

**БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА**

БР.АКПзд-33.00.00.000 ПЗ

Група АКПзд-23-2К

**Михайло Кімак**

**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

Кімак Михайло Іванович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК

681.5

(індекс)

## БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Автоматизація технологічного процесу виробництва паперу

(назва роботи)

Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(назва освітньої програми)

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

(шифр і назва спеціальності)

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

### Нормоконтроль

асистент

(посада)

(підпис)

(дата)

Л.І.Лагойда

(ініціали та прізвище)

### Здобувач освітнього ступеня

АКПзд-23-2К

(шифр групи)

(підпис)

(дата)

М.І.Кімак

(ініціали та прізвище)

### Рецензент

доцент

(посада)

(підпис)

(дата)

М.І.Когутяк

(ініціали та прізвище)

### Науковий керівник

доцент

(посада)

(підпис)

(дата)

В.С.Борин

(ініціали та прізвище)

### Допущено до захисту

### Завідувач кафедри

доцент

(посада)

(підпис)

(дата)

А.І. Лагойда

(ініціали та прізвище)

**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 перший (бакалаврський)

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

(шифр і назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри АКІТ.**

\_\_\_\_\_ /Лагойда А.І./

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 р

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

Кімаку Михайлу Івановичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Автоматизація технологічного процесу виробництва паперу

керівник роботи Борин Василь Степанович, к.т.н., доцент

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

затвержені наказом закладу вищої освіти від « 07 » травня 20 25 року № 52/8

2. Строк подання студентом роботи 13.06.2025 року

3. Вихідні дані до роботи Технологічний регламент, літературні джерела

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ. Аналіз процесу виготовлення паперу та підходи до його автоматизації. Огляд розробок і впроваджень автоматизованих систем керування папероробних машин. Математичне моделювання процесу виробництва паперу. Технічна реалізація процесу виробництва паперу.

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

Лист 1 - Структурна схема виробництва паперу - БР.АКПзд - 33.00.00.000 01

Лист 2 - Технологічна схема процесу - БР.АКПзд - 33.00.00.000 02

Лист 3 - Математична модель процесу змішування - БР.АКПзд - 33.00.00.000 03

Лист 4 - Структурна схема оптимальної системи керування об'єктом - БР.АКПзд - 33.00.00.000 04

Лист 5 - Імітаційна модель оптимальної системи керування - БР.АКПзд - 33.00.00.000 05

Лист 6 - Функціональна схема паперопереробної машини - БР.АКПзд - 33.00.00.000 06

## 6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання 06 листопада 2024 року

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз процесу виготовлення паперу та підходи до його автоматизації.	25 березня 2025	
2	Огляд розробок і впроваджень автоматизованих систем керування папероробних машин.	15 квітня 2025	
3	Математичне моделювання процесу виробництва паперу.	05 травня 2025	
4	Технічна реалізація процесу виробництва паперу	30 травня 2025	

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

М.І.Кімак \_\_\_\_\_  
(ініціали та прізвище)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

В.С.Борин \_\_\_\_\_  
(ініціали та прізвище)

## АНОТАЦІЯ

У роботі розглядаються принципи та методи автоматизації технологічного процесу виробництва паперу, який є складним багатостадійним процесом, що включає підготовку волокнистої сировини, формування полотна, пресування, сушіння, каландрування та намотування готового продукту. Впровадження автоматизованих систем управління (АСУ) у виробництво паперу спрямоване на підвищення якості продукції, зменшення витрат енерго- і водних ресурсів, стабілізацію технологічних параметрів, зниження впливу людського фактора, а також забезпечення безпеки й екологічності виробництва.

Проаналізовано основні параметри, що підлягають автоматичному регулюванню, зокрема концентрацію волокнистої суспензії, швидкість полотна, тиск у пресовій частині, температуру сушильних циліндрів і вологість готового паперу. Описано структуру систем автоматичного керування, які включають засоби вимірювання, датчики, регулятори, програмовані логічні контролери (PLC), операторські панелі, а також засоби інтерфейсу "людина-машина" (HMI).

Особливу увагу приділено розробці математичних моделей окремих технологічних вузлів папероробної машини, що дозволяє проводити імітаційне моделювання, оптимізацію режимів та синтез систем керування. Запропоновано підходи до впровадження інтелектуальних регуляторів, які враховують змінність властивостей сировини та динамічні збурення в процесі виробництва.

**Ключові слова:** система керування, папір, моделювання процесів, виробництво, автоматизація, регулятор, автоматичне керування

## ABSTRACT

The paper examines the principles and methods of automating the technological process of paper production, which is a complex multi-stage process that includes the preparation of fibrous raw materials, web formation, pressing, drying, calendering, and winding of the finished product. The introduction of automated control systems (ACS) in paper production is aimed at improving product quality, reducing energy and water consumption, stabilizing technological parameters, reducing the impact of the human factor, and ensuring the safety and environmental friendliness of production.

The main parameters subject to automatic regulation were analyzed, in particular the concentration of the fibrous suspension, the web speed, the pressure in the press section, the temperature of the drying cylinders, and the humidity of the finished paper. The structure of automatic control systems is described, which include measuring devices, sensors, regulators, programmable logic controllers (PLC), operator panels, as well as human-machine interface (HMI) devices.

Particular attention is paid to the development of mathematical models of individual technological units of a paper machine, which allows for simulation modeling, optimization of modes, and synthesis of control systems. Approaches to the implementation of intelligent controllers that take into account the variability of raw material properties and dynamic disturbances in the production process are proposed.

**Keywords:** control system, paper, process modeling, production, automation, regulator, automatic control

## ЗМІСТ

	ст.
<b>ВСТУП .....</b>	<b>9</b>
<b>1 АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ ПАПЕРУ ТА ПІДХОДИ ДО ЙОГО АВТОМАТИЗАЦІЇ .....</b>	<b>11</b>
1.1 Аналіз технологічної схеми папероробної машини.....	11
Висновки до розділу.....	14
<b>2 ОГЛЯД РОЗРОБОК І ВПРОВАДЖЕНЬ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ПАПЕРОРОБНИХ МАШИН .....</b>	<b>16</b>
Висновок до розділу.....	19
<b>3 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА ПАПЕРУ .....</b>	<b>21</b>
3.1 Математичне моделювання окремих складових мокрої частини папероробної машини .....	21
3.2 Створення математичної моделі процесу змішування.....	23
3.3 Лінеаризація математичної моделі теплового об'єкта.....	26
3.4 Обчислення коефіцієнтів лінеаризованої математичної моделі КО.....	28
3.5 Визначення керованості і спостережливості об'єкта керування.....	33
3.6 Формування критерію оптимальності та якості керування технологічним процесом.....	37
3.7 Синтез оптимального П-регулятора.....	41
3.8 Визначення показників якості керованого об'єкта.....	46
Висновки до розділу.....	39

					<b>БР.АКПзд - 33.00.00.000 ПЗ</b>			
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Кімак М.І.			Автоматизація технологічного процесу виробництва паперу <b>Пояснювальна записка</b>	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.		Борин В.С.				6	54	
Реценз.		Когутяк М.І.				<b>ІФНТУНГ</b>		
Н. Контр.		Лагойда Л.І.				<b>АКПзд-23-2К</b>		
Затверд.		Лагойда А.І.						

<b>4 ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА ПАПЕРУ.....</b>	<b>49</b>
4.1 Вибір технічних засобів автоматизації.....	49
Висновки до розділу.....	51
<b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....</b>	<b>52</b>
<b>ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА.....</b>	<b>54</b>

					БР.АКПзд - 33.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ПРМ - папероробна машина

ФСА - функціональна схема автоматизації

АСУ - автоматизованих систем управління

ВМ - виконавчий механізм

ОК - об'єкт керування

ТП - технологічний процес

ТЗА - технічні засоби автоматизації

PLC - програмовані логічні контролери

АЦП - аналого-цифровий перетворювач

ПЗ - програмне забезпечення

АСК – автоматизована система керування

					БР.АКПзд - 33.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

## ВСТУП

Сучасне паперове виробництво є складним багатостадійним технологічним процесом, який охоплює широкий спектр фізико-хімічних та механічних перетворень. Ключовими етапами є підготовка волокнистої сировини, формування паперового полотна, пресування, сушіння, оздоблення та намотування готової продукції. На кожному з цих етапів необхідне точне дотримання технологічних параметрів, таких як концентрація суспензії, температура, вологість, тиск, швидкість руху полотна тощо. Відхилення від оптимальних режимів може призвести до значного погіршення якості паперу, зростання витрат енергоресурсів, зниження продуктивності та збільшення кількості відходів.

У зв'язку з цим виникає необхідність удосконалення систем керування виробничими процесами з метою забезпечення стабільності технологічних параметрів, підвищення ефективності використання ресурсів і зниження витрат. Автоматизація технологічного процесу виробництва паперу дозволяє досягти високого рівня точності, надійності та адаптивності управління, що є критично важливим у сучасних умовах конкурентного ринку та жорстких екологічних вимог.

Особливої актуальності набуває впровадження мікропроцесорної техніки, програмованих логічних контролерів (PLC), систем SCADA та HMI, які забезпечують гнучке налаштування та інтеграцію автоматизованих систем у різні ділянки виробництва. Застосування засобів автоматизації дає змогу реалізовувати складні алгоритми керування, включаючи адаптивні, нечіткі та оптимізаційні підходи, що враховують змінні характеристики сировини та динамічні впливи зовнішніх збурень.

Крім того, автоматизація сприяє зменшенню ролі людського фактора, підвищенню безпеки праці, зниженню аварійності та забезпеченню стабільної якості продукції. Для машин середньої та малої продуктивності особливо

					БР.АКПзд - 33.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

важливою є економічна ефективність автоматизованих систем керування, яку можна досягти за рахунок впровадження мікроЕОМ і компактних модульних систем.

Метою даного дослідження є аналіз можливостей і шляхів підвищення ефективності автоматизованого керування в процесі виробництва паперу шляхом розробки математичних моделей, вибору оптимальних параметрів регулювання, синтезу систем керування та їх апробації на практичних об'єктах. У роботі особливу увагу приділено мокрій частині папероробної машини як одному з ключових етапів формування властивостей готового продукту.

					БР.АКПзд - 33.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

# 1 АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ ПАПЕРУ ТА ПІДХОДИ ДО ЙОГО АВТОМАТИЗАЦІЇ

## 1.1 Аналіз технологічної схеми папероробної машини

На рисунку 1.1 представлено загальну схему процесу виготовлення паперу.

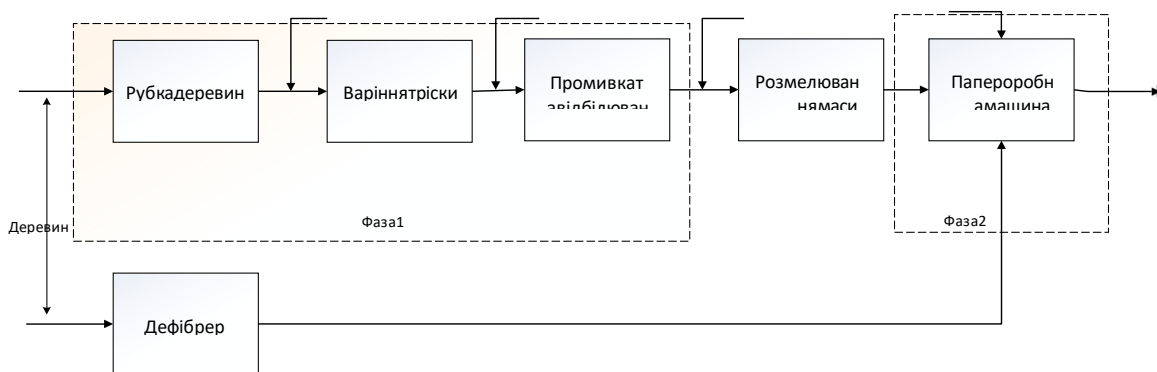


Рисунок 1.1 - Структурна схема виробництва паперу

У минулому для виготовлення паперу використовували ганчір'я та соломку, проте сьогодні єдиною сировиною для цього виду продукції є деревина. Перетворення деревини спочатку на целюлозу, а згодом — на папір є складним і багатостадійним технологічним процесом.

