

Форма № Н-9.02

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

Навчально-науковий інститут інформаційних технологій та робототехніки  
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра автоматики, електроніки та телекомунікацій  
(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

## Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи

бакалавр

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему **Модернізація автоматизованої системи папероробної машини**

Виконав: студент 4 курсу, групи 401МЕ  
спеціальності 141 «Електроенергетика,  
електротехніка та електромеханіка»  
(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Федоренко С.С.

(прізвище та ініціали)

Керівник Ігнат'єв С.Є.

(прізвище та ініціали)

Рецензент Єрмілова Н.В.

(прізвище та ініціали)

Полтава - 2025 рік

# РЕФЕРАТ

кваліфікаційної роботи

## «Модернізація автоматизованої системи папероробної машини»

Робота містить 49 сторінок, 24 ілюстрацій, 7 таблиць, 17 використаних джерел.

**Ключові слова:** папероробна машина, вимірювальний перетворювач, багатоконтурна АСР, контролер, нелінійність.

**Об'єктом кваліфікаційної роботи бакалавра** є дослідження можливості розроблення автоматизованої системи папероробної машини.

**Предметом кваліфікаційної роботи бакалавра** є система управління папероробної машини.

**Метою кваліфікаційної роботи бакалавра** є впровадження автоматизованої системи управління технологічним процесом напуску паперової маси на сітку папероробної машини за допомогою напірної скриньки з повітряною подушкою, що дозволяє вдосконалити виробничий процес.

В якості ідеї пропонується побудувати систему автоматизації з урахуванням програмованого логічного контролера. Система дозволить значно полегшити працю оперативного персоналу за рахунок полегшення ухвалення рішення та зосередження інформації. Значне підвищення точності регулювання технологічних параметрів надасть змогу покращити якість продукції, зменшити вплив якості сировини на готову продукцію, збільшити коефіцієнт корисної дії. Проведено підбір технічних засобів автоматизації та реалізація системи управління із застосуванням мікропроцесорного контролера FATEK серії FBs.

Робота має практичну цінність і її результати після більш детальної доробки можуть бути розглянуті для використання на підприємствах в різних галузях.

## ABSTRACT

qualified work

“Modernization of the automated paper machine system”

The work includes 49 pages, 24 illustrations, 7 tables, 17 curated texts.

Key words: paper machine, vibrating converter, rich circuit ASR, controller, nonlinearity.

The subject of the bachelor's qualification work is the study of the possibility of developing an automated system for a paper machine.

The subject of the bachelor's qualification work is the control system for a paper machine.

The bachelor's qualification involves the development of an automated system for controlling the technological process of injecting paper paste onto the mesh of a paper turning machine using an additional pressure screen with a blown pad, which allows thoroughly refine the production process.


The idea is to create an automation system controlled by a programmable logic controller. The system allows significant relief to operational personnel for the ease of making decisions and maintaining information. By increasing the accuracy of the regulation of technological parameters, it will be possible to control the acidity of products, replace the addition of acidity to the finished product, and increase the coefficient of bark production. The selection of technical features for automation and implementation of the heating system based on the FATEK FBs series microprocessor controller was carried out.

The work has practical value and its results after more detailed development can be considered for research in the production of different textiles.

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

### ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри автоматичної,  
електроніки та телекомунікацій

  
О.В. Шефер  
«01» квітня 2025 р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРУ СТУДЕНТУ

**Федоренку Сергію Сергійовичу**

1. Тема роботи «Модернізація автоматизованої системи папероробної машини»  
керівник роботи Ігнат'єв Станіслав Євгенович, к.т.н., професор  
затверджена наказом вищого навчального закладу від 03.03.2025 року  
№ 306/1-фа.
2. Строк подання студентом проєкту (роботи) 10.06.2025 р.
3. Вихідні дані до проєкту (роботи) Технічна документація на папероробну  
машину. Номінальна напруга 380/220В, частота мережі 50 Гц. Провести  
удосконалення електроприводу папероробної машини. Дослідити систему  
регулювання при використанні локальної та багатоконтурної АСР. Забезпечити  
перерегулювання у межах 30%, час регулювання не більше 1 сек.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно  
розробити) Опис технологічного процесу виробництва паперу. Характеристика  
обладнання та режиму його роботи. Особливості системи управління, що існує.  
Аналіз недоліків. Постановка задач на кваліфікаційну роботу. Розгляд  
технологічного процесу як об'єкта управління. Розробка структурної та  
функціональної схеми системи управління. Створення математичної моделі.  
Аналіз нелінійностей. Синтез САК. Визначення передаточних функцій елементів  
системи. Розрахунок параметрів САК для локальної та багатоконтурної АСР.  
Моделювання АСР без врахування та з врахуванням нелінійності.
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових плакатів):
  - 1) актуальність, мета та задачі розроблення;
  - 2) схема технологічного процесу виробництва паперу;
  - 3) структурна схема системи управління електроприводом папероробної  
машини;


- 4) функціональна схема системи управління електроприводом папероробної машини;
- 5) математична модель системи управління;
- 6) структурна схема САК;
- 7) моделювання АСР без врахування нелінійності;
- 8) моделювання АСР з врахуванням нелінійності;
- 9) висновки.

6. Дата видачі завдання 01.04.2025 р.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Пор. №	Назва етапів кваліфікаційної роботи бакалавра	Термін виконання етапів роботи			Примітки (плакати)
		Дата початку	Квартал	Відсоток виконання	
1	Опис технологічного процесу виробництва паперу. Характеристика обладнання та режиму його роботи. Особливості системи управління, що існує. Аналіз недоліків. Постановка задач на кваліфікаційну роботу.	22.04.25	I	20%	Пл. 1
2	Розгляд технологічного процесу як об'єкта управління. Розробка структурної та функціональної схеми системи управління.	08.05.25		40%	Пл. 2,3
3	Розробка структурної та функціональної схеми системи управління. Створення математичної моделі. Аналіз нелінійностей.	22.05.25	II	60%	Пл. 4,5
4	Синтез САК. Визначення передаточних функцій елементів системи. Розрахунок параметрів САК для локальної та многоконтурної АСР. Моделювання АСР без врахування та з врахуванням нелінійності.	30.05.25		80 %	Пл. 6,7
5	Оформлення кваліфікаційної роботи бакалавра	10.06.25	III	100%	Пл. 8,9

Студент

  
( підпис )

Федоренко С.С.  
( прізвище та ініціали )

Керівник роботи

  
( підпис )

Ігнат'єв С.Є.  
( прізвище та ініціали )

## ЗМІСТ

	стор.
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	8
ВСТУП	9
1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА ПАПЕРУ	11
1.1 Основні технологічні стадії виробництва паперу	11
1.2 Характеристика виробництва та режиму роботи основного обладнання	13
1.3 Існуюча система управління як об'єкт модернізації	14
2. РОЗРОБЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ УПРАВЛІННЯ ПАПЕРОРІБНОЇ МАШИНИ	17
2.1 Технологічний процес виробництва паперу як об'єкт управління	17
2.2 Розроблення структурної схеми системи управління	19
2.3 Розроблення математичної моделі	20
2.4 Аналіз існуючих нелінійностей у контурах регулювання	23
3. СИНТЕЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ	26
3.1 Знаходження передавальної функції датчиків	26
3.2 Розрахунок параметрів елементів систем регулювання під час використання локальних АСР та її моделювання	27
3.3 Розрахунок параметрів елементів системи регулювання під час використання багатоконтурної АСР та її моделювання	30
3.4 Моделювання з урахуванням нелінійності	33
4. РОЗРОБЛЕННЯ СХЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТА ВИБІР ЇЇ ЕЛЕМЕНТІВ	36
4.1 Вибір первинних засобів автоматизації	36
4.2 Підбір та обґрунтування технічних засобів	41
4.3 Розрахунок теплового балансу шафи управління	42
4.4 Комплектація мікропроцесорних засобів регулювання з розподілом параметрів контролю та регулювання за модулями	43
4.5 Вибір обладнання для поєднання локальних контурів регулювання з АСУ ТП верхнього рівня	44
ВИСНОВКИ	47

	7
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	48
ДОДАТКИ	50
ДОДАТОК А ANALYSIS OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF PAPER PRODUCTION	51
ДОДАТОК Б ГРАФІЧНА ЧАСТИНА КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ БАКАЛАВРА	56

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ПРМ – папероробна машина

АСУ ТП – автоматизована система управління технологічним процесом

АСУ – автоматизована система управління

ПУЕ – правила улаштування електроустановок

ДСТУ – державний стандарт України

ВП – вимірювальний перетворювач

ПТ – перетворювач температури

## ВСТУП

**Актуальність роботи.** Розроблення та впровадження автоматизованих систем управління технологічними процесами (АСУ ТП) є основною тенденцією розвитку сучасного промислового виробництва. Системи АСУ ТП в даний час знайшли широке застосування, оскільки дозволяють значно збільшити точність технологічних операцій, що виконуються, знизити кількість людей необхідних для виробничого процесу, а також значною мірою знизити вплив людського фактора на виробничий процес. Усе це призводить до значного зниження виробничих витрат як наслідок збільшує конкурентоспроможність підприємства. Цілі автоматизації – підвищення ефективності та продуктивності праці, підвищення якості продукції, оптимізація планування та управління, звільнення людини від роботи у шкідливих умовах. Комплексна автоматизація процесів (апаратів) хімічної технології передбачає як автоматичне забезпечення нормального ходу цих процесів з використанням різних автоматичних пристроїв (контролю, регулювання, сигналізації тощо), а й автоматичне управління пуском і зупинкою апаратів для ремонтних робіт у критичних ситуаціях.

Тому **метою кваліфікаційної роботи бакалавра** є впровадження автоматизованої системи управління технологічним процесом напуску паперової маси на сітку папероворобної машини за допомогою напірної скриньки з повітряною подушкою, що дозволяє вдосконалити виробничий процес.

**Об'єктом кваліфікаційної роботи бакалавра** є дослідження можливості розроблення автоматизованої системи папероробної машини.

**Предметом кваліфікаційної роботи бакалавра** є система управління папероробної машини.

В якості ідеї пропонується побудувати систему автоматизації з урахуванням програмованого логічного контролера. Система дозволить значно полегшити працю оперативного персоналу за рахунок полегшення

ухвалення рішення та зосередження інформації. Значне підвищення точності регулювання технологічних параметрів надасть змогу покращити якість продукції, зменшити вплив якості сировини на готову продукцію, збільшити коефіцієнт корисної дії.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати наступні **завдання:**

- проаналізувати основні технологічні стадії виробництва паперу, основні режими роботи обладнання та характеристики виробництва;
- виявити особливості існуючої системи управління;
- розробити математичну модель напуску паперової маси на сітку папероробної машини;
- розробити структурну схему системи управління;
- здійснити синтез автоматичного управління;
- обрати витратну характеристику та розрахунок передавальної функції;
- виконати дослідження перехідних процесів у лінеаризованій системі;
- розробити нелінійної системи асинхронного електроприводу з векторним управлінням;
- здійснити розрахунок параметрів елементів систем регулювання під час використання локальних АСР та її моделювання;
- розробити функціональну схему автоматизації технологічного процесу метанування оксидів вуглецю;
- виконати моделювання з урахуванням нелінійності;
- розробити схему автоматизації.

Для вирішення поставлених завдань в роботі використана методика, що включає в себе методи теорії автоматичного управління та методи математичного моделювання на ПК.

# 1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА ПАПЕРУ

## 1.1 Основні технологічні стадії виробництва паперу

Розглянемо основні технологічні стадії виробництва паперу. Основною метою процесу нанесення паперової маси на нескінченну сітку папероробної машини (ПРМ) є досягнення необхідної товщини  $G_{ПМ2} = 0,20$  мм. Це досягається шляхом плавного потоку без перехрещування струменів, завихрень та утворення пластівців, при цьому формування товщини відбувається завдяки напору в повітряній подушці з тиском  $P = 0,9$  МПа.

Безпосередньо сама ділянка подачі паперової маси на сітку ПРМ за допомогою напірної скриньки з повітряною подушкою складається з декількох етапів. Першим етапом буде процес змішування, який виконує змішувальний насос. Другий етап є очищенням батареєю очисників маси. Третій етап є розподілом, що безпосередньо виконується потокорозподільником маси [1].

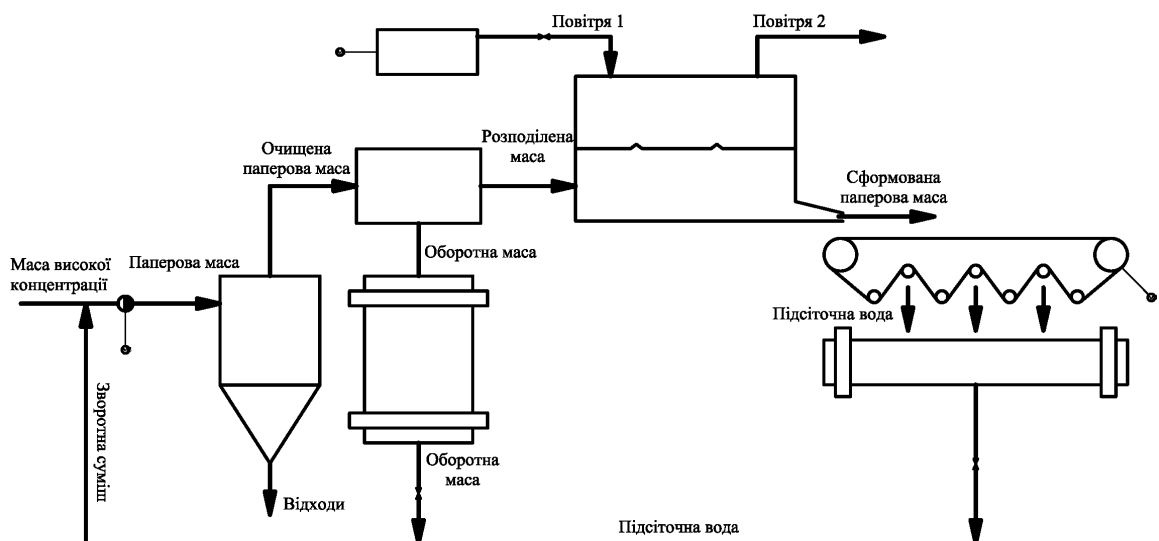


Рисунок 1.1 – Блок-схема технологічного процесу виробництва паперу

На останньому четвертому етапі відбувається перелив оборотної маси у переливному бачку. Такий бачок складається з повітряної подушки та напускної камери, яка безпосередньо подає масу, з нескінченної сітки, яка

рухається від грудного до гауч-валу у процесі віджиму, а також системи збору підсіточних вод.

У процесі змішування в змішувальний насос (двигун М1) подається маса з високою концентрацією плюс оборотна суміш, що утворюється в результаті змішування оборотної маси ( $F^*_{OM}$ ) та підмережної води ( $F^*_{ПВ}$ ). Оборотна маса надходить з нижньої частини переливного бочка, а підмережна вода – з нижньої частини збірника підмережної води. Отримана, внаслідок змішування, паперова маса 1 ( $F_{ПМ1}=3,8 \text{ м}^3/\text{хв}$ ) потрапляє в батарею очищувачів маси, де проходить процес очищення. Очищена паперова маса надходить у поточкорозподільник, а відходи виводяться з нижньої частини апарату.

У подальшому основний потік очищеної паперової маси (близько 90 %) після поточкорозподільника потрапляє в напускну камеру, де необхідно підтримувати рівень ( $L=2,5-3 \text{ м}$ ) та контролювати температуру паперової маси. Належний рівень підтримується за допомогою тиску ( $P=0,9-1 \text{ МПа}$ ) повітряної подушки. В свою чергу, тиск регулюється шляхом зміни витрат повітря ( $1 F^*_{В1}$ ), яке подається компресором (двигун М2).

Близько десяти відсотків залишкової маси через переливний бачок з'єднується з підмережною водою, формуючи оборотну масу, яка за допомогою рециклу потрапляє до змішувального насоса (двигун М1). У переливному бачку підтримується рівень ( $L_{OM} = 0,3 \text{ м}$ ), який регулюється шляхом зміни витрати оборотної маси  $F^*_{OM}$ .

У подальшому з напускної камери, подолавши шлях через напускну щілину, сформована паперова маса прямує на нескінченну сітку, що рухається від грудного до гауч-валу зі сталою швидкістю.

Наступним кроком відбувається віджимання напускної маси на сітку. Далі підсіточна вода, що утворюється, потрапляє до резервуару для підсіткової води, де підтримується необхідний рівень ( $L_{ПВ}=0,2\text{м}$ ). Рівень підтримується за рахунок зміни витрати на виході зі збірки  $F^*_{ПВ}$ .

Отже, підсумовуючи вищезрозглянуте, приходимо до висновку, що кожен етап виробництва паперу має своє значення та виконує унікальну

функцію. В свою чергу підвищення точності роботи механізмів та швидкості реагування на зовнішні впливи є важливим завданням у нашій роботі.

