш важливим і найменш дослідженим є питання динаміки роботи ролерів. У відомих публікаціях немає визначення об'єкта керування технологічним процесом скручування, а відповідно, і його математичної моделі.

Метою даної роботи є підвищення якості переробки чаю шляхом автоматичної стабілізації параметрів технологічного процесу скручування чайного листа в електромеханічні ролери.

Для досягнення поставленої мети в магістерській роботі проведено комплекс теоретичних та експериментальних робіт:

1. Розробити математичну модель узагальненого об'єкта керування по відношенню до керуючого і основним збурюючим впливам.

2. Провести аналіз динаміки узагальненого об'єкта, на підставі чого була синтезована спрощена математична модель об'єкта керування,

3. Виконати структурний аналіз цифрової робастної системи автоматичного керування установки для скручування чаю та здійснена параметрична оптимізація її регуляторів.

4. Розробити обчислювальні моделі об'єкта та системи керування з використанням програм MatLab та MathCAD і запропонована методика проведення експериментів.

5. Створити методику інженерного проектування цифрової системи керування ролера, на підставі якої розроблено варіант технічної реалізації системи.

Методи дослідження: при теоретичному аналізі в роботі використовувалися методи ідентифікації динамічних об'єктів, теорії лінійних і нелінійних систем автоматичного керування, теорії дискретних систем, теорії механізмів і машин, теорії теплопровідності, а також методи математичного моделювання на ПЕОМ. Теоретичні дослідження підтверджені натурними і обчислювальними експериментами об'єкта і системи автоматичного керування технологічним процесом скручування.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Технологічний процес виробництва чорного чаю

Чай – продукт зі спеціально обробленого листа чайної рослини.

Сировиною для його виробництва служать багаторічні тропічні вічнозелені рослини *Thea*. Найбільшого поширення набули два види чайної рослини: китайський *Thea Sinensis* і ассамський *Thea Assamica*. Кожен з них має кілька різновидів, що відрізняються за розміром, формою, будовою листа і іншими ознаками. Для отримання якісного чаю збирають верхівкові частини пагонів, що складаються листових жилок, які ще не розпустились, і двох – п'яти молодого листа (флеші). Вони володіють найбільш сприятливим хімічним складом для отримання чаю з високими дегустаційними властивостями. Старі та грубі пагони дають чай низької якості.

Залежно від того, наскільки повно відбуваються біохімічні і окисні перетворення, з однієї і тієї ж сировини можна отримати чай різного типу і якості. Існує кілька технологічних схем виробництва чорного байхового чаю. Найбільш якісний і дорогий чай виходить із застосуванням так званої ортодоксальної технології (чай «ORTODOX»). У той же час ця технологія є найбільш трудомісткою. Зокрема, ця технологія не забезпечує безперервного процесу виробництва, що ускладнює її промислове застосування. При кустарному застосуванні цієї технології якість продукту часто погіршується внаслідок неточного дотримання технологічних параметрів на різних стадіях обробки [16].

Основні виробничі процеси у виробництві чаю по даній технології можна згрупувати наступним чином :

- збір – транспортування – зберігання – зав'ялювання;
- скручування – сортування;
- ферментація;
- сушка;

– сортування – купаж – фасування – упаковка.

Аналіз технології виробництва чайного листа показує, що одним з її найважливіших ланок, що впливають на продуктивність процесу і якість продукту, є процес скручування зав'яленого листа.

Чорний чай є результатом хімічної взаємодії фенольних з'єднань (таніну) і комплексу ферментних систем (ферменти). В клітці чайного листа ферменти локалізовані в мезофілі в епідермальних тканинах, а танін в вакуолі. До процесу скручування листа не піддається механічному впливу, тому ферментна система і танін роз'єднані за допомогою мембран. При механічній дії на чайне листя клітинний сік вичавлюється з вакуолі і просочує гідролізуючі речовини. Відбувається утворення комплексів окислювальних ферментів мезофіла з таніном в вакуолі.

Отже, скручування зав'яленого чайного листа проводять з метою руйнування його клітин, поділу флеші на складові частини і надання їм характерної скрученої бочкоподібної або циліндричної форми.

Вирізняється клітинний сік, огортаючи поверхню скрученого листа, що піддається впливу кисню повітря – починається ферментативний процес.

На якість вихідної сировини та на якість кінцевого продукту, впливають різні фактори: час збору, погодні умови, кількість грубих фракцій в зборі тощо. Наявність в чайному листі листової пластинки, черешків і жилок пояснюється морфологічними особливостями рослинного матеріалу [10]. Залежно від фізико-механічних показників зібраного листа черешки і особливо жилки можуть чинити негативний вплив на якість продукції або напівфабрикату чаю. Листова пластинка або жилка є аналогічними за будовою речовинами, однак їх зміст в тій чи іншій частині листа різко відрізняється. Всі компоненти, що містяться в рослинній клітині, в цілому можна ділити на дві групи: речовини – носії еластичної деформації і речовини – носії пластичної деформації.

Для отримання продукції чаю підвищеної якості бажано, щоб в сировину містилися речовини пластичної деформації, вони сприяють

доданню трубчастих форм чайнок при скручуванні, забезпечують скручування листа в трубочку, а вміст у листі речовин – носіїв еластичної деформації навпаки перешкоджають утворенню характерної форми чайнок. У міру огрубіння чайного листа в ньому поступово збільшується вміст речовин – носіїв еластичної деформації.

Черешки і жилки за хімічним потенціалом трохи поступаються листовій платівці, однак при скручуванні, якщо лист ніжний, вони з листовою платівкою створюють єдину форму, а коли лист огрубілий, жилки відокремлюються від пластинки [8].

Завданням скручування, крім роздавлювання клітинної структури, є створення певної форми чайнок, але так як в огрубілому аркуші при скручуванні відбувається поділ листової пластинки і жилок, то з останніх утворюються так звані волоски червоного кольору, негативно впливають на якісні показники продукції. Зазвичай утворення волосків спостерігається при скручуванні великої фракції, тому параметри технологічного процесу скручування безпосередньо залежать від якості зібраної чайної сировини.

Експериментально досліджено рух чайної маси у відкритому ролері. При роботі ролера виникають зусилля різної величини і напрямків (рис. 1.1): сили реакцій R_2 з боку стінок циліндра і R_1 з боку кювету столу та відцентрова сила C . При цьому в зоні дії цих сил знаходиться ділянка максимальних напружень стиску, який схематично позначений пунктиром. Частина чайної маси починає переміщатися у напрямку рівнодіючих цих сил Q , яка становить з віссю циліндра кут Θ . Після цього піднятий на поверхню чайний лист пересипається від центру до периферії і вниз під впливом відцентрової сили.

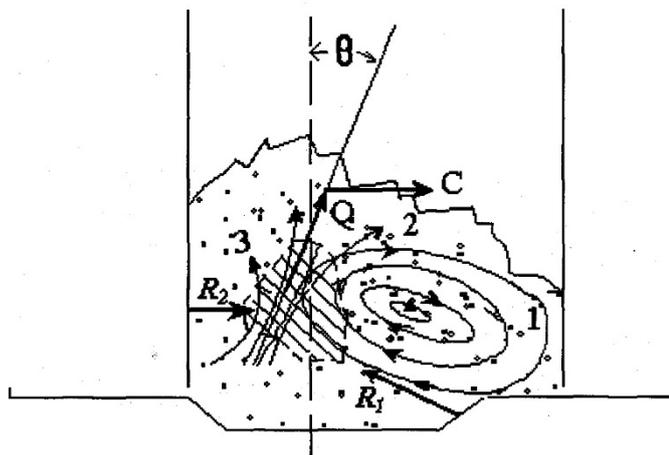


Рисунок 1.1 – Схема розподілу зусиль, що виникають у відкритому ролері при скручуванні чайного листа

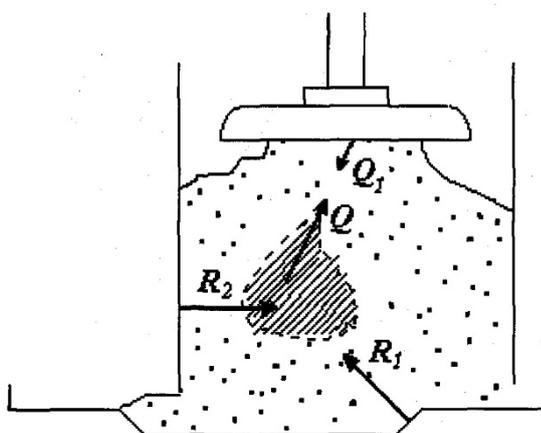


Рисунок 1.2 – Схема розподілу зусиль, що виникають в закритому ролері при скручуванні чайного листа

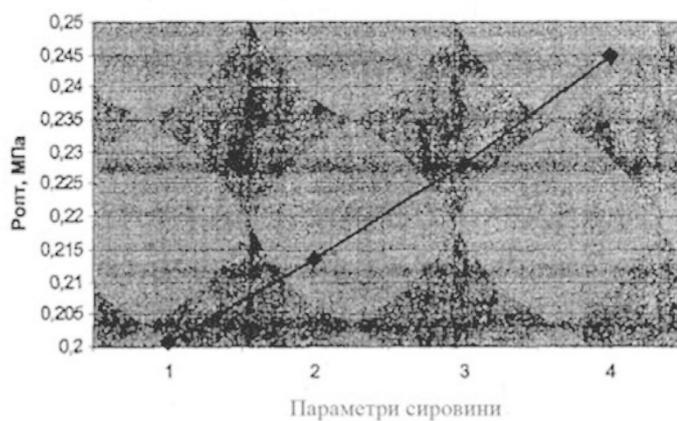


Рисунок 1.3 – Залежність оптимального значення тиску преса від властивостей сировини

Тобто чайна маса циркулює по замкнутим лініям 1 та незамкнутим лініям 2 і 3.

Встановлено, що під час скручування чаю в ролері залишається досить велика кількість поверхонь, що рухаються з різними швидкостями.

Тому деформація і скручування елементів чайної флеші забезпечується тертям між суміжними поверхнями чайної маси.

У ролерів закритого типу застосовується прес, тому величина стискаючих зусиль збільшується. Дія пресу полягає в створенні протидіє Q_1 , рівнодіюча силі Q (рис. 1.2). Сила Q_1 одночасно зі збільшенням напруги стиснення знижує швидкість переміщення чайної маси по центральній частині знизу вгору. Тим самим протидіє циркуляції листа. При $Q_1 = Q$ циркуляція маси абсолютно припиняється і починається стирання листа в площині столу, що негативно впливає на якість чаю.

Зазвичай проводять триразове скручування листа, по 45 хвилин кожне, пропускаючи його в проміжках між скручуваннями через сортувальні машини. Машини, які використовуються для скручування чайного листа, називаються ролерами. Для першого скручування застосовують відкриті ролери (без преса), для наступних – закриті (з пресом) [5].

Технологічна робота ролера має відмінні риси.

Процес скручування в закритому ролері можна розбити на кілька етапів:

1. Рух преса до зіткнення з чайною масою.
2. Стиснення чайної маси і стабілізація досягнутого оптимального тиску преса на чайну масу.
3. Відведення преса від чайної маси і витримка преса в крайньому верхньому положенні.

Традиційно тривалість кожного з етапів встановлювалася оператором інтуїтивно, так як конструкція традиційного ролера не передбачає контролю ні за одним з параметрів технологічного процесу скручування. Етап руху преса до чайної маси не є визначальним в процесі скручування, але вимагає

постійної швидкості руху преса, щоб уникнути його заклинювання. Тому будемо вимагати, щоб тривалість даного етапу була мінімальною, а швидкість переміщення преса – постійною. Тривалість другого і третього етапів є технологічним завданням, яке в даний момент не вирішено.

В процесі скручування листа чайної рослини та їх сік піддаються дії кисню, тиску, температури і вологості. Оптимальне поєднання цих технологічних факторів забезпечує якісний процес скручування і ферментації. Ферментація, починаючись разом зі скручуванням (як тільки руйнуються клітини листа і сік, що виділився на його поверхню, входить у взаємодію з киснем повітря), що не закінчується після припинення скручування. Для її завершення скручений лист необхідно помістити в приміщення для ферментації.

Швидкість ферментативних процесів залежить від температури чайної маси, а зміна температури при скручуванні є наслідком тепловиділень при терті листа, їх русі щодо столу і стінок циліндра і ферментативних процесів. З огляду на нестабільність фрикційних властивостей зав'язаного чайного листа, обсягу його завантаження, умов охолодження тощо, температура в масі і, відповідно, умови ферментації є змінними. Очевидні непостійні характеристики інших основних факторів технологічного процесу, які тісно взаємопов'язані.

Відомо, що якість чаю безпосередньо залежить від тиску на чайну масу і температурного розподілу всередині неї. Експериментально встановлена залежність оптимального значення тиску преса P_{opt} від ранжируваних властивостей сировини (рис. 1.3). У свою чергу, температура чайної маси залежить від властивостей оброблюваного продукту і параметрів переробки:

$$\theta = f(\gamma, \theta_c, \omega_c, \chi_c, n, P); \quad (1.1)$$

де: θ – температура в чайній масі;

γ – властивості чайної маси;

θ_n – температура навколишнього середовища;

ω_{nm} – швидкість обертання столу ролера;

χ_{cm} – форма столу;

n – число циклів навантаження;

P – тиск преса на чайну масу.

При певних значеннях параметрів процесу можна досягти поєднання процесів скручування та ферментації. Однак і нині це завдання вимагає додаткових досліджень внаслідок відсутності чітких критеріїв тривалості і способів вимірювання основних параметрів зазначених процесів.

На даному етапі досліджень використовуємо тимчасові критерії, встановлені емпіричним шляхом і заснованих на якісних показниках одержуваного продукту, згідно з якими стабілізація тиску здійснюється протягом 10 хвилин, а витримка преса в крайньому верхньому положенні – протягом 5 хвилин, що відповідає традиційній ортодоксальній технології.

1.2 Принцип дії електромеханічного пристрою для скручування зав'язаного чайного листа

Операція скручування є однією з найвідповідальніших в технологічному ланцюжку. Чаєскручуючі машини (ролери) використовуються при виробництві всіх видів чаю: зеленого (кок-чай), жовтого (лао-чай), червоного та чорного.

Огляд публікацій по конструкціях і типам ролерів дозволяє класифікувати останні по наступним основним ознакам:

1) За інтенсивністю процесу скручування. Закриті (з пресом) та відкриті (без преса). Перші забезпечують більш інтенсивний процес, ніж другі.

2) За відносним рухом чайної маси і столу з рифами:

– Ролери одинарної дії. У них обертається тільки завантажувальний бак або стіл з рифами.

– Ролери подвійної дії. У них відбувається одночасне обертання завантажувального бака і столу з рифами.

– Ролери потрійної дії. У них відбувається одночасне обертання завантажувального бака, столу з рифами і пресу.

3) Залежно від числа виконавчих двигунів ролери подвійної і потрійної дії можуть бути однодвигунними або багатодвигунними. У однодвигунному варіанті застосовують механізми передачі, роздаючи рух від одного двигуна до столу, пресу і циліндру з чайною масою. У багатодвигунних – кожен з виконавчих механізмів має автономний привід.

4) Залежно від характеру зміни в часі завантаження ролери класифікують на машини безперервної і дискретної дії. В першому випадку здійснюється безперервне завантаження чайної маси, у другому – дискретне.

5) Залежно від напрямку руху чайної маси до столу ролери конструктивно виконуються вертикальними або горизонтальними.

На вітчизняних заводах випускаються ролери різних типів, які відрізняються, головним чином, корисним завантаженням – від 120 до 500 кг зав'яленого листа. Базові моделі – вертикальні однодвигунні ролери подвійної дії з дискретним завантаженням відкритого типу ЧРО-1 і закритого – ЧРП-1.

Ролер ЧРО-1 має наступні складові частини (рис. 1.4): завантажувальний бак 1, в який завантажують зав'ялений лист. Завантажувальний бак знизу не має дна і його нижній край трохи піднятий над круглим столом [5].

3. Стіл в середній частині має поглиблення у формі усіченої піраміди – кювет 7. Всередині кювету є дверцята для вивантаження листа після закінчення процесу скручування.

Машина зібрана на чавунній підково подібній рамі, яка стоїть на трьох чавунних ніжках; третя задня ніжка трохи відрізняється від двох передніх за своєю конструкцією та призначенням. Дві передні ніжки є опорами для рами і двох вільно обертаючих вертикальних колінчастих валів 4 і 5, на задній же

ніжці, яка також служить опорою, змонтований черв'ячний редуктор і третій приводний колінчастий вал 6. На відміну від передніх двох колінчастих валів на нижньому кінці заднього колінчастого валу жорстко закріплено черв'ячне колесо. Завантажувальний бак 1 приводиться в рух шийкою 2 колінчастих валів 4–6.

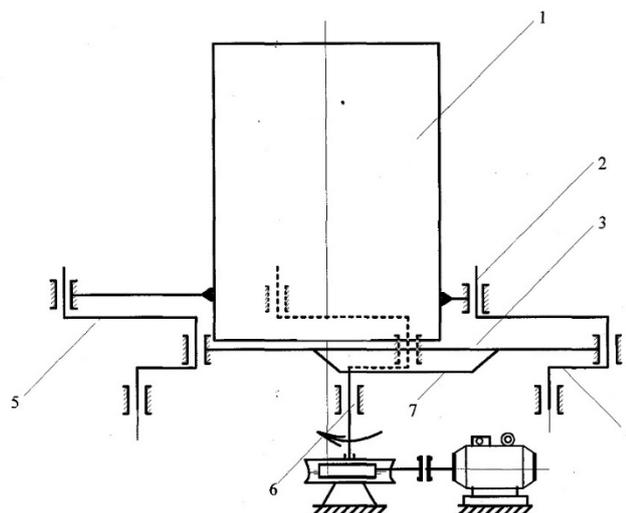


Рисунок 1.4 – Кінематична схема ролера ЧРО-1

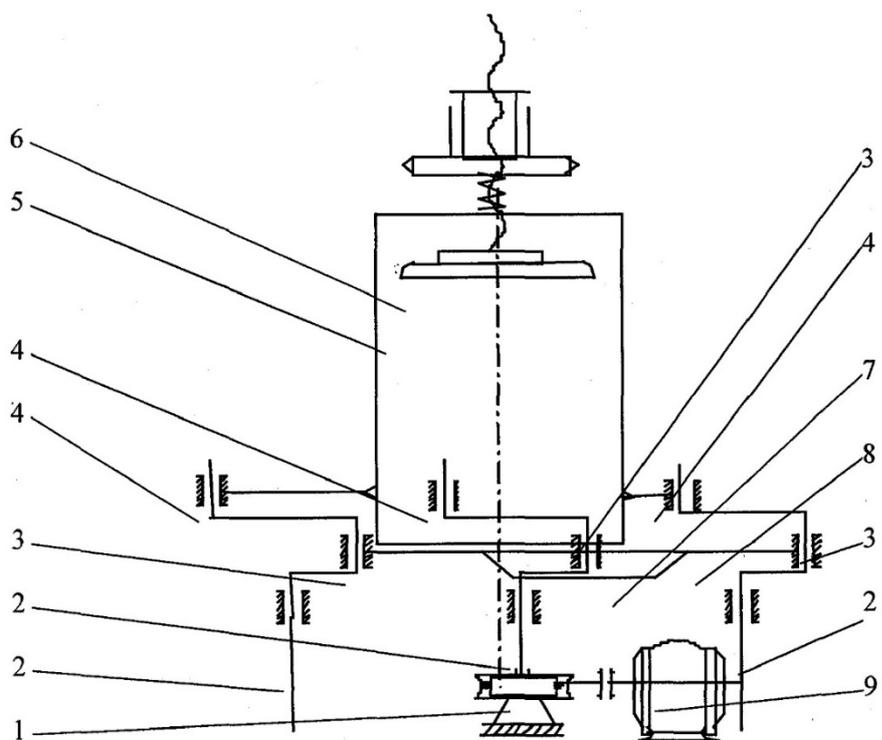


Рисунок 1.5 – Кінематична схема ролера з пресом ЧРП-1

Ролер ЧРП-1 (рис. 1.5) відрізняється від відкритого ролера тільки наявністю преса і пристосування (ланцюгова передача) для пересування преса вгору та вниз. Стіл 8 з кюветом 7 кріпиться на мотильових шейках 3 колінчастих валів 2 і приводиться в рух електродвигуном 9 через черв'ячний редуктор 1. Завантажувальний бак 6 приводиться в рух від мотильових шийок 4 [8].

Прес 7 здійснює вертикальне переміщення в завантажувальному баку ролера.

Ролери ЧРО-1 та ЧРП-1 практично не переналаштовані, що не дозволяє отримувати однаково якісний чайний продукт в умовах різною за якістю вихідної сировини. Конструктивно вони доопрацьовуються, як правило, на чайних фабриках. При цьому змінюється число обертів виконавчих органів ролера шляхом зміни передавального числа клинопасової передачі в залежності від сортності сировини, що надходить.

Оптимальну кутову швидкість знаходять дослідним шляхом. Внаслідок складності такого налаштування подальша зміна числа обертів зазвичай не проводиться, що погіршує показники якості продукції.

Кінематична схема закритого однодвигунного вертикального дискретного ролера подвійної дії англійської фірми «Маршал» аналогічна кінематичній схемі ролера ЧРП-1. Завантажувальний бак та стіл мають електричний привід, що включає черв'ячний редуктор та плоскопасову передачу. Шків редуктора і електродвигуна мають 3 ступені. Швидкість обертання столу і завантажувального бака можна регулювати перекиданням ремня по східцях шківів. Прес ролера кріпиться на П-образній стійці. Для здійснення руху преса використовується ланцюгова передача з ручним приводом.

Основними недоліками цього ролера є значне енергоспоживання і великі габарити в порівнянні з українськими ролерами такої ж продуктивності.

Прототипом малооб'ємного однодвигунного вертикального дискретного ролера подвійної дії виробництва Української чайної фабрики «АХМАД ТІ» є ролер ЧРО-1, відповідно зменшений по габаритам. Він призначений для скручування невеликих партій чаю в дослідних цілях при випробуванні нових сортів. Для забезпечення скручування під тиском він забезпечений найпростішим гвинтовим пресом [10].

Основні технічні характеристики деяких ролерів наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Основні технічні характеристики ролерів

№ п/п	Основні технічні характеристики	Одиниця виміру	Ролер ЧРО-1	Ролер ЧРП-1	Ролер фірми «Маршал»	РолерДФЧ
1	Продуктивність	кг/год.	280	240	50 1	10
2	Число обертів столу	об/хв.	60	60	56/60/65	60
3	Споживана потужність	кВт	3,7	6,0	4,2	1,5
4	Діаметр циліндра	м	0,96	0,96	0,654	0,42
5	Висота циліндра	м	1,02	0,775	0,523	0,5
6	Ємність циліндра	м ³	0,723	0,530	0,18	0,07
7	Прес (підйом і опускання)		Не має	Механізоване	Ручне	Ручне

В даний час для технологічних установок малої продуктивності найбільш поширеними є закриті дискретні ролери подвійної дії з вертикальним розташуванням вісі, з електромеханічним приводом столу і ручним приводом преса.

Такі ролери не дозволяють вирішити задачу автоматизації технологічного процесу скручування, тому для практичного вирішення проблем автоматизації необхідно створити нову конструкцію закритого ролера з регульованим приводом подачі преса.

1.3 Основні проблеми автоматизації електромеханічного ролера і вимоги до системи керування

Скручуючі установки являють собою електромеханічні системи, що включають в себе в основному обертаючий стіл, завантажувальний бак та прес. Відомо, що отримання якісного продукту в процесі скручування в основному залежить від двох основних чинників – тиску преса на чайну масу і температури всередині маси. В результаті технологічних досліджень встановлено, що тиск преса має перебувати в межах 0,18...0,27 МПа в залежності від якості вихідної сировини і вимог до одержуваного продукту, а температура в чайній масі не повинна перевищувати деякого значення. Тому для вдосконалення технологічної операції скручування чайного листа необхідно узгоджене керування виконавчими двигунами столу і преса в умовах технологічних обмежень з боку температури чайної маси і тиску поршня преса на масу [16].

Для контролю зазначених параметрів, активного керування ними, скорочення трудовитрат і мінімізації людського фактору необхідно створити автоматизовану систему керування процесом скручування чайного листа. Реалізація системи керування ролером неможлива без пристроїв вимірювання основних параметрів процесу. З літературних джерел [6] відомі пристрої індикації тиску преса на чайну масу і тиску чайної маси на стіл ролера. Пристрої індикації являють собою механічні системи з використанням манометрів і дозволяють тільки контролювати тиск в процесі скручування, але не дозволяють його автоматизувати. Основний недолік пристроїв для вимірювання тиску чайної маси на столі ролера полягає в

необхідності попередніх розрахунків оптимального тиску, так як він залежить від маси завантаженого чайного листа. Тому даний спосіб вимірювання тиску ускладнює синтез і використання системи керування, зважаючи на необхідність переналаштування параметрів системи в залежності від маси сировини.

Таким чином, основними завданнями автоматизації технологічного процесу є:

1. Створення математичної моделі технологічного процесу скручування чайного листа як об'єкта керування.

2. Розробка датчиків тиску і температури, які можна розмістити на рухомих частинах ролера або безпосередньо в чайній масі.

3. Синтез системи автоматичного керування технологічним процесом скручування, що забезпечує отримання готового продукту з відомими якісними показниками. Перепрограмований задатчик системи повинен здійснювати переналаштування та вибір оптимального співвідношення задаючих впливів, що забезпечують отримання всіх видів чаю (червоного, жовтого, зеленого, чорного) при виконанні технологічного процесу скручування.

Сформулюємо основні завдання досліджень:

- створення математичної моделі процесу скручування чайного листа в ролері як об'єкта керування;
- структурний синтез системи керування ролером;
- розробка алгоритмів керування САК скручування чайного листа;
- визначення області досяжних показників якості системи керування;
- параметрична оптимізація регуляторів системи керування технологічного процесу скручування;
- розробка і створення дослідної установки.

РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДНА ЧАСТИНА

Для розробки науково обґрунтованої методики синтезу систем автоматичного керування технологічним обладнанням для скручування чайного листа необхідно знайти математичний опис об'єкта керування.

Метою даного розділу є дослідження технологічного процесу скручування чайного листа в ролери як об'єкта керування. Для знаходження математичного опису розглянемо динаміку процесу скручування по відношенню до керуючого впливу і основних збурень. Це дозволить сформулювати вимоги до системи керування і її технічної реалізації.

2.1 Визначення об'єкта керування

Для вирішення завдання автоматичного керування тиском преса на чайну масу розроблений на базі відомої конструкції ролера новий варіант пристрою ролера. Установка зібрана на сталевій кільцеподібній рамі 13, яка знаходиться на трьох чавунних ніжках 1,14; третя задня ніжка 14 кілька відрізняється від двох передніх 1 за своєю конструкцією та призначенням. Дві передніх ніжки є опорами для рами 13 і двох вільно обертаючих вертикальних колінчастих валів 3, на задній же ніжці, яка також служить опорою, змонтований черв'ячний редуктор 12 і третій приводний колінчастий вал 9. На відміну від передніх двох колінчастих валів на нижньому кінці заднього колінчастого вала жорстко закріплено черв'ячне колесо. Електропривод столу 10 і завантажувального бака 7 ролера складається з електродвигуна 11, клинопасової 12 та черв'ячної передач.

Стіл 10 установки для скручування підвішений на трьох цапфах (шейках) 4,9 колінчастих валів 3 і здійснює плоско-поступальний круговий рух. Завантажувальний бак 7 підвішений на других трьох мотильованих шейках 5 колінчастих валів, тому він робить поступальний рух в площині, паралельній площині переміщення столу. Завантажувальний бак 7 знизу не

має дна і його нижній край трохи піднятий над круглим столом 10. Стіл ролера цілком відлитий зі сталі. Поверхня столу облицьована листовою нержавіючою сталлю товщиною 1,5–2 мм. Стіл в середній своїй частині має поглиблення у формі усіченої піраміди, званою кюветом 8. Це поглиблення має ребристу поверхню для створення додаткового опору масі чайного листа і збільшення розчавлюючесь, руйнує здатності ролера. У днищі поглиблення столу знаходяться дверцята для вивантаження листа з ролера після закінчення скручування. Дверцята відкривається механічно ручкою 2.

Завантажувальний бак ролера кріпиться на кільці 6 і закривається зверху кришкою з пресом, який використовується для більш інтенсивного процесу скручування. Він являє собою сталевий диск, облицьований з нижнього боку деревом твердої породи. Модернізований ролер оснащений новим по конструкції механічним пресом, що забезпечує зручність і простоту обслуговування ролера при можливості контролю тиску всередині чайної маси (рис. 2.3). Електропривод преса показаний на рисунку 2.4.

