

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

МР.АКПМ-08.00.00.000 ПЗ

Група АКПМ-24-1

Андрій Завадецький

2025

Міністерство освіти і науки України
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Факультет автоматизації та енергетики
Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Завадецький Андрій Володимирович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 681.5: 676.1

(індекс)

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Розроблення автоматизованої системи керування процесом виготовлення паперу

(назва роботи)

Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(назва освітньої програми)

174 - Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

(шифр і назва спеціальності)

Консультант з нормоконтролю

асистент

(посада)

Л.І. Лагойда

(підпис)

(дата)

(ініціали та прізвище)

Здобувач освітнього ступеня

АКПм-24-1

(шифр групи)

А.В. Завадецький

(підпис)

(дата)

(ініціали та прізвище)

Науковий керівник

к.т.н., доцент

(науковий ступінь, вчене звання) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Л.І. Фешанич

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

доцент, к.т.н.

(посада)

(підпис)

(дата)

А.І. Лагойда

(ініціали та прізвище)

Рецензент

к.т.н., доцент

(посада)

(підпис)

(дата)

М.В. Шавранський

(ініціали та прізвище)

Робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Освітній рівень магістерський

Спеціальність 174 - Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та

(шифр і назва)

робототехніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АКІТ

(А.І. Лагойда)

«___» _____ 20__ року

**З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ**

Завадецькому Андрію Володимировичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення автоматизованої системи керування процесом виготовлення паперу

керівник роботи Фешанич Лідія Ігорівна, канд. техн. наук, доцент

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

затвердені наказом закладу вищої освіти від «10» листопада 2025 року № 699/7

2. Строк подання студентом роботи 10.12.2025

3. Вихідні дані до роботи Опис технологічного процесу, технологічна схема, статті науково – технічних журналів, збірники, підручники.

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

1. Аналіз технологічного процесу роботи папероробної машини

2. Моделювання об'єкта керування МІМО для процесів виробництва паперу

3. Синтез оптимальних регуляторів

4. Синтез системи автоматичного регулювання у просторі станів

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

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання 30.10.2024

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технологічного процесу роботи папероробної машини	1.10.2025	
2	Моделювання об'єкта керування МІМО для процесів виробництва паперу	1.11.2025.	
3	Синтез оптимальних регуляторів	01.12.2025	
4	Синтез системи автоматичного регулювання у просторі станів	08.12.2025	

Студент _____
(підпис)

Завадецький А.В.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

Фешанич Л.І.
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

У роботі розглянуто задачу розроблення автоматизованої системи керування процесом виготовлення паперу на основі сучасних методів керування багатоканальними об'єктами типу Multiple Input Multiple Output. Проведено аналіз технологічного процесу роботи папероробної машини та сучасних підходів до керування МІМО-об'єктами. Виконано ідентифікацію папероробної машини, розроблено розв'язувальний пристрій та побудовано математичну модель системи автоматичного регулювання.

Здійснено синтез оптимальних регуляторів із використанням нейронних мереж для налаштування параметрів ПІ-регуляторів. Отримано математичну модель у просторі станів, виконано синтез модального регулятора та реалізовано прогнозне керування (MPC). Результати комп'ютерного моделювання в середовищі MATLAB підтвердили ефективність запропонованої системи керування, її стійкість, точність та швидкодію. Робота має практичну цінність для впровадження в автоматизованих системах керування папероробних машин.

Ключові слова: автоматизована система керування, папероробна машина, МІМО-система, ідентифікація об'єкта, ПІ-регулятор, нейронні мережі, модальний регулятор, прогнозне керування

ANNOTATION

The paper examines the task of developing an automated control system for the paper manufacturing process based on modern methods for controlling multichannel Multiple Input Multiple Output (MIMO) systems. An analysis of the technological process of a paper machine and contemporary approaches to controlling MIMO objects has been performed. The paper machine has been identified, a solving device has been developed, and a mathematical model of the automatic control system has been constructed.

Optimal controllers have been synthesized using neural networks to tune the parameters of PI controllers. A state-space mathematical model has been obtained, a modal controller has been synthesized, and model predictive control (MPC) has been implemented. The results of computer simulations in MATLAB confirm the effectiveness, stability, accuracy, and high performance of the proposed control system. The work has practical value for implementation in automated control systems of paper machines.

Keywords: automated control system, paper machine, MIMO system, system identification, PI controller, neural networks, modal controller, model predictive control (MPC)

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1	
АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ РОБОТИ ПАПЕРОРІСНОЇ МАШИНИ.....	12
1.1. Літературний огляд сучасних методів керування МІМО-об'єктами	12
1.2. Технологічний процес роботи паперорісної машини.....	15
Висновки до розділу 1.....	25
РОЗДІЛ 2	
МОДЕЛЮВАННЯ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ МІМО ДЛЯ ПРОЦЕСІВ ВИРОБНИЦТВА ПАПЕРУ.....	27
2.1. Ідентифікація об'єкта керування – паперорісної машини.....	27
2.2. Розроблення розв'язувального пристрою ПРМ	29
2.3. Моделювання та аналіз системи автоматичного регулювання паперорісної машини.....	32
2.4. Оцінка якості системи автоматичного регулювання паперорісної машини.....	34
Висновки до розділу 2.....	38
РОЗДІЛ 3	
СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНИХ РЕГУЛЯТОРІВ.....	39
3.1. Постановка задачі синтезу оптимальних регуляторів.....	39
3.2. Використання нейронних мереж для оптимізації параметрів ПІ- регуляторів.....	46
Висновки до розділу 3.....	52
РОЗДІЛ 4	
СИНТЕЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ У ПРОСТОРІ СТАНІВ.....	53
4.1. Отримання математичної моделі у просторі станів у формі Жордана.....	53

4.2. Синтез модального регулятора.....	57
4.3. Передбачувальне управління (МРС) процесів папероробної машини.....	63
Висновки до розділу 4.....	68
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	69
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	70

ВСТУП

Актуальність теми.

На сьогоднішній день особливої актуальності набувають завдання, пов'язані з автоматизацією вітчизняних технологічних процесів у різних галузях промисловості, до яких, зокрема, належить і виробництво паперу. Сучасне паперове виробництво характеризується значною різноманітністю типів і сортів паперу, що відрізняються за форматом, щільністю, білизною та сферою застосування. Така варіативність технологічних параметрів зумовлює необхідність розроблення ефективних систем автоматизованого керування, здатних забезпечити стабільність процесів та високу якість кінцевої продукції.

Особливої уваги потребують багатовимірні та багатозв'язні (МІМО) об'єкти керування, які є типовими для папероробних машин. Їхня складність, наявність взаємозалежних каналів керування та нелінійність процесів значно ускладнюють застосування традиційних методів регулювання. Більшість наукових робіт зосереджені на одновимірних системах, тоді як дослідження МІМО-структур залишаються обмеженими, що створює наукову прогалину та підсилює потребу у вивченні таких систем.

Використання новітніх технологій, зокрема методів ідентифікації, машинного навчання, генетичних алгоритмів, а також сучасних підходів до синтезу регуляторів і модельно-передбачувального керування (МРС), відкриває можливості для значного підвищення ефективності паперового виробництва. Упровадження таких рішень сприяє зменшенню втрат через брак, оптимізації енергоспоживання, підвищенню стабільності технологічних режимів і, відповідно, зростанню прибутковості підприємств.

Таким чином, розроблення автоматизованої системи керування МІМО-типу для папероробної машини є актуальним як з наукової, так і з практичної точки зору. Воно відповідає сучасним тенденціям розвитку промислової автоматизації та забезпечує можливість упровадження інтелектуальних методів керування у складні

технологічні процеси, що є важливим кроком до цифровізації та модернізації виробництва.

Обґрунтування вибору теми дослідження

Тема дослідження обрана через зростаючу потребу в автоматизації складних технологічних процесів паперового виробництва, де папероробна машина є типовим багатовимірним МІМО-об'єктом. Традиційні одновимірні методи керування не забезпечують необхідної точності та стабільності, що зумовлює потребу у впровадженні сучасних підходів — ідентифікації, оптимізації, машинного навчання та модельно-передбачувального керування. Недостатня кількість досліджень у сфері МІМО-систем для паперового виробництва та висока практична значущість їх удосконалення роблять тему актуальною й науково обґрунтованою.

Мета і завдання дослідження.

Розроблення автоматизованої МІМО-системи керування процесами паперового виробництва, а саме папероробною машиною. Спираючись на основні технологічні параметри, синтезуються класичні регулятори та розв'язується задача отримання необхідних показників якості системи.

У даній магістерській роботі поставлено мету вдосконалити автоматизацію та процеси керування папероробною машиною шляхом виконання кількох ключових завдань. По-перше, необхідно визначити критично важливі точки контролю, регулювання та керування, що є основою ефективної роботи. Далі пропонується розробити структуровану систему автоматизованого керування (АСУ), спеціально адаптовану для папероробної машини, щоб оптимізувати всі операційні процеси. Також буде розроблено повну функціональну схему автоматизації процесу виготовлення паперу, що забезпечить безперебійну інтеграцію та функціонування. У межах роботи з комплексними МІМО-системами машини передбачається синтез типових регуляторів із використанням процедури розв'язування для точного керування множиною взаємопов'язаних процесів. Для оптимізації параметрів ПІ-регуляторів використовуються нейронні мережі, що підвищує адаптивність і ефективність систем керування.

Об'єктом дослідження

Процеси папероробної машини як багатовимірний та багатозв'язний (МІМО) технологічний об'єкт керування.

Предметом дослідження

Методи, моделі та алгоритми автоматизованого керування МІМО-системою папероробної машини, включно з ідентифікацією, синтезом регуляторів, оптимізацією параметрів та впровадженням сучасних підходів (PI, нейронні мережі, MPC).

Методи дослідження

У дослідженні використано методи системного аналізу для вивчення структури та взаємозв'язків у багатовимірній МІМО-системі папероробної машини. Застосовано методи математичного моделювання для побудови динамічних моделей технологічних процесів, а також алгоритми ідентифікації в середовищі MATLAB для отримання передавальних функцій об'єкта. Для синтезу системи керування використано класичні підходи до побудови PI-регуляторів, доповнені сучасними методами оптимізації, зокрема генетичними алгоритмами та машинним навчанням. У роботі також застосовано принципи модельно-передбачувального керування (MPC) для підвищення точності та адаптивності регулювання.

Наукова новизна отриманих результатів

Під час літературного огляду та аналітичного дослідження встановлено, що розв'язання задач для складних МІМО-систем у паперовому виробництві є актуальним через незначну кількість досліджень з цієї теми. Синтез класичних PID-регуляторів і налаштування параметрів для МІМО-об'єкта керування виконано на основі сучасних методів і алгоритмів, а також упроваджено в систему керування. Наукова новизна полягає у розробленні та застосуванні гібридної моделі, яка поєднує переваги генетичних алгоритмів — використано гібридний метод отримання параметрів PID-регулятора, що поєднує генетичний алгоритм і машинне навчання.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами.

Дослідження виконано в межах наукових напрямів кафедри, що передбачають розроблення сучасних автоматизованих систем керування складними технологічними процесами. Тема узгоджується з планами науково-дослідної роботи щодо впровадження інтелектуальних методів керування та цифровізації виробництва. Отримані результати можуть бути використані в подальших наукових проєктах і грантових програмах, спрямованих на розвиток індустрії 4.0 та модернізацію промислових систем.

Практичні значення отриманих результатів

Отримані результати мають важливе практичне значення для підвищення ефективності та надійності керування технологічними процесами папероробної машини. Розроблена МІМО-система керування та методи її налаштування дозволяють зменшити коливання технологічних параметрів, підвищити стабільність процесу та якість готової продукції. Запропоновані алгоритми ідентифікації, оптимізації параметрів регуляторів і впровадження модельно-передбачувального керування можуть бути інтегровані у промислові системи автоматизації, що забезпечує зниження енергоспоживання, мінімізацію браку та підвищення продуктивності обладнання.

Структура та обсяг магістерської роботи.

Робота складається зі вступу, чотирьох основних розділів, висновків і списку використаних джерел, що охоплює 72 сторінку основного тексту, включає 39 рисунки, 6 таблиць і 11 літературних джерел .

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ РОБОТИ ПАПЕРОРІЗНОЇ МАШИН

1.1. Літературний огляд сучасних методів керування МІМО-об'єктами

Методи МІМО забезпечують ефективний спосіб керування процесами. У паперовій промисловості синтезований ПІД-регулятор на базі Siemens може бути застосований для контролю та керування різними параметрами процесу виробництва паперу, такими як температура, швидкість, тиск та інші. Це дозволяє покращити якість продукції, підвищити ефективність використання обладнання та знизити витрати на енергію й сировину. Таким чином, упровадження синтезованого ПІД-регулятора на базі Siemens у промислові технологічні процеси паперової промисловості є важливим кроком до автоматизації та оптимізації виробничих процесів із використанням сучасних методів керування та високотехнологічного обладнання.

Попри значний прогрес, досягнутий у галузі адаптивного керування, теоретичні досягнення та практичне застосування цієї важливої методології в системах із кількома входами й виходами (МІМО) досі не є узгодженими навіть у найпростішому випадку лінійних систем [1]. Це зумовлено припущеннями, що розглядаються у багатовимірних системах порівняно з випадком один вхід — один вихід (SISO) одновимірних систем. Наприклад, багатовимірні системи алгоритму класичної моделі еталонного адаптивного керування (MRAC) накладають обмеження на матрицю високочастотного підсилення (HFG), які важко перевірити в реальних умовах [1].

Для систем із кількома входами (МІМО) процедура проектування потребує технічного припущення, що керовані системи повинні бути квадратними, тобто кількість входів має дорівнювати кількості виходів [2].

У [2] для аналізу стійкості простого адаптивного керування (SAC) використовується нова теорема про стійкість, на основі якої зроблено висновок, що

похибка відстеження асимптотично прямує до нуля, а адаптивні коефіцієнти сходяться до сталого значення. Ідея SAC полягає у подоланні обмежень класичної моделі еталонного адаптивного керування (MRAC) для систем із кількома входами й виходами (MIMO). Метод привабливий для застосування в складних системах завдяки простоті реалізації.

В епоху Індустрії 4.0 інтелектуальне виробництво стало основним напрямом розвитку світової обробної промисловості. Нові національні стратегії передового виробництва в усьому світі призвели до зростання потреби в розробленні нових інтелектуальних виробничих систем [3]. Алгоритми штучного інтелекту (ШІ) перетворюють сервісні та виробничі організації на високоефективні галузі завдяки підвищенню продуктивності та зниженню витрат на технічне обслуговування й кількість виробничих дефектів [4].

MIMO (Multi-input multi-output) — це багатовимірна система керування, яка має більше ніж одну керовану змінну. Для досягнення номінальних робочих умов об'єкта керування необхідно регулювати кілька ключових змінних процесу.

Відмінною особливістю таких систем є наявність перехресних зв'язків між вхідними та вихідними змінними процесу, що унеможливорює застосування законів керування одновимірних систем, оскільки вплив окремого контуру може призвести до нестійкості всієї системи.

MIMO-об'єкти описують процеси з більш ніж одним входом і більш ніж одним виходом, які потребують кількох контурів керування. Прикладами систем MIMO є теплообмінники, хімічні реактори та ректифікаційні колони, зокрема й процеси паперового виробництва.



Рис. 1.1. Схема одновимірної та багатовимірної системи

Розділення змінних у цій системі покращує контроль над процесом. Є два способи визначити, чи можна систему розділити. Один із них — математичні моделі, інший — більш інтуїтивний метод припущення.

Математичні методи спрощення схем керування MIMO включають метод Relative Gain Array (RGA), індекс Нідерлінгського (NI) та сингулярне розкладання (SVD). Якщо систему неможливо роз'єднати, для її характеристики слід використовувати інші методи, такі як нейронні мережі або модельно-передбачувальне керування.

Спираючись на ідею статичного діагонального спрощення (Static Diagonal Decoupling), мета якого — усунути вплив перехресних зв'язків між каналами [5]. Це досягається шляхом множення матриці передавальних функцій об'єкта $G(s)$ на матрицю розв'язуючих елементів $D(s)$, яка має діагональний вигляд і є оборотною. Таким чином, загальна передавальна функція системи стає діагональною, і кожен канал може розглядатися незалежно.

Для реалізації розв'язуючого керування відповідно до формули (1) необхідно знайти розв'язуючу матрицю $D(s)$.

Статичне діагональне спрощення — це метод декомпозиції багатозв'язної системи керування на набір незалежних підсистем, що спрощує процес аналізу та проектування системи керування.

Процес використання статичного діагонального спрощення включає такі етапи:

Ідентифікація об'єкта керування: визначення вхідних і вихідних змінних системи та отримання передавальних функцій між цими змінними.

Визначення розв'язуючої матриці: розрахунок оборотної матриці $D(s)$ діагонального вигляду так, щоб при множенні матриці передавальних функцій об'єкта $G(s)$ на матрицю $D(s)$ отримувалася діагональна матриця передавальних функцій $F(s)$. Елементи матриці $D(s)$ дорівнюють оберненим значенням статичних коефіцієнтів (постійних членів) діагональних елементів $G(s)$.

Розв'язування системи: застосування матриці $D(s)$ до вихідної системи керування для перетворення багатозв'язної системи в набір незалежних підсистем (каналів керування). У результаті кожен канал керування розглядається окремо.

Проектування та налаштування регуляторів: для кожного незалежного каналу розробляється відповідний регулятор, наприклад ПІ-регулятор, і визначаються оптимальні параметри за допомогою методів налаштування, таких як алгоритм Циглера–Нікольса.

Інтеграція регуляторів і тестування: інтеграція розроблених регуляторів у систему керування та проведення експериментів для перевірки ефективності й точності нової системи порівняно з початковою.

Застосування статичного діагонального спрощення дозволяє спростити процес аналізу та проектування системи керування, забезпечуючи незалежне керування кожним каналом і мінімізуючи вплив перехресних зв'язків між каналами.

1.2. Технологічний процес роботи папероробної машини

Технологічний процес папероробної машини з виробництва паперу — це складний багатостадійний процес, що характеризується великою кількістю взаємопов'язаних параметрів, наявністю значних запізнень, нелінійностей та змінних збурень. Якість готової продукції безпосередньо залежить від точності підтримання технологічних режимів на всіх етапах виробництва, зокрема підготовки маси, формування полотна, пресування, сушіння та намотування.

В умовах сучасного ринку паперової продукції зростають вимоги до стабільності якості, енергоефективності та мінімізації виробничих втрат. Традиційні одноканальні системи автоматичного керування не завжди здатні забезпечити необхідний рівень точності через багатозв'язність об'єкта керування та взаємний вплив параметрів. У зв'язку з цим актуальним є застосування сучасних методів керування типу Multiple Input Multiple Output, які дозволяють враховувати

взаємодію між вхідними та вихідними змінними й забезпечувати більш ефективне керування технологічним процесом.

Отже, розроблення та дослідження автоматизованої системи керування технологічним процесом папероробної машини із застосуванням МІМО-методів є актуальним науково-практичним завданням, спрямованим на підвищення якості продукції, зниження енергоспоживання та підвищення ефективності виробництва.

Технологію виробництва ПРМ (папероробної машини) можна поділити на основні етапи, наведені в таблиці 1.1

Таблиця 1.1

Основні етапи технології виробництва

№	Етапи виробництва
1	Підготовка сировинної маси
2	Очищення маси
3	Розмелювання маси
4	Тонке очищення
5	Вилив
6	Сушіння
7	Намотування

На початковій стадії виробництва паперу необхідно підготувати сировину. Основною сировиною в паперовій промисловості є целюлоза. Вторинною сировиною може бути макулатура — вторинна переробка паперових відходів: книги, журнали, газети тощо. Основним завданням початкового етапу є отримання макулатурної маси, для чого використовують спеціальні пристрої – гідророзбивачі (ГРВ). На цій стадії відбувається розволокнення паперової маси до концентрації 6% (на 16 т води — 1 т макулатури). Целюлоза зі складу транспортером подається в гідророзбивач і розпускається свіжою та оборотною водою. Далі маса переходить на другий етап — стадію очищення.

Гідророзбивачі також називають машинним басейном, де безпосередньо здійснюється підготовка маси для виробництва паперу. Цей агрегат має забезпечувати постійну концентрацію маси завдяки розволокненню вихідної сировини — целюлози. Для перекачування підготовленої маси між ділянками виробництва використовують потужні насоси рисунок 1.1.

