

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ

Група АКП-22-1

Роман Вінницький

2026

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

Вінницький Роман Андрійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК

681.5

(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Розроблення системи автоматичного керування технологічним процесом

(назва роботи)

фільтрації суспензії мідного концентрату

Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(назва освітньої програми)

151 Автоматизації та комп'ютерно-інтегровані та технології

(шифр і назва спеціальності)

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

Нормоконтроль

доцент

(посада)

(підпис)

(дата)

О. В. Кучмистенко

(ініціали та прізвище)

Рецензент

доцент

(посада)

(підпис)

(дата)

Р. Б. Скрип'юк

(ініціали та прізвище)

Здобувач освітнього ступеня

АКП-22-1

(шифр групи)

(підпис)

(дата)

Р. А. Вінницький

(ініціали та прізвище)

Науковий керівник

доцент

(посада)

(підпис)

(дата)

Л. Я. Чигур

(ініціали та прізвище)

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

доцент

(посада)

(підпис)

(дата)

А.І. Лагойда

(ініціали та прізвище)

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання 05.11.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технологічного процесу фільтрації мідного концентрату як об'єкта автоматичного контролю і керування	01.05.26-10.05.26	
2	Математичне моделювання і ідентифікація об'єкта керування.	11.05.26-20.05.26	
3	Синтез та аналіз системи автоматичного керування процесом фільтрації мідного концентрату	21.05.26-05.06.26	
4	Розробка проектної складової системи автоматичного керування	06.06.26-15.06.26	

Студент _____
(підпис)

Р. А. Вінницький _____
(ініціали та прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

Л. Я. Чигур _____
(ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Бакалаврська робота містить: 68 сторінок друкованого тексту, 38 рисунків, 9 таблиць, 10 переліків посилань на джерела.

Тема: «Розроблення системи автоматичного керування технологічним процесом фільтрації суспензії мідного концентрату».

Об'єкт дослідження: процес фільтрації суспензії мідного концентрату у барабанному вакуум-фільтрі в умовах автоматичного керування технологічними параметрами процесу.

Мета проекту: розроблення системи автоматичного керування процесом фільтрації мідного концентрату у барабанному вакуум-фільтрі з використанням сучасних технічних засобів автоматизації та програмного забезпечення для підвищення стабільності технологічного процесу, якості фільтрації та ефективності роботи обладнання.

Методи дослідження: математичне моделювання, методи теорії автоматичного керування, методи структурного та функціонального аналізу, методи ідентифікації об'єкта керування, аналіз перехідних процесів, синтез PID-регуляторів, методи комп'ютерного моделювання, аналіз динамічних систем, програмне моделювання у Matlab Simulink.

Результати кваліфікаційної роботи: розроблена система автоматичного керування процесом фільтрації мідного концентрату у барабанному вакуум-фільтрі, побудована математична модель системи автоматичного регулювання, синтезовані PID-регулятори різними методами налаштування, виконаний аналіз стійкості та якості перехідних процесів, обґрунтований вибір сучасних технічних засобів автоматизації, розроблені функціональна та технологічна схеми системи, створений алгоритм логічного керування у програмному середовищі.

Ключові слова: автоматизація технологічних процесів, барабанний вакуум-фільтр, фільтрація мідного концентрату, система автоматичного керування, PID-регулятор.

ABSTRACT

Bachelor's thesis contains: 68 pages of printed text, 38 figures, 9 tables, 10 lists of references.

Topic: "Development of an automatic control system for the technological process of filtering copper concentrate suspension".

Object of research: the process of filtering copper concentrate suspension in a drum vacuum filter under conditions of automatic control of technological parameters of the process.

Project goal: development of an automatic control system for the process of filtering copper concentrate in a drum vacuum filter using modern technical means of automation and software to increase the stability of the technological process, filtration quality and efficiency of equipment operation.

Research methods: mathematical modeling, methods of automatic control theory, methods of structural and functional analysis, methods of identification of the control object, analysis of transient processes, synthesis of PID controllers, methods of computer modeling, analysis of dynamic systems, software modeling in Matlab Simulink.

Results of qualification work: developed a system for automatic control of the filtration process of copper concentrate in a drum vacuum filter, built a mathematical model of the automatic control system, synthesized PID controllers using various tuning methods, performed an analysis of the stability and quality of transient processes, justified the choice of modern technical means of automation, developed a functional and technological scheme of the system, created a logical control algorithm in a software environment.

Keywords: automation of technological processes, drum vacuum filter, filtration of copper concentrate, automatic control system, PID controller.

ЗМІСТ

	ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ.....	8
	ВСТУП.....	9
1	АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ФІЛЬТРАЦІЇ МІДНОГО КОНЦЕНТРАТУ ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЧНОГО КОНТРОЛЮ І КЕРУВАННЯ.....	12
	1.1 Опис технологічного процесу фільтрації суспензії мідного концентрату як об'єкта автоматизації.....	12
	1.2 Характеристика технологічного обладнання.....	14
	1.3 Аналіз збурень та їх компенсація.....	17
	Висновки до розділу	18
2	МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ І ІДЕНТИФІКАЦІЯ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ.....	19
	2.1 Обґрунтування вибору об'єкта автоматизації.....	19
	2.2 Визначення характеристик об'єкта автоматизації та методи для підвищення показників якості.....	20
	Висновки до розділу.....	22
3	СИНТЕЗ ТА АНАЛІЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ФІЛЬТРАЦІЇ МІДНОГО КОНЦЕНТРАТУ.....	24
	3.1. Синтез одноконтурної системи автоматичного керування.....	24
	3.2 Аналіз динамічних властивостей системи.....	28
	3.3 Синтез регуляторів із заданими показниками якості перехідних процесів.....	33
	3.4 Порівняльний аналіз запропонованих варіантів рішень.....	42

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ			
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Розроблення системи автоматичного керування технологічним процесом фільтрації суспензії мідного концентрату	Літ.	Арк.	Акрушів
Розроб.	Вінницький Р.А.						6	70
Перевір.	Чигур Л. Я.							
Реценз.	Скрип'юк Р.Б.							
Н. Контр.	Кучмистенко О.В.					Група АКП-22-1 ІФНТУНГ		
Затверд.	Лагойда А.І.							

Висновки до розділу.....	44
4 РОЗРОБКА ПРОЕКТНОЇ СКЛАДОВОЇ САК.....	45
4.1 Вибір технічних засобів автоматизації.....	45
4.2 Розробка функціональної схеми автоматизації.....	55
4.3 Розробка програмного забезпечення для PLC.....	57
Висновки до розділу.....	65
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	66
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА.....	68

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

- АСУ — автоматизована система управління
- АРМ — автоматизоване робоче місце
- ВФ — вакуум-фільтр
- ПЛК (PLC) — програмований логічний контролер
- PID-регулятор — пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор
- HMI — людино-машинний інтерфейс
- FBD — Function Block Diagram (функціональна блокова діаграма)
- LAD — Ladder Diagram (релейно-контактна схема)
- AI — Analog Input (аналоговий вхід)
- AO — Analog Output (аналоговий вихід)
- DI — Digital Input (дискретний вхід)
- DO — Digital Output (дискретний вихід)
- PV — Process Variable (поточне значення параметра)
- SP — Set Point (задане значення параметра)
- RPM — Revolutions Per Minute (оберти за хвилину)
- Pt100 — платиновий термометр опору
- Modbus — промисловий протокол передачі даних
- Auto-tune — автоматичне налаштування параметрів регулятора
- MATLAB — програмне середовище математичного моделювання
- Simulink — середовище моделювання динамічних систем у складі MATLAB
- HART — протокол цифрового зв'язку для промислових приладів
- MANUAL — ручний режим роботи
- AUTOMATIC — автоматичний режим роботи

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

ВСТУП

Сучасний розвиток промислових технологій характеризується широким впровадженням автоматизованих систем керування технологічними процесами, які забезпечують підвищення продуктивності, стабільності та економічної ефективності виробництва. Особливо актуальним є використання систем автоматичного регулювання у процесах з високою інерційністю, наявністю запізнення та значною чутливістю до зміни параметрів технологічного середовища. До таких процесів належить процес фільтрації суспензії мідного концентрату за допомогою барабанного вакуум-фільтра, який широко використовується у гірничо-металургійній промисловості.

Актуальність теми зумовлена необхідністю підвищення якості автоматичного керування процесом фільтрації, що безпосередньо впливає на стабільність технологічного процесу, продуктивність обладнання та якість кінцевого продукту. Недостатня ефективність систем керування призводить до значних коливань технологічних параметрів, збільшення часу регулювання, появи перерегулювання та зниження точності підтримання заданих режимів роботи. У сучасних умовах автоматизації виробництва особливо важливим є синтез регуляторів, здатних забезпечити необхідні показники швидкодії, стійкості та точності системи автоматичного регулювання.

Обґрунтування вибору теми дослідження полягає у тому, що процеси автоматичного налаштування та синтезу PID-регуляторів залишаються одними з найпоширеніших і найбільш ефективних засобів керування технологічними об'єктами. Незважаючи на значну кількість існуючих методів налаштування PID-регуляторів, проблема вибору оптимального способу синтезу регулятора для конкретного об'єкта керування залишається актуальною. Аналіз сучасних досліджень показує, що класичні методи налаштування, зокрема метод Циглера–Нікольса та метод Чина–Хронеса–Ресвіка, забезпечують різні характеристики якості перехідних процесів і потребують додаткового дослідження для визначення їх ефективності в умовах конкретного технологічного процесу.

Окрім цього, сучасні програмні засоби моделювання, зокрема середовище MatLab Simulink із функцією автоматичного налаштування параметрів регулятора Auto-tune, дозволяють здійснювати синтез систем керування з покращеними показниками якості.