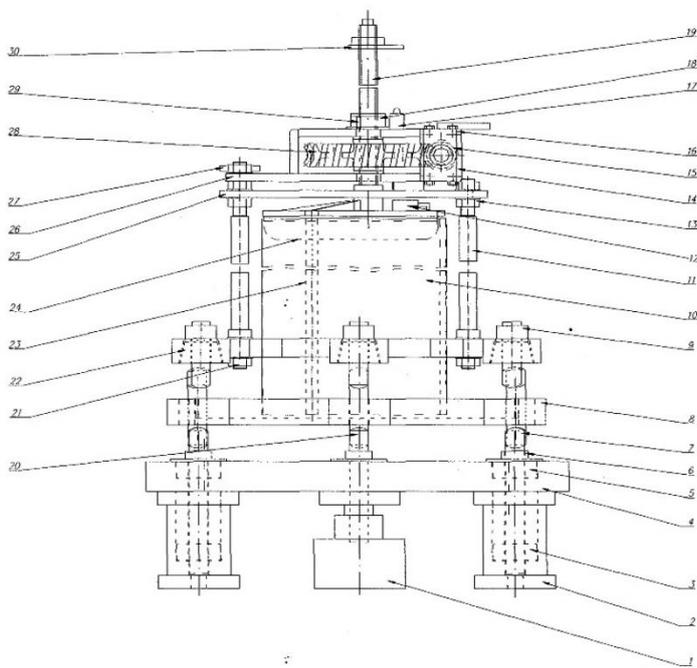


Рисунок 2.1 – Конструктивна схема установки для скручування

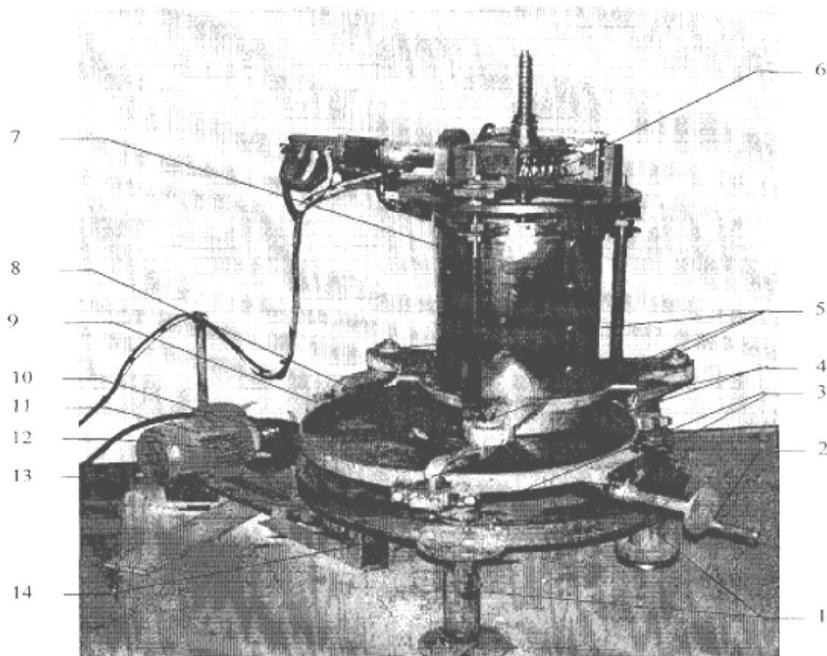


Рисунок 2.2 – Загальний вигляд установки для скручування чаю.

Прес ролера в закритому стані

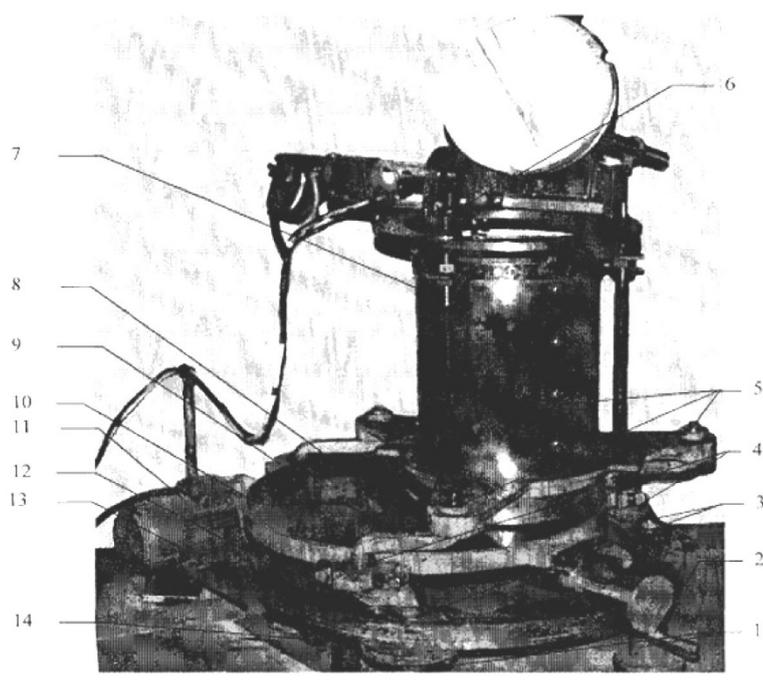


Рисунок 2.3 – Загальний вигляд установки для скручування чаю.

Прес ролера у відкритому стані

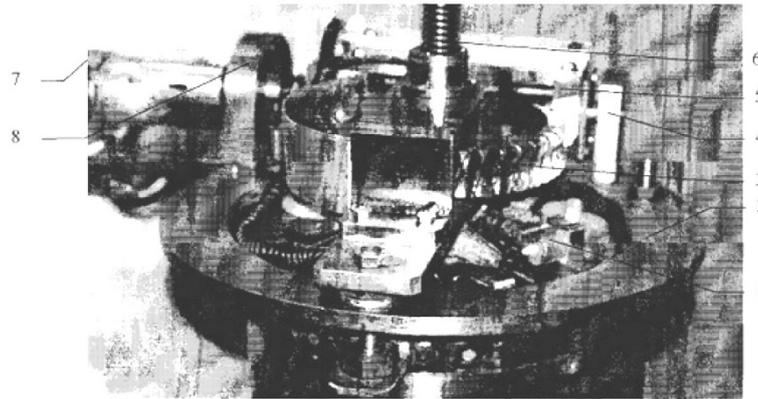


Рисунок 2.4 – Електропривод преса

Механічний зв'язок електродвигуна 7 з пресом здійснюється черв'ячно-гвинтовою передачею 3-6, встановленою на рухомій підставі 2, що повертається навколо підшипників 4 черв'яка 5 при верхньому положенні преса. Дана конструкція дозволяє забезпечити доступ оператора до внутрішньої поверхні завантажувального бака ролера для операції промивки.

Механічний прес ролера працює наступним чином. Крутний момент з валу двигуна 7 передається на черв'ячне колесо 3 через фрикційну муфту 8 і черв'як 5. При цьому ходовий гвинт – рейка 6 переміщує прес вгору або вниз в залежності від напрямку обертання валу електродвигуна. В крайньому верхньому положенні преса рухлива підстава 2 разом з черв'ячним колесом 3, ходовим гвинтом 6 і пресом відкидають вручну до упору. На підставі преса кріпиться гідравлічний датчик тиску 1.

Розглянемо конструкцію ролера. Привід столу здійснюється нерегульованим асинхронним двигуном.

Кінематична схема електроприводу преса ролера (рис. 2.5) включає в себе електродвигун 1, зубчасте колеса 2–5, напівмуфти запобіжної муфти 6, черв'як 7, черв'ячне колесо 8, гвинт-рейка Р, прес 10. Передавальні відносини елементів приводу зведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Передавальні відносини елементів електроприводу преса ролера

1-а ступінь редуктора	2-а ступінь редуктора	Черв'ячна передача	Черв'ячне колесо – гвинт – рейка	Загальне передавальне відношення
$\frac{33}{7} = 4,71$	$\frac{33}{9} = 3,67$	$\frac{40}{2} = 20$	$0,95 \cdot 10^3$ м/рад	345,71

Стосовно до розробленої конструкції ролера керування процесом скручування можна виконувати за рахунок зміни тиску в чайній масі, тобто шляхом керування приводом преса, тому під досліджуваним об'єктом керування будемо розуміти сукупність виконавчої системи, що складається з електродвигуна і механічної частини електроприводу преса ролера, що обертається, столу і чайної маси, що знаходиться в завантажувальному баку ролера.

Вектор вхідних координат об'єкту (рис. 2.6) включає в себе напругу $U_{я}$ на обмотці якоря двигуна постійного струму приводу преса і кутову швидкість ω_c валу асинхронного електродвигуна приводу столу ролера, які спостерігають вихідні координати – тиск P , переміщення преса $X_{вих}$ і температура Θ в чайній масі, основні збурення – зміна параметрів чайної маси γ і температури навколишнього середовища $\Theta_{дов}$

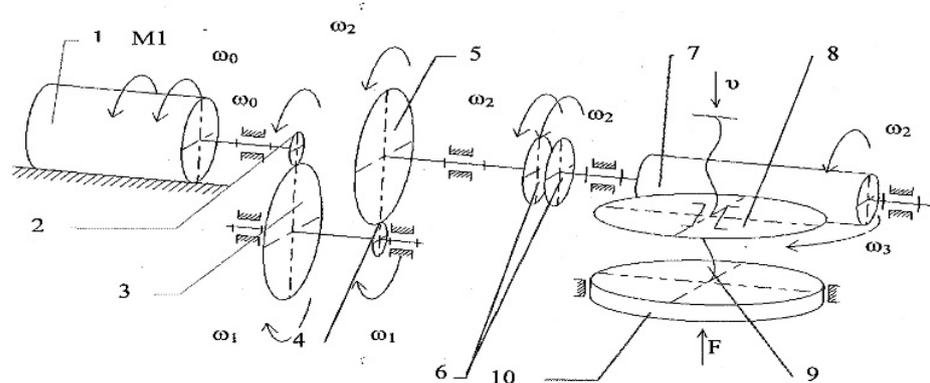


Рисунок 2.5–Кінематична схема привода преса

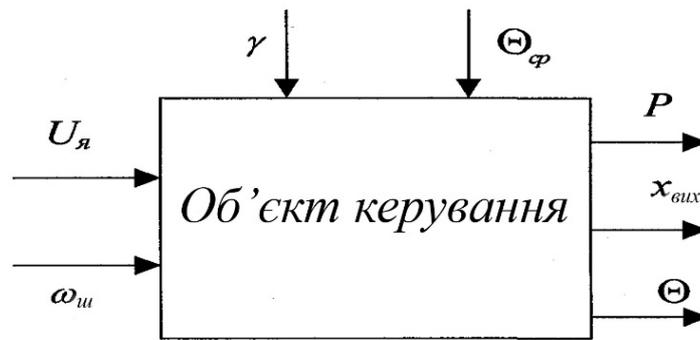


Рисунок 2.6 – Схема об'єкта керування

Величина переміщення преса порівнянна з рівнями деформацій ланок кінематичного ланцюга приводу, тому при дослідженні динаміки об'єкта керування будемо враховувати пружні деформації в приводі преса.

2.2 Розрахункові схеми і рівняння руху узагальненого об'єкта керування

При розробці розрахункової схеми приводу використовуємо загальноприйняті допущення [8]:

Передавальні ланки приводу представимо як зосереджені маси або моменти інерції, до яких прикладені зосереджені сили;

Дисипативні сили і моменти пропорційні швидкості деформацій відповідних пружних елементів.

Розрахункові жорсткості елементів електроприводу експериментального зразка ролера зведені в таблиці 2,2, де c_{12} і c_{34} – контактні жорсткості 1-ї і 2-ї передач редуктора відповідно, c_{23} , c_{45} і c_{67} – крутильні жорсткості валів між 1-ю і 2-ю передачами редуктора, редуктором і муфтою, муфтою і черв'яком відповідно, c_{56} – контактна жорсткість між напівмуфтами.

Електропривод преса реверсивний, черв'ячна передача працює як в тяговому режимі, так і в режимі гальмування. Тому значення коефіцієнтів

жорсткості c_{78} та ліанерізованого опору β_{78} в зачепленні черв'ячної передачі залежать від напрямку обертання (c'_{78} і c''_{78}) – контактна жорсткість з'єднання «черв'як – черв'ячне колесо» в тяговому режимі і режимі гальмування).

Жорсткість кінематичної пари «черв'ячне колесо – ходовий гвинт рейка» складається з двох складових [24]: контактної жорсткості зачеплення c'_{89} , і жорсткості на ходового гвинта c''_{89} . Значення c''_{89} – величина змінна, вона залежить від довжини L_p робочої ділянки гвинта від підстави преса до контактної зони гвинта та черв'ячного колеса. У таблиці 2.2 наведені максимальне і мінімальне значення жорсткості ходового гвинта–рейки.

Таблиця 2.2 – Значення коефіцієнтів жорсткості елементів електроприводу преса ролера

c_{12}	c_{23}	c_{34}	c_{45}	c_{56}	c_{67}	c'_{78}	c''_{78}	c'_{89}	c''_{89}
$5,5 \cdot 10^2$	$1,3 \cdot 10^3$	$1,9 \cdot 10^2$	$2,7 \cdot 10^3$	42,9	$1,4 \cdot 10^4$	$6,1 \cdot 10^5$	$8,9 \cdot 10^5$	$3,1 \cdot 10^9$	$8,8 \cdot 10^9$
кН·м	кН·м	кН·м	кН·м	кН·м	кН·м	кН·м	кН·м	кН·м	кН·м

Аналіз значень жорсткостей ланок кінематичного ланцюга приводу показує, що самим податливим елементом є запобіжна муфта, тому інші елементи електроприводу вважаємо абсолютно жорсткими.

На підставі кінематичної схеми і прийнятих припущень синтезована розрахункова схема приводу (рис. 2.7). Вона представлена послідовної ланцюжком пружно-дисипативних і інерційних елементів, де C_1 і D_1 – крутильна жорсткість і коефіцієнт демпфірування запобіжної муфти; C_2 і D_2 – лінійна жорсткість і коефіцієнт демпфірування чайної маси; m_1 – маса преса; $F_{\text{тпр}}$ – узагальнена сила тертя; $J_{\text{об}}$, $J_{\text{ред}}$, $J_{\text{м}}$ – моменти інерції двигуна, редуктора і муфти; $i_{\text{об}}$ – коефіцієнт передачі черв'ячне колесо – гвинт – рейка; $K_{\text{чп}}$ – передавальне відношення черв'ячної передачі.

Узагальнена сила тертя T_{mp} включає в себе кілька складових: вертикальне тертя об стінки завантажувального бака F_{mp1} , обертальне тертя об поверхню робочого столу ролера F_{mp2} , тертя всередині чайної маси (при зіткненні поверхонь окремого листа) F_{mp3} . отже, $F_{mp} = f_1(i, \gamma, \omega_{cm}, \chi_{cm})$ $i \in 1, 2, \dots, n$ – число циклів навантаження; γ – властивості чайної маси, ω_{cm} – швидкість обертання столу, χ_{cm} – показник форми столу.

Силу внутрішнього тертя представимо силою демпфірування, яка лінійно залежить [49] від деформацій чайної маси. Сили тертя F_{mp1} , і F_{mp2} уявімо еквівалентною силою F_{mp3} . Введені допущення дозволяють скласти рівняння балансу сил, що діють на чайну масу:

$$\left\{ \begin{array}{l} F_i(t) = P_i(t) + P_{np}(t) + P_\delta(t) + F_{mpe}(t) \\ F_i(t) = m \frac{d^2 x_{II}}{dt^2} \\ F_{np}(t) = C_2 - x_{II} \\ F_\delta(t) = D_2 \frac{dx_{II}}{dt} \\ F_{mpe}(t) = K_{mpe} \frac{dx_{II}}{st} \end{array} \right. ; \quad (2.1)$$

де: m – маса чайного листа;

F_4 – зусилля преса;

P_i – сили інерції;

P_{np} – сили пружності чайної маси;

$P_{\delta a}$ – сили демпфірування чайної маси;

K_{mpe} – еквівалентний коефіцієнт тертя;

x_{II} – вісьова деформація чайної маси.

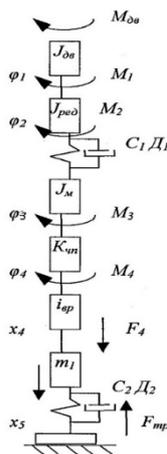


Рисунок 2.7 – Розрахункова схема об'єкта керування

Допускаючи, що сили і моменти демпфірування в пружних ланках кінематичного ланцюга приводу лінійно залежать від швидкості відповідних деформацій [9,11], динаміку виконавчого приводу преса можна описати системою диференціальних рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 U_{\text{я}} = R_{\text{я}} I_{\text{я}} + L_{\text{я}} \frac{dI_{\text{я}}}{dt} + C_{\partial} \Phi \omega_{\partial} \\
 M_{\partial\text{в}} = C_{\partial} \Phi I_{\text{я}} \\
 M_1 = M_{\partial\text{в}} - J_{\partial\text{в}} \frac{d^2 \varphi_1}{dt^2} \\
 M_2 = M_1 - K_{\text{ред}} \\
 M_2 = C_1 \cdot \varphi_1 + D_1 \frac{d\varphi_1}{dt} + J_M \frac{d\varphi_3}{dt^2} \\
 M_3 = M_2 - J_M \frac{d^2 \varphi_3}{dt^2} \quad ; \\
 M_4 = M_3 \cdot K_{\text{чп}} \\
 F_{\text{cep}} = \frac{M_4}{K_{\text{MF}}} \\
 K_{\text{MF}} = \frac{\Delta M}{\Delta F} = \frac{d_{\text{cep}}}{2} \operatorname{tg}(\alpha + \varphi) \\
 x_4 = i_{\text{пер}} \cdot \varphi_4 \\
 \varphi_1 = \varphi_1 - \varphi_3
 \end{array} \right. \quad (2.2)$$

де перші три рівняння описують динаміку електродвигуна постійного струму приводу преса. Тут $U_{я}, R_{я}, I_{я}$ – напруга, активний опір і струм якірного ланцюга; $\omega_{об}$ – кутова швидкість двигуна; C_b, Φ – конструктивний коефіцієнт і магнітний потік двигуна; $\dot{I}_{\partial\partial}$ – електромагнітний момент, що розвивається машиною; $M_1, M_2, M_3, M_4, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$ – моменти і кути, відповідні розрахунковій схемі; $K_{ред}$ – коефіцієнт передачі зубчастого редуктора, K_{MF} – коефіцієнт черв'ячної передачі, $i_{пер}$ – коефіцієнт передачі черв'ячне колесо – гвинт-рейка; K_{MF} коефіцієнт, що зв'язує крутний момент гвинта з зусиллям подачі; x_4 – переміщення преса; $d_{сер}$ – середній діаметр ходового гвинта; α – кут нахилу різьблення гвинта; φ – кут тертя гвинта.

Допускаючи, що сили демпфірування в чайній масі лінійно залежать від швидкості відповідних деформацій, скористаємося такою системою диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} F_4 = m_1 \frac{d^2 x_4}{dt^2} + D_2 \frac{dx_{II}}{dt} + C_2 x_{II}; \\ x_{II} = x_4 - x_5 \end{cases} \quad (2.3)$$

де: x_5 – точка упору чайної маси в стіл ролера.

При зрізанні чайної маси рифами столу зменшується її обсяг. При цьому вісьове переміщення змінюється на величину x_{II} . Опис динаміки процесу різання чайної маси виконано за аналогією з процесом фрезерування [24]. Сила різання залежить в основному від глибини різання. При цьому спостерігається перехідний процес, відповідний аперіодичній ланці [15,18]. Динамічна характеристика різання:

$$W_p(p) = k_p (1 - e^{-p\tau}) / (Tp + 1); \quad (2.4)$$

де: k_p – коефіцієнт різання, $k_p = k \cdot b$, k – сила різання. Pa, b – ширина проникнення ріжучого інструменту, мм, τ – час повороту фрези на 1 зуб,

$$\tau = \frac{60}{n \cdot S} =, n - \text{частота обертання, } S - \text{число зубів, } T - \text{постійна часу стружко-}$$

утворення, $T = \frac{l_p}{V}$, l_p – шлях руху різця, що визначає формування сили різання, мм, V – швидкість різання, мм/с.

Сукупність рівнянь (2.1) – (2.3) являє собою математичний опис узагальненого об'єкта керування. Об'єднуючи їх та вважаючи початкові умови нульовими, перейдемо в цих рівняннях до зображення по Лапласу [23]. Отримаємо:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{\text{я}}(p) = R_{\text{я}}(T_{\text{е}}p + 1)I_{\text{я}}(p) + C_0\Phi\omega_0(p) \\ M_{\text{дв}}(p) = C_0\Phi I_{\text{я}}(p) \\ M_1(p) = M_{\text{дв}}(p) - J_{\text{я}}p^2\varphi_1(p) \\ M_2(p) = M_1(p) \cdot K_{\text{ред}} \\ M_2(p) = C_1(T_1p + 1)\varphi_1(p) + J_{\text{м}}p^2\varphi_3(p) \\ M_3(p) = M_2(p) - J_{\text{м}}p^2\varphi_3(p) \\ M_4(p) = M_3(p) \cdot K_{\text{чп}} \quad ; \\ F_4(p) = \frac{M_4(p)}{K_{\text{мф}}} \\ F_4(p) = m_1p^2x_4(p) + C_2(T_2p + 1)x_{\text{п}}(p) \\ \varphi_1(p) = \varphi_2(p) - \varphi_3(p) \\ x_4(p) = i\varphi_4(p) \\ x_{\text{п}}(p) = x_4(p) - x_5(p) \end{array} \right. \quad (2.5)$$

де: T_1, T_2 – постійні часу $T_i = \frac{D_i}{C_i}$.

Системи рівнянь (2.4–2.5) дозволяють побудувати структуру об'єкта керування (рис. 2.8), в якій виділено дві вимірювані вихідні координати: переміщення преса $X_{\text{max}} = X_4$ і тиск на чайну масу P_s , яке пов'язане з силою F_4

співвідношенням $P = \frac{F_4}{S_n}$, де S_n – площа преса.

$$\text{Тут: } M_{11} = J_{\text{дв}} \frac{d^2\varphi_1}{dt^2}, \quad M_{12} = J_{\text{м}} \frac{d^2\varphi_3}{dt^2}.$$

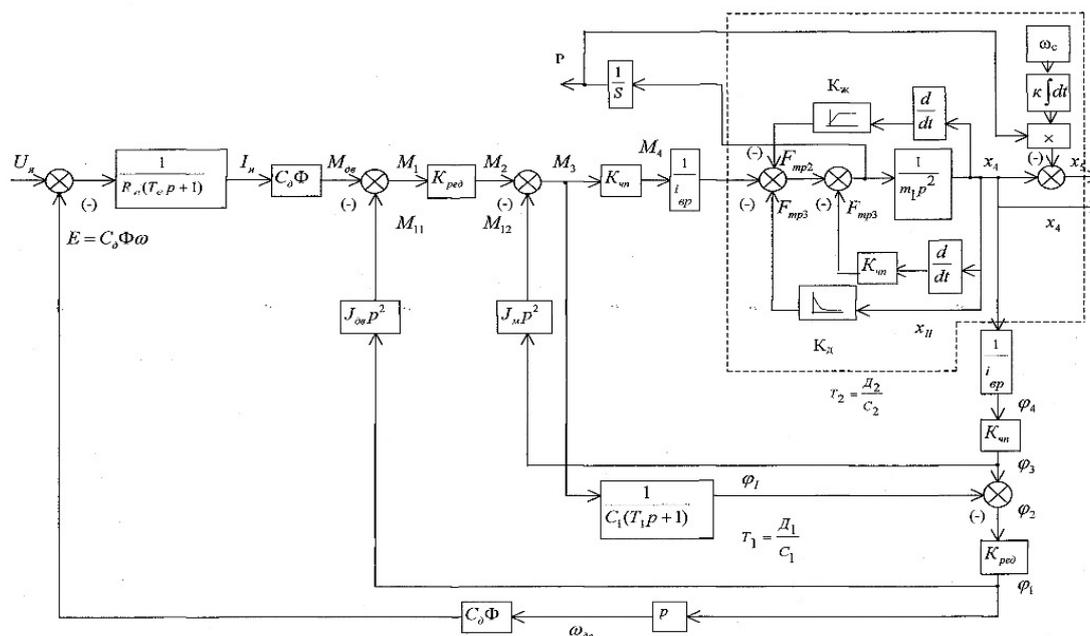


Рисунок 2.8 – Структурна схема об'єкта керування

Виділимо в структурі об'єкта керування частину, що відображає процес деформації чайної маси та формування в ній тиску для більш докладного розгляду.

2.3 Особливості чайної маси як елемента об'єкта керування

Розрахункова схема частини об'єкта керування, що відображає процес деформації чайної маси та формування в ній тиску, наведена на рисунку 2.9. Вона включає в себе масу преса ролера і масу чайного листа, рівномірно розподілену за обсягом ролера. В силу малих швидкостей і прискорень переміщення чайного листа його інерційними властивостями можна знехтувати. Тому в розрахунковій моделі маса чаю не враховується.

Відомо, що пружні та демпфірувальні властивості C_2 і D_2 чайного листа змінюються в процесі переробки.

Досвідченим шляхом на експериментальному зразку ролера встановлена залежність жорсткості C чайної маси від переміщення преса x для i -го циклу навантаження (рис. 2.10). Згідно із законом, близькому до

лінійного, жорсткість зростає до значення C_i^k , відповідної критичної величини переміщення x_k , після чого жорсткість практично не змінюється.

Аналітично цю залежність можна описати виразом:

$$C_i = \begin{cases} C_i^0 & \text{при } x = 0 \\ C_i^0 + \alpha_i \cdot x & \text{при } 0 < x \leq x_k; \\ C_i^k & \text{при } x > x_k \end{cases} \quad (2.6)$$

де: $i = 1, 2, 3$ – номер етапу переробки;

$0, k$ – початковий і кінцевий коефіцієнти;

α_i – коефіцієнт нахилу графіка залежності жорсткості від переміщення преса.

Значення коефіцієнта демпфірування чайної маси також залежить від переміщення преса x (рис. 2.11). Згідно із законом, близькому до лінійного, величина цього коефіцієнта зменшується до значення D_i^k досягаючи мінімальної величини при критичному значенні переміщення x_k , після чого практично не змінюється:

$$D_i = \begin{cases} D_i^0 & \text{при } x = 0 \\ D_i^0 + \beta_i \cdot x & \text{при } 0 < x \leq x_k; \\ D_i^k & \text{при } x > x_k \end{cases} \quad (2.7)$$

де: β_i – коефіцієнт нахилу графіка залежності коефіцієнта демпфірування від переміщення.

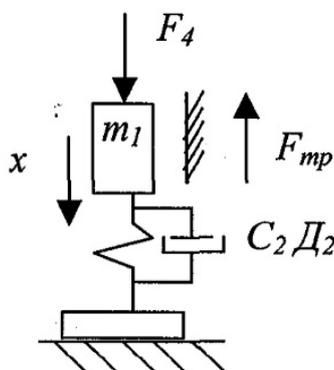


Рисунок 2.9 – Розрахункова схема преса ролера і чайної маси

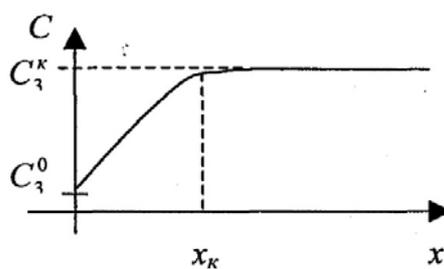


Рисунок 2.10 – Залежність жорсткості чайної маси від переміщення преса ролера

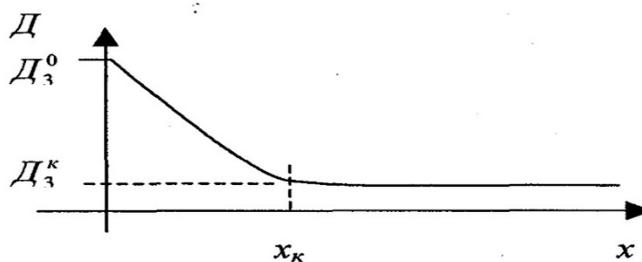


Рисунок 2.11 – Залежність коефіцієнта демпфірування чайної маси від переміщення преса ролера

Експериментально встановлено початкові значення коефіцієнтів жорсткості C^0 та x_k для кожного з етапів переробки: $C_1^0 = 2,6 \cdot 10^3$ Н/м, $C_2^0 = 3,7 \cdot 10^3$ Н/м, $C_3^0 = 5 \cdot 10^3$ Н/м. Значення інших параметрів визначалися при оцінці адекватності аналітичної моделі і натурального зразка.

Оцінка адекватності об'єкта керування здійснювалася в двох режимах:

1. При стрибкоподібному зміні тиску – швидко що протікає процес.
2. При стабілізації тиску – повільно протікають процеси, викликані ущільненням чайної маси за рахунок її обертового руху в ролерів.

Для оцінки адекватності в першому режимі порівнювалися перехідні характеристики, отримані в результаті натурних експериментів з перехідними характеристиками обчислювальних експериментів.

Ущільнення чайного листа в обчислювальній моделі моделювалася шляхом зміни коефіцієнтів жорсткості C та демпфірування D чайної маси.

Відомо, що ці два параметри змінюються в часі, але стосовно до обчислювальної моделі в якості вісі абсцис (рис. 2.10, 2.11) приймається величина ущільнення (допускаємо, що переміщення преса x лінійно залежить від часу t), а вісі ординат – пружність C і коефіцієнт демпфірування D чайної маси по відношенню до зовнішньої сили ΔF .

Шляхом постановки серії експериментів на обчислювальній моделі було показано, що найбільш повний збіг моделі і натурального зразка об'єкта відбувається на першому етапі ($i = 1$) при зміні коефіцієнта жорсткості C і коефіцієнта демпфірування D від $C_1^0 = 2,6 \cdot 10^3 \text{ Н/м}$ і $D_1^0 = 1040,2 \text{ Н}\cdot\text{с/м}$ до $C_1^k = 2,810^6 \text{ Н/м}$ і $D_1^k = 24,4 \text{ Н}\cdot\text{с/м}$, при цьому $\Delta x_1 = 0,11 \text{ м}$; на другому етапі ($i = 2$) м від $C_2^0 = 3,7 \cdot 10^3 \text{ Н/м}$ і $D_2^k = 1090,5 \text{ Н}\cdot\text{с/м}$ до $C_2^k = 4,1 \cdot 10^6 \text{ Н/м}$ і $D_2^k = 36,6 \text{ Н}\cdot\text{с/м}$, при цьому $\Delta x_2 = 0,13 \text{ м}$; на третьому етапі ($t = 3$) від $C_3^0 = 5 \cdot 10^3 \text{ Н/м}$ і $D_3^0 = 1140,3 \text{ Н}\cdot\text{с/м}$ до $C^k = 6,5 \cdot 10^6 \text{ Н/м}$ і $D = 44,2 \text{ Н}\cdot\text{с/м}$, при цьому $\Delta x_3 = 0,14 \text{ м}$.

Таким чином, виконані натурні та обчислювальні експериментальні дослідження, що підтвердили відомий з публікацій факт, про змінності параметрів чайної маси в процесі скручування та дозволили чисельно оцінити характеристики нелінійності та нестационарності об'єкту.