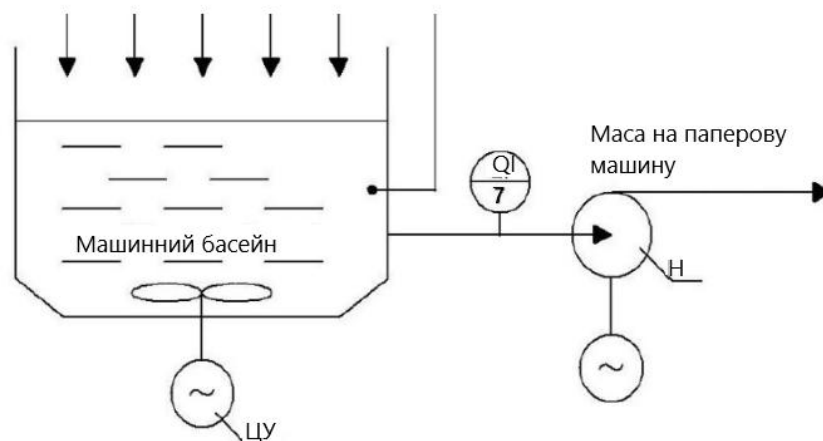


Рис. 1.2. Функціональна схема машинного басейну

Функціональну схему автоматизації гідророзбивача, призначену для розпуску макулатури, показано на рисунку 1.3.

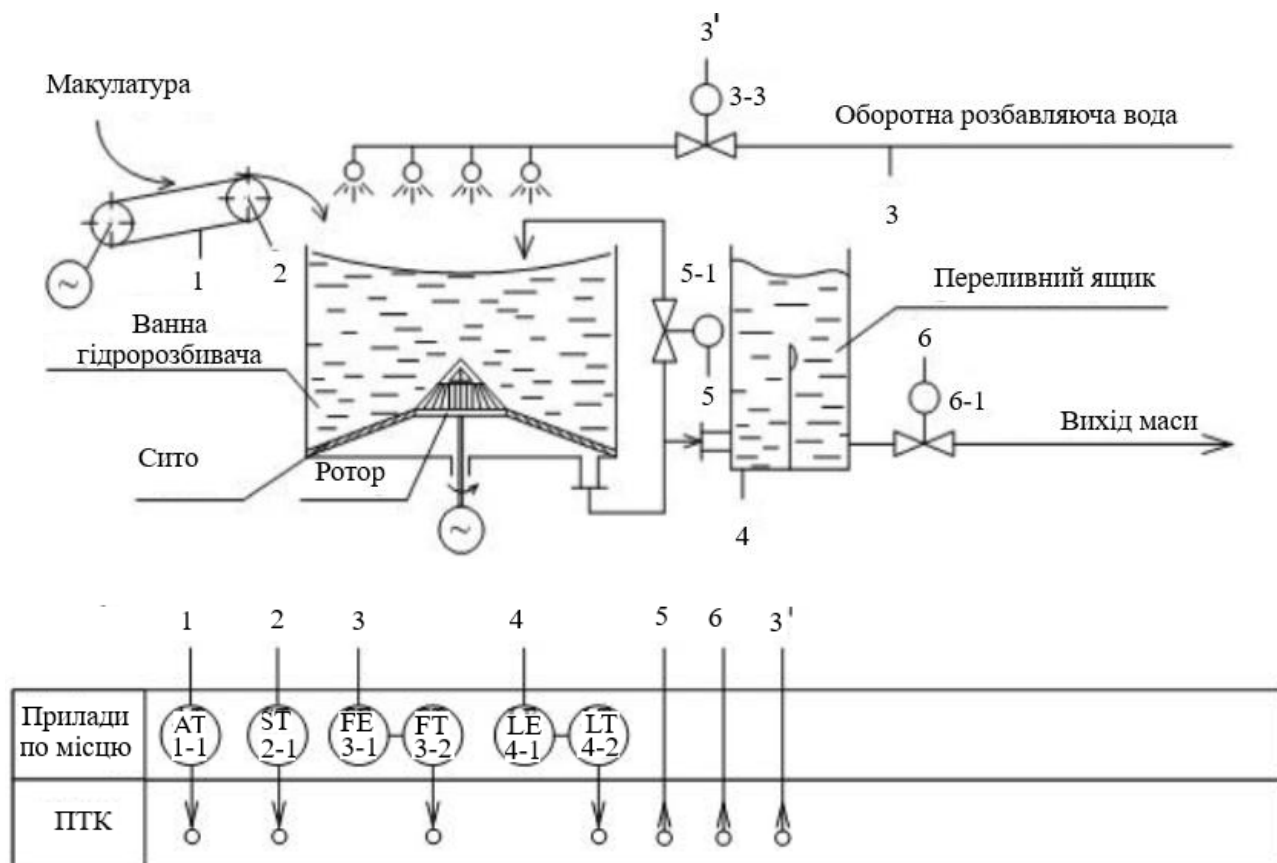


Рис. 1.3. Схема автоматизації гідророзбивача

На другому етапі паперова маса проходить через вихрові очищувачі, які видаляють важкі домішки з макулатури (пісок, скріпки тощо). Потім маса надходить у сепаратор — пристрій для очищення від скотчу, ламінату та не розмеленої вологостійкої макулатури.

Третя стадія — розмелювання. Очищена маса подається на млин, де відбувається розмел паперового волокна, після чого маса надходить у бак постійного рівня (БПР), звідки під постійним тиском подається на перший змішувальний насос.

Четверта стадія — тонке очищення. На цій стадії макулатурна маса потрапляє на змішувальний насос, який розбавляє її водою до концентрації 3%. Далі маса проходить через вихрові очищувачі, де видаляються залишки типографських фарб, крейди та дрібного піску. Потім надходить на другий змішувальний насос, де розбавляється водою до концентрації 0,4–0,5% і подається на агрегат тонкого очищення. Там волокно проходить крізь сито, а сторонні включення видаляються через вібросито. Після тонкого очищення паперова маса надходить у напірний ящик. Для целюлозної сировини попереднє очищення не потрібне.

П'ята стадія — вилив. Напірний ящик — це пристрій, який подає паперову масу під певним тиском і рівномірним потоком на сіткову частину папероробної машини, де відбувається зневоднення та формування паперового полотна. Внутрішні частини напірного ящика виготовлені з відполірованої нержавіючої сталі, щоб запобігти злипанню волокон. Зневоднення здійснюється за допомогою гідропланок і вакуумних ящиків на сітковому столі. Швидкість витікання маси на сітку регулюється зміною тиску повітря в камері напірного ящика або швидкістю обертання змішувального насоса.

У камері напірного ящика встановлено два перфоровані валики Венцеля діаметром 180 мм, які вирівнюють потік і підтримують волокна в дисперсному стані. Один валик має отвори, що займають 35% поверхні, інший — 50%.

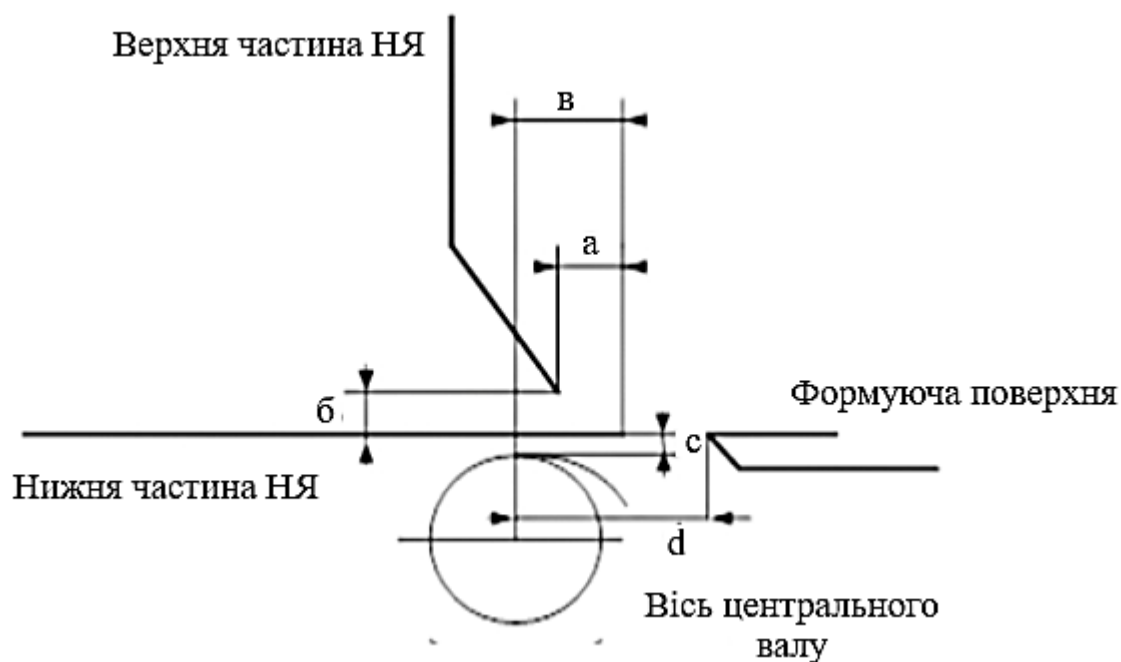


Рис. 1.4. Структурна схема напірного ящика

Ширина шару маси, що подається на сітку, обмежується бічними стінками напірного ящика. Товщина шару маси та якість наливу визначаються положенням передньої стінки, яка переміщується механізмом підйому. Горизонтальне зміщення верхньої губи відносно кромки нижньої губи становить 60 мм всередину камери і 40 мм назовні. Величина відкриття щілини та горизонтального переміщення верхньої губи контролюється за шкалою на лицьовій стороні напірного ящика.

Залишкова частина води за рахунок гідропланок потрапляє у підсітковий басейн, а звідти надходить у збірник оборотної води. Таке використання збірника дозволяє значно зменшити витрати свіжої води. Ящик гідропланок паперової машини містить корпус і гідропланки, розташовані під сіткою. Одна зі складових частин містить сердечник електромагніта, а застосовувана сітка у своєму плетінні має нитку з магнітопровідного матеріалу, наприклад сталі, відповідно до рисунку 1.5.

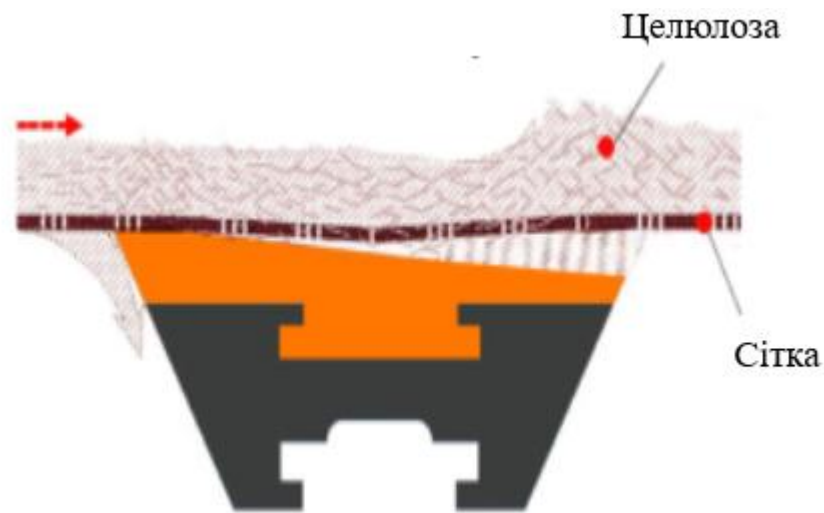


Рис. 1.5. Зовнішній вигляд гідропланки

Сіткова частина машини включає реєстрову секцію, що починається валом діаметром 400 мм, формуючою дошкою, трьома реєстровими валиками діаметром 100 мм, двома комплектами гідропланок по 5 елементів у кожному та окремою гідропланкою. У цій зоні сіткового столу відбувається формування паперового полотна й інтенсивне відведення значної частини води. Це забезпечується її самоплинним стіканням під дією невеликого тиску маси на сітці, роботою відсмоктувальних валиків і гідропланок, а також виникненням вакууму між сіткою та гідропланками.

Застосування гідропланок дозволяє підвищити зневоднюючу дію реєстрової частини сіткового столу. Крім того, при встановленні гідропланок замість реєстрових валиків можна скоротити довжину сіткового столу на сучасних паперових машинах майже вдвічі.

На рисунку 1.6 представлена структурна схема сіткового столу.

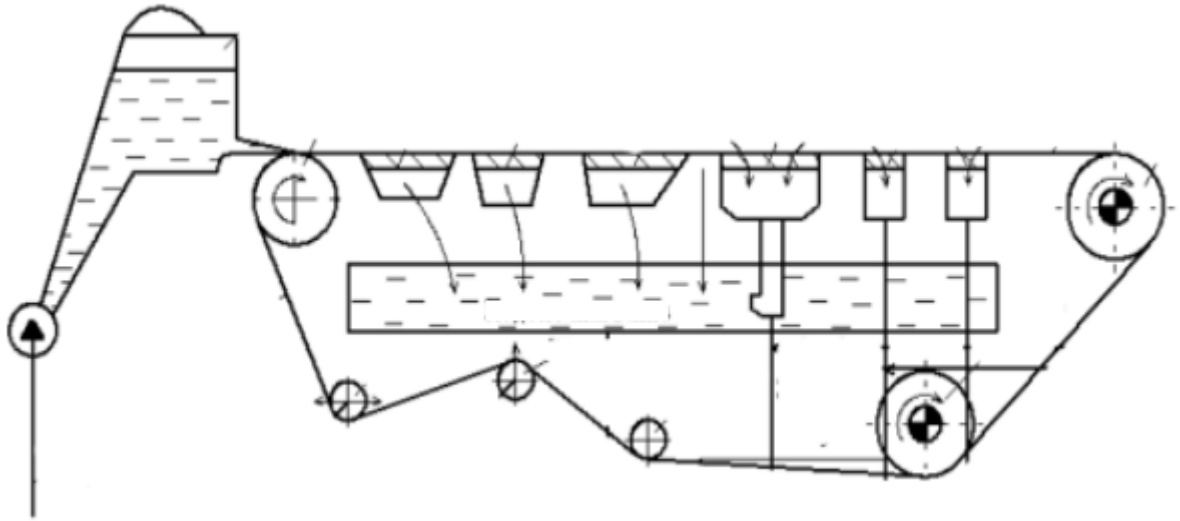


Рис.1.6. Структурна схема сіткового стола

Шоста стадія сушіння. На даній стадії зневоднене паперове полотно до вологості 12–14 % передається на сукно, яке вбирає залишки вологи, і за допомогою пресових валів передається на сушильний циліндр. Безпосередньо для сушіння паперу застосовують сушильний циліндр (Янкі-циліндр), діаметр якого досягає 5 м. Завдяки гладкій поверхні та контакту з тонким папером санітарно-гігієнічного призначення, папір висихає під дією Янкі-циліндра. Довжина великого циліндра сягає приблизно 7,75 м, а його маса становить близько 180 тонн.

Приблизно 40 % потрібної сухості полотна забезпечується за рахунок пари, що надходить у внутрішню частину циліндра. Решта 60 % отримується завдяки роботі колпака з гарячим повітрям, який охоплює поверхню агрегата; температура повітря в ньому варіюється в межах 500–700 °С.

На рисунку 1.7 показана структурна схема ПРМ із нахиленим сітковим столом, де: 1 — напірний ящик; 2 — відсмоктуючий грудний вал; 3 — відсмоктуючий гауч-вал; 4 — передавальний механізм; 5 — пресовий вал; 6 — Янкі-циліндр; 7 — сушильний колпак.

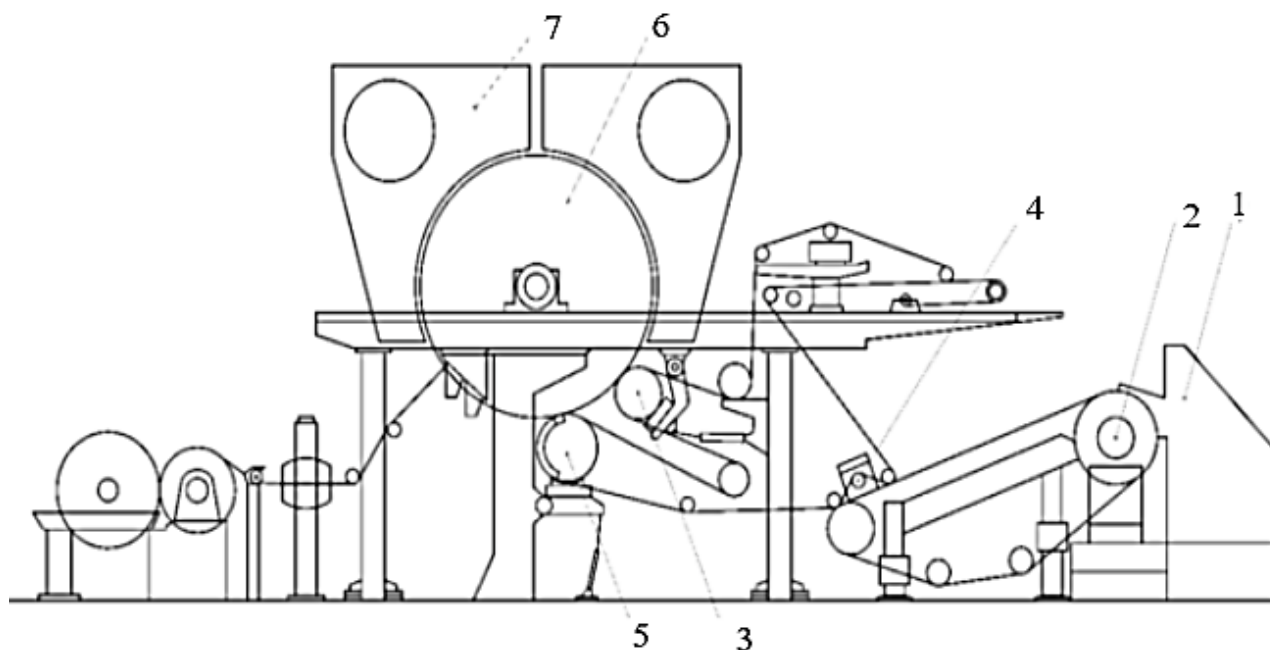


Рис. 1.7. Структурна схема ПРМ із нахиленим сітковим столом

З метою прискорення сушіння поверхню сушильного циліндра доповнюють кожухом швидкісної дії. Паперове полотно, що контактує з янкі-циліндром, знімають спеціальним крепувальним ножом. Крепування покращує м'якість, об'ємність і здатність до поглинання. Цей процес застосовують як для полотна, що має майже завершений рівень висушування (92–95 % сухості), так і для матеріалу з підвищеною вологістю (приблизно 70 %). Сухе крепування найбільше впливає на властивості виробу, оскільки в такому режимі полотно щільніше торкається поверхні циліндра.

Обладнання для мокрого крепування зазвичай доповнюють кількома класичними сушильними циліндрами, розміщеними після янкі-циліндра, щоб забезпечити завершальне видалення вологи. Такий метод використовують переважно для щільніших різновидів паперу. Янкі-циліндр має систему труб, які відводять пару та конденсат. Усередину подається пара під тиском 3 бари. За температури поверхні 90–95 °С і під час обертання циліндра папір висихає до приблизно 6 % вологості та відокремлюється завдяки роботі шаберного леза.

Під час зворотного руху в сітковому відділенні машини сітка проходить кілька валів: один коригувальний — керує траєкторією та запобігає зсуву, два

натяжні — забезпечують необхідний натяг, два ведучі — розташовані поза сіткою та оснащені дерев'яними шаберами для очищення від частинок маси, а також один балансувальний вал.

Для очищення тканини сітки та підтримання її в чистоті використовується водяний розпилювач. Для зняття паперового полотна з сітки на гладильне сукно і щоб уникнути обривів у цій частині машини встановлено пересмоктувальний пристрій, що складається з корпусу типу щілинної сукномийки та двох підтримуючих валів.