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Тому дослідження та порівняльний аналіз різних методів налаштування PID-регуляторів для процесу фільтрації суспензії мідного концентрату є актуальним науково-практичним завданням.

Об'єктом дослідження є система автоматичного керування процесом фільтрації суспензії мідного концентрату.

Предметом дослідження є методи синтезу та налаштування PID-регуляторів для забезпечення заданих показників якості перехідного процесу системи автоматичного регулювання.

Метою бакалаврської роботи є дослідження та синтез PID-регуляторів для автоматизованої системи керування процесом фільтрації суспензії мідного концентрату з метою підвищення показників стійкості, швидкодії та точності системи.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати особливості процесу фільтрації суспензії мідного концентрату як об'єкта автоматичного керування;
- дослідити математичну модель системи автоматичного регулювання; виконати аналіз стійкості та якості перехідних процесів системи без регулятора;
- здійснити синтез PID-регуляторів методом Циглера–Нікольса;
- виконати синтез PID-регуляторів методом Чина–Хронеса–Ресвіка;
- провести автоматичне налаштування PID-регулятора засобами MatLab;
- здійснити порівняльний аналіз отриманих результатів та визначити найбільш ефективний метод синтезу регулятора.

У роботі використано методи математичного моделювання, теорії автоматичного керування, аналізу стійкості систем автоматичного регулювання, чисельного моделювання та комп'ютерного аналізу перехідних процесів. За допомогою методів математичного моделювання досліджено динамічні властивості об'єкта керування. Методи теорії автоматичного керування використано для аналізу стійкості системи та оцінювання якості перехідних процесів.

Чисельне моделювання та програмне середовище MatLab Simulink застосовано для синтезу PID-регуляторів, дослідження характеристик системи та порівняльного аналізу різних методів налаштування регуляторів. Використання зазначених методів забезпечує достовірність отриманих результатів і обґрунтованість сформульованих висновків.

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Наукова новизна отриманих результатів полягає у проведенні порівняльного аналізу різних методів синтезу PID-регуляторів для процесу фільтрації суспензії мідного концентрату та визначенні найбільш ефективного способу налаштування регулятора з точки зору забезпечення оптимального співвідношення між швидкодією, стійкістю та точністю системи автоматичного керування.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання синтезованих PID-регуляторів для підвищення ефективності автоматизованого керування процесом фільтрації у промислових умовах. Отримані результати можуть бути використані при модернізації існуючих систем автоматичного регулювання технологічних процесів у гірничо-металургійній промисловості, а також у навчальному процесі під час вивчення дисциплін, пов'язаних із теорією автоматичного керування та автоматизацією технологічних процесів.

Бакалаврська робота складається зі вступу, кількох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. У роботі наведено результати математичного моделювання, графіки перехідних процесів, таблиці оцінок якості системи та результати порівняльного аналізу методів синтезу PID-регуляторів. Загальний обсяг роботи становить 68 сторінок друкованого тексту, робота містить 38 рисунків, 9 таблиць та список використаних джерел із 10 найменувань. Матеріали роботи базуються на результатах досліджень систем автоматичного керування та моделювання, виконаних у середовищі MatLab Simulink.

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ФІЛЬТРАЦІЇ МІДНОГО КОНЦЕНТРАТУ ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЧНОГО КОНТРОЛЮ І КЕРУВАННЯ

1.1 Опис технологічного процесу фільтрації суспензії мідного концентрату як об'єкта автоматизації

Фільтрація мідної суспензії є дуже важливим етапом у металургії. Цей процес здійснюється за допомогою барабанного вакуум-фільтра, усередині якого створюється розрядження, що відокремлює рідку частину суспензії від твердого осаду. У цьому процесі виключена стадія промивання осаду, щоб заощадити воду та спростити експлуатацію обладнання.

Процес фільтрації мідної суспензії допомагає підготувати осад до подальшої переробки, наприклад, сушіння, випалення або плавлення. На цьому етапі слід дуже уважно стежити за параметрами, оскільки за нестабільних умов фільтрації якість кінцевого продукту може погіршитися.

Процес фільтрації мідного концентрату складається з наступних етапів: подача суспензії, фільтрація, осушення осаду, зняття осаду та регенерація фільтрувальної тканини [1].

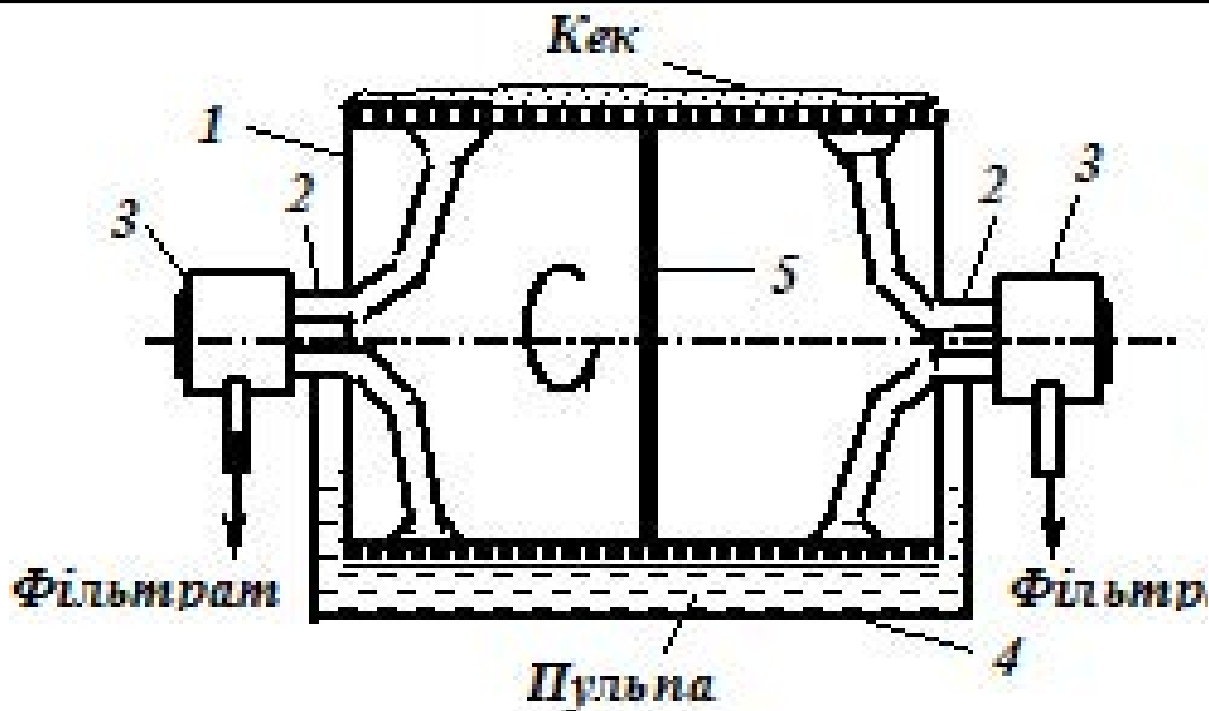
Суспензія потрапляє в корито барабанного вакуум-фільтра, де в подальшому рівномірно розподіляється барабаном вакуум фільтра. Суспензія, що фільтрується, складається з твердих частинок мідного концентрату і рідкої фази, води з розчиненими в ній домішками.

Щоб процес йшов стабільно, необхідно контролювати рівень суспензії в ємності, так як при коливаннях рівня суспензія розподілиться по барабану нерівномірно. Що, у свою чергу, може призвести до втрати якості кінцевої продукції. Процес починається з того, що барабан починає обертатися. Поки він обертається, усередині порожнин створюється розрідження, яке втягує рідку частину суспензії, відокремлюючи її від осаду. Сам осад залишається на фільтрувальній тканині, яка знаходиться на поверхні барабанного вакуум-фільтра.

Коли барабан виходить із зони суспензії, осад додатково зневоднюється під дією вакууму.

Коли осад сягає зони знімання, його акуратно знімають механічним способом із поверхні барабана. Скребокний ніж зрізає висушений осад, який називають «кек», після чого цей «кек» відправляють на подальшу переробку.

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
						12
Змн.		№ докум.	Підпис	Дата		



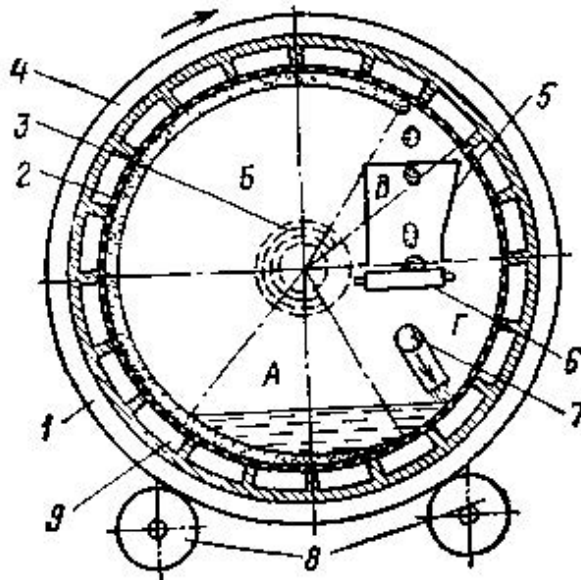
1 - барабан; 2 - порожнисті цапфи; 3 - розподільні головки; 4 - ванна; 5 - перегородка
 Рисунок 1.1 - Схема барабанного вакуум-фільтра з зовнішньою фільтрувальною поверхнею

Для ефективного видалення механізм знімання осаду повинен бути стабільним: якщо тиск буде занадто сильним, фільтрувальна тканина швидко зноситься, а при слабкому тиску частина осаду залишиться на поверхні барабана, що в подальшому погано позначиться на якості фільтрації.