2.4 Теплові процеси в чайній масі

Відомо [15], що якість одержуваного чаю залежить від інтенсивності ферментативного перетворення фенольних сполук в чайній масі. Дослідженнями в області біохімії чаю встановлено, що швидкість перетворення фенольних сполук залежить від безлічі факторів, що визначають серед яких є температура, вологість та концентрація фенольних сполук в чайній сировині.

Зміна температури чайної маси в ролері є наслідком зміни внутрішньої енергії системи як результату трьох типів процесів, таких як:

1. Процеси внутрішнього тертя чайного листа в ролері.

2. Процеси зовнішнього тертя чайного листа об стінки і стіл ролера.
3. Хімічні ферментативні процеси, зумовлені внутрішньою структурою чайного листа.

Експериментальним дослідженням процесів внутрішнього і зовнішнього тертя чайного листа та механічних елементів ролера присвячена робота [8]. Під внутрішнім тертям розуміється узагальнення тертя ковзання, кочення (перекочування), зчеплення, прилипання, а також деформації елементів листа (розтягнення, вигин, крутіння), що виникають при відносному зсуві маси.

На підставі узагальнення, результатів, отриманих в [18], у магістерській роботі були побудовані графічні залежності коефіцієнтів внутрішнього і зовнішнього тертя від часу (рис. 2.12–2.13). Їх аналіз дозволив зробити наступні висновки:

1. Коефіцієнти внутрішнього і зовнішнього тертя чайної маси в процесі скручування несуттєво змінюються.

2. На початковій стадії процесу коефіцієнт внутрішнього тертя збільшується, досягаючи максимального значення, потім зменшується (рис. 2.12) на кожному з етапів скручування, що підтверджує зменшення інтенсивності скручування після певного періоду.

3. Коефіцієнт внутрішнього тертя чайного листа завжди більше одиниці. Коефіцієнт зовнішнього тертя завжди менше одиниці, а при тривалому контакті його величина зменшується (рис. 2.13).

Досліджуємо залежність коефіцієнтів внутрішнього тертя від часу (рис. 2.12) більш детально. В якості базових точок вибираємо початок процесу скручування ($t_0 = 0$) і точку найбільш інтенсивного процесу при ($t_n = 35$ хв.) при максимальному значенні коефіцієнтів внутрішнього тертя.

$$\Delta f = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{f_{\text{сеп}}} 100\%; \quad (2.8)$$

де: f_{\max} , f_{\min} та $f_{\text{сер}}$ – максимальне, мінімальне та середнє значення коефіцієнтів внутрішнього тертя.

Для кожного з етапів скручування $i = 1, 2, 3$ розрахуємо значення Δf на етапі зростання абсолютних значень коефіцієнтів тертя:

$$\Delta f_1 = 1,89\%, \Delta f_2 = 1,5\%, \Delta f_3 = 1,03\%.$$

На етапі зменшення абсолютних значень коефіцієнтів тертя:

$$\Delta f_1 = 1,63\%, \Delta f_2 = 1,68\%, \Delta f_3 = 2,0\%.$$

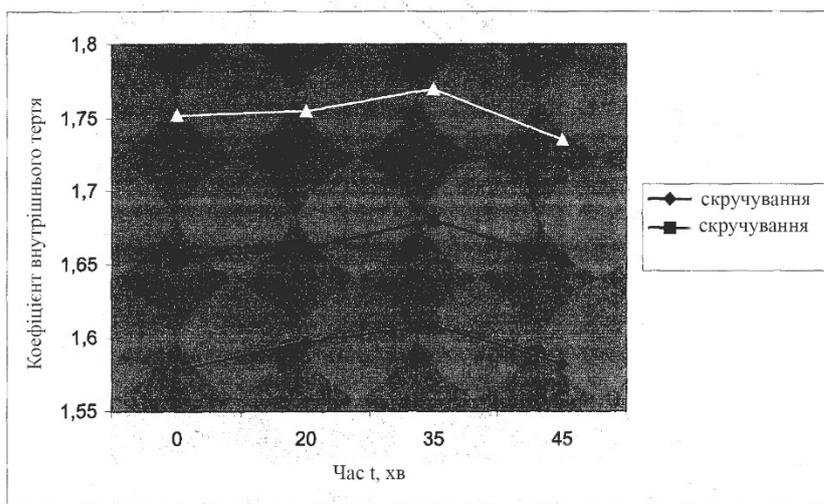


Рисунок 2.12 – Залежність коефіцієнтів внутрішнього тертя від тривалості контакту

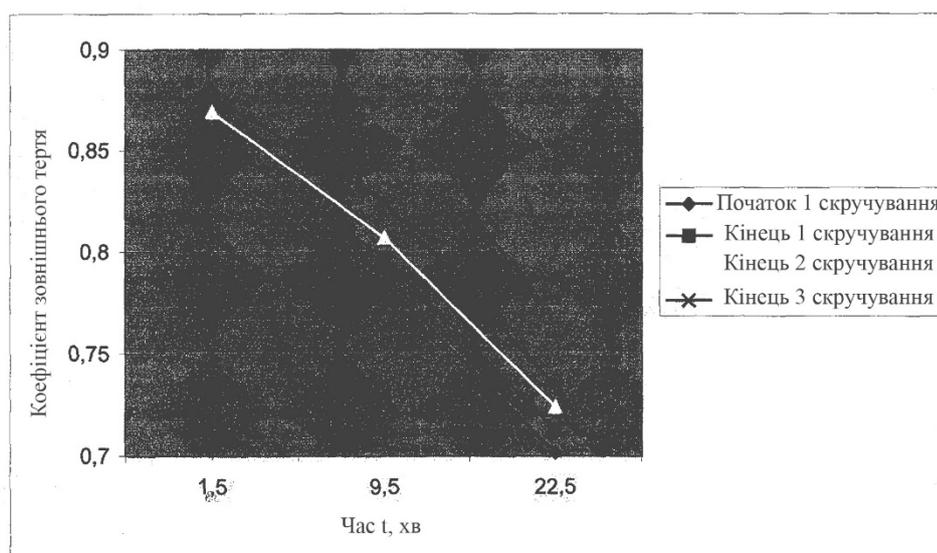


Рисунок 2.13 – Залежність коефіцієнтів зовнішнього тертя від тривалості контакту

Очевидно, що найбільш інтенсивний процес спостерігається на всіх етапах скручування в один і той же часовий відрізок. Розрахуємо відносне відхилення коефіцієнтів тертя на кожному з етапів по формулі:

Таким чином, в першому наближенні при побудові аналітичної моделі коефіцієнти внутрішнього тертя можна вважати постійними зважаючи на невеликі відхилення на кожному з етапів переробки. Вважаємо можливим використання інформації про зміну знаку похідної коефіцієнта внутрішнього тертя по часу для автоматичного визначення часу закінчення кожного технологічного етапу. Обґрунтуванням такого підходу служить той факт, що з робіт за технологією виробництва чаю слідує, що при зменшенні коефіцієнта внутрішнього тертя інтенсивність процесів скручування і ферментації зменшується.

Досліджуємо залежності зовнішнього тертя від часу. Значення коефіцієнта зовнішнього тертя залежать від матеріалу, з якого виготовлені стінки та стіл ролера. На промислових установках завантажувальний бак і стіл виготовляються, як правило, з нержавіючої сталі. Залежність коефіцієнтів зовнішнього тертя від тривалості контакту чайної маси по сталі приведена на рисунку 2.13. Зміна коефіцієнта тертя в одиницю часу на кожному з етапів складає $\Delta f_1 = 7,6 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$, $\Delta f_2 = 7,7 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$, $\Delta f_3 = 7,8 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$ на проміжку часу від $t = 1,5 \text{ c}$ до $t = 9,5 \text{ c}$ і $\Delta f_1 = 6,5 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$, $\Delta f_2 = 6,4 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$, $\Delta f_3 = 6,2 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$ на проміжку часу від $t = 9,5 \text{ c}$ до $t = 22,5 \text{ c}$. Аналіз цих значень дозволяє зробити висновок про те, що коефіцієнт зовнішнього тертя змінюється на кожному з етапів скручування по законом, близьким до експоненціального.

У загальному випадку сила тертя може бути представлена наступним чином:

$$f_{\text{тп}}(t) = f_{\text{мп}}(t) \cdot N_{\sigma}; \quad (2.9)$$

де: N_{σ} – сила, що забезпечує переміщення чайної маси в ролері;

$N_{\sigma} = F_4 + F$ – сила тиску преса;

F – сила реакції з боку рухомого столу ролера

$f_{\text{мп}}(t)$ – узагальнений коефіцієнт тертя;

$f_{\text{мп}}(t) = f_{\text{мпвн}}(t) + f_{\text{мпзов}}(t)$, $f_{\text{мпвн}}(t)$, $f_{\text{мпзов}}(t)$ – коефіцієнт внутрішнього і зовнішнього тертя.

Енергія, що надходить в систему від сил тертя, дорівнює роботі цих сил за час процесу скручування:

$$Q_{\text{мп}}(t) = A_{\text{мп}}(t) = \int_0^{l_k} F_{\text{мп}}(t) dt = \int_0^{l_k} f_{\text{мп}}(t) N_{\text{с}} dt; \quad (2.10)$$

Чисельна оцінка силового впливу рухомого столу є складною, тому запропонуємо альтернативний варіант визначення енергії, що витрачається на процеси внутрішнього і зовнішнього тертя в чайній масі. Вся енергія, що надходить в систему від зовнішніх джерел, до яких відносяться електродвигуни приводів преса і столу ролера, витрачається на механічне переміщення чайної маси і втрати через стінки завантажувального бака, стіл та прес ролера. Втрати тепла $Q_{\text{втр}}$ залежать не тільки від процесів тертя в системі, а й від теплових процесів, які розглянемо пізніше.

Енергія $Q_{\text{нс}}$, що надходить в систему чайної маси – завантажувальний бак ролера від електродвигуна приводу столу ролера, визначається потужністю $N_{\text{см}}$ та коефіцієнтом корисної дії електроприводу столу $\eta_{\text{см}}$:

$$Q_{\text{нс}}(t) = \int_0^{l_k} N_{\text{см}}(t) \cdot \eta_{\text{см}} dt; \quad (2.11)$$

Енергія $Q_{\text{пн}}$, що надходить в систему від електродвигуна електроприводу преса визначається тиском P преса на чайну масу і його переміщенням x_5 , площею контакту поверхні преса і чайної маси S :

$$Q_{\text{пн}}(t) = \int_0^{l_k} P(t) \cdot S \cdot x_5(t) dt; \quad (2.12)$$

Закономірності перенесення тепла визначаються теплофізичними константами та фізико-механічними властивостями продукту, що переробляється.

Визначення значень теплофізичних параметрів, встановлення їх функціональної залежності від зміни структурних властивостей сировини в процесі його переробки лежать в основі розрахунку і вибору оптимальних режимів скручування, ферментації і сушки чаю.

У роботах [5, 8] вказується, що підвищення температури Θ в чайній масі під час процесу скручування робить негативний вплив на процеси ферментації, а $\Theta = 34^{\circ}\text{C}$ є критичною температурою, при перевищенні якої чайний лист втрачає нормальний стан. Тому вони пропонують обмежувати температуру за допомогою охолодження завантажувального бака ролера. Але це твердження суперечить робіт інших дослідників [22], які на підставі виконаних експериментальних досліджень стверджують, що оптимальною температурою в технологічному процесі скручування є $\Theta = 40 \pm 2^{\circ}\text{C}$. Залежність відновлювальної та окисної активності ферментів чайної рослини від температури приведена на рисунку 2.14. Зазвичай при проведенні скручування температура в ролерному цеху становить $22\text{--}24^{\circ}\text{C}$, температура в чайній масі не перевищує $34 \pm 2^{\circ}\text{C}$ [16], то на початковому етапі досліджень вважаємо за можливе відмовитися від обмежень, що накладаються на температуру чайної маси згідно з першою гіпотезою.

При створенні певних температурних та вологісних умов можливо поєднати процеси скручування і ферментації в один процес.

При цьому, по-перше, виключається необхідність використання спеціальних пристроїв для ферментації (в умовах малооб'ємного виробництва є економічно вигідним), а, по-друге, значно полегшується рішення завдання автоматизації процесів виробництва чаю. Тому пошук методів, що дозволяють одночасно завершувати зазначені процеси без збитку для якості чаю, представляє великий практичний інтерес.

Одним з таких методів слід вважати проведення процесу скручування в умовах підвищеної температури повітря в приміщенні до $\Theta_c = 27\text{--}29^\circ\text{C}$ і підвищеній відносній вологості повітря до 90–95%, що дозволяють підвищити температуру в масі скручування скручуючого листа до $\Theta = 40 \pm 2^\circ\text{C}$. Підвищення температури до оптимальної можна досягти також шляхом нагрівання стінок ролера, або напрямком в завантажувальний бак ролера помірному струменю кондиціонованого повітря необхідної температури і вологості на весь період скручування листа.

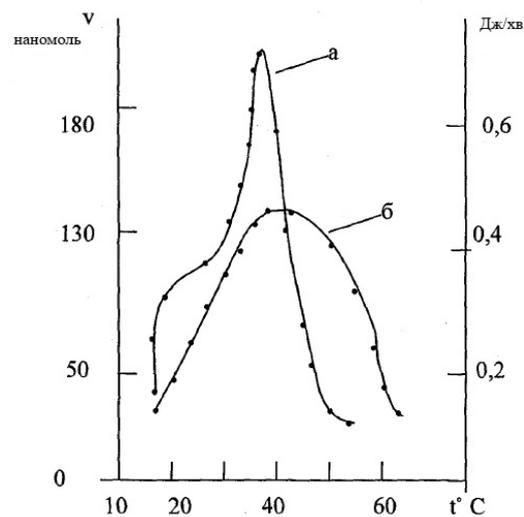


Рисунок 2.14 – Залежність відновлювальної та окисної активності ферментів чайної рослини від температури

Технологічні експериментальні дослідження залежності якості одержуваного продукту від температурних умов, виконані в [21], показали, що:

1. Температура в чайній масі в ролері при проведенні процесів скручування при температурі навколишнього середовища до $\Theta_c = 27\text{--}29^\circ\text{C}$ досягає $36\text{--}38^\circ\text{C}$.

а) температуропровідності α , б) теплоємності c , в) теплопровідності λ

2. Скручування при температурі навколишнього середовища до $\Theta_c = 27-29^\circ\text{C}$ не викликає погіршення якості чаю, а, навпаки, спостерігається певна тенденція до поліпшення якісних показників чорного байхового чаю.

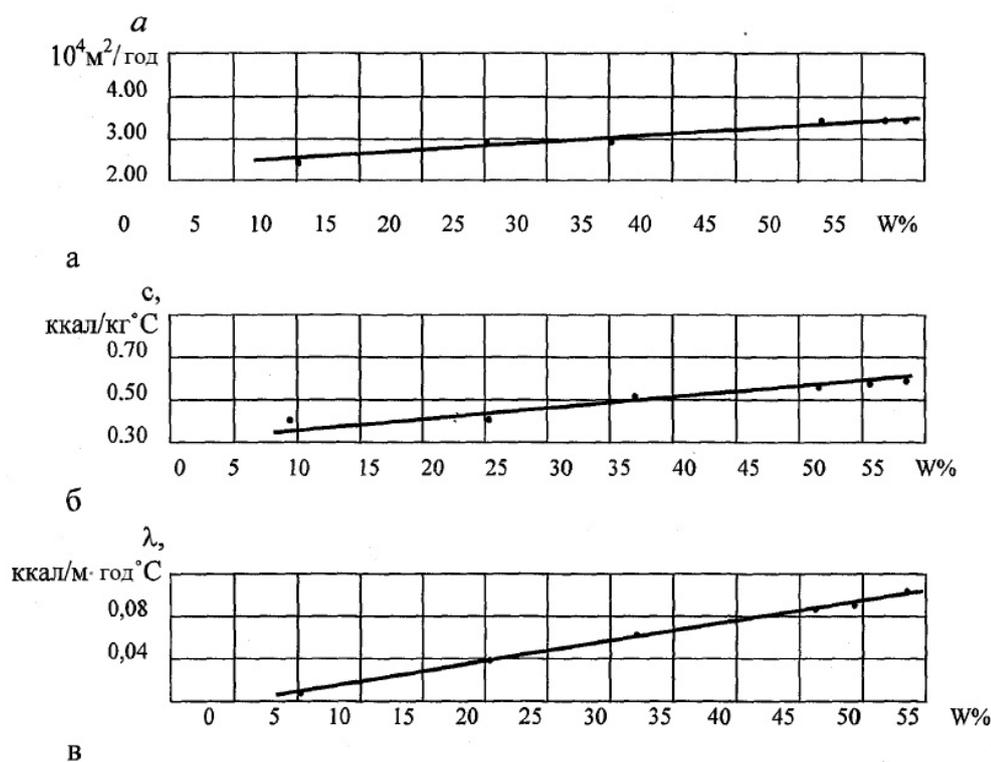


Рисунок 2.15 – Функціональна залежність між вмістом вологи $w\%$ і теплофізичними коефіцієнтами

3. Скручування в вищевказаних повітряно-температурних умовах дозволяє при прийнятій у виробництві кратності і тривалості скручування одночасно закінчити процеси скручування і ферментації основної маси листа, за винятком фракцій першого і другого скручувань.

4. Застосування встановленої температури дозволяє скоротити тривалість ферментації на 1,5–2 години, що полегшує створення потокової лінії виробництва чорного чаю.

Ці результати дозволяють висунути гіпотезу по аналітичному конструюванню технологічного процесу, згідно якого можливі наступні технологічні зміни:

1. Проведення одного скручування замість трьох без проміжних операцій вивантаження і сортування сировини.

2. Завершення процесу скручування при зменшенні інтенсивності процесу.

3. Відмова від ферментації як від самостійної операції в технології первинної переробки чаю після завершення процесу скручування.

Підвищення температури в приміщенні, де встановлений ролер, веде до великих енерговитрат, а також до значного погіршення умов праці.

Тому вважаємо за доцільне вивчення законів зміни температури в чайній масі і розгляд альтернативних варіантів підвищення температури в чайній масі в процесі скручування.

При вивченні наукових джерел не було виявлено будь-яких досліджень в області чисельної оцінки теплофізичних властивостей чайної маси в процесі скручування, однак існують експериментальні дослідження [22] зазначених властивостей в процесі сушіння скрученого та ферментованого чайного листа при виробництві чорного байхового чаю. З них слідує:

1. Теплофізичні коефіцієнти чайної маси ферментованого чайного листа в процесі сушіння змінюються.

2. Зі зменшенням вмісту вологи в чаї коефіцієнти переносу тепла зменшуються.

3. Функціональна залежність між вмістом вологи $w\%$ і теплофізичними коефіцієнтами (температуропровідності a , теплоємності c і теплопровідності λ) лінійна (рис. 2.15) і виражається формулами:

$$\begin{aligned} a &= (2,5 + 0,0166w\%)10^{-4}; \\ c &= 0,3 + 0,00533w\%; \\ \lambda &= 0,004 + 0,00146w\%; \end{aligned} \quad (2.13)$$

4. Функціональна залежність тепловологопровідності δ від вологості $w\%$ нелінійна, вона представлена на рисунку 2.16.

Дані дослідження дозволяють висунути припущення про не стаціонарність теплофізичних властивостей чайного листа не тільки в процесі його сушки, але і в процесі скручування.

Відомо [22] рівняння Арреніуса, що дозволяє зв'язати енергію активації хімічної реакції і температуру:

$$k = Ae^{\left(\frac{Q(t)}{R\Theta(t)}\right)}; \quad (2.14)$$

де: k – константа швидкості хімічної реакції;

R – універсальна газова постійна;

A – постійний коефіцієнт;

$Q(t)$ – енергія активізації як функція часу;

$\Theta(t)$ – температура в чайній масі як функція часу.

Шляхом нескладних перетворень знайдемо з (2.14) вираз для енергії активації:

$$Q(t) = R\Theta(t) \ln\left(\frac{A}{k}\right); \quad (2.15)$$

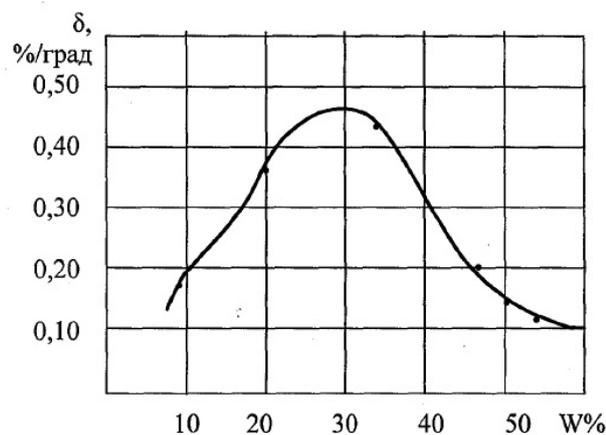


Рисунок 2.16 – Функціональна залежність тепловологопровідності δ від вологості $w\%$

Хімічні процеси в чайній масі можуть бути представлені пропорційною ланкою з коефіцієнтом пропорційності $K_{пр}$:

$$K_{np} = K \ln \left(\frac{A}{k} \right); \quad (2.16)$$

Відоме [19] диференціальне рівняння теплового балансу, яке описує залежність між температурою, часом, координатами та енергією в деякому обсязі:

$$\left\{ \begin{array}{l} C_p(\Theta, t) \rho(\Theta, t) \frac{\partial \Theta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(\Theta, t) \frac{\partial \Theta}{\partial x} \right) - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda(\Theta, t) \frac{\partial \Theta}{\partial r} \right) = Q_{\Sigma} \\ Q_{\Sigma} = Q_{nc} + Q_{nn} + Q_p - Q_n \\ Q_n = Q_{cm} + Q_{ctil} + Q_{np} \\ \text{при } t > 0; 0 < r < R; 0 < x < L; \\ \Theta(r, x) \Big|_{t=0} = \Theta \quad \forall x, t; \quad \frac{\partial \Theta}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0 \quad \forall t \in (0, \infty) \\ \lambda(\Theta, t) \frac{\partial \Theta}{\partial r} \Big|_{r=R} = \Theta_{cm} \quad \forall x, t; \quad \lambda(\Theta, t) \frac{\partial \Theta}{\partial x} \Big|_{x=0} = \Theta_{ctil} \\ \lambda(\Theta, t) \frac{\partial \Theta}{\partial x} \Big|_{x=L} = \Theta_{np} \quad \forall r, t \end{array} \right. ; \quad (2.17)$$

де: $c_{сер}$ – об'ємна ізобарна теплоємність чайної маси;

λ – коефіцієнт теплопровідності чайної маси;

$\Theta = f(r, x, t)$ – температура в точці чайної маси;

Θ_i – температура навколишнього середовища;

t – час процесу;

x – координата точки по висоті завантажувального бака;

R – радіус завантажувального бака;

r – координата точки по радіусу завантажувального бака;

L – висота завантажувального бака;

Q_{Σ} – сумарна енергія, що надходить в систему з боку зовнішніх і

внутрішніх джерел;

$Q_{\Sigma} = Q_{nc} + Q_{mn}$, Q_p – енергія, яка надходить в систему від хімічних реакцій в чайній масі;

Q_{cm} – втрати через стінки завантажувального бака;

$Q_{стїл}$ – втрати через стїл ролера;

$Q_{пр}$ – втрати через прес ролера.

Таким чином, температура чайної маси визначається різницею між енергією Q_{Σ} , що надійшла в систему і енергією втрат Q_n .

Зовнішніми джерелами енергії є електродвигуни електроприводу столу і електроприводу преса, що забезпечують механічне переміщення чайної маси.

До внутрішніх джерел відноситься енергія, що виділяється за рахунок хімічних ферментативних реакцій, що протікають в чайній масі. Природа зазначених реакцій вивчена досить [22], проте, чисельна оцінка залежності температури від протікання окислювальних процесів утруднена через різні концентрації ферментів в кожній партії чайної маси. Тому чисельну оцінку енергії хімічної реакції в процесі скручування можна виконати лише наближено.

Втрати тепла в системі Q_n складаються з втрат через стінки завантажувального бака Q_{cm} , через стїл ролера $Q_{стїл}$ і прес $Q_{пр}$.

Тепловий потїк з бїчної поверхні завантажувального бака, поверхні столу і преса в навколишнє середовище відбувається за законом Ньютона. Чисельні значення втрат можна оцінити за формулою:

$$Q_n = \sum_{i=1}^3 \int_0^{l_k} \alpha_1 S_1 (\Theta_n - \Theta_c) dt; \quad (2.18)$$

де: α_1 – коефіцієнт теплопровідності матеріалу, що стикається з чайною масою;

S_1 – площа поверхні контакту;

i – індекс, що відноситься до параметрів завантажувального бака ($i = 1$), поверхні столу ($i = 2$) або преса ($i = 3$);

Θ_n – температура на внутрішній поверхні матеріалу;

Θ_c – температура навколишнього середовища.

З експериментальних досліджень [20] відомо, що в процесі первинної переробки чаю за класичною ортодоксальною технологією температура в чайній масі за весь період кожного етапу скручування ($t_{\text{ycm}} = 45$ хв.) змінюється з $24\text{--}26^\circ\text{C}$ до $34\text{--}36^\circ\text{C}$, причому на початку процесу спостерігається більш активне зростання температури, ніж при його завершенні. На підставі цих досліджень та відому інерційність теплових процесів, враховуючи активний масо-і тепло-переніс в чайній масі в процесі скручування, в першому наближенні можна використовувати середню температуру чайної маси $\bar{\Theta}(t) = \int_0^V \Theta(r, x, t) dv$, відмовившись від використання температурного розподілу по радіусу і висоті завантажувального бака ролера.

На підставі формул (2.8) – (2.18) можна зробити наближену чисельну оцінку енергії, що надходить в систему з боку хімічних реакцій і процесів тертя в чайній масі.

Як видно з викладеного вище, теплові процеси є важливою і досить складною складовою технологічного процесу скручування в першу чергу через не стаціонарності властивостей самого об'єкта. Адекватність запропонованої математичної моделі температурних процесів в чайній масі в процесі скручування можна оцінити наступними експериментальними дослідженнями.

Таким чином, можна вважати, що в даному класі ролерів, при їх використанні в традиційних температурних умовах навколишнього середовища температура чайної маси не досягає критичного значення. Тому

в синтезованому варіанті системи керування процесом скручування не передбачено регулятор температури чайної маси.

2.5 Обчислювальна модель об'єкта керування

Розробимо в програмному середовищі Matlab [15] обчислювальні моделі частини об'єкта керування – прес ролера та чайної маси, і обчислювальну модель всього узагальненого об'єкта керування.

На основі рівнянь (2.1), (2.3) – (2.7) і частини структурної схеми, виділеної на рисунку 2.8 пунктиром, створена обчислювальна модель частини об'єкта керування (рис. 2.17).

Вхідна координата – сила впливу на прес F_4 , а вихідна – переміщення преса x_4 . Ця модель необхідна для проведення експериментальних досліджень – визначення тимчасових і частотних характеристик технологічного процесу по відношенню до керуючого (сила F_4) і збурюючого (властивості чайної маси γ) впливів.

Пристрій формування задаючого сигналу включає в себе блоки M_1 , M_7 і суматор M_2 (рис. 2.17), Блок M_1 забезпечує стрибкоподібну зміну сили впливу на прес F_4 . Для дослідження динаміки елементів об'єкта керування використовується блок M_7 , що створює додаткову стрибкоподібну зміну сили, яка додається до пресу, на величину ΔF_4 .

Блоки M_{15} , M_{16} , M_{17} , M_{18} і M_{19} формують сили пружності чайної маси P_{yn} відповідно до рівняння (2.1) і відповідають блоку C_{16} структурної схеми (рис. 2.8). Блок M_{15} задає стрибкоподібну зміну початкової жорсткості чайної маси до значення C^0 відповідно до системи рівнянь (2.6). Блок M_{16} описує α_1 – коефіцієнт нахилу графіка залежності жорсткості від переміщення преса. Суматор M_{17} дозволяє отримати значення коефіцієнта жорсткості C_i , В обчислювальну модель введений блок M_{18} , обмежуючий максимальне значення коефіцієнта жорсткості до значення C_i^0 .

Розмножувальний блок M19 дозволяє отримати чисельне значення сил пружності $P_{пр}$ в залежності від переміщення преса і значення коефіцієнта жорсткості чайної маси в кожний момент часу.

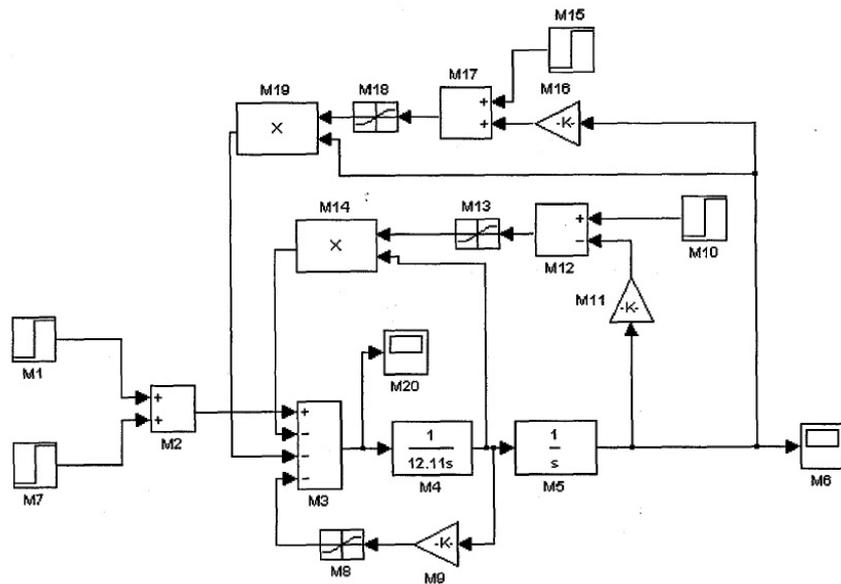


Рисунок 2.17 – Обчислювальна модель преса і чайної маси

Блоки M10, M11, M12, M13 і M14 формують сили демпфірування чайної маси відповідно до рівняння (2.1) і відповідає блокам C20 і C21 структурної схеми узагальненого об'єкта керування (рис. 2.8).