## 1.2 Характеристика виробництва та режиму роботи основного обладнання

Згідно технічної документації станцію напуску паперової маси класифікують наступним чином:

– відповідно до ПУЕ, вона відноситься до зони В-1а, яка визначається як зона, що знаходиться в приміщеннях, де під час нормальної експлуатації не утворюються вибухонебезпечні суміші горючих пар, газів або пар легкозаймистих рідин з повітрям чи іншими окислювачами. Суміші такого типу можуть виникати внаслідок аварій або технічних несправностей [2];

– згідно з нормативами ДСТУ EN ІЕС 60079-15 даний пристрій відноситься до зони класу 2, що характеризується низькою імовірністю вибухонебезпечної газової суміші в нормальних умовах експлуатації. Але інколи спостерігається присутність вибухонебезпечної газової суміші на короткий час [3].

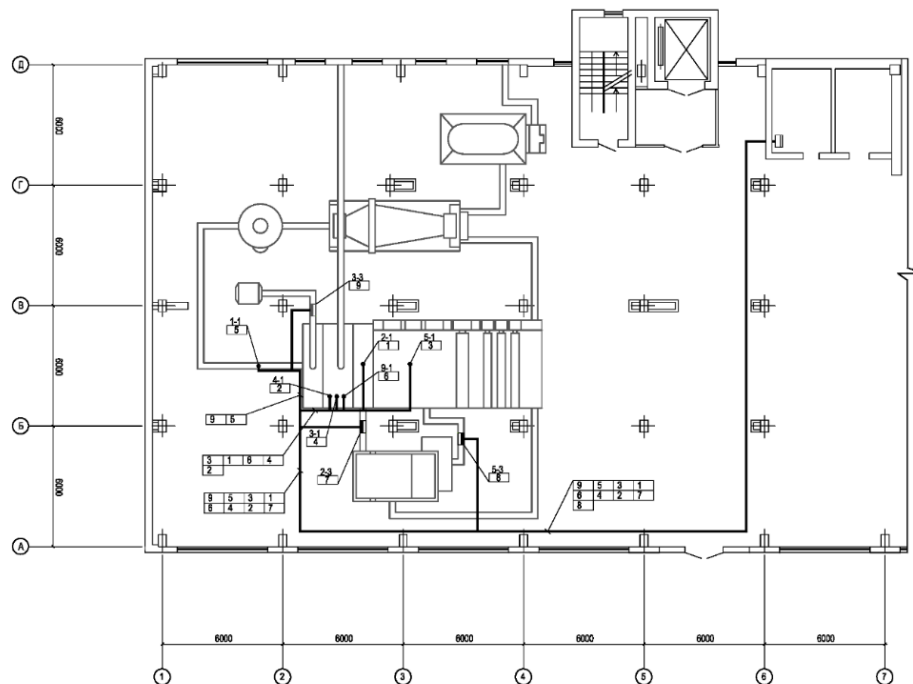


Рисунок 1.2 - План цеху виробництва паперу

Отже, управління насосами, а саме запуск та зупинка, здійснюється безпосередньо з місця розташування щита. Крім того, передбачено можливість дистанційного вимкнення насосів з операторної відповідним працівником.

Цікавим є те, що насос та компресор функціонують синхронно в діапазоні від 10 % до 100 % своєї нормативної продуктивності. Для таких насосів передбачені спеціальні регулятори, які забезпечують перезапуск продукту з нагнітання на всмоктування. Сама подача паперової маси на батарею очисників відбувається через масовий витратомір.

Для забезпечення стовідсоткової безпечної експлуатації насоса та компресора передбачено автоматичне відключення цих пристроїв при досягненні мінімального рівня паперової маси в напірній скриньці та відповідного тиску повітряної подушки. Додатково, насос та компресор оснащені автоматизаційною системою, яка включає блокування та захист, що забороняють запуск і роботу в режимах, які можуть призвести до аварійних ситуацій [4].

У переливному бачку та збірнику підсіточних вод встановлено по одному рівнеміру, які автоматично вимірюють рівень оборотної маси та підсіткової води відповідно. Сучасні вимоги до автоматизації вищерозглянутих приладів включають наявність автоматизаційних засобів, їх швидкодію, надійність та здатність до взаємодії.

### **1.3 Існуюча система управління як об'єкт модернізації**

Сучасне виробництво паперу характеризується управлінням процесом подачі паперової маси кваліфікованими операторами-технологами. Саме вони контролюють параметри технологічного режиму в межах допустимих значень, щоб досягнути необхідних показників якості паперового полотна. До таких показників належать рівень паперової маси в напускній камері та тиск повітря в повітряній подушці. Поряд з тим, цей метод управління не дозволяє ефективно компенсувати вплив збурень – пульсації на стабільність показників

якості. В результаті цього відбувається суттєве порушення технологічного режиму, що, в свою чергу, погіршує якість очищення газу.

Звичайною справою є високий рівень морального та фізичного зносу засобів автоматизації. Це ж, відповідно, ускладнює ефективне управління процесом в цілому та ускладнює забезпечення необхідної швидкості роботи. Така система управління також не дозволяє здійснювати диспетчеризацію технологічного процесу. На жаль, сучасна автоматизована система управління технологічними процесами (АСУ ТП) реалізована на застарілих приладах, які відповідають лише базовим вимогам, а сигналізація та блокування на обладнанні не відповідають сучасним світовим стандартам у цій галузі [5].

Пристрої ПРМ для автоматичної оптимізації процесу подачі паперової маси, які використовуються у вітчизняних галузях сьогодні, складаються з датчика рівня, який з'єднаний з регулятором рівня, датчика швидкості сітки, резистора сумарного напору, регулюючих елементів на повітропроводах та масопроводі до напірної скриньки, а також датчика сумарного напору.

Відзначимо, що недоліком існуючих методів автоматичного регулювання співвідношення «швидкість маси та швидкість сітки» є принцип їх роботи, який передбачає, що маса подається на сітку з постійною швидкістю виходу через щілину, тоді як швидкість сітки змінюється. Проте, відомо, що швидкість виходу маси під час її подачі насправді не залишається сталою. Вона змінюється значно частіше та в більших об'ємах, ніж швидкість сітки, що заважає досягнення однорідності полотна.

Мета, яку ми поставили у нашій роботі, досягається завдяки наявності в пристрої регулятора швидкості сітки, блоку вилучення кореня, який підключений до датчика сумарного напору, елементів порівняння та задатчика коефіцієнта відставання швидкості маси від швидкості сітки. Суматори та обчислювальний блок, що має входи, з'єднані з датчиком швидкості сітки, блоком вилучення кореня, виходами елементів порівняння та задатчиком коефіцієнта відставання, забезпечують обробку даних. Виходи цього блоку,

відповідно, підключені до регуляторів сумарного напору та швидкості сітки через суматори, до яких також підключені входи елементів порівняння.

Отже, таблиця 1.1 візуалізує перелік сигналів виходів.

Таблиця 1.1 – Перелік сигналів, що підлягають автоматизації на ПРМ

№ п/п	Позиція, місце встановлення	Тип	Межа виміру	Клас точності	Допустиме значення	Критичне значення
1.	FE 1-1, витрата паперової маси	ТХА	0,25÷20 м <sup>3</sup>	1,5	>3,8	4
2.	LE 2-1, рівень оборотної маси	ТХА	0,1÷50 м	2	>2,5	3
3.	PE 3-1, тиск повітря	ТХА	0 ÷2,5 МПа	2	>0,9	1
4.	LE 4-1, рівень паперової маси	ТХА	0,1÷50 м	2	>2	2,3
5.	LE 5-1, рівень підмережної води	ТХА	0,1÷50 м	2	>1,5	2
6.	TE 9-1, температура паперової маси	ТХА	0 ÷200 °С	2	>80	85

#### Висновки за розділом

Розглянули основні технологічні стадії виробництва паперу. Кожен етап виробництва паперу має своє значення та виконує унікальну функцію. Виявили, що АСУ ТП реалізована на застарілих приладах, які відповідають лише базовим вимогам, а сигналізація та блокування на обладнанні не відповідають сучасним світовим стандартам у цій галузі. Окреслили які саме сигнали підлягають автоматизації.

## **2. РОЗРОБЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ УПРАВЛІННЯ ПАПЕРОРОБНОЇ МАШИНИ**

### **2.1 Технологічний процес виробництва паперу як об'єкт управління**

Технологічний процес виробництва паперу розпочинається з підготовки сировини, яка складається деревної маси, целюлози та всіляких відходів для формування паперової маси. Після підготовки ці компоненти акумулюються в спеціальних басейнах, де ретельно змішуються у необхідних пропорціях, утворюючи масу з певним складом. Така готова маса з високою концентрацією потрапляє до машинного басейну, звідки вона подається до насоса змішувача, куди також надходить оборотна вода з системи. Розведена водою маса проходить очищення на спеціальному обладнанні, а потім через закриту напірну скриньку подається на сітку. Зміною обертів масової подачі з машинних басейнів, регулюються кількість паперової маси в напірній скринці [4].

До таких напірних скриньок підключені вакуумні вентилятори, а також стиснене повітря для контрольно-вимірювальних приладів, яке подається через регулятори тиску. Також, напірні скриньки обладнані спеціальними переливами з гідрозатворами. У подальшому переливи маси та циркуляція з колектора надходять до підмережних басейнів.

Напірні скриньки обладнані спеціальними перфорованими валиками, які створюють мікротурбулентність у потоці маси. Це сприяє вирівнюванню концентрації та рівномірному розподілу маси по всій ширині скриньки. Від цього залежить зокрема якість паперу, однорідність структури вцілому, товщина та вага готової продукції. Окружна швидкість перфорованих валиків визначається типом виробу, концентрацією маси в напірній скринці та швидкістю роботи машини.

Далі з напірної скриньки через губу напускного пристрою маса витікає рівномірним потоком на рухому сітку, після чого потрапляє на сітковий стіл.

Саме тут відбувається відлив та видалення основної частини води з утвореного шару [5].

Відзначимо, що зміна концентрації маси в напірних скриньках відбувається шляхом регулювання відкриття напускної щілини. Якість паперового полотна значною мірою залежить від способу його формування на сітці. Під час технологічного процесу важливо забезпечити рівномірне виведення маси з напірної скриньки. Стабільність закінчення процесу залежить від тиску всередині напірної скриньки, який формується внаслідок гідростатичного тиску маси та безпосередньо тиску повітря. Гідростатичний тиск визначається рівнем рідини, який підтримується завдяки тиску повітря, що подається через спеціальний клапан. На лінії також встановлено додатковий клапан, призначений для відведення тиску з напірної скриньки. Відзначимо, що ці клапани працюють у протифазі, що дозволяє швидше реагувати на зміни рівня маси всередині напірної скриньки.

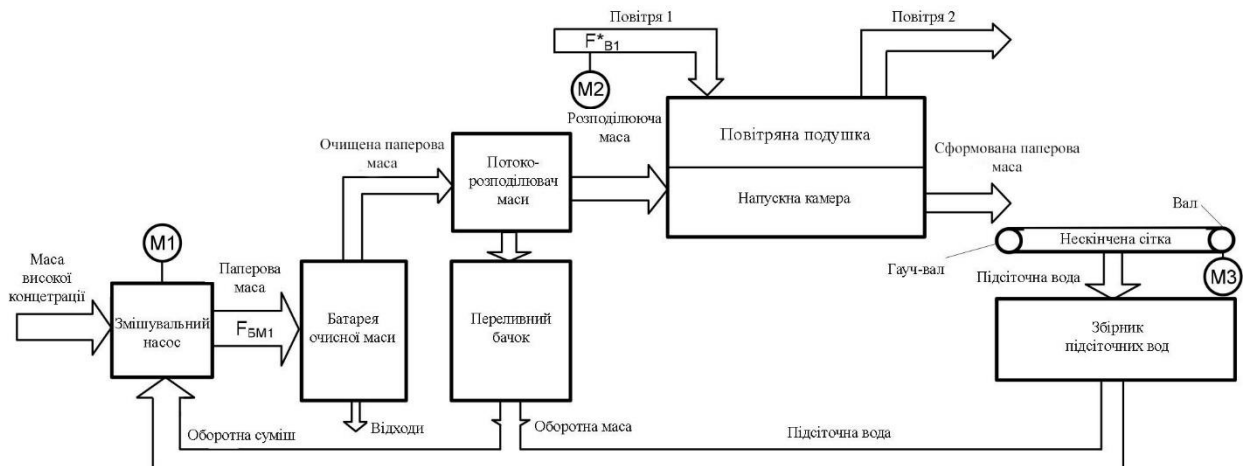


Рисунок 2.1 – Структурна схема АСР процесу напуску паперової маси

Відомо, що для якісного формування паперового полотна на сітці швидкість виходу маси з напускної щілини напірної скриньки повинна приблизно відповідати швидкості сітки. Необхідний тиск маси забезпечується за допомогою повітряного компресора. Під час руху маси разом із сіткою вона спочатку віддає воду, що використовується в оборотному циклі, без примусового відсмоктування через реєстрові валки, а потім під впливом

вакууму, що створюється в відсмоктувальних скриньках та камері, що відсмоктує гауч-вал. Після цього паперове полотно направляється на сушильні циліндри, куди подається необхідна кількість пари. Готове паперове полотно намотується на тамбури за допомогою накату.

## 2.2 Розроблення структурної схеми системи управління

Такий показник як рівень є непрямым індикатором гідродинамічної рівноваги апарату. В залежності від вимог до точності підтримки рівня, використовують один з двох способів регулювання:

1) позиційне регулювання, при якому рівень в апараті підтримується в заданих, досить широких межах:  $L_H \leq L \leq L_B$ ;

2) безперервне регулювання, у якому забезпечується стабілізація рівня заданому значенні, тобто  $L = L^\circ$ .

У вищенаведених автоматичних системах регулювання (АСР) для контролю рівня без статичної похибки використовують ІІІ-регулятори. ІІ-регулятори застосовують лише в тих випадках, коли не потрібна висока якість регулювання та коли збурення в системі не мають постійної складової, що може призвести до накопичення статичної похибки [6].

Відзначимо, що у разі відсутності фазових перетворень в апараті, рівень регулюється одним із трьох способів:

- зміною витрати рідини на вході в апарат (регулювання «на притоці»);
- зміною витрати рідини на виході з апарату (регулювання «на стоку»);
- регулюванням співвідношення витрат рідини на вході в апарат та виході з нього з корекцією за рівнем (каскадна АСР).

В свою чергу, відключення коригуючого контуру може спричинити накопичення помилки в регулюванні рівня. Це відбувається через неминучі похибки в налаштуванні регулятора, внаслідок чого співвідношення витрат рідини на вході та виході апарата не буде ідеально збігатися. Через інтегруючі

властивості об'єкта рівень рідини в апараті постійно зростатиме або зменшуватиметься.

Доведено, що для цього об'єкта виробництва паперу використовуватимемо позиційне регулювання, оскільки рівень паперової маси в апараті підтримується в певних заданих межах. Для належного регулювання рівня на притоці потрібно змінювати витрату повітря на вході в повітряну подушку.

### 2.3 Розроблення математичної моделі

Далі логічним буде розгляд моделі динаміки напірної скриньки, в якій здійснюється регулювання рівня паперової маси води.