Пересмоктувальний пристрій і пресовий вал діаметром 450 мм охоплюються гладильним сукном, яке в процесі роботи забруднюється, тобто пори сукна забиваються дрібним волокном, частинками смоли, наповнювача та іншими речовинами. При забрудненні сукна погіршується фільтрація води, яка, не знаходячи виходу через тканину сукна, змушена проходити через паперове полотно, що порушує його структуру і призводить до розшарування та розривів паперу. Для усунення цього недоліку сукно в процесі роботи ретельно промивається. Для цього встановлено щілинну сукномийку, зволожувальний розпилювач і розпилювач високого тиску.

Сьома стадія — намотування. Для надання паперу ступеня крепування на сушильному циліндрі (янкі-циліндрі) встановлено крепувальний шабер, кут заточування якого визначається залежно від бажаної величини крепу. Величина крепу регулюється різницею швидкостей верхнього та нижнього сушильних циліндрів. Перед входом на накат паперове полотно огинає правильну дугу, при цьому полотно розгладжується і усуваються зморшки.

Намотування паперу в рулони здійснюється на брабанному периферичному накаті з пневматичним притиском тамбура до несучого барабана. З наката машини тамбури паперу тельфером подаються на поздовжньо-різальний верстат, де папір розрізається на рулони потрібного формату. Після того як папір за допомогою шаберного леза відокремлюється від сушильного циліндра, він намотується на намотувальну втулку до певного діаметра, далі знімається, зважується,

перевіряється щільність і якість паперу та направляється на наступну стадію, де готовий папір ріжуть на рулони, листи, а потім — на стадію пакування.

На рисунку 1.8 представлено загальний вигляд роботи папероробної машини.



Рис. 1.8. Загальний вигляд папероробної машини

Об'єктом керування було обрано ПРМ (папероробну машину). Останнім часом показники швидкості роботи обладнання досягли високих темпів: від 1500 до 2200 м/хв. На таких пристроях можна виготовляти паперове полотно, ширина якого сягає 2800–5600 см.

Основна складність, з якою часто стикаються виробники, — це міцність полотна. Теоретично можливо підвищити швидкість роботи до 3000, навіть до 3500 м/хв. Але тоді виникає проблема з міцністю паперу.

Через це більше уваги почали приділяти оптимізації: не обійшлося і без скорочення витрат на постачання сировини та налаштування обладнання. Цей процес сьогодні охоплює практично всі компанії, що працюють у цій сфері.

Активно ведеться розробка концепції ПРМ на основі єдиної платформи. Звісно, завжди прагнуть досягти головної мети — зменшення кількості використовуваного обладнання та скорочення витрат на його обслуговування.

Зокрема, конструкція машин складається з елементів, призначених для розробки хімікатів, обробки відходів і сушіння.

У гонитві за підвищенням швидкості роботи виникла тенденція до усунення відкритих ділянок, через які передається паперове полотно. Це означає, що матеріал усередині пресової частини машини не контактує з навколишнім середовищем, оскільки існує велика ймовірність його пошкодження.

Саме тому санітарно-гігієнічний папір масою 10–60 г/м² належить до найлегших видів паперу. Папероробна машина для виробництва санітарно-гігієнічного паперу відповідає зображенню на рисунку 1.8.

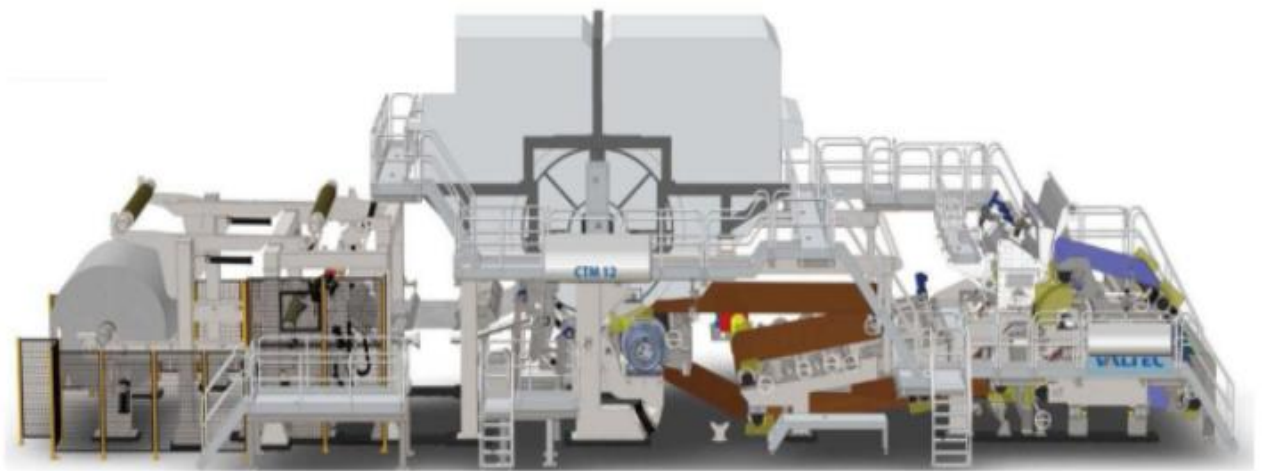


Рис. 1.9 – Папероробна машина для виробництва санітарно-гігієнічного паперу

Плоскосіткові машини такого типу залишаються найпоширенішими завдяки надійності та ефективності. Їхня головна перевага — висока ефективність зневоднення полотна перед сушінням, що знижує енергоспоживання.

Висновки до розділу 1

У розділі виконано огляд сучасних досягнень у галузі керування промисловими технологічними процесами із застосуванням методів Multiple Input Multiple Output. Проаналізовано основні підходи до керування МІМО-об'єктами, їхні переваги, недоліки та області практичного застосування. Показано, що

використання МІМО-методів є найбільш ефективним для багатозв'язних, нелінійних і змінних у часі об'єктів керування.

Окрему увагу приділено аналізу технологічного процесу роботи папероробної машини, визначено його основні стадії, вхідні та вихідні параметри, а також характер взаємозв'язків між ними. На основі проведеного аналізу побудовано функціональну схему автоматизованої системи керування, що відображає структуру об'єкта керування та основні канали регулювання.

Проведений у розділі аналіз підтвердив доцільність застосування сучасних МІМО-методів для керування технологічним процесом виготовлення паперу та створив необхідне теоретичне підґрунтя для подальшого синтезу й дослідження автоматизованої системи керування в наступних розділах роботи.

РОЗДІЛ 2

МОДЕЛЮВАННЯ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ МІМО ДЛЯ ПРОЦЕСІВ ВИРОБНИЦТВА ПАПЕРУ

2.1. Ідентифікація об'єкта керування – папероробної машини

У межах цього дослідження було визначено об'єкт керування МІМО для процесів виробництва паперу. Для цього були зібрані вихідні дані, включаючи щільність паперу, вміст вологи, температуру циліндра та витрату сировини. Ці дані використовувалися для створення моделей вхідних і вихідних змінних на основі вихідних даних відповідно до рисунка 2.1.

<u>RawMaterialFlow</u>	<u>CylinderTemperature</u>	<u>Humidity</u>	<u>PaperDensity</u>
10	100	6.0003	18
10.357	101.43	6.2493	19.286
10.714	102.86	6.4995	20.572
11.071	104.29	6.749	21.858
11.429	105.71	7.001	23.143
11.786	107.14	7.25	24.429
12.143	108.57	7.4993	25.715
12.5	110	7.7507	27.003
12.857	111.43	7.9995	28.287
13.214	112.86	8.2504	29.571
13.571	114.29	8.5015	30.856
13.929	115.71	8.7509	32.141
14.286	117.14	8.9998	33.43
14.643	118.57	9.2499	34.713
15	120	9.5019	36.001

Рис. 2.1. Отриманий набір вихідних даних

Для ідентифікації передатних функцій системи МІМО використовувалися алгоритми, реалізовані в MATLAB. Функції tfest застосовувалися для визначення передатних функцій першого порядку. У результаті ідентифікації були отримані передатні функції $G_{11}(s)$, $G_{12}(s)$, $G_{21}(s)$ і $G_{22}(s)$, які характеризують взаємозв'язок між вхідними та вихідними змінними. Адекватність моделі оцінювалася на основі показників якості, таких як відсоток відповідності та середньоквадратична

похибка. Структурні схеми МІМО-системи керування папероробною машиною наведено на рисунках 2.1 і 2.2.

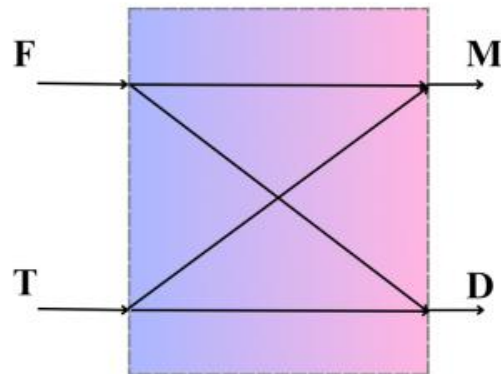


Рис. 2.1. Структурна схема МІМО системи керування

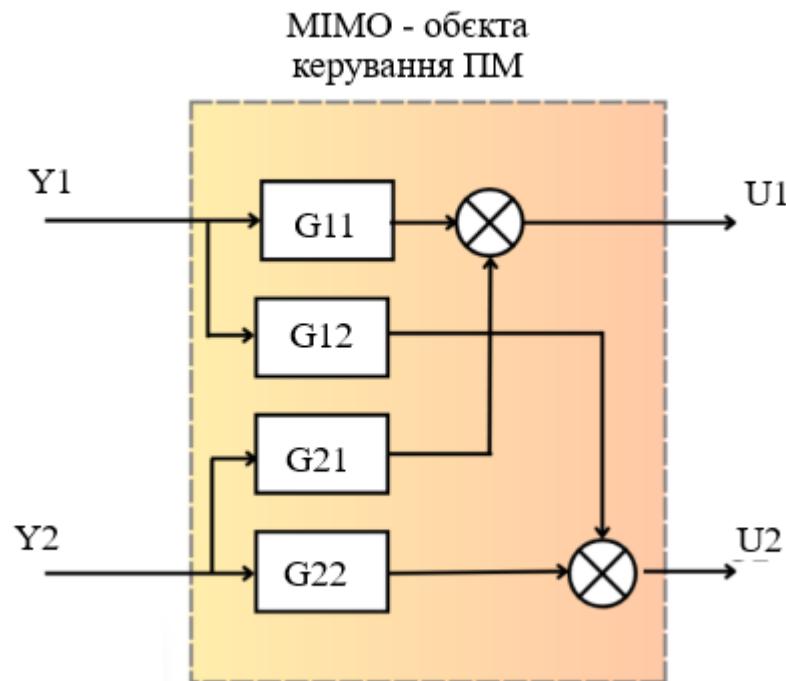


Рис. 2.2. Структурна схема МІМО-об'єкта керування (папероробної машини)

На рисунку 2.2 прийнято такі позначення: u_1 – потік сировини (сировинний матеріал); u_2 – температура Янкі-циліндра; y_1 – вологість паперу; y_2 – щільність паперу; $G_{11}(s)$ – співвідношення між потоком сировини (u_1) і вологістю паперу (y_1); $G_{12}(s)$ – співвідношення між температурою Янкі-циліндра (u_2) і вологістю паперу (y_1); $G_{21}(s)$ – співвідношення між потоком сировини (u_1) і щільністю

паперу (y_2); $G_{22}(s)$ – співвідношення між температурою Янки-циліндра (u_2) і щільністю паперу (y_2).

Таким чином, $G_{11}(s)$, $G_{12}(s)$, $G_{21}(s)$ і $G_{22}(s)$ позначають передатні функції, що характеризують взаємозв'язок між вхідними (u_1, u_2) та вихідними (y_1, y_2) змінними процесів виробництва паперу в межах МІМО-системи. Результати перевірки адекватності ідентифікації об'єкта наведено на рисунку 2.2.

TransferFunction	Adequacy	MSE
'G11'	90.36	0.01084
'G12'	99.93	6.108e-07
'G21'	99.98	1.178e-06
'G22'	99.98	1.184e-06

Рис. 2.2. Результати перевірки адекватності ідентифікації об'єкта

Передатні функції після ідентифікації об'єкта керування мають вигляд:

$$G_{11}(s) = 2.868/(s + 6.092) \quad (2.1)$$

$$G_{12}(s) = 0.003842/(s + 0.0219) \quad (2.2)$$

$$G_{21}(s) = 0.2669/(s + 0.07414) \quad (2.3)$$

$$G_{22}(s) = 0.01622/(s + 0.01803) \quad (2.4)$$

2.2. Розроблення розв'язувального пристрою ПРМ

Спираючись на ідею статичного діагонального спрощення (Static Diagonal Decoupling), яка полягає в усуненні впливу перехресних зв'язків між каналами [12]. Це досягається шляхом множення матриці передавальних функцій об'єкта $G(s)$ на матрицю розв'язуючих елементів $D(s)$, яка має діагональний вигляд і є оборотною. Таким чином, загальна передавальна функція системи стає діагональною, і кожен канал може розглядатися незалежно.

Для реалізації розв'язуючого пристрою згідно з формулою (2.5) необхідно знайти розв'язуючу матрицю $D(s)$.

Статичне діагональне спрощення є методом декомпозиції багатозв'язаної системи керування на набір незалежних підсистем, що спрощує процес аналізу та проєктування системи керування. Процес використання статичного діагонального спрощення включає такі етапи:

Ідентифікація об'єкта керування: визначення вхідних і вихідних змінних системи та отримання передавальних функцій між цими змінними.

Визначення розв'язуючої матриці: обчислення оборотної матриці $D(s)$ з діагональним виглядом таким чином, щоб при множенні матриці передавальних функцій об'єкта $G(s)$ на матрицю $D(s)$ утворювалася діагональна матриця передавальних функцій $F(s)$. Елементи матриці $D(s)$ дорівнюють оберненим значенням статичних коефіцієнтів (постійних членів) діагональних елементів $G(s)$.

Розв'язування системи: застосування розв'язуючої матриці $D(s)$ до вихідної системи керування для перетворення багатозв'язаної системи на набір незалежних підсистем (каналів керування). У результаті кожен канал керування розглядається окремо.

Проєктування і налаштування регуляторів: для кожного незалежного каналу керування розробляється відповідний регулятор, наприклад ПІ-регулятор, і визначаються оптимальні параметри регулятора з використанням методів налаштування, таких як алгоритм Ціглера–Ніколса.

Інтеграція регуляторів і тестування: інтеграція розроблених регуляторів у систему керування та проведення експериментів для перевірки ефективності й точності нової системи керування порівняно з вихідною.

Застосування статичного діагонального спрощення дозволяє спростити процес аналізу та проєктування системи керування, забезпечуючи незалежне керування кожним каналом і мінімізуючи вплив перехресних зв'язків між каналами.

Для реалізації розв'язуючого керування необхідно знайти розв'язуючу матрицю $D(s)$ згідно з формулою (2.5)

$$F(s) = D(s) \cdot G(s) \quad (2.5)$$

де $F(s)$ – діагональна матриця передатних функцій. Елементи $D(s)$ визначаються як обернені значення статичних коефіцієнтів діагональних елементів $G(s)$.

На основі даного методу були отримані елементи розв'язуючої матриці $D(s)$ з використанням статичного діагонального спрощення (формула 2.6), а також побудована матриця розв'язуючого елемента $D(s)$ з використанням знайдених коефіцієнтів розв'язування.

$$D(s) = \begin{vmatrix} D^{11}(s) & D^{12}(s) \\ D^{21}(s) & D^{22}(s) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1.575 & 0 \\ 0 & 1.1116 \end{vmatrix} \quad (2.6)$$

Коефіцієнти $D_{12}(s)$ і $D_{21}(s)$ дорівнюють нулю, що означає, що розв'язувальний елемент зводить багатозв'язаний об'єкт керування (папероробну машину) до діагональної форми, забезпечуючи незалежне керування кожним контуром.

Канал 1: вхід – витрата сировини (u_1), вихід – вологість паперу (y_1).

Канал 2: вхід – температура циліндра (u_2), вихід – щільність паперу (y_2).

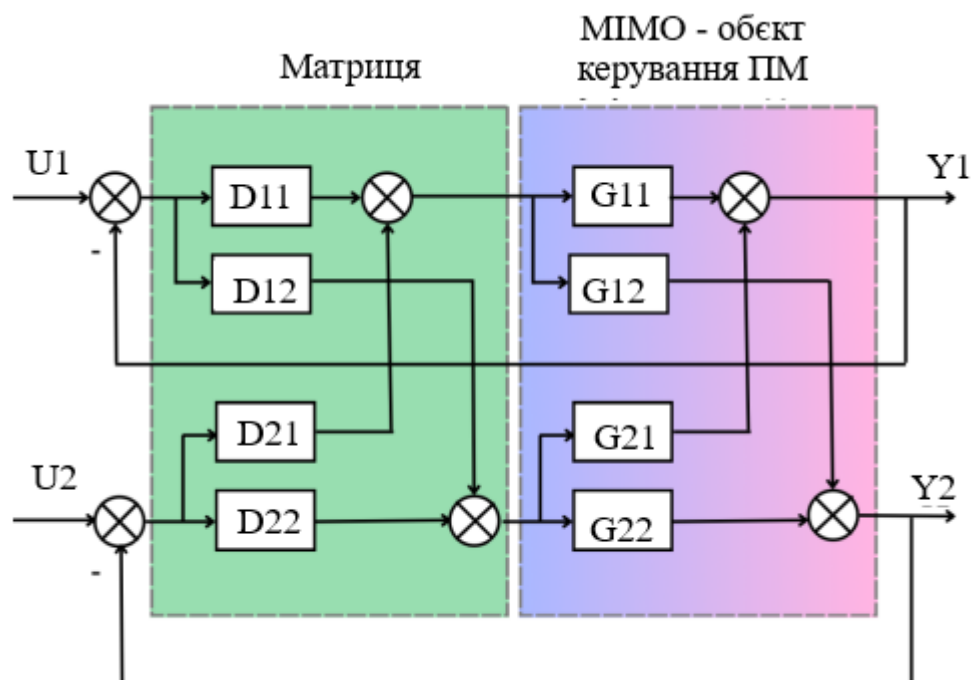


Рис. 2.4. Структурна схема розв'язувального керування папероробною машиною

2.3. Моделювання та аналіз системи автоматичного регулювання папероробної машини

У цьому розділі подано результати синтезу системи керування папероробною машиною, заснованої на розбитті багатовимірної системи на два незалежні канали керування. На основі відомих передатних функцій елементів системи було отримано дві загальні передатні функції для кожного каналу, після чого синтезовано регулятори.

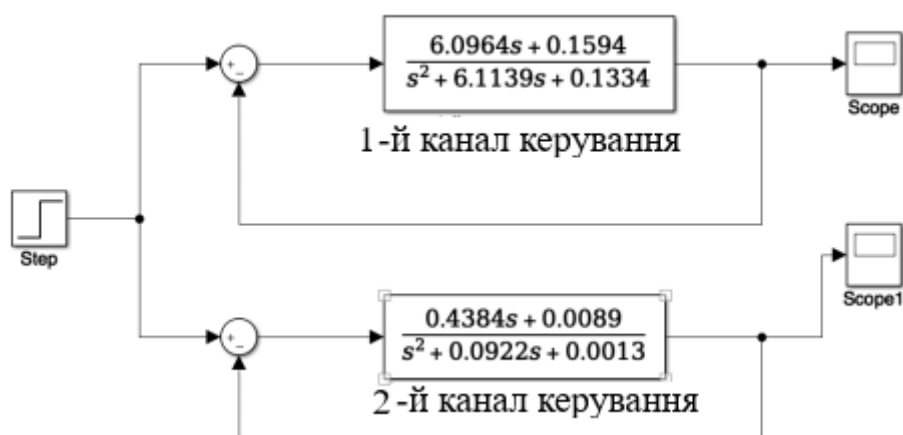


Рис. 2.5. Структурна схема двоканальної системи керування ПРМ

Проведений синтез двох незалежних каналів дозволяє покращити керованість і стабільність системи, забезпечуючи ефективне незалежне керування кожним контуром. Результати моделювання переходових процесів наведено на рисунках 2.6 і 2.7.