Формування чисельного значення сил демпфірування аналогічно формуванню значення сил пружності, але, на відміну від сил пружності, сили демпфірування залежать від швидкості переміщення преса і коефіцієнта демпфірування. Значення коефіцієнта демпфірування підпорядковується залежності, зазначеної в системі рівнянь (2.7).

Еквівалентна сила тертя $F_{мре}$ задається відповідно до системи рівнянь (2.1) блоками M8 і M9, відповідними блокам C22 і C23 структурної схеми. Блок M9 містить $K_{мре}$ додатково в обчислювальну модель введений блок M8, що обмежує значення еквівалентної сили тертя, В реальній системі таке обмеження забезпечується змінним в часі значенням $K_{мре}$.

Суматор МОЗ обчислювальної моделі виконує функції суматорів C9 і C10 структурної схеми (рис. 2.17). Сформовані відповідно до (2.6) – (2.7) і

рисунків 2.10 і 2.11 значення пружною $P_{пр}$ і демпфіруючої P_{δ} складових сил реакції чайної маси також надходять на вхід суматора МОЗ,

Блоки М4 і М5 виконують функції оператора С11 структурної схеми.

На виході блоку М5 формується значення переміщення преса, а на виході блоку М4 – його швидкості.

Для спостереження за динамікою елементів об'єкта керування – преса і чайної маси введемо машинні осцилографи М6 і М20. Видима координата в осцилографі М6 – переміщення преса, в осцилографі М20 – значення тиску преса на чайну масу Р.

Під час одного скручування чайна маса тричі піддається піддавлюванню пресом. Механічні властивості чайної маси мають різні значення на кожному з етапів переробки. Тому в залежності від етапу переробки значення блоків М9, М10, М11, М13, М15, М16, М18 змінюються відповідно до 2.6 і 2.7.

$$\alpha_1 = 2,8 \cdot 10^7 \text{ Н / м}^2; \alpha_2 = 4,1 \cdot 10^7 \text{ Н / м}^2; \alpha_3 = 6,5 \cdot 10^7 \text{ Н / м}^2 :$$

$$\beta_1 = 1,02 \cdot 10^4 \frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{М}^2}; \beta_2 = 1,05 \cdot 10^4 \frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{М}^2}; \beta_3 = 1,10 \cdot 10^4 \frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{М}^2} : (2.19)$$

$$K_{mp1} = 2,1 \cdot 10^3; K_{mp2} = 1,5 \cdot 10^7; K_{mp3} = 2,0 \cdot 10^4 :$$

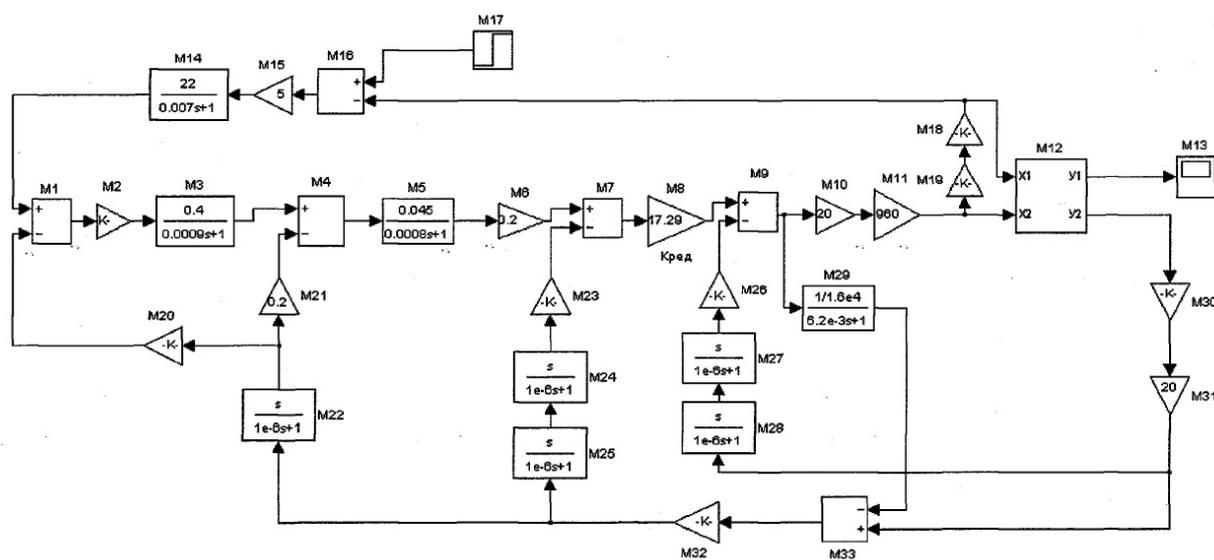


Рисунок 2.18– Обчислювальна модель узагальненого об'єкта керування

На підставі структурної схеми узагальненого об'єкта керування (рис. 2.8) синтезуємо обчислювальну модель узагальненого об'єкта керування (рис. 2.18). Вона повинна забезпечувати можливість проведення експериментальних досліджень об'єкта і системи керування в залежності від керуючого і збурюючого впливів.

Система керування описана блоками M14, M15, M16 і M17. Блок M17 забезпечує завдання необхідного чисельного значення тиску преса на чайну масу P_n , яке порівнюється з поточним значенням тиску P_n в суматорі M16. Через блок посилення M15 і перетворювальну ланку (блок M14) сигнал подається на суматор M1. Блоки M2, M3 і M20 імітують тахогенератор з коефіцієнтом $K_{mz} = 0,02$.

Таблиця 2.3 – Відповідність блоків структурної схеми та обчислювальної моделі

Блок обчис- люваль- ної моделі	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M19
Блок структурної схеми	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C18
Блок обчислювальної моделі	M21	M22	M29	M30	M31	M32		M33	
Блок структурної схеми	C30	C31	C27	C25	C26	C29		C28	

Блоки M23, M24 і M25 відповідають блоку C19 структурної схеми, блоки M26, M27 і M28 – блоку C20. Блок M18 містить коефіцієнт перерахування значення тиску преса на чайну масу в МПа.

Блок M12 включає в себе обчислювальну модель елементів об'єкта керування, описану раніше.

Для спостереження за досліджуваною вихідною координатою переміщення преса введений машинний осцилограф M13.

2.6 Спрощена математична модель об'єкта керування

Результати проведених експериментів дозволяють розробити підходи для спрощення математичного опису технологічного процесу скручування. По-перше, аналіз перехідних характеристик узагальненого об'єкта керування дозволяє знехтувати динамікою двигуна, механічної частини електроприводу преса і процесу різання. По-друге, аналіз теплових процесів дозволяє відмовитися від частини структури об'єкта, яка описує динаміку зміни температури в процесі переробки чайної маси, так як середнє значення температур не досягає гранично допустимого за умовами технології значення, як показано в п.2.4.

З урахуванням описаних припущень розробимо спрощену математичну модель об'єкта керування, що дозволяє аналітично досліджувати процеси в «малому», в той час як узагальнена математична модель дозволяє досліджувати процеси в «великому».

В результаті цих припущень система рівнянь технологічного процесу скручування (2.5) значно спрощується і набуває вигляду:

На підставі цих рівнянь синтезовано структуру спрощеної нелінійної моделі (рис. 2.19). Вона містить не лінійності у вигляді добутку змінних величин, а також нелінійну ланку типу «Обмеження за рівнем». Проведемо дослідження по апроксимації цієї математичної моделі деякою ліанерізованою динамічною ланкою з змінними параметрами.

Для цих цілей розроблена обчислювальна модель спрощеного об'єкта керування. Її структура аналогічна обчислювальній моделі узагальненого об'єкта керування, а змін зазнали лише блоки, що описують динаміку двигуна. Обчислювальна модель спрощеного об'єкта керування показана на рисунку 2.20.

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{я} = R_{я} I_{я} + C_{д} \Phi \omega_{д} \\ M_{об} = C_{д} \Phi I_{я} \\ M_1 = M_{об}; M_2 = M_1 \cdot K_{ред} \\ M_3 = M_2 \\ M_4 = M_3 \cdot K_{чп} \\ F_4 = \frac{M_4}{K_{MF}} \quad ; \\ F_4 = m_1 p^2 x_4 + D_2 p x_{II} + C_2 x_{II} \\ K_{MF} = \frac{\Delta M}{\Delta F} = \frac{d_{сер}}{2} \operatorname{tg}(\alpha + \varphi) \\ x_4 = i_{вол} \cdot \varphi_4 \\ x_{II} = x_4 - x_5 \end{array} \right. \quad (2.20)$$

Оцінимо адекватність спрощеної моделі об'єкта керування. Для цього скористаємося результатами обчислювальних досліджень, методика і результати яких описані вище. Порівняльний аналіз отриманих експериментальних кривих (рис.2.21) при дослідженні спрощеного і узагальненого об'єктів показує їх задовільний збіг. Таким чином, проведені дослідження показали адекватність спрощеної математичної моделі об'єкта керування і можливість її використання при синтезі системи керування.

Аналіз перехідних характеристик показує, що спрощену модель об'єкта керування можна представити у вигляді структури з послідовним з'єднанням нелінійної ланки «обмеження за рівнем» та нелінійною коливальною ланкою зі змінними параметрами (рис. 2.22).

Обмеження за рівнем обумовлено технічними можливостями реверсивного електродвигуна приводу преса і живильної електричної мережі.

Коливальну ланку, що відповідає об'єкту керування, можна описати наступним чином [19]:

$$W_{\text{ок}}(p) = \frac{P(p)}{U_{\text{я}}P} = \frac{K_{\text{ок}}}{T_{\text{ок}}^2 p^2 + 2T_{\text{ок}} \xi p + 1}; \quad (2.21)$$

де: $K_{\text{ок}}$ – коефіцієнт передачі;

$T_{\text{ок}}$ – постійна часу;

ξ – коефіцієнт демпфірування.

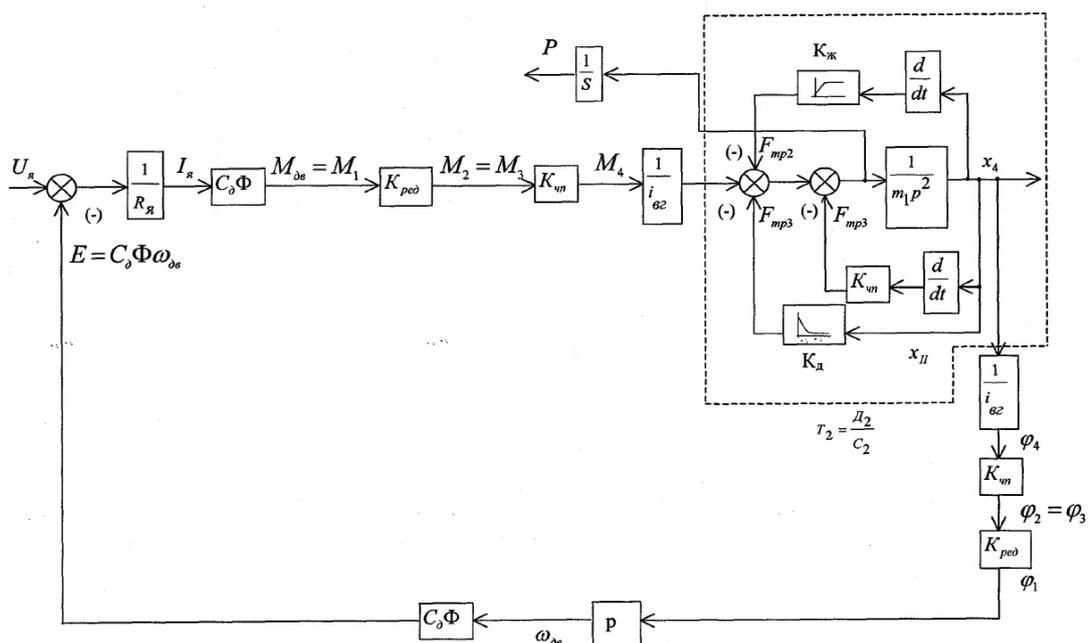


Рисунок 2.19 – Структурна схема спрощеного об'єкта керування

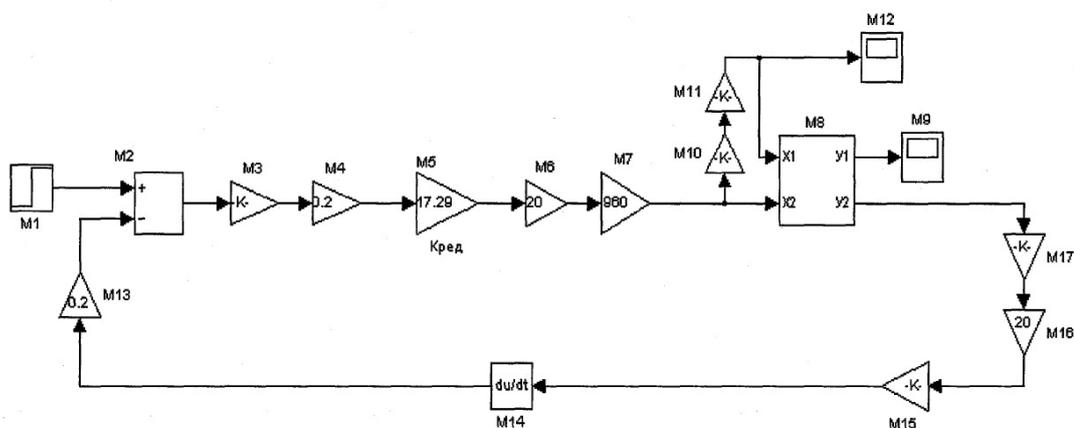


Рисунок 2.20 – Обчислювальна модель спрощеного об'єкта керування

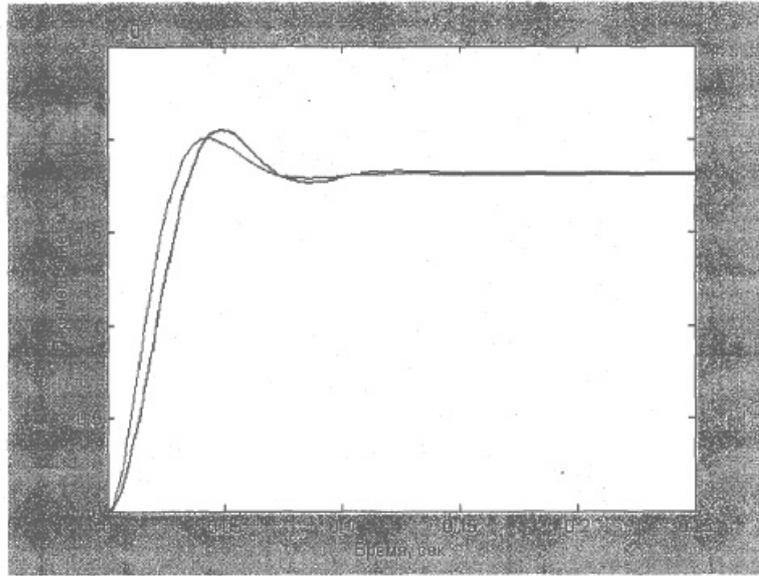


Рисунок 2.21 – Перехідні характеристики зміни тиску преса спрощеного і узагальненого об'єктів керування

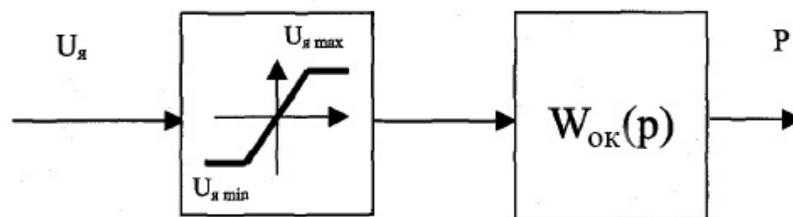


Рисунок 2.22 – Структура спрощеного об'єкта керування

РОЗДІЛ 3 СИНТЕЗ САК СКРУЧУВАННЯ ЧАЙНОГО ЛИСТА

3.1 Розробка функціональної схеми автоматизації

Виконані дослідження об'єкта дозволяють стверджувати, що завдання керування технологічним процесом скручування полягає в забезпеченні автоматичного виведення ролера на сталий режим тиску преса на чайну масу та подальшу стабілізацію цього режиму в умовах дії збурень і наявності обмежень як в об'єкті керування, так і в основних ланках пристроїв автоматики.

Завдання можливо вирішити при використанні замкнутої системи керування, функціональна схема якої (рис.3.1) включає в себе в загальному вигляді програмований задатчик (ПЗ), що забезпечує формування необхідного закону зміни тиску в часі $P(t)$, задаючий пристрій по температурі (ЗПТ), регулятори R_1 , R_2 і R_3 , пристрій сполучення (ПС), керований силовий перетворювач (КСП), пристрої зворотного зв'язку по тиску (ПЗЗТ) і по температурі (ПОЗЗТ), пристрій керування електроприводу столу ролера (ПКЕСР). Таким чином, процес скручування і різання чайної маси (ПСіР) має дві вхідні ($U_{я}$ і $\omega_{я}$) та три вихідні координати (P , Θ , x).

Дана система керування має два зворотні зв'язки по основним параметрам, що характеризує процес скручування: тиск преса на чайну масу P і температура всередині чайної маси, що знаходиться в завантажувальному баку ролера.

Система керування зі зворотним зв'язком по тиску повинна забезпечувати вихід системи на сталий режим та стабілізацію тиску.

Керування по температурі включає в себе обмеження температури «знизу» – Θ_{\min} і зверху – Θ_{\max} . Однак особливості регіональної та сезонної переробки чайного листа дозволяють не ставити обмеження температури «знизу». З технологічних досліджень [15] відомо, що температура в чайній

масі рідко перевищує значення, що перешкоджають ферментативним процесам. Тому обмеженнями, що накладаються на температуру «зверху» на початковому етапі автоматизації ролера, можна знехтувати. Тому синтезуємо систему керування по одній керованій координаті – тиск P преса на чайну масу.

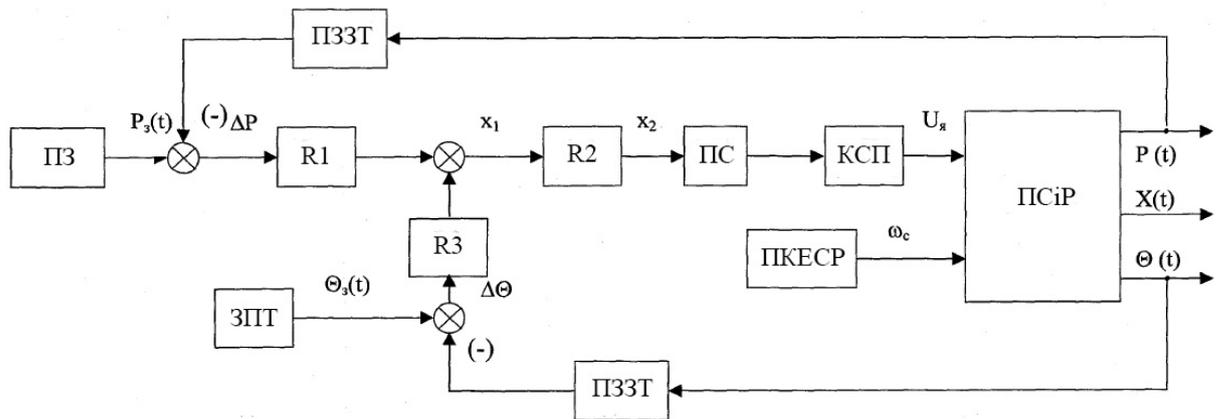


Рисунок 3.1 – Функціональна схема системи керування ролером

Процес автоматичного керування ролером в розглянутій постановці завдання включає в себе наступні технологічні етапи:

1. Підведення преса до поверхні чайної маси.
2. Стабілізація заданої величини тиску.
3. Відведення преса від поверхні чайної маси.

Конструктивні особливості ролера накладають обмеження на характер руху поршня – для запобігання його заклинювання рух має бути монотонним. Технологія виробництва чайного листа вимагає забезпечення плавного наростання тиску в чайній масі. На підставі сказаного сформулюємо критерії оптимізації керування:

1. Монотонність руху преса на першому етапі (до дотику з чайною масою) при максимально можливій швидкодії.
2. Монотонний характер досягнення заданого значення тиску преса на чайну масу при максимально можливій швидкодії.

3. Монотонний характер відведення преса від поверхні чайної маси при максимально можливій швидкодії.

Для вирішення поставленого технологічного завдання вимагатимемо, щоб система керування відпрацьовувала з необхідною точністю програмні оптимальні за швидкодією монотонні траєкторії задаючих впливів підведення преса до чайної маси; набору тиску преса на масу; відведення преса від чайної маси і його позиціонування в початковому положенні.

Для керування на 1-му та 3-му етапах необхідно використання датчика положення преса. Завдання автоматичного керування рухом і позиціонуванням преса аналогічна завданням руху і позиціонування робочих органів верстатів і роботів [8], тому в даній роботі вона не розглядається.

Етап стабілізації тиску преса так само, як і етап виведення на усталений режим, протікає в умовах не стаціонарності параметрів об'єкта керування. Якість керування процесом на цьому етапі буде визначатися мінімізацією відхилення тиску преса від заданого значення програмної траєкторії тиску,

$$\Delta P(t) = P_n(t) - P(t); \Delta P \rightarrow 0;$$

де: $P_n(t)$ – задаючий вплив системи в часі;

$P(t)$ – динамічна зміна тиску преса на чайну масу;

ΔP – динамічна помилка системи.

В ідеальному випадку ΔP має дорівнювати нулю. Таке можливо, якщо система керування буде без інерційною або буде мати нескінченну смугу пропускання. Однак на практиці це важко досягається, оскільки виконавчі органи завжди мають обмеження по потужності, а об'єкт та елементи системи мають інерційність. Тому при розробці системи керування будемо керуватися критерієм досягнення кінцевого мінімально можливого значення помилки ΔP . Це стає можливим тільки в разі, коли смуга пропускання $\omega_{\text{п\ddot{a}}\text{д}}$ системи керування $\omega_{\text{сер}} \rightarrow \omega_{\text{min}}$, де ω_{max} – максимально досяжне значення смуги пропускання.

Таким чином, при синтезі системи керування на етапі стабілізації тиску преса з одного боку необхідно забезпечити максимум смуги пропускання системи, а з іншого – забезпечити мінімум відхилення тиску від заданого.

Цільові функції керування в цьому випадку мають вигляд:

$$\omega_{\text{сер}} \rightarrow \omega_{\text{сер max}} ; \quad (3.1)$$

$$J = \int_{t_n}^{t_k} \Delta P dt \rightarrow 0;$$

В умовах, коли об'єкт керування володіє значною інерційністю і суттєвою не стаціонарністю параметрів, це може бути забезпечено шляхом синтезу адаптивної або робастної системи керування [7].

Найбільш доцільним є застосування робастної системи керування. У ній можна забезпечити найбільш просту практичну реалізацію системи, так як в цьому випадку немає необхідності використовувати адаптивний алгоритм керування. Крім того, використання робастної системи дозволить уникнути переналаштування системи керування при переробці чайної сировини з різними фізико-механічними властивостями, що є важливим при широкій варіації цих властивостей.

Розглянемо синтез структури робастної системи керування технологічним процесом скручування чайного листа в ролери.

3.2 Структурний синтез цифрової системи автоматичного керування

У створюваній системі використовуємо структуру багатоконтурної системи з однією вимірюваною координатою (БСОВК). Вибір такого варіанту реалізації обґрунтований простотою технічної реалізації системи керування, зручністю при налагодженні та експлуатації, а також великим обсягом експериментальних досліджень, накопиченим досвідом практичної реалізації цих систем стосовно електромеханічних об'єктів керування прецизійними верстатами і промисловими роботами [19].

Узагальнена структура БСОВК показана на рисунку 3.2. Тут $R_1 \dots R_n$ регулятори, $W_{oy}(p)$ – передавальна функція об'єкта керування і силового перетворювача, $W_{oc}(p)$ – передавальна функція пристрою зворотного зв'язку, X_z – сигнал завдання, $X_{вих}$ – вихідна координата.

Систему керування реалізуємо в цифровому вигляді.

Наявність інерційного об'єкта керування з постійною часу, значно перевищує період замикання цифрового контролера, дозволяє припустити, що в системі забезпечується виконання теореми Котельникова-Шеннона, а тому при її синтезі будемо користуватися методами безперервних систем.

Розглянемо синтез МСОВК стосовно системам з нестационарним об'єктом. В основу структурної побудови МСОВК покладено принцип послідовної компенсації однієї з найбільших постійних часу об'єкта (для першого контуру) і найбільшої постійної часу знову утворених замкнутих контурів (для подальших). Для цих цілей пропонується в $(n-1)$ -х контурах використовувати П- регулятори, а в n -у контурі – І-регулятор.

Синтезуємо кілька варіантів БСОВК. При цьому будемо вимагати, щоб в кожному з них останній контур завжди містив І-регулятор. Це дозволить забезпечити астатичність системи керування до всіх перешкод, охопленим зворотним зв'язком. Застосування ПД- регуляторів і ПІ-регуляторів в системі керування технологічним процесом скручування недоцільно, так як тут об'єкт керування, як було встановлено в 2-му розділі, має суттєву нестационарність і наскільки точно компенсувати його постійну часу не представляється можливим. Тому при синтезі системи будемо використовувати пропорційні та інтегральні регулятори.

Відповідно до загальноприйнятих умов можна синтезувати два варіанти двоконтурної БСОВК. У першому варіанті (система І, рис. 3.3, а) – внутрішній контур містить П- регулятор, а зовнішній – І-регулятор, а в другому (система ІІ, рис. 3.3, б) обидва контури містять І-регулятори.

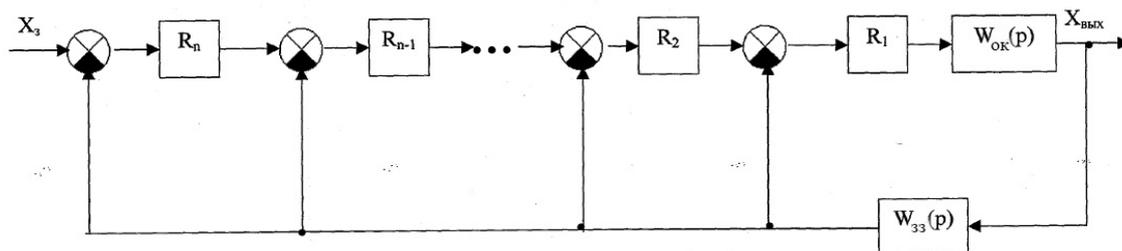


Рисунок 3.2 – Узагальнена структура БСОВК

Розглянемо синтез першого варіанту двоконтурної БСОВК. Передавальна функція внутрішнього розімкнутого контуру системи I має вид:

$$W_{\text{пр}}(p) = \frac{P(p)}{X_{\text{II}}(p)} = \frac{K_{\text{ок}} K_{\text{нн}} K_{\text{пр}}}{(T_{\text{ок}}^2 P^2 + 2T_{\text{ок}} \xi p + 1)}; \quad (3.2)$$

де: $K_{\text{пр}}$ – коефіцієнт передачі П- регулятора;

$K_{\text{нн}}$ – коефіцієнт передачі приводу преса.

Введемо позначення: $K_{1\text{р}} = K_{\text{ок}} K_{\text{нн}} K_{\text{пр}}$.

У замкнутому стані цей контур описується передавальною функцією:

$$W_{\text{ІІЗ}}(p) = \frac{P(p)}{X_{\text{I}}(p)} = \frac{\frac{K_{1\text{р}}}{(T_{\text{ок}}^2 P^2 + 2T_{\text{ок}} \xi p + 1)}}{1 + \frac{K_{\text{ок}} K_{\text{нн}} K_{\text{зз}}}{(T_{\text{ок}}^2 P^2 + 2T_{\text{ок}} \xi p + 1)}}; \quad (3.3)$$

$$\text{де: } K_{\text{ІЗ}} = \frac{K_{1\text{р}}}{1 + K_{1\text{р}} K_{\text{зз}}}; \quad T_{\text{II}} = \frac{2T_{\text{ок}} \xi}{1 + K_{1\text{р}} K_{\text{зз}}}; \quad T_{\text{II}}^2 = \frac{T_{\text{ок}}^2}{1 + K_{1\text{р}} K_{\text{зз}}};$$

У розімкнутому стані другий контур системи має передавальну функцію:

$$W_{2\text{Ір}}(p) = \frac{P(p)}{X_{2\text{І}}(p)} = \frac{W_{\text{ІІЗ}}(p)}{T_{\text{ІІ}} P};$$

де: $T_{\text{ІІ1}}$ – постійна часу першого І-регулятора, а в замкнутому:

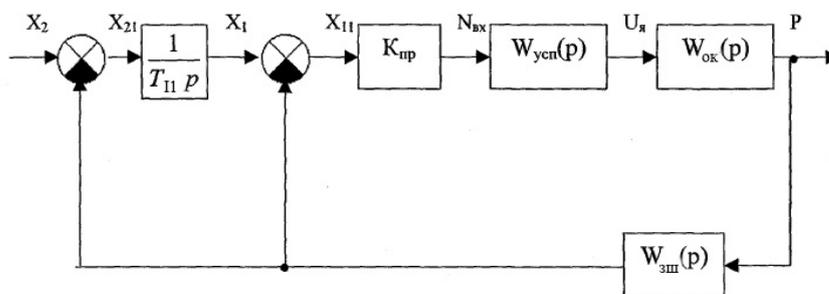
$$W_{213}(p) = \frac{P(p)}{X_2(p)} = \frac{\frac{K_{I3}}{T_{II}p(T_{21}^2p^2 + 2T_{OK}\xi p + 1)}}{T_{II}p \frac{K_{I3}K_{OC}}{(T_{21}^2p^2 + 2T_{OK}\xi p + 1)}};$$

або:

$$W_{213}(p) = \frac{1}{\frac{K_{3III}}{T_{51}^3p^3 + T_{41}^2p^2 + T_{31}p + 1}}; \quad (3.4)$$

$$\text{де: } T_{51}^3 = \frac{T_{II}T_{21}^2}{K_{I3}K_{3III}} = \frac{T_{II}T_{OK}^2}{K_{Ip}K_{3III}}; \quad T_{41}^3 = \frac{T_{II}T_{II}}{K_{I3}K_{3III}} = \frac{2T_{II}T_{OK}\xi}{K_{Ip}K_{3III}}; \quad T_{31} = T_{II};$$

а)



б)

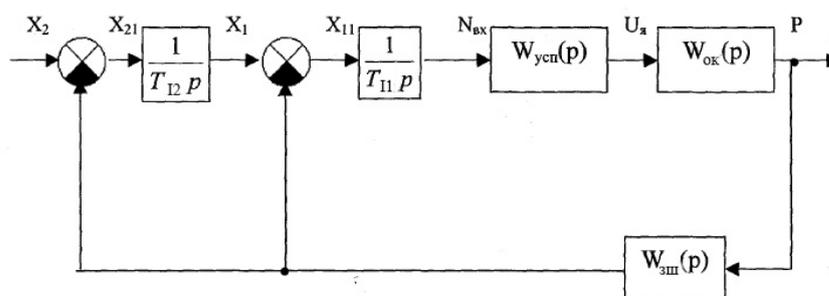


Рисунок 3.3 – Варіанти синтезу двоконтурної БСОВК

а) з П - регулятором і І-регулятором, б) з двома І-регуляторами

Знайдемо умову стійкості синтезованої системи керування. Внутрішній контур завжди стійкий, зовнішній – описується рівнянням третього порядку, тому відповідно до критерію Гурвіца для його стійкості необхідно і достатньо виконання нерівності:

$$T_{41}^2 T_{31} > T_{51}^3; \text{ або } \frac{2T_{II} T_{OK} \xi}{K_{Ip} K_{зш}} \cdot T_{II} > \frac{T_{II} T_{OK}^2}{K_{Ip} K_{зш}}; \quad (3.5)$$

Після нескладних перетворень виразу (3.5) отримаємо умову стійкості:

$$T_{II} > \frac{T_{OK}}{2\xi}; \quad (3.6)$$

що показує, що постійна часу I-регулятора внутрішнього контуру системи I залежить тільки від параметрів об'єкта керування.

