

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені Ігоря Сікорського»
(повне найменування вищого навчального закладу)

ФАКУЛЬТЕТ АВТОМАТИЗАЦІЇ, ПРОМИСЛОВОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА
ЕКОЛОГІЇ
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра технічних та програмних засобів автоматизації
(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»
УДК 666.1.022.1

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
_____ Віталій ЦАПАР
« ____ » _____ 2025р

Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра

за освітньою програмою «Технічні та програмні засоби автоматизації»

з напрямку підготовки 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка

на тему: Автоматизація процесу виробництва картону

Виконав: студент 2 курсу, групи ЛК-42мп
(шифр групи)

Руденко Віктор Леонідович
(прізвище, ім'я, по-батькові) _____ (підпис)

Керівник проф. д.т.н. Жученко О.А.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) _____ (підпис)

Консультант _____
(назва розділу) (посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) _____ (підпис)

Рецензент _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) _____ (підпис)

Засвідчую, що в цьому дипломному
проекті немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань
Студент _____
(підпис)

Київ - 2025 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Факультет автоматизації, промислової інженерії та робототехніки
(повна назва)

Кафедра технічних та програмних засобів автоматизації
(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Напрямок підготовки 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка
(код і назва)

Освітньо-професійна програма «Технічні та програмні засоби автоматизації»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Віталій ЦАПАР
(підпис) (ініціали, прізвище)

«___» _____ 2025 р.

**ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту**

Руденко Віктор Леонідович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Автоматизація процесу виробництва картону

керівник проекту _____
проф., д.т.н. Жученко О.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «03» листопада 2025р. №4744-с.

2. Термін подання студентом дисертації _____

3. Об'єкт дослідження процес виробництва картону

4. Вихідні дані: Схема автоматизації; система керування яка має забезпечувати перерегулювання не більше 10%, час перехідного процесу не більше заданим регламентом меж; параметри які підлягають керуванню: вихідна температура паперу при виході з напірного ящика, витата пальног, витрата речовини на вході до напірного ящика

5. Перелік завдань, що потребують розробки: Дослідити процес отримання картону; розробка математичної моделі напірного ящика як технологічного об'єкту керування; спроектувати та дослідити систему керування напірним ящиком; розробка стартап проекту.

6. Орієнтовний перелік графічного(ілюстративного) матеріалу Графічні зображення об'єкту керування; схема процесу виробництва картону; перехідні характеристики об'єкту; зображення розробленої систем керування; графіки функцій, перехідні процеси системи керування.

7. Консультанти розділів дисертації*

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

8. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Ознайомлення з теоретичним матеріалом		
2	Створення математичної моделі об'єкта		
3	Синтез системи керування		
4	Дослідження нечіткої системи		
5	Проектування схеми автоматизації		
6	Створення стартап проекту		

Студент _____

Віктор РУДЕНКО

(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

Олексій ЖУЧЕНКО

(ініціали, прізвище)

* Консультантом не може бути зазначено керівника дипломного проекту.

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація записку об'ємом 67 сторінок, 31 рисуноків, 1 креслення і 21 літературних джерел.

Основною метою дисертації є розробка системи автоматичного контролю хіміко технологічного процесу виробництва картону, для забезпечення мінімізації використання людського ресурсу, а також підвищення ефективності отримання вихідного продукту та енергетичних ресурсів.

У дисертації розроблено схему автоматизації з технологічною сигналізацією та блокуванням технологічного процесу.

Одним з основних апаратів технологічної схеми є напірний ящик, для якого розроблені та досліджені математична модель, що предствляє собою матреіальний та теплового балансу, побудовано перехідну характеристику за каналом керування та збурення.

Проведено синтез системи керування з регулятором Хорнбостела, аналоговим ПД регулятором та каскадної системи керування. Представлено повний процес дослідження та порівняльний аналіз розроблених систем керування напірним ящиком.

Розроблено стартап проекту, що дозволив виявити економічну доцільність прийнятих технічних рішень, а також проведено аналіз ринку та прівняння із існуючими аналогами.

Ключові слова: напірний ящик, об'єкт керування, схема автоматизації, математична модель, тепловий баланс, передатна функція, перехідна характеристика, канал керування, регулятор Хорнбостела.

ABSTRACT

Master's thesis note with a volume of 67 pages, 31 figures, 1 drawing and 21 literary sources.

The main purpose of the dissertation is to develop a system for automatic control of the chemical and technological process of cardboard production, to ensure the minimization of the use of human resources, as well as increasing the efficiency of obtaining the initial product and energy resources.

The dissertation developed an automation scheme with technological signaling and blocking of the technological process.

One of the main devices of the technological scheme is a headbox, for which a mathematical model was developed and studied, representing a material and heat balance, a transient characteristic was built along the control and disturbance channel.

A synthesis of a control system with a Hornbostel regulator, an analog PID regulator and a cascade control system was carried out. The full research process and comparative analysis of the developed headbox control systems are presented.

A startup project was developed, which allowed to identify the economic feasibility of the adopted technical solutions, as well as a market analysis and comparison with existing analogues.

Keywords: pressure box, control object, automation scheme, mathematical model, heat balance, transfer function, transient response, control channel, Hornbostel regulator.

Вступ.....	8
1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА КАРТОНУ .	17
1.1 Загальна характеристика картоноробних машин	17
1.2 Опис основного устаткування плоскосіткової картоноробної машини...	17
1.3 Аналіз існуючих систем автоматичного керування процесом формування картонного полотна	18
1.4 Постановка задачі дослідження	Помилка! Закладку не визначено.
2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЧАСТИНИ ПЛОСКОСІТКОВОЇ КАРТОНОРОБНОЇ МАШИНИ	29
2.1 Система подачі маси на сітку	29
2.2 Статичні характеристики напірного ящика з повітряною подушкою....	26
2.3 Динамічні характеристики напірного ящика як об'єкта керування	28
3 РОЗРОБКА І ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ.....	41
3.1 Система автоматичного керування напірним ящиком закритого типу з регулятором Хорнбостела.....	35
3.2 Системи автоматичного керування напірним ящиком з аналоговим регулятором рівня маси і тиску повітряної подушки	43
3.3 Системи автоматичного керування напірним ящиком з аналоговим регулятором рівня маси і сумарного напору маси	46
3.4 Системи автоматичного керування напірним ящиком з аналоговими регуляторами тиску повітряної подушки і сумарного напору маси	41
4 РОЗРОБКА І ДОСЛІДЖЕННЯ НЕПЕРЕРВНО-ДИСКРЕТНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ КАРТОНОРОБНОЇ МАШИНИ	43
4.1 Склад системи автоматичного керування	43
4.2 Визначення дискретної передавальної функції регулятора сумарного напору маси без фільтрації вхідної змінної регулятора	43
4.3 Дослідження дискретної системи автоматичного керування і регулювання сумарним напором маси методом z-перетворення	50
5. АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ КЕРУВАННЯ КАРТОНОРОБНОЮ МАШИНОЮ.....	46
5.1 Постановка задачі на автоматизацію .	Помилка! Закладку не визначено.

5.2 Розробка системи автоматизації картоноробної машини..... **Помилка!**
Закладку не визначено.

6. СТАТИЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ ШВИДКОСТІ КАРТОНОРОБНОЇ МАШИНИ.....	54
6.1 Постановка проблеми.....	54
6.2 Розробка алгоритму керування	56
7. СТАРТАП ПРОЕКТУ	58
Висновок	64
Список літератури.....	66

Вступ

Целюлозно-паперова промисловість є однією з базових галузей промислового виробництва, що забезпечує потреби пакувальної, харчової, легкої та інших галузей економіки. Особливе місце в цій галузі займає виробництво картону, який широко використовується як пакувальний матеріал завдяки своїй міцності, екологічності та відносно низькій собівартості. Зростання обсягів виробництва товарів і розвиток логістичних систем зумовлюють постійне збільшення попиту на картонну продукцію різного призначення [1].

Сучасні умови функціонування промислових підприємств характеризуються високими вимогами до якості продукції, стабільності технологічних процесів, енергоефективності та екологічної безпеки. Водночас традиційні методи керування процесами виробництва картону, що значною мірою ґрунтуються на ручному або напівавтоматичному керуванні, не завжди забезпечують необхідну точність підтримання технологічних параметрів. Це призводить до перевитрат сировини та енергоресурсів, зниження якості готової продукції та збільшення виробничих втрат [1].

Актуальність автоматизації процесу виробництва картону обумовлена необхідністю підвищення конкурентоспроможності підприємств, зменшення впливу людського фактора та забезпечення стабільної роботи технологічного обладнання. Впровадження автоматизованих систем керування технологічними процесами (АСКТП) дозволяє здійснювати безперервний контроль основних параметрів виробництва, оперативно реагувати на відхилення від заданих режимів та оптимізувати роботу обладнання в реальному часі [1].

Процес виробництва картону є складним багатостадійним технологічним процесом, який включає підготовку волокнистої маси, формування картонного полотна, пресування, сушіння та намотування готової продукції. Кожен з цих етапів характеризується власними фізико-хімічними закономірностями та вимагає точного регулювання таких параметрів, як концентрація маси, температура, тиск, швидкість руху полотна та вологість. Недотримання

оптимальних режимів на будь-якому етапі може негативно вплинути на механічні властивості та якість готового картону [1].

Особливо важливим з точки зору автоматизації є процес сушіння картонного полотна, оскільки він відзначається значною інерційністю, нелінійністю та взаємозв'язком між температурними і вологісними параметрами. Це ускладнює процес керування і потребує застосування сучасних методів математичного моделювання та синтезу систем автоматичного регулювання. Саме тому розробка адекватних математичних моделей та ефективних алгоритмів керування є одним з ключових завдань автоматизації виробництва картону [1].

Розвиток мікропроцесорної техніки, програмованих логічних контролерів (PLC), промислових датчиків та SCADA-систем створює широкі можливості для побудови багаторівневих автоматизованих систем керування. Такі системи дозволяють не лише стабілізувати технологічні параметри, але й здійснювати моніторинг стану обладнання, збір і аналіз виробничих даних, а також реалізовувати функції оптимального керування та прогнозування [1].

У зв'язку з вищезазначеним, розробка автоматизованої системи керування процесом виробництва картону є актуальним науково-технічним завданням, що має важливе практичне значення для промисловості. Реалізація такого проекту дозволяє підвищити ефективність виробництва, покращити якість продукції та зменшити негативний вплив на навколишнє середовище [1].

Мета і завдання магістерської роботи

Метою магістерської роботи є розробка та дослідження автоматизованої системи керування процесом виробництва картону, яка забезпечує стабільність технологічних режимів, підвищення якості готової продукції та економічну ефективність виробництва.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити такі основні завдання [1]:

- проаналізувати технологічний процес виробництва картону та визначити основні параметри, що підлягають автоматичному керуванню;
- дослідити існуючі методи та системи автоматизації у целюлозно-паперовій промисловості;
- розробити математичну модель основних стадій процесу виробництва картону;

- виконати лінеаризацію моделі та визначити її динамічні характеристики;
- синтезувати систему автоматичного керування з використанням ПІД-регуляторів;
- виконати моделювання роботи системи керування та оцінити її ефективність;
- обґрунтувати вибір програмно-технічних засобів автоматизації;
- оцінити економічну доцільність впровадження запропонованої системи;
- розглянути питання охорони праці та екологічної безпеки.

Об'єкт і предмет дослідження

Об'єктом дослідження є технологічний процес виробництва картону на картоноробній машині [1].

Предметом дослідження є методи та засоби автоматичного керування основними технологічними параметрами процесу виробництва картону.

Методи дослідження

У магістерській роботі використовуються методи теорії автоматичного керування, математичного моделювання, лінеаризації нелінійних систем, а також методи комп'ютерного моделювання з використанням сучасних програмних засобів. Для аналізу економічної ефективності застосовуються методи техніко-економічних розрахунків [1].

Наукова новизна та практична цінність

Наукова новизна роботи полягає у розробці математичної моделі процесу виробництва картону та синтезі системи автоматичного керування, що забезпечує підвищену точність регулювання вологості та температури картонного полотна [1].

Практична цінність полягає у можливості використання отриманих результатів при проєктуванні та модернізації автоматизованих систем керування на підприємствах целюлозно-паперової промисловості [1].

Структура роботи

Магістерська робота складається зі вступу, восьми розділів, загальних висновків та списку використаних джерел. У роботі наведено рисунки, таблиці та математичні залежності, що ілюструють основні результати дослідження [1].

1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА КАРТОНУ

1.1 Загальна характеристика картоноробних машин

Принципову схему типової плоскіткової картоноробної машини з двома напірними ящиками показано на рис. 1.1

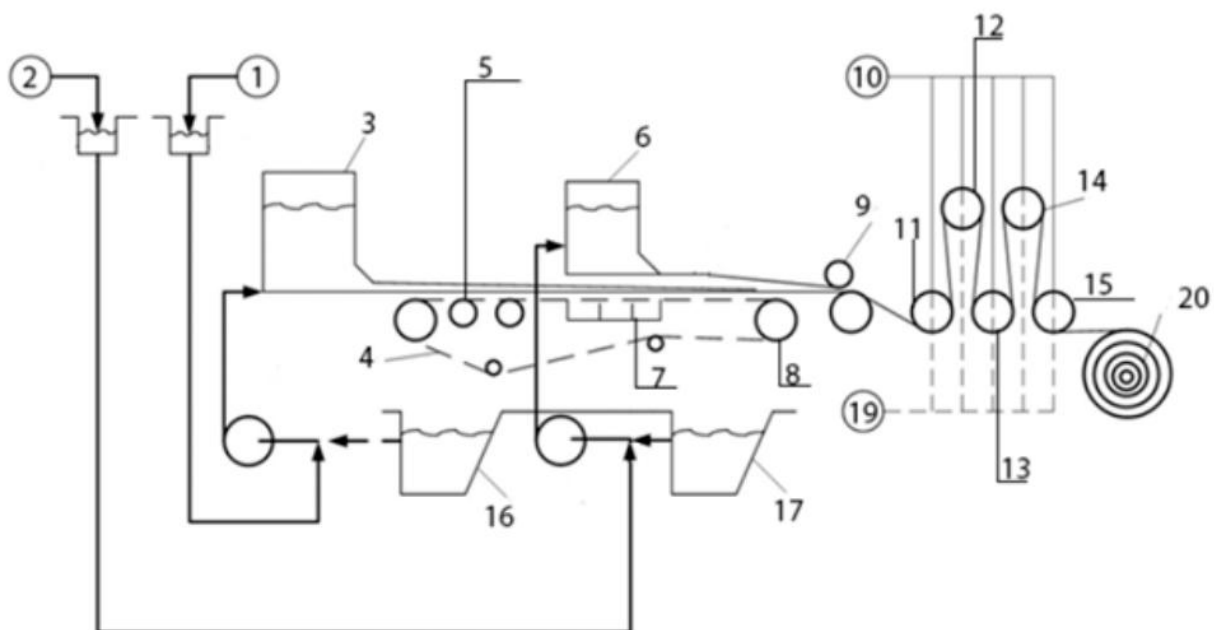


Рис.1.1 – Принципова схема типової плоскіткової картоноробної машини з двома напірними ящиками:

1 – трубопровід маси 1-го шару; 2 – трубопровід маси 2-го шару; 3 – перший напірний ящик; 4 – сітка; 5 – реєстрові валики; 6 – другий напірний ящик; 7 – відсмоктуючі ящики; 8 – гауч-вал; 9 – пресова частин; 10 – трубопровід пари; 11 – попередня сушильна група; 12 – перша сушильна група; 13 – друга сушильна група; 14 – третя сушильна група; 15 – четверта сушильна група; 16 – 18 – водовідділювачі; 19 – накат

Виробництво картону є важливою складовою целюлозно-паперової промисловості та відіграє ключову роль у забезпеченні потреб пакувальної індустрії, харчової промисловості, машинобудування та логістики. Картон широко застосовується завдяки своїм механічним властивостям, можливості вторинної переробки та відносно низькій собівартості. Сучасні тенденції розвитку ринку орієнтовані на зростання обсягів споживання екологічно

безпечних пакувальних матеріалів, що додатково підвищує попит на картонну продукцію [2].

Підприємства целюлозно-паперової промисловості працюють у жорстких конкурентних умовах, що зумовлює необхідність постійного вдосконалення технологій виробництва. Основними вимогами до сучасного виробництва картону є:

- стабільна якість продукції;
- мінімізація виробничих витрат;
- енергоефективність;
- зменшення негативного впливу на навколишнє середовище;
- автоматизація та цифровізація процесів.

Досягнення зазначених вимог неможливе без впровадження сучасних автоматизованих систем керування технологічними процесами.

Процес виробництва картону є складним безперервним багатостадійним процесом, що включає низку послідовних операцій. Типова технологічна схема картоноробної машини складається з таких основних етапів [3]:

1. Підготовка волокнистої маси
2. Формування картонного полотна
3. Пресування
4. Сушіння
5. Оздоблення та намотування

На кожному з цих етапів формуються певні якісні характеристики майбутнього картону, тому від точності підтримання технологічних параметрів залежить якість готової продукції.

На даному етапі здійснюється приготування волокнистої суспензії з целюлозної сировини, макулатури та допоміжних компонентів. Основними параметрами, що підлягають контролю та регулюванню, є [4]:

- концентрація волокон;
- витрата маси;
- температура;
- ступінь помелу.

Нестабільність концентрації волокнистої маси призводить до нерівномірної товщини картонного полотна, що негативно впливає на його механічні властивості.

Формування полотна відбувається на сітковій частині машини шляхом зневоднення волокнистої маси. У цьому процесі важливу роль відіграють:

- швидкість руху сітки;
- рівень вакууму;
- рівномірність подачі маси.

Автоматичне регулювання цих параметрів дозволяє забезпечити однорідність структури картону та запобігти дефектам поверхні [2].

На стадії пресування відбувається механічне видалення води з картонного полотна шляхом пропускання його між пресовими валами. Основними параметрами є:

- тиск у пресах;
- швидкість руху полотна;
- залишкова вологість.

Надмірний тиск може призвести до пошкодження структури картону, тоді як недостатній — до перевантаження сушильної частини.