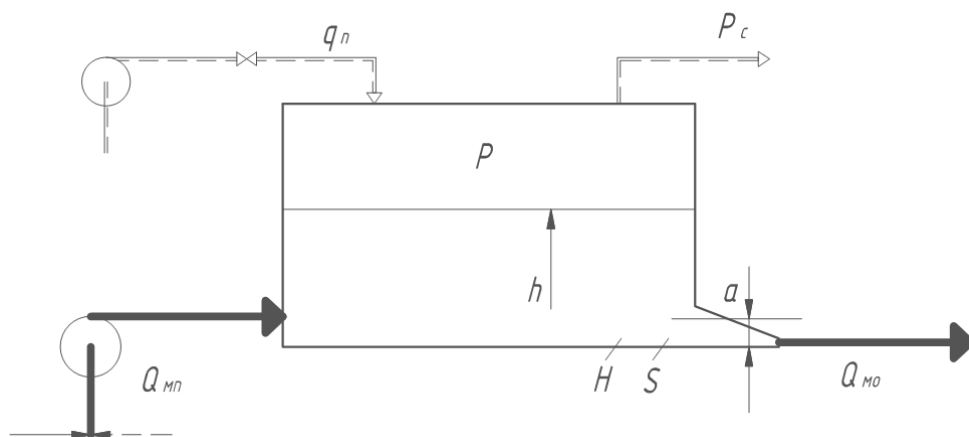


Рисунок 2.2 – Принципова схема напірної скриньки з повітряною подушкою

Отже, математичну модель напірної скриньки з повітряною подушкою можна описати за допомогою системи рівнянь:

$$P(p) = k_{g^*} g^*(p) + k_h h(p); \quad (2.1)$$

$$H(p) = h(p) + k_{1P} P(p); \quad (2.2)$$

$$Q_{MO}(p) = k_H H(p) + k_a a(p); \quad (2.3)$$

$$h(p) = \frac{1}{Fp} (Q_{MP}(p) - Q_{MO}(p)); \quad (2.4)$$

$$g^*(p) = \frac{1}{p} (g_{\Pi}(p) - k_{2P}P(p)); \quad (2.5)$$

$$\text{де: } k_{g^*} = R\Theta^0 V_b^0; k_h = FP_o \Theta^0 / V_b^0; k_{1P} = m_b^0;$$

$$k_H = Q_{MO}^0 / 2H^0; k_a = Q_{MO}^0 / a^0;$$

$$\text{При } P < \frac{3}{3-k} P_c;$$

$$k_{2P} = g_B^0 \frac{\frac{3-k}{2k} P_c^0 - \frac{3-2k}{2k} P_o}{(P_o - P_c^0) \left( \frac{3}{2k} P_c^0 - \frac{3-2k}{2k} P \right)}. \quad (2.6)$$

$$\text{При } p \geq \frac{3}{3-k} P_c, k_{2P} \geq g_B^0 / P_o,$$

де:  $P_o$ ,  $H_o$ ,  $Q_{МП}^0$ ,  $P_c^0$ ,  $V_b^0$ ,  $g_B^0$  і  $a^0$  – відповідно встановилися значення тиску повітря у повітряній подушці, сумарного напору маси, витрати маси, об'єм повітряної подушки, витрати повітря, що надходить у повітряну подушку, та висота напускної щілини;  $F$  – площа поперечного перерізу напускної камери;  $\Theta$  – температура повітря у повітряній подушці;  $R$  – Постійна газова;  $k$  – коефіцієнт політропи,  $m$  – коефіцієнт переведення Па в м вод. ст.;  $P(p)$ ,  $h(p)$ ,  $H(p)$ ,  $Q_{MO}(p)$ ,  $Q_{МП}(p)$ ,  $g^*(p)$ ,  $a(p)$ ,  $g_{\Pi}(p)$  – згідно з зображенням, представленим за Лапласом, розглядаються такі параметри: тиск у повітряній подушці, рівень маси в напускній камері, загальний напір, витрата маси, що проходить через напускну щілину, витрата маси, що надходить у напірний ящик, кількість повітря в повітряній подушці, висота напускної щілини та витрата повітря, що надходить у повітряну подушку [7].

Як свідчать розрахунки, практично  $k_{2P} \approx 0$ . Отже, структурна схема розглянутого об'єкта матиме вигляд, зображений на рисунку 2.2. На основі цієї схеми ми визначимо передатну функцію потрібного каналу ( $g_{\Pi} - h$ ):

$$W_{22}(p) = \frac{-k_H k_{g^*} k_{1P}}{(Fp + A)p}. \quad (2.7)$$

де:  $A = k_H(1 + k_h k_{IP})$ .

Отримана аналітичним шляхом передатна функція потребує уточнення, оскільки в каналі  $g\Pi - h$  існує 3 вид:

$$W_{22}(p) = \frac{k_{22} e^{-p\tau_{22}}}{1 + T_{22}p}; \quad (2.8)$$

де:  $k_{22} = k_H k_g^* k_{IP}/A$ ;  $T_{22} = F/A$ .

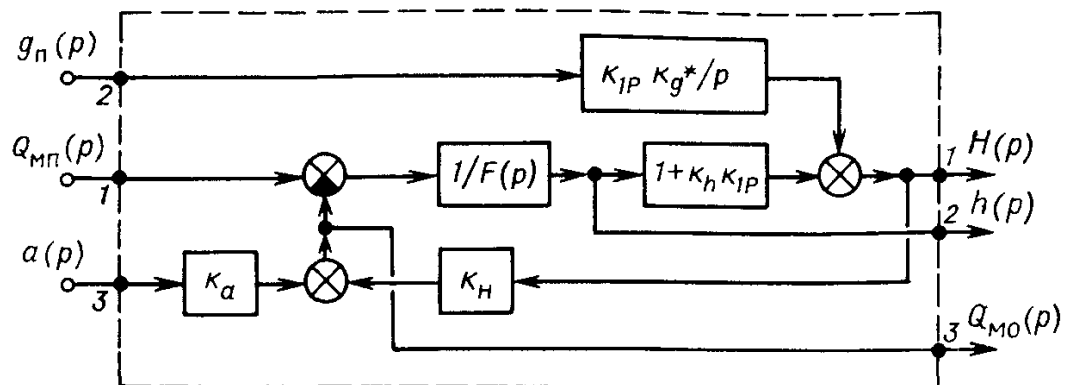


Рисунок 2.3 – Деталізована структурна схема напірної скриньки з повітряною подушкою

Транспортне запізнення = 2,57.

Наразі буде актуальним розрахунок коефіцієнтів передавальної функції моделі.

$$k_H = \frac{3.8}{2 \cdot 2.5} = 0.76;$$

$$k_{g^*} = 8.31 \cdot 18 \cdot 32 = 4786.6;$$

$$k_h = \frac{12 \cdot 70000}{32} = 17500;$$

$$k_{IP} = m_b^o = 0.91;$$

$$A = 0.76(1 + 17500 \cdot 0.91) = 12103;$$

$$k_{22} = \frac{0.76 \cdot 4786.6 \cdot 0.91}{12103} = 0.27;$$

$$T_{22} = \frac{8}{12103} = 0.0006;$$

Передатна функція напірної скриньки по каналу  $g\Pi - h$  набуде вигляду:

$$W_{22}(p) = \frac{0.27}{1 + 0.0006 \cdot p} e^{-2.57p}. \quad (2.9)$$

## 2.4 Аналіз існуючих нелінійностей у контурах регулювання

При аналізі існуючих нерівностей контур регулювання вважають лінійним, якщо його динамічний коефіцієнт передачі постійний, незалежно від того, чи застосовуються в контурі тільки лінійні елементи або містить також і нелінійні елементи, спеціально вводяться для компенсації інших нелінійностей процесу.

Відзначимо, що у нелінійних регуляторних контурах динамічний коефіцієнт передачі змінюється прямо або обернено пропорційно до амплітуди коливань. У випадку прямої залежності невеликі збурення гасяться меншою мірою, ніж великі. Відомо, що стійкість роботи вищезазначеного контуру визначається величиною добутку його коефіцієнта передачі та амплітуди збурюючого впливу. Якщо коефіцієнт передачі перевищує один, то контур буде демонструвати незатухаючі коливання.

Якщо виникає ситуація, коли обернено пропорційної залежності коефіцієнта передачі контуру від амплітуди, то невеликі коливання підсилюються, тоді як великі, відповідно, послаблюються. Це призводить до стабілізації амплітуди коливань контуру, а коефіцієнт передачі буде прагнути одиниці. Коливання з такою амплітудою у технічній документації прийнято називати граничними. Амплітуда граничних коливань залежить від коефіцієнта передачі регулятора [8].

При аналізі контуру з нелінійним елементом використовують діаграму типу «вхід-вихід». Ця діаграма ілюструє зміни динамічних коефіцієнтів передачі об'єкта та регулятора протягом одного періоду коливань регуляторного контуру. Крива, що відображає зміну регулюючого сигналу, нагадує хвилю, яка виникає внаслідок послідовного відображення сигналу від статичних характеристик об'єкта та регулятора.

Відомо, що амплітуда граничних коливань контуру залежить від коефіцієнта передачі об'єкта регулювання протягом періоду його власних коливань. Визначивши цей коефіцієнт, можна створити діаграму «вхід-вихід» або графік зміни амплітуди коливань в залежності від коефіцієнта передачі, а потім визначити амплітуду граничних коливань.

Виокремлюють три типи нелінійних елементів. Перший тип включає елементи з безперервною нелінійною функцією, прикладом чого є крива рН або характеристика переміщення плунжера регулюючого клапана. Другий тип складається з елементів зі шматково-ламанною функцією, таких як елементи систем регулювання, що працюють у режимі насичення. Третій тип охоплює елементи з динамічною нелінійністю, де зсув по фазі та коефіцієнт передачі змінюються в залежності від амплітуди вхідного сигналу. До останнього різновиду також належать елементи з гістерезисною характеристикою [9].

Сьогодні серед динамічних елементів найбільш поширеними є ті, що мають статичну характеристику з гістерезисом. Це явище можна спостерігати, наприклад, у регулюючих клапанах, де гістерезис виникає через сили тертя під час переміщення штока, а також у релейних пристроях. Розмір гістерезису в регулюючих клапанах визначається зміною вихідного сигналу регулятора, необхідного для зміни напрямку руху штока. На амплітуду та період коливань регулювального контуру значно більше впливають інерційні властивості об'єкта, ніж гістерезис. Таким чином, контур регулювання буде стійким, якщо діапазон пропорційності регулятора налаштований так, що амплітуда коливань вихідного сигналу є достатньо великою, а коефіцієнт передачі такого контуру перевищує одиницю.

Як стверджують дослідники, гістерезис можна зменшити, створюючи вихідний сигнал регулятора з великою амплітудою та високою частотою. Для цього в системах пропорційного регулювання з елементом гістерези в замкнутому контурі на клапанах встановлюють позиціонер.

Позиціонер по факту є П-регулятором з високим коефіцієнтом передачі. У поєднанні з приводом клапана, який має інерційне запізнення та гістерезис, він створює додатковий замкнутий контур. Позиціонери використовуються для покращення безпосередньо роботи клапана, забезпечуючи додаткову енергію. Вони впливають на привід клапана до тих пір, поки шток не займе положення, що відповідає вхідному сигналу, при цьому легко долаючи опір, який заважає його переміщенню [7].

Безпосередньо переміщення штока визначається силою тертя та силою, що виникає внаслідок перепаду тиску. Сили тертя викликають гістерезис, який, при поєднанні двох інтегруючих елементів у контурі, може призвести до незгасаючих коливань. Проте, навіть за наявності гістерезису, використання позиціонера сприяє зменшенню фазового зсуву, що виникає внаслідок роботи основного контуру. Великий перепад тиску на мембрані клапана забезпечує надійне утримання штока в будь-якому положенні, включаючи повне відкриття та закриття.

Зазначимо, що період власних коливань клапана з позиціонером варіюється від 0,5 до 2,0 секунд, що залежить від розмірів клапана. Швидкість роботи клапана з позиціонером значно підвищується, проте при регулюванні витрат цього все ще недостатньо. Якщо в системі регулюючий клапан не є найповільнішим елементом, використання позиціонера є доцільним.

#### Висновки за розділом

Розглянули технологічний процес виробництва паперу як об'єкт управління. Розробили структурну схему автоматизації. Для належного регулювання рівня на притоці потрібно змінювати витрату повітря на вході в повітряну подушку.

### 3. СИНТЕЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ

#### 3.1 Знаходження передавальної функції датчиків

У технічній літературі передавальні функції датчиків описуються як оперіодика першого порядку. Необхідно визначити постійні часу для цих датчиків. У документації до датчиків вказано, що постійні часу рівнемірів коливаються від 0.001 до 0.1. Для нашого аналізу прийнемо постійну часу 0.1 с, що буде найгіршим варіантом для системи. Таким чином, передатна функція датчика Resemout 5300 матиме наступний вигляд [8]:

$$W_D = \frac{1}{0.1s + 1}; \quad (3.1)$$

Передатна функція датчика тиску коливається від 0.001 до 0.1. Візьнемо постійну часу 0.1 с, що є найгіршим варіантом для системи. Таким чином, передатна функція датчика Метран 300ПР матиме наступний вигляд:

$$W_D = \frac{1}{0.1s + 1}; \quad (3.2)$$

У нашій системі регулюючими органами є запірно-регулюючий односідельний фланцевий клапан типу DN 150 серії 995 з електричним приводом. Витратна характеристика цього клапана представлена на рисунку 3.1.

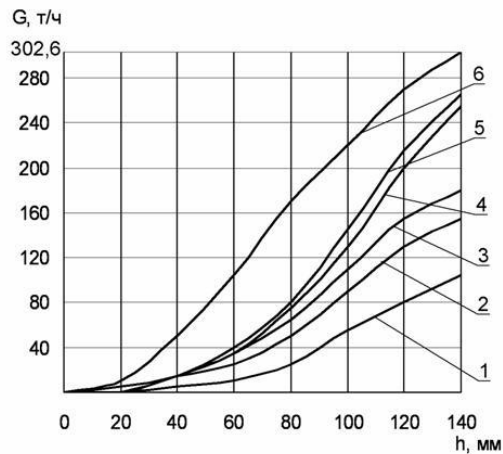


Рисунок 3.1– Витратна характеристика клапана

При робочому тиску в трубопроводі, що становить 0,7 МПа, коефіцієнт передачі буде дорівнювати 1,75. Виходячи з цього коефіцієнта та постійної часу, яка дорівнює 4,5, ми можемо визначити передатну функцію РВ:

$$W = \frac{1.75}{4.5s + 1}. \quad (3.3)$$

### 3.2 Розрахунок параметрів елементів систем регулювання під час використання локальних АСР та її моделювання

Відзначимо, що при автоматизації виробничих процесів найчастіше завдання синтезу зводиться до вибору найбільш відповідного типового регулятора П, ПІ, ПІД законами регулювання та визначення його параметрів налаштування, що забезпечують необхідний перехідний процес [9].

Вибір регулятора та встановлення параметрів налаштування для об'єкта з відомими характеристиками здійснюються в такій послідовності:

- особливості технологічного процесу формують вимоги до якості регулювання, що визначається певними типовими перехідними процесами та їх показниками;
- обирається типовий закон регулювання;
- визначаються параметри налаштування регулятора;

– на основі обчислених значень параметрів налаштування регулятора моделюється перехідний процес для аналізу основних якісних характеристик системи.

Трапляються випадки, коли рівень рідини часто піддається випадковим коливанням, викликаним турбулентністю потоку, що надходить до об'єкта, а також його розбризкуванням. У таких випадках у коливальних контурах виникають коливання з періодом, що відповідає періоду власних коливань контуру. У промислових апаратах рівень рідини зазвичай коливається з амплітудою, яка в деяких випадках може досягати 20-40% від номінального значення.

Зазначимо, що для забезпечення стабільності контуру регулювання рівня рідини достатньо встановити невеликий діапазон пропорційності регулятора. Проте навіть незначні випадкові збурення можуть призвести до того, що плунжер регулюючого клапана досягне крайнього положення, що є неприпустимим. Іноді рівень рідини в резервуарі використовується для регулювання витрат в інших частинах системи, як у нашому випадку. Однак, якщо витрата суттєво коливається, регулювання стає неможливим. У таких випадках застосовують ПІ-регулятори, встановлюючи широкий діапазон пропорційності. Інтегральна складова регулятора забезпечує поступове приведення регульованого параметра до заданого значення.

У технічній документації зазначено, що згідно з теорією автоматичного управління, для замкнутої системи з показником коливності  $M$  можна в комплексній площині створити амплітудно-фазо-частотну характеристику розімкнутої системи. Ця характеристика буде стосуватися кола, центр якого розташований на негативній дійсній вісі в певній точці:

$$C = \frac{M}{1-M^2}. \quad (3.4)$$

та радіусом:

$$R = \left| \frac{M}{1-M^2} \right|. \quad (3.5)$$

З урахуванням цих умов, застосовується наступний алгоритм для розрахунку параметрів регулятора на задану величину  $M$ .

З початку координат комплексної площини проводиться промінь під кутом  $\varphi = \arcsin(1/M)$  відносно негативної дійсної піввісі [10].

Створюється амплітудно-фазова частотна характеристика об'єкта регулювання з умовним регулятором, у якого коефіцієнт передачі дорівнює один.

Далі формується коло з центром на дійсній вісі, яке дотикається до променя та амплітудно-фазо-частотної характеристики.

Передатна функція ПІ – регулятора має вигляд:

$$W(p) = K_{PI} \cdot \left( 1 + \frac{1}{T_{I3} \cdot p} \right). \quad (3.6)$$

За методикою, викладеною вище, отримуємо наступне (рис. 3.2).