Знайдемо передавальні функції системи керування, приймаючи $K_{пр} = 0,1$ і $T_{II} = 1$ с, в залежності від параметрів об'єкта керування на кожному з етапів переробки за формулою (3.7):

$$W_1(p) = \frac{\frac{1}{K_{зш}}}{T_{51}^3 p^3 + T_{41}^2 p^2 + T_{31} p + 1} = \frac{8000}{49,37 p^3 + 5144,9 p^2 p + 1};$$

$$W_2(p) = \frac{\frac{1}{1,25 \cdot 10^{-4}}}{3,01 p^3 + 1950,3 p^3 + p + 1}; \quad (3.7)$$

$$W_3(p) = \frac{\frac{1}{1,25 \cdot 10^{-4}}}{0,326 p^3 + 649,1 p^3 + p + 1};$$

Характеристичне рівняння системи:

$$a_0 p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + a_3 = 0; \quad (3.8)$$

де: коефіцієнти $a_0 \dots a_3$ визначаються виразами $a_0 = \frac{T_{II} T_{OK}^2}{K_{Ip}}$;

$$a_1 = \frac{2T_{II} T_{OK} \xi}{K_{Ip}}; a_2 = T_{II}; a_3 = 1;$$

Знайдемо аналітичний вираз для налаштувань регуляторів системи керування, при яких забезпечується монотонність перехідних процесів.

Для цього перетворимо вираз (3.8) до вигляду [29]:

$$q^3 + Aq^2 + Bq + 1 = 0; \quad (3.9)$$

де: $q = \sqrt[3]{\frac{a_0}{a_3}} p$; A і B – параметри Вишнеградського $A = \frac{a_1}{\sqrt[3]{a_0 a_3}}$;

$$B = \frac{a_2}{\sqrt[3]{a_0 a_3^2}};$$

Умова монотонності перехідного процесу в системі третього порядку визначається умовою:

$$2A^3 - 9AB + 27 = 0 \text{ при } A < 3; \quad (3.10)$$

Після підстановки в (3.10) відповідних коефіцієнтів з рівняння (3.8) отримаємо наступну систему:

$$\begin{cases} T_{II} = \frac{27T_{ок} K_{ip} K_{зш}}{18K_{I3} K_{зш} - 16\xi^3}; \\ T_{II} < \frac{27K_{ip} K_{зш} T_{ок}}{8\xi^3} \end{cases}; \quad (3.11)$$

Підставивши в нерівність з системи (3.11) мінімальні значення постійної часу $T_{ок}$ і коефіцієнта ξ , отримаємо: $T_{II} < 25 \cdot 10^{-10}$ с.

У програмному середовищі MatLab створимо обчислювальну модель синтезованої системи зі змінними параметрами об'єкта керування (рис. 3.4) і проведемо дослідження перехідних процесів тиску в зазначеній системі. Три криві перехідних процесів тиску з передавальними функціями (3.7) на різних етапах скручування збігаються (рис. 3.5).

На основі передавальної функції замкнутої системи керування I були розраховані речова і уявна складові:

$$\begin{cases} U(\omega) = \frac{1 - T_{41}^2 \omega^2}{K_{зш} \left[(1 - T_{41}^2 \omega^2)^2 + (T_{31} \omega - T_{51}^3 \omega^3)^2 \right]}; \\ V(\omega) = \frac{T_{51}^3 \omega^3 - T_{31} \omega}{K_{зш} \left[(1 - T_{41}^2 \omega^2)^2 + (T_{31} \omega - T_{51}^3 \omega^3)^2 \right]} \end{cases}; \quad (3.12)$$

В програмному середовищі MatLab були побудовані частотні характеристики, відповідні виразом (3.12). Вони представлені рисунку 3.6.

Аналіз частотних характеристик показує, що варіація параметрів об'єкта керування призводить до істотної зміни показників якості динаміки системи I.

Розглянемо систему II з двома I-регуляторами.

У розімкненому стані перший контур системи II описується передавальною функцією:

$$W_{12p}(p) = \frac{P(p)}{X_{II}(p)} = \frac{1}{T_{II}p} \frac{K_{ок} K_{nn}}{(T_{ок}^2 p^2 + 2T_{ок} \xi p + 1)}; \quad (3.13)$$

де: $X_{II}(p)$ – зображення сигналу на вході першого I-регулятора (рис. 3.3 б);

T_{II} – постійна часу першого I-регулятора.

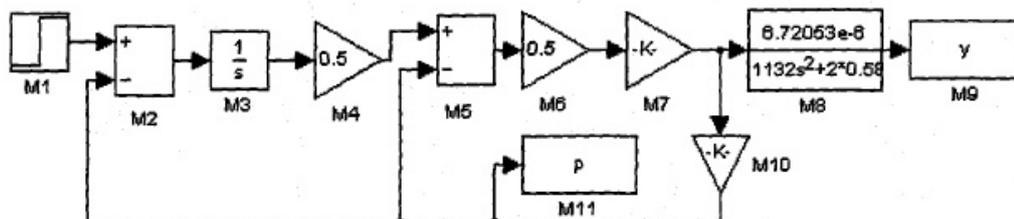


Рисунок 3.4 – Обчислювальна модель двоконтурної БСОВК з П- регулятором і I-регулятором

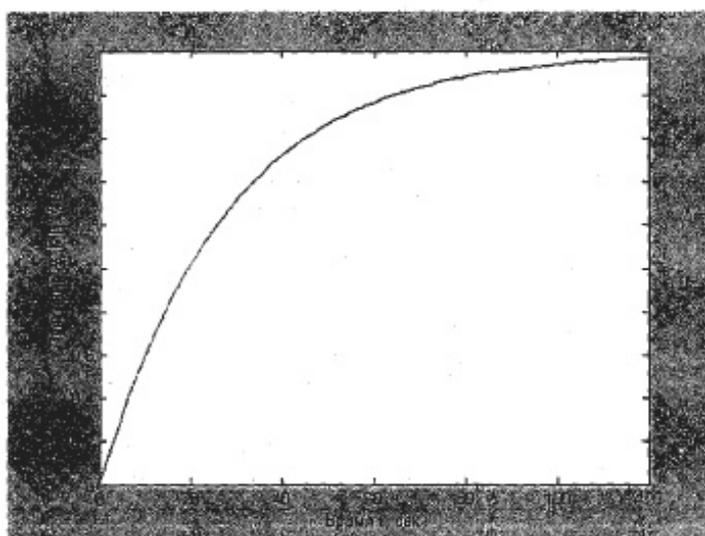


Рисунок 3.5 – Сімейство кривих перехідних процесів в двоконтурній БСОВК з П- регулятором і I-регулятором

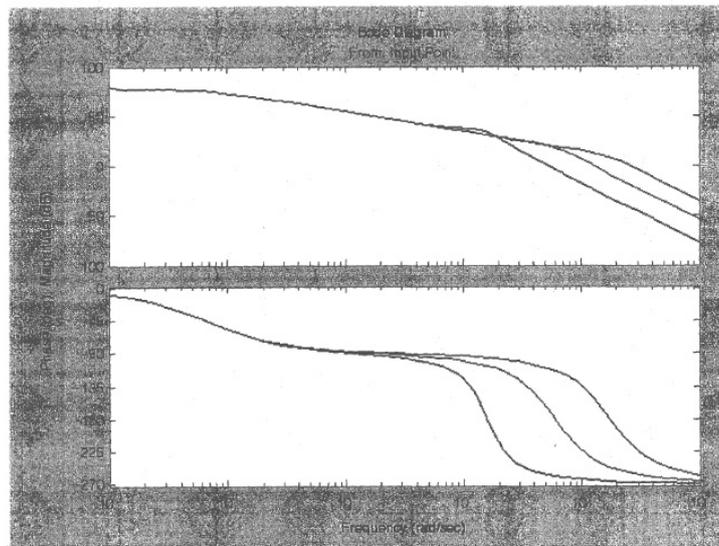


Рисунок 3.6 – Частотні характеристики двоконтурної БСОВК з регулятором і І-регулятором

У замкнутому стані перший контур системи II описується передавальною функцією:

$$W_{123}(p) = \frac{\Delta P(p)}{X_I(p)} = \frac{1}{1 + \frac{1}{T_{II}} p (\Gamma_{ок}^2 p^2 + 2T_{ок} \xi p + 1)} \frac{K_{ок} K_{nn}}{T_{II} p (\Gamma_{ок}^2 p^2 + 2T_{ок} \xi p + 1)};$$

або:

$$W_{123}(p) = \frac{1}{T_{32}^3 p^3 + T_{22}^2 p^2 + T_{12} p + 1} \frac{K_{зш}}{K_{nn} K_{ок} K_{зш}}; \quad (3.14)$$

де: $T_{32}^3, T_{22}^2, T_{12}$ – постійні часу, $T_{32}^3 = \frac{T_{II} T_{ок}^2}{K_{nn} K_{ок} K_{зш}}$; $T_{22}^2 = \frac{2T_{II} T_{ок} \xi}{K_{nn} K_{ок} K_{зш}}$;

$$T_{12} = \frac{T_{II}}{K_{nn} K_{ок} K_{зш}};$$

Другий контур системи II в розімкнутому стані описується передавальною функцією:

$$W_{12p}(p) = \frac{\Delta P(p)}{X_{21}p} = \frac{1}{T_{12}p} \frac{\frac{1}{K_{зш}}}{T_{32}^3 p^3 + T_{22}^2 p^2 + T_{12}p + 1}; \quad (3.15)$$

де: T_{12} – постійна часу другого І-регулятора.

Передавальна функція системи II в замкнутому стані:

$$W_{223}(p) = \frac{\Delta P(p)}{X_2 p} = \frac{1}{K_{зш} T_{12} p (T_{32}^3 p^3 + T_{22}^2 p^2 + T_{12} p + 1)} \frac{1}{1 + \frac{K_{ос}}{K_{зш} T_{12} p (T_{32}^3 p^3 + T_{22}^2 p^2 + T_{12} p + 1)}};$$

або:

$$W_{223}(p) = \frac{1}{K_{зш}} \frac{1}{T_{72}^4 p^4 + T_{62}^3 p^3 + T_{52}^2 p^2 + T_{42} p + 1}; \quad (3.16)$$

де: $T_{72}^4, T_{62}^3, T_{52}^2, T_{42}$ – постійні часу, $T_{72}^4 = \frac{T_{II} T_{I2} T_{ок}^2}{K_{nn} K_{ок} K_{зш}}$; $T_{62}^3 = \frac{2T_{II} T_{I2} T_{ок} \xi}{K_{nn} K_{ок} K_{зш}}$;

$$T_{52}^2 = \frac{T_{II} T_{I2}}{K_{nn} K_{ок} K_{зш}}; T_{42} = T_{I2};$$

Знайдемо умову стійкості синтезованої системи керування.

Внутрішній контур системи описується рівнянням третього порядку, тому відповідно до критерію Гурвіца для її стійкості необхідно і досить виконання нерівності:

$$T_{22}^2 T_{12} > T_{32}^3; \text{ або}$$

$$\frac{2T_{II} T_{ок} \xi}{K_{nn} K_{ок} K_{зш}} \cdot \frac{T_{II}}{K_{nn} K_{ок} K_{зш}} > \frac{T_{II} T_{ок}^2}{K_{nn} K_{ок} K_{зш}}; \quad (3.17)$$

Після нескладних перетворень отримаємо умову стійкості внутрішнього контуру системи II:

$$T_{II} > \frac{T_{ок} K_{nn} K_{ок} K_{зш}}{2\xi}; \quad (3.18)$$

Оскільки зовнішній контур системи описується диференціальним рівнянням четвертого порядку, то відповідно до критерію Гурвіца для її стійкості необхідно і достатньо виконання нерівності:

$$T_{I2} (T_{62} T_{52} - T_{72} T_{42}) > (T_{62}^3)^2 \cdot 1; \text{ або}$$

$$T_{I2} \left(\frac{2T_{II} T_{I2} T_{oy} \xi}{K_{nn} K_{ok} K_{zsh}} \cdot \frac{T_{II} T_{I2}}{K_{\tau} K_{ok} K_{zsh}} - \frac{T_{II} T_{I2} T_{ok}^2}{K_{nn} K_{ok} K_{zsh}} \right) > \frac{4T_{II}^2 T_{I2}^2 T_{oe}^2 \xi^2}{(K_{nn} K_{ok} K_{zsh})^2}; \quad (3.19)$$

Після перетворень отримаємо систему умов стійкості системи II:

$$\begin{cases} T_{I2} > \frac{4T_{II} T_{ok} \xi^2}{2T_{II} \xi - T_{ok} K_{nn} K_{ok} K_{zsh}}; \\ T_{II} > \frac{T_{ok} \cdot K_{nn} K_{ok} K_{zsh}}{2\xi} \end{cases}; \quad (3.20)$$

Друга нерівність системи (3.20) є умовою стійкості першого контуру і одночасно умовою позитивності знаменника першої нерівності цієї ж системи.

Проведемо аналіз системи II з точки зору забезпечення робастності. Критерієм досягнення робастності будемо вважати відсутність варіації коефіцієнтів при першому ступені p характеристичного полінома замкнутої системи при зміні параметрів об'єкта керування. В вираз для T_{42} нестационарні параметри не входять, в вирази $T_{72}^4, T_{62}^3, T_{52}^2$ входять нестационарні параметри, тому знайдемо аналітичні вирази для відносної варіації постійних часу $T_{72}^4, T_{62}^3, T_{52}^2$.

$$\Delta T_{72}^4 = \frac{\frac{T_{ok1}^2 T_{II} T_{I2}}{K_{\tau} K_{zsh} K_{ok1}} - \frac{T_{ok2}^2 T_{II} T_{I2}}{K_{nn} K_{zsh} K_{ok2}}}{\frac{T_{ok2}^2 T_{II} T_{I2}}{K_{nn} K_{zsh} K_{ok2}}} = \frac{K_{ok2} T_{ok1}^2}{K_{ok1} T_{ok2}^2} - 1 = D_k D_{\tau}^2 - 1; \quad (3.21)$$

де: D_k, D_{τ}^2 – відносини параметрів об'єкта керування, $D_k = \frac{K_{ok2}}{K_{ok1}}$;

$$D_{\tau} = \frac{T_{ok1}}{T_{ok2}};$$

$$\Delta T_{62}^3 = \frac{\frac{2T_{ок1} T_{II} T_{I2} \xi_1}{K_{TT} K_{зш} K_{ок1}} - \frac{2T_{оу2} T_{II} T_{I2} \xi_2}{K_{nn} K_{зш} K_{ок2}}}{\frac{2T_{ок2} T_{II} T_{I2} \xi_2}{K_{nn} K_{зш} K_{ок2}}} = \frac{K_{ок2} T_{ок1} \xi_1}{K_{ок1} T_{ок2} \xi_2} - 1 = D_C D_T D_\xi - 1; \quad (3.22)$$

де: D_ξ – відносини параметрів об'єкта керування, $D_\xi = \frac{\xi_1}{\xi_2}$.

$$\Delta T_{52}^2 = \frac{\frac{T_{II} T_{I2}}{K_{TT} K_{зш} K_{ок1}} - \frac{T_{II} T_{I2}}{K_{nn} K_{зш} K_{ок2}}}{\frac{T_{II} T_{I2}}{K_{nn} K_{зш} K_{ок2}}} = \frac{K_{ок2}}{K_{ок1}} - 1 = D_k - 1; \quad (3.23)$$

Як випливає з виразів (3.21) – (3.23), варіації постійних часу $T_{72}^4, T_{62}^3, T_{52}^2$ залежать тільки від параметрів об'єкта керування, причому не від їх абсолютних значень, а від стосунків відповідних параметрів. Для розглянутого прикладу об'єкта керування знайдемо максимальні значення цих співвідношень:

$$D_{T_{max}} = \frac{T_{оуmax}}{T_{окmin}}; \quad (3.24)$$

$$D_{T_{max}} = \frac{0,011132}{0,000998} = 11,15.$$

$$D_{\xi_{max}} = \frac{\xi_{max}}{\xi_{min}}; \quad (3.25)$$

$$D_{\xi_{max}} = \frac{0,9937}{0,58} = 1,71.$$

$$D_{л_{max}} = \frac{K_{окmax}}{K_{окmin}}; \quad (3.26)$$

$$D_{л_{max}} = \frac{8,18 \cdot 10^{-5}}{6,72 \cdot 10^{-5}} = 1,22.$$

Обчислимо значення постійних часу І-регуляторів з умов стійкості системи керування (3.20):

$$T_{II} > \frac{T_{ок} \cdot K_{ок} K_{зш}}{2\xi}; \quad (3.27)$$

$$T_{II} > 0,24 \cdot 10^{-6} \text{ с.}$$

$$T_{II} > \frac{0,0111 \cdot 2987,7 \cdot 10^{-5} \cdot 0,000125}{2 \cdot 0,58}$$

$$T_{II} > 0,24 \cdot 10^{-6} \text{ с.}$$

Приймаємо $T_{II} = 0,001 \text{ с.}$ Тоді:

$$T_{I2} > \frac{4T_{II} T_{ок} \xi^2}{2T_{II} \xi - T_{ок} \cdot K_{ин} K_{ок} K_{зш}}; \quad (3.28)$$

$$T_{I2} > \frac{4 \cdot 0,001 \cdot 0,0111 \cdot 0,58^2}{2 \cdot 0,58 \cdot 0,001 - 2987,7 \cdot 6,72 \cdot 10^{-5} \cdot 0,000125 \cdot 0,0111}$$

$$T_{I2} > 0,013 \text{ с;}$$

У програмному середовищі MatLab створимо обчислювальну модель (рис. 3.7) синтезованої системи керування і проведемо дослідження динаміки системи при різних значеннях параметрів об'єкта керування, прийнявши $T_{II} = 0,001 \text{ с}$ і $T_{I2} = 0,05 \text{ с}$. Аналіз отриманих залежностей (рис. 3.8) показує, що варіація параметрів об'єкта керування практично не впливає на динаміку системи, що підтверджує результати аналітичних досліджень.

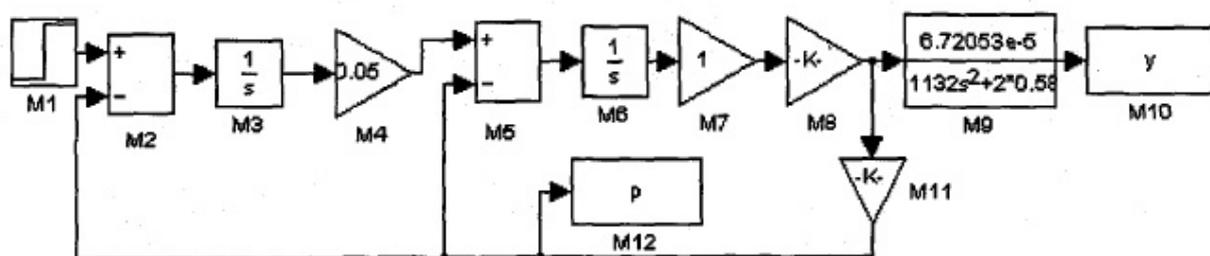


Рисунок 3.7 – Обчислювальна модель двоконтурної БСОВК з двома І-регуляторами

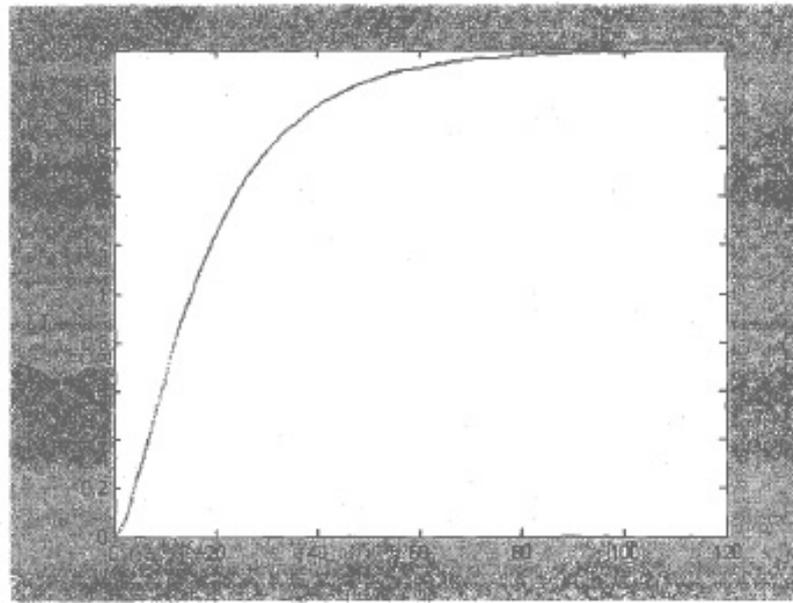


Рисунок 3.8 – Сімейство кривих перехідних процесів в двоконтурній БСОВК з двома І-регуляторами

Використовуючи прийняті значення $T_{И1}$ та $T_{И2}$ і вираз (3.16) знайдемо три передавальні функції системи Π для різних значень параметрів об'єкта керування: $K_{ок1}, T_{ок1}, \xi_1, K_{ок2}, T_{ок2}, \xi_2$ і $K_{ок3}, T_{ок3}, \xi_3$.

$$W_4(p) = \frac{8,0 \cdot 10^3}{0,247p^4 + 25,725p^3 + 1992,131p^2 + 0,05p + 1};$$

$$W_5(p) = \frac{8,0 \cdot 10^3}{0,2015p^4 + 9,75p^3 + 1718,213p^2 + 0,05p + 1}; \quad (3.29)$$

$$W_6(p) = \frac{8,0 \cdot 10^3}{0,00163p^4 + 3,246p^3 + 1636,393p^2 + 0,05p + 1};$$

Знайдемо речову $U(\omega)$ і уявну $V(\omega)$ складові передавальної функції системи:

$$W(j\omega) = \frac{1}{K_{зш} \left(T_{72}^4 (j\omega)^4 + T_{62}^3 (j\omega)^3 + T_{52}^2 (j\omega)^2 + T_{42} (j\omega) + 1 \right)}; \quad (3.30)$$

Тоді:

$$U(\omega) = \frac{T_{72}^4 \omega^4 - T_{52}^2 \omega^2 + 1}{K_{oc} \left[\left(T_{72}^4 \omega^4 - T_{52}^2 \omega^2 \right)^2 + \left(T_{42} \omega - T_{62}^3 \omega^3 \right)^2 \right]}; \quad (3.31)$$

$$V(\omega) = \frac{T_{562}^3 \omega^3 - T_{42} \omega}{K_{oc} \left[\left(T_{72}^4 \omega^4 - T_{52}^2 \omega^2 + 1 \right)^2 \ddot{\omega} + \left(T_{42} \omega - T_{62}^3 \omega^3 \right)^2 \right]}; \quad (3.32)$$

Частотні характеристики, відповідні передавальним функціям W_4, W_5 і W_6 , створені в програмному середовищі MatLab, наведені на рисунку 3.9. Їх порівняльний аналіз показує, що варіація параметрів об'єкта керування не робить істотного впливу на динаміку системи П.

Порівняльний аналіз характеристичних поліномів двох варіантів системи показав, що, за інших рівних умов двоконтурна МСОВК з двома І-регуляторами володіє меншою чутливістю до варіації параметрів $T_{ок}$ і ξ об'єкта керування (змінною $K_{ок}$ можна знехтувати). Це пояснюється тим, що на відміну від полінома передавальної функції (3.4), де коефіцієнти при p^2 і p^3 визначаються нестационарними параметрами об'єкта, в поліномі (3.16) від зміни $T_{ок}$ і ξ змінюють свої значення лише коефіцієнти при p в четвертій і третій ступенях. Менша чутливість системи П до варіації параметрів об'єкта керування підтверджена також результатами обчислювальних експериментів.

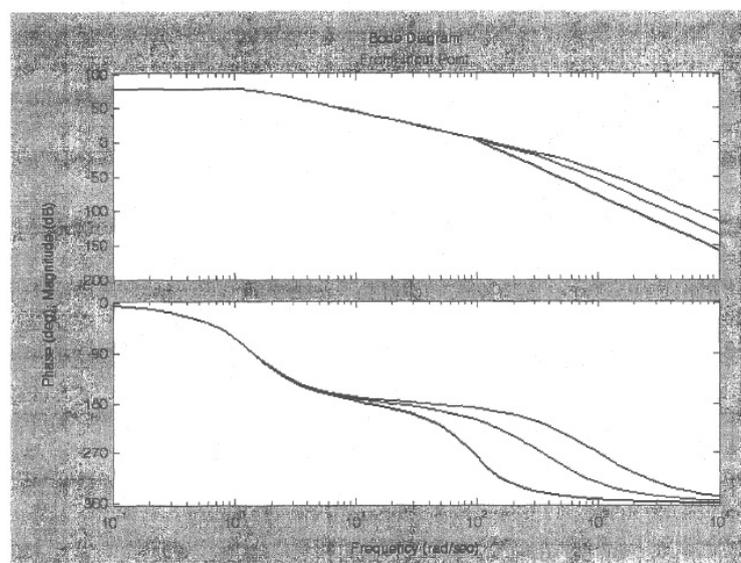


Рисунок 3.9 – Частотні характеристики двоконтурної МСОВК з двома І-регуляторами

Порівняльний аналіз результатів обчислювальних експериментальних досліджень (рис.3.6, 3.9) також показав, що при рівних значеннях параметрів регуляторів система II володіє більшою частотою зрізу і меншим часом перехідного процесу, ніж система I.

Тому для подальших досліджень розглядається II варіант системи.

3.3 Області досяжних показників якості і параметричну оптимізація регуляторів системи керування

Критерієм параметричної оптимізації регуляторів системи є визначення областей досяжних показників якості САК.

Відомо [17], що перехідний процес в системі залежить не тільки від властивостей системи автоматичного керування, а й від характеру зовнішнього впливу. Розглянемо поведінку САК при дії одиничної ступінчастою функції $g(t) = l(t) = \begin{cases} 1 & \text{при } t > 0 \\ 0 & \text{при } t \leq 0 \end{cases}$ і нульових початкових умовах.

Вимагатимемо, щоб в системі керування процес був монотонним з максимально можливою швидкістю і максимальною смугою пропускання.

Для визначення значень часу регулювання t_p і перерегулювання σ скористаємося обчислювальною моделлю системи керування, представленої на рисунку 3.7.

Досліджуємо вплив величин коефіцієнтів жорсткості C і демпфірування D чаю на перехідні характеристики тиску преса на чайну масу при незмінних значеннях постійних часу регуляторів системи керування $T_{и1}$ і $T_{и2}$ за наступною методикою:

1. У блок M1 заносимо значення задатчика тиску $P_3 = 0,2 \text{ МПа}$.
2. У блоки M7 і M4 заносимо значення постійних часу регуляторів системи $T_{и1} = 1 \text{ с}$ і $T_{и2} = 0,05 \text{ с}$.

3. У блок М9 заносимо значення коефіцієнта передачі $K_{ок}$, постійної часу $T_{ок}$ і коефіцієнта демпфірування ξ , відповідні першого етапу переробки: $K_{ок} = 6,72 \cdot 10^{-5}$, $T_{ок} = 0,0111$ с, $\xi = 0,58$.

4. Фіксуємо перехідний процес тиску преса на чайну масу в блоці М12.

5. Змінюємо параметри блоку М9 на значення, відповідні другого етапу обробки $K_{ок} = 7,79 \cdot 10^{-5}$, $T_{ок} = 0,00296$ с, $\xi = 0,959$.

6. Повторюємо п.4.

7. Змінюємо параметри блоку М9 на значення, відповідні третього етапу обробки $K_{ок} = 8,18 \cdot 10^{-5}$, $T_{ок} = 0,000998$ с, $\xi = 0,994$.

8. Повторюємо п.4.

9. У блоках М7 і М4 змінюємо значення постійних часу регуляторів системи $T_{И1} = 1$ с і $T_{И2} = 0,05$ с на $T_{И1} = 10$ с і $T_{И2} = 1,0$ с.

10. Повторюємо пп.3-8.

11. У блоках М7 і М4 змінюємо значення постійних часу регуляторів системи $T_{И1} = 10$ с і $T_{И2} = 1,0$ на $T_{И1} = 5$ с і $T_{И2} = 7,0$ с.

12. Повторюємо пп.3-8.