Деревина, що надходить із лісосировинної біржі, подається на рубальні машини, де подрібнюється на тріску. Тріска транспортується у варильний цех, де в котлах періодичної дії, під впливом хімічних реагентів, із неї виготовляється целюлоза. Після завершення стадій промивання (у промивальному цеху) та відбілювання (у відбілювальному цеху), целюлозу подають на операцію розмелювання, що здійснюється в конічних або дискових млинах.

З метою зниження собівартості сировини частину деревини спрямовують на деревномасний завод, де на дефібраторах отримують деревну масу. Ця маса, разом із відбіленою целюлозою та наповнювачами (такими як глинозем і крейда), подається безпосередньо на папероробну машину для формування паперового полотна.

									Арк.
									11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БР.АКПзд - 33.00.00.000 ПЗ				



Напірний ящик забезпечує рівномірний розподіл паперової маси та подає її суцільним потоком на сітку (позиція 12). Швидкість руху сітки узгоджена зі швидкістю потоку маси, що витікає з напірного ящика, що забезпечує стабільне формування паперового полотна. Конструктивно напірний ящик може бути відкритого або закритого типу. У варіанті із закритим типом передбачається наявність вакуумного простору над поверхнею маси, що дозволяє підтримувати постійний рівень у ящику. Такий підхід забезпечує стабільний тиск і, відповідно, необхідну швидкість витікання маси крізь регульовальну щілину, що є критичним для рівномірного формування паперового полотна.

Після подачі розбавленої маси на сітку розпочинається її основне зневоднення за допомогою різноманітних пристроїв, таких як реєстрові валики (позиція 13), відсмоктуючі ящики (позиція 14) та гауч-вал (позиція 15). Оскільки в обіговій воді міститься значна кількість волокон, основним завданням процесу зневоднення є ефективно затримання волокон на сітці. Концентрація волокон в обіговій воді змінюється в межах від 0,2 до 2 г/л залежно від типу паперу, що виготовляється на машині.

Відібрана в першій частині машини обігова вода подається до резервуару реєстрової води (позиція 23). Вода, зібрана відсмоктуючими ящиками (позиція 14), надходить у проміжний резервуар сосунної води (позиція 21), рівень якої підтримується сталим для забезпечення необхідного стовпа відсмоктуючої води. Далі ця вода переміщується у буферний резервуар (позиція 22), який зв'язаний із резервуаром реєстрової води (позиція 23). Застосування цієї води обумовлене її високим вмістом волокон, що сприяє економії сировини та підвищенню ефективності технологічного процесу.

Наприкінці сіткової частини машини формується паперове полотно з вологістю близько 80% (сухість — приблизно 20%). На цьому етапі зберігається повний вміст сухої речовини на одиницю площі (1 м<sup>2</sup>) полотна, за умови відсутності змін його геометричних розмірів, які можуть виникати в пресовій та сушильній частинах машини. Таким чином, маса абсолютно сухої

					БР.АКПзд - 33.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

речовини, що припадає на 1 м<sup>2</sup> паперового полотна, є відомою і постійною після сіткової частини.

Після мокрої частини паперове полотно транспортується за допомогою шерстяних сукон у пресову секцію машини, де вологість полотна знижується до приблизно 60% (сухість — 40%).

Для видалення від 50 до 90% вологи з паперового полотна необхідно провести його сушіння. Процес сушіння здійснюється на сушильних циліндрах (позиція 19), у які подається пар, а також за допомогою циркуляції теплого повітря, що забезпечує інтенсивне видалення вологи шляхом випаровування. Сушильна частина машини складається з двох секцій, при цьому подача пари в кожену секцію виконується незалежно одна від одної, тобто паралельно. Обсяг подачі теплого повітря регулюється вентиляторами, а температура підтримується шляхом контролю подачі пари.

Привід папероробної машини здійснюється через головний вал, який з'єднаний з електродвигуном. Окремі секції машини регулюються від головного валу за допомогою регуляторів швидкості, що дозволяє керувати співвідношенням швидкостей між секціями відповідно до технологічного регламенту. Такий спосіб керування є надзвичайно важливим, оскільки з одного боку паперове полотно піддається витягуванню під дією натягу, що виникає в результаті роботи пресів, а з іншого — дещо скорочується під впливом сушіння. Рівнодіюча цих двох сил визначає загальне видовження полотна у машинному напрямі, яке складає від 5% до 10%. Це видовження між двома секціями, що викликає натяг полотна, називається відносним видовженням.

### **Висновок до розділу**

У результаті проведеного аналізу технологічного процесу виготовлення паперу встановлено, що він являє собою складний багатоступеневий комплекс операцій, які потребують точного контролю і регулювання численних

					БР.АКПзд - 33.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

параметрів: концентрації волокнистої суспензії, вологості, температури, тиску, швидкості руху паперового полотна тощо. З огляду на це автоматизація технологічного процесу є необхідною складовою сучасного паперового виробництва, що забезпечує підвищення продуктивності, стабільності якості готової продукції та ефективного використання ресурсів.

Розглянуті основні етапи виробництва — від підготовки сировини, формування полотна, пресування, сушіння до фінішної обробки — мають свої специфічні технологічні особливості, які ускладнюють реалізацію автоматизованих систем керування. Зокрема, велика динамічна змінність властивостей сировини, неоднорідність волоконної структури та складність взаємодії фізико-хімічних процесів вимагають застосування адаптивних та інтелектуальних методів керування.

Аналіз існуючих підходів до автоматизації паперового виробництва свідчить про ефективність використання мікропроцесорної техніки, програмованих логічних контролерів (PLC), систем SCADA і HMI, що забезпечують оперативний моніторинг, регулювання і оптимізацію параметрів процесу. Особливо перспективним є впровадження математичного моделювання технологічних стадій та розробка дискретних регуляторів, які дозволяють підвищити точність і надійність систем управління навіть у вузькопрофільних та малопродуктивних папероробних машинах.

Встановлено, що ефективне керування паперовою масою на мокрій частині машини, а також контроль сушильного циклу і натягу полотна мають визначальний вплив на якість кінцевої продукції. Це підкреслює необхідність подальшого розвитку автоматизованих систем з урахуванням особливостей технології та сучасних методів управління.

Отже, комплексний підхід до автоматизації, що базується на глибокому розумінні технологічних процесів та застосуванні сучасних засобів обчислювальної техніки, є ключовим чинником підвищення ефективності та конкурентоспроможності паперового виробництва.

					БР.АКПзд - 33.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

## 2 ОГЛЯД РОЗРОБОК І ВПРОВАДЖЕНЬ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ПАПЕРОРІБНИХ МАШИН

Автоматизація папероробних машин є одним із ключових напрямів модернізації целюлозно-паперової промисловості, спрямованим на підвищення продуктивності, стабільності технологічних процесів та якості кінцевої продукції. Станом на сьогодні в цій галузі здійснено значний обсяг наукових і прикладних досліджень, що охоплюють як базові технологічні аспекти, так і питання інтеграції сучасних засобів обчислювальної техніки та програмного забезпечення.

Перші автоматизовані системи керування папероробними машинами базувалися на аналогових регуляторах та простих системах ПД-регулювання, що дозволяло стабілізувати окремі параметри технологічного процесу, наприклад, натяг полотна чи тиск у пресовій секції. З розвитком мікропроцесорної техніки з'явилися цифрові системи управління, що забезпечують високу точність регулювання, можливість реалізації складних алгоритмів, збір і аналіз великих обсягів даних у реальному часі.

В останні десятиліття особливу увагу приділяють впровадженню програмованих логічних контролерів (PLC), систем SCADA та HMI, які дозволяють інтегрувати всі підсистеми керування папероробної машини в єдину автоматизовану систему. Це сприяє підвищенню оперативності прийняття рішень, можливості дистанційного моніторингу та керування технологічними параметрами.

Значний внесок у розвиток автоматизації зробили методи математичного моделювання та імітаційного моделювання технологічних процесів, які дозволяють оптимізувати налаштування регуляторів і прогнозувати поведінку системи при зміні умов виробництва. У цьому контексті застосовуються як класичні ПД-регулятори, так і адаптивні, нечіткі та інтелектуальні системи

					БР.АКПзд - 33.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

управління, здатні враховувати варіації сировини та збурення технологічного процесу.

Особливої актуальності набули розробки автоматизованих систем для вузькоформатних та малопродуктивних папероробних машин, де економічна доцільність автоматизації значною мірою залежить від вартості обладнання. Тут широке застосування знаходять компактні модульні рішення на базі мікроЕОМ, які забезпечують ефективне керування при мінімальних витратах.

Вітчизняні та зарубіжні дослідники активно працюють над удосконаленням сенсорних систем для контролю якості паперу в реальному часі, що дозволяє оперативно коригувати параметри процесу. Інтеграція таких систем з автоматизованим керуванням дає змогу забезпечити високий рівень стабільності технологічних режимів і знизити кількість браку.

Впровадження сучасних інформаційних технологій, зокрема IoT, Big Data та машинного навчання, відкриває нові перспективи для розвитку автоматизованих систем керування папероробними машинами, підвищуючи їх адаптивність і здатність до самонавчання.

Отже, аналіз існуючих розробок свідчить про постійний розвиток і вдосконалення автоматизованих систем керування папероробними машинами, спрямований на підвищення їх ефективності, гнучкості та інтегрованості у сучасні промислові комплекси.

Розглянуто автоматизовану систему керування технологічним процесом (АСКТП) виробництва паперу підприємства «Латбумпром», яка побудована за багатофункціональним принципом і виконує інформаційні, керувальні та допоміжні функції.

Функціональна структура, що ілюструє взаємозв'язок алгоритмів між собою та об'єктом керування, наведена на рисунку 2.1.