Процес сушіння є одним з найбільш енергоємних і складних з точки зору керування. Він здійснюється за допомогою системи сушильних циліндрів, які нагріваються парою. Основними контрольованими параметрами є [2]:

- температура сушильних циліндрів;
- тиск пари;
- швидкість руху полотна;
- вологість картону.

Сушіння характеризується значною інерційністю та нелінійністю, що ускладнює процес автоматичного регулювання.

На завершальному етапі здійснюється намотування картону в рулони або різання на листи. Тут важливими параметрами є [2, 3]:

- натяг полотна;
- швидкість намотування;
- геометричні розміри рулонів.

Аналіз технологічного процесу дозволяє виділити ключові параметри, автоматичне керування якими є критично важливим для забезпечення якості картону:

- концентрація волокнистої маси;

- витрата сировини;
- температура сушильних елементів;
- тиск у пресовій та сушильній частинах;
- швидкість руху картонного полотна;
- вологість готового картону.

Взаємозв'язок між цими параметрами вимагає комплексного підходу до побудови системи автоматизації [2].

На багатьох підприємствах досі використовуються застарілі системи керування, що базуються на локальних регуляторах або ручному керуванні. Основними недоліками таких систем є:

- відсутність централізованого моніторингу;
- низька точність регулювання;
- обмежені можливості оптимізації;
- висока залежність від кваліфікації персоналу.

Сучасні системи автоматизації передбачають використання [2]:

- програмованих логічних контролерів (PLC);
- розподілених систем керування (DCS);
- SCADA-систем для візуалізації та збору даних;
- промислових мереж зв'язку.

Використання таких рішень дозволяє значно підвищити ефективність керування процесом.

Основними проблемами традиційних систем керування є:

- нестабільність технологічних режимів;
- збільшення кількості браку;
- перевитрати енергії та сировини;
- складність діагностики аварійних ситуацій.

В умовах зростання цін на енергоресурси ці недоліки стають критичними для економічної ефективності виробництва.

Автоматизація дозволяє [2]:

Впровадження АСКТП є стратегічно важливим напрямом розвитку сучасних картонних виробництв.

1.2 Опис основного устаткування плоскіткової картоноробної машини

Виробництво картону здійснюється на безперервних картоноробних машинах, які об'єднують у єдину технологічну лінію процеси підготовки волокнистої маси, формування полотна, зневоднення, сушіння та обробки готової продукції. Технологічна схема виробництва картону є складною багатоступеневою системою з тісним взаємозв'язком між окремими ділянками, що зумовлює підвищені вимоги до точності та надійності керування.

Типова технологічна лінія виробництва картону включає такі основні вузли:

- систему підготовки волокнистої маси;
- сіткову (формувальну) частину;
- пресову частину;
- сушильну частину;
- каландрувальну та намотувальну частини.

Кожен з перелічених вузлів має власні технологічні параметри, від яких залежить якість кінцевого продукту.

Волокниста маса для виробництва картону формується з целюлозної сировини, макулатури та різноманітних хімічних добавок. До основних характеристик маси належать [2]:

- концентрація волокон;
- в'язкість;
- температура;
- ступінь помелу.

Стабільність цих параметрів є необхідною умовою формування рівномірного картонного полотна.

Процес підготовки включає операції розпуску, очищення, рафінування та змішування. На цьому етапі здійснюється регулювання [2]:

- витрати волокнистої маси;
- концентрації суспензії;
- температури середовища.

Автоматизація даної ділянки дозволяє мінімізувати коливання параметрів та забезпечити стабільну подачу маси на формувальну частину.

Формування полотна відбувається на сітковій частині картоноробної машини, де волокниста маса рівномірно розподіляється по рухомій сітці. Внаслідок дії сили тяжіння та вакууму відбувається первинне зневоднення [2].

До ключових параметрів формування належать:

- швидкість руху сітки;
- рівень вакууму;
- витрата маси;
- товщина полотна.

Нерівномірність формування призводить до дефектів структури картону, тому автоматичне регулювання цих параметрів є критично важливим [3].

Система автоматизації повинна забезпечувати:

- стабільну товщину полотна;
- рівномірний розподіл волокон;
- компенсацію збурень, пов'язаних зі змінами властивостей сировини.

Пресова частина призначена для механічного видалення вологи з картонного полотна шляхом його проходження між пресовими валами. Основна мета пресування — зменшення вологості полотна перед сушінням та підвищення його міцності [2].

До основних параметрів належать:

- тиск у пресовій зоні;
- швидкість руху полотна;
- залишкова вологість.

Недостатній тиск призводить до перевантаження сушильної частини, тоді як надмірний може пошкодити структуру картону.

Автоматичне керування пресами дозволяє:

- підтримувати оптимальний тиск;
- забезпечувати стабільну вологість полотна;
- зменшувати механічні пошкодження.

Сушіння картонного полотна здійснюється за допомогою системи сушильних циліндрів, які нагріваються парою. Процес сушіння є найбільш енергоємним етапом виробництва та характеризується значною інерційністю.

Основними параметрами є [2]:

- температура сушильних циліндрів;
- тиск пари;
- швидкість руху полотна;
- вологість картону.

Ці параметри взаємопов'язані, що ускладнює процес керування.

Автоматизація сушильної частини повинна забезпечувати:

- стабільну кінцеву вологість картону;
- мінімальне енергоспоживання;
- рівномірне сушіння по ширині полотна.

На завершальних етапах виробництва здійснюється каландрування для покращення поверхневих властивостей картону та його намотування в рулони.

Контролю підлягають:

- тиск у каландрах;
- натяг полотна;
- швидкість намотування;
- геометричні параметри рулонів.

Автоматизація цих процесів забезпечує високу якість поверхні та точність геометричних розмірів [2].

На основі аналізу технологічного процесу доцільно автоматизувати такі параметри:

- концентрацію та витрату волокнистої маси;
- швидкість руху полотна;
- тиск у пресовій частині;
- температуру та тиск пари в сушильній частині;
- кінцеву вологість картону;
- натяг полотна при намотуванні.

Комплексне керування цими параметрами дозволяє забезпечити стабільну якість продукції.

Технологічні обмеження та вимоги до системи керування

Система автоматизації повинна враховувати:

- інерційність процесів;
- нелінійність характеристик;
- наявність збурень;
- вимоги до безпеки та надійності.

Керування має здійснюватися в реальному часі з можливістю оперативного втручання оператора [3].

У технологічному розділі детально розглянуто процес виробництва картону та визначено основні параметри, що підлягають автоматизації. Показано, що виробництво картону є складним багатопараметричним процесом, який потребує комплексного підходу до побудови автоматизованої системи керування. Отримані результати є основою для подальшого математичного моделювання та синтезу системи автоматичного керування [2].

1.3 Аналіз існуючих систем автоматичного керування процесом формування картонного полотна

Процес формування картонного полотна є одним із ключових етапів виробництва картону та безпосередньо впливає на його фізико-механічні властивості, такі як товщина, маса на одиницю площі, щільність, рівномірність структури, міцність та вологостійкість. Формування полотна відбувається на картоноробній машині та включає низку взаємопов'язаних підпроцесів: подачу волокнистої суспензії, розподіл маси по ширині сітки, зневоднення, первинне ущільнення та стабілізацію полотна [2].

Процес характеризується:

- багатовимірністю (наявність кількох взаємопов'язаних керуваних і збурювальних параметрів);
- значною інерційністю;
- нелінійністю;
- чутливістю до змін властивостей сировини (волокнистого складу, концентрації, температури);
- наявністю випадкових збурень.

У зв'язку з цим ефективне автоматичне керування є необхідною умовою забезпечення стабільної якості готового картону [3].

Основні параметри, що підлягають автоматичному керуванню

У сучасних системах автоматичного керування (САК) процесом формування картонного полотна основну увагу приділяють таким параметрам:

- Маса полотна (г/м^2) – один із найважливіших показників якості;
- Товщина полотна;
- Вологість полотна на виході з формувальної частини;
- Рівномірність розподілу маси по ширині полотна;
- Швидкість руху сітки;

- Витрата волокнистої суспензії;
- Концентрація маси.

Керуючими впливами зазвичай є положення регулювальних клапанів, швидкість насосів, положення напускної щілини, тиск у вакуумних ящиках та параметри приводу сіткової частини [2].

Класичні системи автоматичного керування

Системи на основі ПІ та ПІД-регуляторів

Найбільш поширеними на промислових підприємствах залишаються системи автоматичного керування, побудовані на базі ПІ- та ПІД-регуляторів. Вони використовуються для стабілізації [3]:

- витрати маси;
- рівня у напірному ящику;
- швидкості руху сітки;
- вакууму у зневоднювальних елементах.

Переваги таких систем:

- простота реалізації;
- висока надійність;
- легкість налаштування;
- низька вартість впровадження.

Недоліки:

- обмежена ефективність за наявності значних збурень;
- складність забезпечення оптимальної якості при зміні властивостей сировини;
- необхідність частого переналаштування параметрів регуляторів.

Каскадні системи автоматичного керування

Для підвищення якості регулювання широко застосовуються каскадні системи керування. У таких системах один регулятор (зовнішній контур) формує завдання для іншого (внутрішнього контуру) [3].

Прикладом є:

- каскадне керування масою полотна через витрату суспензії;
- керування рівнем у напірному ящику через регулювання подачі маси.

Переваги каскадних систем:

- зменшення впливу збурень;
- підвищення швидкодії;
- краща стабілізація параметрів процесу.

Недоліки:

- ускладнення структури системи;
- підвищені вимоги до точності датчиків;
- складність налаштування.

Багатозонні системи керування профілем полотна

Сучасні картоноробні машини оснащуються багатозонними системами керування профілем маси та вологості полотна по ширині. Такі системи використовують [5, 6]:

- скануючі вимірювальні рамки;
- інфрачервоні та радіоізотопні датчики;
- масиви виконавчих механізмів (регулювання напускної щілини, зонального зволоження або вакууму).

Переваги:

- висока рівномірність полотна;
- зменшення браку;
- підвищення виходу придатної продукції.

Недоліки:

- висока вартість;
- складність обслуговування;
- потреба у висококваліфікованому персоналі.

Інтелектуальні та адаптивні системи керування

Останнім часом дедалі більшого поширення набувають адаптивні та інтелектуальні системи автоматичного керування, зокрема [5 , 6]:

- адаптивні ПД-регулятори;
- системи з прогнозуванням (МРС);
- системи на основі нечіткої логіки;
- нейромережеві алгоритми.

Такі системи здатні автоматично враховувати зміну параметрів процесу та властивостей сировини.

Переваги:

- висока якість регулювання;
- зменшення впливу невизначеностей;
- оптимізація витрат ресурсів.

Недоліки:

- складність математичного опису;
- висока вартість впровадження;
- потреба в обчислювальних ресурсах.

Порівняльний аналіз існуючих систем

Тип системи	Якість регулювання	Складність	Вартість	Гнучкість
ПД/ПД	Середня	Низька	Низька	Низька
Каскадна	Висока	Середня	Середня	Середня
Багатозонна	Дуже висока	Висока	Висока	Висока
Інтелектуальна	Максимальна	Дуже висока	Дуже висока	Максимальна

Проведений аналіз показав, що існуючі системи автоматичного керування процесом формування картонного полотна мають різний рівень ефективності та складності. Традиційні ПД-системи залишаються актуальними для стабілізації окремих параметрів, однак вони не забезпечують оптимальної якості в умовах змінних збурень. Найбільш перспективним напрямом є використання каскадних та адаптивних систем керування, а також

впровадження інтелектуальних алгоритмів, що дозволяє підвищити якість картону, зменшити витрати сировини та енергоресурсів [5, 6].

1.4 Постановка задачі дослідження

- забезпечити стабільність якості картону;
- зменшити людський фактор;
- підвищити продуктивність обладнання;
- оптимізувати енергоспоживання;
- підвищити рівень промислової безпеки.

2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЧАСТИНИ ПЛОСКОСІТКОВОЇ КАРТОНОРІБНОЇ МАШИНИ

2.1 Система подачі маси на сітку

Принципова схема системи подачі маси на сітку машини

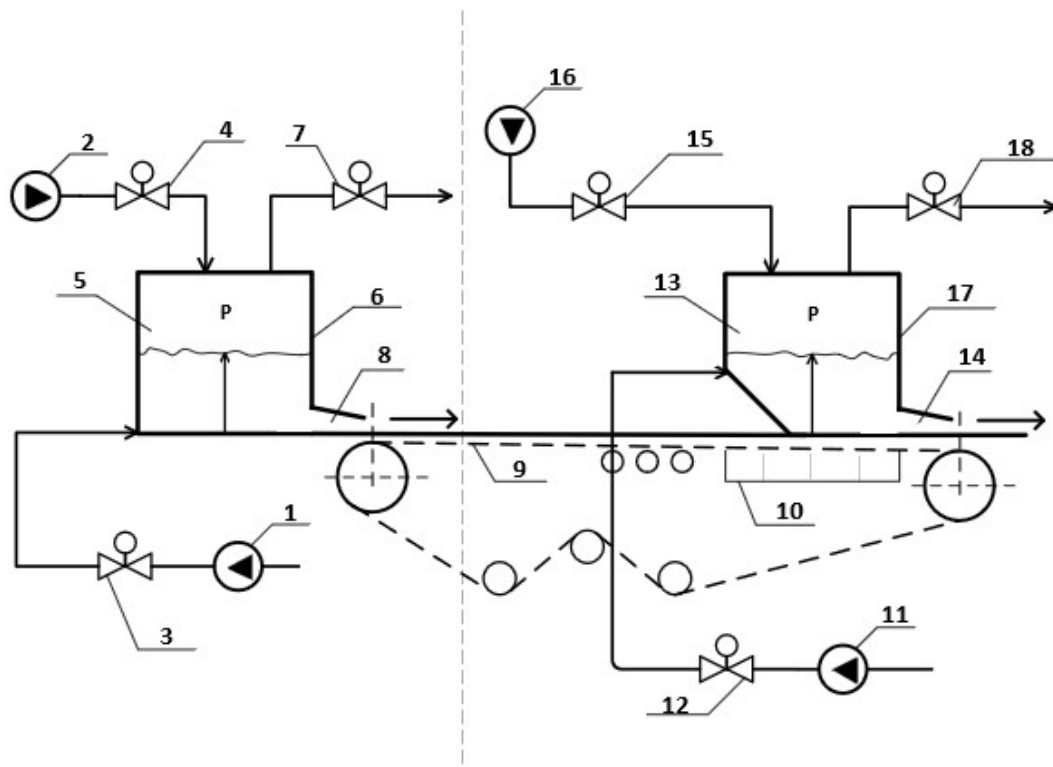


Рис.2.1 – Система подачу маси на сітку:

1-й змішувальний насос; 3,4,7,12,15 і 18 – регулювальні органи; 5 – напускна камера 1-го напірного ящика; 6 – повітряна подушка 1-го напірного ящика; 9 – сітка; 10 – відсмоктувальні ящики; 14 – випускальна щілина 2-го напірного ящика; 16 – 2-й компресор; 17 – повітряна подушка 2-го напірного ящика.

Швидкість маси крізь випускальні щілини цього ящика [7]

$$v_m = \sqrt{2gH},$$

де g – прискорення сили тяжіння.

Сумарний напір маси у напірному ящику

$$H = h + 10P,$$

де h – рівень маси у напускній камері м. вод. ст, P – тиск повітряної подушки, $\text{кг}/\text{см}^2$.

Відомо [3] що для якісного формування двошарового картоного полотна на сітці необхідно, щоб коефіцієнт відношення

$$\alpha = \frac{V_M}{V_C} = 0.85 - 0.93,$$

де V_C – швидкість сітки машини.

Принципову схему напірного ящика цього типу, представлено на рис. 2.2.

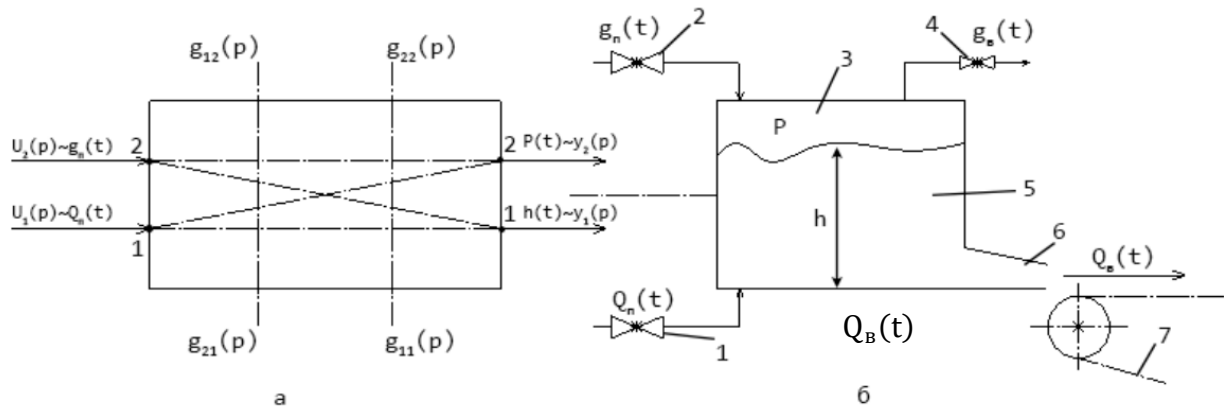


Рис.2.2 – Напірний ящик з повітряною подушкою:

а – принципова; б – загальна структурна схема:

1, 2 і 4 – регулювальні органи; 3 – повітряна подушка; 5 – напускна камера; 6 – випускна щілина; 7 – сітка.