13. У блоках М7 і М4 змінюємо значення постійних часу регуляторів системи $T_{И1} = 5$ с і $T_{И2} = 7,0$ с на $T_{И1} = 400$ с і $T_{И2} = 50,0$ с.

14. Повторюємо пп.3-8.

Сімейство кривих перехідних процесів при зміні параметрів об'єкта керування представлені на рисунку 3.10. На кожному з наведених графіків існують три збігаючі лінії, відповідні параметрам об'єкта керування на кожному з етапів переробки при незмінних параметрах регуляторів системи керування. Порівняльний аналіз результатів експериментів показує, що зміна параметрів об'єкта контрольний засіб не впливає на перехідні характеристики системи автоматичного керування, так як криві перехідних характеристик збігаються. Тому дослідження впливу параметрів регуляторів системи керування будемо проводити при значеннях параметрів об'єкта керування, які відповідають одному з етапів, наприклад, першому.

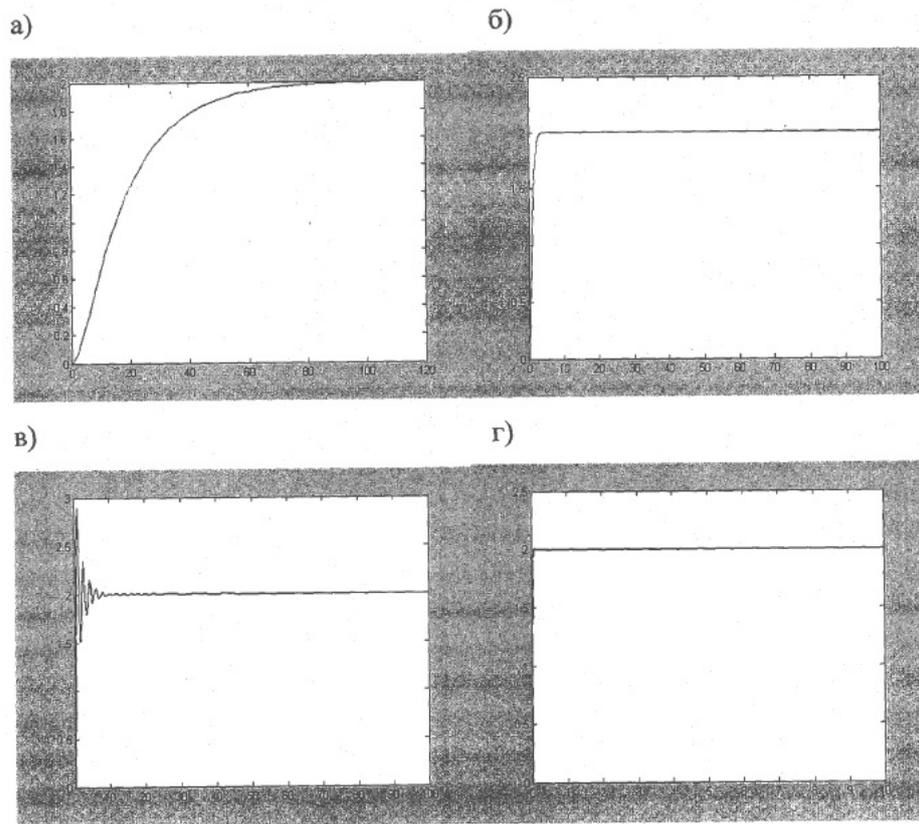


Рисунок 3.10 – Сімейства кривих перехідних процесів при зміні параметрів об'єкта керування при: а) $T_{11} = 1\text{c}$ і $T_{12} = 0,05\text{c}$; б) $T_{11} = 10\text{c}$ і $T_{12} = 10\text{c}$; в) $T_{11} = 5\text{c}$ і $T_{12} = 7,0\text{c}$; г) $T_{11} = 400\text{c}$ і $T_{12} = 50,0\text{c}$

Досліджуємо поведінку САК при змінних значеннях параметрів регуляторів системи керування T_{11} і T_{12} за такою методикою:

1. У блок М1 заносимо значення задатчика тиску $P_3 = 0,2$ МПа.
2. У блок М9 заносимо значення коефіцієнта передачі $K_{ок}$, постійної часу $T_{ок}$ і коефіцієнта демпфірування ξ , що відповідають першому етапу переробки: $K_{ок} = 6,72 \cdot 10^{-05}$, $T_{ок} = 0,0111\text{c}$, $\xi = 0,58$.
3. У блоки М7 і М4 заносимо значення постійних часу регуляторів системи $T_{11} = 1\text{c}$ і $T_{12} = 0,05\text{c}$.
4. Фіксуємо перехідний процес тиску преса на чайну масу в блоці М12.
5. У блоці М4 послідовно змінюємо значення постійної часу другого регулятора $T_{12} = 0,05\text{c}$ на $T_{12} = 0,1; 0,5; 1; 2; 4; 7; 10; 20; 50\text{c}$.
6. Повторюємо П.4 для кожного значення T_{12} .

7. У блоках М7 і М4 послідовно змінюємо значення постійних часу регуляторів системи $T_{I1} = 1\text{с}$ і $T_{I2} = 50\text{с}$ на $T_{I1} = 2; 3; 5; 7; 10; 20; 30; 50; 100; 200; 300\text{с}$ і $T_{I2} = 0,05\text{с}$.

8. Повторюємо пп.4-6 для кожного із значень для кожного значення T_{I1} .

Сімейства кривих перехідних процесів при зміні параметрів регуляторів системи керування представлені на рисунках 3.11–3.13.

За результатами серії експериментальних досліджень за запропонованою методикою побудовані поверхні області досяжних показників якості системи керування за часом регулювання t_p (рис. 3.14) і перерегулювання σ (рис. 3.15). Значення перерегулювання обмежена 10%.

При використанні в системі керування інтегральних регуляторів для забезпечення максимально можливої смуги пропускання параметри регуляторів системи повинні мати мінімальні значення.

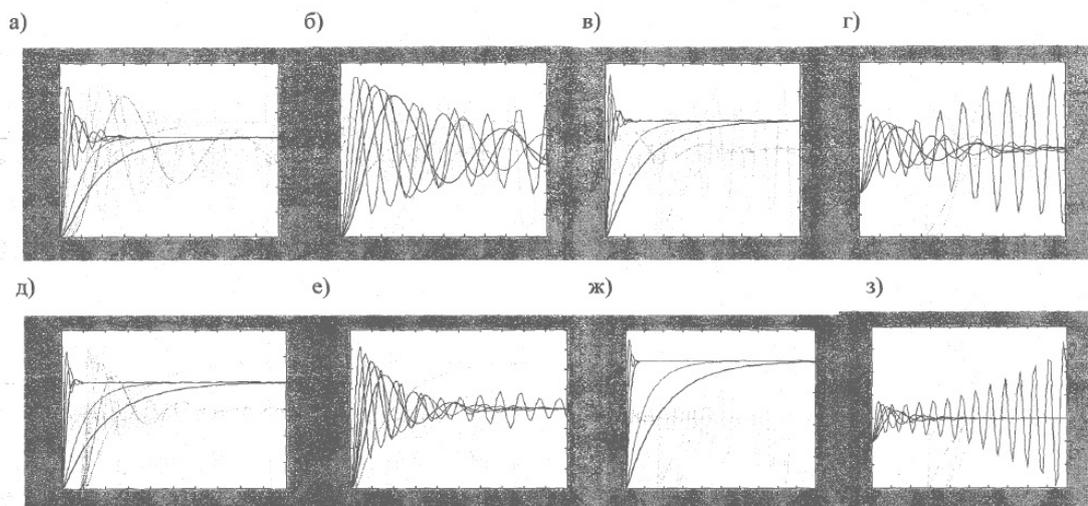


Рисунок 3.11 – Сімейства кривих перехідних процесів при зміні параметрів регуляторів системи керування. Колір ліній відповідає значенням T_{I2} з найменшого до найбільшого: синій, зелений, червоний, блакитний, фіолетовий.

а) $T_{I1} = 1\text{с}$ і $T_{I2} = 0,05; 0,1; 0,5; 1; 2\text{с}$; б) $T_{I1} = 1\text{с}$ і $T_{I2} = 4; 7; 10; 20; 50\text{с}$; в) $T_{I1} = 2\text{с}$ і $T_{I2} = 0,05; 0,1; 0,5; 1; 2\text{с}$; г) $T_{I1} = 3\text{с}$ і $T_{I2} = 0,05; 0,1; 0,5; 1; 2\text{с}$; е) $T_{I1} = 3\text{с}$ і $T_{I2} = 4; 7; 10; 20; 50\text{с}$; ж) $T_{I1} = 5\text{с}$ і $T_{I2} = 0,05; 0,1; 0,5; 1; 2\text{с}$; з) $T_{I1} = 5\text{с}$ і $T_{I2} = 4; 7; 10; 20; 50\text{с}$.

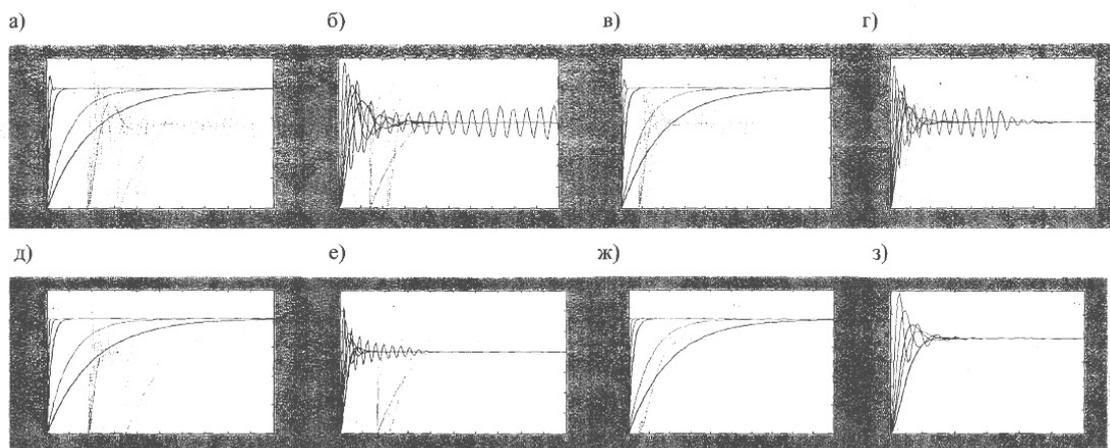


Рисунок 3.12 – Сімейства кривих перехідних процесів при зміні параметрів регуляторів системи керування. Колір ліній відповідає значенням T_{I2} з найменшого до найбільшого: синій, зелений, червоний, блакитний, фіолетовий

а) $T_{I1} = 7\text{c}$ і $T_{I2} = 0,05; 0,1; 0,5; 1; 2\text{c}$; б) $T_{I1} = 7\text{c}$ і $T_{I2} = 4; 7; 10; 20; 50\text{c}$; в) $T_{I1} = 10\text{c}$ і $T_{I2} = 0,05; 0,1; 0,5; 1; 2\text{c}$; г) $T_{I1} = 10\text{c}$ і $T_{I2} = 4; 7; 10; 20; 50\text{c}$; д) $T_{I1} = 20\text{c}$ і $T_{I2} = 0,05; 0,1; 0,5; 1; 2\text{c}$; е) $T_{I1} = 20\text{c}$ і $T_{I2} = 4; 7; 10; 20; 50\text{c}$; ж) $T_{I1} = 30\text{c}$ і $T_{I2} = 0,05; 0,1; 0,5; 1; 2\text{c}$; з) $T_{I1} = 30\text{c}$ і $T_{I2} = 4; 7; 10; 20; 50\text{c}$.

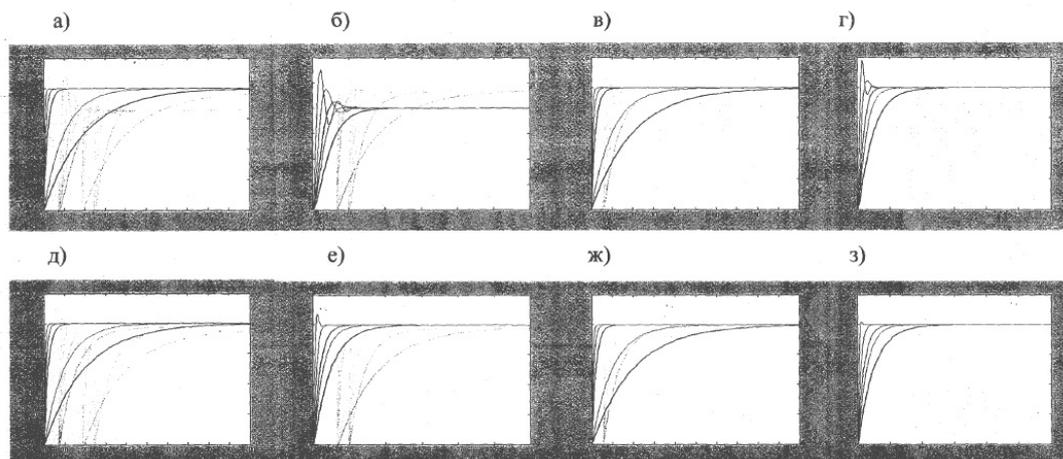


Рисунок 3.13 – Сімейства кривих перехідних процесів при зміні параметрів регуляторів системи керування. Колір ліній відповідає значенням T_{I2} з найменшого до найбільшого: синій, зелений, червоний, блакитний, фіолетовий

а) $T_{I1} = 50\text{c}$ і $T_{I2} = 0,05; 0,1; 0,5; 1; 2\text{c}$; б) $T_{I1} = 50\text{c}$ і $T_{I2} = 4; 7; 10; 20; 50\text{c}$; в) $T_{I1} = 100\text{c}$ і $T_{I2} = 0,05; 0,1; 0,5; 1; 2\text{c}$; г) $T_{I1} = 100\text{c}$ і $T_{I2} = 4; 7; 10; 20; 50\text{c}$; д) $T_{I1} = 200\text{c}$ і $T_{I2} = 0,05; 0,1; 0,5; 1; 2\text{c}$; е) $T_{I1} = 200\text{c}$ і $T_{I2} = 4; 7; 10; 20; 50\text{c}$; ж) $T_{I1} = 300\text{c}$ і $T_{I2} = 0,05; 0,1; 0,5; 1; 2\text{c}$; з) $T_{I1} = 300\text{c}$ і $T_{I2} = 4; 7; 10; 20; 50\text{c}$.

3.4 Програмно-апаратна реалізація системи керування

В даний час відомо два шляхи технічної реалізації цифрової системи керування – апаратна та програмно-апаратна. Кращім є варіант програмно-апаратної технічної реалізації системи, що пояснюється більшою гнучкістю при налаштуванні регуляторів системи.

Функціональна схема системи автоматичного керування технологічним процесом скручування представлена на рисунку 3.16. Вона включає в себе цифровий контролер з пристроєм сполучення, силовий керований перетворювач, електродвигун, механічну частину електроприводу преса ролера, динамічну частину об'єкта керування, датчик тиску преса на чайну масу, датчик переміщення преса і блок логіки.

Датчик переміщення преса використовується для формування програмної траєкторії зміни тиску преса на чайну масу на етапах розгону і гальмування преса в процесі виведення установки на режим стабілізації тиску і в процесі відведення преса від чайної маси.

Задаючий пристрій і регулятори системи передбачається реалізувати програмно на базі цифрового контролера С-60. Установка для скручування обладнано електроприводом з універсальним реверсивним електродвигуном марки ІЕ-1013 з силовим керованим перетворювачем. Система забезпечена зворотним зв'язком з гідравлічним датчиком тиску 2МД-5т,

Задатчик формує програмну траєкторію монотонної зміни тиску (рис. 3.17).

Розроблено алгоритм програмної реалізації системи керування (рис. 3.18). У цьому алгоритмі можна виділити три блоки. Перший блок (оператор 1) – введення параметрів налаштування системи, другий (оператор 6) – формування програмної траєкторії зміни тиску преса, третій (оператори 2–3,7–16) – програмні регулятори і пристрої порівняння системи керування.

При формуванні програмної траєкторії в алгоритм введені такі позначення: $D_0(t) = d^2p/dt^2$, $D_1(t)$, $D_2(t)$ – прискорення, швидкість та зміна

тиску преса на чайну масу відповідно, $D_0 = D_1 (t = t_c)$, $P_{пс} = P_{п} (t = 2t_c + t_{п})$. Швидкість переміщення преса P_{μ} до досягнення чайної маси або при русі від чайної маси при нульовому значенні тиску є величиною постійною. Сигнал $x_{ц}$ забезпечує завдання напрямку руху преса. Введення координати x_{12} забезпечує перешкодозахищеність системи при $x = x_0$.

Алгоритм програмної реалізації передбачає відпрацювання наступних технологічних етапів:

1. Рух преса до зіткнення з чайною масою. При цьому переміщення x преса не може бути більше висоти x завантажувального бака ($x \leq x_1$). Закінчення етапу характеризується збільшенням тиску P преса по відношенню до початкового тиску P_0 ($P > P_0$) або умовою $x \geq x_1$.

2. Відпрацювання програмної траєкторії $P(t)$ відповідно до рисунка 3.22.

3. Відведення преса до крайнього верхнього положення ($x = x_0$).

4. Витримка $t_b = 300$ секунд при $x = x_0$, $x_{12} = 0$.

5. Повторення п. 1-4.

6. Повторення п. 1-3.

7. Зупинка установки в момент часу $t = t_3$.

На підставі проведених експериментальних досліджень, підтверджуючих справедливості основних положень теоретичної частини даної роботи, запропонована наступна інженерна методика синтезу регуляторів синтезованої системи керування.

1. Введення вихідних даних: C_{\min} , C_{\max} , m , D_{\min} , D_{\max} , $K_{пн}$.

2. Розрахунок параметрів об'єкта і системи керування:

$$T_{ок\max} = \sqrt{\frac{m}{C_{\min}}}, T_{ок\min} = \sqrt{\frac{m}{C_{\max}}}, \xi_{\min} = \frac{D_{\min}}{2T_{ок\min} C_{\max}}, \xi_{\max} = \frac{D_{\max}}{2T_{ок\max} C_{\min}}; \quad (3.33)$$

$$K_{зш} = \frac{1}{S \cdot 10^5}.$$

3. Визначення коефіцієнта передачі $K_{ок}$ проводиться постановкою експерименту на обчислювальній моделі спрощеного об'єкта керування, показаному на рисунку 2.16.

4. Визначення мінімальних значень параметрів T_{11} і T_{12} регуляторів системи керування з умови її стійкості відповідно до виразу (3.33) для мінімального значення постійної часу $T_{ок}$.

5. Вибір параметрів регуляторів T_{11} і T_{12} по перерегулюванню σ й часу перехідного процесу t_p . Для визначення значень регуляторів на поверхнях (рис.3.14 та 3.15) будуються криві як перетини поверхні і площини з заданим значенням критеріїв. Координати точки перетину проєкцій кривих на площині параметрів регуляторів є шуканими значеннями T_{11} та T_{12} .

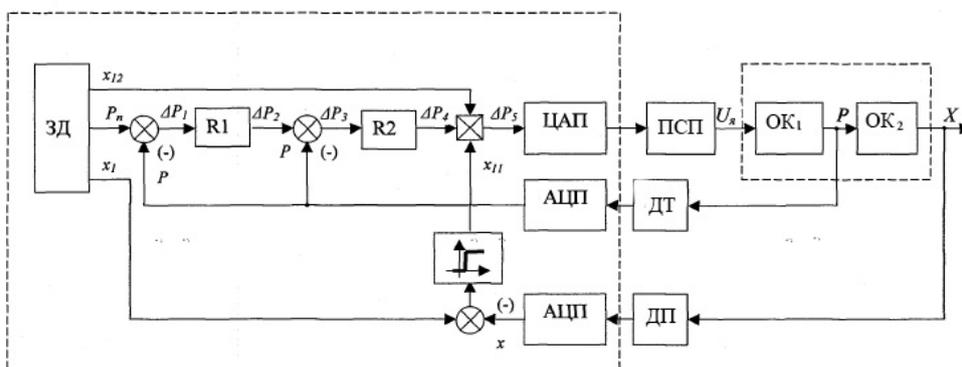


Рисунок 3.16 – Функціональна схема системи автоматичного керування технологічним процесом скручування

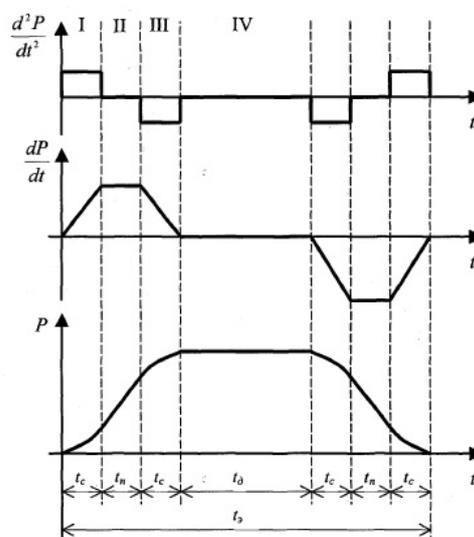


Рисунок 3.17 – Графіки зміни задаючих величин в часі

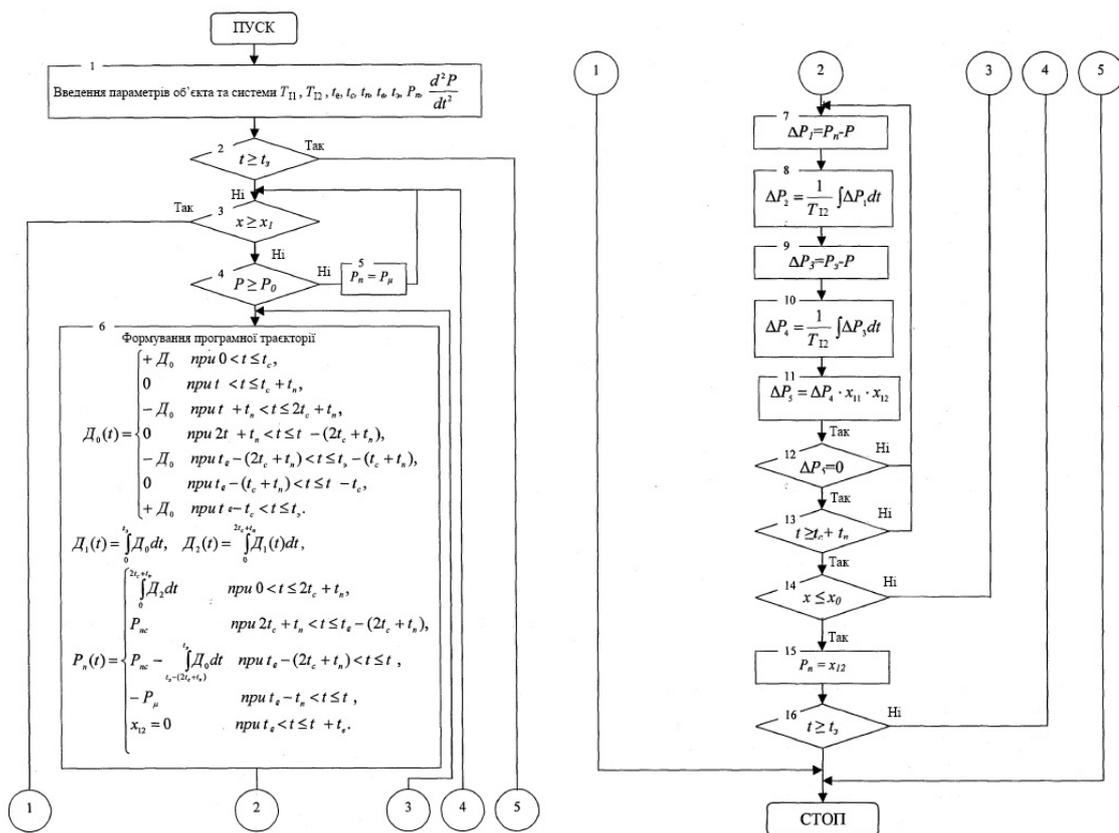


Рисунок 3.18 – Алгоритм програмної реалізації системи керування

РОЗДІЛ 4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

4.1 Техніко-економічне обґрунтування

У магістерській роботі виконано розробку системи автоматизації системи стабілізації параметрів технологічного процесу скручування чайного листа в електромеханічному ролері. Вона включає в себе цифровий контролер з пристроєм сполучення, силовий керований перетворювач, електродвигун, механічну частину електроприводу преса ролера, динамічну частину об'єкта керування, датчик тиску преса на чайну масу, датчик переміщення преса і блок логіки.

Використання синтезованої системи керування дозволить збільшити виробництво чаю більш високої сортності на 10...20%, а також зменшити кількість простоїв та ремонтів обладнання.

4.2 Визначення витрат на удосконалення САК скручування чайного листа

Для удосконалення САК скручування чайного листа закуплені комплектуючі, перелік яких зведений у таблицю 4.1.

Таблиця 4.1 – Перелік необхідних комплектуючих

Найменування та технічна характеристика	Тип	Од. виміру	К-ть	Ціна за одиницю грн.	Ціна грн.
Цифровий контролер	CS6S	шт.	1	1500	1500
Датчик тиску	AGCO	шт.	1	700	700
Датчик температури	TP-16/500 (500C)	шт.	1	500	500
Датчик переміщення пресу	MLC 420	шт.	1	500	500
Кроковий електродвигун	86BYG250B-14	шт.	1	5500	5500
Всього:					8700

Таким чином, витрати на придбання комплектуючих для удосконалення САК скручування чайного листа дорівнюють:

$$Z_k = 8700 \text{ грн.}$$

Розрахунок заробітної платні з нарахуваннями.

Для встановлення системи необхідно виконати роботи по встановленню, монтажу системи керування, демонтажу старого обладнання, налагодці та пуску системи. Вказані роботи будуть проводити бригада з одного слюсара 5-го розряду протягом доби.

Витрати на заробітну плату з нарахуваннями визначимо за формулою:

$$S_{\text{ЗПМ}} = K_{\text{нз}} \cdot \lambda \cdot t \cdot \sum_{i=1}^m C_{ti} (1 + H); \quad (4.1)$$

де: $K_{\text{нз}}$ – коефіцієнт, який враховує накладні витрати на заробітну плату, $K_{\text{нз}} = 1,3$;

λ – коефіцієнт, який враховує премії, $\lambda = 1,25$;

t – час виконання робіт, год;

C_{ti} – часова тарифна ставка працівника i -го розряду.

H – норма нарахування на заробітну плату, $H = 0,22$;

m – кількість робочих, чол.

$$S_{\text{ЗПМ}} = 1,3 \cdot 1,25 \cdot 1 \cdot (37,87 \cdot 1) \cdot (1 + 0,22) = 600,62 \text{ грн.}$$

Визначення загальної суми витрат.

Витрати на удосконалення САК скручування чайного листа як суму витрат на купівлю комплектуючих та витрат на заробітну плату з нарахуваннями робітникам, які проводять модернізацію:

$$Z_m = Z_k + Z_{\text{ЗПМ}}; \quad (4.2)$$

$$Z_m = 8700 + 600,62 = 9300,62 \text{ грн.}$$

4.3 Розрахунок річного фонду роботи ролера

Розрахунок річного фонду часу роботи ролера проведемо за формулою:

$$T_p = \frac{T_\Phi}{\frac{1}{t_{cm} \cdot K_{cm}} + D_p}; \quad (4.3)$$

де: T_Φ – річний фонд робочого часу, $T_\Phi = 251$ днів;

t_{cm} – тривалість зміни в машино-годинах, $t_{cm} = 8$;

K_{cm} – коефіцієнт змінності роботи устаткування, $K_{cm} = 1$;

D_p – простой в машино-днях у всіх видах технічного обслуговування і ремонту, який приходить на одну машино-годину, визначимо за формулою:

$$D_p = \frac{\sum_{i=1}^n d_{pi} \cdot a_i}{T_{ц}}; \quad (4.4)$$

де: n – число різновидів технічних обслуговувань та ремонтів за міжремонтний період;

d_{pi} – тривалість перебування в i -му ремонті чи технічному обслуговуванні;

a_i – кількість i -х ремонтів чи технічних обслуговувань за міжремонтний період;

До та після модернізації час міжремонтного циклу складає 8760 годин. До удосконалення САК проводилось 6 оглядів впродовж 1,0 години, а після 4 оглядів впродовж 1,0 години. Враховуючи наведене, розраховуємо простой в машино-днях при всіх видах технічного обслуговування до та після модернізації:

$$D_{p1} = \frac{1 \cdot 1 \cdot 6}{8760} = 0,0007 \frac{\text{маш.днів}}{\text{маш.год}}$$

$$D_{p2} = \frac{1 \cdot 1 \cdot 4}{8760} = 0,0005 \frac{\text{маш.днів}}{\text{маш.год}}$$

Тоді річний фонд часу роботи ролера дорівнюватиме відповідно:

$$T_{р1} = \frac{251}{\frac{1}{8 \cdot 1} + 0,0007} = 1996,82 \text{ год.}$$

$$T_{р1} = \frac{251}{\frac{1}{8 \cdot 1} + 0,0005} = 2000,00 \text{ год.}$$

4.4 Розрахунок річної експлуатаційної продуктивності

Річна експлуатаційна продуктивність ролера визначається за формулою:

$$B = B_{\text{Е.Г.П}} \cdot T_{\text{P}} \cdot K_{\text{ПР}}, \quad (4.5)$$

де: $B_{\text{Е.Г.П}}$ – годинна експлуатаційна продуктивність, (0,24 т/год.);

$K_{\text{ПР}}$ – коефіцієнт, що враховує простій, не враховане в годинній експлуатаційній продуктивності.

Після удосконалення САК скручування чайного листа та встановлення сучасного вимірювального обладнання продуктивність збільшиться на 10 %.

Таким чином до та після удосконалення САК скручування чайного листа річна продуктивність складає:

$$B_1 = 0,24 \cdot 1996,82 \cdot 0,9 = 431,31 \text{ т/рік.}$$

Після модернізації:

$$B_2 = 0,26 \cdot 3909,66 \cdot 0,9 = 468,00 \text{ т/рік.}$$

4.5 Розрахунок поточних річних витрат

Поточні річні експлуатаційні витрати визначаються для ролера до та після модернізації.