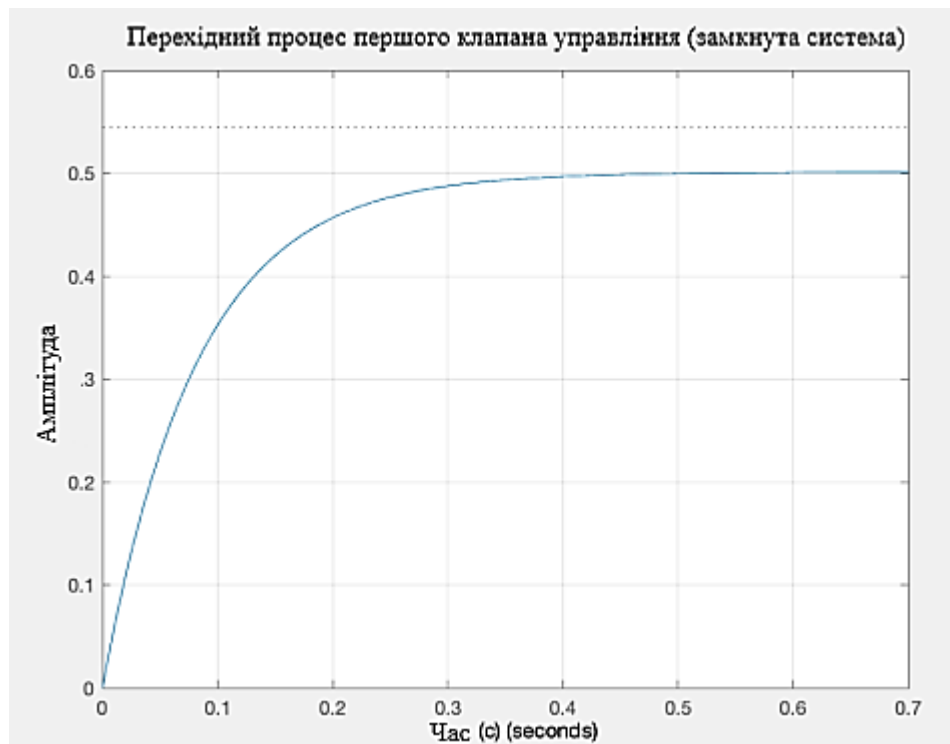


Рис. 2.6. Перехідний процес 1-го каналу

Графік показує, як змінюється вологість паперу у відповідь на зміну витрати сировини.

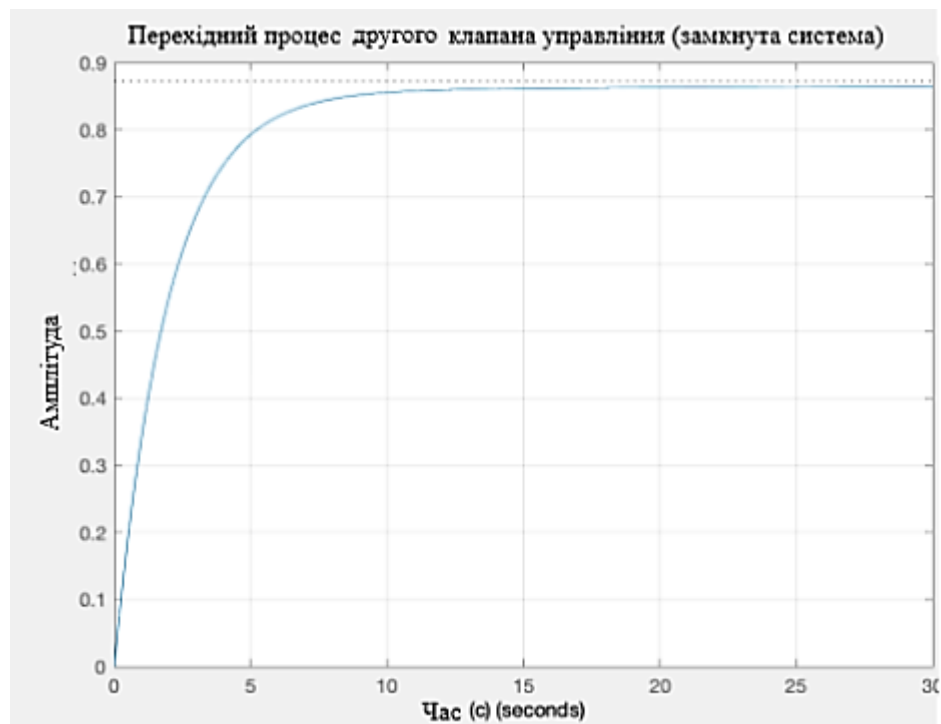


Рис. 2.7. Перехідний процес 2-го каналу

Графік показує, як зміна температури циліндра впливає на щільність паперу

2.4. Оцінка якості системи автоматичного регулювання папероробної машини

Характер системи визначається її перехідною характеристикою. Побудувавши перехідну характеристику системи автоматичного регулювання щільності паперу, можна оцінити її якість. Для більш детального аналізу САК використовують прямі та опосередковані оцінки якості. Прямі оцінки отримують за перехідним процесом, а опосередковані — безпосередньо за полюсами системи. Джерелом оцінки якості виступає замкнена система автоматичного регулювання.

Спираючись на перехідну характеристику (рисунок 2.8), проаналізуємо якість системи за прямими оцінками якості першого каналу керування.

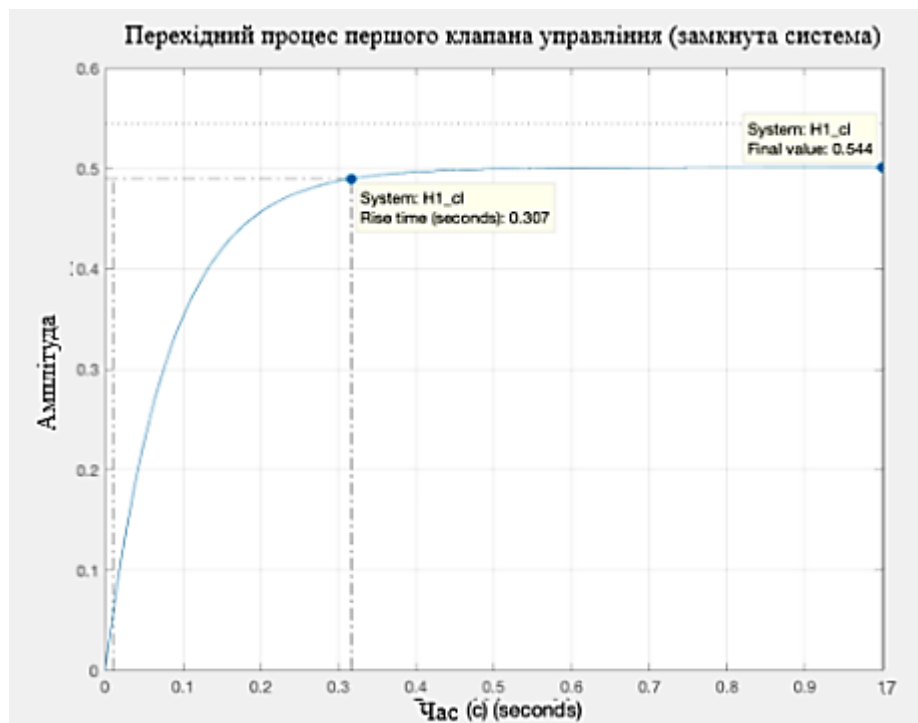


Рис. 2.8. Перехідна характеристика з прямими оцінками якості

Наведено перехідну характеристику другого каналу керування (рисунок 2.9).

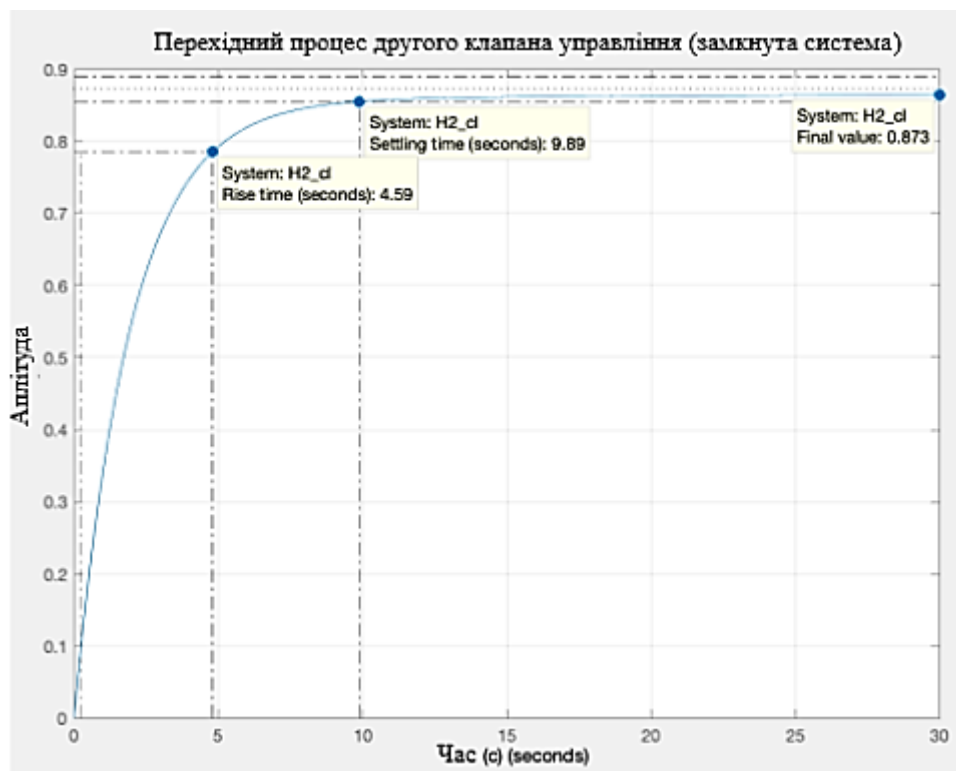


Рис. 2.9. Перехідна характеристика з прямими оцінками якості

Установлена похибка визначає таку динамічну властивість системи, як точність. Оскільки для даної системи установлена похибка не дорівнює нулю, замкнена система керування не є точною. Це необхідно врахувати під час розв'язання задачі налаштування регулятора.

З аналізу прямих оцінок якості видно, що швидкодія системи є задовільною. Швидкодію САК папероробної машини визначають як швидкість реакції системи на вхідну дію — у нашому випадку одиничний ступінчастий сигнал. Час регулювання становить 9,89 с.

Водночас система є неточною, оскільки установлена похибка не досягає заданого значення. Одним із основних показників, що характеризує якість регулювання в усталеному режимі, є точність регулювання $e_{ss} = 0$. У зв'язку з цим необхідно синтезувати типовий регулятор.

Для визначення запасів стійкості побудовано ЛАЧХ і ЛФЧХ замкненої системи (рисунок 2.5). Згідно з частотними характеристиками системи отримано опосередковані оцінки якості, які також мають важливе значення для аналізу системи.

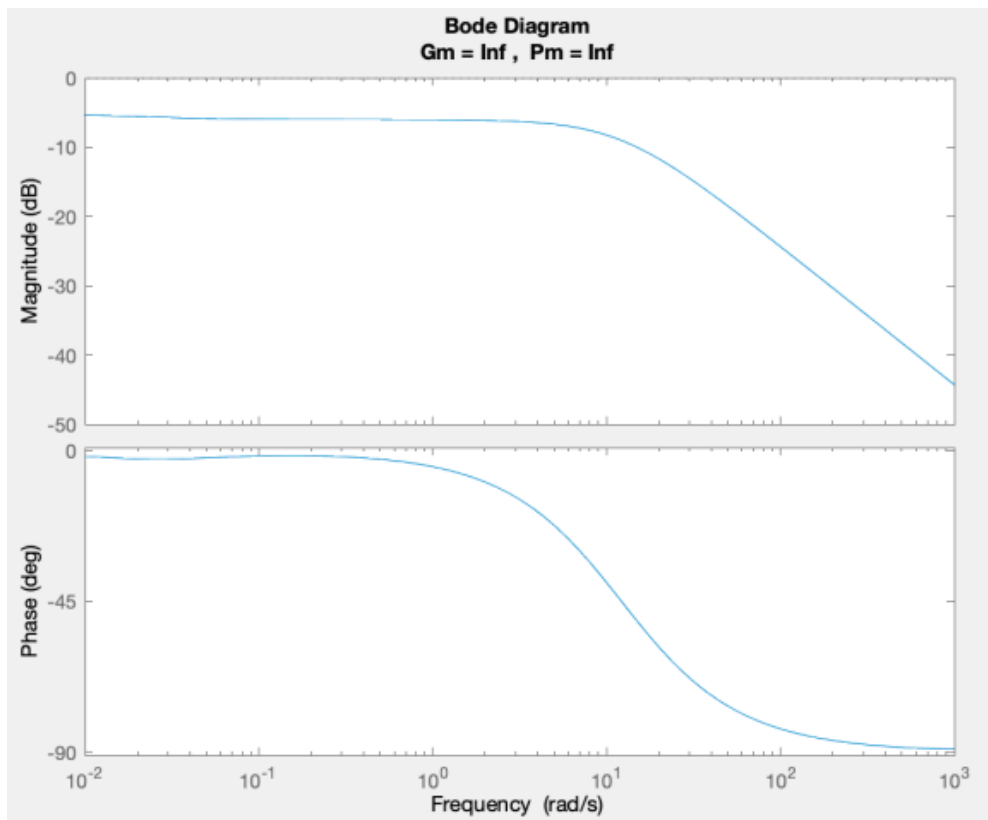


Рис. 2.5. ЛАЧХ і ЛФЧХ замкненої системи ПРМ

Згідно з графіком, отримано такі опосередковані оцінки якості (таблиця 2.1).

Таблиця 2.1

Запаси стійкості за амплітудою та фазою

Запас стійкості	Перший канал управління	Другий канал управління
Gm	Inf	inf
Pm	Inf	inf

Відповідно до вимог до запасів стійкості, мінімальне значення запасу за амплітудою становить 10 дБ. У нашому випадку цей показник перевищує вимоги й дорівнює нескінченності. Мінімальне значення запасу за фазою становить 30° , а за графіком (рисунок 2.5) запас стійкості за фазою також дорівнює нескінченності.

Далі подано вимоги до синтезу регулятора на основі оцінок САК папероробної машини відповідно до даних таблиці 2.2.

Таблиця 2.2

Вимоги до синтезу регулятора на основі оцінок якості

№	Оцінювання якості		Канал		Вимоги	
			керування 1	керування 2	P1	P2
1	Час регулювання	T_{set}	45 с	9.9 с	15 с	45 с
2	Перерегулювання	P_{ov}	0%	0%	0 ... 20%	0 ... 20%
3	Усталена помилка	e_{ss}	0.5	0.2	0	0
4	Коливальність	μ	-	-	0.5	0.5
5	Час наростання	T_R	0.3	4.6	10	10

Слід враховувати, що під час синтезу регулятора існує висока ймовірність збільшення часу регулювання, оскільки система є неточною. Для досягнення установленної похибки, рівної нулю, допускається збільшення часу регулювання, де ключовим показником для даного технологічного процесу і системи в цілому є точність.

Наступним кроком було спроектовано регулятори для кожного з незалежних каналів керування. Для цього розроблено ПІ-регулятор для кожної пари «вхід–вихід», після чого визначено оптимальні параметри регуляторів із використанням методів налаштування, таких як алгоритм Циглера–Ніколса.

Закон ПІ-регулятора записується у такому вигляді:

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(t) dt \quad (2.7)$$

У результаті отримано два незалежні контури керування, кожен із яких регулює свій вихід, при цьому вплив перехресних зв'язків мінімізовано. Це спрощує процес проектування та аналізу системи керування.

Висновки до розділу 2

У розділі виконано моделювання об'єкта керування типу Multiple Input Multiple Output для процесів виробництва паперу. Проведено ідентифікацію папероробної машини як об'єкта керування, визначено її основні динамічні характеристики, вхідні та вихідні змінні, а також умови взаємного впливу параметрів у багатоканальній системі.

На основі результатів ідентифікації розроблено розв'язувальний пристрій для папероробної машини, який забезпечує зменшення взаємного впливу між каналами регулювання та підвищення керованості МІМО-системи. Виконано математичне моделювання системи автоматичного регулювання, досліджено її динамічні та статичні характеристики в різних режимах роботи.

Проведено оцінку якості системи автоматичного регулювання папероробної машини за основними показниками точності, швидкодії, перерегулювання та стійкості. Отримані результати підтвердили ефективність обраної структури керування та доцільність подальшого впровадження запропонованого рішення в автоматизованій системі керування технологічним процесом виробництва паперу.

РОЗДІЛ 3

СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНИХ РЕГУЛЯТОРІВ

3.1. Постановка задачі синтезу оптимальних регуляторів

На поданій діаграмі зображено схему синтезу пристроїв керування для певного об'єкта. Тут використовується комбінація різних методів керування та технологій для досягнення оптимальної роботи системи.

Структурна схема постановки задачі синтезу пристроїв керування наведена на рисунку 3.1.

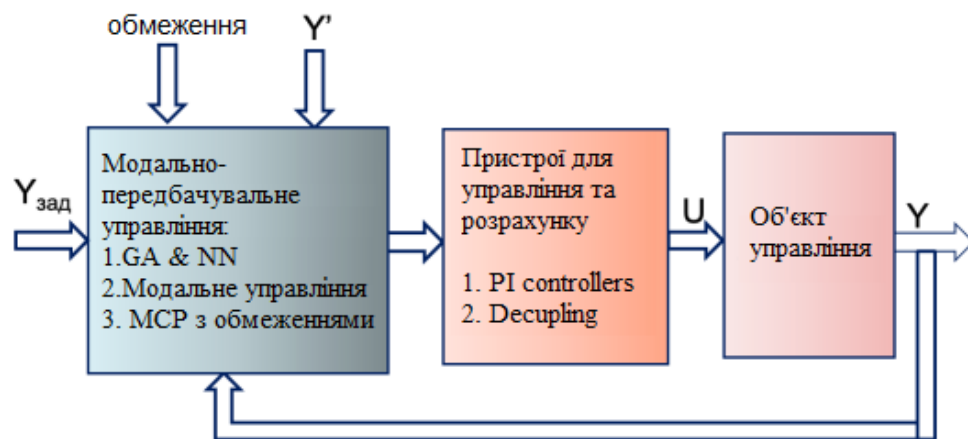


Рис. 3.1. Структурна схема постановки задачі синтезу пристроїв керування

Для математичної моделі необхідно знайти параметри PI-регулятора (3.7) на основі методу генетичного алгоритму (GA), який мінімізує квадратичний інтегральний критерій якості:

$$ISE = \int_0^{\infty} e^2(t) dt \rightarrow \min \quad (3.1)$$

Цей критерій доцільно застосовувати для коливальної системи, оскільки він виключає негативні значення. Мінімізуючи критерій якості, ми безпосередньо зменшуємо оцінки якості системи та отримуємо оптимальні параметри PI-регулятора.

Для пошуку оптимальних параметрів використовується MATLAB Optimization Toolbox з генетичним алгоритмом. Суть генетичного алгоритму

полягає в імітації еволюційних процесів. Процес роботи GA можна поділити на наступні етапи (рисунок 3.2):

Крок 1. Створення початкової популяції Початкова популяція складається з набору індивідуумів, що містять хромосоми, які, у свою чергу, складаються з генів. Початкові значення зазвичай створюються випадковим чином. У нашому випадку невідомих два — $K_p K_{pK}$ і $K_i K_{iK}$. Тип популяції — double vector, необхідний при наявності цілочисельних обмежень.

Крок 2. Оцінка пристосованості (fitness function) Визначається відповідність кожного індивідуума цільовій функції. У нашому випадку — це інтегральна квадратична помилка.

Крок 3. Відбір (selection) Вибираються найбільш пристосовані індивідууми для збереження в популяції. Використовується турнірний відбір (tournament) для підтримки різноманітності популяції.

Крок 4. Схрещування (crossover) Обмін генетичною інформацією між частинами хромосом для створення нового покоління.

Крок 5. Мутація (mutation) Випадкове змінення окремих генів з невеликою ймовірністю для збереження генетичного різноманіття. Використовується двоступінчастий алгоритм uniform.

Крок 6. Умови зупинки та вибір оптимального індивідуума Задаються критерії зупинки алгоритму. Після завершення обчислень обирається індивідуум з найкращою пристосованістю, що забезпечує мінімум цільової функції та є оптимальним рішенням для PI-регулятора.