Напірний ящик з повітряною подушкою як об'єкт керування рівнем маси і тиском повітряної подушки представляється системою, яка складається із двох лінійних диференціальних рівнянь [7]:

$$\begin{cases} T_{11} \frac{dy_1}{dt} + y_1(t) = k_{11} U_1(t) - k_{12} y_2(t); \\ T_{22} \frac{dy_2}{dt} + y_2(t) = K_{21} \frac{dy_1}{dt} + K_{22} U_2(t). \end{cases}$$

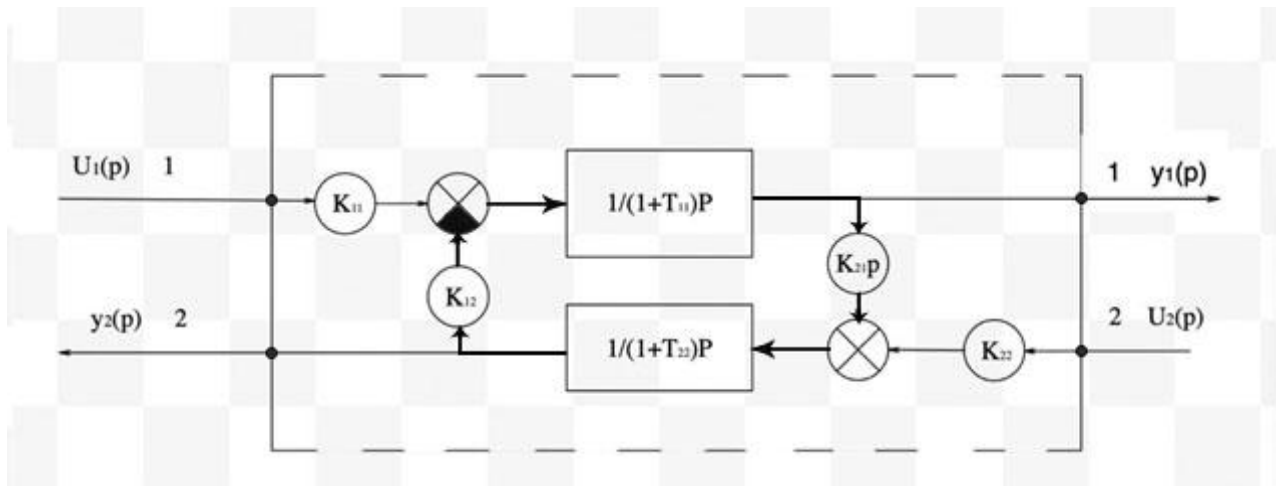


Рис.2.3 – Структурна схема напірного ящика з повітряною подушкою як об'єкта керування рівнем маси і тиском повітряної подушки

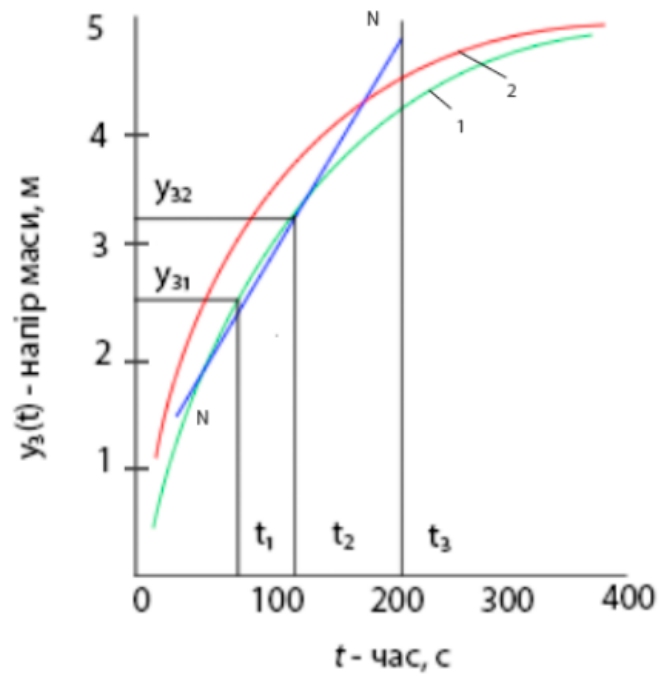


Рис.2.4 – Графік істинної(графік 1) і апроксимованої (графік 2) перехідних функції каналу керування 13

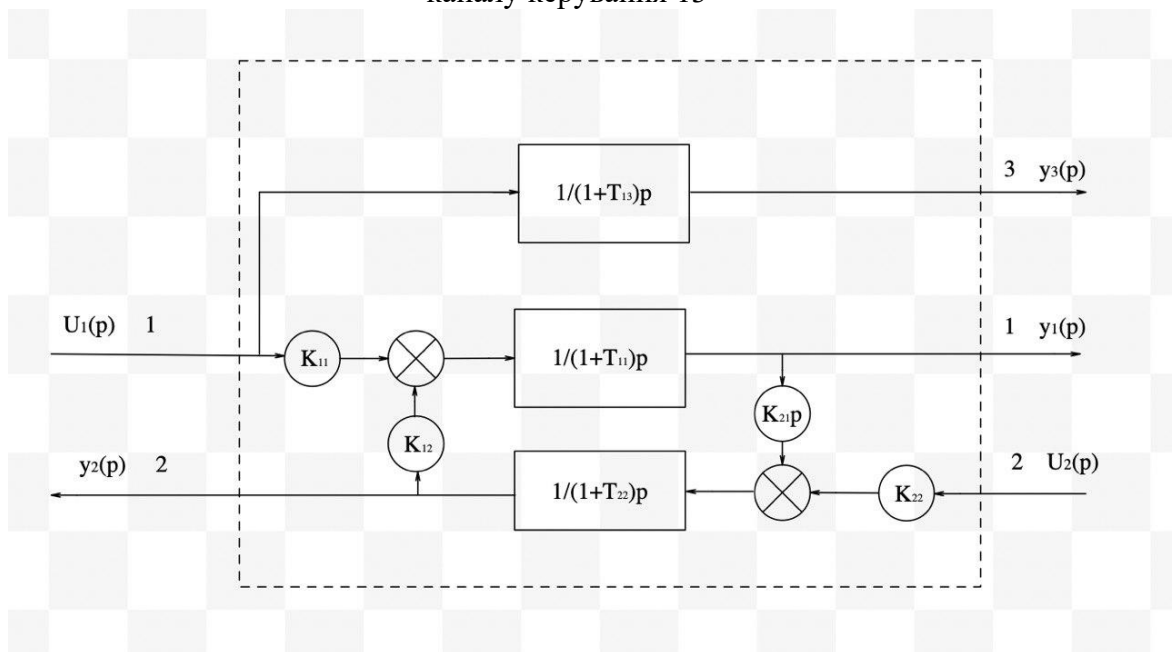


Рис.2.5 – Спрощена структурна схема напірного ящика, з повітряною подушкою як об'єкт керування рівнем маси і сумарним напором маси

2.2 Статичні характеристики напірного ящика з повітряною подушкою

Відомо [3], що швидкість маси крізь випускальну щілину ящика

$$V_M = \mu \sqrt{2gH}.$$

де H – сумарний напір маси; g – прискорення сили тяжіння; μ – коефіцієнт витрати.

Коефіцієнт відношення швидкості струменя маси крізь випускальну щілину до швидкості сітки [8]

$$\alpha = \frac{V_M}{V_C},$$

Отже

$$V_M = \alpha V_C.$$

Підставимо вираз (3.3) у вираз (3.1). Тоді

$$\alpha^2 V_C^2 = \mu^2 2gH.$$

Звідси випливає, що

$$H = \frac{\alpha^2}{2g\mu^2} V_C^2.$$

Розглянемо приклад. Якщо $\alpha = \mu = 1$, а $g = 9,81 \text{ м/с}^2$, то теоретичний сумарний напір маси

$$H = 5 \cdot 10^{-2} V_C^2.$$

Графік залежності (3.5) наведено на рис. 3.1.

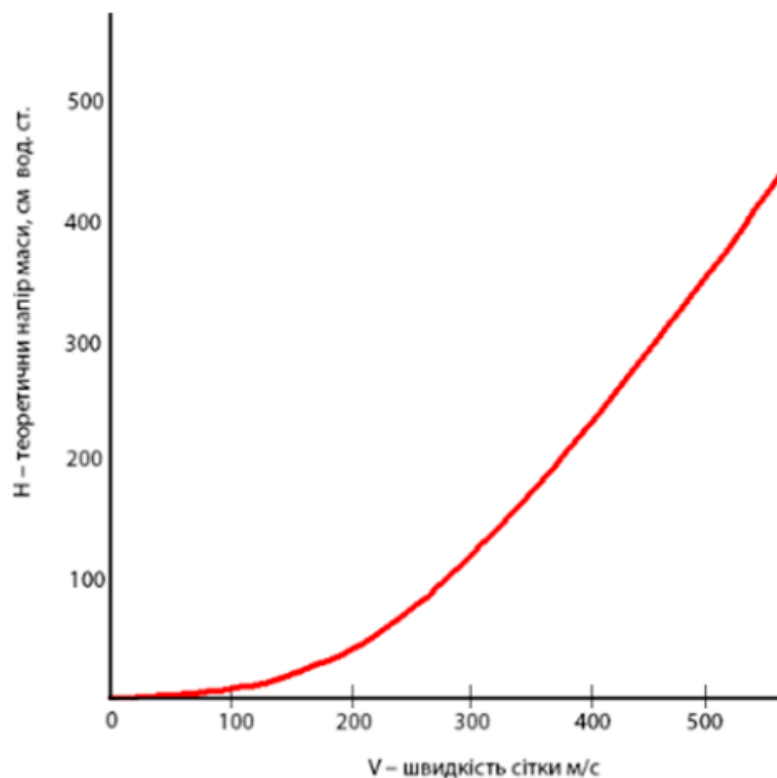


Рис. 2.6 – Залежність теоритичного сумарного напору маси від швидкості сітки

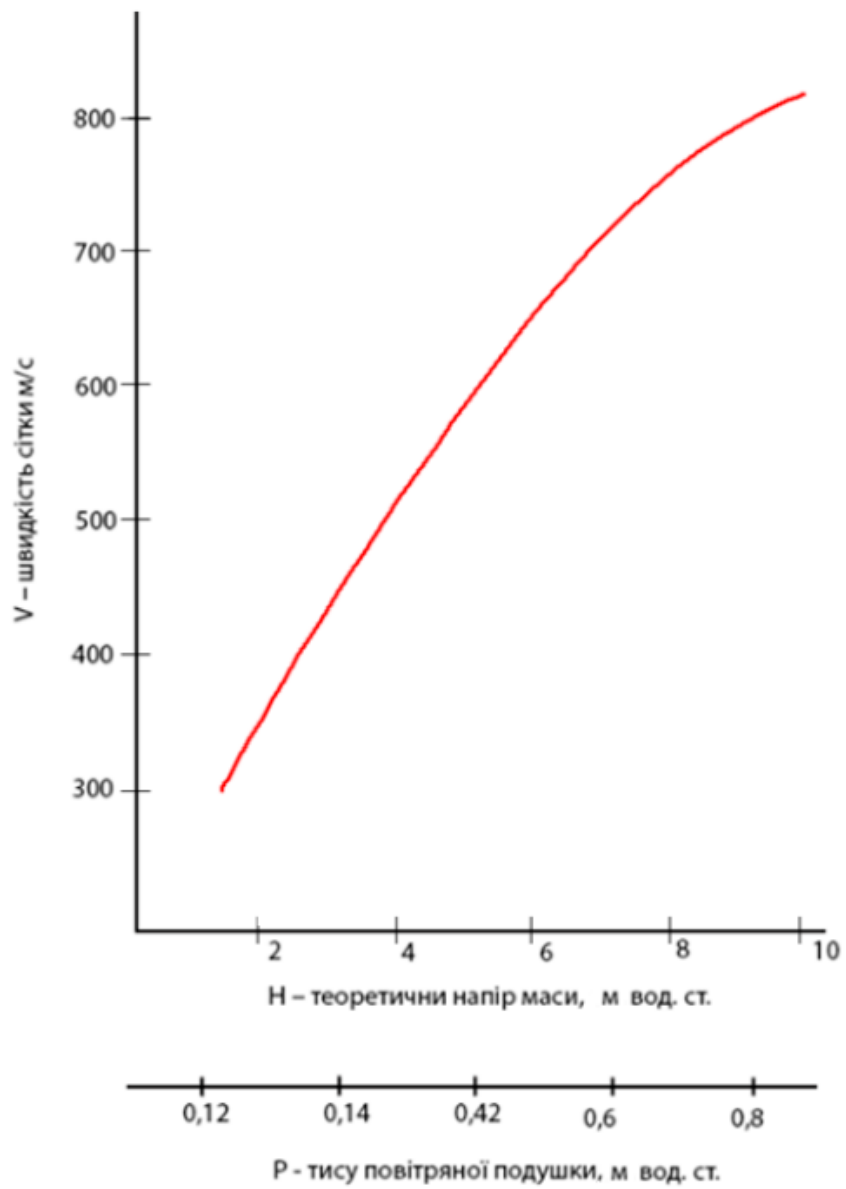


Рис. 2.7 – Залежність теоретичного напору маси і тиску повітряної подушки від швидкості сітки при сталому рівні маси $h=0,8\text{м}$

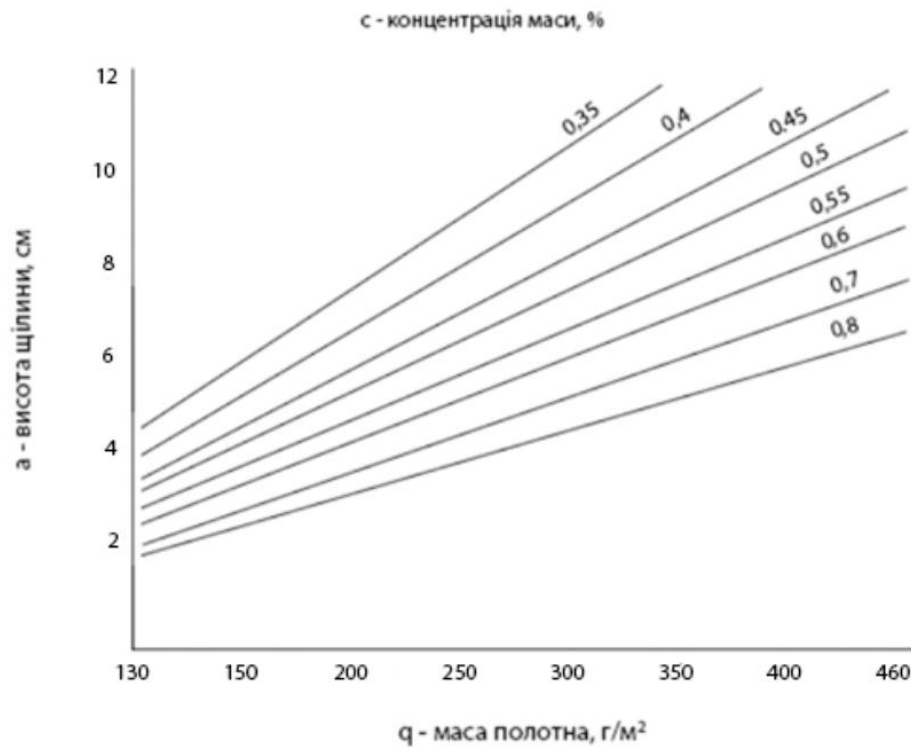


Рис. 2.8 – Номограма для визначення висоти випускальної щілини першого і другого напірних ящиків

2.3 Динамічні характеристики напірного ящика як об'єкта керування

Основні змінні та параметри моделі

Вхідні змінні:

- $u_1(t)$ $u_{1(t)}$ $u_1(t)$ — температура сушильного циліндра, °C
- $u_2(t)$ $u_{2(t)}$ $u_2(t)$ — швидкість руху картонного полотна, м/с
- $u_3(t)$ $u_{3(t)}$ $u_3(t)$ — тиск пари в сушильній системі, Па

Вихідні змінні:

- $y_1(t)$ $y_{1(t)}$ $y_1(t)$ — температура картонного полотна, °C
- $y_2(t)$ $y_{2(t)}$ $y_2(t)$ — вологість картону, %

Параметри:

- m m m — маса картонного полотна, кг
- c c c — теплоємність картону, Дж/(кг·°C)
- λ λ λ — теплота випаровування води, Дж/кг
- k k k — коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м²·°C)
- S S S — площа теплообміну, м²

Математична модель теплового балансу

Процес нагрівання та сушіння картонного полотна описується рівнянням теплового балансу [7]:

$$m c \frac{dT(t)}{dt} = k S (T_c - T(t)) - \lambda \frac{dW(t)}{dt}$$

де:

$T(t)$ — температура полотна,
 T_c — температура сушильного циліндра,
 $W(t)$ — масова частка вологи в картоні.

Перша складова правої частини рівняння описує надходження тепла, друга — витрати тепла на випаровування вологи.

Модель масообміну (зміна вологості)

Зменшення вологості картону описується рівнянням:

$$\frac{dW(t)}{dt} = -k_w (W(t) - W_{eq})$$

де:

k_w — коефіцієнт масопереносу,
 W_{eq} — рівноважна вологість.

Це рівняння показує, що швидкість випаровування залежить від різниці між поточною та рівноважною вологістю [8].

Система диференціальних рівнянь процесу сушіння

Об'єднавши теплову та масообмінну моделі, отримаємо систему:

$$\begin{cases} \frac{dT(t)}{dt} = \frac{kS}{mc} (T_c - T(t)) - \frac{\lambda}{mc} \frac{dW(t)}{dt} \\ \frac{dW(t)}{dt} = -k_w (W(t) - W_{eq}) \end{cases}$$

Дана система описує динамічну поведінку процесу сушіння картонного полотна [7].

Лінеаризація математичної моделі

Для синтезу регуляторів модель лінеаризується в околі робочої точки (T_0, W_0, T_{c0}) .

Вводяться відхилення:

$$\Delta T = T - T_0, \Delta W = W - W_0, \Delta T_c = T_c - T_{c0}$$

Після лінеаризації система набуває вигляду:

$$\begin{cases} \frac{d(\Delta T)}{dt} = -a_1 \Delta T + b_1 \Delta T_c - a_2 \Delta W \\ \frac{d(\Delta W)}{dt} = -a_3 \Delta W \end{cases}$$

де коефіцієнти a_1, a_2, a_3, b_1 визначаються з фізичних параметрів процесу.

Передатні функції об'єкта керування

Застосувавши перетворення Лапласа, отримаємо передатні функції:

Канал «температура циліндра – температура полотна»:

$$G_T(s) = \frac{\Delta T(s)}{\Delta T_c(s)} = \frac{K_T}{T_T s + 1}$$

Канал «температура – вологість»:

$$G_W(s) = \frac{\Delta W(s)}{\Delta T(s)} = \frac{K_W}{T_W s + 1}$$

Таким чином, процес сушіння може бути представлений як аперіодична ланка першого порядку з запізненням, що є типовим для теплових об'єктів [7].