					БР.АКПзд - 33.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

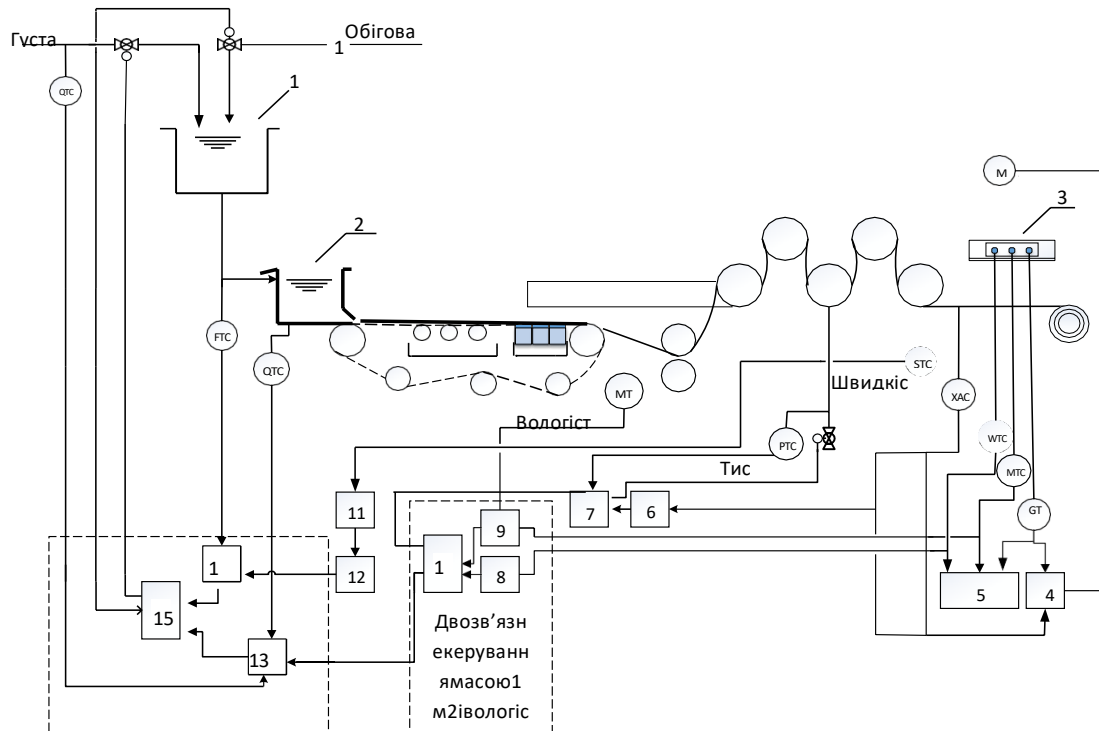


Рисунок 2.1 - Функціональна структура паперопереробної машини

Програмне забезпечення розглянутої автоматизованої системи керування технологічним процесом (АСКТП) побудоване за модульним принципом і реалізоване в середовищі операційної системи реального часу. Будь-який складний алгоритм представлено у вигляді послідовності взаємозалежних модулів, кожен із яких багаторазово використовується в різних алгоритмах. Застосування модульного підходу спрощує процес програмування, підвищує гнучкість програмного забезпечення та забезпечує кращу структурованість і прозорість коду.

Під час синтезу алгоритмів враховано необхідність адаптивного налаштування коефіцієнтів регулятора залежно від зміни швидкості машини, забезпечення автономності взаємопов'язаних каналів керування, а також можливість реалізації комбінованого керування за сигналами збурення та відхилення керованої змінної від її заданого значення.

Структурну схему керувального обчислювального комплексу виготовлення паперу зображено на рис.2.2.

					БР.АКПзд - 33.00.00.000 ПЗ		Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			18

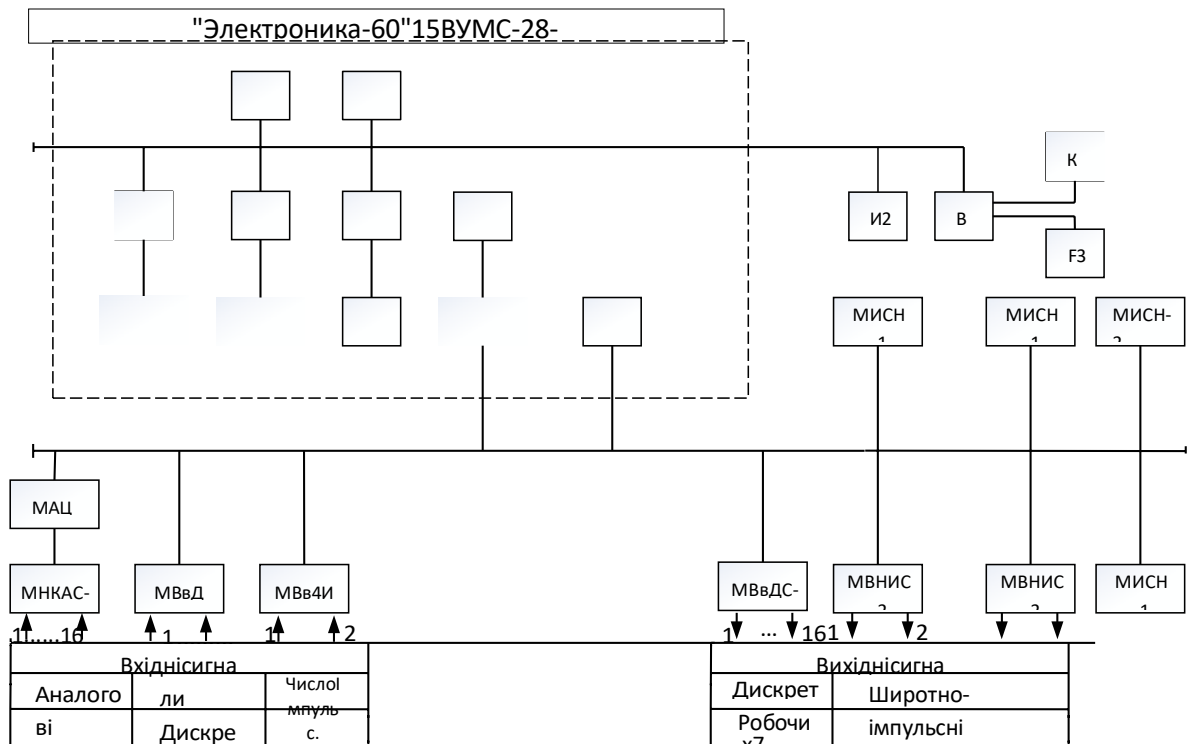


Рисунок 2.2 - Структурна схема керувального обчислювального комплексу виготовлення паперу

### Висновок до розділу

Аналіз сучасного стану розробок і впроваджень автоматизованих систем керування папероробними машинами показує, що ця галузь є надзвичайно динамічною і швидкозростаючою. Основні напрями розвитку пов'язані з переходом від традиційних аналогових та простих цифрових систем до складних модульних, адаптивних та інтелектуальних систем управління, які здатні ефективно працювати в умовах високої динамічності і змінних технологічних параметрів.

Впровадження сучасних програмованих логічних контролерів (PLC), систем SCADA та HMI дозволяє інтегрувати різні підсистеми керування, забезпечуючи гнучкість, масштабованість і підвищену надійність управління технологічними процесами паперового виробництва. Значну роль відіграють також сенсорні технології для точного контролю параметрів якості паперу в

реальному часі, що сприяє оперативному коригуванню процесів і мінімізації браку.

Особлива увага приділяється розробці математичних моделей і алгоритмів керування, які забезпечують адаптивність систем і можливість інтеграції різних типів регуляторів (ПД, нечіткі, інтелектуальні). Це є важливою передумовою для підвищення ефективності та стабільності виробництва, особливо у вузькоформатних і малопродуктивних папероробних машинах, де витрати на автоматизацію мають бути оптимізованими.

Крім того, застосування сучасних інформаційних технологій, таких як Інтернет речей (IoT), великі дані (Big Data) і машинне навчання, відкриває нові перспективи для розвитку систем автоматичного керування, підвищуючи їх здатність до самонавчання, прогнозування і оптимізації виробничих процесів.

В цілому, огляд свідчить про те, що автоматизація папероробних машин є ключовим фактором підвищення конкурентоспроможності підприємств целюлозно-паперової промисловості та розвитку інтелектуальних виробничих систем у сучасних умовах. Подальші дослідження мають бути спрямовані на удосконалення алгоритмів управління, розробку універсальних модульних платформ і інтеграцію інтелектуальних технологій для забезпечення високої якості і стабільності паперового виробництва.

					БР.АКПзд - 33.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

## 3 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА ПАПЕРУ

### 3.1 Математичне моделювання окремих складових мокрої частини папероробної машини

Процес виробництва паперу є складним технологічним комплексом, що включає в себе багато послідовних та паралельних операцій — від підготовки волокнистої сировини до формування, зневоднення, сушіння та обробки паперового полотна. Кожен із цих етапів характеризується великою кількістю фізико-хімічних і механічних процесів, взаємодія яких визначає кінцеву якість продукції та ефективність виробництва.

У зв'язку з високою складністю технології та необхідністю забезпечення стабільності параметрів процесу в умовах змінних вхідних впливів і варіацій сировини, математичне моделювання набуває особливого значення як потужний інструмент для аналізу, оптимізації та автоматизації виробничих процесів. Використання математичних моделей дозволяє системно вивчати динаміку процесу, прогнозувати його поведінку, розробляти ефективні алгоритми керування та забезпечувати підвищену надійність технологічних систем.

Математичне моделювання у паперовому виробництві охоплює різні рівні: від опису фізико-хімічних явищ, що відбуваються під час обробки сировини, до динамічних моделей формування паперового полотна та регулювання технологічних параметрів у автоматизованих системах керування. Особливо важливим є моделювання мокрої частини машини, де відбувається формування волокнистої структури, а також моделювання процесів сушіння та натягу полотна, які впливають на механічні властивості готової продукції.

Використання сучасних методів математичного моделювання, таких як диференціальні рівняння, імітаційне моделювання, методи оптимізації і теорії керування, сприяє розробці інтелектуальних систем автоматичного управління,

					БР.АКПзд - 33.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

які можуть адаптуватися до змін виробничих умов і підтримувати задані параметри з високою точністю.

Таким чином, математичне моделювання є невід'ємною складовою сучасного науково-технічного забезпечення виробництва паперу, що забезпечує підвищення його технологічної ефективності, якості продукції та економічної доцільності.

Виходячи з технологічної схеми папероробної машини (рис. 1.1), розроблено спрощену технологічну схему мокрої частини цієї папероробної машини (рис. 3.1).

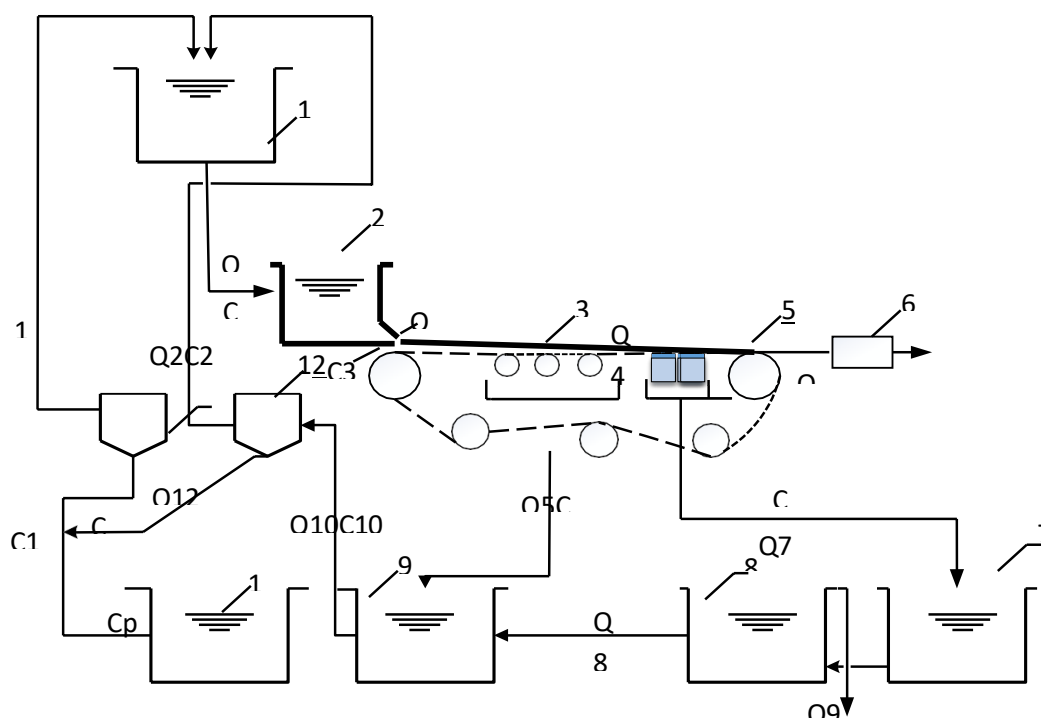


Рисунок 3.1 - Спрощена технологічна схема мокрої частини папероробної машини

Для побудови моделей окремих елементів і частин папероробної машини було прийнято такі припущення:

- ванни та змішувальні басейни мають сталий рівень води і масу за умови постійного об'єму.
- зміни концентрації маси в них є незначними.