Останній етап – регенерація фільтрувальної тканини. Вона потрібна, щоб усунути залишки осаду і відновити проникність тканини. Очищення роблять або механічним способом, або продуванням повітрям. Від того, наскільки добре ця процедура пройде, залежить не лише термін служби тканини, а й те, як ефективно працюватимуть наступні цикли фільтрації. Тому цей етап є дуже важливим для стабільної роботи вакуум-фільтра при тривалій експлуатації. Зневоднення мідного концентрату, на відміну деяких інших технологій фільтрації, проходить без етапу промивання осаду.

Таке рішення пов'язане з кількома технологічними та економічними причинами. По-перше, відмова від промивання дозволяє значно заощадити воду, що дуже важливо за обмежених ресурсів водопостачання. По-друге, такий підхід прискорює сам процес фільтрації, оскільки виключається додатковий етап із подачею та видаленням промивної води.

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



1 - барабан; 2 - циліндрична перфорована поверхня; 3- розподільна головка; 4 - опорний бандаж; 5 - приймальний пристрій; 6 - конвеєр; 7 - труба; 8 - опорні ролики; 9 - порожнина

Рисунок 1. 2 - Барабанний вакуум-фільтр з внутрішньою фільтрувальною поверхнею

Відмова від промивання осаду допомагає зберегти його структуру, через що він не розмивається і тверді частинки рівномірно розподіляються в кеку. Це дуже важливо для наступних етапів переробки, наприклад, для сушіння та плавки, тому що значною мірою усуває необхідність повторного осадження та додаткового зневоднення осаду. Можна сказати, що промивання осаду практично не впливає на якість кінцевого продукту. Контроль вологості при цьому досягається за допомогою точного налаштування вакууму та швидкості обертання барабана.

1.2 Характеристика технологічного обладнання

Для підтримки стабільності процесу фільтрації використовують чотири основні датчики, які контролюють важливі параметри. Рівнемір регулює подачу суспензії в корито фільтра і не дає рівню рідини коливатися, так як це може вплинути на товщину шару осаду і як наслідок, вплинути на якість фільтрації. Вакуумметр вимірює рівень розрідження в барабані, і від цього залежить, як швидко видаляється рідина та ефективність зневоднення осаду.

Швидкість обертання барабана є ще одним важливим параметром, який вимірюється тахометром.

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Регулюючи швидкість, можна оптимізувати час перебування осаду під впливом вакууму, щоб допомогти знайти баланс між продуктивністю та якістю зневоднення.

Температурний датчик стежить, як змінюється температура суспензії, оскільки в'язкість рідини залежить від температури, що у своє чергу впливає швидкість проходження рідини через фільтрувальну тканину. Інформація від датчиків надходить у систему управління, яка допомагає автоматизувати процес фільтрації та вчасно змінювати параметри, щоб обладнання працювало стабільно. Така автоматизація сильно зменшує ризик помилок через людський фактор, покращує точність налаштувань та знижує шанси аварій. У результаті процес стає ефективнішим і передбачуваним.

Барабанний вакуум-фільтр - це пристрій безперервної дії, яка поділяє суспензію на рідку та тверду частини за допомогою вакуумної фільтрації. Основні його частини складаються з циліндричного барабана, який частково занурений у корито із суспензією, системи вакуумного відсмоктування, механізму знімання осаду та пристрої для очищення фільтрувальної тканини [2].

Усередині барабана є кілька секцій, які з'єднані із вакуумною системою через розподільчу головку. А на поверхні барабана кріпиться фільтрувальна тканина, яка утримує тверді частинки. Коли барабан обертається, кожна його секція по черзі проходить за кілька зон. У зоні фільтрації, яка знаходиться в кориті з суспензією, рідка частина втягується вакуумом, проходить через фільтрувальну тканину і йде як фільтрат, а тверді частинки залишаються на тканині та утворюють осад. Після того, як барабан виходить з корита, осад потрапляє в зону сушіння, де вакуум і атмосферне повітря продовжують видаляти з нього рідину.

На наступному етапі осад надходить у зону знімання, де ножовий механізм і стиснене повітря відокремлюють його від фільтрувальної тканини, а потім направляють на подальшу переробку. Барабанний вакуум-фільтр - це об'єкт управління, у якому слід підтримувати стабільні умови фільтрації, щоб процес йшов стабільно та ефективно. Робота фільтра залежить від багатьох параметрів, які треба регулювати, а також різних зовнішніх збурень, які можуть впливати на якість фільтрації. Щоб все це контролювати та коригувати, використовують систему управління, яка працює з даними від чотирьох основних датчиків.

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Фільтрацію можна представити як керовану систему з вхідними та вихідними параметрами, а також з впливами, що обурюють. Вхідні параметри задають умови роботи фільтра і може контролювати або оператор, або автоматична система. До таких параметрів відносяться швидкість обертання барабана, рівень вакууму, подача суспензії в корито та температура суспензії.

Швидкість обертання барабана впливає на товщину осадового шару та час його зневоднення. Вакуум створює розрідження, що впливає те, як швидко рідина видаляється з осаду. Подача суспензії відповідає за рівномірний розподіл шару осаду на фільтрувальній тканині, а температура суспензії впливає на її в'язкість і, відповідно, швидкість фільтрації. Вихідні параметри показують, як працює система та наскільки ефективний процес. До них відносяться продуктивність фільтра - скільки суспензії оброблено за одиницю часу, вологість осаду після фільтрації, якість фільтрату, яке показує, наскільки добре очищена рідина, і товщина шару осаду на барабані. Щоб зрозуміти, як працює фільтр, і ухвалити рішення про налаштування, необхідно стежити за цими показниками.

Під час роботи фільтра можуть з'являтися різні збурення, які важко відразу контролювати, але за допомогою автоматичного керування їх вплив можна зменшити. Одне з таких це коливання концентрації твердих частинок суспензії, які змінюють, фільтрованість суспензії, що вимагає коригування параметрів фільтрації. Температурні зміни впливають на в'язкість рідини та на швидкість, з якою вона проходить через фільтрувальну тканину. Перепади вакууму, які виникають через нестабільну роботу вакуумної системи, знижують ефективність видалення вологи з осаду. А якщо фільтрувальна тканина зношується, її проникність знижується, і тоді необхідно або збільшити вакуум, або зменшити швидкість обертання барабана. Для контролю та регулювання процесу використовуються чотири датчики. Рівномір стежить за рівнем суспензії в корит і регулює її подачу, щоб не було різких стрибків. Вакуумметр вимірює розрідження в системі, тим самим дозволяє системі керування коригувати роботу вакуумного насоса. Тахометр вимірює швидкість обертання барабана, щоб підходила під технологічні вимоги. Температурний датчик контролює температуру суспензії, яка впливає на в'язкість рідини та швидкість фільтрації.

Автоматична система регулювання допомагає компенсувати вплив різних зовнішніх збурень та тримати процес фільтрації в оптимальному режимі. Це забезпечує стабільну якість очищення, знижує витрати на експлуатацію та продовжує термін служби фільтрувальної тканини.

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.3 Аналіз збурень та їх компенсація

Під час експлуатації барабанного вакуум-фільтра можуть виникати різні збурення, які здатні негативно впливати на ефективність процесу фільтрації та якість кінцевого продукту. Для забезпечення стабільної роботи системи необхідно виявляти ці обурення та розробляти методи для їх компенсації [2].

Однією з основних чинників, які впливають процес фільтрації, є зміна властивостей суспензії. Зміни концентрації твердої фази, розміру частинок або в'язкості можуть помітно вплинути ефективність роботи фільтра. Наприклад, підвищення концентрації твердих частинок призводить до потовщення осадового шару на фільтрувальній тканині, що ускладнює його зневоднення та знижує продуктивність фільтра. Щоб компенсувати такі зміни, використовують датчик рівня суспензії, який контролює подачу матеріалу в корито фільтра. Цей датчик підтримуватиме оптимальний рівень для рівномірного розподілу та фільтрації.

Температурні коливання суттєво впливають на процес фільтрації. Зміни температури навколишнього середовища або самої суспензії змінюють в'язкість рідини, що, своєю чергою, впливає на швидкість фільтрації та якість осаду. Щоб компенсувати ці зміни, у системі встановлений температурний датчик, який фіксує коливання температури суспензії. За його показаннями система управління може коригувати такі параметри, як швидкість обертання барабана або рівень вакууму, забезпечуючи цим стабільність фільтрації.

Перепади рівня вакууму, спричинені нестабільною роботою вакуумної системи або витокami, негативно впливають на процес зневоднення осаду. Для контролю за цим параметром застосовується вакуумметр, який відстежує розрідження в системі. При виявленні відхилень система управління регулює роботу вакуумного насоса або вживає інших заходів для відновлення необхідного рівня вакууму.

Згодом фільтрувальна тканина зношується, і через це її проникність стає меншою, а ефективність фільтрації погіршується. Щоб компенсувати таке обурення, потрібно регулярно перевіряти стан тканини та вчасно її змінювати, при виявленні зносу. Крім того, система управління може враховувати, наскільки сильно зношена тканина, і налаштовувати параметри роботи, щоб виключити негативний вплив на якість фільтрації.

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Ефективна компенсація всіх цих проблем досягається за допомогою автоматичної системи керування, яка працює на даних із ключових датчиків. Завдяки цьому процес фільтрації виходить стабільним, а якість продукту високою. До того ж це допомагає довше зберігати обладнання в робочому стані.

Висновки до розділу

У цьому розділі бакалаврської роботи розглянуто технологічний процес фільтрації суспензії мідного концентрату як об'єкт автоматизації. Проведено аналіз принципу роботи барабанного вакуум-фільтра, описано основні етапи процесу фільтрації, зокрема подачу суспензії, формування та осушення осаду, його знімання і регенерацію фільтрувальної тканини. Визначено особливості процесу зневоднення мідного концентрату без стадії промивання осаду та обґрунтовано доцільність такого технологічного рішення.