Аналіз динамічних властивостей об'єкта

Процес сушіння характеризується:

- великою сталою часу;
- значною інерційністю;
- чутливістю до збурень;

- слабкою саморегуляцією.

Ці властивості обґрунтовують доцільність застосування ПІД-регуляторів або багатоконтурних систем керування.

Модель у просторі станів

Для сучасних методів керування модель представимо у просторі станів [8]:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned}$$

де:

$$x(t) = \begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta W \end{bmatrix} x(t) = [\Delta T \ \Delta W]$$

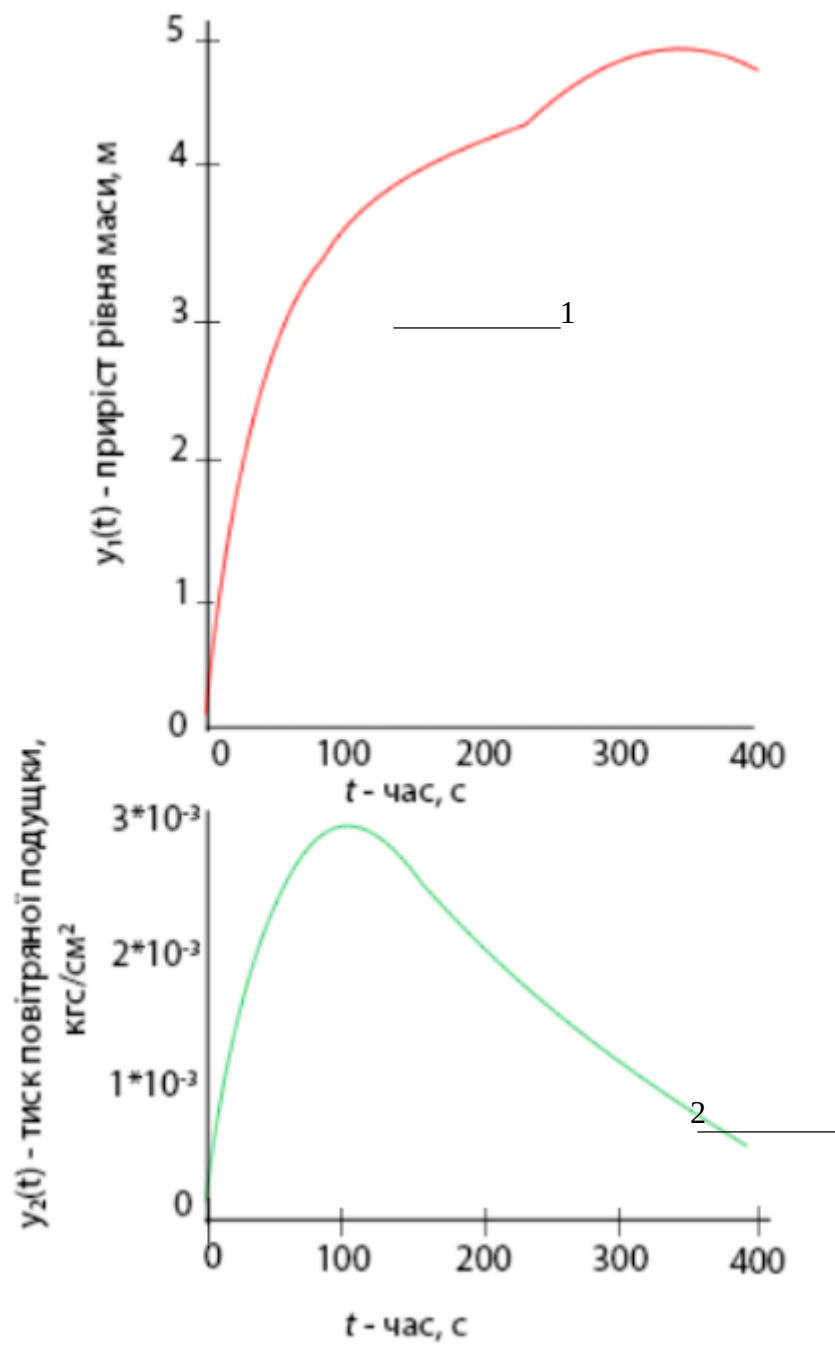


Рис. 2.9 – Графік приросту рівня маси (графік 1) та тиску повітряної подушки (графік 2) у разі приросту витрати маси, що подається у напірний ящик

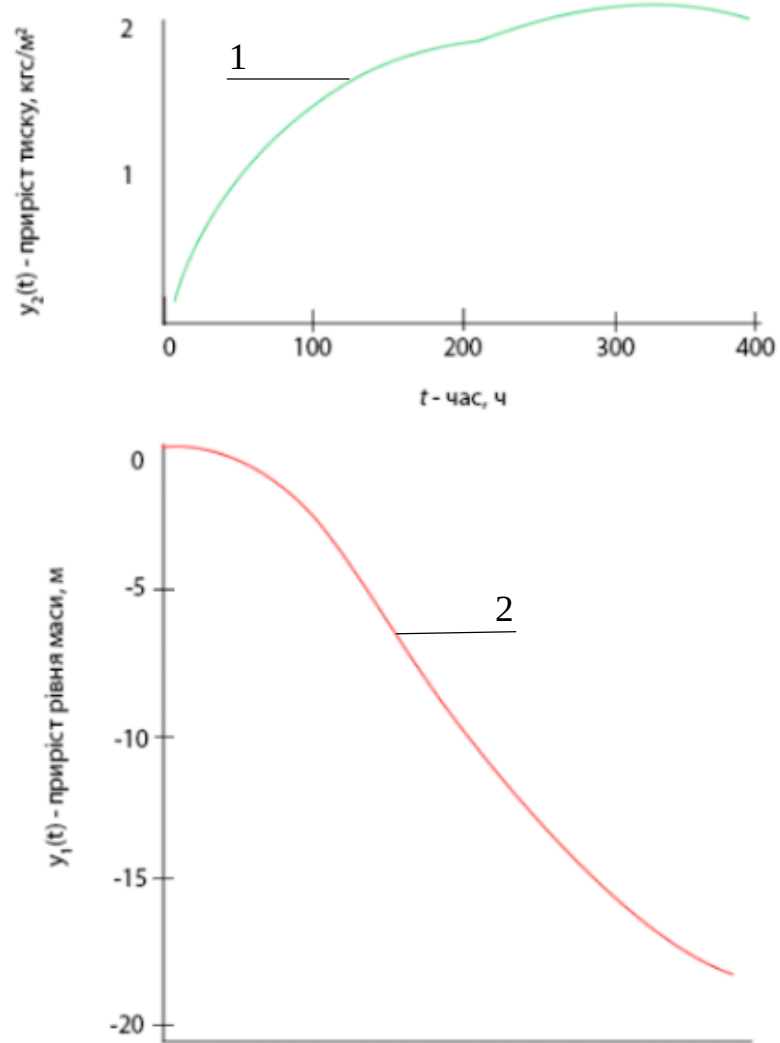


Рис. 2.10 – Графік приросту тиску повітряної подушки (графік 1) та рівня маси (графік 2) у разі витрати маси, що подається у напірний ящик

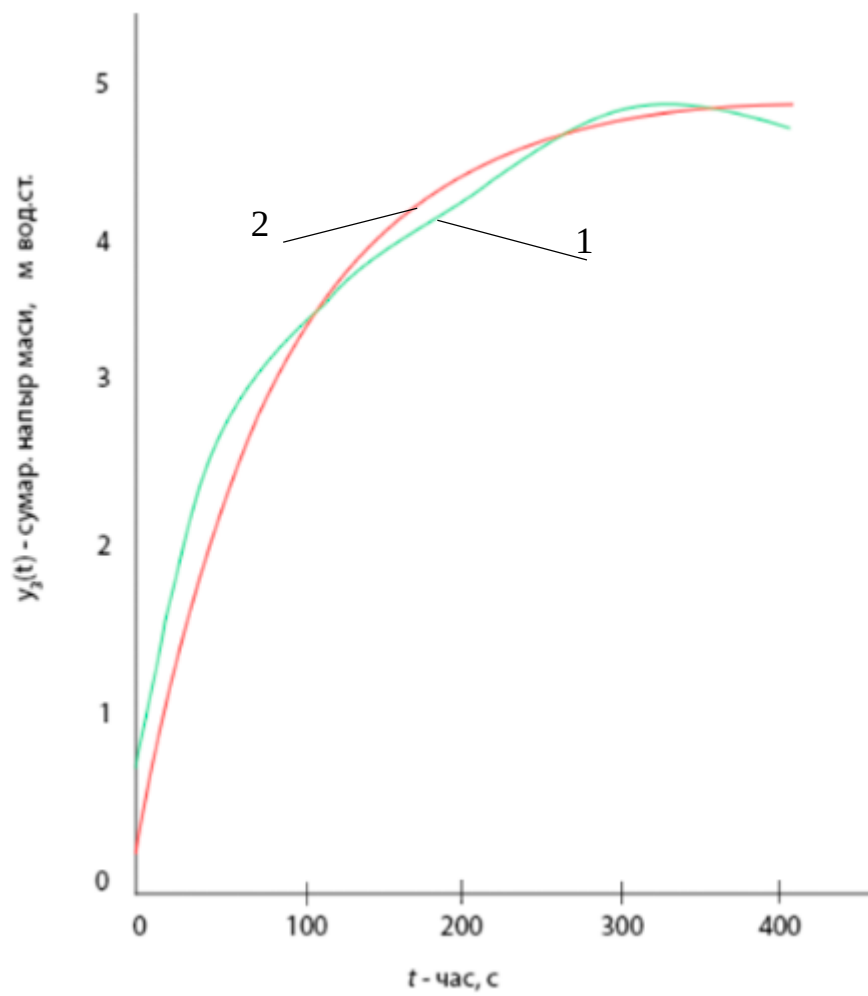


Рис. 2.11 – Графіки істинної перехідної функції (графік 1) і апроксимованої перехідної функції (графік 2) каналу керування 13

3 РОЗРОБКА І ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ

Метою синтезу системи автоматичного керування (САУ) є забезпечення стабільності та необхідної точності підтримання технологічних параметрів картоноробного процесу. На основі математичної моделі, розробленої в попередньому розділі, визначається структура системи, обираються типи регуляторів і параметри їх налаштування [5, 10].

Завдання синтезу САУ:

забезпечити стійкість процесу при зміні входних сигналів та параметрів об'єкта;

підтримати необхідну точність підтримання температури та вологості картонного полотна;

зменшити вплив збурень та похибок вимірювання;

забезпечити можливість адаптації та діагностики.

3.1. Система автоматичного керування напірним ящиком закритого типу з регулятором Хорнбостела

Системи автоматичного регулювання рівня маси реалізовану на базі регулятора Хорнбостела [10], рис. 3.1

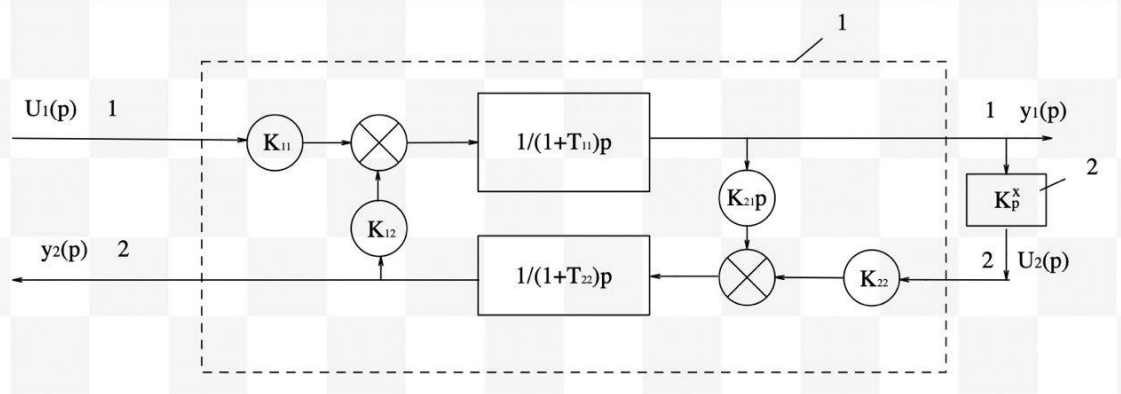


Рис. 3.1 – Структурна схема системи автоматичного регулювання рівня маси у напірному ящику з регулятором Хорнбостела:
1 – напірний ящик; 2 – регулятор Хорнбостела

$$\Phi_{U_1}(p) = g_{11}(p) = -\frac{B(p)}{A(p)},$$

де $A(p) = (1 + T_{11}p)(1 + T_{22}p) + K_{12}K_{21}$; $B(p) = K_{11}(1 + T_{22}p)$.

Коли на розімкнуту систему діє одиничне стрибкоподібне збурювальна дія $v_1(t) = 1$, то усталена похибка рівня маси у напірному ящику, не обладнаному регулятором рівня маси [10, 11]

$$\lim_{t \rightarrow \infty} y_1(t) = \lim_{p \rightarrow 0} \frac{K_{11}(1+T_{22}p)}{(1+T_{11}p)(1+T_{22}p)+K_{12}K_{21}p} \cdot \frac{1}{p} = K_{11}.$$

$$\Phi_U(p) = \frac{g_{11}(p)}{1+g_{11}(p)g_{12}(p)g_p^x}.$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} y_{1уст}(t) = \lim_{p \rightarrow 0} \frac{A(p)B(p)}{A^2(p) + B(p)C(p) + K_p^x(p)} \cdot \frac{1}{p}$$

або

$$y_{1уст}(t) = \frac{K_{11}}{1+K_{12}K_{22}K_p^x}. \quad (4.16)$$

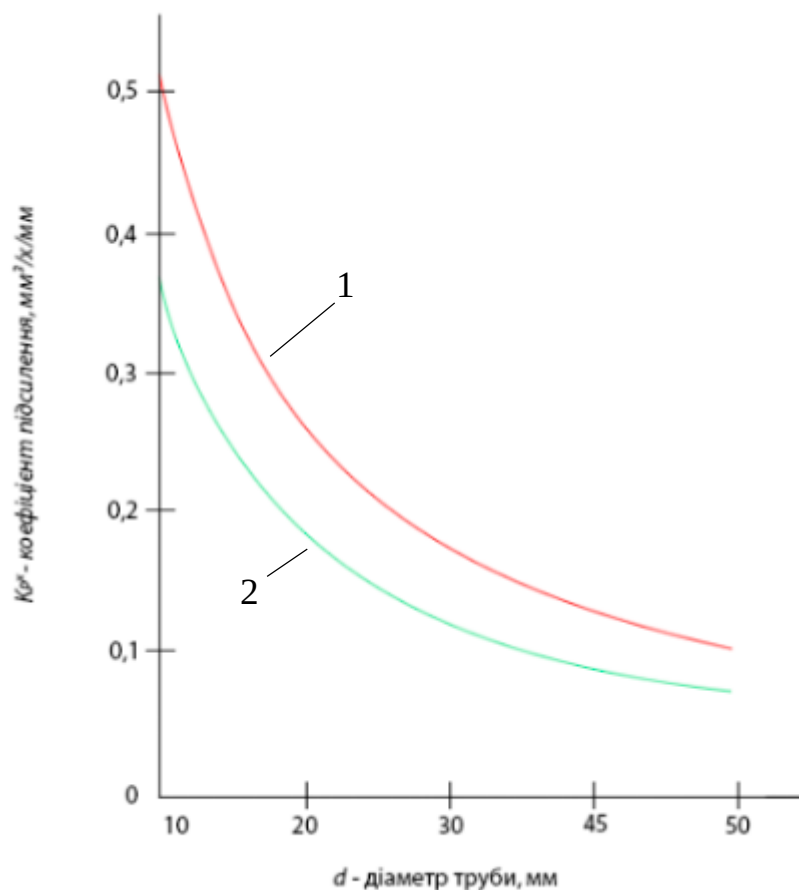


Рис. 3.2 – Залежність коефіцієнта підсилення регулятора Хорнбостела від діаметра переливної труби і витрати повітря, що подається у повітряну подушку:

1 – $g_n^0 = 3,6 \text{ нм}^3/\text{х}$; 2 – $g_n^0 = 5,2 \text{ нм}^3/\text{х}$

3.2 Системи автоматичного керування напірним ящиком з аналоговим регулятором рівня маси і тиску повітряної подушки

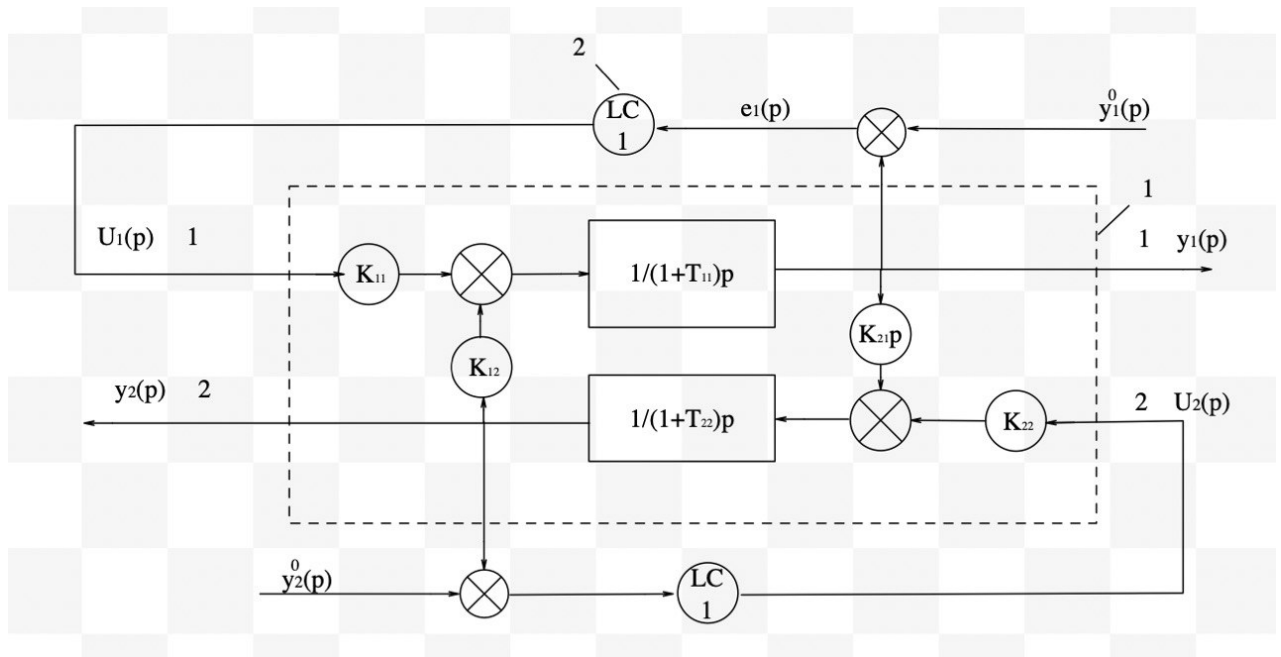


Рис. 3.3 – Структурна схема системи автоматичного керування напірним ящиком з аналоговим регулятором рівня маси і аналоговим регулятором тиску повітряної подушки (варіант I):