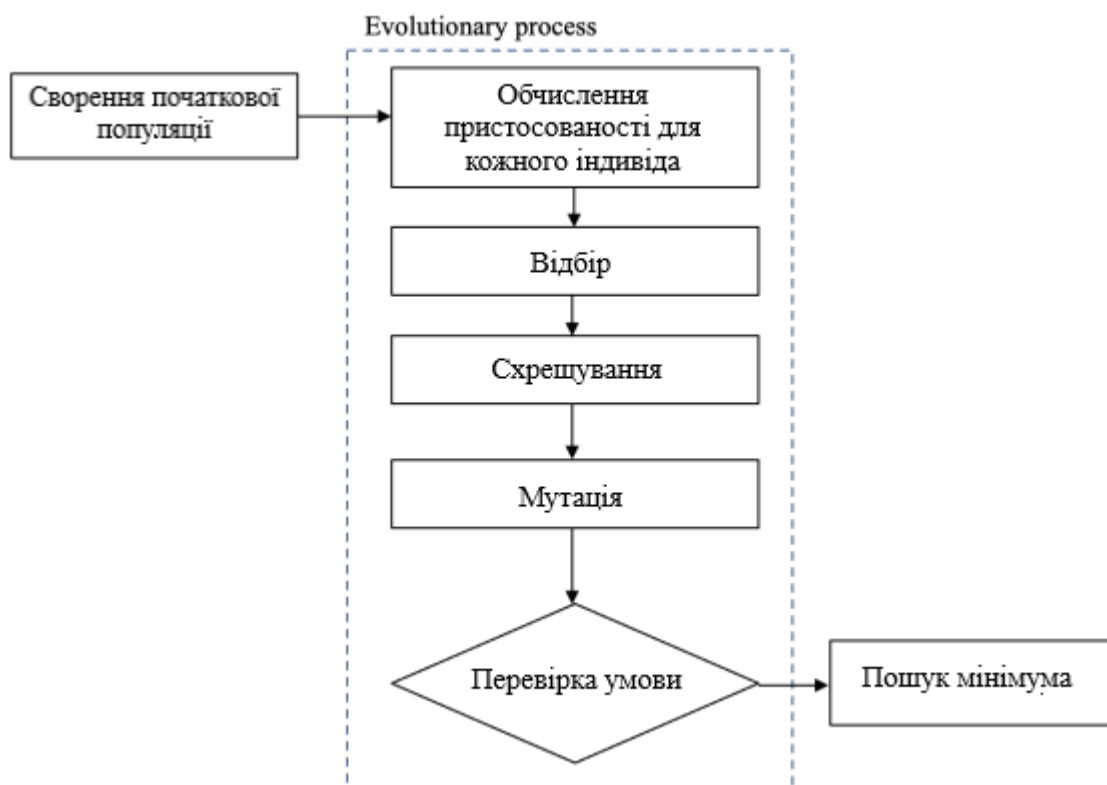


Рис. 3.2. Блок-схема роботи генетичного алгоритму

Використовуючи логіку даного методу, за допомогою генетичного алгоритму можна отримати оптимальні значення цільової функції.

Цільову функцію записуємо у М-файл для подальшої оптимізації. Далі, задаючи параметри генетичного алгоритму, визначаємо оптимальні K_p , K_r та K_i для PI-регулятора, який керує щільністю паперу на бумагоделательной машині.

Процес пошуку оптимальних параметрів для цільової функції представлений на рисунку 3.3.

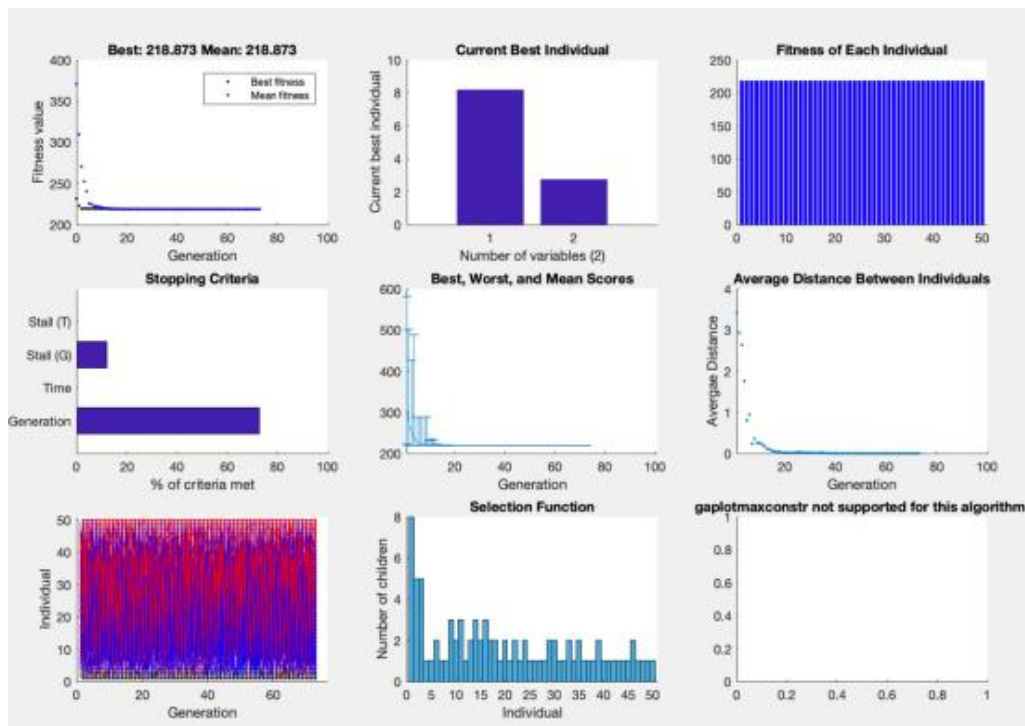


Рис. 3.3. Використання генетичного алгоритму в MATLAB

Класичні методи розв'язання не справляються з даною задачею через високу складність передаточної функції.

Застосування генетичного алгоритму дозволяє показати процес пошуку оптимального рішення цільової функції. Розширення MATLAB Optimization Toolbox забезпечує знаходження оптимальних параметрів типового PI-регулятора для управління системою.

Процес визначення цих параметрів представлений на рисунку 3.4.

Generation	Func-count	f(x)	f(x)	Generations
61	3100	269.9	269.9	1
62	3150	269.9	269.9	0
63	3200	269.9	269.9	1
64	3250	269.9	269.9	2
65	3300	269.9	269.9	0
66	3350	269.9	269.9	1
67	3400	269.9	269.9	0
68	3450	269.9	269.9	1
69	3500	269.9	269.9	0
70	3550	269.9	269.9	1
71	3600	269.9	269.9	2
72	3650	269.9	269.9	0
73	3700	269.9	269.9	1
74	3750	269.9	269.9	2
75	3800	269.9	269.9	0
76	3850	269.9	269.9	1
77	3900	269.9	269.9	2

Optimization terminated: average change in the fitness value less than options.FunctionTolerance.
 Kp1: 2.2
 Ki1: 0.56
 Kp2: 8.2
 Ki2: 0.7554

Рис. 3.4. Використання генетичного алгоритму в MATLAB Optimization Toolbox

За допомогою генетичного алгоритму мінімізували критерій якості (3.1) і отримали оптимальні параметри ПІ-регулятора для управління:

Для першого каналу управління (3.2):

$$u(t) = 2.21 e(t) + 0.5 \int_0^t e(t) dt \quad (3.2)$$

Для другого каналу управління (3.3):

$$u(t) = 8.21 e(t) + 0.7456 \int_0^t e(t) dt \quad (3.3)$$

Побудувавши перехідний процес системи з ПІ-регулятором, на рисунках 3.5 та 3.6 показані результати для першого та другого каналу управління відповідно. Це дозволяє оцінити, як застосування оптимізованого регулятора вплинуло на основні показники системи: точність, перерегулювання та час регулювання.

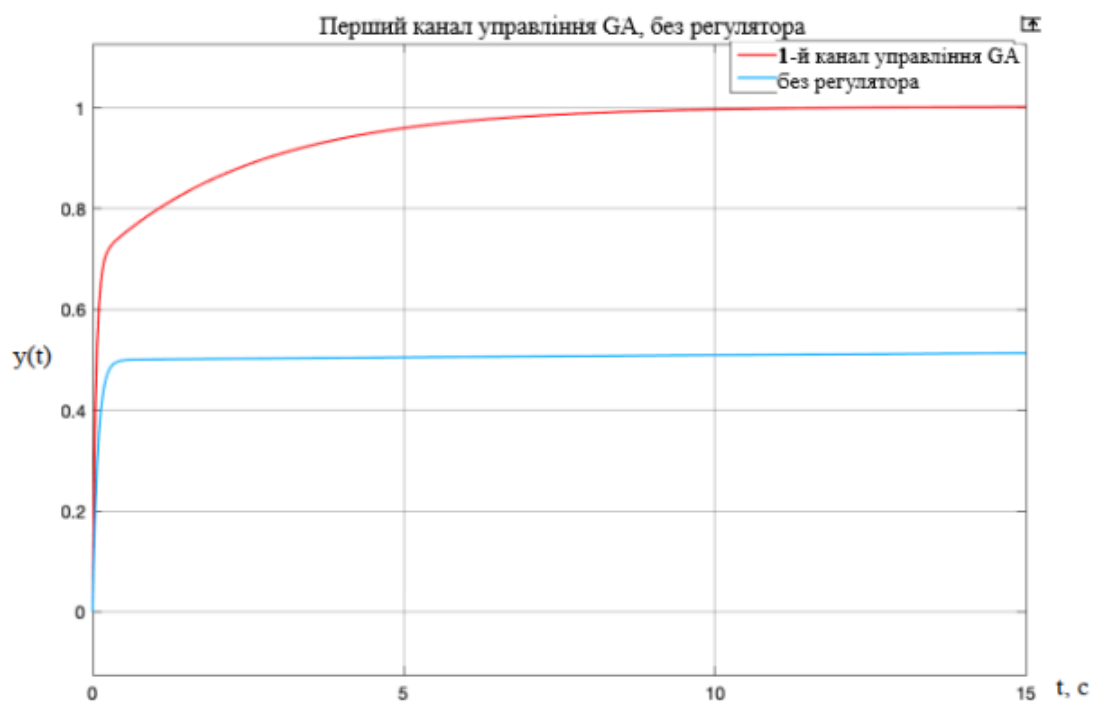


Рис. 3.5. Перехідний процес першого каналу управління з оптимізованим ПІ-регулятором

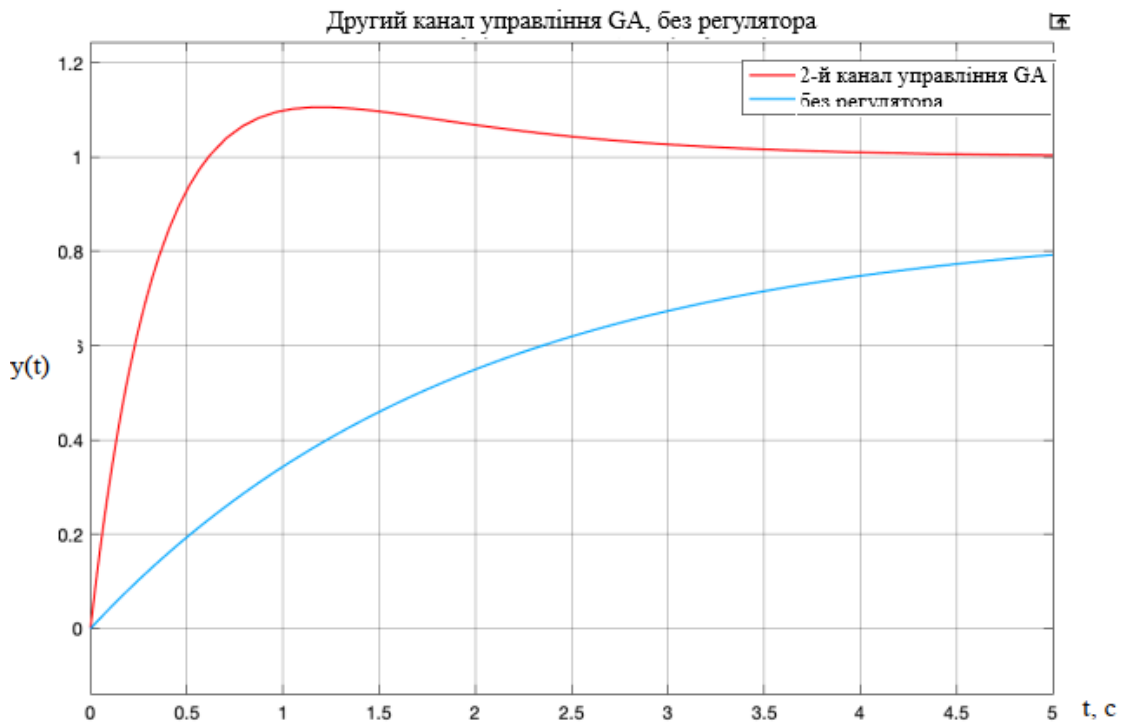


Рис. 3.6. Перехідний процес другого каналу управління з синтезованим PI-регулятором

Основні спостереження:

- точність системи значно покращена: установлена помилка практично дорівнює нулю.
- перерегулювання мінімальне, що забезпечує плавну реакцію системи на зміни.
- швидкодія системи зросла, що є одночасно перевагою та потенційним недоліком, оскільки надто велика швидкодія може призвести до механічних навантажень.

У таблиці 3 наведені оптимальні параметри PI-регуляторів, визначені методом Циглера-Никольса

Таблиця 3

Оптимальні параметри налаштування

Метод	Канал 1	Канал 2
ZN	$k_p = 1.042$ $k_i = 19.057$	$k_p = 1.042$ $k_i = 0.056$

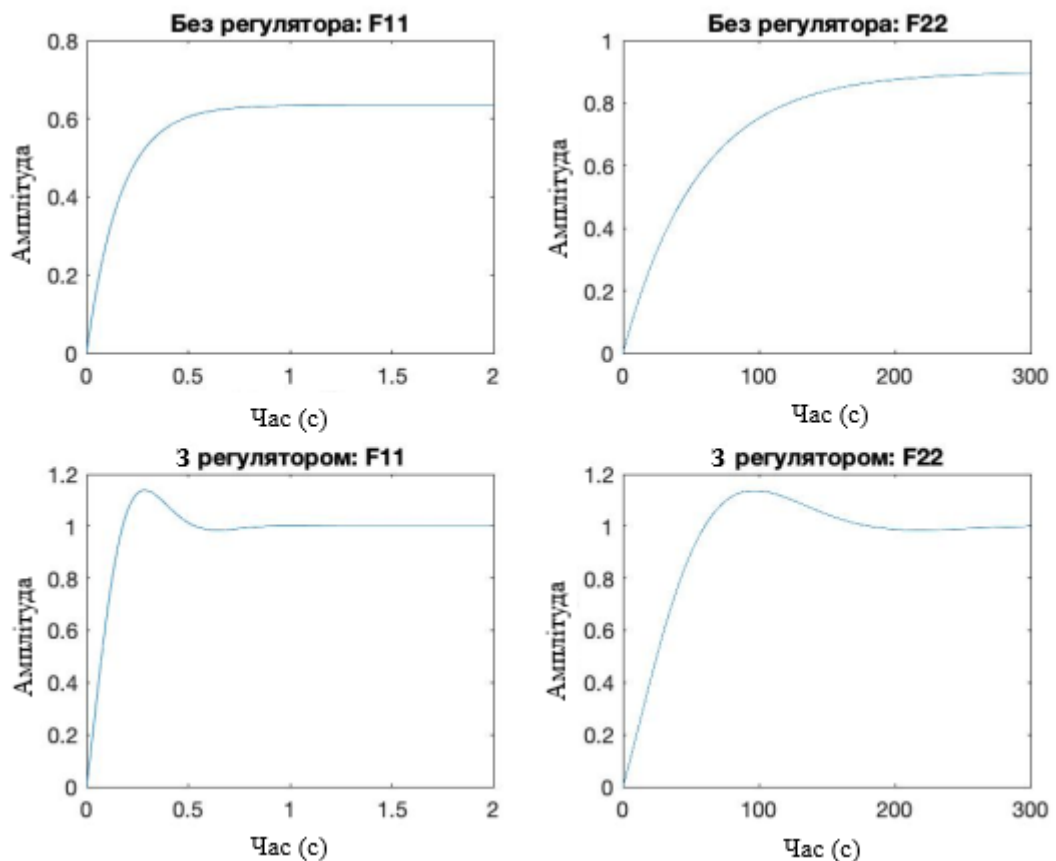


Рис. 3.7. МІМО-система з PI-регулятором та без нього

Аналіз показав, що системи, налаштовані з використанням методу Ціглера–Ніколса, демонстрували значно кращі результати порівняно з системами без його застосування. Це було зумовлено встановленням оптимальних параметрів для ПІ-регуляторів за допомогою цього методу, що призвело до підвищення точності та ефективності системи керування загалом.

Таким чином, застосування методу Ціглера–Ніколса для налаштування параметрів ПІ-регулятора дозволило покращити перехідні характеристики системи, зменшити перерегулювання та час встановлення, що забезпечило більш точне й надійне керування технологічним процесом. Це є важливим чинником у забезпеченні якості та ефективності роботи об'єктів керування.

3.2. Використання нейронних мереж для оптимізації параметрів ПІ-регуляторів

У цьому розділі розглядається інноваційний підхід до оптимізації параметрів ПІ-регуляторів для систем керування папероробною машиною з використанням нейронних мереж.

Традиційні методи налаштування параметрів регуляторів можуть бути трудомісткими та не завжди забезпечують оптимальну продуктивність системи. Інтеграція методів машинного навчання, таких як нейронні мережі, дозволяє автоматизувати та покращити процес налаштування регуляторів, забезпечуючи більш точне й адаптивне керування.

Метою даного дослідження є розробка та впровадження нейронної мережі для прогнозування оптимальних параметрів ПІ-регуляторів k_p і k_i для двох каналів керування папероробною машиною.

У цьому дослідженні використано гібридний підхід, що включає генетичний алгоритм (ГА) і нейронні мережі (НС). Генетичний алгоритм застосовувався для початкової оптимізації параметрів.

Отримані за допомогою генетичного алгоритму результати використовувалися як початковий набір даних для навчання нейронних мереж. Нейронні мережі мають здатність до навчання та самоадаптації, що робить їх ідеальним інструментом для постійно змінюваних виробничих процесів, де потрібна миттєва реакція на зміни в робочому середовищі та технологічних умовах.

У результаті інтеграція ГА і НС не лише прискорює процес оптимізації, але й значно підвищує його ефективність, забезпечуючи надійне та стабільне керування процесом виготовлення паперу. Такий підхід демонструє суттєву перевагу над традиційними методами, підкреслюючи потенціал застосування гібридних систем в автоматизації промислових процесів.

Алгоритм роботи системи машинного навчання представлений на рисунку 3.8.