У розділі наведено конструктивну характеристику барабанного вакуум-фільтра, описано його основні елементи та принцип функціонування вакуумної системи. Розглянуто роботу фільтра як об'єкта автоматичного керування, визначено основні входні та вихідні параметри процесу, а також проаналізовано фактори, що впливають на ефективність фільтрації.

Також у розділі проаналізовано основні збурення технологічного процесу, серед яких зміна концентрації твердої фази суспензії, температурні коливання, перепади рівня вакууму та зношування фільтрувальної тканини. Для кожного збурення визначено можливі наслідки для процесу фільтрації та розглянуто способи їх компенсації засобами автоматичного керування.

Окрему увагу приділено засобам контролю та автоматизації процесу. Описано призначення основних датчиків системи, зокрема датчика рівня, вакуумметра, тахометра та температурного датчика, а також їх роль у забезпеченні стабільності технологічного процесу. На основі проведеного аналізу обґрунтовано необхідність застосування автоматизованої системи керування для підтримання оптимальних режимів роботи барабанного вакуум-фільтра та підвищення ефективності процесу фільтрації

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ І ІДЕНТИФІКАЦІЯ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

2.1 Обґрунтування вибору об'єкта автоматизації

У процесі керування фільтрацією мідного концентрату виникає низка технологічних і динамічних проблем, які негативно впливають на стабільність роботи барабанного вакуум-фільтра, якість зневоднення осаду та ефективність функціонування системи автоматичного керування.

Однією з основних проблем є нестабільність властивостей суспензії. У процесі роботи можуть змінюватися концентрація твердих частинок, гранулометричний склад та в'язкість суспензії. Такі зміни безпосередньо впливають на швидкість фільтрації, товщину осадового шару та ступінь його зневоднення. При збільшенні концентрації твердої фази осадовий шар стає щільнішим, що ускладнює проходження рідини через фільтрувальну тканину та знижує продуктивність системи.

Суттєвою проблемою є коливання рівня вакууму в системі. Нестабільна робота вакуумного насоса, витоки повітря або засмічення вакуумних каналів можуть призводити до зміни рівня розрідження всередині барабана. Це погіршує процес видалення вологи з осаду, збільшує залишкову вологість кеку та знижує якість кінцевого продукту.

Ще однією проблемою є нерівномірна подача суспензії в корито вакуум-фільтра. Коливання рівня суспензії призводять до нерівномірного розподілу осаду на поверхні барабана, через що виникають локальні перевантаження фільтрувальної тканини та погіршується стабільність процесу фільтрації. У результаті система може працювати з підвищеним перерегулюванням та нестійкими режимами.

Важливий вплив на процес фільтрації мають температурні коливання. Зміна температури суспензії змінює її в'язкість, що впливає на швидкість проходження рідкої фази через фільтрувальну тканину. При зниженні температури суспензія стає більш в'язкою, що уповільнює процес фільтрації та збільшує час зневоднення осаду.

Проблемою також є зношування та забруднення фільтрувальної тканини. У процесі тривалої експлуатації пори тканини поступово забиваються частинками концентрату, що знижує її проникність.

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Це призводить до зменшення продуктивності вакуум-фільтра та потребує періодичної регенерації або заміни фільтрувального матеріалу. Крім того, зношування тканини може викликати погіршення якості фільтрації та збільшення втрат твердих частинок у фільтраті.

Складність керування процесом також пов'язана з інерційністю об'єкта та наявністю часових запізнень. Зміна параметрів керування, таких як швидкість обертання барабана або рівень вакууму, не призводить до миттєвої зміни вихідних параметрів системи. Через це виникають труднощі під час налаштування регуляторів, оскільки надмірне підсилення може спричинити коливання та втрату стійкості системи.

Додатковою проблемою є вплив зовнішніх збурень та людського фактора. Неточне налаштування параметрів системи, несвоєчасна реакція оператора на зміну режимів роботи або помилки під час експлуатації обладнання можуть призводити до погіршення якості фільтрації та зниження ефективності роботи системи автоматичного керування.

Таким чином, процес керування фільтрацією мідного концентрату характеризується значною кількістю взаємопов'язаних факторів і збурень, що потребує застосування ефективних систем автоматичного регулювання та сучасних методів синтезу регуляторів для забезпечення стабільної, точної та енергоефективної роботи барабанного вакуум-фільтра.

2.2 Визначення характеристик об'єкта автоматизації та методи для підвищення показників якості

Для забезпечення ефективного керування процесом фільтрації суспензії мідного концентрату буде необхідно застосувати сучасні методи аналізу та синтезу систем автоматичного регулювання.

Особливістю даного технологічного процесу є наявність інерційності, часових запізнень, впливу зовнішніх збурень та змін параметрів об'єкта керування в процесі експлуатації. Це ускладнюватиме підтримання стабільних режимів роботи барабанного вакуум-фільтра та вимагатиме використання методів, здатних забезпечити необхідну швидкодію, стійкість і точність системи автоматичного керування. Для розв'язання поставлених у роботі завдань буде використано комплекс методів математичного моделювання, теорії автоматичного керування та комп'ютерного аналізу динамічних систем.

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вибір цих методів буде обумовлений необхідністю дослідження поведінки об'єкта керування в різних режимах роботи, аналізу показників якості системи та синтезу регуляторів із заданими характеристиками.

На початковому етапі дослідження буде використано методи аналізу технологічного процесу та структурного опису об'єкта автоматизації.

Це дозволить визначити основні вхідні та вихідні параметри процесу фільтрації, виявити основні збурення та встановити взаємозв'язки між параметрами системи. Аналіз технологічного процесу дасть змогу сформулювати вимоги до системи автоматичного регулювання та обґрунтувати необхідність застосування PID-регулятора для керування процесом фільтрації.

Для дослідження динамічних властивостей системи буде використано методи математичного моделювання. Побудова математичної моделі об'єкта керування дозволить описати поведінку процесу фільтрації у вигляді передавальних функцій та дослідити реакцію системи на зовнішні впливи. Використання математичної моделі дасть можливість проводити дослідження без втручання у реальний технологічний процес, що значно спростить аналіз та знизить ризики виникнення аварійних ситуацій.

Для оцінювання стійкості та якості системи автоматичного регулювання будуть застосовані методи теорії автоматичного керування. Аналіз перехідних процесів дозволить визначити такі показники, як час регулювання, перерегулювання, час наростання, встановлена помилка та ступінь коливальності системи.

Оцінка цих параметрів буде необхідною для визначення ефективності роботи системи та порівняння різних методів налаштування регулятора.

Основним методом підвищення ефективності системи автоматичного керування у роботі буде обрано використання PID-регулятора. Вибір саме PID-регулятора пояснюватиметься його широким застосуванням у промислових системах автоматизації, простотою реалізації та здатністю забезпечувати високу точність регулювання.

Пропорційна складова регулятора забезпечуватиме необхідну швидкодію системи, інтегральна – усуватиме статичну похибку, а диференціальна – підвищуватиме стійкість системи та зменшуватиме коливання перехідного процесу.

Для синтезу параметрів PID-регулятора будуть використані емпіричні методи налаштування Циглера–Нікольса та Чина–Хронеса–Ресвіка.

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Метод Циглера–Нікольса дозволить швидко отримати параметри регулятора на основі характеристик перехідного процесу об'єкта керування та забезпечить достатню швидкодію системи.

Однак цей метод може супроводжуватися значним перерегулюванням і коливаннями, тому додатково буде використано метод Чина–Хронеса–Ресвіка, який забезпечить більш плавний характер перехідного процесу та підвищить стійкість системи.

Для порівняння результатів синтезу також буде застосовано автоматичне налаштування параметрів регулятора за допомогою функції Auto-tune у середовищі MatLab Simulink. Використання цього методу дозволить автоматично визначати оптимальні параметри PID-регулятора з урахуванням характеристик об'єкта керування та забезпечить покращення показників якості системи. Автоматизований синтез регулятора дозволить значно скоротити час налаштування системи та мінімізувати вплив людського фактора.

Комп'ютерне моделювання системи буде виконано в середовищі MatLab Simulink, яке є одним із найефективніших програмних засобів для дослідження систем автоматичного керування. Використання Simulink дозволить реалізувати математичну модель об'єкта керування, провести моделювання перехідних процесів та виконати порівняльний аналіз різних методів налаштування PID-регуляторів.

Отримані результати моделювання стануть основою для оцінювання ефективності вибраних методів та формування висновків щодо найбільш оптимального способу синтезу регулятора для процесу фільтрації суспензії мідного концентрату.

Висновки до розділу

У другому розділі бакалаврської роботи виконано обґрунтування та вибір методів розв'язання поставлених завдань для автоматизованої системи керування процесом фільтрації суспензії мідного концентрату. Проведено аналіз основних проблем, які виникають під час функціонування барабанного вакуум-фільтра, зокрема нестабільності властивостей суспензії, коливань рівня вакууму, нерівномірної подачі суспензії, температурних змін, зношування фільтрувальної тканини та впливу зовнішніх збурень на процес фільтрації.

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У розділі здійснено постановку технічного завдання та визначено основні вимоги до системи автоматичного керування. Обґрунтовано необхідність використання сучасних методів математичного моделювання, теорії автоматичного керування та комп'ютерного аналізу динамічних систем для дослідження процесу фільтрації. Визначено основні підходи до аналізу динамічних характеристик об'єкта керування та оцінювання показників якості системи автоматичного регулювання.

Також у розділі обґрунтовано вибір PID-регулятора як основного засобу підвищення ефективності системи автоматичного керування процесом фільтрації. Розглянуто особливості використання пропорційної, інтегральної та диференціальної складових регулятора для забезпечення необхідної швидкодії, точності та стійкості системи. Для синтезу параметрів PID-регулятора обрано методи Циглера-Нікольса, Чина-Хронеса-Ресвіка та автоматичне налаштування Auto-tune у середовищі MatLab Simulink.