1 – напірний ящик; 2 – аналоговий регулятор рівня; 3 – аналоговий регулятор тиску

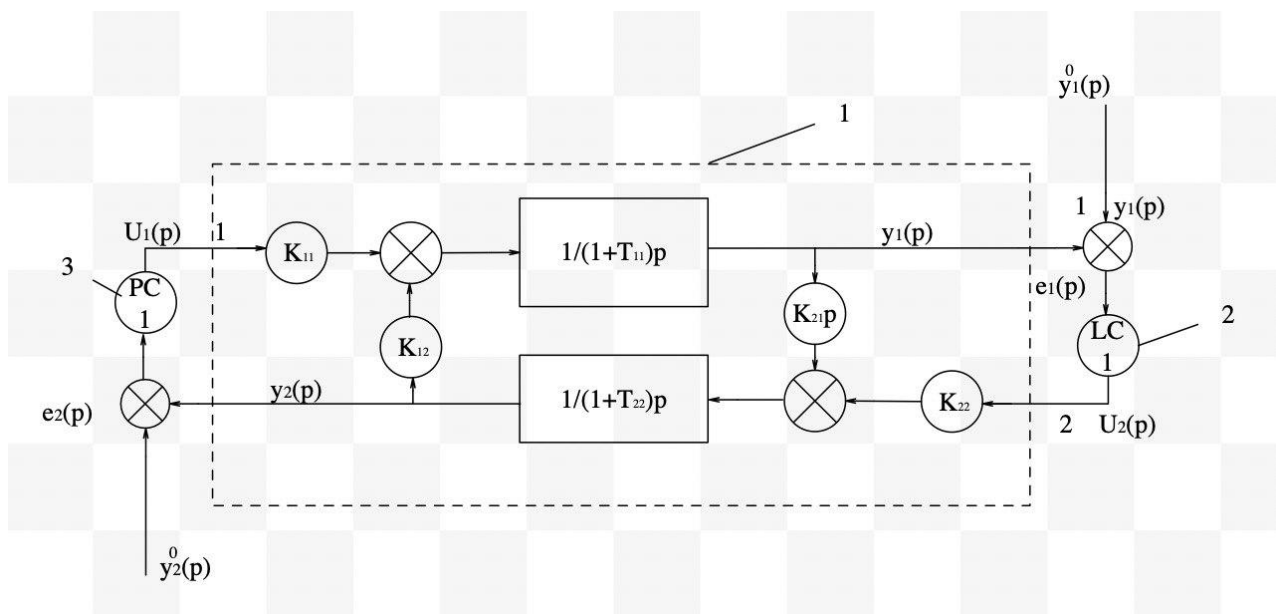


Рис. 3.4 – Структурна схема системи автоматичного керування напірним ящиком з аналоговим регулятором рівня маси і аналоговим регулятором тиску повітряної подушки (варіант II):

1 – напірний ящик; 2 – аналоговий регулятор рівня; 3 – аналоговий регулятор тиску

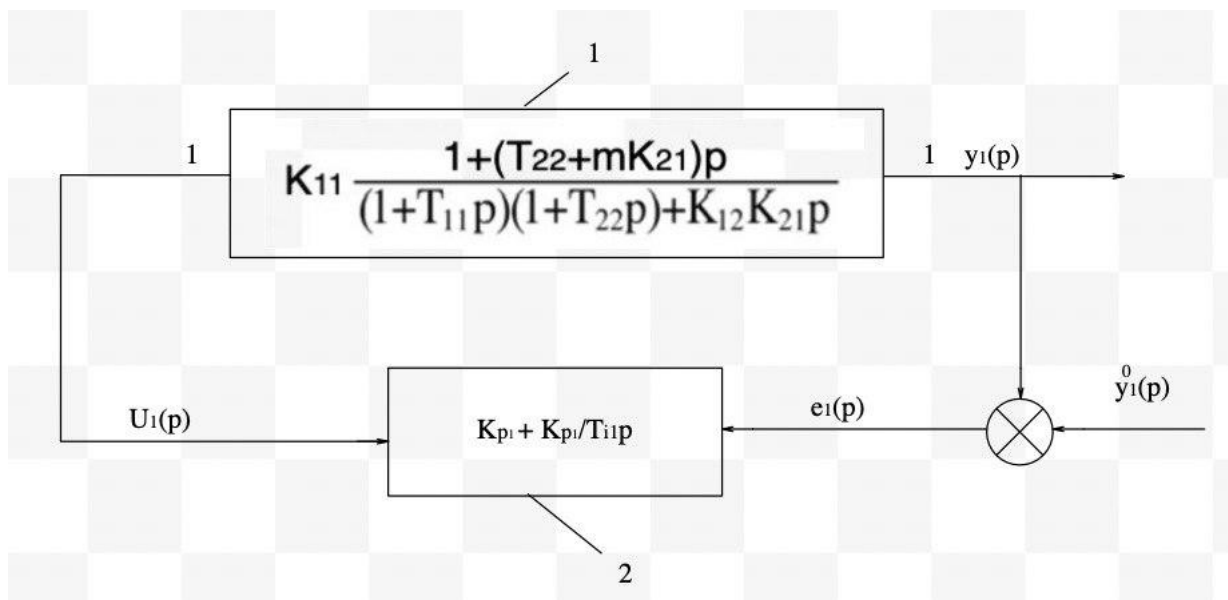


Рис. 3.5 – Структурна схема системи автоматичного регулювання рівня маси (варіант I):
1 – напірний ящик (канал 11); 2 – аналоговий автоматичний регулятор рівня

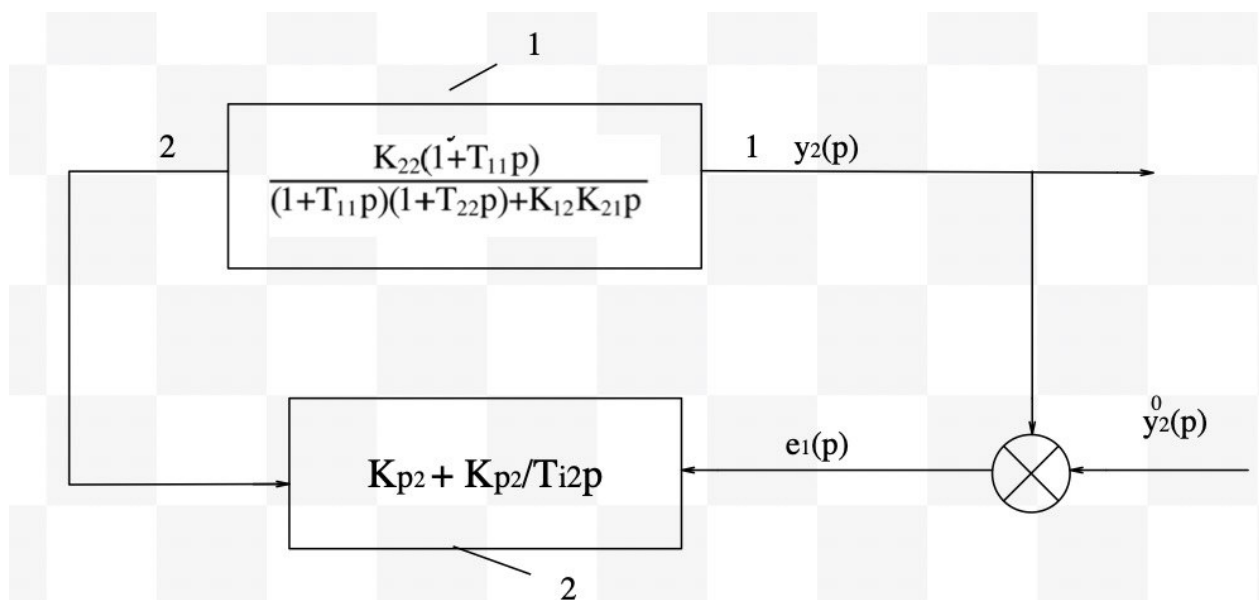


Рис. 3.6 – Структурна схема системи автоматичного регулювання рівня тиску повітряної подушки (варіант I):

1 – напірний ящик (канал 22); 2 – аналоговий автоматичний регулятор рівня

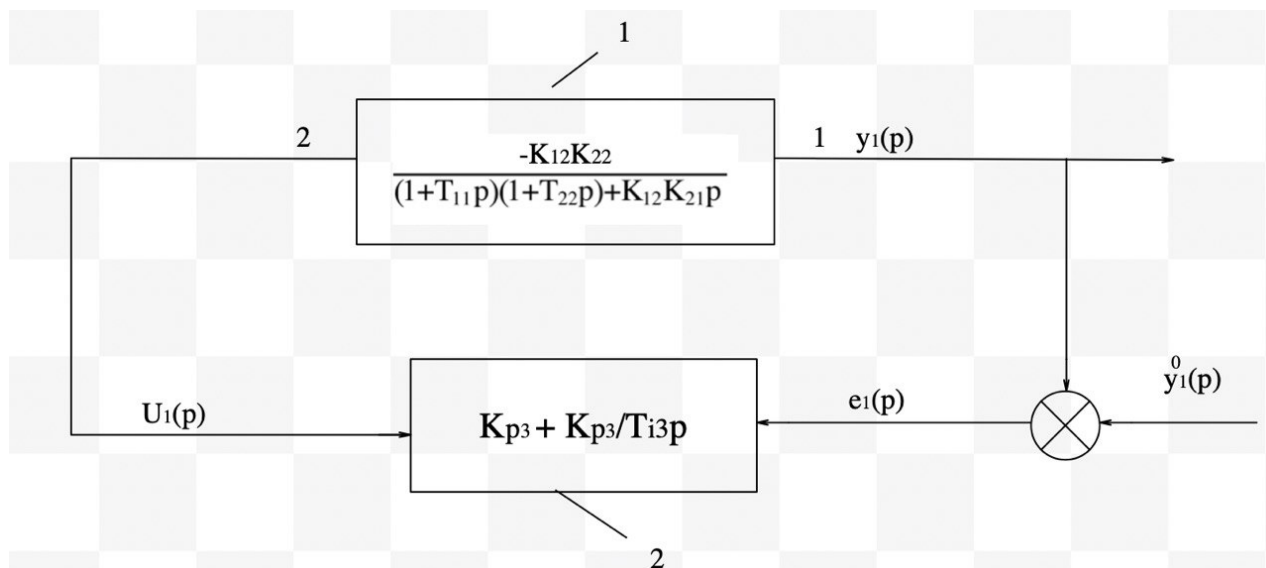


Рис. 3.7 – Структурна схема системи автоматичного регулювання рівня маси (варіант II):
1 – напірний ящик (канал 21); 2 – аналоговий автоматичний регулятор рівня

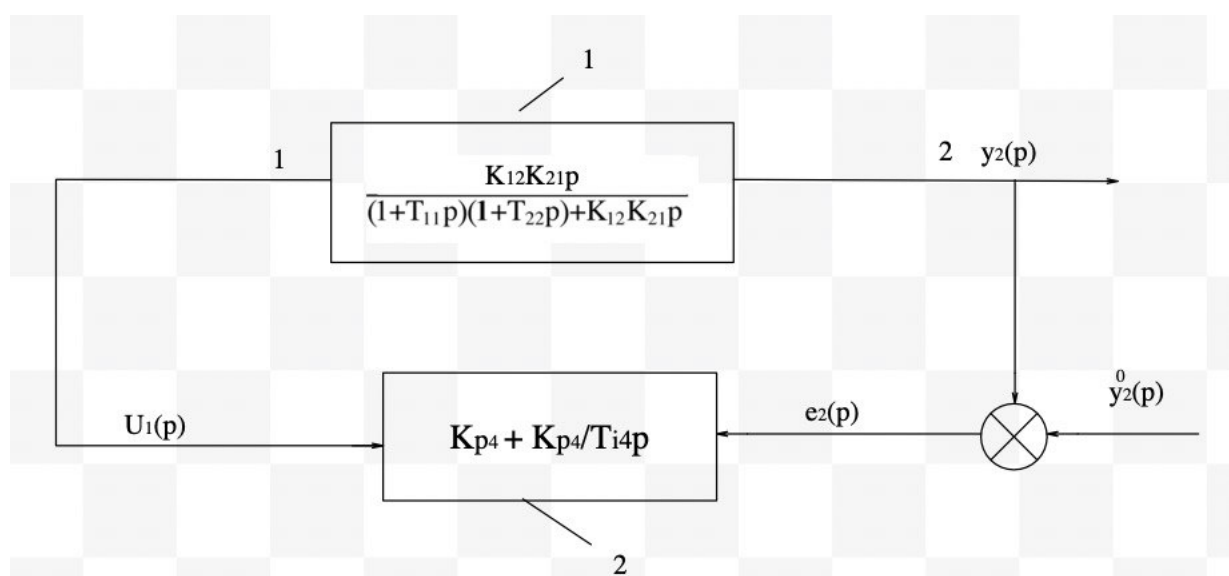


Рис. 3.8 – Структурна схема системи автоматичного регулювання рівня тиску повітряної подушки (варіант II):
1 – напірний ящик (канал 12); 2 – аналоговий автоматичний регулятор тиску

3.3. Системи автоматичного керування напірним ящиком з аналоговим регулятором рівня маси і сумарного напору маси

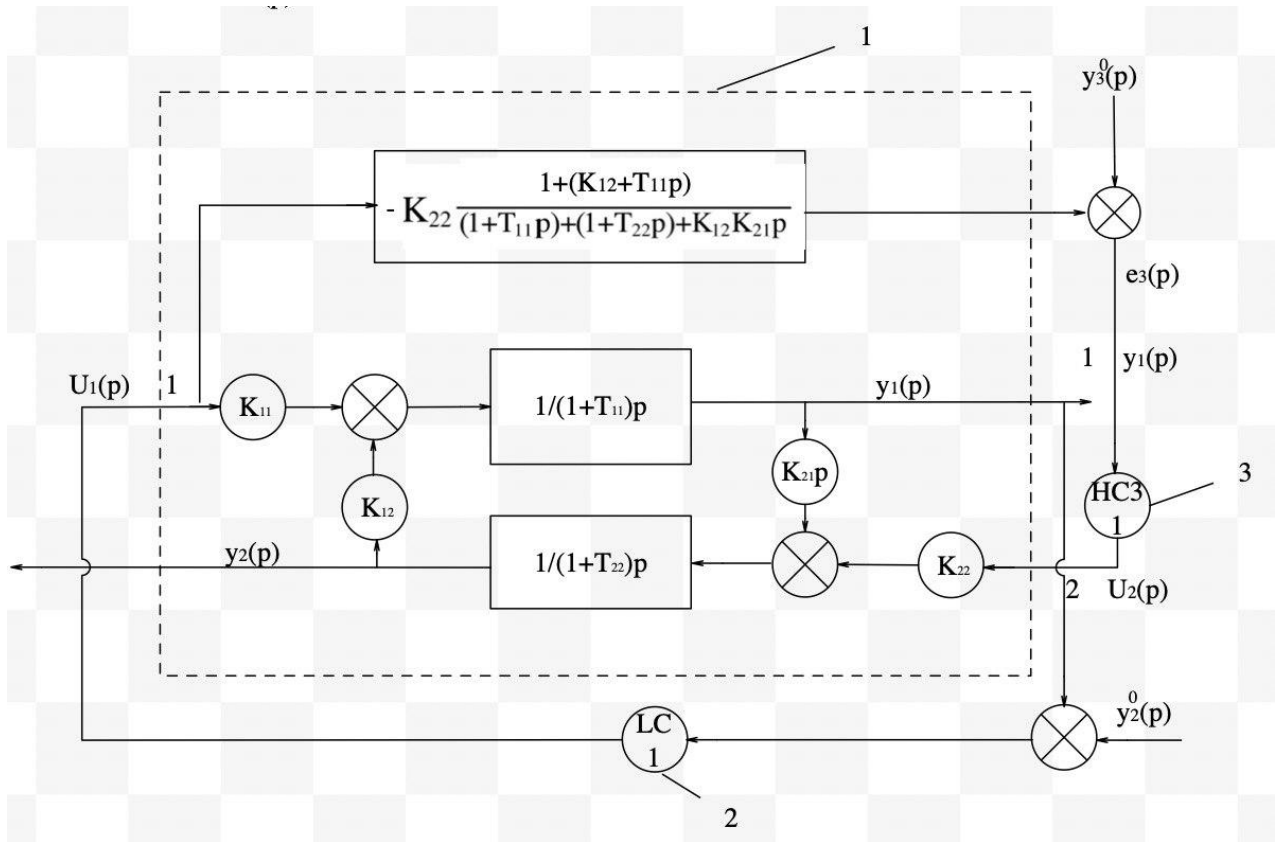


Рис. 3.9 – Структурна схема системи автоматичного керування напірним ящиком з аналоговим регулятором рівня маси і аналоговим регулятором сумарного напору (варіант III):

1 – напірний ящик; 2 – аналоговий регулятор рівня; 3 – аналоговий регулятор сумарного напору маси