					БР.АКПзд - 33.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

- додавання свіжої води у мокру частину машини не враховується.

Розглядається змішувач, принципова схема якого зображена рис. 3.2.

Змішувач маси високої концентрації (МВК) з обіговою водою (ОВ) призначений для одержання маси низької концентрації (МНК), яка подається до напірного ящика.

Нехай  $Q_1$  — витрата маси високої концентрації з концентрацією  $P_1$ , а  $Q$  — витрата обігової води з концентрацією  $C_1$ ;  $H$  — рівень рідини в змішувачі;  $Q$  — витрата розбавленої маси з концентрацією  $P_0$ . У цьому випадку число вхідних і вихідних потоків дорівнює  $n=2$ , а число параметрів —  $p=2$ .

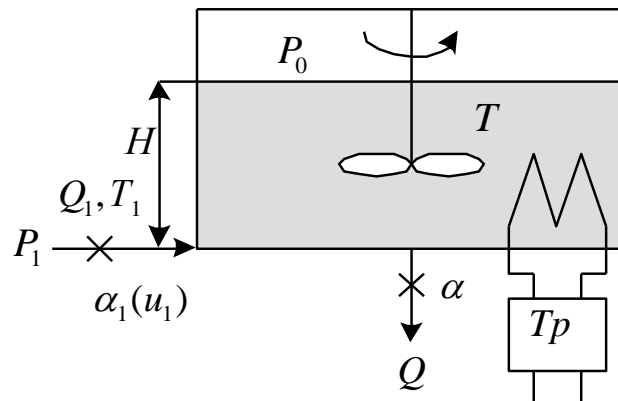


Рисунок 3.2 - Принципова схема об'єкту керування

### 3.2 Створення математичної моделі процесу змішування

На рис. 3.3 показано змішувач з електропідігрівачем, напругу на якому можна регулювати за допомогою тиристорного регулятора  $TP$ . В ємність подається потік рідини  $Q_1$ , а відбирається  $Q$ . Витрату  $Q_1$  можна регулювати за допомогою регулюючого органу з характеристикою  $\alpha_1(U)$ .

Задачею регулювання є підтримання постійних в ємності температури  $T$  і рівня  $H$ . Отже, вхідні величини це витрата  $Q_1$  і струм  $I$ , а вихідні величини  $T, H$ .

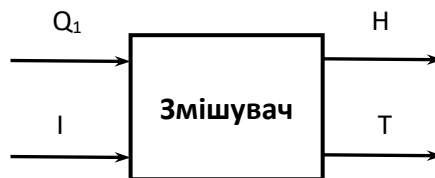


Рисунок 3.3 – Модель «вхід-вихід» змішувача

Побудову математичної моделі будемо здійснювати при таких допущеннях:

- нагрівається ідеальна однофазна рідина (її густина не залежить від температури і тиску);
- потік тепла від джерела до рідини не залежить від температури середовища, що нагрівається;
- нехтуємо втратами тепла на тертя і завихрення рідини;
- в ємності відбувається ідеальне перемішування рідини так, що температура в ємності дорівнює її температурі на виході;
- нехтуємо теплообміном між рідиною та навколишнім середовищем;
- тиск  $P_1$ , а також температура  $T_1$  – постійні.

Об'єм рідини в ємності позначимо через  $V$ . Зміна об'єму рідини підпорядковується рівнянню:

$$\frac{dV}{dt} = Q_1 - Q. \quad (3.1)$$

Об'ємні витрати визначимо з рівнянь:

$$Q_1 = \alpha_1(U)(P_1 - P_0 - \rho g H)^{1/2} \quad (3.2)$$

$$Q = \alpha \cdot (\rho g H)^{1/2} \quad (3.3)$$

Оскільки поперечний переріз ємності змінний, то

$$V = L \cdot S(h), \quad (3.4)$$

де  $L$  - довжина лежачої циліндричної ємності;

$S(h)$  - функція зміни площі дзеркала рідини в залежності від висоти стовпа рідини в ємності

					БР.АКПзд - 33.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

$$\frac{dV}{dt} = \alpha_1(U)(P_1 - P_0 - \rho gH)^{1/2} - \alpha \cdot (\rho gH)^{1/2} \quad (3.5)$$

Тепловий баланс для рідини визначається наступним рівнянням:

$$\{Швидкість\ зміни\ ентальпії\} = \{прихід\ тепла\} - \{відхід\ тепла\},$$

в якому прихід тепла – це тепло рідини, яке поступає з потоком  $Q_1$ , а тепловий потік від електропідігрівача до рідини – тепло, що відводиться з потоком  $Q$ .

Отже,

$$\frac{d(\rho cVT)}{dt} = \rho Q_1 cT_1 + I^2 R - \rho Q cT \quad (3.6)$$

де  $C$  – теплоємність рідини;  $\rho$  – її густина;  $R$  – опір електропідігрівача.

Величини  $Q_1$  і  $Q$  визначаються з рівнянь (1.2) і (1.3). Отримаємо

$$\rho c \frac{d(VT)}{dt} = \rho c T_1 \alpha_1(U)(P_1 - P_0 - \rho gH)^{1/2} + I^2 R - \rho c T \alpha \cdot (\rho gH)^{1/2} \quad (1.7)$$

Таким чином, математична модель даного об'єкту буде мати вигляд

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dV}{dt} = \alpha_1(U)(P_1 - P_0 - \rho gH)^{1/2} - \alpha \cdot (\rho gH)^{1/2} \\ \rho c \frac{d(VT)}{dt} = \rho c T_1 \alpha_1(U)(P_1 - P_0 - \rho gH)^{1/2} + I^2 R - \rho c T \alpha \cdot (\rho gH)^{1/2} \end{array} \right. \quad (3.8)$$

					БР.АКПзд - 33.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

### 3.3 Лінеаризація математичної моделі теплового об'єкта

Лінеаризація – це процес переходу від нелінійних диференціальних рівнянь до лінійних. Математичною основою лінеаризації є розклад нелінійної функції в ряд Тейлора, в якому залишаються тільки перші члени розкладу.

Лінеаризацію математичної моделі об'єкта зробимо при допущенні, що відхилення вихідних величин  $H$  і  $T$  від своїх усталених значень  $H^0$  і  $T^0$  незначні, так що нелінійні функції, які входять в рівняння системи (1.8) можна розкласти в ряд Тейлора і обмежитись лише лінійними членами розкладу.

Нехай

$$H \approx H^{(0)} + \Delta H, \quad (3.9)$$

$$T \approx T^{(0)} + \Delta T, \quad (3.10)$$

$$\begin{aligned} Q_1 &\approx Q_1^{(0)} + \Delta Q_1 \\ I &\approx I^{(0)} + \Delta I \end{aligned} \quad (3.11)$$

Знайдемо об'єм рідини в ємності. Для цього скористаємось довідниковою формулою

$$V(H) = \int_0^H S(x) dx. \quad (3.12)$$

Взявши інтеграл отримаємо наступне співвідношення

$$V(H) = L \left[ R^2 \arccos\left(\frac{R-H}{R}\right) - (R-H)\sqrt{R^2 - (R-H)^2} \right], \quad (3.13)$$

де  $R$  – радіус основи циліндра;

					БР.АКПзд - 33.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

$H$  – висота наливу.

Враховуючи вищенаведені перетворення система рівнянь математичної моделі (3.8) буде представлено в наступному вигляді

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d}{dt} [\rho L \cdot (R^2 \arccos\left(\frac{R-H}{R}\right) - (R-H)\sqrt{R^2 - (R-H)^2})] &= \alpha_1(U)(P_1 - P_0 - \rho g H)^{1/2} - \\ &- \alpha \cdot (\rho g H)^{1/2} \\ \frac{d}{dt} [\rho L \cdot (R^2 \arccos\left(\frac{R-H}{R}\right) - (R-H)\sqrt{R^2 - (R-H)^2})] &= \rho c T_1 \alpha_1(U)(P_1 - P_0 - \rho g H)^{1/2} + \\ &+ I^2 R - \rho c T \alpha \cdot (\rho g H)^{1/2} \end{aligned} \right. \quad (3.14)$$

Розкладемо в ряд Тейлора  $S(H)$ :

$$\begin{aligned} S(H) &= r^2 \arccos\left(\frac{r-H^0}{r}\right) - (r-H^0)\sqrt{2H^0 r - H^{02}} + \\ &+ 2\sqrt{2H^0 r - H^{02}} \Delta H \end{aligned} \quad (3.15)$$

Враховуючи нульові початкові умови  $\frac{dH^{(0)}}{dt} = 0$  отримаємо:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dH}{dt} &= -\frac{\alpha g}{4L\sqrt{2H^{(0)}r - H^{(0)2}}\sqrt{\rho g H^{(0)}}} \cdot \Delta H + \frac{\alpha_1'(u)\sqrt{P_1 - P_0 - \rho g H^{(0)}}}{2\rho L\sqrt{2H^{(0)}r - H^{(0)2}}} \cdot \Delta \alpha_1(u) \\ \frac{dT}{dt} &= \frac{T^{(0)}\alpha_1'(u)\sqrt{P_1 - P_0 - \rho g H^{(0)}}}{2LH^{(0)}\sqrt{2H^{(0)}r - H^{(0)2}}} \cdot \Delta \alpha_1(u) + \frac{\alpha_1(u)\sqrt{P_1 - P_0 - \rho g H^{(0)}}}{2LH^{(0)}\sqrt{2H^{(0)}r - H^{(0)2}}} \cdot \Delta T - \\ &- \frac{\rho g T^{(0)}\alpha_1(u)}{4LH^{(0)}\sqrt{2H^{(0)}r - H^{(0)2}}\sqrt{P_1 - P_0 - \rho g H^{(0)}}} \cdot \Delta H + \frac{I^{(0)}R}{\rho c L \cdot H^{(0)}\sqrt{2H^{(0)}r - H^{(0)2}}} \cdot \Delta I - \\ &- \frac{\alpha\sqrt{\rho g H^{(0)}}}{2LH^{(0)}\sqrt{2H^{(0)}r - H^{(0)2}}} \cdot \Delta T - \frac{\rho g \alpha}{4LH^{(0)}\sqrt{2H^{(0)}r - H^{(0)2}}\sqrt{\rho g H^{(0)}}} \cdot \Delta H \end{aligned} \right. \quad (3.15)$$

Проведемо наступні заміни в даній системі:

					БР.АКПзд - 33.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

$$\Delta H = x_1, \Delta T = x_2, \Delta \alpha_1(u) = u_1, \Delta I = u_2. \quad (3.16)$$

Запишемо формули для обчислення коефіцієнтів  $a_{ij}$  та  $b_{ij}$ :

$$a_{11} = -\frac{\alpha g}{4L\sqrt{2H^{(0)}r - H^{(0)2}}\sqrt{\rho g H^{(0)}}}$$

$$b_{11} = \frac{\alpha_1'(u_0)\sqrt{P_1 - P_0 - \rho g H^{(0)}}}{2\rho L\sqrt{2H^{(0)}r - H^{(0)2}}}$$

$$a_{21} = -\left(\frac{\rho g T^{(0)}\alpha_1(u_0)}{4LH^{(0)}\sqrt{2H^{(0)}r - H^{(0)2}}\sqrt{P_1 - P_0 - \rho g H^{(0)}}} + \frac{\rho g \alpha}{4LH^{(0)}\sqrt{2H^{(0)}r - H^{(0)2}}\sqrt{\rho g H^{(0)}}}\right)$$

$$a_{22} = \frac{\alpha_1(u_0)\sqrt{P_1 - P_0 - \rho g H^{(0)}}}{2LH^{(0)}\sqrt{2H^{(0)}r - H^{(0)2}}} - \frac{\alpha\sqrt{\rho g H^{(0)}}}{2LH^{(0)}\sqrt{2H^{(0)}r - H^{(0)2}}}$$

$$b_{21} = \frac{T^{(0)}\alpha_1'(u_0)\sqrt{P_1 - P_0 - \rho g H^{(0)}}}{2LH^{(0)}\sqrt{2H^{(0)}r - H^{(0)2}}}$$

$$b_{22} = \frac{I^{(0)}R}{\rho cL \cdot H^{(0)}\sqrt{2H^{(0)}r - H^{(0)2}}}$$

При відповідних замінах лінеаризована математична модель у формі Коші буде мати вигляд:

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = a_{11}x_1 + b_{11}u_1 \\ \frac{dx_2}{dt} = a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + b_{21}u_1 + b_{22}u_2 \end{cases}$$

### 3.4 Обчислення коефіцієнтів лінеаризованої математичної моделі КО

Для опису статичної характеристики регулюючого органу  $\alpha(u)$  використаємо поліном Лагранжа. Вихідні дані для апроксимації отримуємо із графіка залежності. Знаходження залежності за допомогою інтерполяційного многочлена Лагранжа виконаємо в програмі MathCad:

					БР.АКПзд - 33.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

Значення величин для рівняння  $a_1 = a(u_1)$  :

$$0\text{-а точка: } u_{10} := 0 \quad \alpha_{10} := 0$$

$$1\text{-а точка: } u_{11} := 0.03 \cdot 10^6 \quad \alpha_{11} := 0.016$$

$$2\text{-а точка: } u_{12} := 0.05 \cdot 10^6 \quad \alpha_{12} := 0.032$$

$$3\text{-а точка: } u_{13} := 0.08 \cdot 10^6 \quad \alpha_{13} := 0.068$$

$$4\text{-а точка: } u_{14} := 0.1 \cdot 10^6 \quad \alpha_{14} := 0.1$$

Розрахунок коефіцієнтів рівняння  $a_1 = a(u_1)$

$$L_{10}(u) := \alpha_{10} \cdot \frac{(u - u_{11}) \cdot (u - u_{12}) \cdot (u - u_{13}) \cdot (u - u_{14})}{(u_{10} - u_{11}) \cdot (u_{10} - u_{12}) \cdot (u_{10} - u_{13}) \cdot (u_{10} - u_{14})}$$

$$L_{11}(u) := \alpha_{11} \cdot \frac{(u - u_{10}) \cdot (u - u_{12}) \cdot (u - u_{13}) \cdot (u - u_{14})}{(u_{11} - u_{10}) \cdot (u_{11} - u_{12}) \cdot (u_{11} - u_{13}) \cdot (u_{11} - u_{14})}$$

$$L_{12}(u) := \alpha_{12} \cdot \frac{(u - u_{10}) \cdot (u - u_{11}) \cdot (u - u_{13}) \cdot (u - u_{14})}{(u_{12} - u_{10}) \cdot (u_{12} - u_{11}) \cdot (u_{12} - u_{13}) \cdot (u_{12} - u_{14})}$$

$$L_{13}(u) := \alpha_{13} \cdot \frac{(u - u_{10}) \cdot (u - u_{11}) \cdot (u - u_{12}) \cdot (u - u_{14})}{(u_{13} - u_{11}) \cdot (u_{13} - u_{12}) \cdot (u_{13} - u_{10}) \cdot (u_{13} - u_{14})}$$

$$L_{14}(u) := \alpha_{14} \cdot \frac{(u - u_{10}) \cdot (u - u_{11}) \cdot (u - u_{12}) \cdot (u - u_{13})}{(u_{14} - u_{11}) \cdot (u_{14} - u_{12}) \cdot (u_{14} - u_{13}) \cdot (u_{14} - u_{10})}$$

$$\alpha_1(u) := L_{10}(u) + L_{11}(u) + L_{12}(u) + L_{13}(u) + L_{14}(u)$$

					БР.АКПзд - 33.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29



Залежність гідравлічного опору від  $u$  на вході(знаходимо із графіка):

$$\alpha(u) := -3.33 \cdot 10^{-22} \cdot u^4 + 8.67 \cdot 10^{-17} \cdot u^3 + 3.33 \cdot 10^{-14} \cdot u^2 + 4.63 \cdot 10^{-7}$$

Обчислимо значення гідравлічних опорів:

$$\alpha_{10} := \frac{Q_1}{\sqrt{P_1 - P_0 \cdot -\rho \cdot g \cdot H_0}} \quad \alpha_{10} = 6.595 \times 10^{-4} \quad \frac{\text{кг}}{\text{с} \cdot \sqrt{\text{Па}}}$$

$$\alpha := \frac{Q_1}{\sqrt{\rho \cdot g \cdot H_0}} \quad \frac{\text{кг}}{\text{с} \cdot \sqrt{\text{Па}}}$$

$$\alpha = 0.085$$

Обчислюємо похідну  $\alpha_{1p}(u_1)$

$$\alpha_1(u_1) := -3.33 \cdot 10^{-22} \cdot u_1^4 + 8.67 \cdot 10^{-17} \cdot u_1^3 + 3.33 \cdot 10^{-14} \cdot u_1^2 + 4.63 \cdot 10^{-7} \cdot u_1$$

$$\frac{d}{du_1} \alpha_1(u_1) \text{ float, 3} \rightarrow -1.33 \cdot 10^{-21} \cdot u_1^3 + 2.60 \cdot 10^{-16} \cdot u_1^2 + 6.66 \cdot 10^{-14} \cdot u_1 + 4.63 \cdot 10^{-7}$$

$$\alpha_{1p}(u_1) := -1.33 \cdot 10^{-21} \cdot u_1^3 + 2.60 \cdot 10^{-16} \cdot u_1^2 + 6.66 \cdot 10^{-14} \cdot u_1 + 4.63 \cdot 10^{-7}$$

Обчислимо значення  $u_0$ :

$$u_{10} := 1$$

Given

$$-3.33 \cdot 10^{-22} \cdot u_{10}^4 + 8.67 \cdot 10^{-17} \cdot u_{10}^3 + 3.33 \cdot 10^{-14} \cdot u_{10}^2 + 4.63 \cdot 10^{-7} \cdot u_{10} = \alpha_{10}$$

$$u_{10} := \text{Find}(u_{10}) \quad u_{10} = 1.424 \times 10^3 \quad \text{Па}$$

Знаходимо значення параметрів моделі:

$$a_{11} := \frac{-\alpha \cdot g}{4 \cdot L \cdot \sqrt{2 \cdot H_0 \cdot r - (H_0)^2} \cdot \sqrt{\rho \cdot g \cdot H_0}}$$

$$b_{11} := \frac{\alpha l_p(u_{10}) \cdot \sqrt{P_1 - P_0} \cdot -\rho \cdot g \cdot H_0}{2 \cdot \rho \cdot L \cdot \sqrt{2 \cdot H_0 \cdot r - (H_0)^2}}$$

$$a_{21} := \left[ \frac{\rho \cdot g \cdot T_0 \cdot \alpha l(u_{10})}{4 \cdot L \cdot H_0 \cdot \sqrt{2 \cdot H_0 \cdot r - (H_0)^2} \cdot \sqrt{P_1 - P_0} \cdot -\rho \cdot g \cdot H_0} + \frac{\rho \cdot g \cdot \alpha}{4 \cdot L \cdot H_0 \cdot \sqrt{2 \cdot H_0 \cdot r - (H_0)^2} \cdot \sqrt{\rho \cdot g \cdot H_0}} \right]$$

$$a_{22} := \frac{\alpha l(u_{10}) \cdot \sqrt{P_1 - P_0} \cdot -\rho \cdot g \cdot H_0}{2 \cdot L \cdot \sqrt{2 \cdot H_0 \cdot r - (H_0)^2}} - \frac{\alpha \cdot \sqrt{\rho \cdot g \cdot H_0}}{2 \cdot L \cdot H_0 \cdot \sqrt{2 \cdot H_0 \cdot r - (H_0)^2}}$$

$$b_{21} := \frac{T_0 \cdot \alpha l_p(u_{10}) \cdot \sqrt{P_1 - P_0} \cdot -\rho \cdot g \cdot H_0}{\rho \cdot c \cdot L \cdot H_0 \cdot \sqrt{2 \cdot H_0 \cdot r - (H_0)^2}}$$

$$b_{22} := \frac{I_0 \cdot R}{\rho \cdot c \cdot L \cdot \left[ H_0 \cdot \sqrt{2 \cdot H_0 \cdot r - (H_0)^2} \right]}$$

Отримаємо наступні значення:

$$a_{11} = -2.5 \times 10^{-3}$$

$$b_{11} = 5.624 \times 10^{-6}$$

$$a_{21} = -1.563$$

$$a_{22} = 3$$

$$b_{21} = 1.255 \times 10^{-7}$$

$$b_{22} = 1.964 \times 10^{-5}$$

					БР.АКПзд - 33.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

Після обчислень коефіцієнтів отримали таку математичну модель:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dx_1}{dt} = -2.5 \cdot 10^{-3} x_1 + 5.624 \cdot 10^{-6} u_1, \\ \frac{dx_2}{dt} = -1.563 x_1 + 3 x_2 + 1.255 \cdot 10^{-7} u_1 + 1.964 \cdot 10^{-5} u_2, \end{array} \right.$$

### 3.5 Визначення керованості і спостережливості об'єкта керування

Запишемо лінеаризовану математичну модель об'єкта в у векторно-матричному вигляді:

$$\frac{d\bar{X}}{dt} = A_p \bar{X} + B_p \bar{U} \quad (3.17)$$

$$\text{де } A_p = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}; B_p = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{bmatrix}; \bar{X}^T = (X_1, X_2); \bar{U}^T = (U_1, U_2).$$

Для зручності моделювання системи рівняння (4.1) подамо в безрозмірній формі. Введемо такі безрозмірні величини:  $x_1 = \frac{X_1}{H^0}$ ,  $x_2 = \frac{X_2}{T^0}$ ,  $u_1 = \frac{U_1}{\alpha(u_1^0)}$ ,  $u_2 = \frac{U_2}{\alpha(u_2^0)}$ . Із останніх співвідношень визначимо  $X_1 = x_1 H^0$ ,  $X_2 = x_2 T^0$ ,  $U_1 = u_1 \alpha(u_1^0)$  і  $U_2 = u_2 \alpha(u_2^0)$ . Підставивши значення величин  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $U_1$ ,  $U_2$  в рівняння отримуємо

$$\frac{dx_1}{dt} = a_{11} x_1 + b_{11} u_1 \quad (3.18)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = a_{21} x_1 + a_{22} x_2 + b_{21} u_1 + b_{22} u_2, \quad (3.19)$$

					БР.АКПзд - 33.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

В математичній моделі (3.18) і (3.19) змінні стану об'єкта  $x_1, x_2$  та керуючі дії  $u_1, u_2$  – безрозмірні величини. Тепер модель (3.18) і (3.19) в матрично-векторній формі набуде такого вигляду:

$$\frac{d\bar{x}}{dt} = A\bar{x} + B\bar{u} \quad (3.20)$$

$$\bar{y} = C\bar{x} \quad (3.21)$$

$$\text{де } A = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} b_{11} & 0 \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix}; C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; \bar{x}^T = (x_1, x_2); \bar{u}^T = (u_1, u_2); \bar{y}^T = (y_1, y_2)$$

$y_1, y_2$  – безрозмірний вихід об'єкта.

В випадку, коли об'єкт керування описується рівнянням (3.21), він буде повністю керованим тоді і тільки тоді, коли ранг матриці

$$H_R = [B \quad AB \quad A^2B \quad \dots \quad A^{n-1}B] \quad (3.22)$$

дорівнює  $n$ .