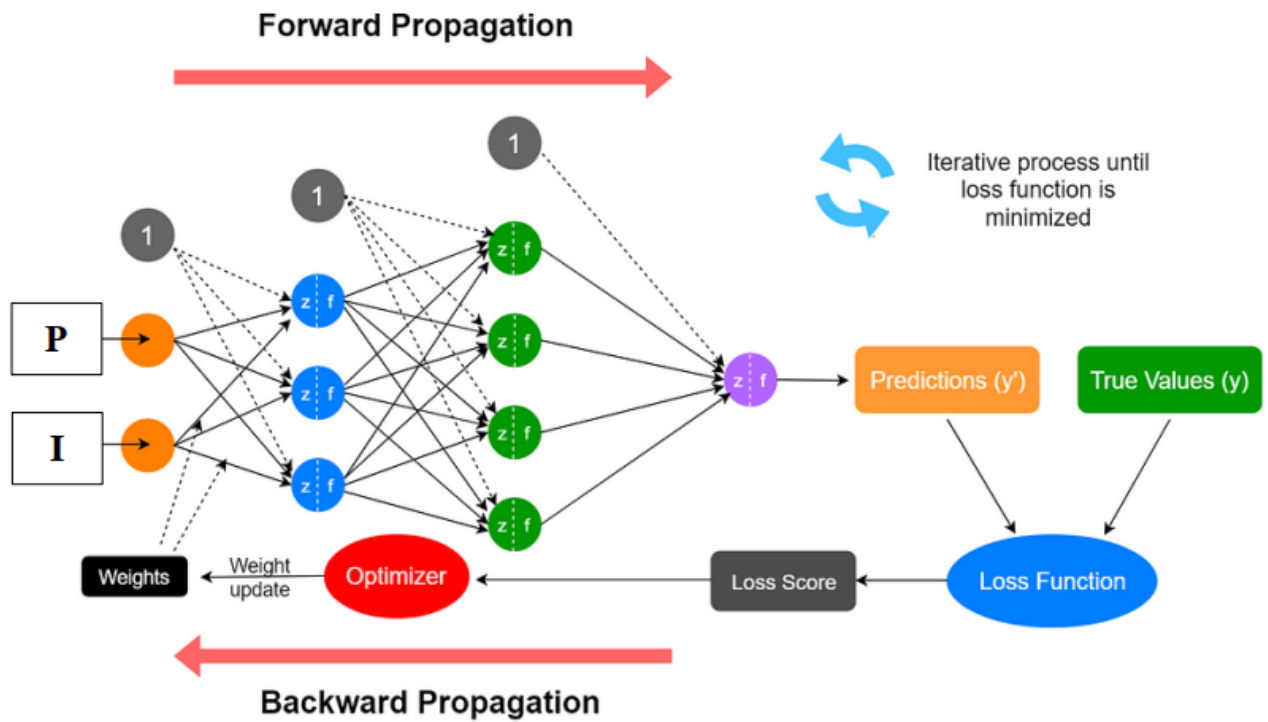


Рис. 3.8. Алгоритм роботи машинного навчання

На основі даних, отриманих за допомогою генетичного алгоритму (ГА), були навчені нейронні мережі для уточнення параметрів ПІ-регуляторів.

1. Підготовка даних: здійснено генерацію навчальних даних з варіаціями навколо оптимальних параметрів, знайдених за допомогою ГА.
2. Архітектура нейронної мережі: мережа складається з двох прихованих шарів по 10 нейронів у кожному.
3. Процес навчання: дані були розділені на навчальну, валідаційну та тестову вибірки. Навчання мережі здійснювалося на вхідних даних, що представляють випадкові параметри, та вихідних даних, що відповідають оптимальним значенням k_p і k_i .

За допомогою інструментарію MATLAB проведено навчання мережі на вхідних і вихідних даних навколо оптимальних параметрів, знайдених ГА. Результати представлені на рисунку 3.9.

```

new_input1 = [0.5; 0.3];
predicted_params1 = net1(new_input1);
disp(['Predicted Kp1: ', num2str(predicted_params1(1))]);
disp(['Predicted Ki1: ', num2str(predicted_params1(2))]);
new_input2 = [0.7; 0.2];
predicted_params2 = net2(new_input2);
disp(['Predicted Kp2: ', num2str(predicted_params2(1))]);
disp(['Predicted Ki2: ', num2str(predicted_params2(2))]);
Performance (Channel 1): 12.0012
Performance (Channel 2): 13.9133
Predicted Kp1: 2.578
Predicted Ki1: 0.49952
Predicted Kp2: 9.2088
Predicted Ki2: 0.61719

```

Рис. 3.9. Використання гібридного алгоритму в MATLAB Optimization Toolbox

Використання гібридного алгоритму в MATLAB Optimization Toolbox із застосуванням методів машинного навчання представлено на рисунку 3.10.

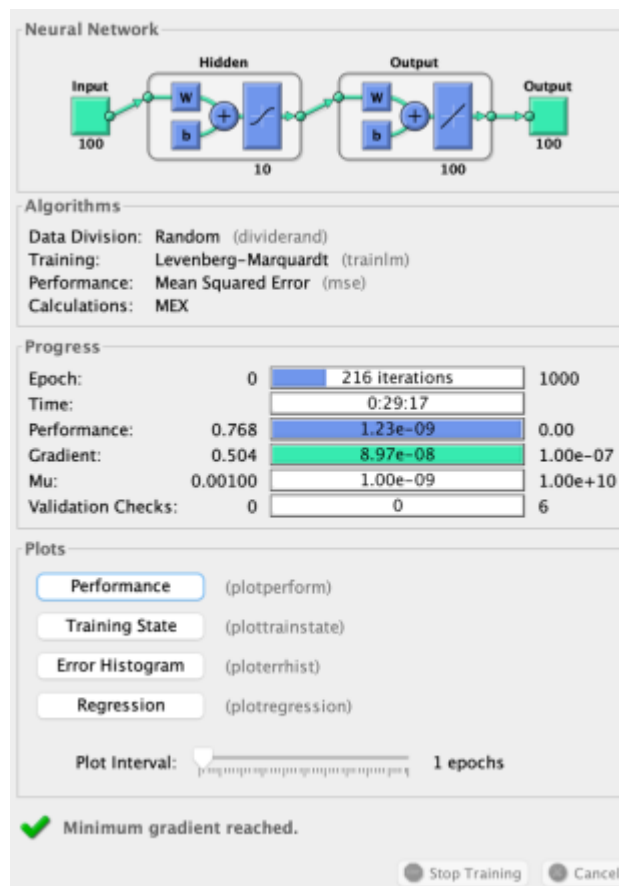


Рис. 3.10. Використання генетичного алгоритму в MATLAB Optimization Toolbox

За допомогою машинного навчання отримано систему з наступними параметрами ПІ-регулятора для першого каналу управління (3.4):

$$u(t) = 2.5786 e(t) + 0.49952 \int_0^t e(t) dt \quad (3.4)$$

Для другого каналу управління (3.5):

$$u(t) = 9.21 e(t) + 0.62 \int_0^t e(t) dt \quad (3.5)$$

Побудувавши перехідний процес системи з ПІ-регулятором (рисунки 3.11 та 3.12 для першого та другого каналу управління відповідно), визначено, як результати моделювання вплинули на основні показники, а саме точність, перерегулювання та час регулювання.

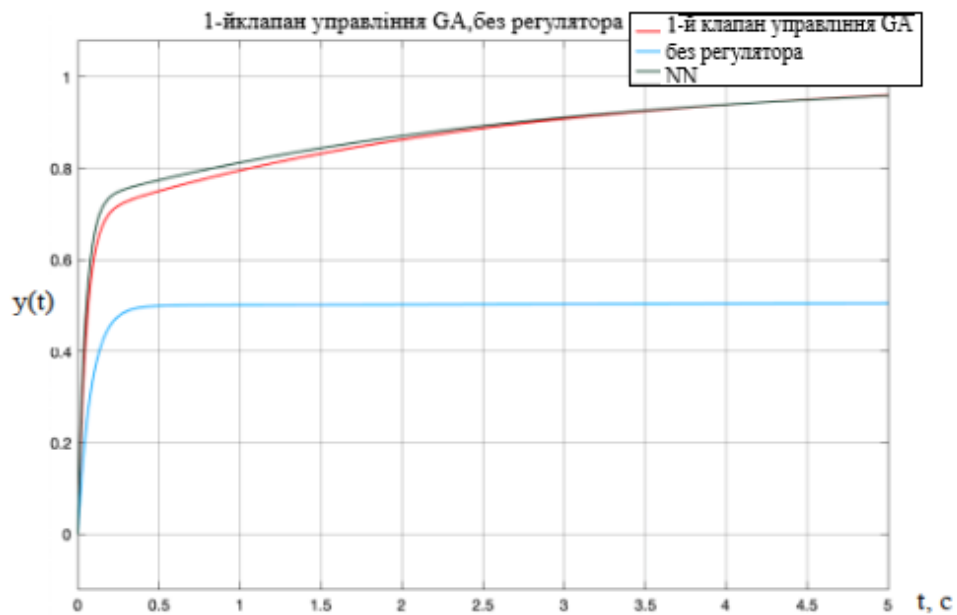


Рис. 3.11. Порівняльний аналіз перехідних характеристик 1-го контуру управління

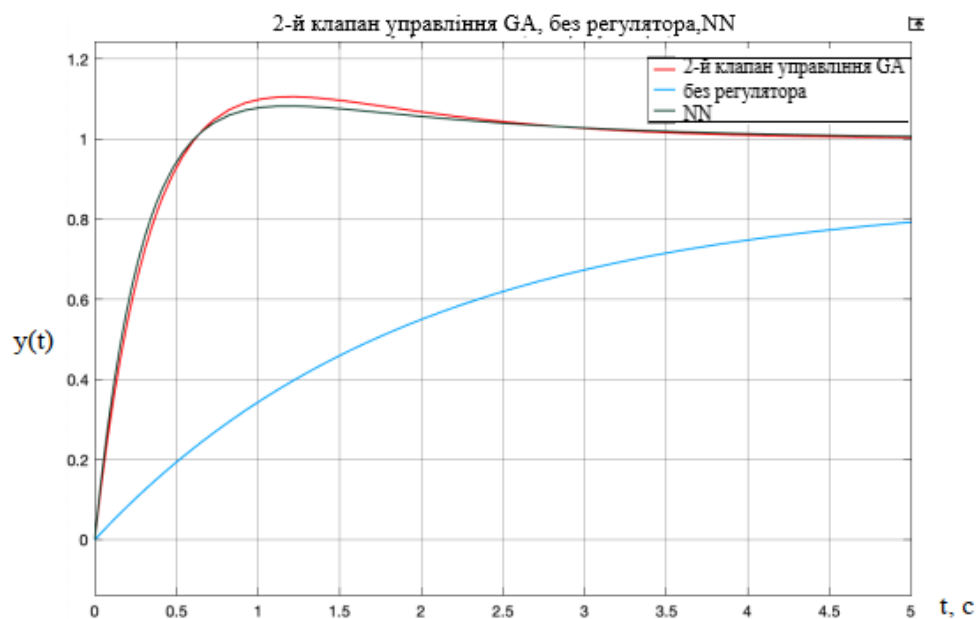


Рис. 3.12. Порівняльний аналіз перехідних характеристик 2-го контуру управління

Використання нейронних мереж у комбінації з генетичними алгоритмами показало високу ефективність в оптимізації параметрів ПІ-регуляторів. Інтеграція генетичних алгоритмів і нейронних мереж є потужним інструментом для оптимізації параметрів систем управління.

Цей підхід демонструє значні переваги перед традиційними методами, забезпечуючи високу точність, адаптивність та ефективність управління. Результати дослідження можуть бути корисними для подальшого розвитку та вдосконалення систем управління у паперовій промисловості.

Згідно з порівняльним аналізом перехідної характеристики, найкращі результати демонструє регулятор, синтезований методом генетичного алгоритму, де процес більш монотонний порівняно з методом ZN №2. Також найбільш виражена перевага у часі регулювання.

Для детальнішого розгляду порівнюємо оцінки якості згідно таблиці 3.1 та таблиці 3.2.

Таблиця 3.1

Оцінки якості 1-го каналу управління

№	Оцінювання якості		Система	ZN	ГА	НМ
1	Час регулювання	T_{set}	15.5 с	45с	0.48 с	12.72 с
2	Перерегулювання	P_{ov}	–	–	13.8%	–
3	Усталена помилка	e_{ss}	$\rightarrow 0$	0.48	$\rightarrow 0$	$\rightarrow 0$
4	Колівальність	μ	0	–	0	0
5	Степінь стійкості	μ	0.18	0.02	0.03	0.16
6	Час наростання	T_R	6.39	0.31	0.133	7.2

У межах проведеного дослідження було встановлено, що регулятор, отриманий за допомогою гібридного методу, який об'єднує генетичний алгоритм та нейронні мережі, продемонстрував найкращі результати серед усіх протестованих методів налаштування ПІ-регуляторів для системи управління паперовою машиною.

Гібридний підхід дозволив не лише досягти оптимального налаштування параметрів, але й забезпечив високу адаптивність та точність регулювання в динамічному виробничому середовищі.

Таблиця 3.2

Оцінки якості 2-го каналу управління

№	Оцінювання якості		Система	ZN №2	ГА	НМ
1	Час регулювання	T_{set}	9.9 с	42	165 с	40
2	Перерегулювання	P_{ov}	–	16.4%	13.7%	11.6%
3	Усталена помилка	e_{ss}	0.21	→ 0	→ 0	→ 0
4	Коливальність	μ	–	0	0	0
5	Степінь стійкості	μ	0.02	0.08	0.02	0.07
6	Час наростання	T_R	4.6	8.3	45	8.6

Аналізуючи оцінки якості, доцільним є використання ПІ-регулятора, синтезованого методом генетичного аналізу. Хоча час регулювання помітно збільшився, очевидною перевагою стало те, що усталена помилка дорівнює нулю в обох випадках побудови регулятора. Крім того, вдалося усунути перерегулювання. Водночас суттєвим недоліком є те, що ступінь стійкості значно наблизилася до межі стійкості порівняно з вихідною системою.

Порівнюючи три регулятори — отримані методом генетичного алгоритму (ГА), методом Ціглера–Ніколса (ZN №2) та гібридним методом GA+NN — за показниками найкращим виявився регулятор, отриманий гібридним алгоритмом.

Застосування генетичного алгоритму на початковому етапі дозволило швидко звужити область пошуку та визначити відповідні діапазони параметрів регуляторів, тоді як нейронні мережі використовувалися для детального налаштування та адаптації параметрів до конкретних умов процесу. Це поєднання підходів значно прискорило процес оптимізації та підвищило його ефективність порівняно з традиційними методами, які часто потребують значних часових витрат і не завжди здатні адекватно реагувати на зміни в умовах процесу.

Порівняємо також запаси стійкості за амплітудою та фазою відповідно до таблиці 3.3 і таблиці 3.4.

Таблиця 3.3

Запаси стійкості системи та регуляторів

Показник стійкості	Базова система	GA-регулятор	GA + NN регулятор	Метод ZN №2
Gm (запас за амплітудою)	∞	∞	∞	∞
Pm (запас за фазою)	∞	178,27°	178,27°	119,94°

Таблиця 3.4

Запаси стійкості системи та регуляторів порівнюючи запаси

Показник стійкості	Базова система	GA-регулятор	GA + NN регулятор	Метод ZN №2
Gm (амплітудний запас)	∞	∞	∞	∞
Pm (фазовий запас)	∞	174,08°	179,33°	178,46°

Стійкості двох регуляторів, запас стійкості за амплітудою в методі генетичного алгоритму знаходиться в межах допустимих значень, як і запас за фазою.

Висновки до розділу 3

У розділі сформульовано задачу синтезу оптимальних регуляторів для системи керування та обґрунтовано доцільність використання нейронних мереж для оптимізації параметрів ПІ-регуляторів. Запропонований підхід дозволяє забезпечити адаптивне налаштування коефіцієнтів регуляторів з урахуванням динаміки об'єкта керування та вимог до якості перехідних процесів. Отримані результати підтверджують ефективність використання методів інтелектуальної оптимізації в автоматизованих системах керування.

РОЗДІЛ 4

СИНТЕЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ У ПРОСТОРИ СТАНІВ

4.1. Отримання математичної моделі у просторі станів у формі Жордана

Задані диференціальні рівняння, що описують двовимірну математичну модель об'єкта управління (W – передавальні функції (4.1), (4.2), (4.3), (4.4), які їм відповідають).

Передавальні функції об'єкта управління ПРМ мають вигляд:

$$W_{11}(p) = \frac{3.868}{p+6.092}; \quad (4.1)$$

$$W_{12}(p) = \frac{0.003842}{p+0.0219}; \quad (4.2)$$

$$W_{21}(p) = \frac{0.2669}{p+0.07414}; \quad (4.3)$$

$$W_{22}(p) = \frac{0.01622}{p+0.01803}. \quad (4.4)$$

Де u_1 – потік сировини, u_2 – температура поверхні робочого циліндра, y_1 – вологість паперу, y_2 – щільність паперу.

Таким чином, $W_{11}(p)$, $W_{12}(p)$, $W_{21}(p)$ і $W_{22}(p)$ характеризують взаємозв'язок між вхідними (u_1, u_2) та вихідними (y_1, y_2) змінними процесів паперового виробництва в межах розглянутої МІМО-системи.

1. Необхідно отримати вирази для характеристичних поліномів, відповідних кожному рівнянню; полюси; передавальні функції; параметри моделі простору станів:

$$\begin{array}{ll} p_1 = -6.092 & b_1 = 3.868 & . \\ p_2 = -0.0219 & b_2 = 0.003842 & . \\ p_3 = -0.07414 & b_3 = 0.2669 & . \\ p_4 = -0.01803 & b_4 = 0.01622 & . \end{array}$$

1. Отримати передавальну функцію багатовимірної системи управління та математичну модель у просторі станів у канонічній форм [11] (4.5):

$$W(s) = \begin{vmatrix} W_{11}(p) & W_{12}(p) \\ W_{21}(p) & W_{22}(p) \end{vmatrix} \quad (4.5)$$

2. По передавальній функції багатовимірної системи отримати математичну модель у просторі станів у канонічній формі:

$$\dot{x}_1(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (4.6)$$

$$y(t) = Cx(t)$$

$$W(p) = \frac{y(p)}{u(p)} = \frac{Q(p)}{R(p)} \quad (4.7)$$

$$y(p) = \begin{vmatrix} y_1(p) \\ y_2(p) \\ y_3(p) \end{vmatrix} = W(p) \cdot u(p), u(p) = \begin{vmatrix} u_1 \\ u_2 \end{vmatrix} \quad (4.8)$$

Отримуємо значення y_1, y_2 відповідно (4.9) та (4.10)

$$\begin{vmatrix} y_1 \\ y_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} W_{11}(p) \cdot u_1(p) + G_{12}(p) \cdot u_2(p) \\ W_{21}(p) \cdot u_1(p) + G_{22}(p) \cdot u_2(p) \end{vmatrix} \quad (4.9)$$

$$\begin{aligned} y_1 &= W_{11}(p) \cdot u_1(p) + W_{12}(p) \cdot u_2(p) \\ y_2 &= W_{21}(p) \cdot u_1(p) + W_{22}(p) \cdot u_2(p) \end{aligned} \quad (4.10)$$

Таким чином, отримуємо систему з двох рівнянь (4.11):

$$\begin{cases} y_1 = x_1 + x_2 \\ y_2 = x_3 + x_4 \end{cases} \quad (4.11)$$

4. Підставляючи передавальні функції та змінні стану:

$$\begin{cases} y_1 = W_{11}(p) \cdot u_1(p) + W_{12}(p) \cdot u_2(p) = \frac{3.868}{p + 6.092} u_1(p) + \frac{0.003842}{p + 0.0219} u_2(p) \\ y_2 = W_{21}(p) \cdot u_1(p) + W_{22}(p) \cdot u_2(p) = \frac{0.2669}{p + 0.07414} u_1(p) + \frac{0.01622}{p + 0.01803} u_2(p) \end{cases}$$

$$\begin{cases} x_1(p) = \frac{3.868 \cdot u_1(p)}{p+6.092} \\ x_2(p) = \frac{0.003842 \cdot u_2(p)}{p+0.0219} \\ x_3(p) = \frac{0.2669 \cdot u_1(p)}{p+0.07414} \\ x_4(p) = \frac{0.01622 \cdot u_2(p)}{p+0.01803} \end{cases} \Rightarrow \quad (4.12)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = -6.092x_1(t) + 3.868 \cdot u_1(t) \\ \dot{x}_2(t) = -0.0219x_2(t) + 0.003842 \cdot u_2(t) \\ \dot{x}_3(t) = -0.07414x_3(t) + 0.2669 \cdot u_1(t) \\ \dot{x}_4(t) = -0.01803x_4(t) + 0.01622 \cdot u_2(t) \\ y_1 = x_1 + x_2 \\ y_2 = x_3 + x_4 \end{cases} \quad (4.13)$$

Створимо модель за допомогою інструментарію MATLAB, результат представлений на рисунку 4.1.

```

sys =
A =
      x1      x2      x3      x4
x1  -6.092      0      0      0
x2      0  -0.0219      0      0
x3      0      0  -0.07414      0
x4      0      0      0  -0.01803

B =
      u1      u2
x1   3.868      0
x2      0  0.003842
x3   0.2669      0
x4      0  0.01622

C =
      x1  x2  x3  x4
y1   1   1   0   0
y2   0   0   1   1

D =
      u1  u2
y1   0   0
y2   0   0

Continuous-time state-space model.