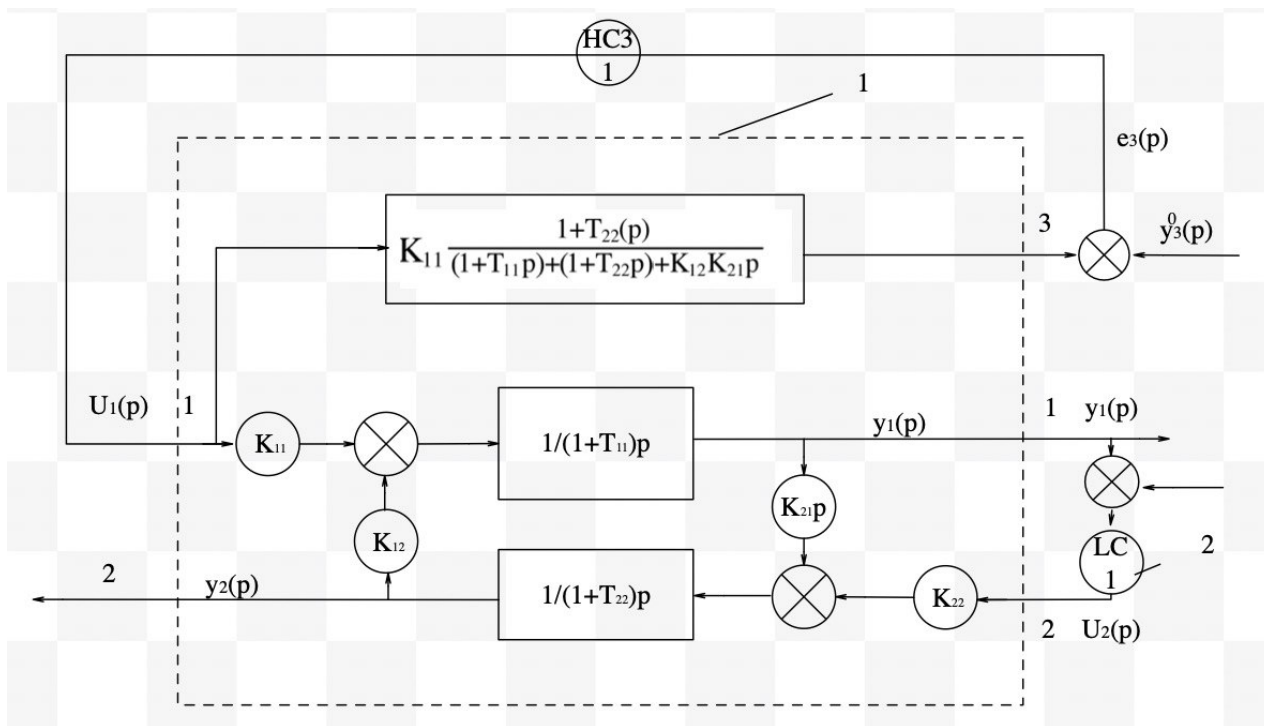


Рис. 3.10 – Структурна схема системи автоматичного керування напірним ящиком з аналоговим регулятором рівня маси і аналоговим регулятором сумарного напору(варіант IV):
1 – напірний ящик; 2 – аналоговий регулятор рівня; 3 – аналоговий регулятор сумарного напору маси

3.4. Системи автоматичного керування напірним ящиком з аналоговими регуляторами тиску повітряної подушки і сумарного напору маси

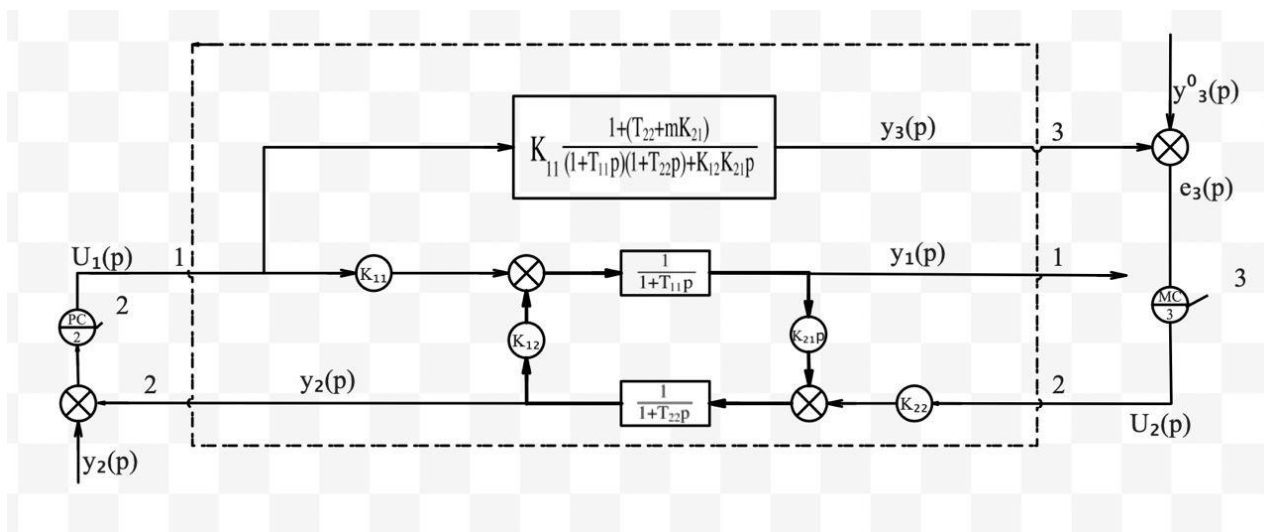


Рис. 3.11 – Структурна схема системи автоматичного керування напірним ящиком з аналоговим регулятором тиску повітряної подушки і аналоговим регулятором сумарного напору маси (варіант V):
1 – напірний ящик; 2 – аналоговий регулятор тиску повітря; 3 – аналоговий регулятор сумарного напору маси

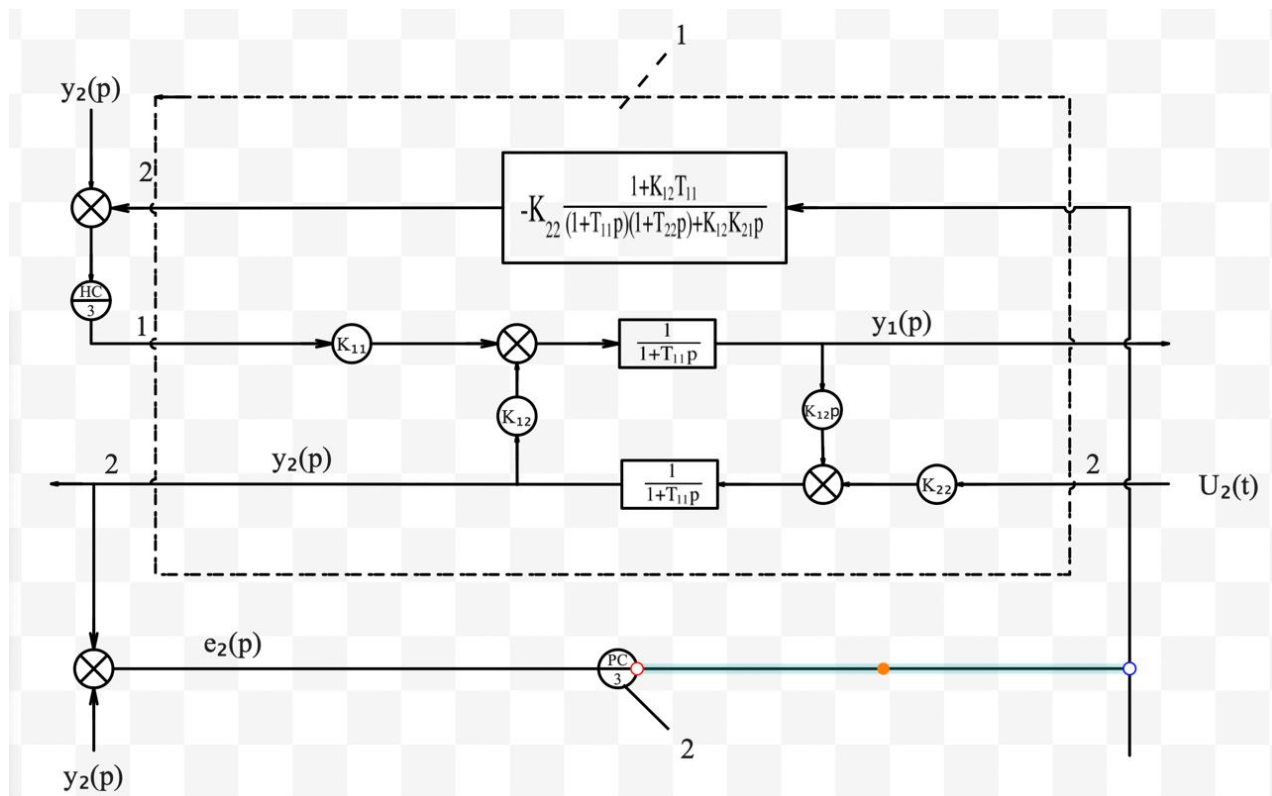


Рис. 3.12 – Структурна схема системи автоматичного керування напірним ящиком з аналоговим регулятором тиску повітряної подушки і аналоговим регулятором сумарного напору маси (варіант VI):

1 – напірний ящик; 2 – аналоговий регулятор тиску повітря; 3 – аналоговий регулятор сумарного напору маси

4. РОЗРОБКА І ДОСЛІДЖЕННЯ НЕПЕРЕРВНО-ДИСКРЕТНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ КАРТОНОРОБНОЇ МАШИНИ

4.1 Склад системи автоматичного керування

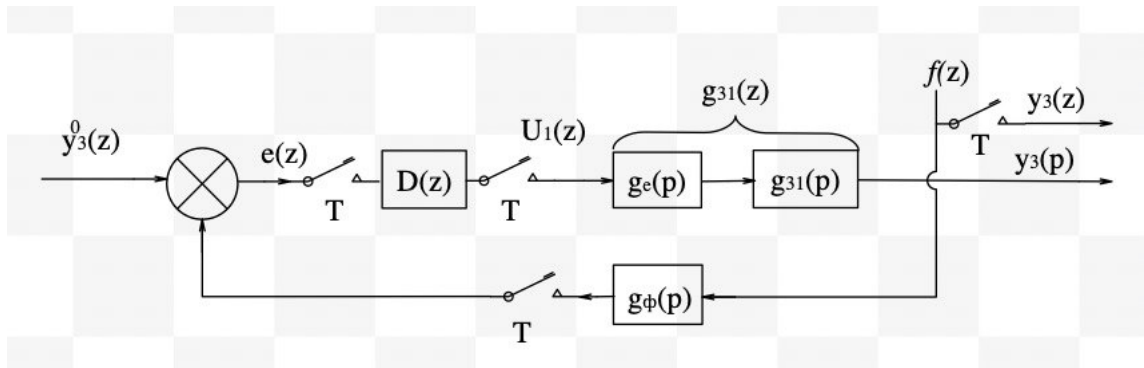


Рис. 4.1 – Структурна схема дискретної системи автоматичного керування і регулювання сумарним напором маси

$$\Phi(z) = \frac{y_3(z)}{y_3^0(z)}.$$

Нехай передавальна функція замкнутої системи

$$\Phi(z) = \frac{\exp(-p\tau)}{1+T_3p},$$

де T_3 – стала часу замкнутої системи; τ – час запізнення у системі, який дорівнює часу запізнення, що існує у каналі керування 13.

$$D_1(z) = \frac{(1-a_3)(1-a_p z^{-1})}{K_{11}(1-a_p)[1-a_3 z^{-1}-(1-a_3)z^{-(K+1)}]},$$

4.2 Визначення дискретної передавальної функції регулятора сумарного напору маси з фільтрацією вхідної змінної регулятора

Передавальна функція [12]

$$g_{31}(p) = \frac{1-e^{-pT}}{p} \frac{K_{11}e^{-p\tau}}{1+T_{13}p} \frac{1}{1+T_\phi p}.$$

$$g_{13}(z) = K_{11} \frac{\alpha + \beta z^{-1}}{(1-a_p z^{-1})(1-a_\phi z^{-1})},$$

$$\text{де } a_p = \exp\left(-\frac{T}{T_{13}}\right); a_\phi = \exp\left(-\frac{T}{T_\phi}\right); \alpha = 1 - \frac{a_\phi T_\phi - a_p T_{13}}{T_\phi - T_{13}};$$

$$\beta = a_p a_\phi - \frac{a_p T_\phi - a_\phi T_{13}}{T_\phi - T_{13}}.$$

$$D_2(z) = \frac{(1-a_3)(1-a_p z^{-1})(1-a_\phi z^{-1})}{K_{11}[(1-a_p z^{-1})(1-a_\phi z^{-1}) - \frac{1-a_3}{1-a_p}(\alpha + \beta z^{-1})z^{-(k+1)}]}.$$

4.3 Дослідження дискретної системи автоматичного керування і регулювання сумарним напором маси методом z-перетворення

- Стала часу напірного ящика по каналу керування 13 $T_{13} = 20\text{с}$
- Коефіцієнт підсилення каналу керування $K_{11} = 0,63 \text{ м вод. ст./м}^3/\text{с}$.
- Час запізнення у каналі керування 13 $\tau = 80\text{с}$.

Передавальна функція напірного ящика по каналу керування [13]

$$g_{31}(z) = K_{11} \frac{1-a_p}{1-a_p z^{-1}} z^{-K},$$

де

$$a_p = \exp\left(-\frac{T}{T_{13}}\right); k = \frac{\tau}{T}.$$

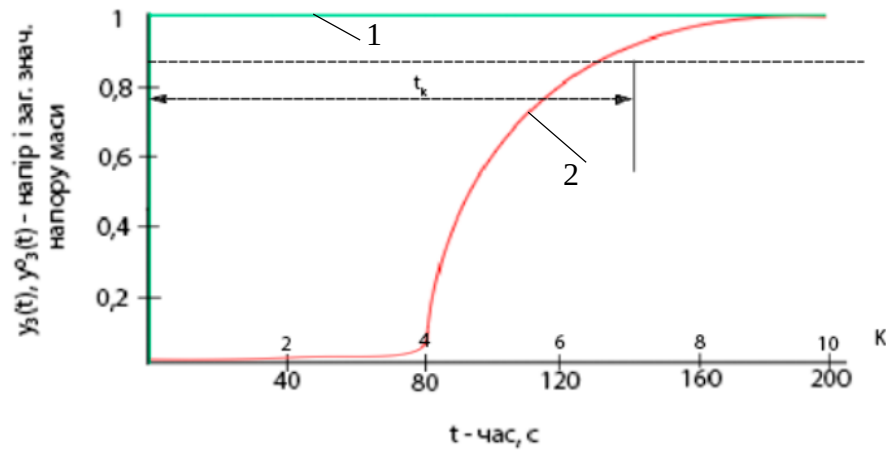


Рис. 4.2 – Графік зміни сумарного напору маси (графік 2) в ДСАК напором маси у разі дії одиничного стрибкоподібного задавального діяння (графік 1)

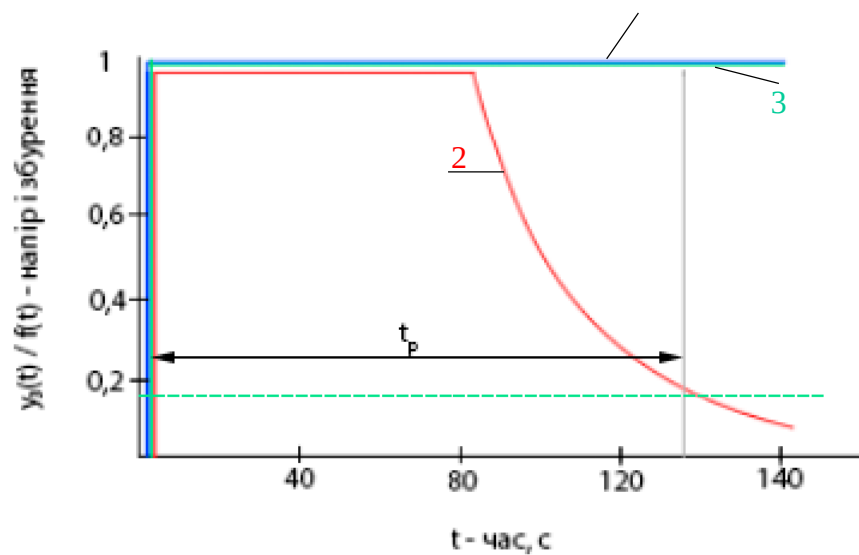


Рис. 4.3 – Графік зміни сумарного напору маси (графік 2) в ДСАК напором маси у разі дії одиничного стрибкоподібного збурювального діяння (графік 1) та у разі відключення регулятора (графік 3)

5. АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ КЕРУВАННЯ КАРТОНОРОБНОЮ МАШИНОЮ

5.1 Постановка задачі на автоматизацію

Сучасна автоматизована система керування технологічним процесом виробництва картону будується на трьох рівнях і стабілізації, координації та оптимізації [14]

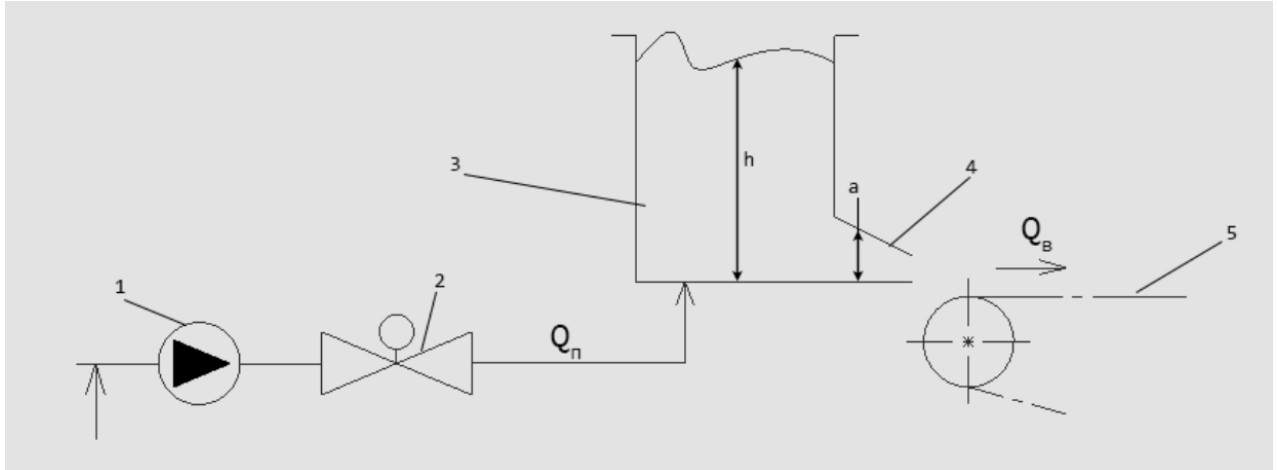


Рис. 5.1. Принципова схема напірного ящика відкритого типу:
1 – змішувальний насос; 2 – регулювальний орган; 3 - напускна камера; 4 – випускальна щілина; 5 – сітка

Метою даного розділу є визначення програмно-технічних засобів для реалізації автоматизованої системи керування процесом виробництва картону, а також опис алгоритмів керування, структурних схем та засобів моніторингу.