Керований об'єкт буде повністю спостережливим, якщо ранг матриці

$$H_C = [C^T \quad A^T C^T \quad (A^T)^2 C^T \quad \dots \quad (A^T)^{n-1} C^T] \quad (3.23)$$

розміром  $n \times nk$  буде рівним  $n$ .

В нашому випадку  $n = 2$  і

$$H_R = [B \quad AB];$$

$$H_C = [C^T \quad A^T C^T].$$

Програма обчислення безрозмірних матриць  $A$  і  $B$  наведено нижче (за допомогою MathCad). Ранг матриці  $H_P$  і  $H_C$  визначаємо шляхом їх сингулярного розкладу.

### Дослідження об'єкта на керованість і спостережливість Перехід до безрозмірних величин

$$a_{11} := -2.5 \cdot 10^{-3} \quad a_{21} := -1.563 \quad a_{22} := 3$$

$$b_{11} := 5.624 \cdot 10^{-6} \quad b_{21} := 1.255 \cdot 10^{-7} \quad b_{22} := 1.964 \cdot 10^{-5}$$

### Приведення матриць $A$ і $B$ до безрозмірного виду

$$A := \begin{pmatrix} a_{11} & 0 \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \quad B := \begin{pmatrix} b_{11} & 0 \\ b_{21} & b_{22} \end{pmatrix} \quad C := \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$A = \begin{pmatrix} -2.5 \times 10^{-3} & 0 \\ -1.563 & 3 \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} 5.624 \times 10^{-6} & 0 \\ 1.255 \times 10^{-7} & 1.964 \times 10^{-5} \end{pmatrix}$$

Іншими словами, матриця рангу 2 має найвищий рівень лінійної незалежності, який дорівнює 2, що свідчить про її «повноту» в межах двовимірного підпростору. Такий ранг також означає, що детермінант будь-якого  $3 \times 3$  або більшого підмасиву цієї матриці дорівнює нулю, а мінор розміром  $2 \times 2$  є відмінним від нуля.

Якщо йдеться про дві матриці, обидві з яких мають ранг 2, це свідчить, що обидві матриці мають однаковий ступінь лінійної незалежності та розмірність простору, який вони породжують.

## Обчислення матриць HR і Hc

$HR := \text{augment}(B, A \cdot B)$

$$HR = \begin{pmatrix} 5.624 \times 10^{-6} & 0 & -1.406 \times 10^{-8} & 0 \\ 1.255 \times 10^{-7} & 1.964 \times 10^{-5} & -8.414 \times 10^{-6} & 5.892 \times 10^{-5} \end{pmatrix}$$

$Hc := \text{augment}(C^T, A^T \cdot C^T)$

$$Hc = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -2.5 \times 10^{-3} & -1.563 \\ 0 & 1 & 0 & 3 \end{pmatrix}$$

## Обчислення вектора сингулярних чисел

$$s := \text{svds}(HR^T) \quad s^T = (6.267 \times 10^{-5} \quad 5.624 \times 10^{-6})$$

$$sc := \text{svds}(Hc^T) \quad sc^T = (3.527 \quad 1)$$

$$F := B^{-1}A \quad F = \begin{pmatrix} -444.523 & 0 \\ -7.958 \times 10^4 & 1.527 \times 10^5 \end{pmatrix}$$

## Обчислення рангу матриць HR і Hc за допомогою функції Rank(M)

$$\text{rank}(HR) = 2$$

$$\text{rank}(Hc) = 2$$

Оскільки ранг матриць  $H_P$  і  $H_C$  дорівнює двом (сингулярні числа відмінні від нуля), то робимо висновок, що даний об'єкт є керованим і спостережливим.

### 3.6 Формування критерію оптимальності та якості керування технологічним процесом

Важливий клас задач оптимального керування складають так звані лінійні задачі з квадратичним критерієм, розв'язком яких є регулятори зі зворотнім зв'язком. У вітчизняній літературі відповідна методика одержала назву аналітичного конструювання оптимальних регуляторів (АКОР). Сформулюємо цю задачу.

Нехай модель динаміки керованого об'єкта в просторі станів  $X$  задається системою:

					БР.АКПзд - 33.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

$$\frac{d\bar{x}}{dt} = A\bar{x} + B\bar{u}, \bar{x} \in E^n, \bar{u} \in E^m \quad (3.24)$$

$$\bar{x}(0) = \bar{x}_0$$

А рівняння спостережливості має такий вигляд:

$$\bar{y} = C\bar{x} + D\bar{u}, y \in E^k \quad (3.25)$$

де  $A, B, C, D$  – постійні матриці  $x$ -  $n$  – мірний вектор сатаній керованого об'єкта;  $u$ -  $m$  – мірний вектор керування;  $y$ -  $k$  – мірний вектор спостереження. Рівняння (3.25) означає, спостерігається  $k$  – координат керованого об'єкта, які зв'язані з величинами  $x$ ,  $u$  співвідношення (3.25).

Необхідно забезпечити досягнення заданого цільового стану  $Xd = 0$  з найменшими можливими затратами. (Випадок не нульового усталеного значення зводиться до випадку, що розглядається, шляхом підстановки  $\bar{x} = \hat{x} - \bar{x}_d$ ).

Якість керування визначається квадратичним критерієм

$$R(\bar{x}, \bar{u}) = \frac{1}{2} \int_0^{t_f} (\bar{y}^T M \bar{y} + \bar{u}^T R \bar{u}) dt, \quad (3.26)$$

де  $M$  і  $R$  симетричні і додатньо визначені вагові матриці.

Із виразу (3.26) вилучимо змінну  $y$  шляхом підстановки її значення із (3.25)

$$R(\bar{x}, \bar{u}) = \frac{1}{2} \int_0^{t_f} ((C\bar{x} + D\bar{u})^T M (C\bar{x} + D\bar{u}) + \bar{u}^T R \bar{u}) dt,$$

Розкриваючи дужки в підінтегральному виразі, одержимо

$$R(\bar{x}, \bar{u}) = \frac{1}{2} \int_0^{t_f} (\bar{x}^T Q \bar{x} + \bar{x}^T S \bar{u} + \bar{u}^T S^T \bar{x} + \bar{u}^T \tilde{R} \bar{u}) dt \quad (3.27)$$

					БР.АКПзд - 33.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

де  $Q = C^T M C, S = C^T M D, \tilde{R} = F + R, F = D^T M D$ .

Матриці  $Q$  і  $R$  в виразі (3.27) також симетричні, оскільки  $Q = Q^T, R = R^T$ .

Поставимо задачу: знайти таке оптимальне керування  $u^*$ , як функцію фазових координат  $\bar{x}$ , яке мінімізувало б критерій оптимальності (3.27) і задовольняло би диференціальному рівнянню (3.24). Розв'язок цієї задачі дає можливість визначити алгоритм функціонування оптимального регулятора.

Для розв'язування задачі скористаємось принципом максимуму. Утворимо функцію Гамільтона:

$$K(\bar{x}, \bar{u}, \bar{\psi}) = \frac{1}{2} (\bar{x}^T Q \bar{x} + \bar{x}^T S \bar{u} + \bar{u}^T S^T \bar{x} + \bar{u}^T R \bar{u}) + \bar{\psi}^T (A \bar{x} + B \bar{u}), \quad (3.28)$$

а також рівняння для спряжених змінних

$$\frac{d\bar{\psi}}{dt} = \frac{\partial K(\bar{x}, \bar{u}, \bar{\psi})}{\partial \bar{x}}, \bar{\psi}(t_f) = 0 \quad (3.29)$$

де  $\bar{\psi}^T = (\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_n)$  –  $n$ -вимірна вектор-функція спряжених змінних.

Права частина рівняння (3.29) це градієнт функції  $K(\bar{x}, \bar{u}, \bar{\psi})$  за змінною  $x$ , для знаходження якого скористаємося такими правилами:

$$\frac{\partial (\bar{a}^T G_1 \bar{x})}{\partial \bar{x}} = G_1^T \bar{a}, \quad \frac{\partial (\bar{x}^T G_2 \bar{a})}{\partial \bar{x}} = G_2 \bar{a},$$

де  $G_1, G_2$  – довільні матриці розмірами  $n_1 \times n_2$  і  $n_2 \times n_1$  відповідно;  $\bar{a}, \bar{x}$  –  $n_1, n_2$  – вимірні вектори.

Отже,

$$\frac{d\bar{\psi}}{dt} = Q \bar{x} + S \bar{u} - A^T \bar{\psi} \quad (3.30)$$

					БР.АКПзд - 33.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

Будемо вважати що на керування  $\bar{u}$  не накладено ніяких обмежень. Тоді необхідна умова існування максимуму функції Гамільтона

$$\frac{\partial K(\bar{x}, \bar{u}, \bar{\psi})}{\partial \bar{u}} = \bar{0}$$

дає  $-S^T \bar{x} - \tilde{R} \bar{u} + B^T \bar{\psi} = \bar{0}$

З останнього рівняння знаходимо

$$\bar{u} = \tilde{R}^{-1}(B^T \bar{\psi} - S^T \bar{x}) \quad (3.31)$$

Якщо в (3.24) підставити, одержане значення  $\bar{u}$ , то одержимо систему рівнянь

$$\frac{d\bar{x}}{dt} = A\bar{x} + B\tilde{R}^{-1}(B^T \bar{\psi} - S^T \bar{x}), \quad \bar{x}(0) = 0 \quad (3.32)$$

$$\frac{d\bar{\psi}}{dt} = Q\bar{x} + S\bar{u} - A^T \bar{\psi}, \quad \bar{\psi}(t_f) = 0 \quad (3.33)$$

для розв'язку якої скористаємося перетворенням Ріккати

$$\bar{\psi}(t) = -P(t)\bar{x} \quad (3.34)$$

де  $P(t)$  – симетрична додатно визначена матриця розміром  $n \times n$ .

Продиференціюємо ліву і праву частину рівняння (3.34)

$$\frac{d\bar{\psi}}{dt} = -\frac{dP(t)}{dt} \bar{x} - P(t) \frac{d\bar{x}}{dt}$$

В одержане рівняння замість  $\frac{d\bar{x}}{dt}$  підставимо його значення, яке визначається правою частиною рівняння (5.9). В результаті отримаємо

$$\frac{d\bar{\psi}}{dt} = -\frac{dP(t)}{dt}\bar{x} - P(t)\left[A\bar{x} + B\tilde{R}^{-1}(B^T\bar{\psi} - S^T\bar{x})\right],$$

$$\frac{d\bar{\psi}}{dt} = -\frac{dP(t)}{dt}\bar{x} - P(t)A\bar{x} + P(t)B\tilde{R}^{-1}B^T P(t)\bar{x} + P(t)B\tilde{R}^{-1}S^T\bar{x}$$

В правій частині одержане рівняння об'єднаємо другий і останній доданки і винесемо за дужки величини  $P(t)$  і  $x$ :

$$-P(t)A\bar{x} + P(t)B\tilde{R}^{-1}S^T\bar{x} = -P(t)(A - B\tilde{R}^{-1}S^T)\bar{x} = -P(t)\tilde{A}\bar{x},$$

де  $\tilde{A} = A - B\tilde{R}^{-1}S^T$ .

Отже,

$$\frac{d\bar{\psi}}{dt} = -\frac{dP(t)}{dt}\bar{x} - P(t)\tilde{A}\bar{x} + P(t)B\tilde{R}^{-1}B^T P(t)\bar{x}. \quad (3.35)$$

В праву частину рівняння (3.33) замість  $\psi(t)$  і  $u$  підставимо його значення, що визначаються формулами (3.34) і (3.35). Після аналогічних перетворень отримуємо:

$$\frac{d\bar{\psi}}{dt} = Q\bar{x} + \tilde{A}^T P(t)\bar{x}, \quad (3.36)$$

де  $\tilde{Q} = Q - S\tilde{R}^{-1}S^T$ .