Процесом скручування чайного листа в ролері займається один робітник 5-го розряду, після удосконалення САК склад не зміниться.

Витрати на заробітну плату до та після модернізації складають:

$$S_{ЗП} = 1,3 \cdot 1,25 \cdot 1996,82 \cdot 37,87 \cdot 1 \cdot (1 + 0,22) = 149915,80 \text{ грн.}$$

$$S_{ЗП} = 1,3 \cdot 1,25 \cdot 2000,00 \cdot 37,87 \cdot 1 \cdot (1 + 0,22) = 150154,55 \text{ грн.}$$

Визначення витрат на технічне обслуговування та поточний ремонт ролера.

Витрати на технічне обслуговування і поточний ремонт ролера визначимо за формулою:

$$S_{ТО} = S_{ТОЗ} + S_{ТОМ}; \quad (4.6)$$

де: $S_{ТОЗ}$ – витрати на заробітну плату ремонтників з нарахуваннями;

$S_{ТОМ}$ – витрати на матеріали та запасні частини.

Витрати на заробітну плату ремонтних робітників з нарахуваннями визначаються за формулою:

$$S_{ТОЗ} = \frac{T_P}{T_{Ц}} \cdot K_{НЗ} \cdot \lambda \cdot C_P \cdot \sum_{i=1}^m a_{pi} \cdot \chi_{pi} \cdot (1 + H); \quad (4.7)$$

де: C_P – середня тарифна ставка ремонтного робітника, що обслуговують установку, грн/год;

a_{pi} – кількість техобслуговувань і поточних ремонтів без капітального ремонту;

χ_{pi} – трудємкість і-го технічного обслуговування та поточного ремонту, до і після – $\chi_{pi} = 9,8$; $\chi_{pi} = 8,54$.

Витрати на матеріали та запасні частини визначаються за формулою:

$$S_{ТОМ} = K_{Ш} \cdot \frac{S_{ТОЗ} \cdot (1 - H)}{K_{НЗ}} \cdot K_{ЗР}; \quad (4.8)$$

де: $K_{Ш}$ – норма накладних розходів за всіма видами витрат, крім заробітної плати, $K_{Ш} = 1,1$;

$K_{ЗР}$ – коефіцієнт переходу від витрат на заробітну плату до витрат на матеріали та запасні частини, $K_{ЗР} = 1,25$.

До модернізації для технічного огляду та поточного ремонту необхідно один слюсар КВПіА 5-го розряду. Після модернізації їх склад не змінився. Огляд проводиться 6 разів на рік до модернізації та 4 після.

$$S_{\text{ТОЗ1}} = \frac{1996,82}{8760} \cdot 1,3 \cdot 1,25 \cdot 1 \cdot 6 \cdot 9,8 \cdot 37,87 \cdot (1 + 0,22) = 1006,28 \text{ грн.}$$

$$S_{\text{ТОЗ2}} = \frac{2000,00}{8760} \cdot 1,3 \cdot 1,25 \cdot 1 \cdot 4 \cdot 8,54 \cdot 37,87 \cdot (1 + 0,22) = 585,53 \text{ грн.}$$

Витрати на матеріали та запасні частини до модернізації складають:

$$S_{\text{ТОМ1}} = 1,1 \cdot \frac{1006,28 \cdot (1 - 0,22)}{1,3} \cdot 1,25 = 830,18 \text{ грн.}$$

Витрати на матеріали та запасні частини після модернізації:

$$S_{\text{ТОМ2}} = 1,1 \cdot \frac{585,53 \cdot (1 - 0,22)}{1,3} \cdot 1,25 = 483,06 \text{ грн.}$$

Таким чином, витрати на технічне обслуговування та поточний ремонт ролера до модернізації склали:

$$S_{\text{ТО1}} = 1006,28 + 830,18 = 1836,46 \text{ грн.}$$

після модернізації:

$$S_{\text{ТО2}} = 585,53 + 483,06 = 1068,59 \text{ грн.}$$

Величину витрат на електроенергію визначимо за формулою:

$$S_{\text{ЕЛ}} = K_{\text{Ш}} \cdot W_{\text{ЕЛ}} \cdot V_{\text{ЕЛ}} \cdot T_{\text{Р}}; \quad (4.9)$$

де: $V_{\text{ЕЛ}}$ – ціна 1 кВт/год електроенергії – 5,5 грн;

$W_{\text{ЕЛ}}$ – витрата за годину енергії, кВт/год.

Споживання електроенергії ролера складало 6 кВт/год, після удосконалення САК енергоспоживання не зміниться.

Виходячи з цього витрати на електроенергію до модернізації склали:

$$S_{\text{ЕЛ1}} = 1,1 \cdot 6 \cdot 5,5 \cdot 1996,82 = 72484,57 \text{ грн.}$$

після модернізації:

$$S_{\text{ЕЛ2}} = 1,1 \cdot 6 \cdot 5,5 \cdot 2000,00 = 72600,00 \text{ грн.}$$

Розрахунок суми річних витрат на експлуатацію ролера зведений у таблицю 4.2.

Таблиця 4.2 – Сума річних витрат на експлуатацію

Найменування статті витрат	Величина витрат	
	До впровадження САК, грн.	Після впровадження САК, грн.
Зарплата з нарахуваннями	149915,80	150154,55
ТО та поточний ремонт	1836,46	1068,59
Електроенергія	72484,57	72600,00
Разом	224236,83	223823,14

4.6 Розрахунок вартості машино–години роботи ролера

Розрахунок вартості машино–годин розраховуємо за формулою:

$$S_{\text{МГ}} = \frac{S}{T_p}; \quad (4.10)$$

До модернізації вартість однієї машино-години складала:

$$S_{\text{МГ1}} = \frac{224236,83}{1996,82} = 112,30 \text{ грн. / год.}$$

Після модернізації вартість однієї машино-години змінилась і складає:

$$S_{\text{МГ2}} = \frac{223823,14}{2000,00} = 111,91 \text{ грн. / год.}$$

4.7 Розрахунок вартості технологічної операції на одиницю продукції

Вартість технологічної операції визначається за формулою:

$$S_{\text{П}} = \frac{S}{B}; \quad (4.11)$$

До модернізації вартість складала:

$$S_{\text{П1}} = \frac{224236,83}{431,31} = 519,90 \text{ грн. / т.}$$

Після модернізації вартість складає:

$$S_{\text{п2}} = \frac{223823,14}{2000,00} = 478,25 \text{ грн. / т.}$$

4.8 Розрахунок економічного ефекту від проведення модернізації

Річний економічний ефект від проведення модернізації визначається за формулою:

$$E = (S_{\text{п1}} - S_{\text{п2}}) \cdot B; \quad (4.12)$$

$$E = (519,90 - 478,25) \cdot 223823,14 = 19492,20 \text{ грн / рік.}$$

Термін окупності витрат по модернізації розрахуємо за формулою:

$$T = \frac{Z_{\text{м}}}{E}; \quad (4.13)$$

$$T = \frac{9300,62}{19492,20} = 0,39 \text{ років} \approx 5 \text{ місяців.}$$

Отже, термін окупності приблизно 5 місяців.

Висновки за розділом

Витрати на технічне обслуговування та поточний ремонт електрообладнання зменшились на 41,81 %.

Витрати на електроенергію електропривода збільшились на 0,16 %.

Вартість машино-години роботи електропривода зменшились на 0,35%.

Вартість технічної операції для одиниці продукції після модернізації знизилась на 8,01 %.

Економічна ефективність від проведеної автоматизації склала 19492,20 грн.

Таблиця 4.3 – Техніко-економічні показники удосконалення системи стабілізації параметрів технологічного процесу скручування чайного листа в електромеханічному ролері

Показники	Одиниці виміру	Значення		
		до модернізації	після модернізації	абсолютне відхилення
1. Капітальні витрати на модернізацію	грн.	х	9300,62	х
2. Річний фонд часу роботи	год.	1996,82	2000,00	-3,18
3. Річна експлуатаційна продуктивність	т	431,31	468,00	-36,69
4. Річні експлуатаційні витрати, усього:	грн.	224236,83	223823,14	+413,69
у тому числі: витрати на оплату праці	грн.	149915,80	150154,55	-238,75
витрати на ТО та ТР	грн.	1836,46	1068,59	+767,87
витрати на електроенергію	грн.	72484,57	72600,00	-115,43
5. Вартість однієї машино-години роботи	грн./год.	112,30	111,91	+0,39
6. Вартість технологічної операції	грн./ т	519,90	478,25	+41,65
7. Річний економічний ефект	грн.	х	19492,20	х
8. Строк окупності капітальних вкладень	місяців	х	5	х

ВИСНОВКИ

Показано, що природні особливості вирощування чаю на порівняно невеликих площах в важкодоступних гірських районах і технологічна необхідність переробки сировини, головним чином – скручування чайного листа в ролери, через 3–6 годин після збору в умовах жорстких обмежень на тиск преса на чайну масу, температуру і вологість визначають актуальність автоматизації технологічного процесу скручування в ролери. Встановлено, що для ролерів порівняно невеликих габаритів рішення задачі їх автоматизації може бути зведене до розробки та створенню систем програмного автоматичного керування пресом ролера. Розроблено та виготовлено ролер з незалежним електроприводом преса (подана заявка на винахід). запропоновано і реалізована система вимірювання тиску преса ролера на чайну масу (подана заявка на винахід). Ці технічні рішення створюють передумови для автоматизації технологічного процесу скручування.

Встановлено динамічний взаємозв'язок процесів, що протікають в чайній масі, двигуні і механічній частини електроприводу преса ролера.

Тому під об'єктом керування розуміється сукупність двигуна і механічної частини електроприводу преса ролера, що обертаючого столу і чайної маси, що знаходиться в завантажувальному баку ролера. В допущенні сталості кутової швидкості ω_c обертання валу асинхронного електродвигуна приводу столу ролера керуючим впливом об'єкта вибрана напруга U_y на обмотці якоря двигуна постійного струму приводу преса. Вихідні координати – тиск P преса на чайну масу, температура Θ всередині неї і переміщення преса $x_{\text{вих}}$. Основні збурення – механічні і теплофізичні властивості γ чайної маси і температура $\Theta_{\text{під}}$ доквілля.

Розроблено математичний опис об'єкта керування, коли вихідні координатами є P і $x_{\text{вих}}$. На підставі запропонованих і обґрунтованих

розрахункових схем складені нелінійні рівняння об'єкта і синтезована його структура. Експериментально встановлено нелінійні залежності пружних і дисипативних характеристик чайної маси від її ущільнення.

Виконано дослідження теплових процесів при скручуванні чайної маси в ролери як елемента узагальненого об'єкта керування.

Проведено структурний синтез робастної системи керування технологічним процесом скручування у вигляді нелінійної багатоконтурної системи з однією вимірюваною координатою (БСОВК). Не лінійність обумовлена обмеженням за рівнем силового перетворювача.

Порівняльний аналіз двох варіантів двоконтурної БСОВК показав, що, за інших рівних умов двоконтурна БСОВК з двома І-регуляторами володіє меншою чутливістю до варіації параметрів об'єкта керування, а її динамічні характеристики більш стабільні в порівнянні з двоконтурною БСОВК з І-регулятором і ІІ-регулятором. Побудовано в просторі параметрів T_{i1} і T_{i2} регуляторів системи області досяжних показників якості керування, в яких забезпечуються критерії оптимізації системи. Встановлено, що зміна параметрів об'єкта керування на кожному з трьох етапів переробки сировини практично не змінює показники якості керування в БСОВК з двома І-регуляторами.

Розроблено обчислювальні моделі об'єкта і системи керування ролерів, запропоновані методики проведення обчислювальних експериментів по дослідженню динаміки об'єкта і системи. Проведені експерименти довели працездатність синтезованої системи керування процесом скручування чайної маси в ролери. Показано, що використання синтезованої системи керування дозволить збільшити виробництво чаю більш високої сортності на 10...20%. Створено методику інженерного проектування системи, на підставі якої розроблено варіант технічної реалізації системи керування технологічним процесом скручування на базі програмованого контролера С-60. Створено алгоритм програмної реалізації її регуляторів.

Перелік посилань

1. Бойко В. С., Бойко В. В., Видолоб Ю. Ф. та ін. Теоретичні основи електротехніки. Підручник: У 3 т.; Т. 2: Перехідні процеси у лінійних електричних кіл із зосередженими параметрами. – К.: ІВЦ "Видавництво «Політехніка»", 2008. – 224 с.
2. Галай М. В. Імпульсні, цифрові та релейні системи автоматичного керування: навчальний посібник: – Полтава: ПолтНТУ, – 2002. – 222 с.
3. Галай М. В. Лінійні неперервні системи автоматичного керування: навчальний посібник: – Полтава: ПолтНТУ, – 2001. – 140 с.
4. Голуб А. П. Системи керування електроприводами : навч. посібник / А. П. Голуб, Б. І. Кузнецов, І. О. Опришко, В. П. Соляник. – К. : НМК ВО, 1992. – 352 с.
5. Грабко В. В. Мікропроцесорні системи керування електроприводами. Розрахунок цифрової системи керування електроприводом постійного струму. Курсове та дипломне проектування : навчальний посібник / В. В. Грабко, М. П. Розводюк, В. В. Грабко. – Вінниця: ВНТУ, 2012. – 97 с.
6. Грабко В. В. Системи керування електроприводами. Розрахунок системи підпорядкованого керування електроприводом постійного струму. Курсове та дипломне проектування : навчальний посібник / В. В. Грабко, М. П. Розводюк, В. В. Грабко. – Вінниця: ВНТУ, 2010. – 89 с.
7. Лисиченко М. Л. Посібник "Електропривод у питаннях і відповідях" / М. Л. Лисиченко, П. І. Савченко, О. К. Тищенко, В. В. Гузенко — Х: ХНТУСГ; Факт, 2012., 2012. – 500 с.
8. Онушко В. В., Шефер О. В., Скрильник О. М. Асинхронні машини: посібник із модуля «Асинхронні машини»: – Полтава, ПолтНТУ, – 2008. – 183 с.

9. Онушко В. В., Шефер О. В. Електричні машини: Навчальний посібник. – Полтава: ПолтНТУ, –2015. – 536 с.

10. Павленко Т. П. Автоматизований електропривод загальнопромислових механізмів. Конспект лекцій (для студентів усіх форм навчання за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка, електромеханіка) / Т. П. Павленко, О. В. Донець, О. М. Петренко ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. – 132 с.

11. Півняк Г. Г. Сучасні частотно-регульовані асинхронні електроприводи з широтно-імпульсною модуляцією / Г. Г. Півняк, О. В. Волков. – Дніпропетровськ, НГУ, 2006. – 470 с.

12. Шебітченко В. Г., Стрижеус Д. Розрахунок статичних параметрів елементів автоматизованого електропривода: навчальний посібник: – Полтава: ПОЛТНТУ, – 2010. - 107 с.

13. Шебітченко В. Г., Шефер О. В., Бороздін М. К. Датчики й регулятори в автоматизованому електроприводі: навчальний посібник: –Полтава: ПОЛТНТУ, – 2011. - 88 с.

14. Шульга О. В. Навчальний посібник із грифом МОН «Автоматизоване керування електроприводами» з дисципліни «Системи керування електроприводами» для студентів вищих навчальних закладів: – Полтава: ПолтНТУ, – 2007. – 352 с.

15. 12. Ніколаєнко А.М. Мікропроцесорні та програмні засоби автоматизації [Текст]: навчальний посібник / А.М. Ніколаєнко, Н.О. Міняйло. Запоріжжя, ЗДІА, –2011. – 444

16. 13. Лазарєв Ю. Ф. Довідник з MATLAB / Електронний навчальний посібник з курсового і дипломного проектування. – К.: НТУУ "КПІ", 2013. – 132 с.

17. Шебітченко В.Г., Шефер О.В. Електронні пристрої у схемах трансформаторів та асинхронних двигунів // Навчальний посібник. – Полтава: ПолтНТУ. 2009.-54 с.

18. Шефер О. В., Скрильник О. М. Асинхронні машини: посібник із модуля «Асинхронні машини»: Полтава, ПолтНТУ, 2008. – 183 с.

19. Шпіт С.В. Системи автоматичного керування з еталоном – спостерігачем / Шпіт С.В., Янцеловський С.Г., Ткаченко О.І. // Адаптивні системи автоматичного управління. – 2008 – №12(32). – С. 145– 151.

20. Шпіт С.В., Семчишин А.В. Автономна багатомірна система керування з еталонами – спостерігачами/ Шпіт С.В., Семчишин А.В. // Адаптивні системи автоматичного управління. – 2009 - №13(33).- С. 97–107.

21. Шпіт С.В. Дуальний спостерігач в системах автоматичного керування/ Шпіт С.В. // Адаптивні системи автоматичного управління. - 2009 - №14(34).– С. 91–98.

22. Шпіт С.В. Дослідження систем керування при неповній апріорній інформації / Шпіт С.В. // Адаптивні системи автоматичного управління. - 2012 – №21(40). – С. 95–89.

23. Шпіт С.В. Дуальний спостерігач як компенсатор неконтрольованих збурень / Шпіт С.В. // Адаптивні системи автоматичного управління. – 2012 – №20(40). – С. 94–100.

24. Шульга О. В. Навчальний посібник «Автоматизоване керування електроприводами» з дисципліни «Системи керування електроприводами» для студентів вищих навчальних закладів: Полтава:ПолтНТУ, 2007. – 352 с.

ДОДАТКИ

Додаток А

SECTION 1 ANALYTICAL PART

1.1 Technological process of black tea production

Tea is a product from specially treated tea plant leaves.

The raw material for its production are perennial tropical evergreen plants *Thea*. The most common are two types of tea plants: Chinese *Thea Sinensis* and Assamese *Thea Assamica*. Each of them has several varieties that differ in size, shape, leaf structure and other characteristics. To obtain quality tea, the apical parts of the shoots are collected, consisting of leaf veins that have not yet bloomed, and two to five young leaves (flushes). They have the most favorable chemical composition for tea with high tasting properties. Old and rough shoots give low quality tea.

Depending on how fully biochemical and oxidative transformations take place, tea of different types and qualities can be obtained from the same raw materials. There are several technological schemes for the production of black tea. The highest quality and most expensive tea is obtained using the so-called orthodox technology (tea «ORTODOX»). At the same time, this technology is the most time consuming. In particular, this technology does not provide a continuous production process, which complicates its industrial application. With the artisanal application of this technology, product quality often deteriorates due to inaccurate compliance with technological parameters at different stages of processing.

The main production processes in the production of tea by this technology can be grouped as follows:

- collection – transportation – storage – wilting;
- twisting – sorting;
- fermentation;

- drying;
- sorting – blending – packing – packing.

Analysis of the technology of tea leaf production shows that one of its most important parts that affect the productivity of the process and product quality is the process of twisting withered leaves.

Black tea is the result of chemical interaction of phenolic compounds (tannin) and a complex of enzyme systems (enzymes). In the tea leaf cell, the enzymes are localized to the mesophile in the epidermal tissues and the tannin to the vacuole. The process of twisting the leaves is not subject to mechanical impact, so the enzyme system and tannin are separated by membranes. At mechanical action on tea leaves cellular juice is squeezed out of vacuole and impregnates hydrolyzing substances. Complexes of mesophilic oxidative enzymes with tannin in the vacuole are formed.

Therefore, twisting of withered tea leaves is carried out in order to destroy its cells, divide the flush into its component parts and give them a characteristic twisted barrel-shaped or cylindrical shape.

Cellular juice is distinguished by enveloping the surface of the twisted leaf, which is exposed to oxygen in the air – the enzymatic process begins.

The quality of raw materials and the quality of the final product are influenced by various factors: collection time, weather conditions, the number of coarse fractions in the collection and so on. The presence of leaf blades, petioles and veins in the tea leaf is explained by the morphological features of plant material [2]. Depending on the physical and mechanical properties of the collected leaf cuttings and especially the veins can have a negative impact on the quality of products or semi-finished tea. Leaf blade or vein are similar in structure to substances, but their content in one or another part of the leaf differs sharply. All components contained in the plant cell, in general, can be divided into two groups: substances – carriers of elastic deformation and substances – carriers of plastic deformation.

To obtain high quality tea, it is desirable that the raw materials contain substances of plastic deformation, they contribute adding tubular shapes of teapots during twisting, ensure the twisting of the leaf into a tube, and the content in the leaf

of substances – carriers of elastic deformation, on the contrary, prevent the formation of the characteristic shape of teapots. As the tea leaf coarsens, it gradually increases the content of substances – carriers of elastic deformation.

Petioles and veins are slightly inferior in chemical potential to the leaf blade, but when twisted, if the leaf is delicate, they form a single shape with the leaf blade, and when the leaf is coarse, the veins separate from the plate.

The task of twisting, in addition to crushing the cell structure, is to create a certain shape of the teapots, but since the roughened sheet during twisting is the separation of leaf blades and veins, the latter form the so-called red hairs, negatively affecting product quality. Usually the formation of hairs is observed during the twisting of a large fraction, so the parameters of the technological process of twisting directly depend on the quality of the collected tea raw materials.

The movement of tea mass in an open roller was experimentally studied. During the operation of the roller there are forces of different magnitudes and directions (Fig. 1.1): reaction forces R_2 from the cylinder walls and R_1 from the table cuvette and centrifugal force C . In the area of these forces is the area of maximum compressive stresses, which is schematically indicated by. Part of the tea mass begins to move in the direction of equal forces Q , which is at an angle with the axis of the cylinder Θ . After that, the raised tea leaf is poured from the center to the periphery and down under the influence of centrifugal force.

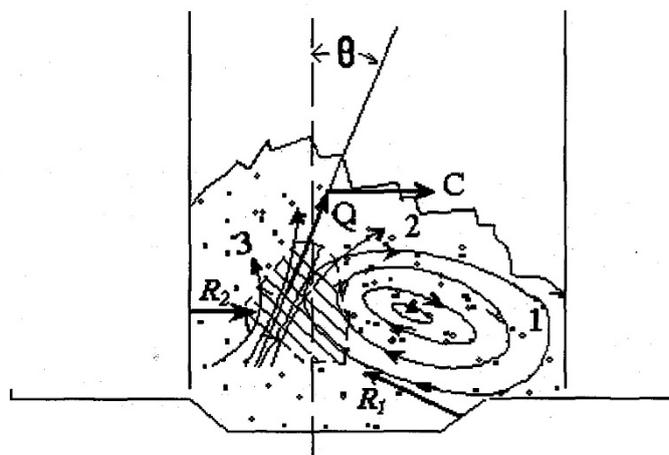


Figure 1.1 – Diagram of the distribution of forces arising in the open roller when twisting the tea leaf

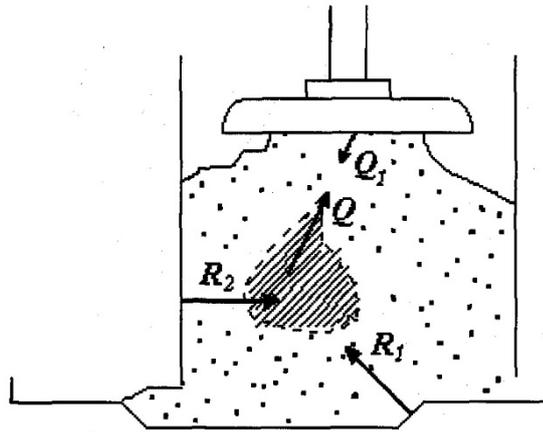


Figure 1.2 – Diagram of the distribution of forces arising in a closed roller when twisting a tea leaf

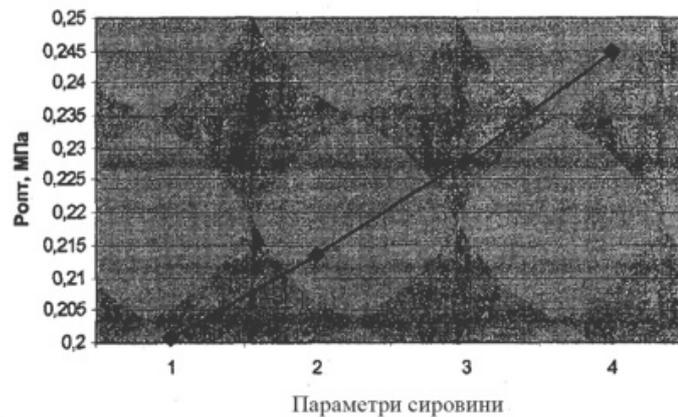


Figure 1.3 – Dependence of the optimal value of press pressure on the properties of raw materials

That is, the tea mass circulates on closed lines 1 and open lines 2 and 3.

It is established that during the twisting of tea in the roller remains a large number of surfaces moving at different speeds.

Therefore, the deformation and twisting of the elements of the tea flush is provided by friction between adjacent surfaces of the tea mass.

Closed rollers use a press, so the amount of compressive force increases. The action of the press is to create a counteracting Q_1 , equivalent to the force Q (Fig. 1.2). The force Q_1 simultaneously with the increase in compression stress reduces the speed of movement of the tea mass in the Central part from the bottom up. Thus counteracts the circulation of the letter. When $Q_1 = Q$, the circulation of the mass

completely stops and the abrasion of the sheet in the plane of the table begins, which negatively affects the quality of tea.

Usually carry out three twists of a sheet, for 45 minutes everyone, passing it in intervals between twists through sorting machines. The machines used to twist the tea leaf are called rollers. For the first twisting open rollers (without press) are used, for the following – closed (with press).

The technological work of the roller has distinctive features.

The process of twisting in a closed roller can be divided into several stages:

1. The movement of the press before the collision with the tea mass.
2. Compression of the tea mass and stabilization of the achieved optimal pressure of the press on the tea mass.
3. Withdrawal of the press from the tea mass and holding the press in the uppermost position.

Traditionally, the duration of each of the stages was set by the operator intuitively, as the design of the traditional roller does not provide control over any of the parameters of the technological process of twisting. The stage of movement of the press to the tea mass is not decisive in the process of twisting, but requires constant speed of the press to avoid jamming. Therefore, we will require that the duration of this stage be minimal, and the speed of movement of the press – constant. The duration of the second and third stages is a technological task that is currently unsolved.

In the process of twisting the leaves of the tea plant and their juice are exposed to oxygen, pressure, temperature and humidity. The optimal combination of these technological factors provides a quality process of twisting and fermentation. Fermentation, beginning with twisting (as soon as the leaf cells are destroyed and the juice released on its surface, interacts with oxygen in the air), which does not end after the cessation of twisting. To complete it, the twisted sheet must be placed in the fermentation room.

The speed of enzymatic processes depends on the temperature of the tea mass, and the change in temperature during twisting is a consequence of heat release

during the friction of the leaves, their movement relative to the table and cylinder walls and enzymatic processes. Given the instability of the frictional properties of the withered tea leaf, the volume of its loading, cooling conditions, etc., the temperature in the mass and, accordingly, the fermentation conditions are variable. The inconsistent characteristics of other main factors of the technological process, which are closely interrelated, are obvious.

It is known that the quality of tea directly depends on the pressure on the tea mass and the temperature distribution inside it. The dependence of the optimal value of the pressure P_{opt} on the ranked properties of raw materials has been experimentally established (Fig. 1.3). In turn, the temperature of the tea mass depends on the properties of the processed product and processing parameters:

$$\theta = f(\gamma, \theta_c, \omega_{nm}, \chi_{cm}, n, P); \quad (1.1)$$

where: θ – temperature in the tea mass;

γ – properties of tea mass;

θ_c – ambient temperature;

ω_{nm} – roller table rotation speed;

χ_{cm} – table shape;

n – number of load cycles;

P – is the pressure of the press on the tea mass.

At certain values of the process parameters, a combination of twisting and fermentation processes can be achieved. However, even today this task requires additional research due to the lack of clear criteria for duration and ways to measure the main parameters of these processes.

At this stage of research we use temporal criteria established empirically and based on the quality of the product, according to which pressure stabilization is carried out within 10 minutes, and holding the press in the uppermost position - for 5 minutes, which corresponds to traditional orthodox technology.

1.2 The principle of operation of the electromechanical device for twisting withered tea leaves

The twisting operation is one of the most responsible in the technological chain. Tea twisting machines (rollers) are used in the production of all types of tea: green (coke tea), yellow (lao tea), red and black.

A review of publications on the design and types of roller skates allows you to classify the latter by the following main features:

1) The intensity of the twisting process. Closed (with press) and open (without press). The former provide a more intensive process than the latter.

2) The relative motion of the tea mass and the table with reefs:

- Rollers of single action. They rotate only the loading tank or table with reefs.
- Double action rollers. In them there is a simultaneous rotation of a loading tank and a table with reefs.

- Triple action rollers. In them there is a simultaneous rotation of a loading tank, a table with reefs and a press.

3) Depending on the number of actuators, double and triple rollers can be single-engine or multi-engine. In the single-engine version, transmission mechanisms are used, distributing the movement from one engine to the table, press and cylinder with tea mass. In multi-engine – each of the actuators has an autonomous drive.

4) Depending on the nature of the change in loading time, rollers are classified into machines of continuous and discrete action. In the first case, the continuous loading of tea mass is carried out, in the second – discrete.

5) Depending on the direction of movement of tea mass to a table rollers are constructively executed vertical or horizontal.

Domestic factories produce rollers of various types, which differ mainly in payload - from 120 to 500 kg of withered sheet. Basic models - vertical single-motor rollers of double action with discrete loading of open type CHRO-1 and closed – CHRP-1.

Roller CHRO-1 has the following components (Fig. 1.4): loading tank 1, which loads the withered sheet. The loading tank at the bottom has no bottom and its lower edge is slightly raised above the round table.

3. The table in the middle part has a recess in the form of a truncated pyramid – a ditch 7. Inside the ditch there is a door for unloading the sheet after the twisting process.

The machine is assembled on a cast-iron horseshoe-like frame, which stands on three cast-iron legs; the third rear leg is slightly different from the two front in its design and purpose. The two front legs are supports for the frame and two freely rotating vertical crankshafts 4 and 5, on the rear the worm gearbox and the third drive crankshaft 6 are mounted on the leg, which also serves as a support. In contrast to the front two crankshafts, the worm wheel is rigidly fixed on the lower end of the rear crankshaft. The loading tank 1 is driven by the neck 2 of the crankshafts 4-6.