Крім того, у розділі обґрунтовано використання програмного середовища MatLab Simulink для побудови математичної моделі системи, моделювання перехідних процесів та проведення порівняльного аналізу різних методів налаштування PID-регуляторів. Отримані результати стали основою для подальшого дослідження ефективності системи автоматичного керування процесом фільтрації мідного концентрату.

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3 СИНТЕЗ ТА АНАЛІЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

3.1 Синтез одноконтурної системи автоматичного керування

Для управління процесом фільтрації суспензії мідного концентрату у барабанному вакуум-фільтрі розроблено математичну модель системи автоматичного регулювання вакууму. Але спочатку побудуємо структурну схему (рисунок 3.1) яка є основою для синтезу регуляторів. На структурній схемі показані основні компоненти системи: регулятор, виконавчий механізм, регулюючий орган, об'єкт управління та датчик зворотного зв'язку.

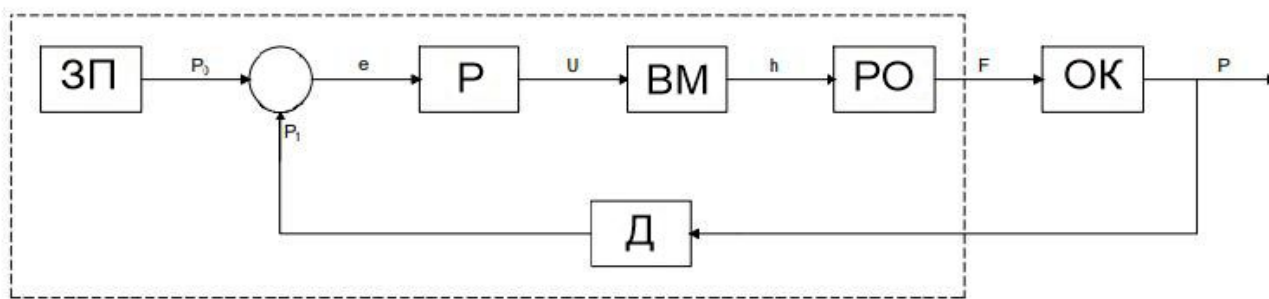


Рисунок 3.1 – Структурна схема контуру регулювання вакууму в барабанному вакуумному фільтрі

Тут:

ЗП - задаючий пристрій;

Р - регулятор;

ВМ - виконавчий механізм;

РО - регулюючий орган;

ОК - барабанний вакуум фільтр;

Д - давач тиску;

P_0 - вакуум у системі барабанного вакуум фільтра;

e - помилка, що виникає при відхиленні параметра від завдання;

U - напруга;

h - переміщення регулюючого органу;

F - витрата повітря.

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У ході проведення аналізу технологічного процесу фільтрації мідного концентрату було визначено вхідний та вихідний параметри для системи. Вхідним параметром є потужність вакуумного насоса, а вихідним параметром рівень вакууму в системі барабанного вакуум-фільтра.

Вихідні значення цих параметрів представлені в таблиці 3.1, що дозволяє провести подальше моделювання та оптимізацію процесу управління.

Таблиця 3.1 - Вихідні значення

Потужність насоса(%)	Витрата повітря (л/с)
5	0.25
10	0.5
15	0.75
20	1
25	1.3
30	1.6
35	1.9
40	2.2
45	2.5
50	2.8
55	3.1
60	3.4
65	3.7
70	4
75	4.3
80	4.6
85	4.9
90	5.2
95	5.5
100	5.8

Використовуючи пакет System Identification Toolbox (рисунок 3.2) у системі MATLAB, проведемо побудову математичної моделі системи автоматичного регулювання барабанного вакуум-фільтра, спираючись на вихідні дані вхідного параметра потужності насоса та вихідного параметра рівня вакууму в системі.

При побудові математичної моделі ключовим моментом є оцінка її адекватності.

Згідно з рисунком 3.3, математична модель САК барабанного вакуумного-фільтра має вигляд розімкнутої системи 2-го порядку

$$G_{ou}(s) = \frac{0.08522s + 0.06059}{s^2 + 1.462s + 1.01} \quad (3.1)$$

Для забезпечення точності та стабільності процесу регулювання вакууму в системі барабанного вакуум фільтра необхідно враховувати не тільки динаміку об'єкта управління, а й характеристики виконавчого механізму (насос) та регулюючого органу (клапан). Це з тим, кожен із цих компонентів має динамічні особливості, які впливають реакцію системи зміни керуючого сигналу.

Визначимо передатну функцію виконавчого механізму, яким є насос. Для вакуумних пластинчасто-роторних насосів типу Edwards E2M-80 на лініях приблизно 8 метрів затримка встановлення розрядження зазвичай становить від 0.4 до 0.6 секунд.

Візьмемо усереднене значення:

$$G_{BM}(s) = \frac{K_H}{T_H s + 1} \quad (3.2)$$

- $K_H = 0.12$ МПа/од – коефіцієнт підсилення насоса., $K_H = 0.12$ дає при повному сигналі ($u=1$) розрідження порядку - 0.1 МПа, що збігається з паспортними даними насоса;

- $T_H = 0.5$ с. - постійна часу, визначає інерційність насоса та вакуумної лінії.

Підставивши значення формулу (3.2) отримаємо наступну передатну функцію виконавчого механізму:

$$G_{BM}(s) = \frac{0.12}{0.5s + 1} \quad (3.3)$$

Визначимо передатну функцію регулюючого органу – клапан. Для дросель-клапанів DN25-DN32 з витратним коефіцієнтом рівним 1.8 характерне плавне відкриття з електропневмоприводом (0 ÷ 100 % за 0.15...0.25 секунд).

Формула для регулюючого органу буде виглядати так:

$$G_{PO}(s) = \frac{K_K}{T_K s + 1} \quad (3.4)$$

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Тут:

- $K_K = \frac{1}{K_H} = 1.2$ – коефіцієнт підсилення клапана;

- $T_K = 0.2$ с. – стала часу клапана.

Підставивши значення в формулу (3.4) отримаємо наступну передавальну функцію виконавчого механізму:

$$G_{PO}(s) = \frac{1.2}{0.2s + 1} \quad (3.5)$$

Тепер отримаємо загальну передатну функцію контуру керування вакуумом:

$$G_{розімк} = G_{ВМ}(s) * G_{PO}(s) * G_{ОУ}(s) = \frac{0.12}{0.5s + 1} * \frac{1.2}{0.2s + 1} * \frac{0.08522s + 0.06059}{s^2 + 1.462s + 1.01}$$
$$G_{розімк}(s) = \frac{0.0123s + 0.00872}{0.1s^4 + 0.8462s^3 + 2.1244s^2 + 2.169s + 1.01} \quad (3.6)$$

Звідси передавальна функція замкнутої системи контуру управління вакуумом має такий вигляд:

$$G_{замк}(s) = \frac{0.0123s + 0.00872}{0.1s^4 + 0.8462s^3 + 2.1244s^2 + 2.1813s + 1.01872} \quad (3.7)$$

3.2 Аналіз динамічних властивостей системи

Для аналізу стійкості розімкнутої та замкнутої систем застосуємо перший метод Ляпунова, полюси цих систем, використовуючи у Matlab.

```
>> G=tf([0.0123 0.00872],[0.1 0.8462 2.1244 2.169 1.01])  
  
G =  
  
          0.0123 s + 0.00872  
-----  
0.1 s^4 + 0.8462 s^3 + 2.124 s^2 + 2.169 s + 1.01  
  
Continuous-time transfer function.  
Model Properties  
>> pole(G)  
  
ans =  
  
-5.0000 + 0.0000i  
-2.0000 + 0.0000i  
-0.7310 + 0.6897i  
-0.7310 - 0.6897i
```

Рисунок 3.4 - Лістинг програми для знаходження полюсів РСАК

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Зобразимо отримані полюси на комплексній площині через команду pzmap Matlab (рисунок 3.5)

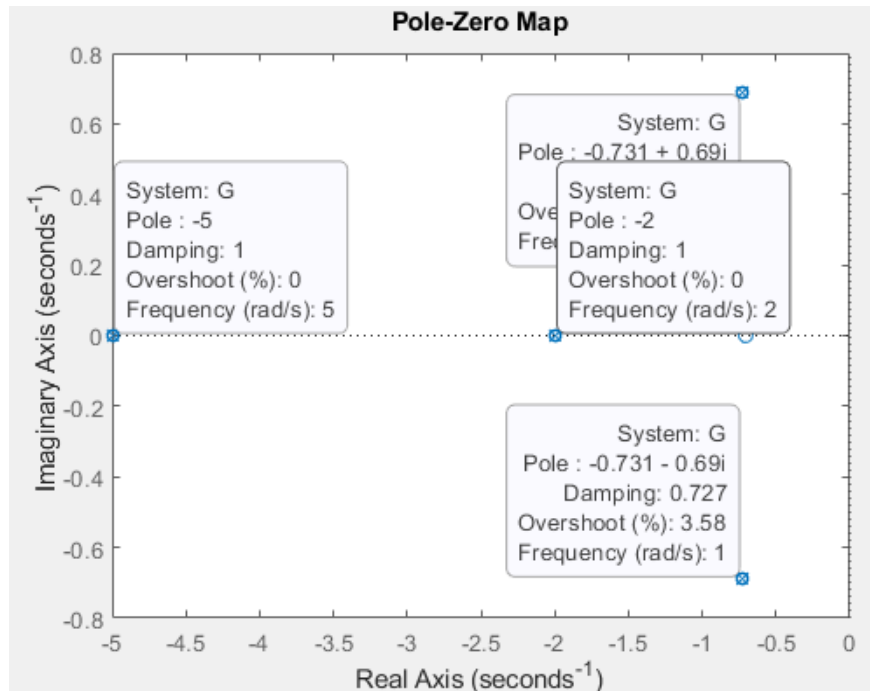


Рисунок 3.5 - Полюси РСАК на комплексній площині

Полюси розімкнутої системи автоматичного регулювання мають від'ємні дійсні частини, що, згідно з першим методом Ляпунова, підтверджує її стійкість.