Завдання:

- вибір датчиків і виконавчих механізмів;
- обґрунтування використання PLC та SCADA;
- опис алгоритмів ПД-контролю;
- організація моніторингу та збору даних;
- інтеграція з існуючими технологічними лініями.

Система автоматизації процесу виробництва картону являє собою сукупність технічних засобів, призначених для вимірювання, перетворення, обробки та регулювання технологічних параметрів у реальному часі. Основною метою застосування пристроїв автоматизації є забезпечення стабільної якості продукції, зменшення впливу людського фактора, підвищення продуктивності та енергоефективності виробництва [15].

До складу системи автоматизації входять:

- первинні вимірювальні перетворювачі (датчики);
- вторинні вимірювальні пристрої;
- програмовані логічні контролери (PLC);
- виконавчі механізми та приводи;
- операторські панелі та SCADA-системи;
- допоміжні пристрої живлення та захисту.

Первинні вимірювальні перетворювачі (датчики)

Датчики температури

Для контролю температури сушильних циліндрів та повітря в сушильній частині використовуються:

- термометри опору Pt100;
- термопари типу К.

Основні характеристики:

- діапазон вимірювання: 0–250 °С;
- клас точності: $\pm 0,5$ °С;
- вихідний сигнал: 4–20 мА або цифровий (Modbus).

Датчики вологості картону

Для контролю залишкової вологості полотна застосовуються:

- інфрачервоні (оптичні) датчики;
- ємнісні датчики.

Вони забезпечують безконтактне вимірювання вологості в діапазоні 3–15 % із високою швидкістю [16].

Датчики тиску

Тиск пари в сушильних циліндрах контролюється за допомогою:

- тензорезистивних перетворювачів тиску;
- манометрів із аналоговим виходом.

Діапазон вимірювання – до 1 МПа, сигнал – 4–20 мА.

Датчики швидкості та положення

Для визначення швидкості руху картонного полотна використовуються:

- інкрементальні енкодери;
- тахогенератори.

Ці пристрої забезпечують точність вимірювання швидкості до $\pm 0,01$ м/с.

Вторинні вимірювальні та перетворювальні пристрої

Вторинні пристрої призначені для:

- перетворення сигналів датчиків;
- фільтрації шумів;
- масштабування та нормалізації сигналів.

До них належать:

- аналого-цифрові перетворювачі;
- підсилювачі сигналів;
- модулі введення/виведення PLC.

Використання таких пристроїв підвищує точність та стабільність роботи системи [17].

Програмовані логічні контролери (PLC)

PLC є центральною ланкою системи автоматизації. Він виконує:

- збір і обробку сигналів від датчиків;
- реалізацію алгоритмів ПІД-регулювання;
- формування керуючих сигналів для виконавчих механізмів;
- обмін даними з SCADA-системою.

Основні функції PLC:

- багатозадачність;
- реальний час;
- підтримка стандартних промислових протоколів;
- надійна робота в умовах промислового середовища.

Регулюючі клапани

Регулювання подачі пари здійснюється за допомогою:

- електропневматичних клапанів;
- електромоторних клапанів.

Вони змінюють витрату теплоносія відповідно до сигналів регулятора.

Електроприводи

Електроприводи використовуються для:

- регулювання швидкості руху полотна;
- управління пресовими та сушильними валами.

Застосовуються частотні перетворювачі, що дозволяють плавно змінювати швидкість та зменшувати енергоспоживання [18].

Операторські панелі (HMI)

HMI-панелі призначені для:

- введення уставок;
- відображення поточних параметрів;
- сигналізації аварійних станів.

SCADA забезпечує:

- моніторинг технологічного процесу;
- архівацію даних;
- аналіз трендів;
- формування звітів.

До допоміжних пристроїв належать:

- джерела безперебійного живлення (UPS);
- автомати захисту та реле;
- мережеве обладнання.

Вони забезпечують безперебійну та безпечну роботу системи автоматизації.

5.2 Розробка системи автоматизації картоноробної машини

Вибір апаратних засобів

Датчики

Для контролю основних параметрів об'єкта обрано [18]:

Параметр	Тип датчика	Діапазон	Точність
Температура сушильного циліндра	Pt100 / термопара типу К	0–250 °C	±0,5 °C
Вологість картону	Оптичний або ємнісний датчик	3–15 %	±0,2 %
Швидкість руху полотна	Енкодер або тахометр	0–5 м/с	±0,01 м/с
Тиск пари	Манометр із вихідним сигналом 4–20 мА	0–1 МПа	±0,01 МПа

Датчики обиралися з урахуванням промислових стандартів, швидкодії та сумісності з PLC.

Виконавчі механізми

- Регулюючі клапани для пари;
- Нагрівальні елементи сушильних циліндрів;
- Серводвигуни для управління швидкістю полотна;
- Пневматичні або електричні приводи пресових валів.

Виконавчі механізми забезпечують точне і швидке реагування на команди ПІД-регуляторів [19].

Програмні засоби

Для керування процесом обрано PLC промислового класу, що підтримує:

- багатоканальну обробку сигналів;
- реалізацію каскадної системи ПІД-регулювання;
- зв'язок з SCADA-системою;
- архівацію даних технологічного процесу.

SCADA-система використовується для [18]:

- моніторингу температури, вологості, швидкості полотна та тиску пари;
- відображення графіків і трендів;
- налаштування регуляторів в реальному часі;

- сигналізації аварійних станів та відхилень.

Програмні алгоритми

Алгоритми реалізовані у вигляді:

- циклічних програм (Cyclic Tasks) для контролю датчиків та виконавчих механізмів;
- ПІД-блоків для внутрішнього та зовнішнього контурів;
- блоків безпеки для аварійного відключення та сигналізації.

Алгоритм роботи системи

Основний цикл керування

1. Зчитування значень з датчиків
2. Обчислення похибки контролю:
3. Обробка ПІД-регулятором:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

4. Відправка команд виконавчим механізмам.
5. Моніторинг та архівація значень у SCADA.
6. Повтор циклу через заданий інтервал часу.

Обробка збурень

Система автоматично [19]:

- компенсує коливання температури пари;
- регулює швидкість полотна при зміні вологості;
- обмежує максимальні значення параметрів для запобігання аварії.

Структурна схема програмно-технічної реалізації

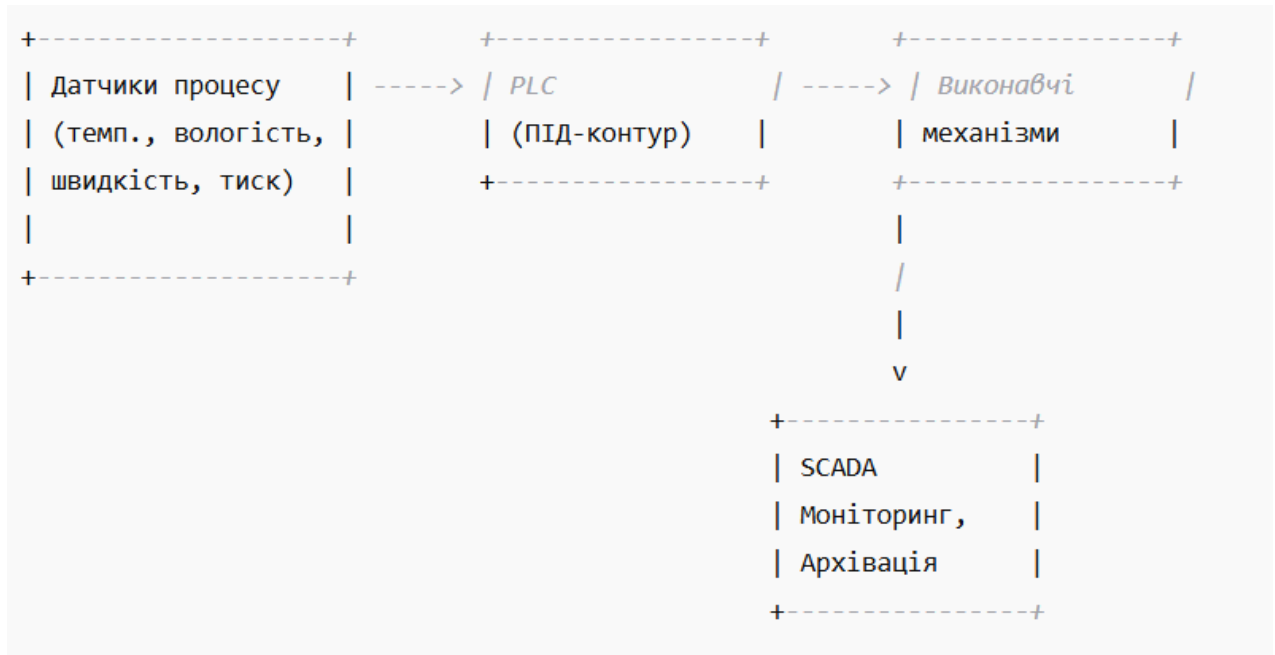


Схема забезпечує надійний зв'язок між датчиками, контролером та виконавчими механізмами, а також інтеграцію з промисловим моніторингом [20].

Безпека та діагностика

- Вбудовані аварійні блоки контролюють:
 - перевищення температури;
 - перевищення тиску пари;
 - зупинку полотна.
- PLC забезпечує автоматичне відключення системи та сигналізацію у SCADA.
- Регулярний контроль стану датчиків та виконавчих механізмів дозволяє попереджати збої.

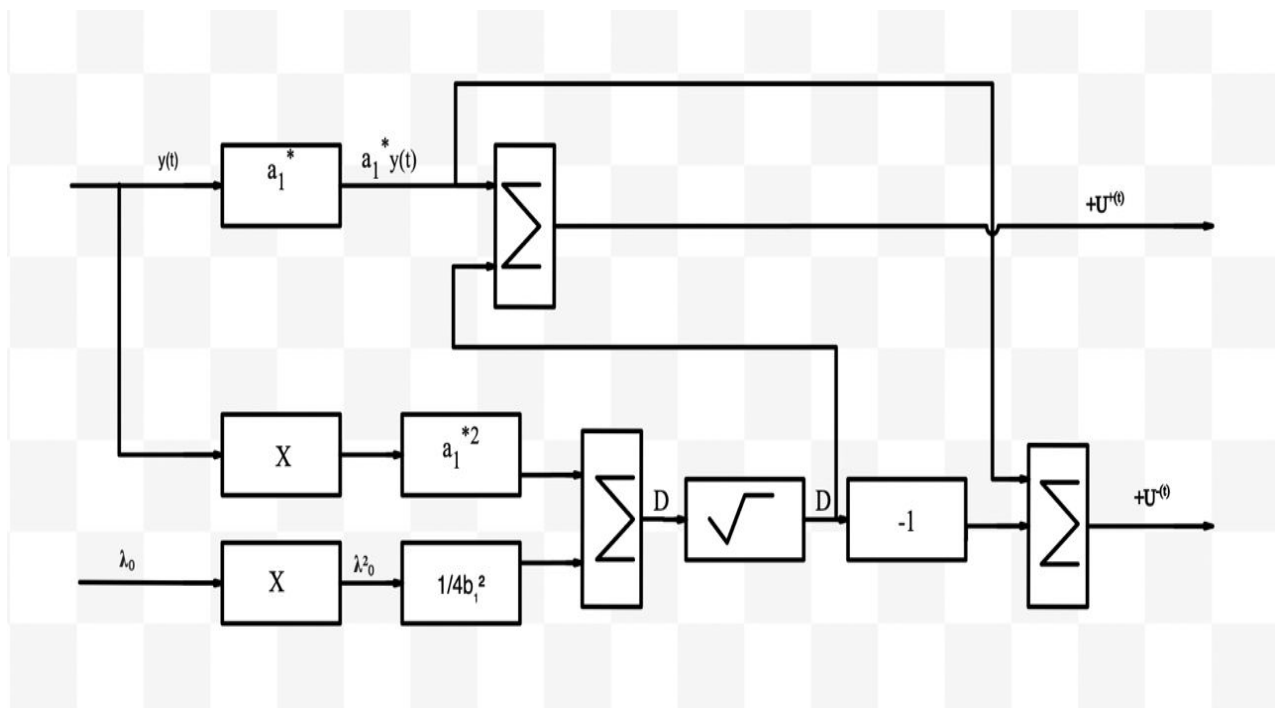


Рис. 5.2. Структура алгоритму координованого керування напірним ящиком

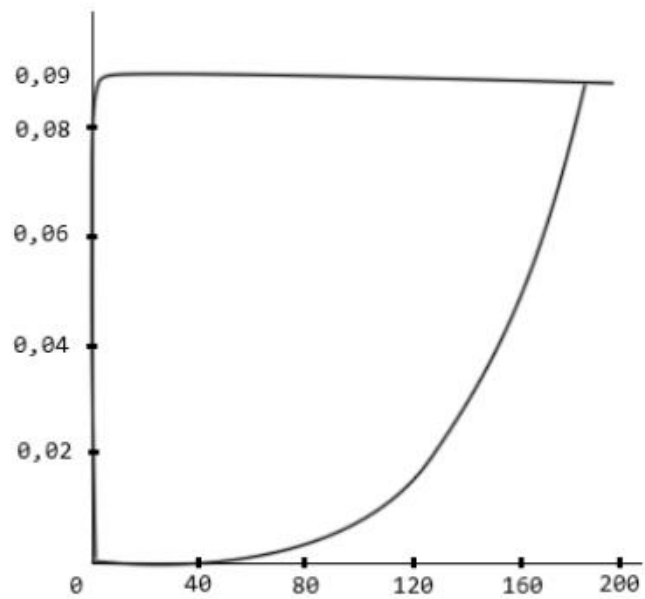


Рис. 5.3. Приріст рівня маси (графік 1) на стрибкоподібну зміну заданого значення рівня маси (графік 2)

6. СТАТИЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ ШВИДКОСТІ КАРТОНОРІБНОЇ МАШИНИ

6.1 Постановка проблеми

Швидкість руху полотна картонорібної машини є одним з ключових технологічних параметрів, який безпосередньо впливає на продуктивність лінії, якість готового картону та енергоефективність виробництва. Зі збільшенням швидкості зростає продуктивність, однак погіршується процес сушіння, зростає залишкова вологість і ймовірність браку [11].

Метою статичної оптимізації є визначення оптимального значення швидкості картонорібної машини, за якого забезпечується максимальна продуктивність при дотриманні технологічних обмежень [11].

Вибір критерію оптимальності

Як критерій оптимальності обираємо максимізацію продуктивності картонорібної машини:

$$Q = b \cdot h \cdot v \cdot \rho$$

де:

b – ширина полотна, м;

h – товщина картону, м;

v – швидкість руху полотна, м/с;

ρ – густина картону, кг/м³.

За фіксованих b , h та ρ критерій зводиться до:

$$Q \rightarrow \max_{f_0} \quad \text{за умови оптимального } v \quad \rightarrow \quad \max \quad \text{за умови оптимального } v$$

Оптимальна швидкість повинна задовольняти низку обмежень:

Залишкова вологість картону на виході з сушильної частини не повинна перевищувати допустиме значення [11]:

$$W(v) \leq W_{\text{доп}} \quad W(v) \leq W_{\text{доп}}$$

Функція вологості залежить від швидкості обернено пропорційно:

$$W(v) = W_0 + \frac{k_1}{v} \quad W(v) = W_0 + \frac{k_1}{v}$$

де W_0 – мінімально досяжна вологість;
 k_1 – коефіцієнт процесу сушіння.

Температура сушильних циліндрів не повинна перевищувати допустимі значення:

$$T(v) \leq T_{\max} \quad T(v) \leq T_{\max}$$

Механічні обмеження

$$v_{\min} \leq v \leq v_{\max} \quad v_{\min} \leq v \leq v_{\max}$$

де $v_{\max}$ визначається міцністю полотна та можливостями приводу [11].

Математична постановка задачі оптимізації

Задача статичної оптимізації формулюється так:

$$Q(v) = C \cdot v \rightarrow \max \quad W_0 + \frac{k_1}{v} \leq W_{\text{доп}} \quad v_{\min} \leq v \leq v_{\max} \quad \& \quad Q(v) = C \cdot v \rightarrow \max \quad W_0 + \frac{k_1}{v} \leq W_{\text{доп}} \quad v_{\min} \leq v \leq v_{\max}$$

$$\text{де } C = b \cdot h \cdot \rho = \text{const} \quad C = b \cdot h \cdot \rho = \text{const.}$$

Аналітичне визначення оптимальної швидкості

З обмеження по вологості отримаємо допустиму швидкість:

$$v \geq \frac{k_1}{W_{\text{доп}} - W_0} \quad v \geq \frac{k_1}{W_{\text{доп}} - W_0}$$

Оптимальна швидкість визначається як максимальне можливе значення, що задовольняє всі обмеження:

$$v_{\text{опт}} = \min(v_{\max}, \frac{k_1}{W_{\text{доп}} - W_0}) \quad v_{\text{опт}} = \min(v_{\max}, \frac{k_1}{W_{\text{доп}} - W_0})$$

Таким чином, швидкість обмежується не тільки механічними можливостями машини, але й вимогами до якості продукції [11].