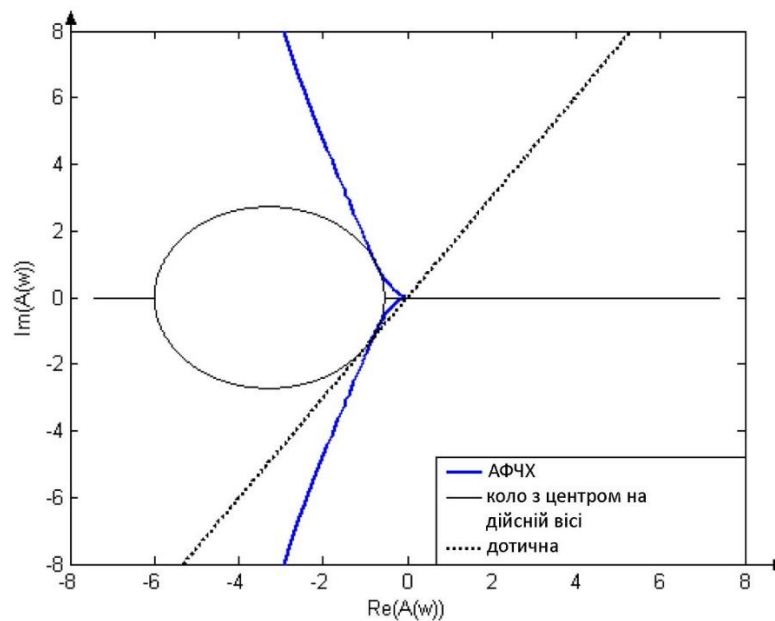


Рисунок 3.2 – Знаходження коефіцієнтів регулятора

Коефіцієнти  $K_{PI} = 275$ ,  $T_{I3} = 68$ .

$$W_{PI}(p) = 275 \cdot \left( 1 + \frac{1}{68 \cdot p} \right). \quad (3.7)$$

Спробуємо змоделювати систему, що синтезується (рис. 3.3), за допомогою програмних інструментів.

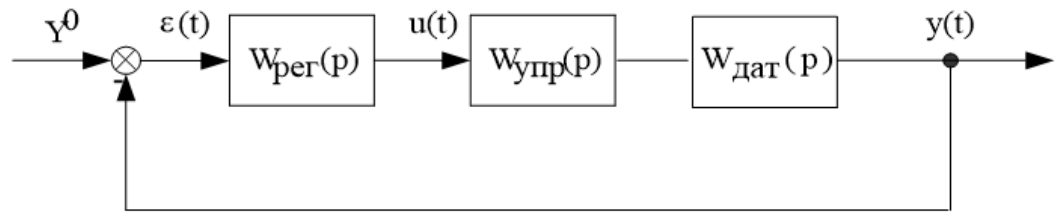


Рисунок 3.3 – Блок-схема системи регулювання

Ми отримали наступну перехідну характеристику (рис. 3.4).

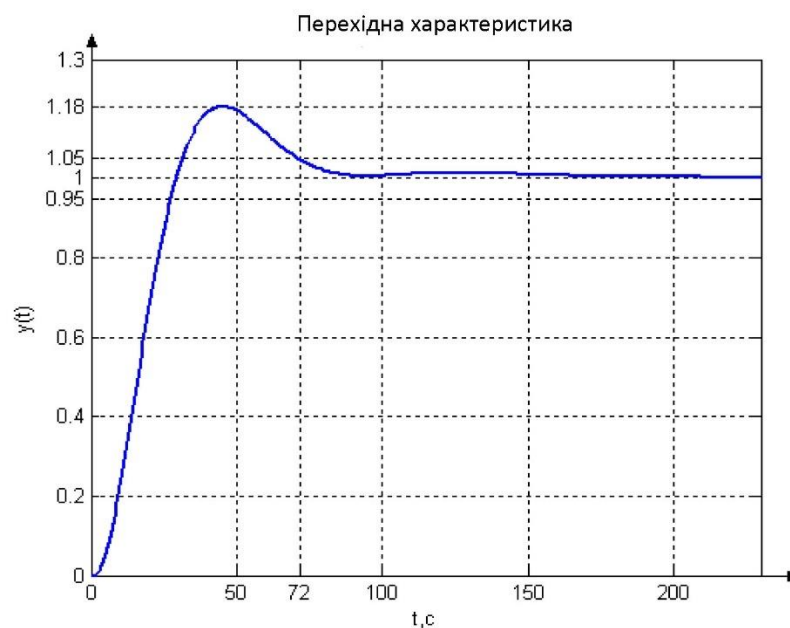


Рисунок 3.4 – Графік перехідного процесу системи при подачі каналом управління одиничного стрибкоподібного впливу

З графіка перехідного процесу можна визначити: час регулювання  $t_p = 72$  с, перерегулювання становить 18 %, а статична помилка наближається до нуля. Ці якісні характеристики відповідають вимогам завдання.

### 3.3 Розрахунок параметрів елементів системи регулювання під час використання багатоконтурної АСР та її моделювання

Спробуємо змодельувати систему з урахуванням збурення при подачі керуючого каналу з нульовим впливом (рис. 3.5 та рис. 3.6) [10].

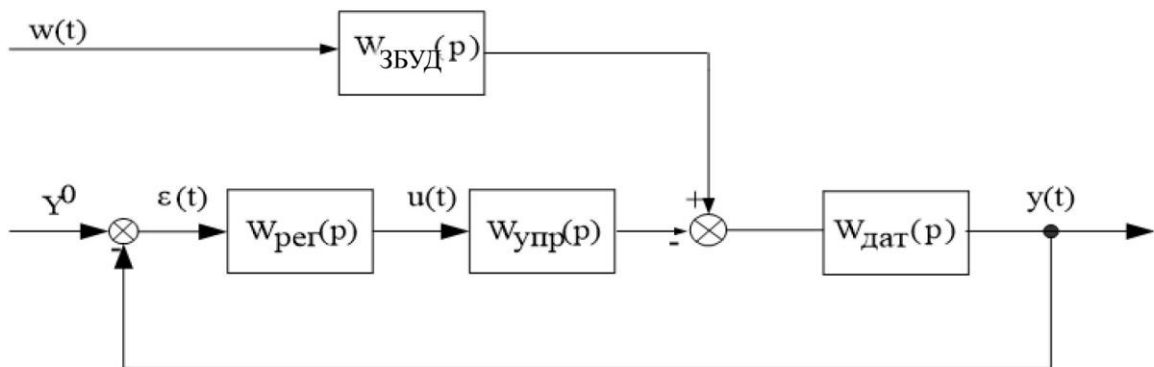


Рисунок 3.5 – Блок-схема системи регулювання зі збуренням  
При подачі каналом управління нульового впливу отримаємо:

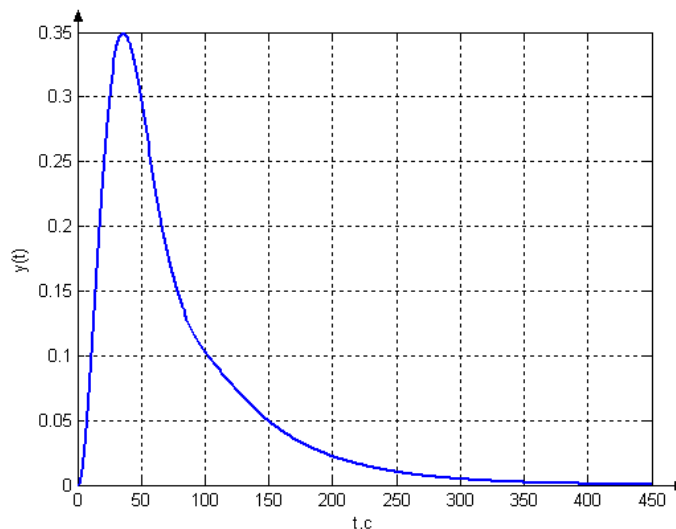


Рисунок 3.6 – Графіки перехідного процесу системи зі збуренням при нульовій дії на вхід

Для усунення отриманих ефектів у систему введемо компенсатор (рис. 3.7). Для мінімізації впливу зовнішніх факторів доцільно додати другий негативний канал, який компенсуватиме вплив зовнішнього збурення.

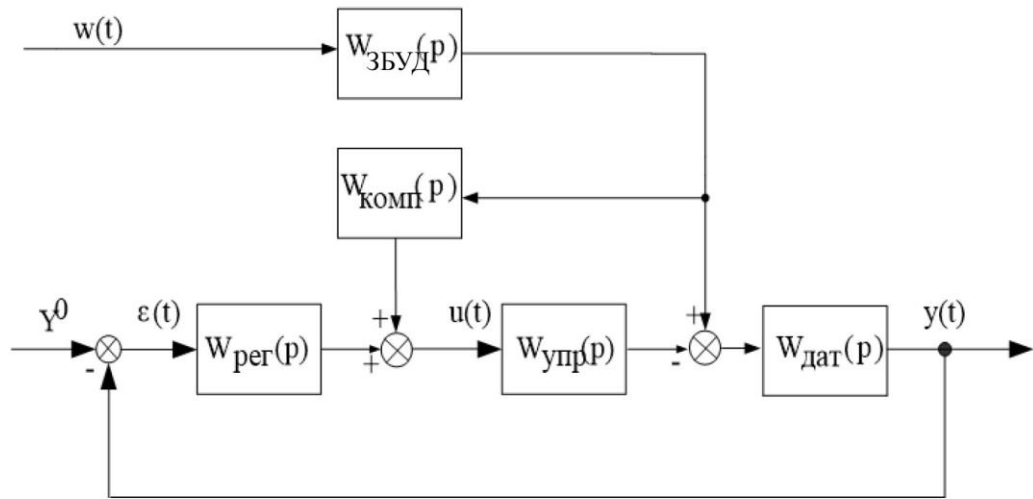


Рисунок 3.7 – Блок-схема системи регулювання із компенсатором по збуренню

Давайте порівняємо отримані результати (рис.3.9).

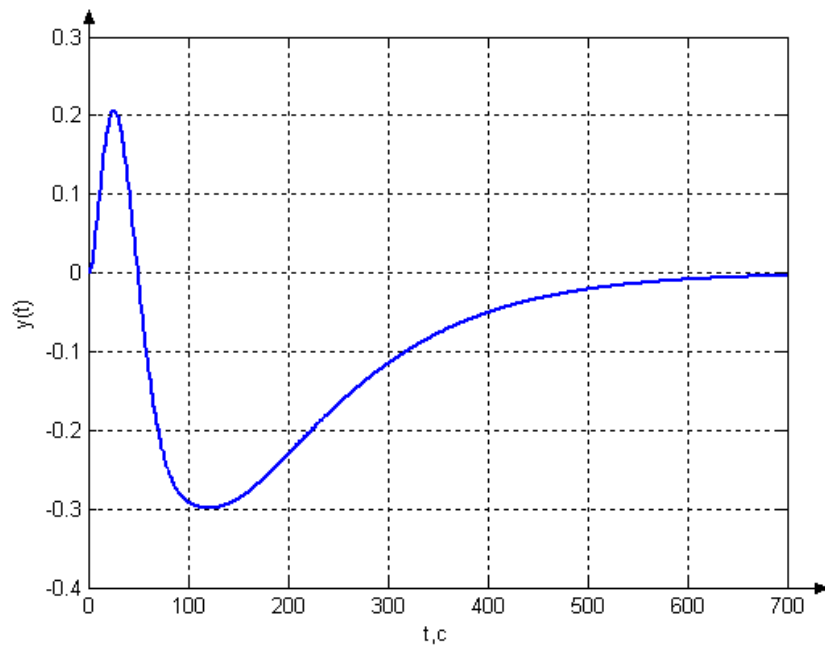


Рисунок 3.8 – Графіки перехідного процесу системи з компенсатором по збуренню при нульовій дії на вхід системи

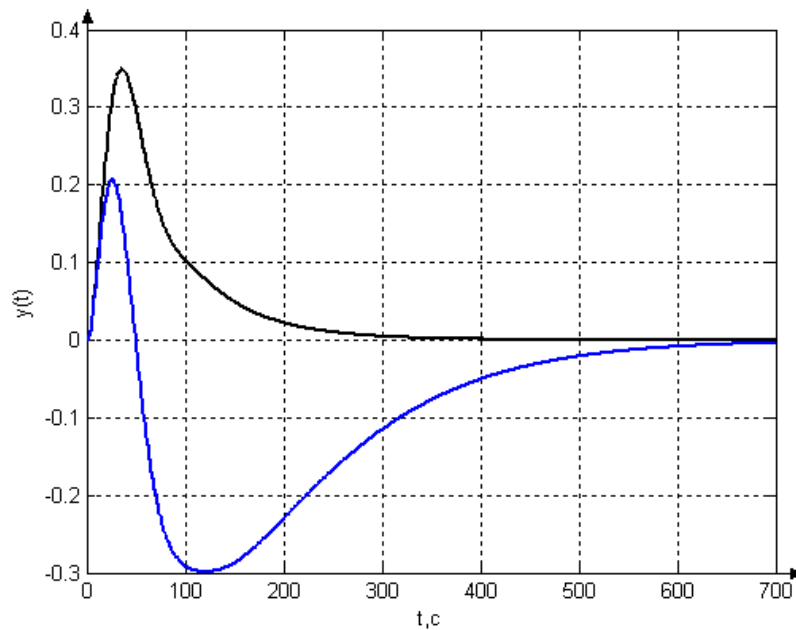


Рисунок 3.9 – Порівняння перехідних показників системи зі збуренням та компенсатором по збуренню при нульовій дії на вхід системи

З рисунка 3.9 чітко видно, що впровадження компенсатора зменшує стрибок, але суттєво подовжує час регулювання. З графіка перехідного процесу можна визначити: час регулювання  $t_p = 391$  с, перерегулювання становить 30 %, а статична помилка прагне до нуля. Моделюємо процес зміни (збільшення та зменшення)  $K_p$  та  $T_i$  на 5% та 10%. Визначимо показники якості перехідних процесів.

З графіка перехідного процесу, при зменшенні  $K_p$  і  $T_i$  регулятора на 5%, отримуємо: час регулювання  $t_p = 405$  с, перерегулювання = 32%, статична помилка прагне до нуля.

З графіка перехідного процесу маємо висновок, при збільшенні  $K_p$  та  $T_i$  регулятора на 5%, отримуємо такі результати: час регулювання  $t_p$  становить 400 с, перерегулювання дорівнює 28%, а статична помилка прагне до нуля.

Відзначимо, що при зменшенні  $K_p$  та  $T_i$  регулятора на 10% з графіка перехідного процесу видно, що час регулювання  $t_p$  становить 410 с, перерегулювання досягає 38%, а статична помилка також прагне до нуля.

У ситуації, коли  $K_p$  та  $T_i$  регулятора збільшуються на 10%, графік перехідного процесу показує, що час регулювання  $t_p$  становить 380 с, перерегулювання дорівнює 26%, а статична помилка знову прагне до нуля.

### 3.4 Моделювання з урахуванням нелінійності

У реальних умовах технологічного процесу важливо враховувати спотворення, які виникають через нелінійність. Усі реальні системи спочатку є нелінійними, тому, коли ми застосовуємо лінійну модель для опису такої системи, ми фактично виконуємо лінеаризацію певних її властивостей.

По факту метод гармонійної лінеаризації належить до наближених методів дослідження автоколивань. Він дозволяє визначити умови існування та параметри автоколивань у нелінійних системах практично будь-якого порядку. Цей метод також може бути використаний для аналізу вимушених коливальних режимів та для наближеної оцінки якості перехідних процесів.

Метод гармонійної лінеаризації базується на вивченні поведінки системи під впливом гармонійного (синусоїдального) сигналу, який подається на вхід нелінійного елемента. При цьому періодичну криву на виході нелінійного елемента замінюють на першу гармоніку. Похибка, що виникає внаслідок такої заміни, є відносно невеликою, оскільки лінійна частина системи автоматичного управління (САУ) виконує згладжуючу функцію, подібну до фільтра низьких частот, що не пропускає високочастотні коливання. Вони фактично пригнічуються елементами системи, які мають інерційні властивості, такими як індуктивність або механічні маси [9].

Технічний світ тлумачить метод гармонійної лінеаризації на припущенні, що автоколивання можна приблизно описати у вигляді синусоїдальної функції. Лінеаризація передбачає заміну нелінійних елементів на лінійну передатну функцію, що дозволяє створити модель для малих відхилень від робочої точки. Цей підхід часто використовується в системах з внутрішніми коливаннями. У деяких випадках неможливо знайти адекватний

метод аналізу, і єдиним виходом залишається імітаційне моделювання. Проте, враховуючи особливості нелінійних систем, навіть якщо обраний метод аналізу є доцільним, результати слід перевіряти за допомогою моделювання.