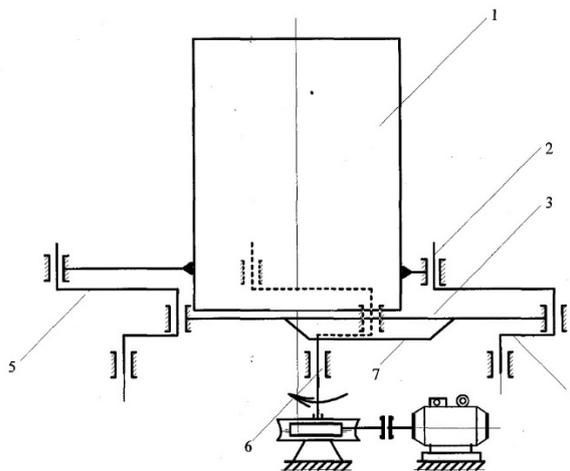


Figure 1.4 – Kinematic scheme of the roller CRO-1

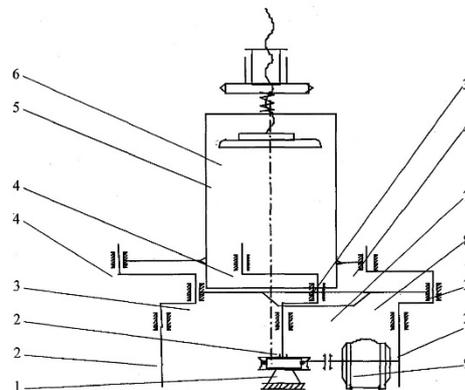


Figure 1.5 – Kinematic diagram of the roller with the press CRP-1

Roller CRP-1 (Fig. 1.5) differs from the open roller only by the presence of a press and a device (chain transmission) to move the press up and down. The table 8 with the cuvette 7 is mounted on the butterfly necks 3 of the crankshafts 2 and is driven by an electric motor 9 through a worm gear 1. The loading tank 6 is driven by the butterfly necks 4.

Press 7 performs vertical movement in the loading tank of the roller.

Rollers CHRO-1 and CRP-1 are practically not reconfigured, which does not allow to obtain the same quality tea product in conditions of different quality of raw materials. Structurally, they are refined, usually in tea factories. This changes the number of revolutions of the executive bodies of the roller by changing the gear ratio of the V-belt transmission depending on the grade of incoming raw materials.

The optimal angular velocity is found experimentally. Due to the complexity of such settings, further changes in the number of revolutions are usually not carried out, which worsens the quality of products.

The kinematic scheme of the closed single-engine vertical discrete double-acting roller of the English firm "Marshall" is similar to the kinematic scheme of the CRP-1 roller. The loading tank and table have an electric drive that includes a worm gearbox and a flat belt drive. The pulleys of the reducer and the electric motor have 3 stages. The speed of rotation of the table and the loading tank can be adjusted by tipping the belt on the steps of the pulleys. The roller press is mounted on a U-shaped rack. A manual chain drive is used to move the press.

The main disadvantages of this roller are significant energy consumption and large size compared to Ukrainian roller skates of the same performance.

The prototype of the low-volume single-engine vertical discrete double-acting roller manufactured by the Ukrainian tea factory «AHMAD TI» is the roller coaster CHRO-1, respectively reduced in size. It is designed for twisting small batches of tea for research purposes when testing new varieties. To ensure twisting under pressure, it is equipped with the simplest screw press.

The main technical characteristics of some rollers are given in table 1.1.

Table 1.1 – The main technical characteristics of roller skates

№ n/n	Basic technical characteristics	Unit measurement	Roller CHRO- 1	Roller CRP-1	Roller firms «Marshal»	Roller DFCH
1	Productivity	kg / year	280	240	510	10
2	Speed table	rpm	60	60	56/60/65	60
3	Consumed power	kW	3,7	6,0	4,2	1,5
4	Cylinder diameter	m	0,96	0,96	0,654	0,42
5	Cylinder height	m	1,02	0,775	0,523	0,5
6	Cylinder capacity	m ³	0,723	0,530	0,18	0,07
7	Press (lift and dropping)		No	Mechanized	Manual	Manual

Currently, for low-performance technological installations, the most common are closed discrete double-acting rollers with a vertical axis, with an electromechanical table drive and a manual press drive.

Such rollers do not allow to solve the problem of automation of technological process of twisting therefore for the practical decision of problems of automation it is necessary to create a new design of the closed roller with the adjustable drive of giving of the press.

1.3 The main problems of automation of the electromechanical roller and the requirements for the control system

Twisting installations are electromechanical systems that include mainly a rotating table, a loading tank and a press. It is known that obtaining a quality product in the twisting process mainly depends on two main factors - the pressure of the press on the tea mass and the temperature inside the mass, as a result of technological research it is established that the pressure of the press should be within 0.18... 0.27 MPa depending on the quality of raw materials and requirements for the product, and the temperature in the tea mass should not exceed a certain value. Therefore, to improve the technological operation of twisting the tea sheet requires coordinated control of the executive motors of the table and press in terms of technological constraints on the temperature of the tea mass and the pressure of the piston of the press on the mass.

To control these parameters, actively manage them, reduce labor costs and minimize the human factor, it is necessary to create an automated control system for the process of twisting the tea leaf. Implementation of a roller control system is impossible without devices for measuring the basic parameters of the process. From the literature [6] known devices for indicating the pressure of the press on the tea mass and the pressure of the tea mass on the roller table. Indication devices are mechanical systems using manometers and allow only to control the pressure during twisting, but do not allow to automate it. The main disadvantage of devices for measuring the pressure of the tea mass on the roller table is the need for preliminary calculations of the optimal pressure, as it depends on the weight of the loaded tea sheet. Therefore, this method of measuring pressure complicates the synthesis and use of the control system, due to the need to readjust the parameters of the system depending on the weight of raw materials.

Thus, the main tasks of process automation are:

1. Creating a mathematical model of the technological process of twisting the tea leaf as an object of control.

2. Development of pressure and temperature sensors that can be placed on moving parts of the roller or directly in the tea mass.

3. Synthesis of the system of automatic control of the technological process of twisting, which provides a finished product with known qualitative indicators. The reprogrammed unit of the system must reconfigure and select the optimal ratio of setting influences that ensure the production of all types of tea (red, yellow, green, black) when performing the technological process of twisting.

We formulate the main objectives of research:

–creation of a mathematical model of the process of twisting a tea leaf in a roller as an object of control;

–structural synthesis of the roller control system;

–development of algorithms for controlling SAC tea leaf twisting;

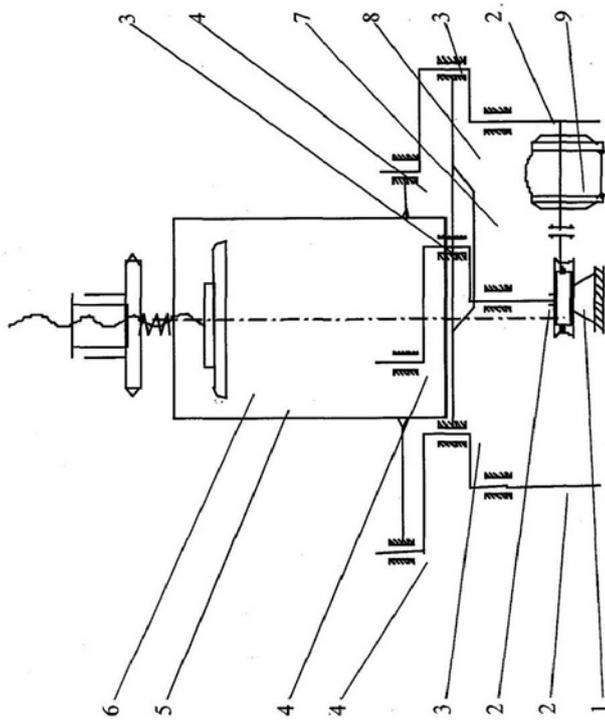
–determination of the area of achievable quality indicators of the management system;

–parametric optimization of regulators of control system of technological process of twisting;

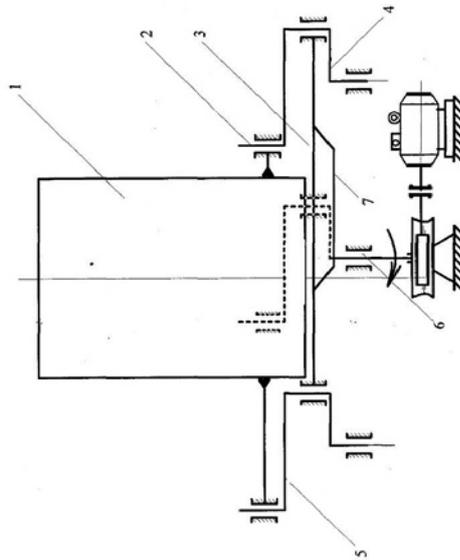
–development and creation of a research facility.

Додаток Б

Кінематичні схеми чайних ролерів ЧРО та ЧРП



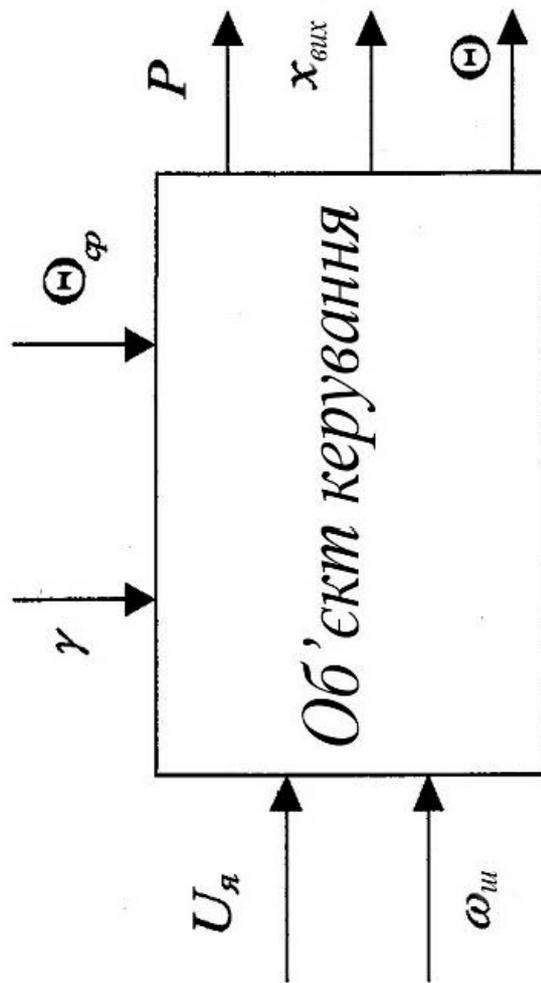
Ролер ЧРП-1 відрізняється від відкритого ролера тільки наявністю преса і пристосування (ланцюгова передача) для пересування преса вгору і вниз. Стіл 8 з кюветом 7 кріпиться на мотильових шейках 3 колінчастих валів 2 і приводиться в рух електродвигуном 9 через черв'ячний редуктор 1. Завантажувальний бак 6 приводиться в рух від мотильових шийок 4. Прес 7 здійснює вертикальне переміщення в завантажувальному баку ролера



Ролер ЧРО-1 має наступні складові частини: завантажувальний бак 1, в який завантажують зав'ялених лист. Завантажувальний бак знизу не має дна і його нижній край трохи піднятий над круглим столом. Стіл 3 в середній частині має поглиблення у формі усіченої піраміди – кювет 7. Всередині кювету є дверцята для вивантаження листа після закінчення процесу скручування

Додаток В

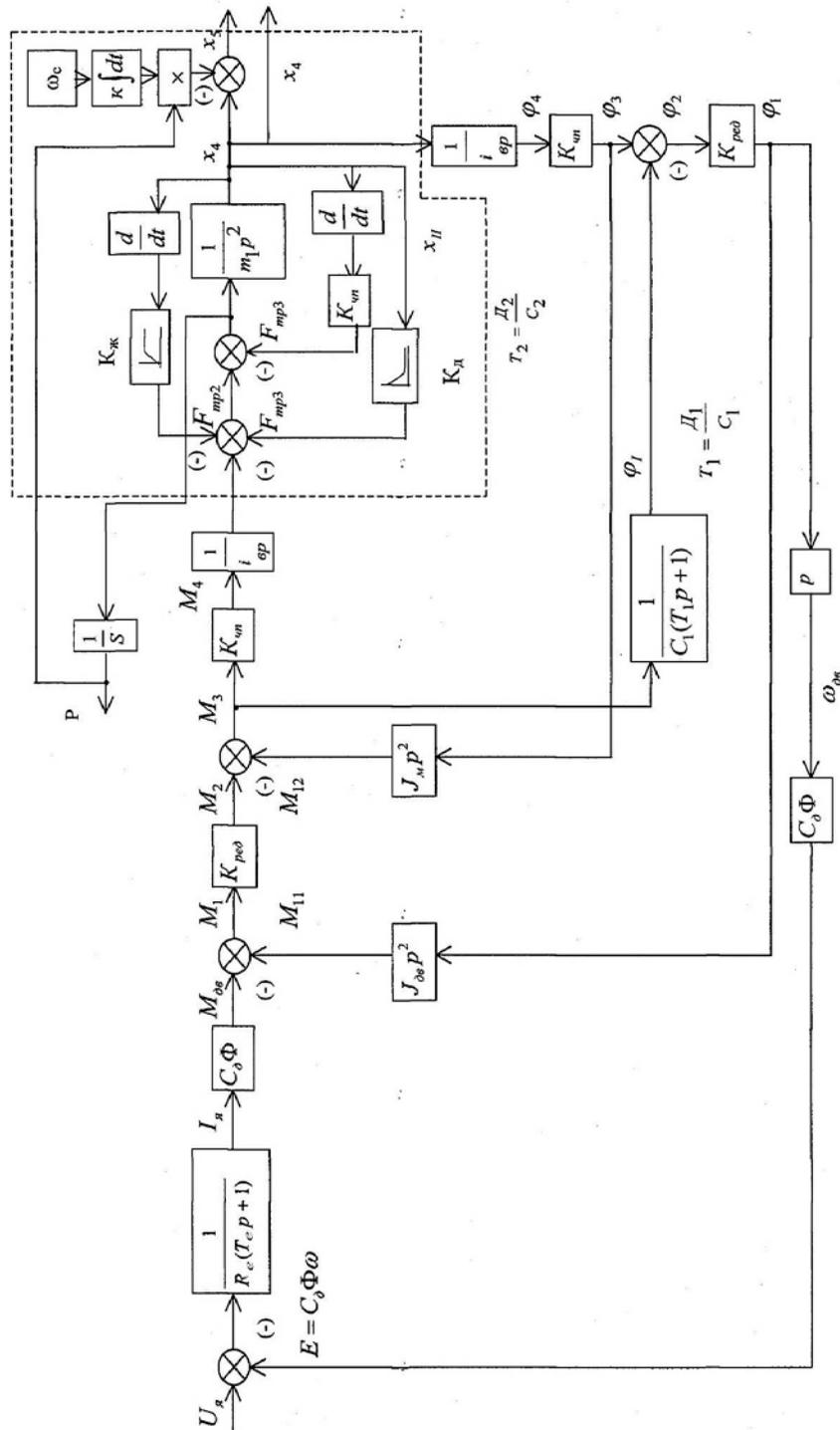
Електромеханічний ролер як об'єкт керування



$U_{я}$ на обмотці якоря двигуна постійного струму приводу преса і кутову швидкість $\omega_{ш}$ валу асинхронного електродвигуна приводу столу ролера, які спостерігають вихідні координати – тиск P , переміщення преса $x_{вих}$ і температура ω в чайній масі, основні обурення – зміна параметрів чайної маси γ і температури навколишнього середовища ω_{φ}

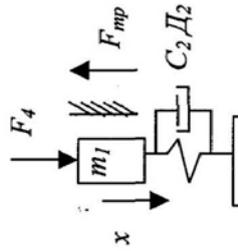
Додаток Г

Структурна схема об'єкта керування

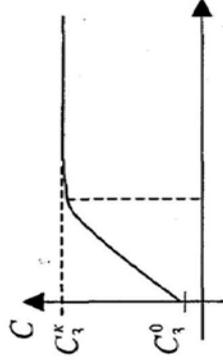


Додакто Г

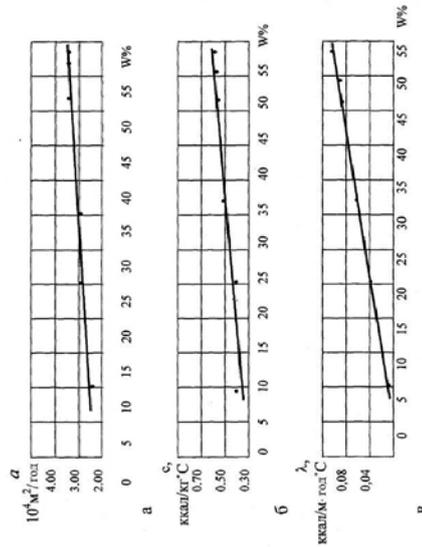
Особливості чайної маси як елемента об'єкта керування



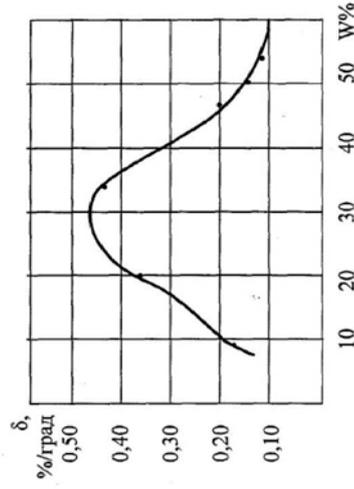
Обчислювальна модель преса і чайної маси



Залежність жорсткості чайної маси від переміщення преса ролера



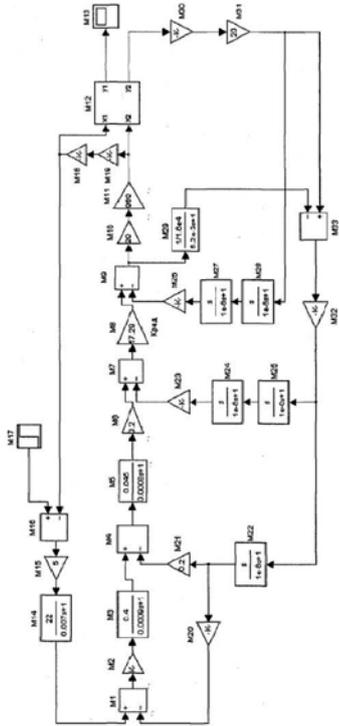
Функціональна залежність між вмістом вологи W% і теплофізичними коефіцієнтами



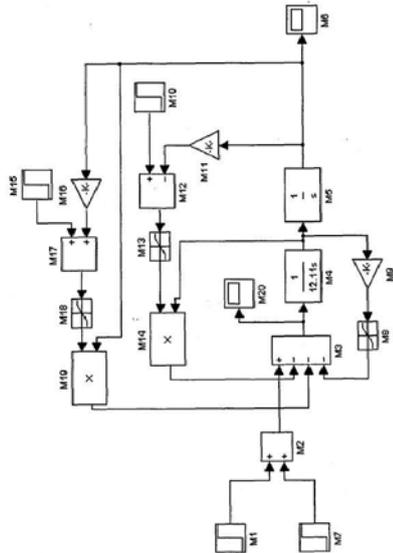
Функціональна залежність тепловологієпровідності delta від вологості W%

Додаток Д

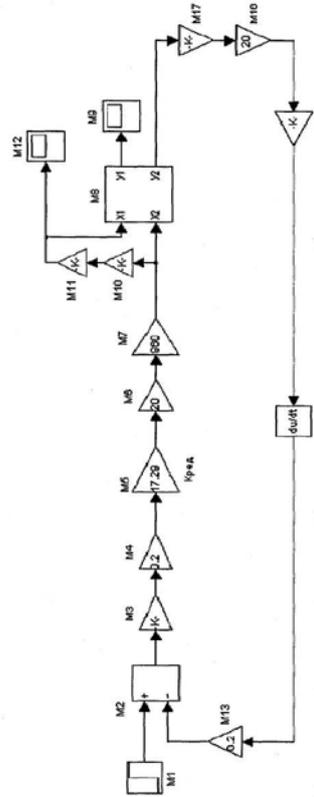
Обчислювальні моделі об'єкта керування в Matlab



Обчислювальна модель узагальненого об'єкта керування



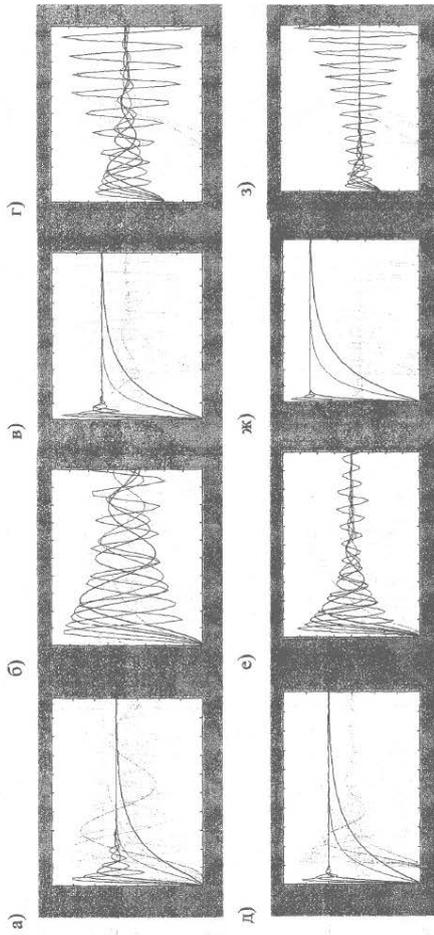
Обчислювальна модель преса і чайної маси



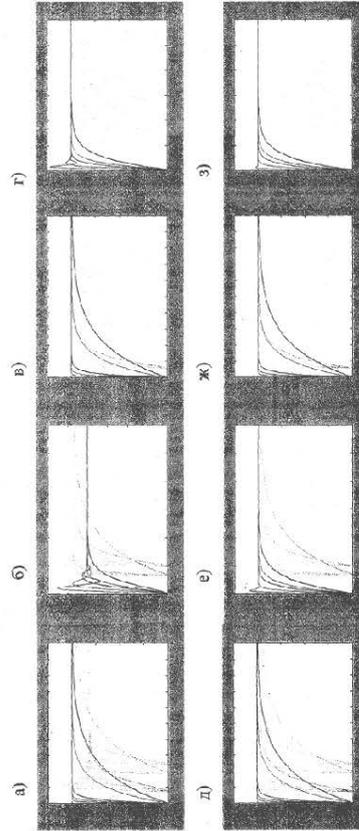
Обчислювальна модель спрощеного об'єкта керування

Додаток Е

Графіки перехідних процесів



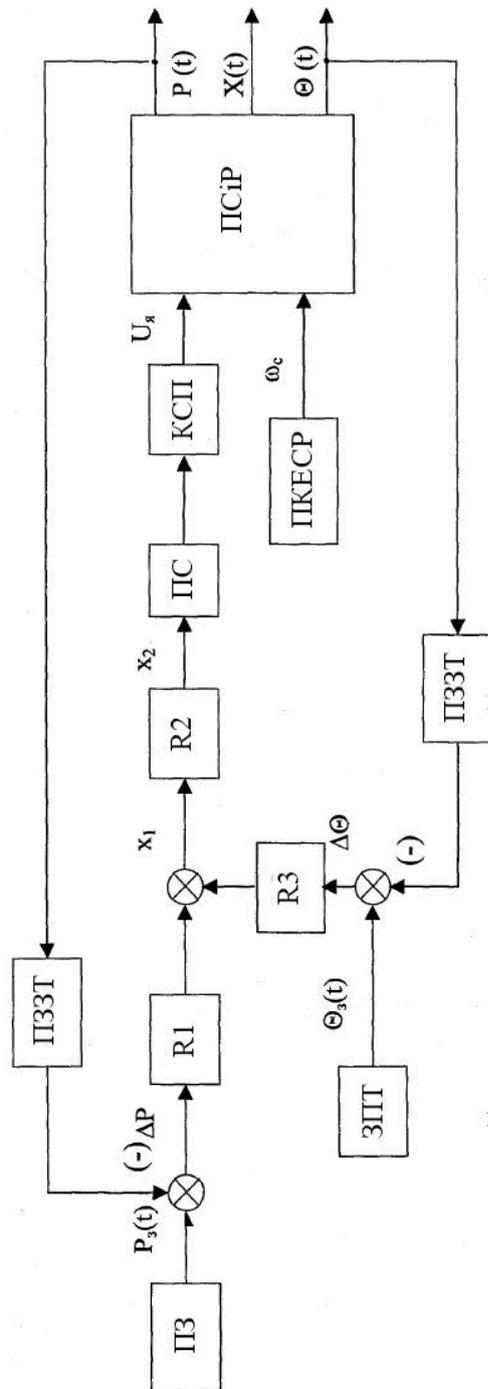
Сімейства кривих перехідних процесів при зміні параметрів регуляторів системи керування



Сімейства кривих перехідних процесів при зміні параметрів регуляторів системи керування

Додаток Є

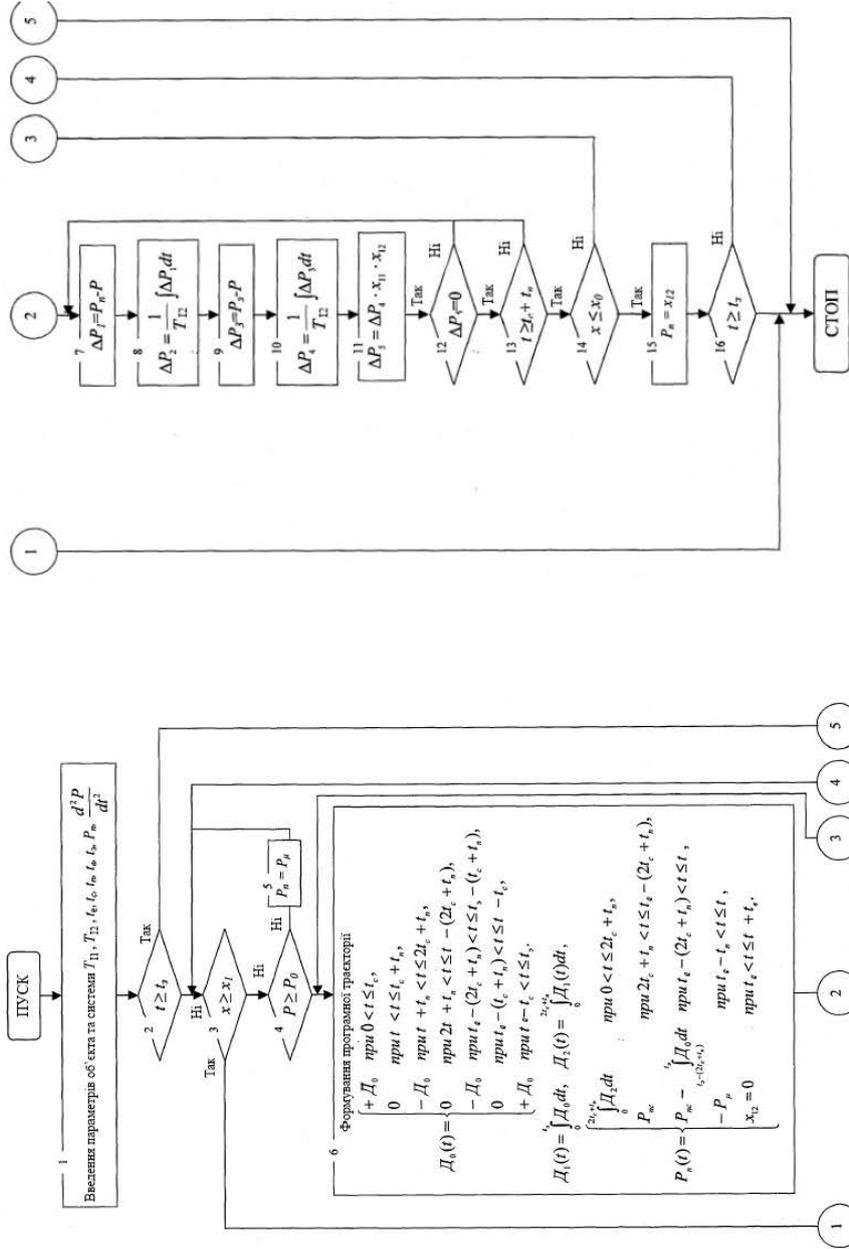
Функціональна схема системи керування ролером



Програмований задачник (ПЗ), що забезпечує формування необхідного закону зміни тиску в часі $P(t)$, задаючий пристрій по температурі (ЗПТ), регулятори $R1$, $R2$ і $R3$, пристрій сполучення (ПС), керований сигналом перетворювач (КСП), пристрої зворотного зв'язку по тиску (ПЗЗТ) і по температурі (ПОЗЗТ), пристрій керування електроприводу столу ролера (ПКЕСР). Таким чином, процес скручування і різання чайної маси (ПСiP) має дві вхідні (U_α і ω_c) і три вихідні координати (P , Θ , x)

Додаток 3

Алгоритм програмної реалізації системи керування



Додаток И

Таблиця техніко-економічних показників

Показники	Одиниці виміру	Значення		
		до модернізації	після модернізації	абсолютне відхилення
1. Капітальні витрати на модернізацію	грн.	х	9300,62	х
2. Річний фонд часу роботи	год.	1996,82	2000,00	-3,18
3. Річна експлуатаційна продуктивність	т	431,31	468,00	-36,69
4. Річні експлуатаційні витрати, усього:	грн.	224236,83	223823,14	+413,69
у тому числі:				
витрати на оплату праці	грн.	149915,80	150154,55	-238,75
витрати на ТО та ТР	грн.	1836,46	1068,59	+767,87
витрати на електроенергію	грн.	72484,57	72600,00	-115,43
5. Вартість однієї машино-години роботи	грн./год.	112,30	111,91	+0,39
6. Вартість технологічної операції	грн./т	519,90	478,25	+41,65
7. Річний економічний ефект	грн.	х	19492,20	х
8. Строк окупності капітальних вкладень	місяців	х	5	х