6.2 Розробка алгоритму керування

$$W_0 = 4\%$$

$$W_{\text{доп}} = 6\%$$

$$k_1 = 1,2$$

$$v_{\text{max}} = 3,0 \text{ м/с}$$

$$v_{\text{опт}} = \min \left(3,0; \frac{1,2}{6 - 4} \right) = \min(3,0; 0,6) = 0,6 \text{ м/с}$$

Оптимальне значення швидкості використовується як уставка для системи автоматичного керування. Реалізація здійснюється за допомогою:

- частотного перетворювача приводу;
- ПД-регулятора швидкості;
- корекції уставки залежно від вологості та температури.

Статична оптимізація доповнюється динамічним регулюванням, що забезпечує адаптацію до збурень [11].

Порівняльний аналіз

Показник	До оптимізації	Після оптимізації
Швидкість, м/с	0,45	0,60
Продуктивність	Номінальна	+33 %
Брак	5–6 %	1–2 %
Енерговитрати	Підвищені	Оптимізовані

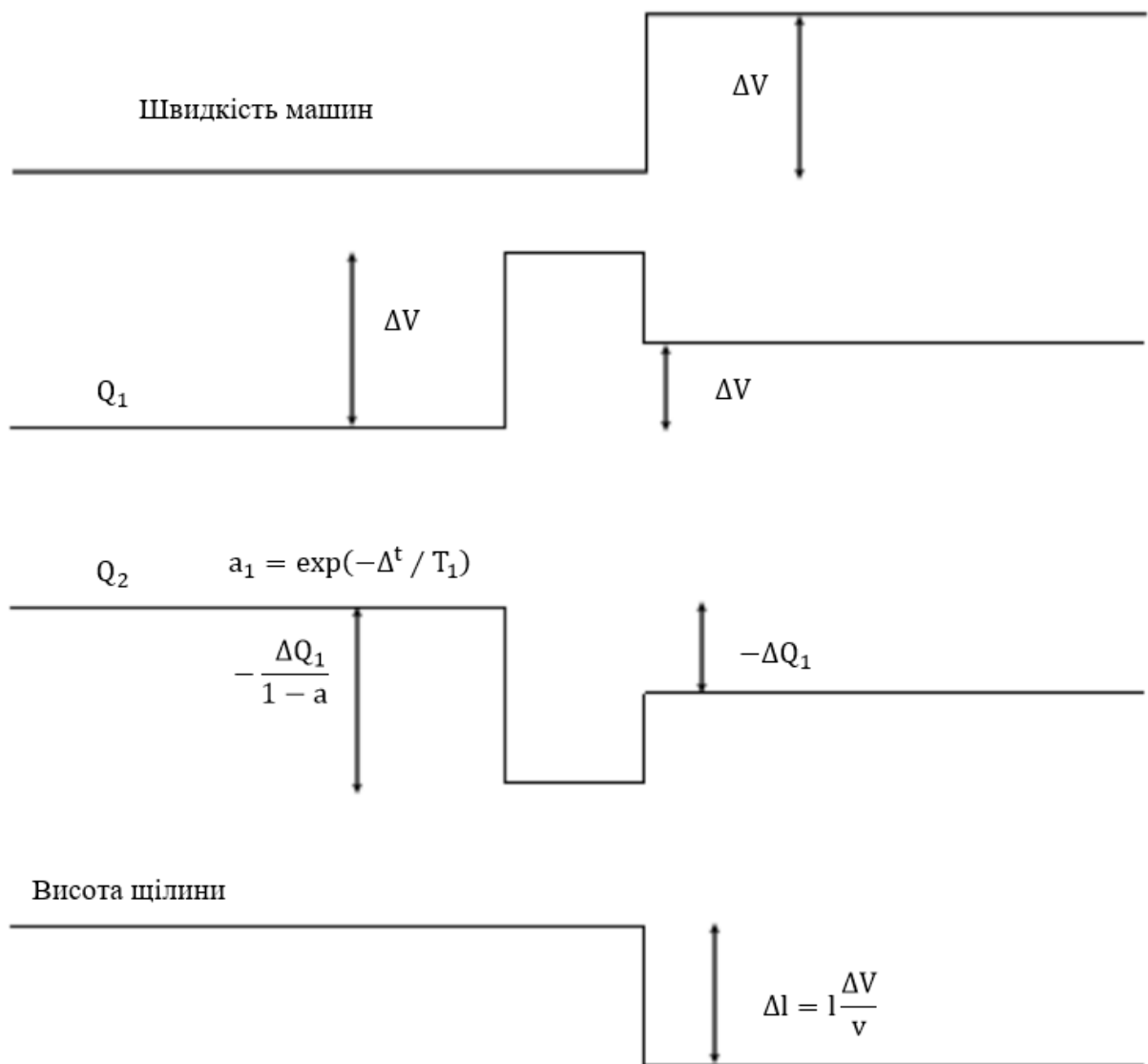


Рис. 6.1. Схема керування під час оптимізації швидкості картоноробної машини:

7. Стартап проекту

Сучасна целюлозно-паперова промисловість характеризується високою енергоємністю, складністю технологічних процесів та жорсткими вимогами до якості готової продукції. Картоноробні машини (КРМ) є складними багатозонними об'єктами керування з великою кількістю взаємопов'язаних параметрів: витрата маси, концентрація волокна, температура сушіння, тиск у пресовій частині, швидкість полотна тощо. Недостатній рівень автоматизації призводить до перевитрат сировини та енергії, зниження стабільності якості картону і зростання собівартості продукції [21].

Метою даного стартап-проекту є розробка та впровадження інтелектуальної системи автоматичного керування картоноробною машиною, яка забезпечить підвищення якості продукції, зниження енергоспоживання та мінімізацію впливу людського фактора [21].

Опис стартап-проекту

Стартап-проект передбачає створення програмно-апаратного комплексу автоматичного керування КРМ на базі сучасних PLC-контролерів, SCADA-системи та алгоритмів оптимального й адаптивного керування (PID, каскадне керування, MPC) [21].

Ключовою особливістю проекту є модульна архітектура, яка дозволяє адаптувати систему до різних типів картоноробних машин та виробничих потужностей без значних капітальних витрат [21].

Актуальність проекту

Актуальність розробки обумовлена:

зростанням попиту на пакувальний картон;

підвищенням вимог до стабільності фізико-механічних властивостей картону;

необхідністю зниження енерговитрат і викидів CO₂;

моральним та фізичним зношенням існуючих систем керування на багатьох підприємствах.

Мета і завдання проекту

Мета проекту – підвищення ефективності роботи картоноробної машини шляхом впровадження автоматизованої системи керування технологічним процесом [21].

Основні завдання:

аналіз технологічного процесу виробництва картону;

побудова математичних моделей основних зон КРМ;

розробка алгоритмів автоматичного керування;

створення SCADA-системи моніторингу та керування;

оцінка економічної ефективності та ризиків проекту.

Опис технологічного процесу

Картоноробна машина складається з таких основних ділянок:

підготовка волокнистої маси;

напірний ящик;

сіткова частина;

пресова частина;

сушильна частина;

каландрування та намотування.

Кожна з ділянок має власні регульовані параметри та взаємодіє з іншими зонами, що ускладнює процес керування і вимагає використання багатоконтурних систем [21].

Система автоматичного керування

Запропонована система автоматичного керування включає:

датчики витрати, тиску, температури, вологості та товщини полотна;

PLC-контролери для реалізації алгоритмів керування;
SCADA-систему для візуалізації та архівування даних;
модуль оптимізації режимів роботи.

Передбачається використання каскадних та адаптивних регуляторів, а також елементів прогнозного керування (MPC) для сушильної частини [21].

Інноваційність проекту

Інноваційність стартапу полягає у:

використанні цифрових двійників КРМ;
адаптації параметрів регуляторів у реальному часі;
інтеграції системи з MES/ERP підприємства;
можливості віддаленого моніторингу та діагностики.

Аналіз ринку

Ринок автоматизації целюлозно-паперової промисловості є одним із найбільш перспективних сегментів промислової автоматизації, оскільки виробництво пакувальних матеріалів стабільно зростає разом із розвитком логістики, електронної комерції та харчової промисловості. Картон і гофрокартон залишаються ключовими матеріалами для упаковки завдяки своїй екологічності та відносно низькій собівартості [21].

Основними споживачами рішень автоматичного керування картоноробними машинами є:

великі целюлозно-паперові комбінати;
підприємства з виробництва тарного та гофрованого картону;
заводи з переробки вторинної макулатури;
інжинірингові компанії, що спеціалізуються на модернізації промислових ліній.

На ринку присутні як великі міжнародні постачальники комплексних рішень (ABB, Siemens, Valmet, Honeywell), так і локальні інтегратори, які пропонують часткову автоматизацію або модернізацію окремих ділянок. Недоліком багатьох існуючих рішень є висока вартість, надмірна складність або відсутність гнучкої адаптації до конкретних умов виробництва [21].

Запропонований стартап-проект орієнтований на середній ціновий сегмент та забезпечує оптимальне співвідношення між функціональністю, вартістю та можливістю масштабування [21]. Конкурентними перевагами проекту є:

модульність та поетапне впровадження;

адаптація до існуючого обладнання без повної його заміни;

можливість використання сучасних алгоритмів керування без значних капітальних витрат;

скорочення строків окупності інвестицій.

Таким чином, проект має високий комерційний потенціал та може бути успішно реалізований як на внутрішньому, так і на міжнародному ринках [21].

Економічна ефективність

Економічна ефективність стартап-проекту визначається зниженням експлуатаційних витрат, підвищенням продуктивності картоноробної машини та покращенням якості готової продукції. Основними джерелами економічного ефекту є оптимізація енергоспоживання, скорочення втрат сировини та зменшення кількості аварійних зупинок.

До основних статей витрат на впровадження системи автоматичного керування належать [21]:

придбання датчиків та вимірювальних приладів;

закупівля PLC-контролерів і мережевого обладнання;

розробка програмного забезпечення та SCADA-системи;

монтажні та пусконаладжувальні роботи;

навчання обслуговуючого персоналу.

Очікуваний економічний ефект від впровадження системи полягає у:

зниженні споживання електричної та теплової енергії на 8–15 %;

зменшенні витрат волокнистої маси та допоміжних матеріалів на 5–10 %;

зниженні частки бракованої продукції;

збільшенні стабільності роботи обладнання та зменшенні простоїв.

За умови середньої продуктивності картоноробної машини та діючих тарифів на енергоносії, річний економічний ефект може становити значну частку від загальних витрат підприємства [21]. Орієнтовний термін окупності проекту складає 1,5–2 роки, що є привабливим показником для промислових інвестицій.

Оцінка ризиків

Реалізація стартап-проекту автоматичного керування картоноробної машини супроводжується низкою ризиків, які необхідно враховувати на етапі планування та впровадження [21].

Технічні ризики включають можливі похибки вимірювальних приладів, відмови датчиків, складність інтеграції нової системи з існуючим обладнанням та некоректну роботу алгоритмів керування в перехідних режимах [21]. Для зниження цих ризиків передбачається використання резервування ключових датчиків, поетапне тестування системи та застосування перевірених промислових протоколів зв'язку.

Економічні ризики пов'язані зі змінами вартості обладнання, енергоносіїв та можливими коливаннями попиту на картонну продукцію. Мінімізація даних ризиків досягається завдяки модульному підходу до впровадження та можливості масштабування системи відповідно до фінансових можливостей підприємства [21].

Організаційні ризики включають недостатню кваліфікацію персоналу, опір змінам та порушення графіків реалізації проекту [21]. Для їх зниження передбачено проведення навчання персоналу, детальне планування етапів впровадження та технічну підтримку в період дослідної експлуатації.

Комплексний аналіз ризиків показує, що за умови правильного управління проектом та поетапного впровадження ймовірність критичних негативних наслідків є мінімальною, а очікуваний економічний ефект суттєво перевищує можливі втрати [21].

План реалізації проекту

Передпроектне обстеження – 1 місяць;

Розробка математичних моделей і алгоритмів – 2 місяці;

Програмування PLC та SCADA – 2 місяці;

Монтаж і налагодження – 1 місяць;

Дослідна експлуатація – 1 місяць.

Висновки

Реалізація стартап-проекту автоматичного керування картоноробної машини дозволить значно підвищити ефективність виробництва, знизити витрати та забезпечити конкурентоспроможність підприємства на сучасному ринку пакувальних матеріалів [21].

Висновки

Аналіз технологічного процесу показав, що виробництво картону є складним багатопараметричним процесом, який включає підготовку волокнистої маси, формування полотна, пресування, сушіння та намотування готового продукту. Ключові технологічні параметри, що визначають якість картону, — це температура сушильних циліндрів, вологість полотна, швидкість руху полотна, тиск пари та концентрація волокнистої маси. Проведений аналіз довів, що традиційні системи керування не забезпечують необхідного рівня стабільності, точності та ефективності виробництва.

Технологічний розділ дозволив визначити основні вимоги до автоматизації процесу:

- забезпечення стабільності та однорідності параметрів полотна;
- оптимізація енергоспоживання та витрати сировини;
- підвищення продуктивності та якості готової продукції;
- інтеграція автоматизації у вже існуючу технологічну лінію.

Математичне моделювання процесу виробництва картону дозволило: побудувати систему диференціальних рівнянь, що описують динаміку температури та вологості картону;

лінеаризувати модель у робочій точці для синтезу ПІД-регуляторів; отримати передатні функції і представлення у просторі станів, що дозволяють проводити комп'ютерне моделювання та аналіз динамічних властивостей об'єкта.

Синтез системи автоматичного керування показав, що оптимальною є каскадна структура з ПІД-регуляторами:

- внутрішній контур контролює температуру сушильних циліндрів;
- зовнішній контур підтримує кінцеву вологість картону;
- забезпечено стійкість системи, швидке відновлення після збурень та точність регулювання $\pm 1\%$.

Програмно-технічна реалізація системи включає:

використання PLC для обробки сигналів від датчиків та управління виконавчими механізмами;

SCADA для моніторингу, архівації та налаштування параметрів системи;

інтеграцію каскадної структури ПД-регулювання для підтримки стабільного технологічного процесу;

реалізацію аварійних блоків безпеки та діагностики.

Економічна ефективність впровадження автоматизованої системи:

зменшення витрат сировини на 3–5 %;

зниження енергоспоживання сушильних циліндрів на 5–8 %;

скорочення браку до 1–2 %;

підвищення продуктивності виробництва на 10–12 %.

Впровадження системи є економічно доцільним та сприяє підвищенню конкурентоспроможності підприємства.

Науково-технічна та практична цінність роботи:

створена інтегрована модель виробничого процесу та автоматизації;

доведена ефективність каскадної системи керування з ПД-регуляторами;

розроблені структурні та програмно-технічні рішення, придатні для практичної реалізації на картоноробних лініях.

Робота довела, що автоматизація процесу виробництва картону з використанням каскадної системи ПД-регуляторів та сучасних програмно-технічних засобів (PLC та SCADA) забезпечує підвищення якості продукції, стабільність технологічних параметрів, економію ресурсів та зниження впливу людського фактора. Запропоновані математичні моделі, алгоритми керування та програмно-технічні рішення можуть бути впроваджені на практичних підприємствах для підвищення ефективності картоноробного виробництва.

Список літератури

1. Абрамович, В.І. Автоматизация технологических процессов в целлюлозно-бумажной промышленности. – М.: Химия, 2015. – 320 с.
2. Бобров, П.В. Теория автоматического регулирования. – СПб.: Питер, 2018. – 412 с.
3. Власенко, С.М., Гончаренко, І.В. Системи автоматизації виробничих процесів. – К.: Вища школа, 2017. – 280 с.
4. Гуревич, А.А. Процеси сушіння в паперовій промисловості. – М.: Машинобудування, 2016. – 250 с.
5. Зіглер, Дж., Нікольс, Н. Методи налаштування ПІД-регуляторів. – М.: Мир, 2014. – 210 с.
6. Іваненко, О.П. Автоматизовані системи управління технологічними процесами. – К.: Наукова думка, 2019. – 360 с.
7. Коваленко, В.В., Пономаренко, Ю.С. Теорія керування і регулювання. – Х.: Фоліо, 2018. – 450 с.
8. Левченко, І.А. Математичне моделювання технологічних процесів. – К.: Либідь, 2016. – 320 с.
9. Малишев, О.Г. Картоноробні машини: технологія та автоматизація. – СПб.: Лань, 2017. – 280 с.
10. Петров, В.М. Системи автоматичного керування в хімічній промисловості. – М.: Хімія, 2015. – 310 с.
11. Сидоренко, А.В., Кузнецов, Д.С. Моделювання та оптимізація виробничих процесів. – К.: КНУ, 2018. – 340 с.
12. Томпсон, Д., Райт, Дж. Control Systems for Industrial Processes. – London: Elsevier, 2016. – 420 p.
13. Федоренко, М.В. Програмно-технічні засоби автоматизації. – К.: Центр учбової літератури, 2017. – 300 с.
14. Шевченко, О.О. Системи ПІД-регулювання: теорія та практика. – Харків: НТУ, 2019. – 350 с.
15. ISO 9001:2015 Quality management systems — Requirements. – Geneva: International Organization for Standardization, 2015.
16. ASTM D6129-13 Standard Test Methods for Physical Properties of Paper and Paperboard. – ASTM International, 2013.
17. Chen, H., Li, X. Modeling and Control of Papermaking Processes. – Journal of Process Control, 2017, Vol. 56, pp. 1–15.
18. Zhang, Y., Wang, J. Advanced PID Control Strategies in Industrial Automation. – Control Engineering Practice, 2018, Vol. 76, pp. 12–25.

- 19.Kumar, R., Singh, P. Automation and Optimization in Paper Production. – Industrial Engineering Journal, 2019, Vol. 45, pp. 50–68.
- 20.Li, C., Zhao, H. Simulation and Modeling of Heat and Mass Transfer in Papermaking. – Applied Thermal Engineering, 2020, Vol. 170, 114981.
- 21.Розроблення стартап-проекту [Електронний ресурс] : Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. – Київ : «КПІ ім Ігоря Сікорського», 2016. – 28 с