Система, що враховує нелінійність, має наступний вигляд:

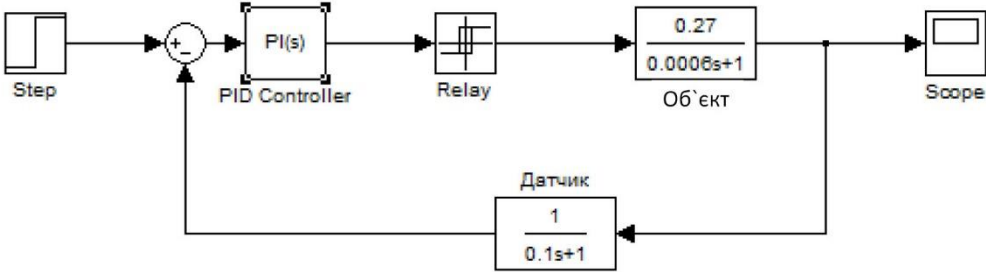


Рисунок 3.10 – Система регулювання з нелінійністю

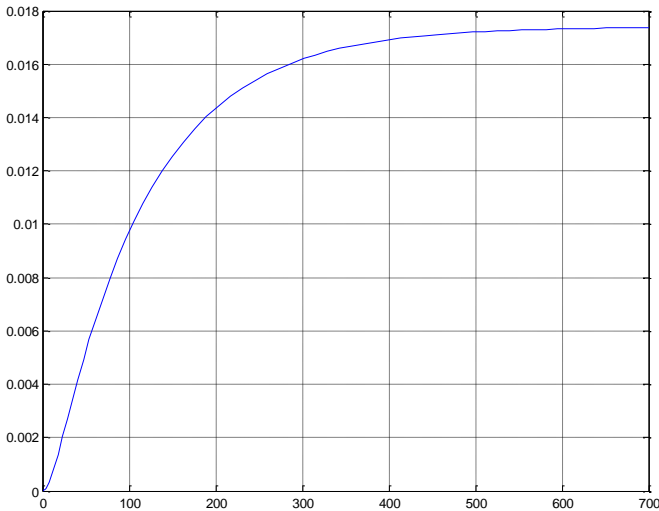


Рисунок 3.11 – Графіки перехідного процесу системи з нелінійністю

Після проведення лінеаризації ми отримали коефіцієнт посилення  $K=2,9876$ . Замінивши нелінійність на цей коефіцієнт, ми формуємо систему у такому вигляді:

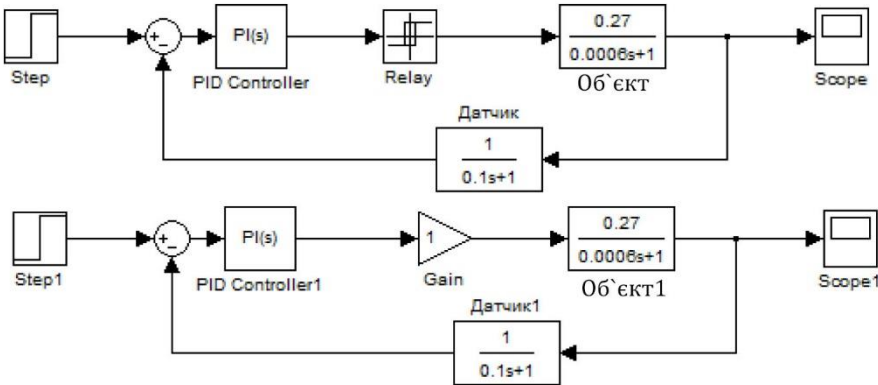


Рисунок 3.12 – Система регулювання з нелінійністю та з коефіцієнтом посилення

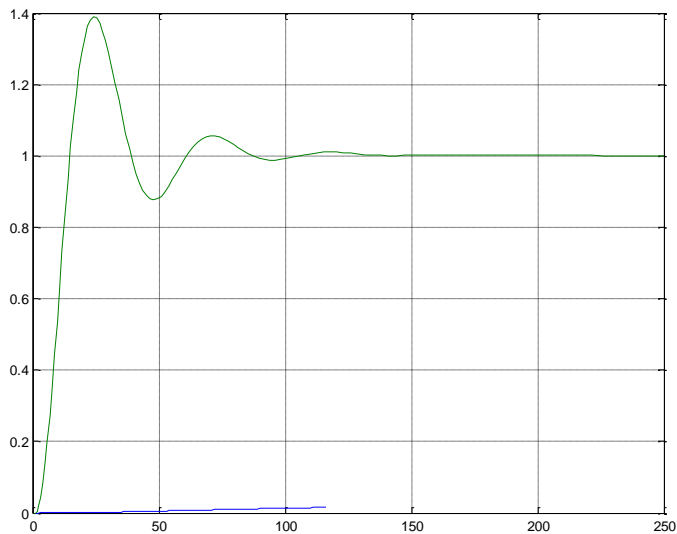


Рисунок 3.13 – Порівняння перехідних характеристик з нелінійністю та з коефіцієнтом посилення

Висновок за розділом

Знайшли передавальну функцію датчиків. Зазначимо, що для забезпечення стабільності контуру регулювання рівня рідини достатньо встановити невеликий діапазон пропорційності регулятора. Дослідили багатоконтурну АСР та з урахуванням нелінійності.

## 4. РОЗРОБЛЕННЯ СХЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТА ВИБІР ЇЇ ЕЛЕМЕНТІВ

### 4.1 Вибір первинних засобів автоматизації

Згідно з таблицею 1.1 з першого розділу, сигнали, які підлягають автоматизації розмежуємо на:

- витрата паперової маси FE 1-1;
- рівень оборотної маси LE 2-1; LE 4-1;
- рівень підмержевої маси LE 4-1;

- тиск повітря РЕ 3-1;
- температура паперової маси ТЕ 9-1.

Сучасні засоби автоматизації повинні відповідати ряду вимог:

1. Висока точність вимірювання є найважливішою вимогою, особливо коли потрібно визначити не миттєву витрату, а загальну кількість (масу або обсяг) речовини, що пройшла.
2. Висока надійність є другою найважливішою вимогою. Вона оцінюється за тривалістю, протягом якої прилад зберігає свою працездатність та досягнуту точність. Цей період залежить від типу приладу та умов його використання.
3. Точність вимірювання має незначну залежність від зміни щільності речовини. Лише теплові та силові витратоміри, які вимірюють масову витрату, володіють цією важливою характеристикою.
4. Швидкість роботи приладу та його динамічні характеристики є важливими аспектами, особливо коли витратомір використовується в системах автоматичного регулювання або для вимірювання швидко змінних витрат.
5. Широкий спектр змін. Для приладів з лінійною характеристикою цей діапазон становить від 8 до 20 і більше, тоді як у витратомірів з системою управління, що мають квадратичну характеристику, він обмежується лише 3-10.
6. Забезпеченість метрологічною базою. Зразкові витратомірні установки, які потрібні для калібрування та перевірки різних витратомірів, є складними та дорогими, особливо коли йдеться про великі обсяги витрат, що підлягають перевірці.
7. Різноманіття вимірюваних речовин є досить широким. Вони можуть бути не лише однофазними та однокомпонентними, а й багатofазними та багатоконпонентними.

Отже, для вимірювання витрати паперової маси, враховуючи зазначені вимоги, було обрано витратомір Метран 305ПР. Параметри цього пристрою наведені в таблиці 4.1 [11].

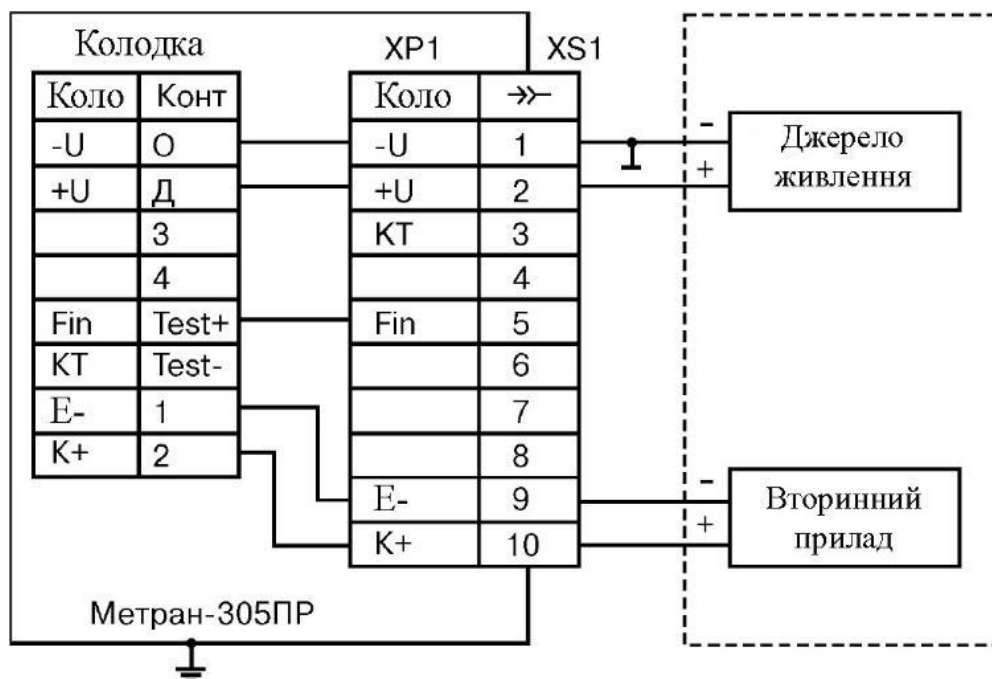
Таблиця 4.1 – Параметри витратоміра Метран 305ПР

Параметр	Значення
$Q_{\min}$ , м <sup>3</sup> /год	0,4
$Q_{\max}$ , м <sup>3</sup> /год	50
Надлишковий тиск вимірюваного середовища, МПа	30
Діапазон температур вимірюваного середовища	1...100°C
Втрата тиску рідини на витратомірі при витраті $Q$ не перевищує МПа	<0.12

Вихідні сигнали витратоміра виглядають наступним чином:

- пасивний імпульсний типу «замкнуто/розімкнуто» оптопара (стандартно);
- струмовий 4-20 мА з HART-протоколом (опція);
- цифровий сигнал ModBus RTU/RS485 (опція).

Електроживлення витратоміра здійснюється від зовнішнього джерела постійного струму напругою 16...36 В з амплітудою пульсації напруги трохи більше 200 мВ. Потужність витратоміра, що споживається: не перевищує 3,6 Вт.



## Рисунок 4.1 – Схема підключення перетворювача Метран-305ПР

Для підтримки необхідного рівня оборотної та підмережевої маси обираємо рівнемір Rosemount 3300, параметри якого представлені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Параметри рівнеміра Rosemount 3300 [12]

Параметр	Значення
Випромінювана потужність	Номінальна 50 мкВт, максимальна 2 мВт
Діапазон вимірів	від 0,1 м до 23,5 м (залежить від типу зонда)
Похибка вимірів рівня	$\pm 5$ мм для зондів $< 5$ м; $\pm 0,1\%$ від вимірюваної відстані для твердих зондів $> 5$ м; $\pm 0,15\%$ від вимірюваної відстані для гнучких зондів $> 5$ м
Оновлення показань	1 раз в с
Тиск процесу	від -0,1 до 4,0 МПа

У сучасній промисловості рівноміри типу Rosemount 3300 використовуються в різних промислових секторах, зокрема в хімічній та нафтохімічній промисловості, нафтогазовій галузі, целюлозно-паперовій промисловості, фармацевтиці, харчовій промисловості та виробництві напоїв. Вони також застосовуються для контролю якості питної води та стічних вод, а також в енергетиці, зокрема на греблях, гідро- та електростанціях.

Деталізуємо переваги вищерозглянутих рівномірів:

- точність вимірювань не залежить від діелектричної проникності, щільності, температури, тиску Н;
- різні типи зондів дозволяють застосовувати рівноміри 3300 в резервуарах різної геометрії, у тому числі з наявністю внутрішніх конструкцій;
- простота установки;
- двопровідна схема підключення (можна використовувати наявні кабелі);
- простота заміни використовуваних блоків електроніки більш досконали;

- можливість використання існуючих конструкційних пристроїв при заміні буйкових рівнемірів;
- можливість одночасного вимірювання рівня та рівня межі поділу двох рідин;
- надійність вимірів в умовах високої турбулентності або вібрацій, запиленості та пароутворення.

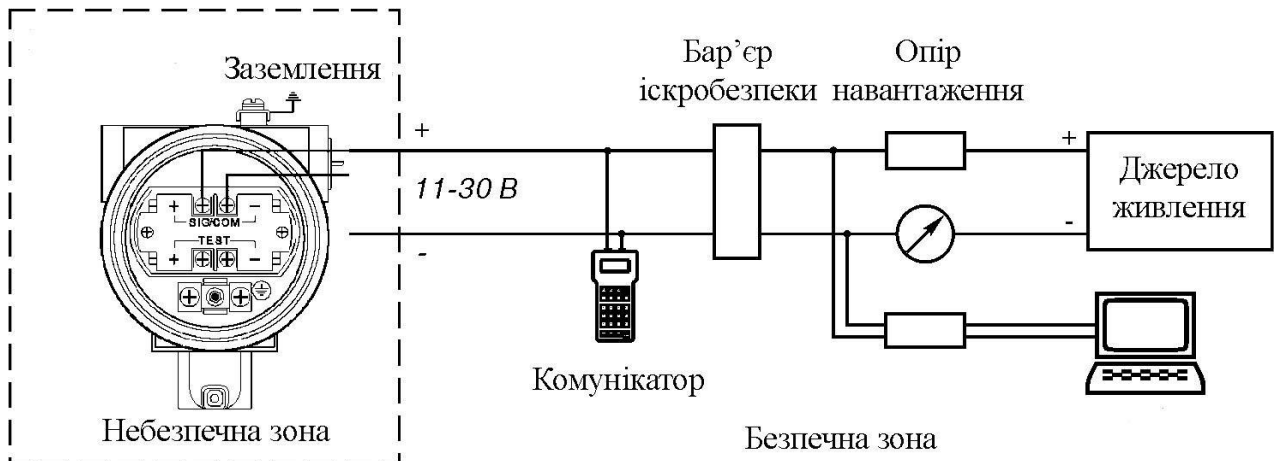


Рисунок 4.2 – Схема підключення рівнеміра Rosemount 3300

Для вимірювання тиску повітря в напускній камері обираємо датчик тиску Метран 75, характеристики якого представлені в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Параметри датчика тиску Метран 75 [13]

Параметр	Значення
Можливі верхні межі вимірювання тиску	від 10,3 кПа до 25 МПа
Можлива перенастроювання діапазону вимірювання	в межах не більш як 20:1
Температура технологічного процесу	-40...121°C

Датчики забезпечують безперервне перетворення тиску в аналоговий вихідний сигнал постійного струму або цифровий вихідний сигнал за стандартом протоколу HART.

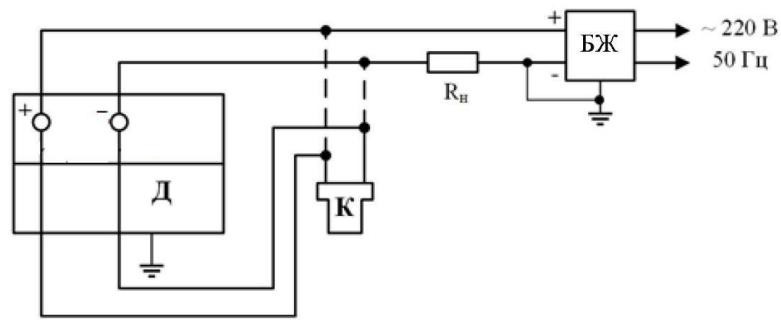


Рисунок 4.3 – Схема підключення датчика тиску Метран 75

Для вимірювання температури паперової маси обираємо датчик температури ТПУ-205, характеристики якого представлені в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Параметри датчика температури ТПУ-205 [14]

Параметр	Значення
Діапазон уніфікованого вихідного сигналу	4...20 мА
Потужність	не більше 0,8 Вт
Робочі умови вимірів	-50...85 °С

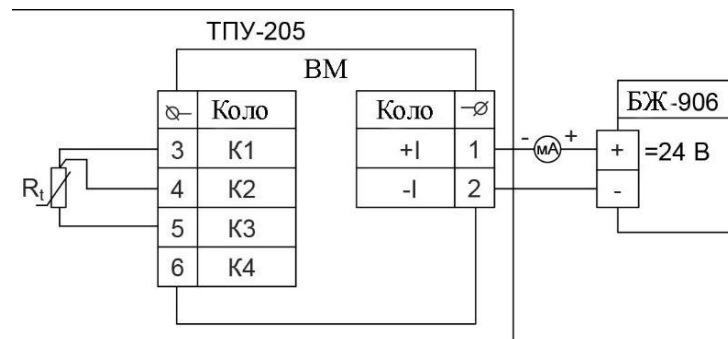


Рисунок 4.4 – Схема підключення датчика температури ТПУ-205

Зазначимо, що ТПУ-205 призначені для вимірювання та перетворення температури в уніфікований вихідний сигнал постійного струму в діапазоні 4...20 мА. Вони виконують функції приймачів і є повноцінними аналогами приладів ТСМУ, ТСПУ, ТХАУ та ТХХУ-205. До складу ТПУ-205 входять первинний перетворювач температури (ПТ) та вимірювальний перетворювач (ВП). ВП є мікропроцесорним пристроєм, який встановлюється в головку термоперетворювача.