```

Рис. 4.1. Перехід із системи простору станів в операторну форму

В результаті отримали задані передавальні функції об'єкта управління, згідно з рисунком 4.2.

```
>> G=tf(sys)

G =

From input 1 to output...
      3.868
  1:  -----
      s + 6.092

      0.2669
  2:  -----
      s + 0.07414

From input 2 to output...
      0.003842
  1:  -----
      s + 0.0219

      0.01622
  2:  -----
      s + 0.01803

Continuous-time transfer function.
```

Рис. 4.2. Операторна форма із системи простору станів

Отримаємо результати моделювання за моделями в операторній формі та у просторі станів у Simulink, що відповідає рисунку 4.3.

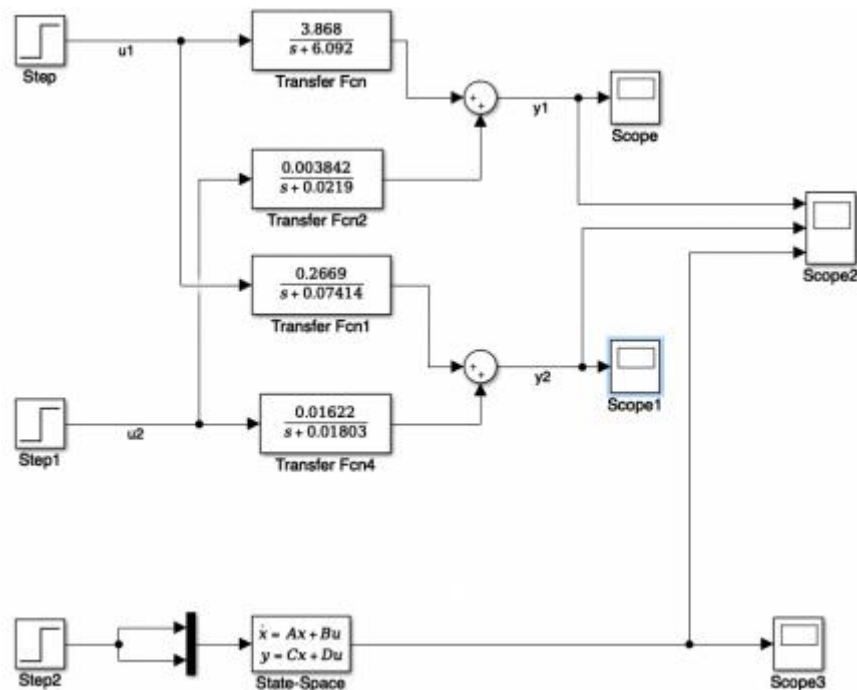


Рис.4.3. Моделювання системи простору станів

Згідно з графіком перехідних процесів (рисунок 4.4), видно, що графіки перехідних процесів збігаються, а саме перехідні процеси операторної форми та простору станів.

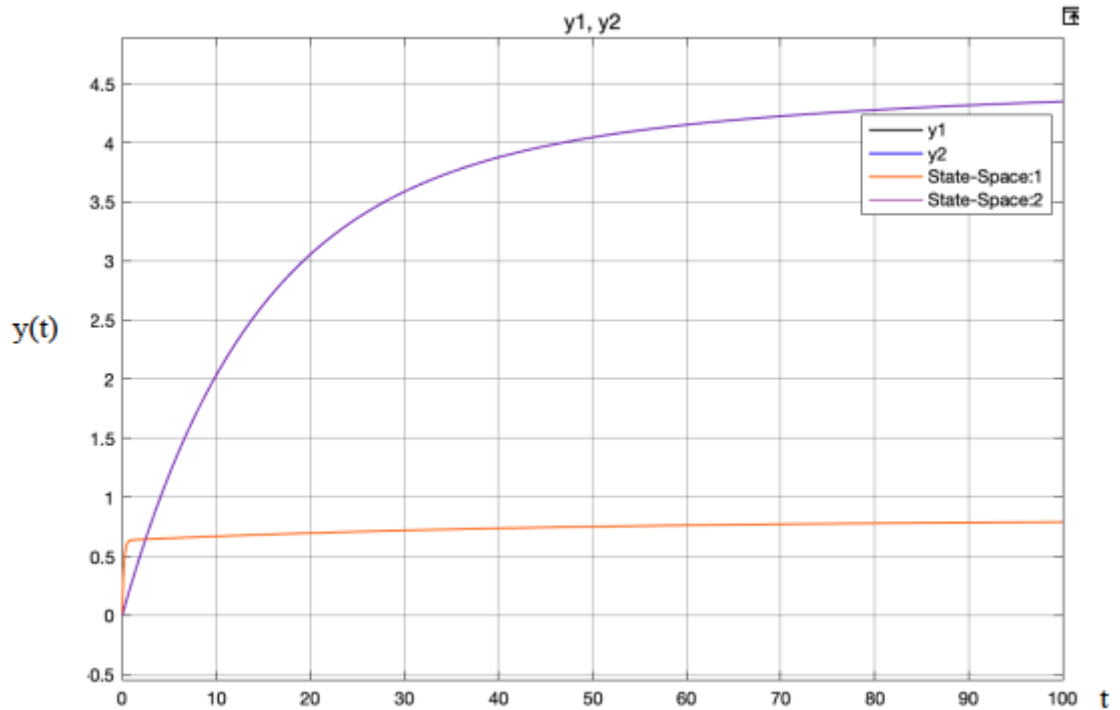


Рис. 4.4. Перехідні процеси операторної та канонічної форми

4.2. Синтез модального регулятора

У системах автоматичного керування часто виникає потреба змінити динаміку об'єкта так, щоб він поведився саме так, як вимагає технологічний процес: швидше реагував, менше колювався, швидко повертався до рівноваги після збурення. Одним із найбільш прозорих та елегантних методів досягнення цього є метод модального управління, або метод розміщення власних значень.

Суть цього методу можна пояснити так: кожна лінійна динамічна система має певні внутрішні «моди» — її власні значення, або полюси. Вони визначають, як швидко затухають коливання, як реагує система на зовнішній вплив, чи буде вона стабільною. Якщо ці полюси розташовані не там, де хотілося б, ми можемо «перенести» їх в інші точки комплексної площини, змінивши закон керування. Саме цим і займається модальний регулятор.

Щоб побудувати такий регулятор, об'єкт описують у просторі станів. У нашому випадку береться двовимірний математична модель, яку подано у формі Жордана. Така форма зручна тим, що чітко показує структуру власних значень,

особливо якщо вони повторюються. У цій формі матриця станів складається з так званих жорданових блоків, що дозволяє легко аналізувати поведінку системи й визначати вплив керуючого сигналу на кожен координату стану.

Далі вводиться ідея зворотного зв'язку за станом. Уявімо, що ми можемо вимірювати всі внутрішні змінні системи — наприклад, положення, швидкість чи інші фізичні параметри. Тоді можна сформувати керуючий сигнал як лінійну комбінацію станів. Це виглядає як:

$$u(t) = -Kx(t) \quad (4.14)$$

де K — вектор коефіцієнтів регулятора, який ми ще маємо визначити. Після введення такого керування система перетворюється: її матриця станів змінюється з A на $A - BK$. Саме ця нова матриця визначає динаміку вже замкненої системи.

Особливо цікавою є ситуація, коли матриця (A) подана у формі Жордана з повторними власними значеннями. Така структура показує, що система потенційно має внутрішній зв'язок між станами, який не завжди легко змінити. Проте за умови повної керованості зворотній зв'язок дає змогу «розірвати» небажані моди та перемістити всі полюси у потрібні точки.

Завдяки цьому метод модального регулювання стає дуже потужним інструментом: він дозволяє не просто покращити поведінку системи, а цілеспрямовано задати її динаміку, спроектувати потрібний характер перехідного процесу й отримати якість керування, яка повністю відповідає технічним вимогам.

Виконаємо перевірку керованості в середовищі MATLAB (рис. 4.5.)

```

>> A=[-6.092 0 0 0; 0 -0.0219 0 0; 0 0 -0.07414 0; 0 0 0 -0.01803]
B=[3.868 0; 0 0.003842; 0.2669 0; 0 0.01622]
C=[1 1 0 0; 0 0 1 1]
D=[0 0; 0 0]
Qy=[B A+B A^2+B A^3+B]
r1=rank(Qy)

A =
   -6.0920         0         0         0
         0   -0.0219         0         0
         0         0   -0.0741         0
         0         0         0   -0.0180

B =
   3.8680         0
         0   0.0038
   0.2669         0
         0   0.0162

C =
    1    1    0    0
    0    0    1    1

D =
    0    0
    0    0

Qy =
   3.8680         0  -23.5639         0  143.5510         0  -874.5128         0
         0   0.0038         0  -0.0001         0   0.0000         0  -0.0000
   0.2669         0  -0.0198         0   0.0015         0  -0.0001         0
         0   0.0162         0  -0.0003         0   0.0000         0  -0.0000

r1 =
    4

```

Рис. 4.5. Перевірка керованості в MATLAB

$$u(t) = -Fx(t) \quad (4.15)$$

Бажана динаміка визначається розрахунком необхідного ступеня стійкості $\eta = 10$, тому корені характеристичного полінома замкнутої системи можна вибрати наступні:

$$s_{1ж} = -11, s_{2ж} = -12, s_{3ж} = -13, s_{4ж} = -14; \quad (4.16)$$

Для розв'язку необхідно визначити матрицю глибини зворотних зв'язків q :

$$q = \begin{vmatrix} 0.1 \\ 0.1 \end{vmatrix} \quad (4.17)$$

Для розрахунку коефіцієнтів характеристичних рівнянь для розімкнутої та замкнутої системи:

$$\det(sI - A) = s^4 + a_1s^3 + a_2s^2 + a_3s + a_4 \quad (4.18)$$

$$= s^4 + 6.2061s^3 + 0.6983s^2 + 0.0205s + 0.0002 \quad (4.19)$$

Характеристичний поліном (4.34) для замкнутої системи управління, за теоремою Бозе, з коренями $s_{1ж} = -11, s_{2ж} = -12, s_{3ж} = -13, s_{4ж} = -14$

$$\det(sl - D = s^2 + c_1s^3 + c_2s^2 + c_3s + c_4 = (s - s_1)(s - s_2)(s - s_3)(s - s_4) = s^4 + 50s^3 + 935s^2 + 7750s + 24024 \quad (4.20)$$

Формування допоміжного вектора (4.21):

$$d = k - b = \begin{vmatrix} k_4 \\ k_3 \\ k_2 \\ k_1 \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} b_4 \\ b_3 \\ b_2 \\ b_1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 24023.99 \\ 7749.97 \\ 934.3 \\ 43.7939 \end{vmatrix} \quad (4.21)$$

Формування матриці H_2 (4.22):

$$\begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ b_1 & 1 & 0 & 0 \\ b_2 & b_1 & 1 & 0 \\ b_3 & b_2 & b_1 & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 6.2 & 1 & 0 & 0 \\ 0.6 & 6.2 & 1 & 0 \\ 0.02 & 0.6 & 6.2 & 1 \end{vmatrix} \quad (4.22)$$

Визначення елементів вектора налаштовуваних параметрів (4.23):

$$k = Q^{-1}d = \begin{vmatrix} -18.45 \\ -5.05 \cdot 10^{10} \\ 0.005 \cdot 10^{10} \\ 1.1165 \cdot 10^{10} \end{vmatrix} \quad (4.23)$$

Матриця налаштовуваних параметрів для багатовимірного регулятора:

$$F = q \cdot k^T = \begin{vmatrix} 0.1 \\ 0.1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} -18.45 \\ -5.05 \cdot 10^{10} \\ 0.005 \cdot 10^{10} \\ 1.1165 \cdot 10^{10} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & -5.0595 \cdot 10^9 & 0.005 \cdot 10^9 & 1.1165 \cdot 10^9 \\ 0 & -5.0595 \cdot 10^9 & 0.005 \cdot 10^9 & 1.1165 \cdot 10^9 \end{vmatrix}$$

Створення модального регулятора проведено за допомогою MATLAB, результати представлені на рисунках 4.6 та 4.7.

```

>> q=[0.1; 0.1]
b=B*q
q =
    0.1000
    0.1000
b =
    0.3868
    0.0004
    0.0267
    0.0016
>> H1=[A+A*b A^2+b A+b]
a=poly(A)
r=[-11; -12; -13; -14]
c=poly(r)
c-a
vpa(ans)
H1 =
   -07.4513   14.3551   -2.3564    0.3868
   -0.0000    0.0000   -0.0000    0.0004
   -0.0000    0.0001   -0.0020    0.0267
   -0.0000    0.0000   -0.0000    0.0016
a =
    1.0000    6.2061    0.6983    0.0205    0.0002
r =
   -11
   -12
   -13
   -14

```

```

      1      50      935      7750      24024
ans =
  1.0e+04 *
      0      0.0044      0.0934      0.7750      2.4024
ans =
[ 0, 43.793930000000003133209247607738, 934.30173029200001628649108205
>> d=[24823.999821658540895441547036171; 7749.979530437519315455574542
H2=[1 0 0 0; 6.2061 1 0 0; 0.6983 6.2061 1 0; 0.0205 0.6983 6.2061 1]
d =
  1.0e+04 *
      2.4024
      0.7750
      0.0934
      0.0044
H2 =
    1.0000     0     0     0
    6.2061    1.0000     0     0
    0.6983    6.2061    1.0000     0
    0.0205    0.6983    6.2061    1.0000
>> k=inv(Q)*d
Undefined function or variable 'Q'.
Did you mean:
>> Q=H2'*H1'
Q =
    0.0004    0.0000    0.0001    0.0000
    0.0012    0.0002    0.0065    0.0010
    0.0441    0.0024    0.1637    0.0100
    0.3868    0.0004    0.0267    0.0016

```

Рис. 4.6. Отримання модального регулятора в MATLAB

```

>> k=inv(Q)*d
k =
  1.0e+10 *
   -0.0000
  -5.0595
   0.0050
   1.1165
>> F=q*k'
F =
  1.0e+09 *
   -0.0000   -5.0595   0.0050   1.1165
   -0.0000   -5.0595   0.0050   1.1165
>> vpa(k)
ans =
-18.456676411700030371321190614253
-50594660377.11144256591796875
49818465.737909302115440368652344
11164528113.017169952392578125
>> poly(A-b*k')
ans =
  1.0e+04 *
      0.0001    0.0050    0.0935    0.7751    2.4024
>> vpa (ans)
ans =
[ 1.0, 49.999999994081676391033397521824, 935.16879788787787219916936010122, 7751.0277521753705514129251;

```

Рис. 4.7. Отримання модального регулятора в MATLAB

Синтезований модальний регулятор дав позитивні результати: регулятор ефективно керує системою, мінімізуючи помилки та забезпечуючи бажану поведінку системи.

Недолік: спостерігається велике перерегулювання системи, що не є нормативним, проте це зменшило час регулювання.

Результати моделювання системи з регулятором та без регулятора представлені на графіках рисунків 4.8–4.10 для невимушеного руху.



Рис. 4.8. Моделювання невимушеного руху

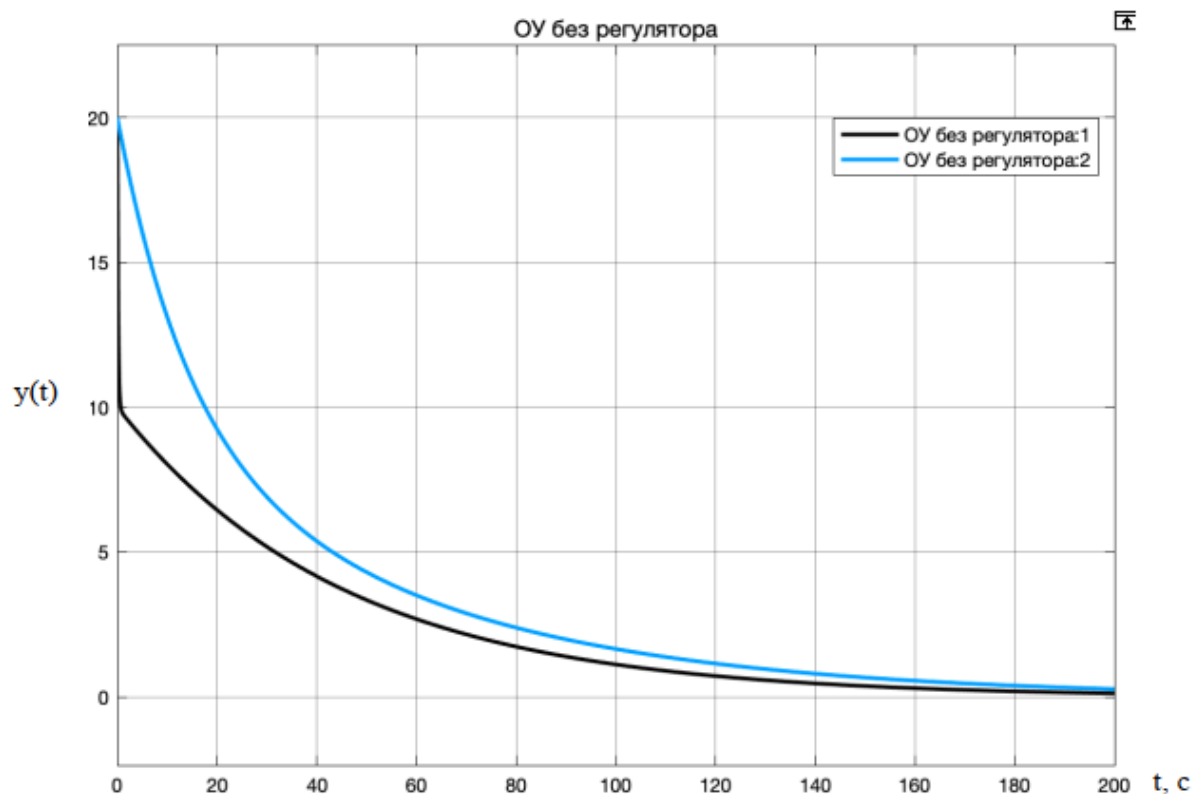


Рис.4.9. Графіки невимушеного руху без регулятора

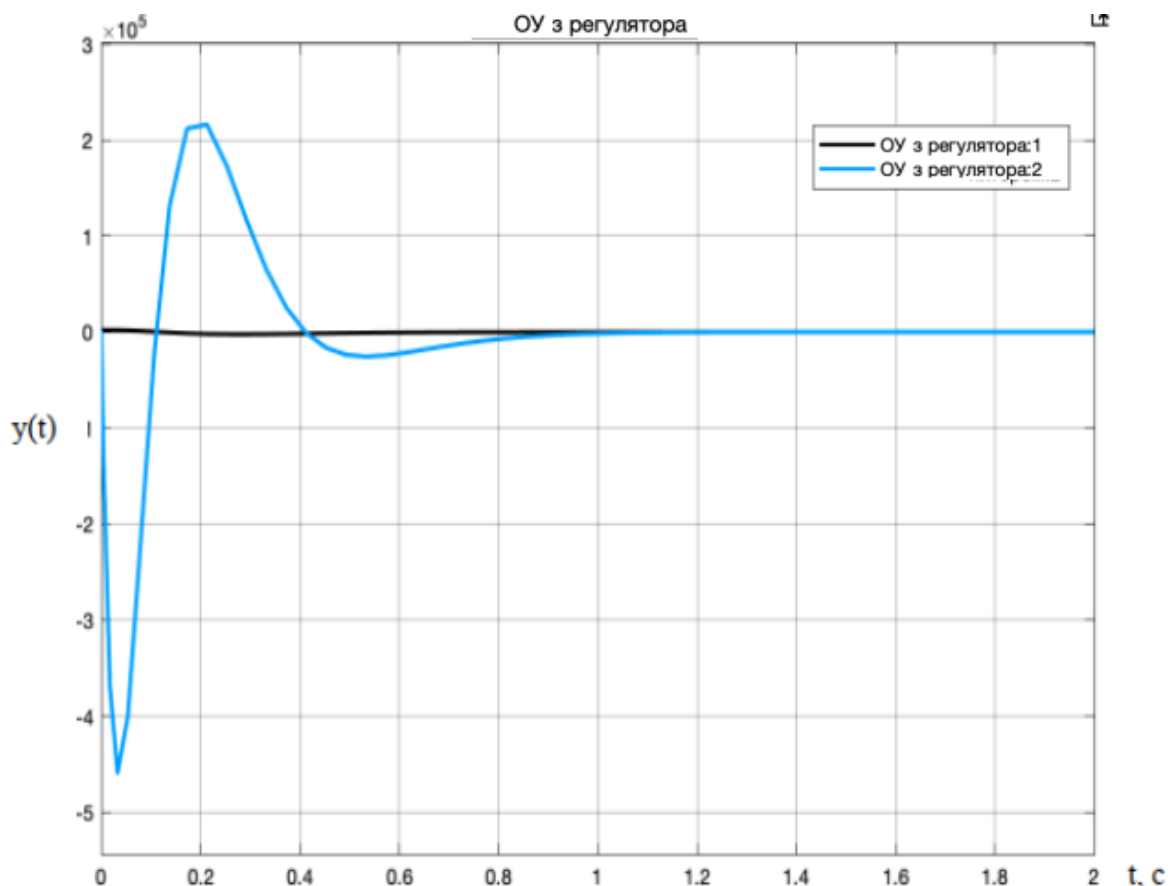


Рис. 4.10. Графіки невимушеного руху з регулятором

4.4. Передбачувальне управління (MPC) процесів папероробної машини

Паперова промисловість відіграє важливу роль у соціально-економічній структурі багатьох країн, забезпечуючи суттєві можливості для розвитку та стабільності. Однак, незважаючи на її значущість, цей сектор стикається з рядом проблем, пов'язаних із ефективністю та точністю, що підкреслює необхідність застосування більш сучасних систем управління.