Прирівнявши між собою ліві частини рівнянь (3.35) і (3.36) (праві рівні), одержуємо

$$-\frac{dP(t)}{dt}\bar{x} - P(t)\tilde{A}\bar{x} + P(t)B\tilde{R}^{-1}B^T P(t)\bar{x} = Q\bar{x} + \tilde{A}^T P(t)\bar{x},$$

Для того, щоб це рівняння було справедливим для будь-якого значення  $x$ , необхідно перетворити в нуль матричний множник при  $x$ . Таким чином, одержимо рівняння:

					БР.АКПзд - 33.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

$$\frac{dP(t)}{dt} + P(t)\tilde{A} + \tilde{A}^T P(t) - P(t)B\tilde{R}^{-1}B^T P(t) = -Q,$$

$$P(t_f) = 0 \quad (3.37)$$

яке будемо називати узагальнюючим рівнянням Ріккати.

Отже, оптимальний закон керування зі зворотнім зв'язком стану об'єкта, або просто оптимальний регулятор, задається виразом

$$\bar{u}^* = -\tilde{R}^{-1}(B^T P(t) + S^T)\bar{x} \quad (3.38)$$

В цьому випадку  $C = I$ ,  $D = Q$ ,  $Q = M$ , а  $y = x$ . Тоді ми одержуємо загальновідоме рівняння Ріккати

$$\frac{dP(t)}{dt} \bar{x} + P(t)A + A^T P(t) - P(t)BR^{-1}B^T P(t) = -Q \quad (3.39)$$

Відповідно, оптимальний регулятор задається виразом

$$\bar{u}^* = -\tilde{R}^{-1}B^T P(t)\bar{x} \quad (3.40)$$

### 3.7 Синтез оптимального П-регулятора

Із рівняння (3.38) випливає, що синтезований нами регулятор може розглядатись, як пропорційний з матричним передаточним коефіцієнтом

$$K(t) = R^T (B^T P(t) + S^T), \quad (3.41)$$

який виявляється функцією змінного  $t$ .

При постійних матрицях  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$ ,  $M$ ,  $R$  і при  $t \rightarrow \infty$   $P(t)$  прямує до постійного значення, яке можна знайти, розв'язавши алгебраїчне матричне рівняння

$$P(t)\tilde{A} + \tilde{A}^T P(t) - P(t)B\tilde{R}^{-1}B^T P(t) + \tilde{Q} = 0, \quad (3.42)$$

відносно  $P(t)$ .

					БР.АКПзд - 33.00.00.000 ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Задача синтезу оптимальної системи керування в постановці (3.25) допускає, що завдання регулятора  $y_{d1}$  і  $y_{d2}$  нульові. Розглянемо випадок не нульових значень величин  $y_{d1}$  і  $y_{d2}$ . Нехай в усталеному режимі  $\bar{y} = \bar{y}_d$  і відповідно  $\bar{u} = \bar{u}_d$ . Тоді рівняння (3.24) і (3.25) набудь такого вигляду:

$$0 = A\bar{x}_d + B\bar{u}_d, \quad (3.43)$$

$$\bar{y}_d = C\bar{x}_d. \quad (3.44)$$

Від рівнянь (3.43) і (3.44) віднімемо рівняння (3.24) і (3.25), відповідно. В результаті отримаємо

$$\frac{d(\bar{x}_d - \bar{x})}{dt} = A(\bar{x}_d - \bar{x}) + B(\bar{u}_d - \bar{u}),$$

$$\bar{y}_d - \bar{y} = C(\bar{x}_d - \bar{x}).$$

Введемо такі позначення:  $\tilde{x} = \bar{x}_d - \bar{x}$ ,  $\tilde{u} = \bar{u}_d - \bar{u}$  і  $\tilde{y} = \bar{y}_d - \bar{y}$ . Тоді

$$\frac{d\tilde{x}}{dt} = A\tilde{x} + B\tilde{u}. \quad (3.45)$$

$$\tilde{y} = C\tilde{x}. \quad (3.46)$$

Відповідним чином сформуємо критерій якості керування багатовимірним об'єктом

$$J = \int \{ \tilde{y}^T Q \tilde{y} + \tilde{u}^T R \tilde{u} \} dt.$$

Враховуючи значення  $\tilde{y}$ , яке визначається формулою (3.46), і те, що  $C$  одинична матриця, отримуємо

$$J = \int \{ \tilde{x}^T Q \tilde{x} + \tilde{u}^T R \tilde{u} \} dt. \quad (3.47)$$

Мінімізація критерію (3.47) з врахуванням (3.45) приводить до рівняння Ріккати (3.29). Розв'язавши рівняння (3.29), знаходимо  $S$  і відповідно  $\tilde{u} = -K\tilde{x}$  або  $\tilde{u} = -K\tilde{y}$ , де  $K = R^{-1}B^T S$ .

					БР.АКПзд - 33.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

Із останнього рівняння визначимо вектор керуючих дій  $\bar{u} = \bar{u}_d + K\bar{y}$ .  
Оскільки в рівнянні (3.43) матриця  $B$  - квадратна, то  $\bar{u}_d = -B^{-1}A\bar{y}_d$ . Отже,

$$\bar{u} = -B^{-1}A\bar{y}_d + K\bar{y}. \quad (3.48)$$

Рівняння (3.48) дає можливість побудувати структурну схему оптимальної системи керування гідравлічним об'єктом (рис. 3.5).

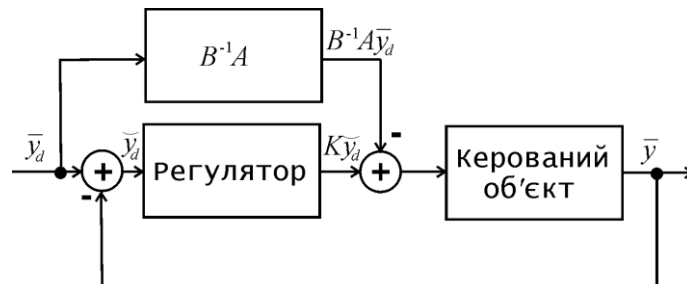


Рисунок 3.5 – Структурна схема оптимальної системи керування об'єктом

Нижче наведена програма розрахунку матричного коефіцієнта пропорційного регулятора, який обчислюється як розв'язок рівняння Ріккаті (3.29), коли  $t \rightarrow \infty$ . Були вибрані такі значення матриць  $Q = \begin{bmatrix} 0.25 & 0 \\ 0.05 & 0.17 \end{bmatrix}$  і

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0.08 \\ 0.06 & 0.6 \end{bmatrix}.$$

Програма розв'язку рівняння Ріккаті (використовуємо програмний пакет MatLab):

$$A = [-2.5e-3 \ 0; -1.563 \ 3]$$

$$B = [5.624e-6 \ 0; 1.255e-7 \ 1.964e-5]$$

A =

$$\begin{bmatrix} -0.025 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} -1.563 & 3 \end{bmatrix}$$

B =

					БР.АКПзд - 33.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

$$0.000005624 \quad 0$$

$$0.0000001255 \quad 0.00001964$$

$$D=[0 \ 0; 0 \ 0]$$

$$C=[1 \ 0; 0 \ 1]$$

$$Q=[0.25 \ 0; 0.05 \ 0.17]$$

$$R=[1 \ 0.08; 0.06 \ 0.6]$$

$$[K \ S \ e]=lqr(A,B,Q,R)$$

В результаті отримано значення матриць

$$K =$$

$$0.0097 \quad -0.0408$$

$$-0.0016 \quad 0.0082$$

$$S =$$

$$24.7471 \quad 1.2702$$

$$1.2702 \quad 9.1829$$

та власні значення матриці

$$e =$$

$$-0.0040$$

$$-0.0083$$

замкнутої системи. Від'ємні власні значення матриці  $E$  вказують на те, що замкнута система керування є стійкою.

У відповідності з рис. 3.5 отримана імітаційна модель системи в середовищі програмного продукту Simulink (рис. 3.6).

					БР.АКПзд - 33.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

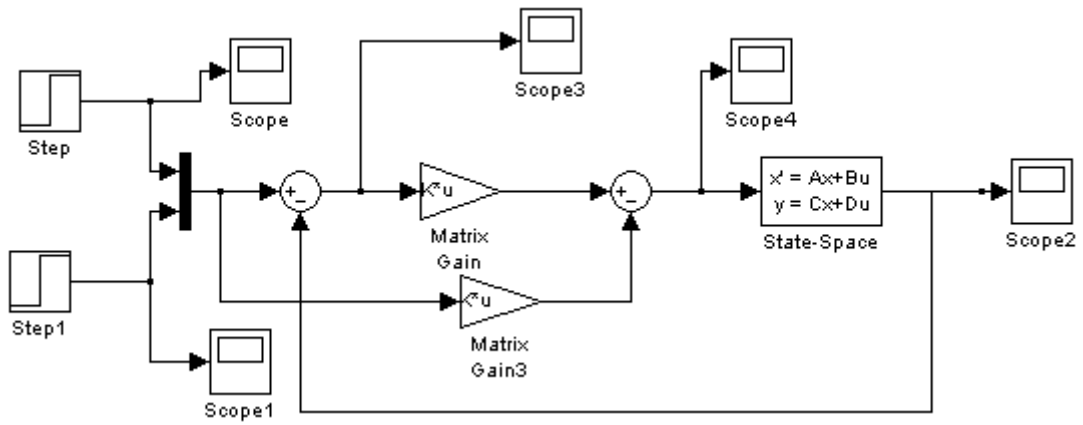


Рисунок 3.6 – Імітаційна модель оптимальної системи керування гідравлічним об'єктом

Як завдання  $y_{d1}$  і  $y_{d2}$  були взяті одиничні сигнали. Результатом є вихідні величини  $y_1$  і  $y_2$ , графіки яких показані на рис. 3.7.

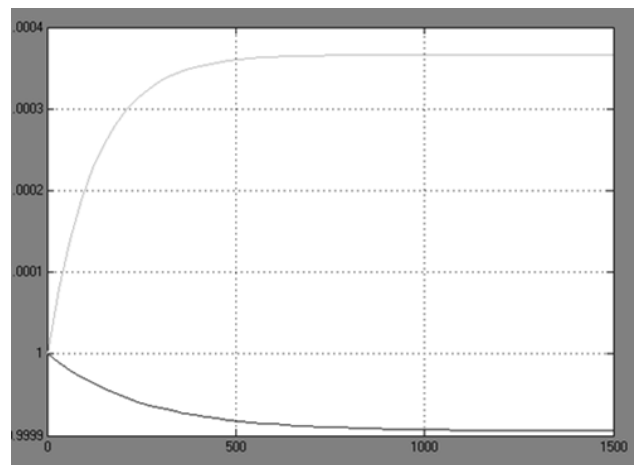
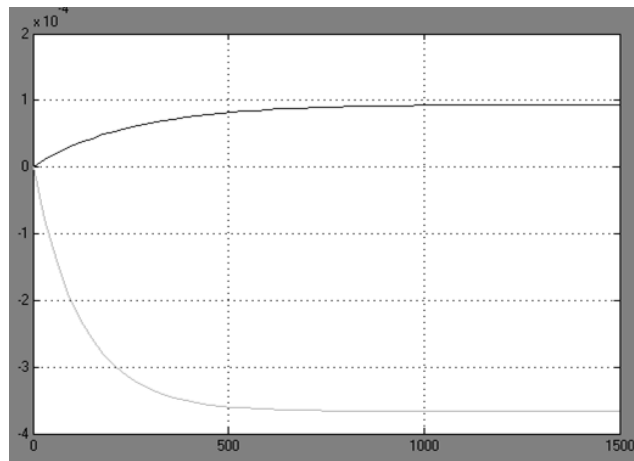


Рисунок 3.7 – Графіки перехідних процесів в оптимальній системі керування

### 3.8 Визначення показників якості керованого об'єкта

Якість автоматичної системи керування визначається сукупністю властивостей, які забезпечують ефективне функціонування як самого об'єкта керування, так і керуючого пристрою, тобто всієї системи керування в цілому.