## 4.2 Підбір та обґрунтування технічних засобів

У нашій роботі вибір технічного завдання здійснювався на основі таких критеріїв:

1) Контролер FATEK серії FBs був призначений для виконання конкретних завдань, а кількість та характеристики модулів обиралися відповідно до цих завдань:

Таблиця 4.5 – Параметри технічних засобів

Тип модуля	Характеристика	Опис
FBs-20MC	max DO/I - 20, максимально допустимий струм шини на постійну напругу 5 В – 600 мА	Базовий модуль з вбудованим ЦП з вбудованими дискретними входами/виходами. DI (12 входів) – для підключення 9 кнопок, DO (8 виходів) – для управління ПБР та частотними приводами
FBs-6AD	2x6 аналогових входів	Для підключення датчиків рівня (3), температури (1), витрати (1), тиску (1) та ПП (6).
FBs-CM25E	протокол – TCP/IP, UDP, режим зв'язку – дуплекс/напівдуплекс, кількість одночасно відкритих з'єднань -8, максимальна швидкість передачі – 10Мбіт/с, живлення – 240 мА	Комунікаційний модуль із підтримкою Ethernet

2) МЕО було обрано на основі того, що напірний ящик класифікується за ПУЕ як зона В-1а. Ця зона визначається як така, що розташована в приміщеннях, де під час нормальної експлуатації не утворюються вибухонебезпечні суміші горючих парів, газів або парів легкозаймистих рідин з повітрям чи іншими окислювачами. Виникнення таких сумішей можливе лише внаслідок аварій або несправностей.

3) Датчики були обрані з урахуванням їх здатності вимірювати необхідні діапазони величин, а також наявності вибухо- та пожежобезпечного виконання.

4) Шафа навісна К604-02-IP54 розмірами 800x600x300 була обрана через необхідність розміщення та підключення великої кількості обладнання, а також завдяки наявності зовнішнього охолодження.

### 4.3 Розрахунок теплового балансу шафи управління

При розрахунку теплового балансу шафи управління сумарну теплоту, що виділяється приладами (за винятком частотних приводів) у шафі, визначимо на основі споживаної потужності:

$$Q_{\Sigma} = P = 320 \text{ Вт.} \quad (4.1)$$

Максимально допустима температура шафи становить  $50^{\circ}\text{C}$ , що визначається робочими температурами блоків живлення. У приміщенні максимальна температура досягає  $30^{\circ}\text{C}$ . Відповідно, можемо визначити різницю температур:

$$\Delta T = T_{\text{щ}} - T_{\text{oc}}; \quad (4.2)$$

$$\Delta T = 50 - 30 = 20.$$

Маємо розрахунок ефективної площі теплообміну для шафи, яка не є крайньою в ряду:

$$A = 1.4 \cdot D \cdot (W + H) + 1.8 \cdot W \cdot H; \quad (4.3)$$

$$A = 1.4 \cdot 0.3 \cdot (0.8 + 0.6) + 1.8 \cdot 0.8 \cdot 0.6 = 1.44 \text{ м}^2.$$

Для визначення об'ємного потоку  $V$ , необхідного для відведення теплової потужності  $Q_{\Sigma}$ , використовується наступна формула:

$$V_{\Sigma} = \zeta \frac{Q_{\Sigma}}{\Delta T}; \quad (4.4)$$

$$V_{\Sigma} = 3.1 \frac{320}{20} = 49.6 \frac{\text{м}^3}{\text{год}}.$$

У документації для частотних приводів вказано, що необхідний обсяг охолоджуючого повітря становить 15,25 м<sup>3</sup>/год. Оскільки в нашій шафі встановлено сім частотних приводів, загальний обсяг повітря буде дорівнювати:

$$V_{\text{цп}} = 15,25 \cdot 3 = 45,75 \frac{\text{м}^3}{\text{год}}.$$

Загальний обсяг охолоджуючого повітря для нашої шафи має становити 95,35 м<sup>3</sup> на годину.

#### 4.4 Комплектація мікропроцесорних засобів регулювання з розподілом параметрів контролю та регулювання за модулями

Для комплектації мікропроцесорних засобів система автоматичного регулювання розроблена на основі ПЛК серії С300 компанії Honeywell. Цей контролер повністю підтримує п'ять мов стандарту MEK61131-3. Він має можливість підключення до модулів віддаленого введення/виведення через протоколи Modbus або DCON, використовуючи RS-232/485 або Ethernet.

Таблиця 4.6 - Розподіл параметрів, що підлягають контролю та регулюванню за модулями 1-го контролера [15]

Модуль	Канал	Параметр
1	2	3
FBs-6AD	1	Вимірювання рівня в напускній камері, переливному бачку, збірнику підсіточних підключених вод за 4-х провідною схемою
	2	
	3	
	4	Вимірювання температури паперової маси в напускній камері підключено за 4-х провідною схемою
	5	Вимірювання тиску повітря в повітряній подушці підключено за 4-х провідною схемою
	6	Вимірювання витрати паперової маси підключено за 4-х провідною схемою
	7	Не використовується
	8	Не використовується
	9	Не використовується
FBs-20MC	1	
	2	

	3	Управління частотними приводами
	4	
	5	
	6	
	7	
	8	
	9	
	10	
	11	
	12	

#### **4.5 Вибір обладнання для поєднання локальних контурів регулювання з АСУ ТП верхнього рівня**

Враховуючи практичний досвід при виборі обладнання, зазвичай, розподілені автоматизовані системи управління технологічними процесами (АСУ ТП) мають трирівневу архітектуру. Приклад структурної схеми комплексу технічних засобів цієї системи представлений на рисунку 4.5.

На самому верхньому рівні, за участю оперативного персоналу, вирішуються завдання диспетчеризації процесу, оптимізації режимів, підрахунку техніко-економічних показників виробництва, а також візуалізації та архівування даних, діагностики і корекції програмного забезпечення системи. Верхній рівень автоматизованої системи управління технологічними процесами (АСУ ТП) реалізується на основі серверів, операторських та інженерних станцій.

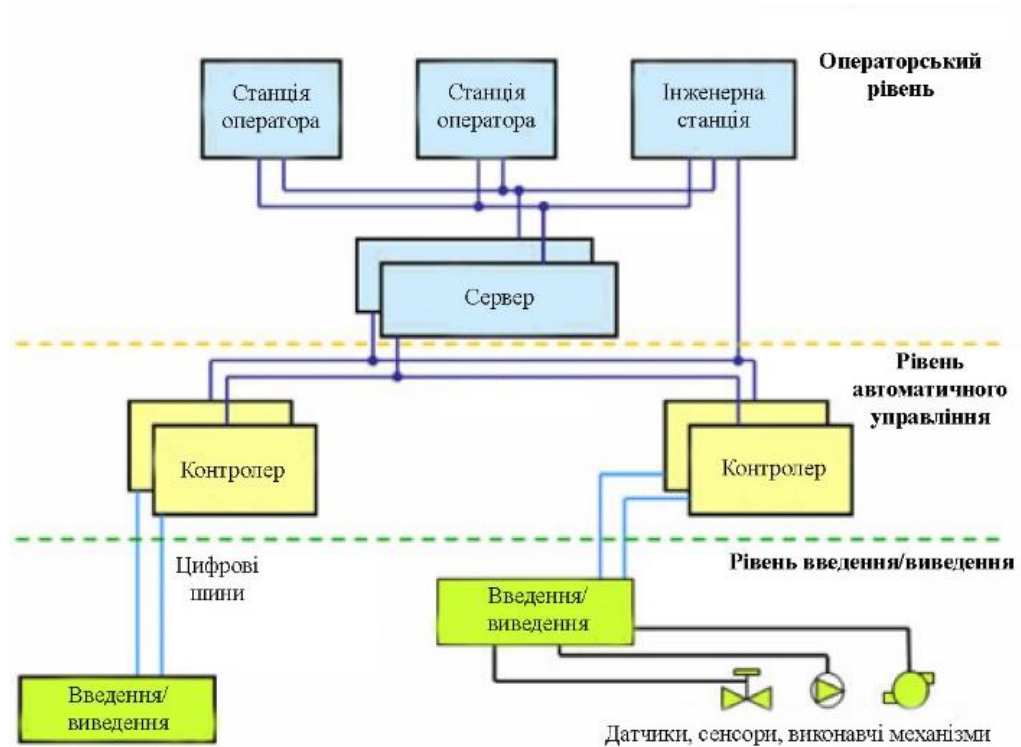


Рисунок 4.5 – Структура розподіленої АСУ ТП

На середньому рівні виконуються завдання автоматичного управління та регулювання, запуску та зупинки обладнання, логіко-командного управління, а також аварійних відключень та захистів. Реалізація середнього рівня здійснюється з використанням ПЛК.

Нижній, який ще має назву польовий, рівень АСУ ТП відповідає за збір даних про параметри технологічного процесу та стан устаткування, а також за реалізацію управляючих впливів. Основними технічними засобами цього рівня є датчики, виконавчі пристрої, станції розподіленого вводу/виводу, пускачі, кінцеві вимикачі та перетворювачі частоти.

Для з'єднання елементів як на різних рівнях, так і всередині одного рівня застосовують мережеві технології. Мережі передачі даних, що використовуються в АСУ ТП, можна умовно розділити на два класи:

1. Польові шини (Field Buses).
2. Мережі верхнього рівня (операторського рівня, Terminal Buses).

Отже, приходимо до висновку, що основною функцією польової шини є забезпечення мережевої взаємодії між контролерами та віддаленими

периферійними пристроями, такими як вузли вводу/виводу. Крім того, до польової шини можуть підключатися різноманітні контрольно-вимірювальні прилади та виконавчі пристрої, які оснащені відповідними мережевими інтерфейсами. Ці пристрої часто називають інтелектуальними, оскільки вони підтримують високорівневі протоколи для мережевого обміну [16].

Мережі верхнього рівня АСУ ТП призначені для передачі даних між контролерами, серверами та робочими станціями операторів. Іноді до таких мереж додаються додаткові елементи, такі як центральний архівний сервер, сервер промислових додатків, інженерна станція тощо.

Отже, на нижньому рівні ми можемо організувати обмін даними через RS-485 за протоколом Modbus, а на верхньому рівні використовувати Ethernet без необхідності в додаткових комунікаційних модулях. Результатом буде система візуалізована на рисунку 4.6.

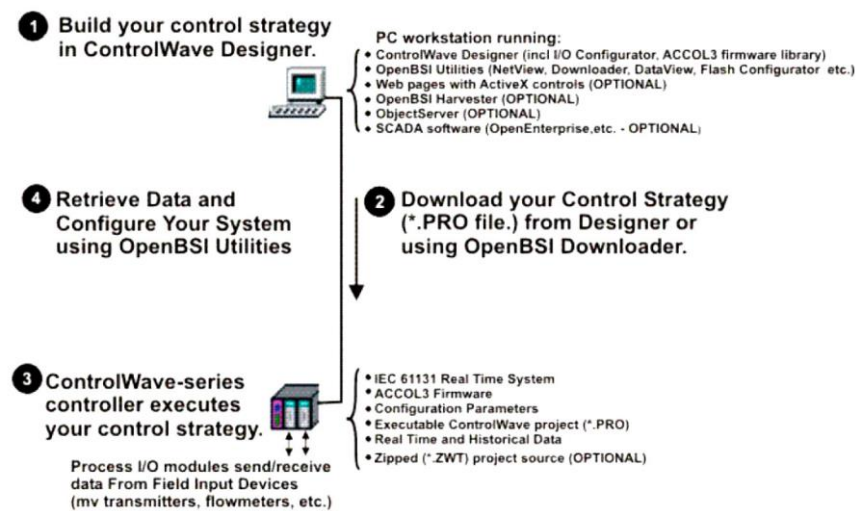


Рисунок 4.6 – Схема з'єднання локальної та АСУ верхнього рівня

### Висновки за розділом

Обрали первинні та технічні засоби автоматизації. Датчики були обрані з урахуванням їх здатності вимірювати необхідні діапазони величин, а також наявності вибухо- та пожежобезпечного виконання. Враховуючи практичний досвід при виборі обладнання, зазвичай, розподілені АСУ ТП мають тривірневу архітектуру.

## ВИСНОВКИ

Мета кваліфікаційної робота бакалавра досягнута, а саме розроблено автоматизовану системи управління технологічним процесом напуску паперової маси на сітку папероробної машини за допомогою напірної скриньки з повітряною подушкою, що дозволяє вдосконалити виробничий процес.

У першому розділі розглянули основні технологічні стадії виробництва паперу. Кожен етап виробництва паперу має своє значення та виконує унікальну функцію. Виявили, що АСУ ТП реалізована на застарілих приладах, які відповідають лише базовим вимогам, а сигналізація та блокування на обладнанні не відповідають сучасним світовим стандартам у цій галузі. Окреслили які саме сигнали підлягають автоматизації.

У другому розділі розглянули технологічний процес виробництва паперу як об'єкт управління. Розробили структурну схему автоматизації. Для належного регулювання рівня на притоці потрібно змінювати витрату повітря на вході в повітряну подушку.

У третьому розділі знайшли передавальну функцію датчиків. Зазначимо, що для забезпечення стабільності контуру регулювання рівня рідини достатньо встановити невеликий діапазон пропорційності регулятора. Дослідили багатоконтурну АСР та з урахуванням нелінійності.

У четвертому розділі обрали первинні та технічні засоби автоматизації. Датчики були обрані з урахуванням їх здатності вимірювати необхідні діапазони величин, а також наявності вибухо- та пожежобезпечного виконання. Враховуючи практичний досвід при виборі обладнання, зазвичай, розподілені АСУ ТП мають трирівневу архітектуру.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Видавничо-поліграфічні матеріали Ч1. Друкарський папір та картон / автори.: І.В. Солтис, О.В. Дуболазов, Чернівці: Чернівецький нац. ун-тет, 2021, с. 347
2. ДСТУ EN IEC 60079-15:2019 Вибухонебезпечні середовища. Частина 15. Електричне устаткування. Вид вибухозахисту n (EN IEC 60079-15:2019, IDT; IEC 60079-15:2017, IDT).
3. Правила улаштування електроустановок. Офіційне видання. – Київ, 2017.
4. Основи автоматизації технологічних процесів. Конспект лекцій [Електронний ресурс] : навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні» за спеціальностями 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: В. В. Шевченко, Г. С. Тимчик.. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 111 с.
5. Автоматизація виробничих процесів: підручник/ І.В.Ельперін, О.М. Пупена, В.М. Сідлецький, С.М.Швед. – Вид. 2-ге, виправлене. – К.: Вид. Ліра-К, 2017. – 378 с.
6. Савицький В. Технічні засоби автоматизації. Львів, 2018. 292 с.
7. Васильківський І. С., Фединець В. О., Юсик Я. П. Виконавчі пристрої систем автоматизації. Львів, 2020. 220 с.
8. Аблесімов О. К. Теорія автоматичного управління: навчальний посібник / О. К. Аблесімов – К. : «Освіта України», 2019. – 270 с.
9. Невлюдов І. Ш. Автоматичне управління технологічними об'єктами [Електронний ресурс]: Підручник / І. Ш. Невлюдов, О. В. Токарєва; М-во освіти і науки України, ХНУРЕ. – Харків: ХНУРЕ, 2018. – 190 с.

10. Моделювання систем управління в SIMULINK : навч. посібник / [В. О. Богомолів, О. Г. Гурко, В. І. Клименко, Д. М. Леонт'єв, О. М. Красюк] ; М-во освіти і науки України. Харків ХНАДУ, 2018. - 220 с.

11. Каталог перетворювачів витрати Метран 305ПР. – Режим доступу: <https://www.mashprom.com.ua/%D0%BC%D0%B5%D1%82%D1%80%D0%B0%D0%BD-305%D0%BF%D1%80>

12. Каталог рівнемірів. – Режим доступу: [https://www.testrite.com.ua/ua/emerson\\_rosemount\\_3300.php](https://www.testrite.com.ua/ua/emerson_rosemount_3300.php)

13. Каталог датчиків тиску. – Режим доступу: <https://vodomir.in.ua/ua/p1451527543-datchiki-tisku-metran.html>

14. Каталог датчиків температури. – Режим доступу: <https://regmik.ua/product/datchiki-temperature-205/>

15. Каталог контролерів. – Режим доступу: <https://fatek.com.ua/>

16. Каталог мікропроцесорів. – Режим доступу: <https://tdz.net.ua/ua/p1367540443-plk-asu-programmiruemyj.html>

17. Шефер О.В., Єрмілова Н.В. Методичні рекомендації до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» – Полтава: Національний університет імені Юрія Кондратюка, 2025. – 18 с

# ДОДАТКИ

## ДОДАТОК А

### 1. ANALYSIS OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF PAPER PRODUCTION

#### 1.1 Main technological stages of paper production

Let us consider the main technological stages of paper production. The main goal of the process of applying paper pulp to an endless wire of a paper machine (PM) is to achieve the required thickness  $G_{PM2} = 0.20$  mm. This is achieved by a smooth flow without crossing jets, eddies and the formation of flakes, while the thickness is formed due to the pressure in the air cushion with a pressure of  $P = 0.9$  MPa.