Так само, для перевірки стійкості замкнутої системи застосуємо перший метод Ляпунова.

```
>> G1=tf([0.0123 0.00872],[0.1 0.8462 2.1244 2.1813 1.01872])

G1 =

          0.0123 s + 0.00872
-----
0.1 s^4 + 0.8462 s^3 + 2.124 s^2 + 2.181 s + 1.019

Continuous-time transfer function.
Model Properties
>> pole(G1)

ans =

-5.0094 + 0.0000i
-1.9746 + 0.0000i
-0.7390 + 0.6955i
-0.7390 - 0.6955i
```

Рисунок 3.6 - Лістинг програми для знаходження полюсів ЗСАК

Зобразимо отримані полюси на комплексній площині через команду pzmap Matlab (рисунок 3.7).

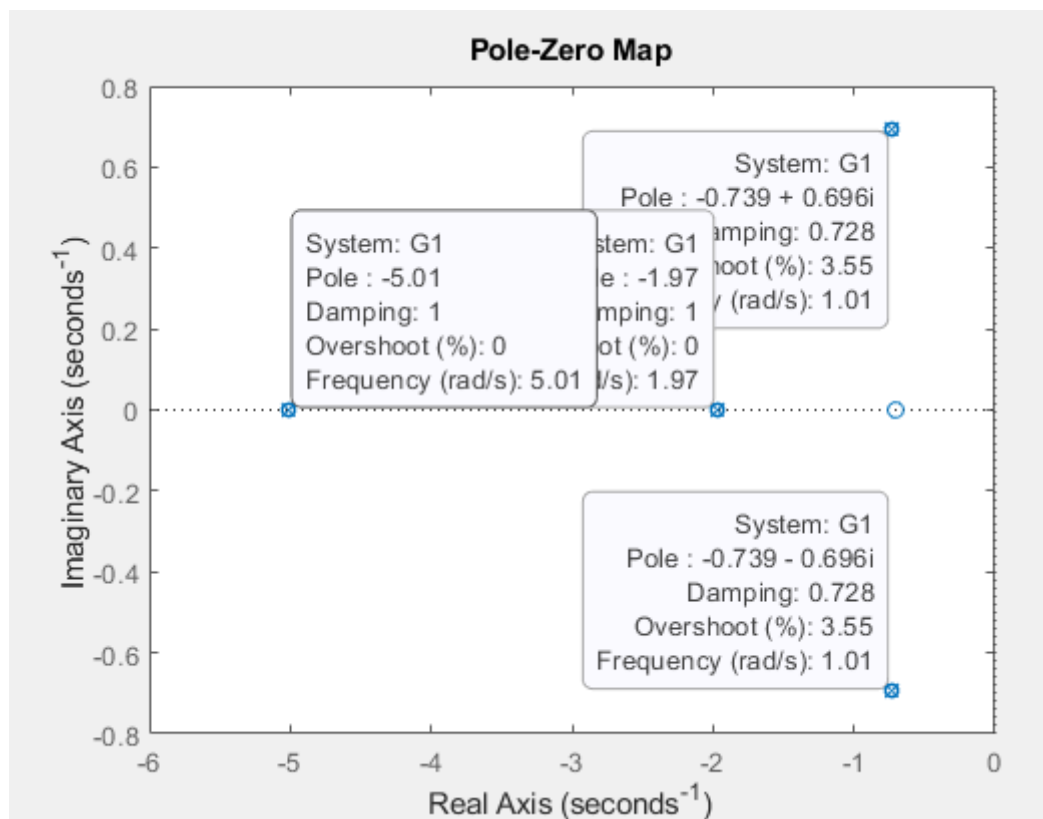


Рисунок 3.7 – Полюси ЗСАК на комплексній площині

Полюси замкнутої системи мають негативні дійсні частини, що, згідно з теоремою Ляпунова, підтверджує її стійкість.

Наступним етапом аналізу системи автоматичного регулювання вакууму барабанному вакуум-фільтрі є визначення оцінок якості замкнутої системи. Оцінки якості поділяються на прямі за перехідним процесом, і непрямі розташування полюсів системи.

Аналіз якості замкнутої системи управління вакуумом проведено на основі перехідного процесу (рисунок 3.8), а отримані прямі та опосередковані оцінки якості зведені до таблиці 3.2.

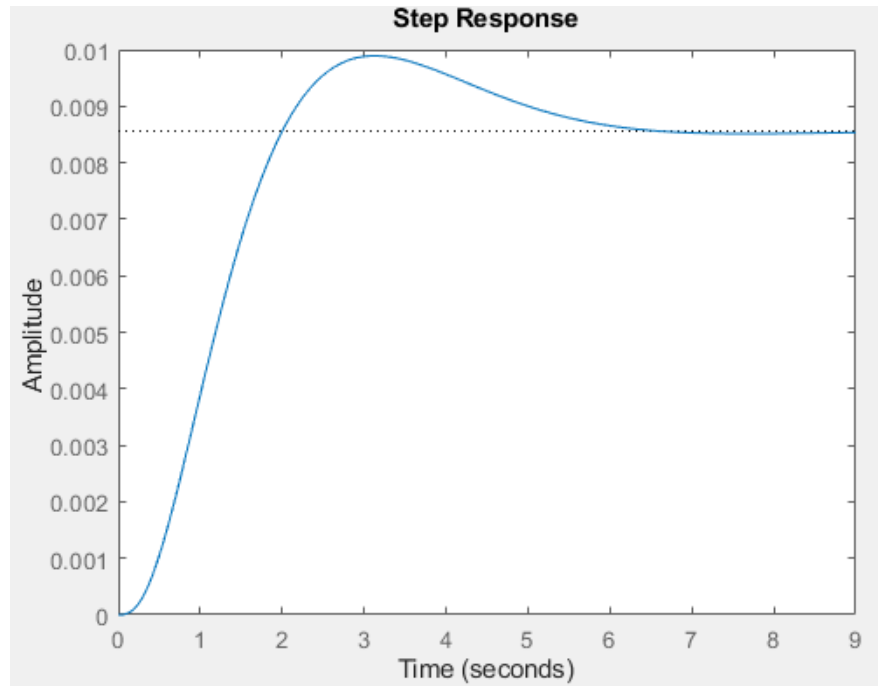


Рисунок 3.8 – Перехідний процес ЗСАР

Таблиця 3.2 – Прямі та опосередковані оцінки якості системи без регулятора

№	Показники якості	Позначення	За перехідним процесом
1	Час регулювання	T_{set}	4.95 с
2	Перерегулювання	P_{ov}	15%
3	Кількість коливань	M	0
4	Коливання	μ	-
5	Період коливань	T	-
6	Усталена похибка	e_{ss}	0.9914
7	Час досягнення першого максимуму	T_P	3.18 с
8	Час наростання	T_R	1.08 с
9	Декремент згасання	χ	-

Оцінку якості системи за корінням характеристичного рівняння проведемо, використовуючи розташування полюсів на комплексній площині.

Кореневі оцінки якості:

а) Характеристика №1

$$T_{set} = \frac{4}{|\sigma_{min}|} = \frac{4}{|-5|} = 0.8 \text{ с.}$$

де σ_{min} - мінімальний полюс із дійсним значенням.

Згідно з даними на рисунку 3.7, полюсом із дійсним значенням є число 5.

б) Характеристика №2.

Ступінь стійкості

$$n = |\sigma_{min}| = 5.$$

Запаси стійкості по амплітуді та фазі визначимо за допомогою графіків ЛАЧХ та ЛФЧХ (рисунок 3.9). Результати кореневого аналізу якості зведено до таблиці 3.3.

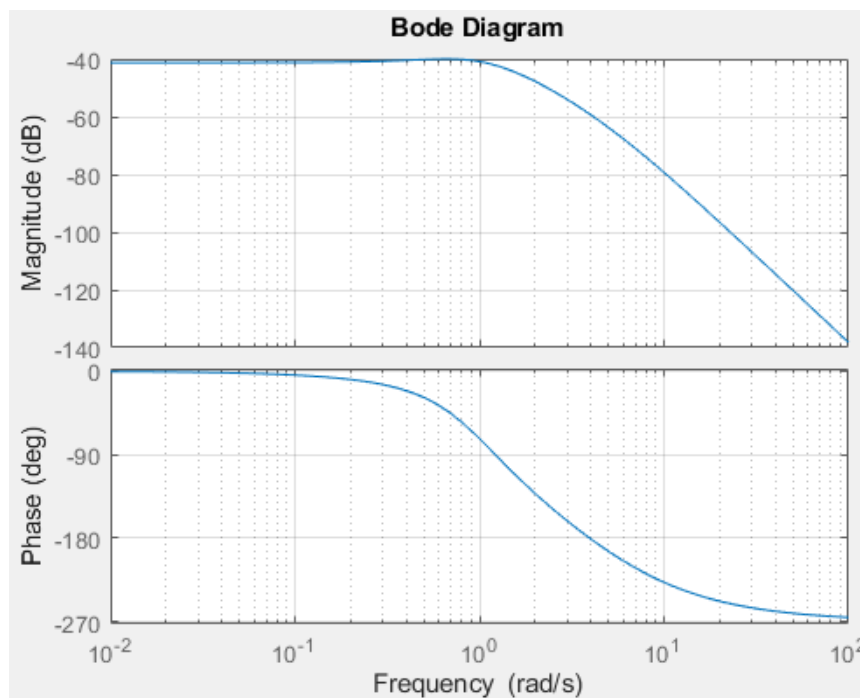


Рисунок 3.9 – Запаси стійкості по амплітуді та фазі розімкнутої системи без регулятора

Запаси стійкості по амплітуді дорівнює 59 dB, а по фазі дорівнює нескінченності. Допустима межа запасів стійкості по амплітуді дорівнює 10÷15 dB, по фазі (30÷40°). Отже, отримані запаси стійкості не відповідають вищезазначеним вимогам.