Точність системи в перехідних режимах оцінюють за допомогою прямих і непрямих показників.

Прямі показники визначають по графіку перехідного процесу, що виникає в системі при ступеневому зовнішньому впливі. Одним із головних прямих показників якості є перерегулювання  $\sigma(\%)$ .

Час перехідного процесу  $t_n$  – час за який досягається усталений режим роботи. За графіками перехідного процесу (рисунок 6.3) визначмо час регулювання  $t_p$  і перерегулювання  $\delta$ .

Час регулювання  $t_p$  визначається як час, на протязі якого відхилення вихідної величини від нового усталеного значення  $y_0$  не перевершує заданого значення  $\Delta y_{p0}$ . Як правило  $\Delta y_{p0} = (0,01 - 0,05)y_0$ .

Перерегулювання визначається як максимальне відносне відхилення регульованої величини від її нового усталеного значення

$$\delta = \frac{y_{\max} - y}{y_0} 100\% \quad (3.49)$$

Для нашого випадку  $t_p \leq 1000$  с для рівня ємності і  $t_p \leq 600$  с для температури в ємності, а  $\delta_1 = \frac{1-1}{1} 100\% = 0\%$  і  $\delta_2 = \frac{1-1}{1} 100\% = 0\%$ . Також можна зробити висновок про стійкість системи: дана система стійка так як перехідний процес регулювання затухає.

### Висновки до розділу

У результаті проведеного дослідження було встановлено, що математичне моделювання є ефективним інструментом для аналізу, оптимізації

					БР.АКПзд - 33.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

та синтезу систем автоматизованого керування процесом виробництва паперу. Побудовані моделі окремих елементів і підсистем папероробної машини, зокрема змішувачів маси, напірного ящика, сіткової частини та системи зневоднення, дозволяють формалізувати фізико-технологічні процеси та отримати уявлення про їх динамічні характеристики.

Здійснене моделювання мокрої частини папероробної машини дало змогу виявити ключові залежності між витратою маси, її концентрацією, рівнем напору та якісними показниками паперового полотна. Прийняті допущення — зокрема сталість об'ємів змішувачів і незначні зміни концентрації — дали змогу значно спростити математичний опис процесу без втрати адекватності моделі.

Побудовані рівняння матеріального балансу, використані для опису змішувальних процесів, забезпечують основу для подальшого аналізу стабільності, налаштування регуляторів і прогнозування впливу збурень на вихідні параметри. Математичні моделі, що враховують множинні вхідні та вихідні потоки, дозволяють розглядати об'єкт як багатоканальну систему з відповідними зв'язками між змінними, що особливо актуально при розробці систем багатоконтурного керування.

Результати математичного моделювання можуть бути безпосередньо використані для комп'ютерного моделювання процесу, верифікації алгоритмів керування та їх подальшого впровадження в програмне забезпечення АСКТП. Також вони слугують фундаментом для розробки адаптивних, нечітких і інтелектуальних регуляторів, здатних реагувати на зміну зовнішніх умов і властивостей сировини.

					БР.АКПзд - 33.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

## 4 ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА ПАПЕРУ

### 4.1 Вибір технічних засобів автоматизації

*Регулювання тиску пари у трубопроводі сушильної групи папероробної машини.*

Датчики тиску широко розробляються і виготовляються провідними виробниками засобів автоматизації. У даному проекті обрано датчик тиску виробництва фірми «Metran» (модель Metran-100), зовнішній вигляд якого наведено на рисунку 4.1.



Датчики серії Metran-100 призначені для використання у системах автоматичного контролю, регулювання та керування технологічними процесами. Вони забезпечують безперервне перетворення вимірюваного тиску в уніфікований аналоговий сигнал, що дозволяє інтегрувати їх у стандартні контури автоматичного керування.

#### *Вимірювання витрати.*

У якості засобу вимірювання витрати рідин обрано масовий витратомір Endress+Hauser Proline Promass 83F. Зовнішній вигляд приладу представлено на рисунку 4.2.

					БР.АКПзд - 33.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48



Рисунок 4.2 – Датчик витрати Proline Promass 83F

Даний прилад є універсальним багатофункціональним засобом вимірювання, що забезпечує високоточне визначення масової витрати рідин. Завдяки використанню принципу коріолісової масової витратометрії, пристрій також дозволяє одночасно вимірювати об'ємну витрату, густину та температуру середовища, що проходить через нього. Це робить Promass 83F ефективним інструментом для інтеграції у склад автоматизованих систем контролю та керування технологічними процесами.

*Вимірювання температури.*

Вимірювальний перетворювач температури Rosemount 644 призначений для перетворення аналогового сигналу, що надходить від первинного чутливого елемента, у стандартизований цифровий сигнал типу 4–20 мА, а також у форматі бездротового зв'язку WirelessHART.

Цей перетворювач є надійним і універсальним засобом контролю температури у промислових технологічних процесах. Його використання дозволяє зменшити витрати на монтаж за рахунок зниження потреби у дорогих подовжувальних кабелях і мультиплексах. Прилад характеризується високою надійністю, гнучкістю в застосуванні, та може бути встановлений як у з'єднувальній головці, так і на DIN-рейці.

					БР.АКПзд - 33.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49



Рисунок 4.3 – Вимірювальний перетворювач температури

### Висновки до розділу

У даному розділі було розглянуто технічну структуру та ключові етапи реалізації технологічного процесу виробництва паперу з урахуванням вимог до точності, надійності та енергоефективності. Детально проаналізовано функціональні вузли папероробної машини, зокрема: підготовку маси, формування полотна у мокрій частині, зневоднення, сушіння та транспортування готової продукції.

Особливу увагу приділено вибору та інтеграції сучасних засобів вимірювання та регулювання, таких як витратоміри, датчики температури, тиску, вологості та маси 1 м<sup>2</sup> паперового полотна. Наведено приклади використання сучасних приладів, зокрема датчика витрати Endress+Hauser Proline Promass 83F та температурного перетворювача Rosemount 644, які забезпечують точність і стабільність контролю основних параметрів.

Застосування автоматизованих систем керування дозволяє досягти високого рівня стабільності процесу, зменшити технологічні втрати, оптимізувати витрати енергоресурсів та підвищити загальну ефективність виробництва. Обґрунтовано доцільність впровадження багатофункціональних,

					БР.АКПзд - 33.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

модульно побудованих АСКТП, здатних забезпечити адаптивне регулювання в умовах зміни зовнішніх збурень і параметрів сировини.

Таким чином, технічна реалізація процесу виробництва паперу на сучасному рівні неможлива без широкого застосування засобів автоматизації, що забезпечують якісне управління усіма етапами технологічного процесу та створюють умови для впровадження концепції «розумного виробництва» у целюлозно-паперовій промисловості.

					БР.АКПзд - 33.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Автоматизація технологічного процесу виробництва паперу є важливим і необхідним етапом підвищення ефективності функціонування целюлозно-паперових підприємств, забезпечення стабільної якості продукції та зниження витрат енергоресурсів і сировини. Розгляд і аналіз сучасного стану галузі свідчать про те, що впровадження автоматизованих систем керування (АСКТП) дозволяє комплексно вирішувати завдання моніторингу, регулювання та оптимізації технологічних параметрів на всіх етапах виробництва — від підготовки маси до формування, сушіння й намотування паперового полотна.

Одним із ключових напрямів автоматизації є розробка адаптивних і багатоконтурних систем керування, які здатні враховувати множинні збурення, зміну властивостей сировини, коливання навантаження та вимоги до кінцевої продукції. Використання сучасних мікропроцесорних засобів, сенсорного обладнання та програмного забезпечення на базі операційних систем реального часу забезпечує високу точність регулювання, оперативність реагування на відхилення параметрів, а також інтеграцію з інформаційними системами підприємства.

Результати математичного моделювання, проведені в межах даного дослідження, дозволили створити спрощені, але адекватні моделі окремих ділянок папероробної машини, що лягли в основу побудови систем керування. Це дає змогу впроваджувати алгоритми як традиційного ПІД-регулювання, так і інтелектуальні підходи — зокрема, на основі нечіткої логіки, нейромереж або моделей адаптації до змінних умов виробництва.

Окрему увагу було приділено огляду реальних впроваджень АСКТП на базі промислових підприємств, зокрема на вузькоформатних і тихохідних папероробних машинах. Встановлено, що навіть для машин середньої та малої продуктивності автоматизація забезпечує істотне підвищення продуктивності, зменшення втрат матеріалів і покращення умов праці персоналу.

					БР.АКПзд - 33.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

У підсумку можна стверджувати, що автоматизація процесу виробництва паперу є не лише технічно доцільною, а й економічно вигідною. Вона забезпечує основу для цифрової трансформації виробництва, підвищення конкурентоспроможності підприємств та їхньої відповідності сучасним стандартам якості, енергоефективності та екологічної безпеки.

					БР.АКПзд - 33.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДжЕРЕЛА

1. Семенцов Г.Н. Автоматичне управління: Навчальний посібник / Г.Н. Семенцов, Я.Р. Когуч, М.М. Дранчук і інші. – Івано-Франківськ: Факел, 2003.
2. Семенцов Г. Н. Теорія автоматичного керування. /Г. Н. Семенцов Івано-Франківськ; //Факел, 1999 – 610 с.
3. Жученко А. І. Математичні моделі цифрових систем керування : навч. посіб. / А. І. Жученко. – К. : 13МН, 1997. – 240 с. – Бібліогр.: с. 235. – 300 пр.
4. Жученко А. І., Піргач М. С., Кваско М. З. Автоматичне керування напірними ящиками паперо- і картоноробних машин : монографія / А. І. Жученко, М. С. Піргач, М. З. Кваско. – К. : Бізнес Медіа Консалтинг, 2014. – 232 с. – Бібліогр.: с. 215–229. – 200 пр. – ISBN 978-966-2425-34.
5. Жученко А. І., Ладієва Л. Р., Піргач М. С. Аналітичне конструювання дискретних регуляторів : навч. посіб. / А. І. Жученко, Л. Р. Ладієва, М. С. Піргач. – К. : Аграр Медіа Груп, 2014. – 268 с. – Бібліогр.: с. 262. – ISBN 978-617-646-275-0.
6. Кваско М. З., Піргач М. С., Аверіна Т. В. Проектування і дослідження систем автоматичного керування технологічними процесами : навч. посіб. / М. З. Кваско, М. С. Піргач, Т. В. Аверіна. – К. : ІВЦ «Видавництво «Політехніка», 2003. – 360 с. – Бібліогр.: с. 60–61, 130, 192, 238, 263, 307–309, 339–340. – 200 пр. – ISBN 966-622-116-0.
7. Кваско М. З., Ладієва Л. Р., Піргач М. С. Математичне моделювання та ідентифікація одно- і багатовимірних систем : навч. посіб. / М. З. Кваско, Л. Р. Ладієва, М. С. Піргач. – К. : НТУУ «КПІ», 2006. – 368 с. – Бібліогр.: с. 277–278. – 200 пр. – ISBN 966-622-211-6.
8. Горбійчук М.І. Моделювання об'єктів і систем керування в нафтогазовій промисловості. Навчальний посібник. Частина 2. ІФНТУНГ. 1999. –с. 226.

					БР.АКПзд - 33.00.00.000 ПЗ	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		