The section of paper pulp feeding to the PM wire using a pressure box with an air cushion consists of several stages. The first stage will be the mixing process, which is performed by a mixing pump. The second stage is cleaning by a battery of pulp cleaners. The third stage is distribution, which is directly performed by the pulp flow distributor. At the last, fourth stage, the circulating pulp overflows in the overflow tank. Such a tank consists of an air cushion and a filling chamber that directly feeds the pulp, an endless screen that moves from the chest to the gauche shaft during the squeezing process, as well as a system for collecting under-screen water.

During the mixing process, the mixing pump (engine M1) feeds a high-concentration pulp plus a circulating mixture formed as a result of mixing the circulating pulp ( $F_{*OM}$ ) and under-screen water ( $F_{*PV}$ ). The circulating pulp comes from the bottom of the overflow barrel, and under-screen water comes from the bottom of the under-screen water collector. The resulting paper pulp 1 ( $F_{PM1} = 3.8$  m<sup>3</sup>/min) enters the pulp purifier battery, where the cleaning process takes place. The cleaned paper pulp enters the flow distributor, and the waste is discharged from the bottom of the device.

Further, the main flow of cleaned paper pulp (about 90%) after the flow distributor enters the filling chamber, where it is necessary to maintain the level ( $L=2.5-3$  m) and control the temperature of the paper pulp. The proper level is maintained using the pressure ( $P=0.9-1$  MPa) of the air cushion. In turn, the pressure is regulated by changing the air flow rate ( $1 F*B1$ ), which is supplied by the compressor (engine M2).

About ten percent of the residual mass is connected to the sub-network water through the overflow tank, forming a circulating mass, which is recycled to the mixing pump (engine M1). The level ( $LOM = 0.3$  m) is maintained in the overflow tank, which is regulated by changing the flow rate of the circulating mass  $F*OM$ .

Further, from the filling chamber, having overcome the path through the filling gap, the formed paper pulp is directed to an endless mesh moving from the chest to the gauche shaft at a constant speed.

The next step is to squeeze the filling mass onto the screen. Then the resulting under-screen water enters the under-screen water tank, where the required level is maintained ( $LPW=0.2$ m). The level is maintained by changing the flow rate at the outlet of the assembly  $F * PV$ .

So, summing up the above, we come to the conclusion that each stage of paper production has its own significance and performs a unique function. In turn, increasing the accuracy of the mechanisms and the speed of response to external influences is an important task in our work.

## 1.2 Characteristics of production and operation mode of the main equipment

According to the technical documentation, the paper pulp filling station is classified as follows:

- according to the PUE, it belongs to zone B-1a, which is defined as a zone located in premises where explosive mixtures of flammable vapors, gases or vapors of flammable liquids with air or other oxidizers are not formed during normal

operation. Mixtures of this type may occur as a result of accidents or technical malfunctions;

– according to the DSTU EN IEC 60079-15 standards, this device belongs to zone class 2, which is characterized by a low probability of an explosive gas mixture under normal operating conditions. But sometimes the presence of an explosive gas mixture is observed for a short time.

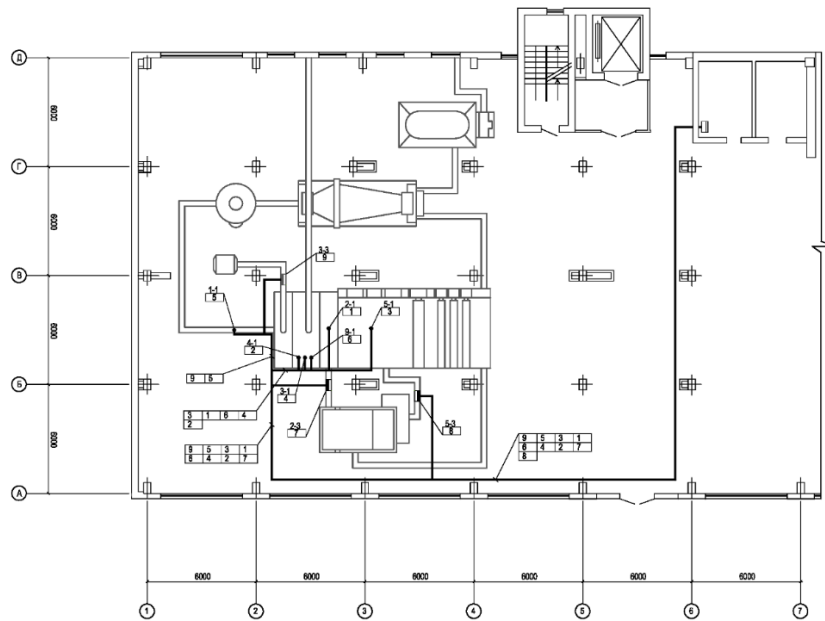


Figure 1.1 - Paper production shop plan

Therefore, the pumps are controlled, namely started and stopped, directly from the location of the switchboard. In addition, it is possible to remotely turn off the pumps from the operator's room by the appropriate employee.

It is interesting that the pump and compressor operate synchronously in the range from 10% to 100% of their standard performance. For such pumps, special regulators are provided that ensure the restart of the product from discharge to suction. The paper pulp itself is supplied to the purifier battery through a mass flow meter.

To ensure 100% safe operation of the pump and compressor, these devices are automatically turned off when the minimum level of paper pulp in the headbox and the corresponding air cushion pressure are reached. Additionally, the pump and compressor are equipped with an automation system that includes blocking and

protection that prohibit starting and operating in modes that can lead to emergency situations.

One level gauge is installed in the overflow tank and the under-grid water collector, which automatically measure the level of circulating mass and under-grid water, respectively. Modern requirements for automation of the above-mentioned devices include the availability of automation tools, their speed, reliability and ability to interact.

### 1.3 Existing control system as an object of modernization

Modern paper production is characterized by the control of the paper pulp feeding process by qualified operators-technologists. It is they who control the parameters of the technological regime within the permissible values in order to achieve the required quality indicators of the paper web. Such indicators include the level of paper pulp in the inlet chamber and the air pressure in the air cushion. At the same time, this control method does not allow to effectively compensate for the influence of disturbances - pulsations on the stability of quality indicators. As a result, a significant violation of the technological regime occurs, which, in turn, worsens the quality of gas purification.

A high level of moral and physical wear of automation equipment is common. This, accordingly, complicates the effective management of the process as a whole and makes it difficult to ensure the required speed of work. Such a control system also does not allow to carry out dispatching of the technological process. Unfortunately, the modern automated process control system (ACS) is implemented on outdated devices that meet only basic requirements, and the signaling and blocking on the equipment do not meet modern world standards in this field.

PRM devices for automatic optimization of the paper pulp feeding process, which are used in domestic industries today, consist of a level sensor connected to a level regulator, a screen speed sensor, a total head resistor, regulating elements on the air ducts and the mass duct to the pressure box, as well as a total head sensor.

It should be noted that the disadvantage of existing methods for automatically regulating the ratio of "mass velocity and screen speed" is the principle of their operation, which assumes that the mass is fed to the screen with a constant exit speed through the slot, while the screen speed changes. However, it is known that the exit speed of the mass during its feeding does not actually remain constant. It changes much more often and in larger volumes than the mesh speed, which prevents the achievement of uniformity of the web.

The goal that we set in our work is achieved due to the presence in the device of a mesh speed regulator, a root extraction unit, which is connected to the total pressure sensor, comparison elements and a setter of the lag coefficient of the mass velocity from the mesh speed. Adders and a computing unit, which has inputs connected to the mesh speed sensor, the root extraction unit, the outputs of the comparison elements and the lag coefficient setter, provide data processing. The outputs of this unit, respectively, are connected to the total pressure and mesh speed regulators through adders, to which the inputs of the comparison elements are also connected.

So, table 1.1 visualizes the list of output signals.

Table 1.1 – List of signals subject to automation on the PRM

№ п/ п	Position, installation location	Type	Measurement limit	Accuracy class	Acceptable value	Critical value
1.	FE 1-1, paper pulp consumption	TXA	0,25÷20 м <sup>3</sup>	1,5	>3,8	4
2.	LE 2-1, turnover level	TXA	0,1÷50 м	2	>2,5	3
3.	PE 3-1, air pressure	TXA	0 ÷2,5 МПа	2	>0,9	1
4.	LE 4-1, paper pulp level	TXA	0,1÷50 м	2	>2	2,3
5.	LE 5-1, groundwater level	TXA	0,1÷50 м	2	>1,5	2
6.	TE 9-1, paper pulp temperature	TXA	0 ÷200 °C	2	>80	85

### Conclusions by section

We examined the main technological stages of paper production. Each stage of paper production has its own significance and performs a unique function. We found that the APCS is implemented on outdated devices that meet only basic requirements, and the signaling and blocking on the equipment do not meet modern world standards in this industry. We outlined which signals are subject to automation.

Міністерство освіти та науки України  
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»  
Кафедра автоматики, електроніки та телекомунікацій

## **Модернізація автоматизованої системи папероробної машини**

### **Кваліфікаційна робота бакалавра**

Виконав:

студент 401МЕ групи

Керівник:

к.т.н, доцент

Федоренко С.С.

Ігнат'єв С.Є.

Полтава 2025

## 1

**Метою кваліфікаційної роботи бакалавра** є впровадження автоматизованої системи управління технологічним процесом напуску паперової маси на сітку папероробної машини за допомогою напірної скриньки з повітряною подушкою, що дозволяє вдосконалити виробничий процес.

**Об'єктом кваліфікаційної роботи бакалавра** є система керування папероробної машини.

**Предметом кваліфікаційної роботи бакалавра** є дослідження можливості розроблення автоматизованої системи папероробної машини.

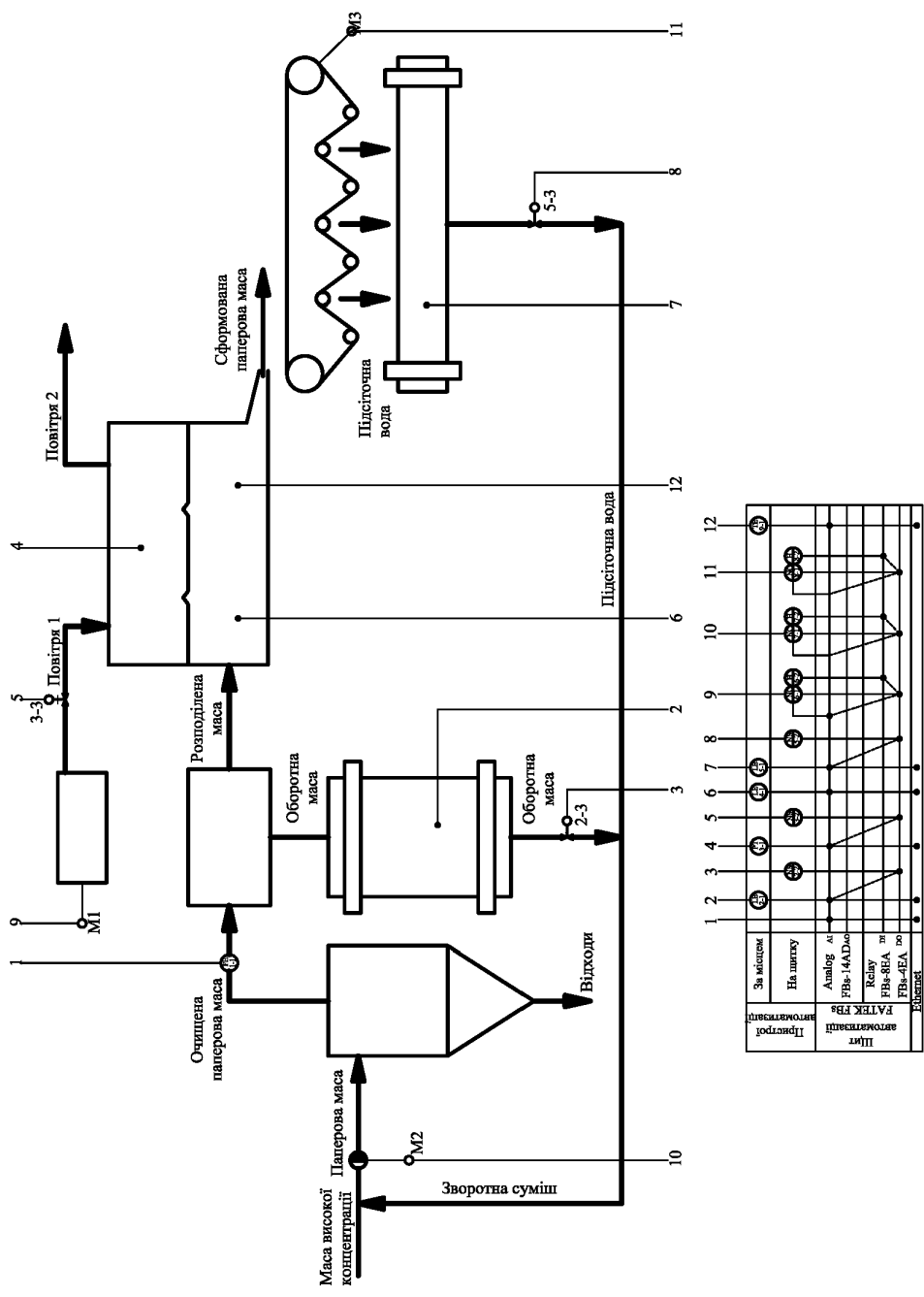
В якості ідеї пропонується побудувати систему автоматизації з урахуванням програмованого логічного контролера. Система дозволить значно полегшити працю оперативного персоналу за рахунок полегшення ухвалення рішень та зосередження інформації. Значне підвищення точності регулювання технологічних параметрів надасть змогу покращити якість продукції, зменшити вплив якості сировини на готову продукцію, збільшити коефіцієнт корисної дії.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати наступні завдання:

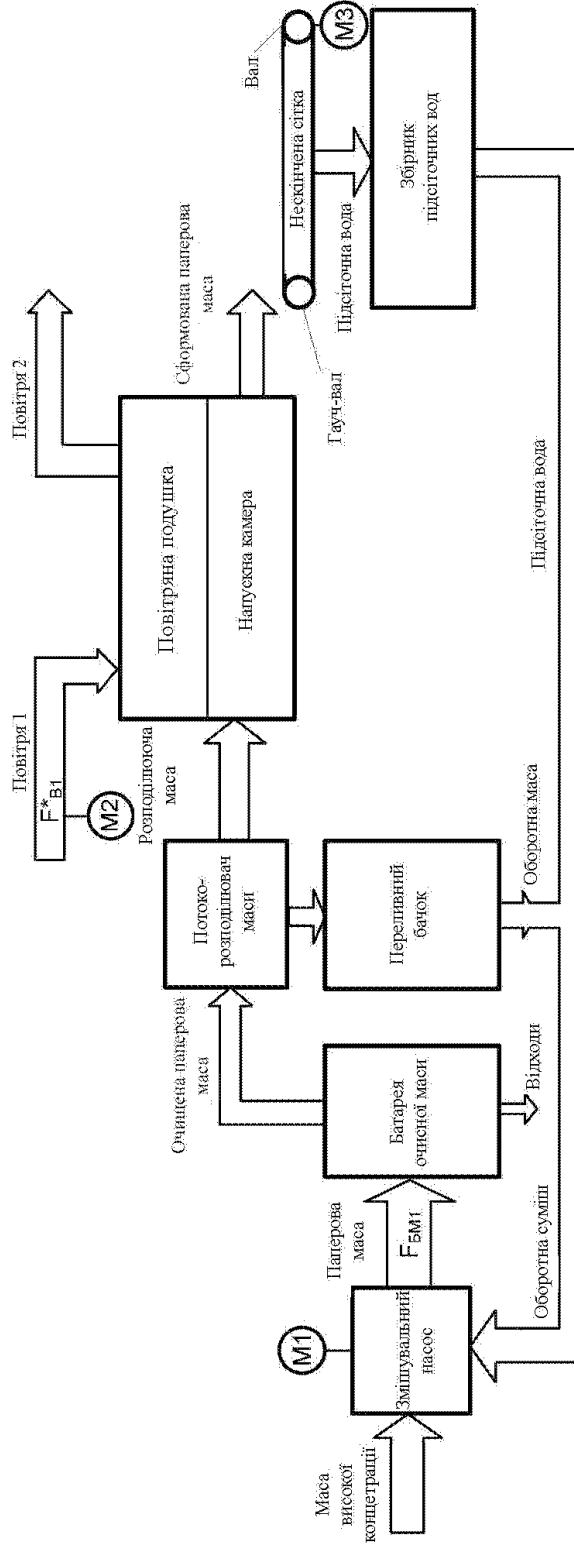
- проаналізувати основні технологічні стадії виробництва паперу, основні режими роботи обладнання та характеристики виробництва;
- виявити особливості існуючої системи керування;
- розробити математичну модель напуску паперової маси на сітку папероробної машини;
- розробити структурну схему системи управління;
- здійснити синтез автоматичного керування;
- обрати витратну характеристику та розрахунок передавальної функції;
- виконати дослідження перехідних процесів у лінеаризованій системі;
- розробити нелінійної системи асинхронного електроприводу з векторним керуванням;
- здійснити розрахунок параметрів елементів систем регулювання під час використання локальних АСР та її моделювання;
- розробити функціональну схему автоматизації технологічного процесу метанування оксидів вуглецю;
- виконати моделювання з урахуванням нелінійності;
- розробити схему автоматизації.