Актуальність впровадження автоматизованих МІМО-систем та методу передбачувального управління (Model Predictive Control, MPC) для оптимізації процесів у паперовому виробництві стає дедалі очевиднішою. Ці технології обіцяють значне покращення характеристик системи, забезпечуючи гнучкість та адаптивність, необхідні для сучасного виробництва.

Застосування методів передбачувального управління може вирішити низку проблем, таких як неефективність і неточність традиційних систем управління, складність координації кількох систем і відсутність швидкої корекції виробничих процесів. Дослідження цих аспектів надасть цінні дані та напрямки для подальшого розвитку та впровадження автоматизованих систем управління у паперове виробництво.

Об'єктом управління є папероробна машина (ПРМ). Цей об'єкт являє собою складну багатовимірну та взаємопов'язану систему Multi Input Multi Output (МІМО), що робить його оптимальним для аналізу можливостей передбачувального управління.

Застосування методу прогнозного управління (МРС) у цій системі спрямоване на створення моделі, здатної прогнозувати майбутні стани процесу на основі поточних даних та зовнішніх впливів. Це дозволяє оперативно коригувати вхідні параметри у відповідь на зміни зовнішніх умов та вимог до продукції, забезпечуючи стабільність і оптимізацію виробничого процесу.

Відомо математичну модель ПРМ, отриману на основі структурної та параметричної ідентифікації, де вхідними параметрами є швидкість потоку сировини та температура в циліндрі. Ці змінні безпосередньо впливають на ключові характеристики кінцевого продукту, такі як вологість і товщина паперу, що є вихідними параметрами системи.

На основі ідеї статичного діагонального розв'язування (Static Diagonal Decoupling) було отримано розрахункове управління об'єкта, де структурна схема розв'язуючого управління представлена на рисунку 4.11.

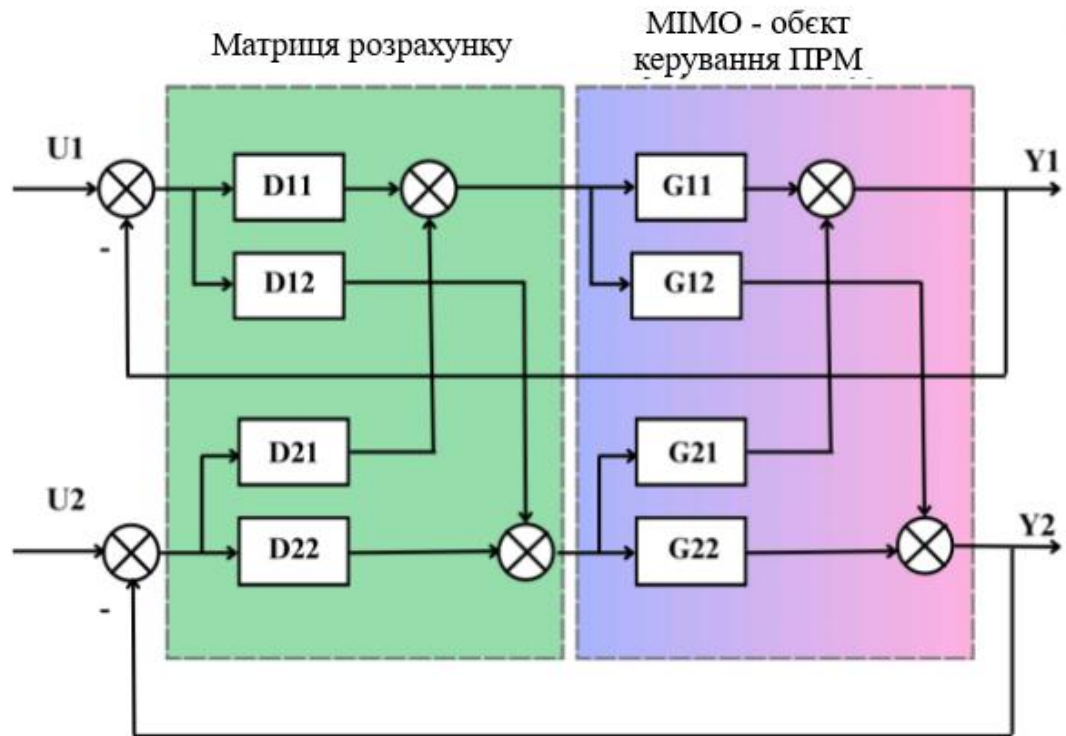


Рис. 4.11. Структурна схема розрахункового управління папероробною машиною

Розглядаючи застосування передбачувального управління для цієї системи:

Передбачувальне управління (Model Predictive Control, MPC) — це вид управління, при якому майбутня поведінка системи прогнозується на основі математичної моделі та поточних вимірювань. Потім оптимізується керуючий вплив так, щоб мінімізувати різницю між прогнозованими та бажаними вихідними значеннями системи протягом визначеного горизонту прогнозу.

Перетворення системи у форму простору станів (state-space) є ключовим етапом у процесі розробки контролера із застосуванням методу прогнозного управління (MPC).

Форма простору станів дозволяє ефективно моделювати динаміку системи, описуючи, як система переходить із одного стану в інший під впливом керуючих сигналів. Це особливо важливо для MPC, де необхідно прогнозувати майбутню поведінку системи.

Метод простору станів добре підходить для роботи з багатовимірними системами, де є кілька входів та виходів. Це робить його зручним для застосування в MPC, який часто використовується для управління складними системами.

Модельне передбачувальне управління (MPC) базується на оптимізації вхідних сигналів системи з метою мінімізації цільової функції. Ця функція представляє собою суму квадратів відхилень вихідних величин від їхніх бажаних значень та змін керуючих впливів (4.24):

$$J = \sum_{k=1}^{N_p} (y(k) - r(k))^2 + \sum_{k=0}^{N_u-1} \Delta u(k)^2 \quad (4.24)$$

де J — цільова функція, N_p — горизонт прогнозу, N_u — горизонт керування, $y(k)$ — вихід системи в момент часу k , $r(k)$ — бажане значення виходу, а $\Delta u(k)$ — зміна керуючого впливу.

У середовищі MATLAB для налаштування та аналізу MPC-контролера було використано `mpcDesigner`. Емпірично, на основі заданої математичної моделі паперової машини, описаної у формі простору станів, були вибрані значення горизонту прогнозу та горизонту керування:

$$N_p = 18; N_u = 5$$

В результаті оптимізації вдалося досягти збіжності вихідних сигналів MO1 та MO2 до бажаного значення, що наведено на рисунку 4.12.

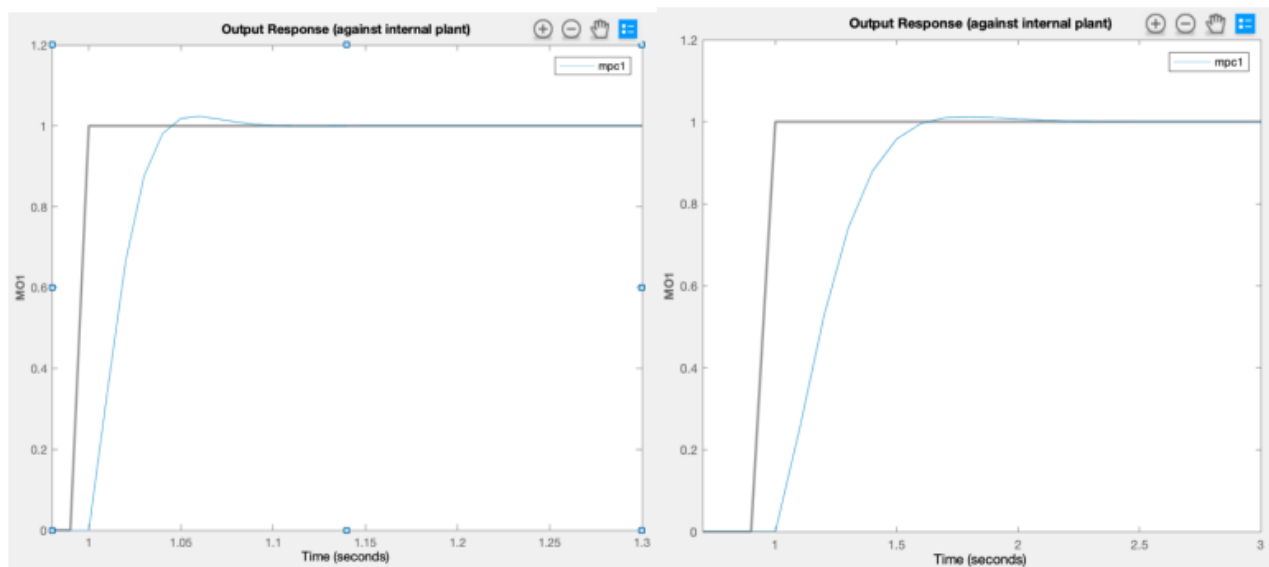


Рис. 4.12. Графік вихідного сигналу MO1 та MO2

Канал управління 1: Вхід – витрата сировини, вихід – вологість паперу (y_1). Цей канал описує вплив витрати сировини на вологість паперу.

Канал управління 2: Вхід – температура циліндра, вихід – щільність паперу (y_2). Цей канал описує вплив температури циліндра на щільність паперу.

За допомогою модельного передбачувального управління (MPC) та інструментів MATLAB вдалося ефективно керувати МІМО-системою та досягти збіжності вихідних сигналів до заданих значень.

За допомогою MPC Designer Toolbox була отримана модель предиктивного управління для двох контурів управління, що відповідає рисунку 4.13. На цьому рисунку представлені графіки вихідних сигналів MO1 та MO2. Голуба лінія на графіках показує реальні значення вихідних сигналів, а сіра лінія – бажані або цільові значення, до яких прагнуть сигнали.

Як видно з графіків, використання налаштованого MPC-контролера забезпечує успішну збіжність вихідних сигналів до заданих значень.

Результати демонструють, що застосування MPC-контролера значно покращує точність та стабільність системи. Система з контролером MPC швидше досягає усталеного стану та забезпечує більш точне слідування за заданим референтним сигналом. Це підкреслює переваги застосування предиктивного управління в сучасних системах для досягнення високої точності та надійності.

Графіки перехідних процесів системи з контролером і без нього підтверджують ці висновки, демонструючи підвищену точність при використанні контролера MPC.

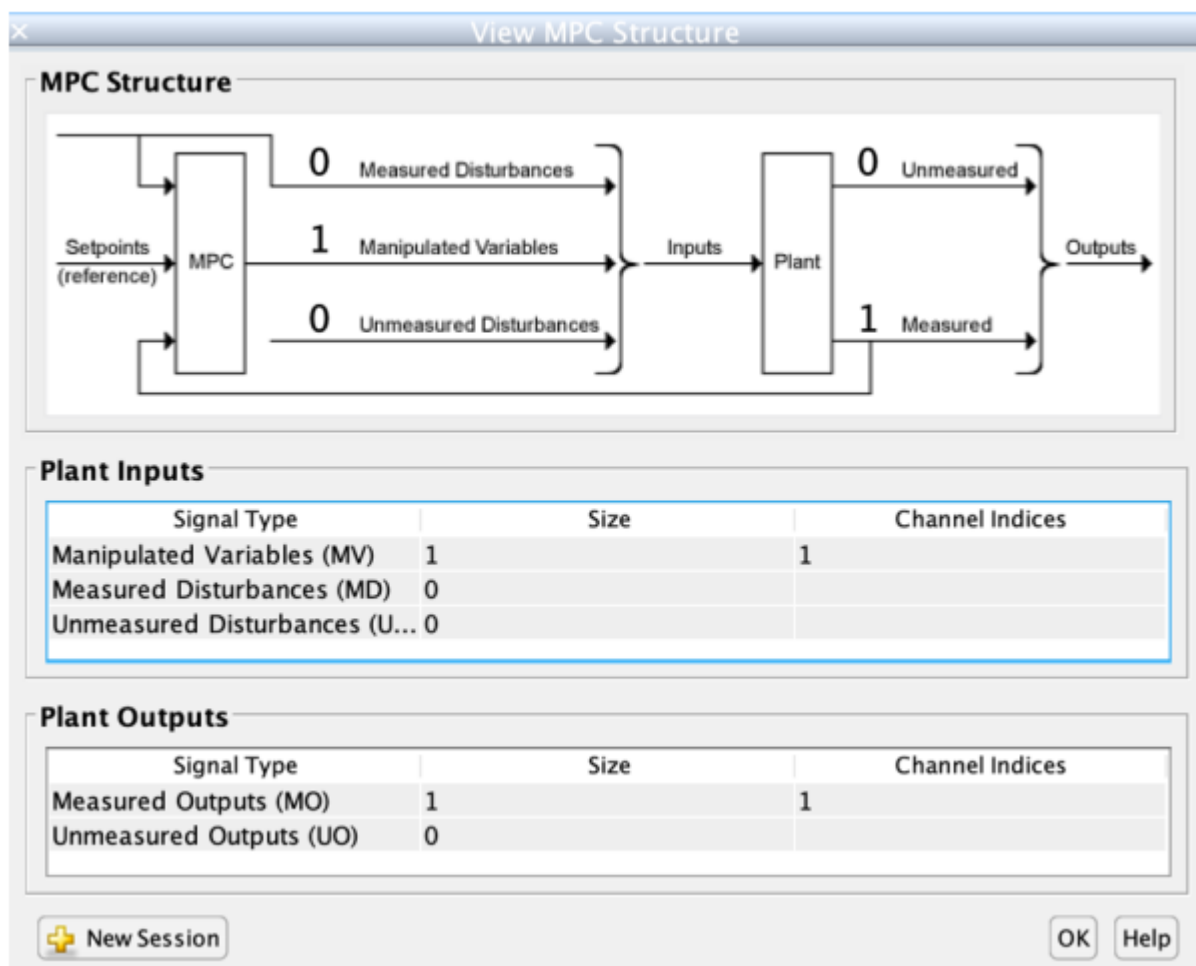


Рис. 4.13. Налаштування MPC за допомогою MPC Designer Toolbox

Висновки до розділу 4

У розділі отримано математичну модель об'єкта керування у просторі станів у формі Жордана та проведено її дослідження в середовищі MATLAB. На основі моделі виконано синтез модального регулятора, що забезпечує необхідні показники стійкості та швидкодії системи. Також реалізовано передбачувальне управління (MPC) для процесів папероробної машини, яке дозволяє підвищити точність керування та ефективність роботи системи в умовах багатозв'язності та змінних режимів.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У даній роботі розв'язано актуальну науково-практичну задачу розроблення автоматизованої системи керування процесом виготовлення паперу на основі сучасних МІМО-методів та інтелектуальних алгоритмів керування. Досягнута мета роботи підтверджується такими основними результатами:

Виконано аналіз технологічного процесу роботи папероробної машини та сучасних методів керування МІМО-об'єктами. Визначено основні стадії процесу, ключові вхідні та вихідні параметри, а також встановлено складний багатозв'язний характер об'єкта керування.

Проведено ідентифікацію папероробної машини як МІМО-об'єкта, розроблено розв'язувальний пристрій та побудовано математичну модель системи автоматичного регулювання. За результатами моделювання виконано оцінку якості системи, яка підтвердила її стійкість, достатню швидкодію та точність регулювання.

Сформульовано задачу синтезу оптимальних регуляторів та обґрунтовано застосування нейронних мереж для оптимізації параметрів ПІ-регуляторів. Отримані результати свідчать про ефективність інтелектуальних методів налаштування регуляторів у складних багатоканальних системах керування.

Отримано математичну модель об'єкта у просторі станів у формі Жордана, здійснено комп'ютерне моделювання в середовищі MATLAB та виконано синтез модального регулятора. Крім того, реалізовано передбачувальне керування (MPC), яке забезпечує покращення якості регулювання в умовах змінних режимів роботи папероробної машини.

Результати виконаної роботи підтверджують ефективність запропонованої автоматизованої системи керування та доцільність її використання для підвищення якості паперової продукції, зниження енергетичних витрат і підвищення стабільності технологічного процесу. Отримані наукові та практичні результати можуть бути використані при модернізації існуючих систем керування папероробних машин та в подальших наукових дослідженнях.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Інновації в автоматизації папероробних машин: прогнозування тенденцій у целюлозно-паперовій промисловості до 2025 року. Режим доступу: <https://ud-machine.com/uk/blog/paper-machine-automation-trends/>.
2. Автоматизація виробничих процесів целюлозно-паперового виробництва: Схеми автоматизації [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 133 «Галузеве машинобудування», спеціалізації «Інжиніринг, комп'ютерне моделювання та проектування обладнання целюлозно-паперового виробництва» / А. І. Жученко, М. С. Піргач, Я. Ю. Жураковський; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 146 с.
3. Жученко А. І. Автоматичне керування напірними ящиками паперої кортоноробних машин [Текст]: монографія/ А. І. Жученко, М. С. Піргач, М. З. Кваско. – К.: Бізнес Медіа Консалтинг, 2014. Бібліогр.: С. 215-229.
4. Жученко А. І. Математичні моделі цифрових систем керування [Текст]: навч. посіб. / А. І. Жученко. – К.: ІЗМН, 1997.–240 с.
5. Кваско М. З. Проектування і дослідження систем автоматичного керування технологічними процесами [Текст]: навч. посіб./ М. З. Кваско, М. С. Піргач, Т. В. Аверіна. – К.: ІВЦ "Видавництво «Політехніка»", 2003. – 360 с.
6. Кваско М. З. Математичне моделювання та ідентифікація одно- і багатовимірних систем [Текст]: навч. посіб./ М. З. Кваско, Л. Р. Ладієва, М. С. Піргач. – К.: НТУУ "КПІ", 2006. – 308 с.
7. Пиріг Я. , Климаш М. , Пиріг Ю., Лаврів О. Генетичний алгоритм як засіб розв'язання оптимізаційних задач *Information and communication technologies, electronic engineering*, Vol. 3, No. 2, 2023, pp. 95–107
8. Мартинова О. В. Генетичний алгоритм для розв'язання оптимізаційних задач / О. В. Мартинова, К. В. Степанова // Сучасні проблеми управління підприємствами: теорія та практика : матеріали міжнар. наук.-практ. конф., 18–19 бер. 2019 р. : тези допов. – Х., 2019. – С. 387 – 389.

9. Субботін С. О. Нейронні мережі : теорія та практика: навч. посіб. / С. О. Субботін. – Житомир : Вид. О. О. Євенок, 2020. – 184 с.

10. Теорія динамічних систем : навч. посіб. / В.В. Пічкур, О.В. Капустян, В.В. Собчук. – Луцьк : Вежа-Друк, 2020. – 348 с.

11. Escobar, C.; Vargas, F.J.; Peters, A.A.; Carvajal, G. A Cooperative Control Algorithm for Line and Predecessor Following Platoons Subject to Unreliable Distance Measurements. *Mathematics* 2023, 11, 801. <https://doi.org/10.3390/math11040801>.