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

Проаналізувавши отримані показники якості, можна відзначити, що система без регулятора має помітне перерегулювання, що дорівнює 15 відсотків, що вказує на присутність значних коливань і перевищення цільового значення. Кількість коливань при цьому дорівнює нулю, що свідчить про відсутність стійких коливальних процесів.

Швидкодія системи характеризується часом регулювання 4.95 секунд і часом наростання 1.08 секунд, що вказує на відносно повільний загальний відгук при швидкому початковому підйомі сигналу. Помилка, що встановилася, становить 0.9914, що говорить про недостатню точності системи і необхідність її поліпшення.

Головним недоліком системи є її неточність та помітне перерегулювання, тому доцільно синтезувати регулятор, здатний зменшити ці недоліки.

Розгляд системи з PID-регулятором буде виправданим, оскільки складова, що інтегрує, підвищить точність, пропорційна забезпечить необхідну швидкодію, а диференціальна дозволить передбачати зміну помилки і оперативно реагувати на зміни в системі. Це забезпечить швидку адаптацію регулятора до змін та стабільність вихідного сигналу.

3.3 Синтез регуляторів із заданими показниками якості перехідних процесів

Для об'єкта управління, що є процесом фільтрації суспензії мідного концентрату з використанням барабанного вакуум-фільтра, необхідно синтезувати PID-регулятор, з метою забезпечення заданих показників якості системи автоматичного регулювання.

Як базовий метод налаштування обраний перший метод Циглера-Нікольса (ZN1), заснований на визначенні коефіцієнта передачі, постійного часу T і часу запізнення L [3].

Метод полягає в наступному. За перехідним процесом розімкнутої системи знаходимо такі параметри як стала часу, коефіцієнт передачі та час запізнення (рисунок 3.10).

Для знаходження невідомих параметрів необхідно визначити точку перегину перехідної характеристики, потім провести до неї дотичну. Час запізнення визначається як інтервал часу від моменту подачі вхідного ступінчастого впливу до початку руху сигналу L дорівнює 0.37 секунд.

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

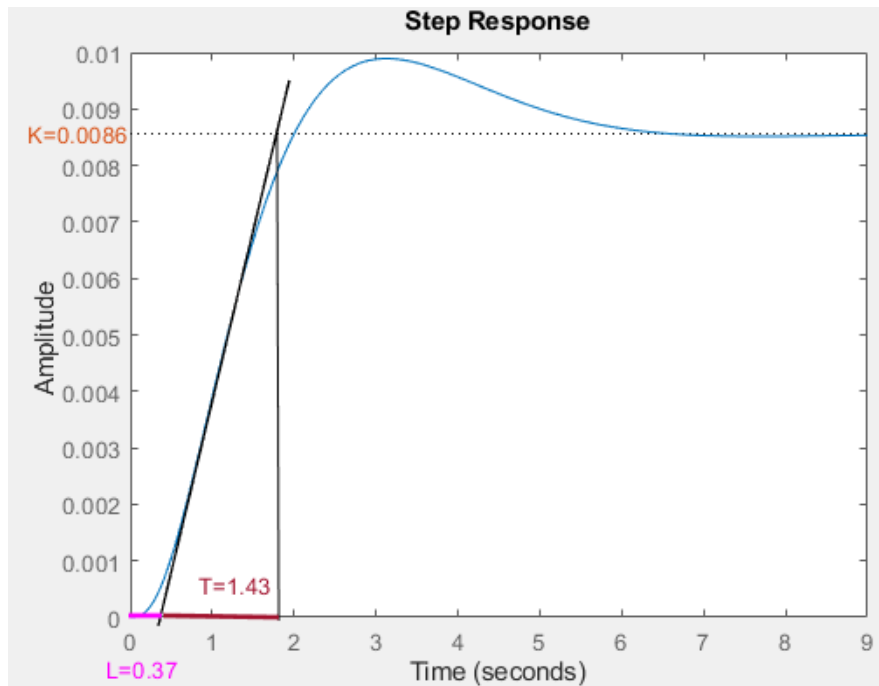


Рисунок 3.10 – Перехідний процес розімкнутої системи

Коефіцієнт передачі дорівнює встановленому значенню перехідної характеристики K дорівнює 0.0086. Постійна часу (T) – час, яка визначається як різниця між t_K і L , вона дорівнює 1.43 секунди.

Далі перевіримо, чи задовольняють отримані значення встановленим вимогам:

$$0.15 < \frac{L}{T} < 0.6$$

Розраховане значення дорівнює 0.26, що відповідає вимогам. Використовуючи отримані значення, параметри регуляторів розраховуються за формулами, наведеними у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 - Розрахунок значень PID-регулятора методом ZN1

Контролер	K_p	K_I	K_D
P-регулятор	$\frac{T}{KL}$	-	-
PI-регулятор	$0.9 \frac{T}{KL}$	$\frac{L}{0.3}$	-
PID-регулятор	$1.2 \frac{T}{KL}$	$2L$	$0.5L$

У ході моделювання системи автоматичного управління процесом фільтрації методом Циглера-Нікольса було отримано такі характеристики:

Коефіцієнт передачі $K = 0.0086$;

Постійна часу $T = 1.43$.

Час запізнення $L = 0.37$

Отримані значення K , L і T використовуються для обчислення параметрів P , PI і PID -регуляторів за формулами з таблиці 3.3. Отримані значення параметрів P , PI та PID -регуляторів наведені в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 - Значення параметрів P , PI та PID -регуляторів обчислені методом ZN1

Контролер	K_p	K_I	K_D
P-регулятор	449.4	-	-
PI-регулятор	404.5	1.23	-
PID-регулятор	539.3	0.74	0.185

Використовуючи отримані параметри типового регулятора першим методом Циглера-Нікольса (ZN1), промодельюємо систему з PID -регуляторами. Результати моделювання системи з PID -регулятором представлені нижче на графіку (рис. 3.11)

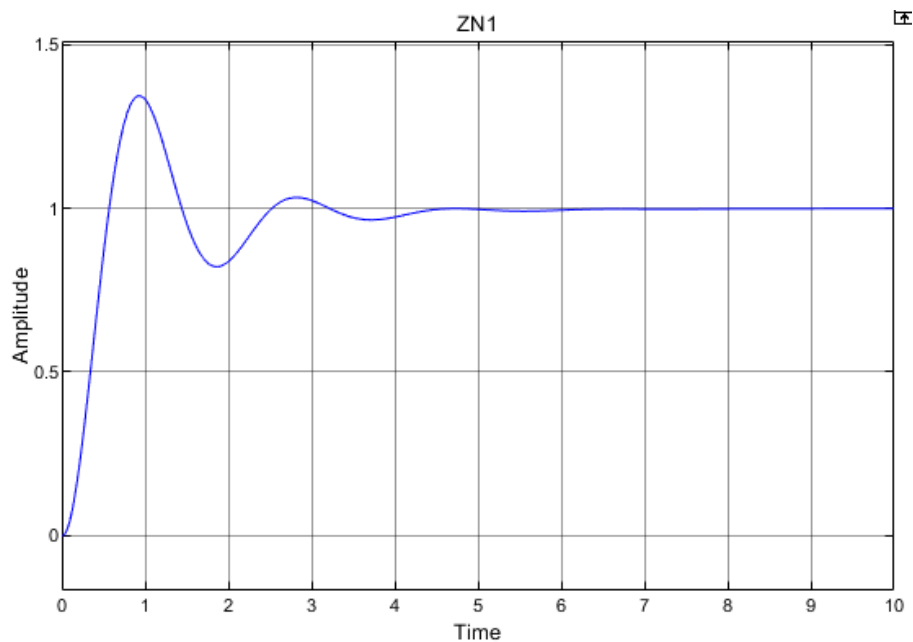


Рисунок 3.11 – Перехідний процес системи з PID -регулятором

Ступінь стійкості системи з PID-регулятором дорівнює 0.329 (рисунок 3.12).