Для вирішення поставлених завдань в роботі використана методика, що включає в себе методи теорії автоматичного керування та методи математичного моделювання на ПК.

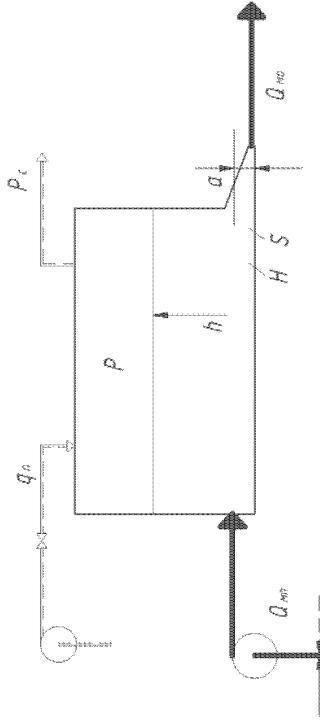
## Функціональна схема автоматизації папероробної машини



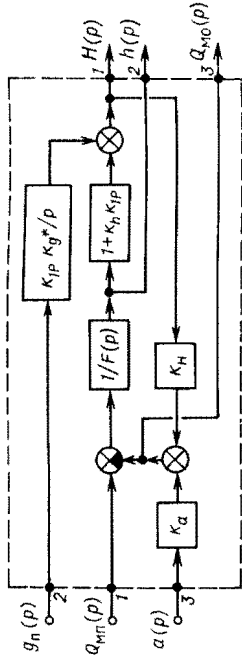
### Структурна схема автоматизації папероробної машини



**Розробка математичної моделі напускної скриньки папероробної машини**



Принципова схема напірної скриньки з повітряною подушкою



Деталізована структурна схема напірної скриньки з повітряною подушкою

$$P(p) = k_{*g} g^*(p) + k_h h(p);$$

$$H(p) = h(p) + k_{IP} P(p);$$

$$Q_{MO}(p) = k_H H(p) + k_a a(p);$$

$$h(p) = \frac{1}{Fp} (Q_{MP}(p) - Q_{MO}(p));$$

$$g^*(p) = \frac{1}{p} (g_{II}(p) - k_{2P} P(p));$$

$$W_{22}(p) = \frac{-k_H k_a k_{IP}}{(Fp + A)p}$$

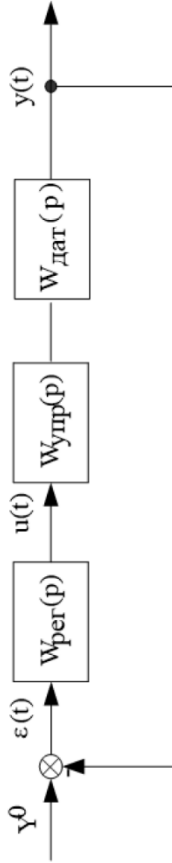
де:  $A = k_H (1 + k_{IP})$ .

Отримана аналітичним шляхом передатна функція має бути уточнена, т. як. у каналі гП -h існує 3 вид:

$$W_{22}(p) = \frac{k_{22} e^{-pT_{22}}}{1 + T_{22}p};$$

де:  $k_{22} = k_H k_a k_{IP} / A$ ;  $T_{22} = F/A$ .

## Синтез системи локальної АСР папероробної машини

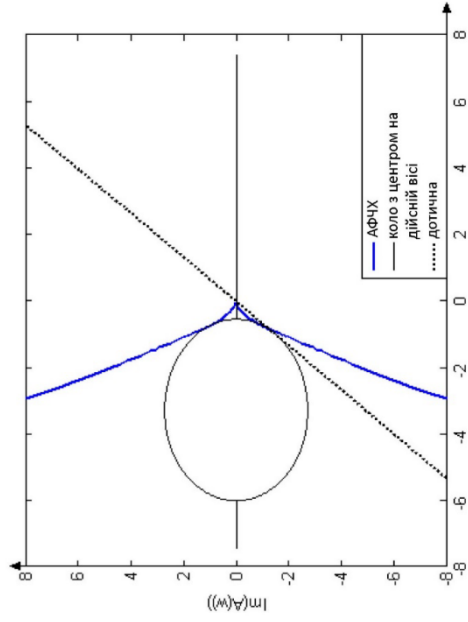


$$W(p) = K_{пр} \cdot \left( 1 + \frac{1}{T_{із} \cdot p} \right).$$

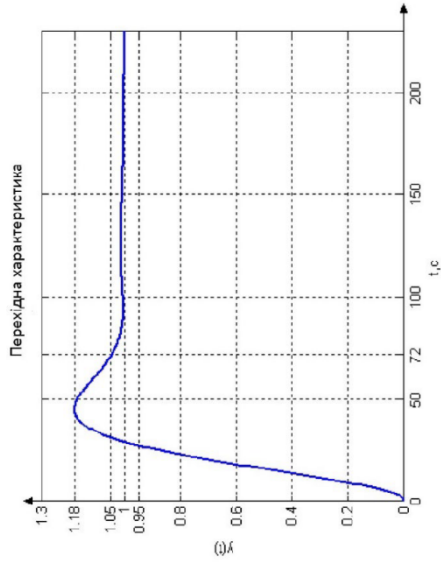
Коефіцієнти  $K_{пр} = 275$ ,  
 $T_{із} = 68$ .

$$W_{рег}(p) = 275 \cdot \left( 1 + \frac{1}{68 \cdot p} \right).$$

Блок-схема системи регулювання

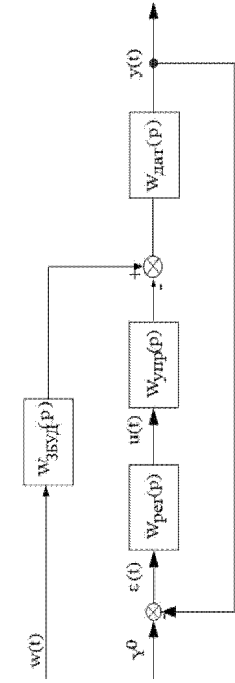


Знаходження коефіцієнтів регулятора

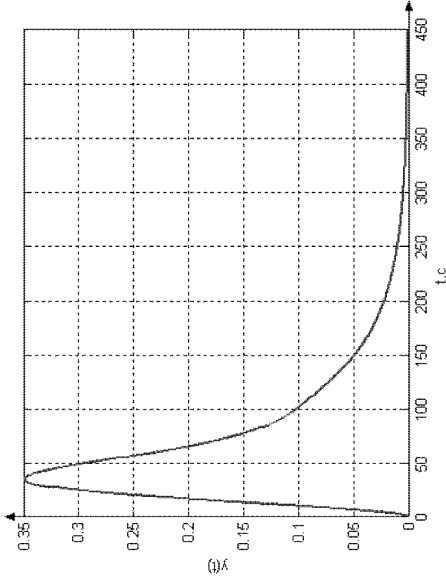


Графік перехідного процесу системи при подачі каналом управління одиничного стрибкоподібного впливу

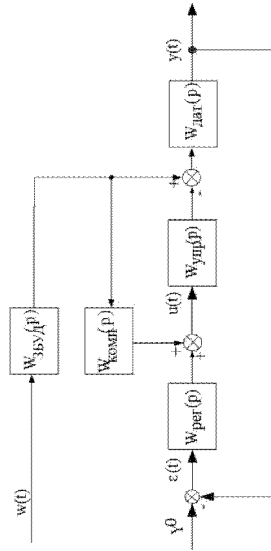
## Синтез системи багатоконтурної АСР папероробної машини



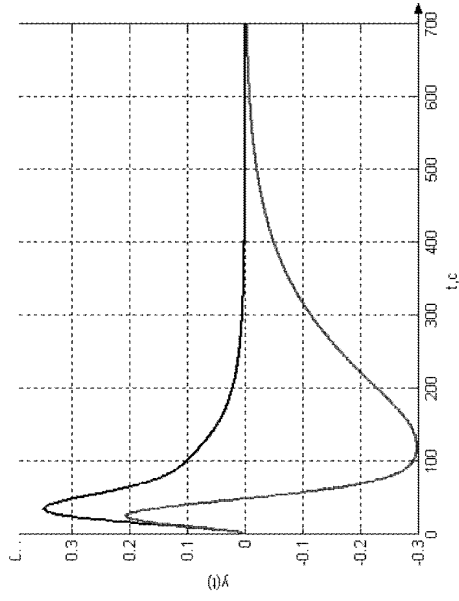
Блок-схема системи регулювання зі збуренням



Графіки перехідного процесу системи зі збуренням при нульовій дії на вхід



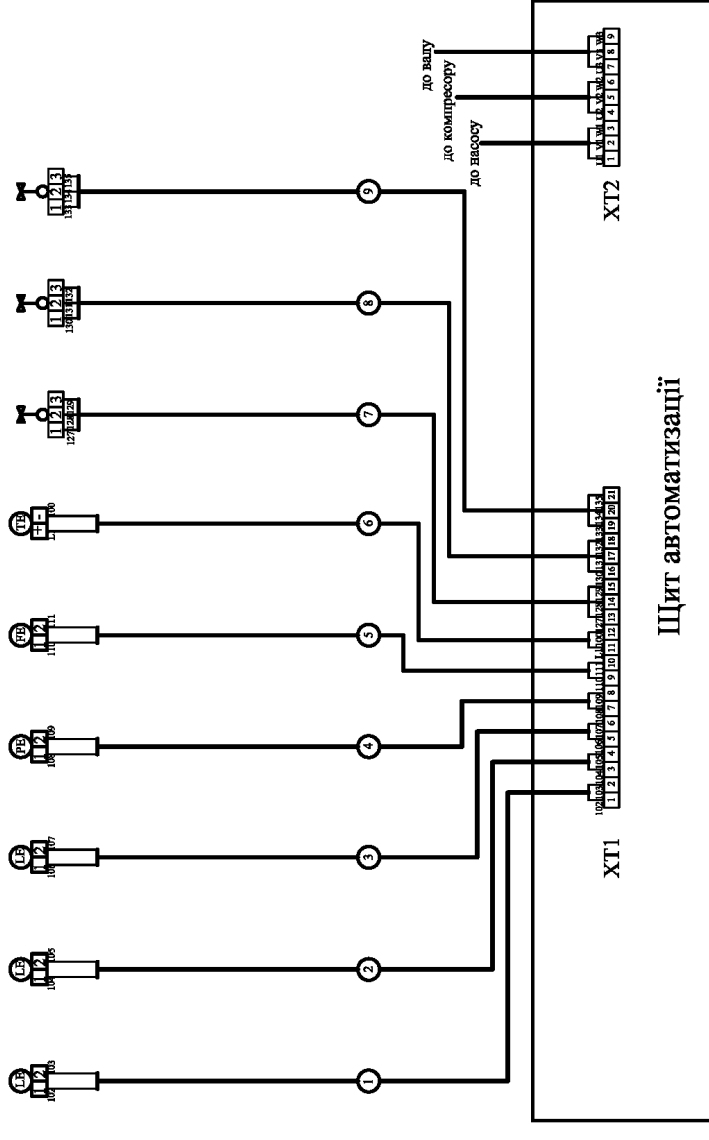
Блок-схема системи регулювання із компенсатором зі збуренням



Порівняння перехідних показників системи зі збуренням та компенсатором по збуренню при нульовій дії на вхід системи

## Схема зовнішніх з'єднань засобів автоматизації

Найменування параметра та місце вібру імпульсу	Вимірювання рівня		Вимірювання тиску	Вимірювання тиску	Регулювання тиску
	Переливний бачок	Нагусна камера	Збірник підігрітого вод	У повітряній подушці	У повітряній подушці
Позначення креслення уставки	Вимірювання тиску		Вимірювання тиску	Вимірювання тиску	Регулювання тиску
	2-1	4-1	5-1	3-1	1-1
Позиція	Вимірювання рівня		Вимірювання температури	Вимірювання тиску	Регулювання тиску
	2-3	5-3	9-1	2-3	3-3



## Схема підключення засобів автоматизації

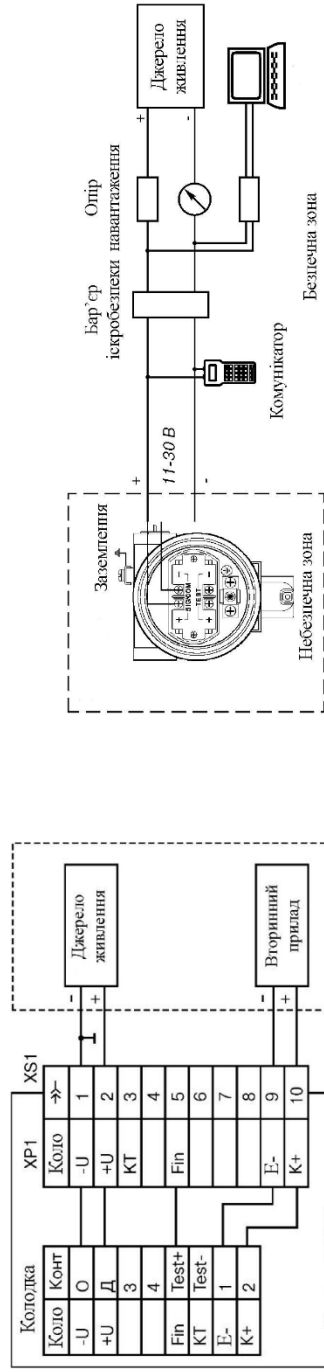


Схема підключення рівнеміра Rosemount 3300

Схема підключення перетворювача  
Метран-305ПР

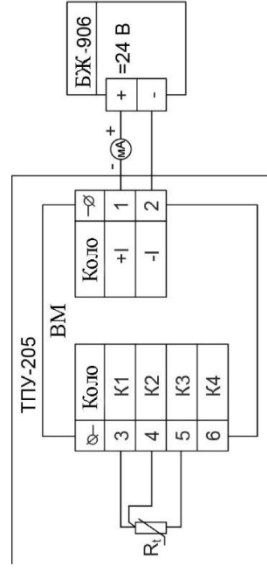


Схема підключення датчика температури ТПУ-205

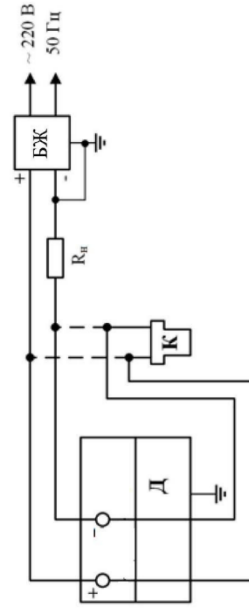


Схема підключення датчика тиску Метран 75

## Висновки

Мета кваліфікаційної робота бакалавра досягнута, а саме розроблено автоматизовану систему управління технологічним процесом напуску паперової маси на сітку папероробної машини за допомогою напірної скриньки з повітряною подушкою, що дозволяє вдосконалити виробничий процес.

У першому розділі розглянули основні технологічні стадії виробництва паперу. Кожен етап виробництва паперу має своє значення та виконує унікальну функцію. Виявили, що АСУ ТП реалізована на застарілих приладах, які відповідають лише базовим вимогам, а сигналізація та блокування на обладнанні не відповідають сучасним світовим стандартам у цій галузі. Окреслили які саме сигнали підлягають автоматизації.

У другому розділі розглянули технологічний процес виробництва паперу як об'єкт управління. Розробили структурну схему автоматизації. Для належного регулювання рівня на притоці потрібно змінювати витрату повітря на вході в повітряну подушку.

У третьому розділі знайшли передавальну функцію датчиків. Зазначимо, що для забезпечення стабільності контуру регулювання рівня рідини достатньо встановити невеликий діапазон пропорційності регулятора. Дослідили багатоконтурну АСР та з урахуванням нелінійності.

У четвертому розділі обрали первинні та технічні засоби автоматизації. Датчики були обрані з урахуванням їх здатності вимірювати необхідні діапазони величин, а також наявності вибухо- та пожегобезпечного виконання. Враховуючи практичний досвід при виборі обладнання, зазвичай, розподілені АСУ ТП мають трирівневу архітектуру.