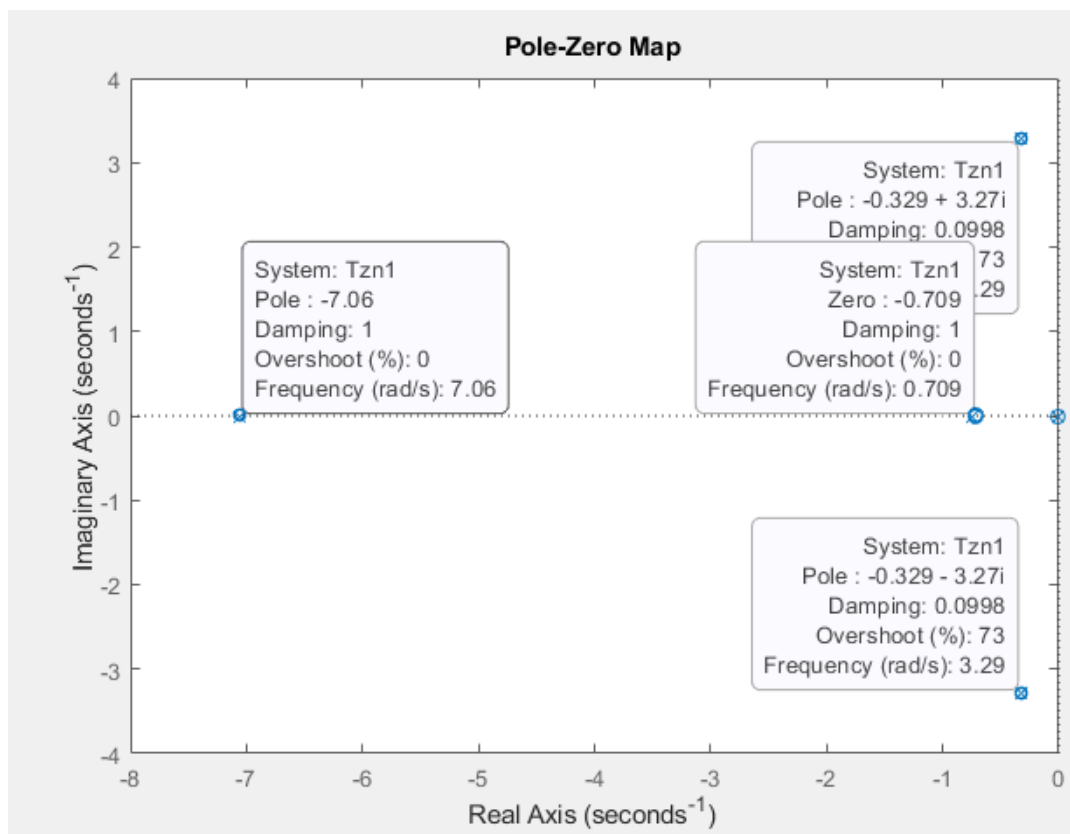


Рисунок 3.12 – Полюси системи з PID-регулятором на комплексній площині

У таблиці 3.5 представлені прямі та опосередковані оцінки якості перехідного процесу з використанням PID-регулятора

Таблиця 3.5 – Прямі та опосередковані оцінки якості системи з PID-регулятором синтезованого методом ZN1

№	Показники якості	Позначення	За перехідним процесом
1	Час регулювання	T_{set}	2.5 с
2	Перерегулювання	P_{ov}	34 %
3	Кількість коливань	M	2
4	Коливання	μ	9.6 %
5	Період коливань	T	1.89 с
6	Усталена похибка	e_{ss}	0
7	Час досягнення першого максимуму	T_P	0.95 с
8	Час наростання	T_R	0.57 с
9	Декремент згасання	χ	-

Синтезований за допомогою методу Циглера-Нікольса PID-регулятор забезпечує досить швидкий час відгуку, але також супроводжується деякими коливаннями та перерегулюванням. Важливо відзначити, що хоча система в цілому стабілізується, можна покращити налаштування регулятора для зниження перерегулювання та підвищення точності.

Спробуємо покращити характеристики регулятора за допомогою синтезу PID-регулятора методом Чина-Хронеса-Ресвіка (CHR). Алгоритм цього методу схожий на метод ZN1, тому вчислимо параметри PID-регулятора за формулами, поданими в таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 - Розрахунок значень PID-регулятора методом CHR

Контролер	K_p	T_i	T_D
P-регулятор	$0.3 \frac{T}{KL}$	-	-
PI-регулятор	$0.35 \frac{T}{KL}$	$\frac{1.2L}{K}$	-
PID-регулятор	$0.6 \frac{T}{KL}$	$\frac{L}{K}$	$0.5LK$

Отримані значення параметрів P, PI та PID-регуляторів запишемо в таблицю 3.7.

Таблиця 3.7 - Значення параметрів P, PI та PID-регуляторів обчислені методом CHR

Контролер	K_p	T_i	T_D
P-регулятор	134.8	-	-
PI-регулятор	157.3	57.6	-
PID-регулятор	269.6	43	0.0016

За допомогою отриманих параметрів типового регулятора методом CHR промодельюємо систему з PID-регулятором.

Результати моделювання системи з PID-регулятором представлені нижче на графіку (рис. 3.13)

У таблиці 3.8 представлені прямі та опосередковані оцінки якості перехідного процесу з використанням PID-регулятора (CHR).

Таблиця 3.8 – Прямі та опосередковані оцінки якості системи з PID-регулятором синтезованого методом CHR

№	Оцінки якості	Позначення	За перехідним процесом
1	Час регулювання	T_{set}	15.43 с
2	Перерегулювання	P_{ov}	12.4%
3	Число коливань	M	-
4	Коливання	μ	-
5	Період коливань	T	-
6	Встановлена помилка	e_{ss}	0
7	Час досягнення першого максимуму	T_p	1.38 с
8	Час наростання	T_R	1.1 с
9	Декремент згасання	χ	-

Метод CHR дозволив знизити перерегулювання та коливання, що значно підвищило стабільність системи. Однак це призвело до збільшення часу регулювання, що зробило систему менш швидкою, але стабільнішою.

В якості альтернативи попереднім двом методам розглянемо автоматичне налаштування параметрів регулятора за допомогою функції «Auto-tune» у середовищі MatLab.

Будемо використовувати спосіб, який базується на налаштуванні параметрів регулятора в графічному середовищі Simulink. Для цього спочатку промодельємо систему з PID-регулятором Simulink (рисунок 3.15).

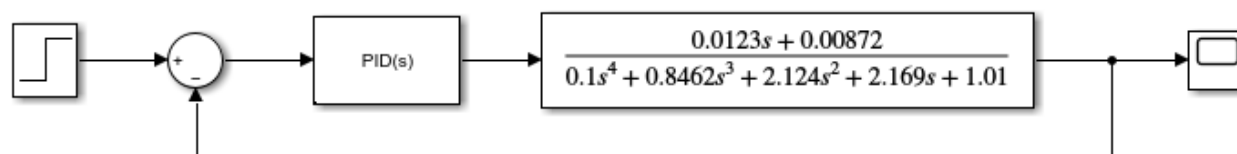


Рисунок 3.15 – Моделювання системи з PID-регулятором у Simulink

Потім у вікні параметрів регулятора необхідно натиснути кнопку «Tune», щоб відкрити інструмент «PID tuning tool» (рисунок 3.16).

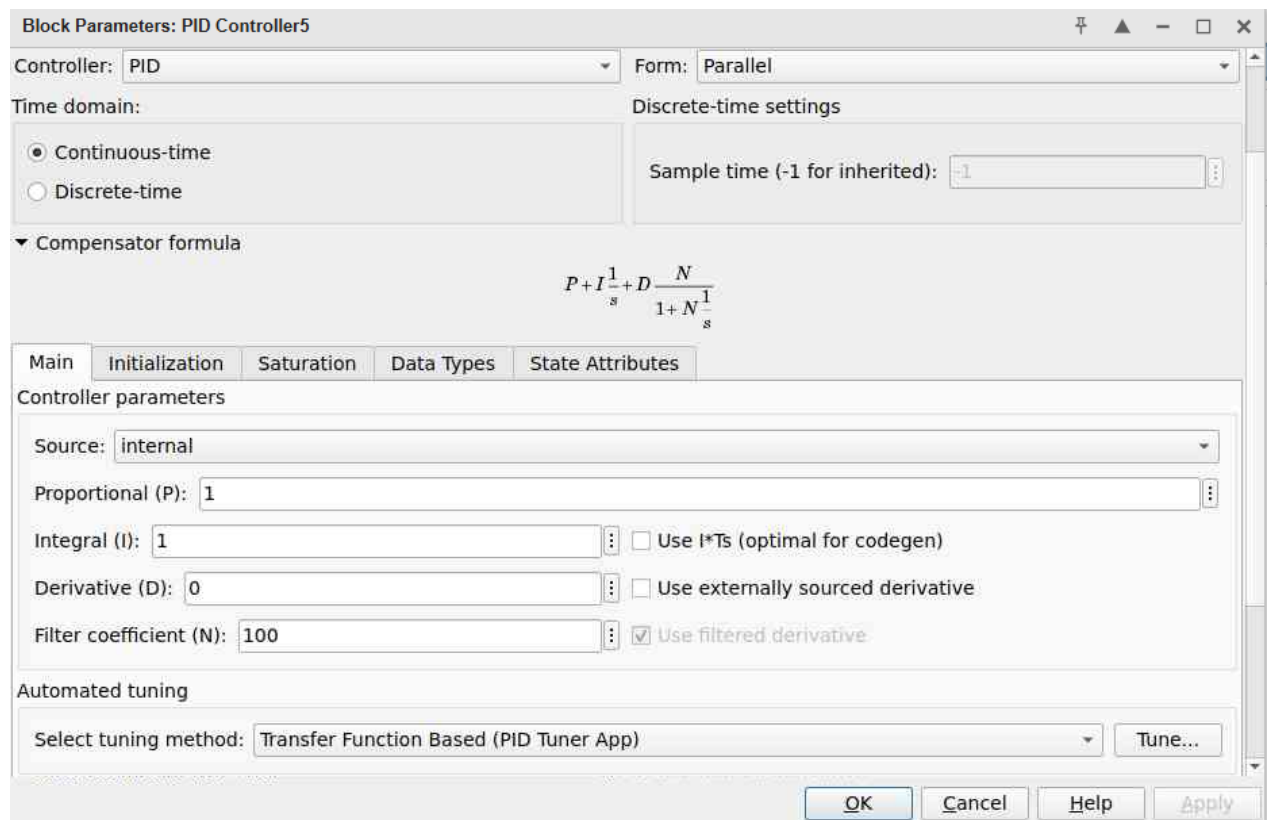


Рисунок 3.16 – Блок налаштування параметрів PID-регулятора

Після натискання кнопки Tune відкрилося вікно, в якому відображається перехідний процес системи з PID-регулятором, налаштованим за допомогою інструмента PID Tuner (рисунок 3.17).

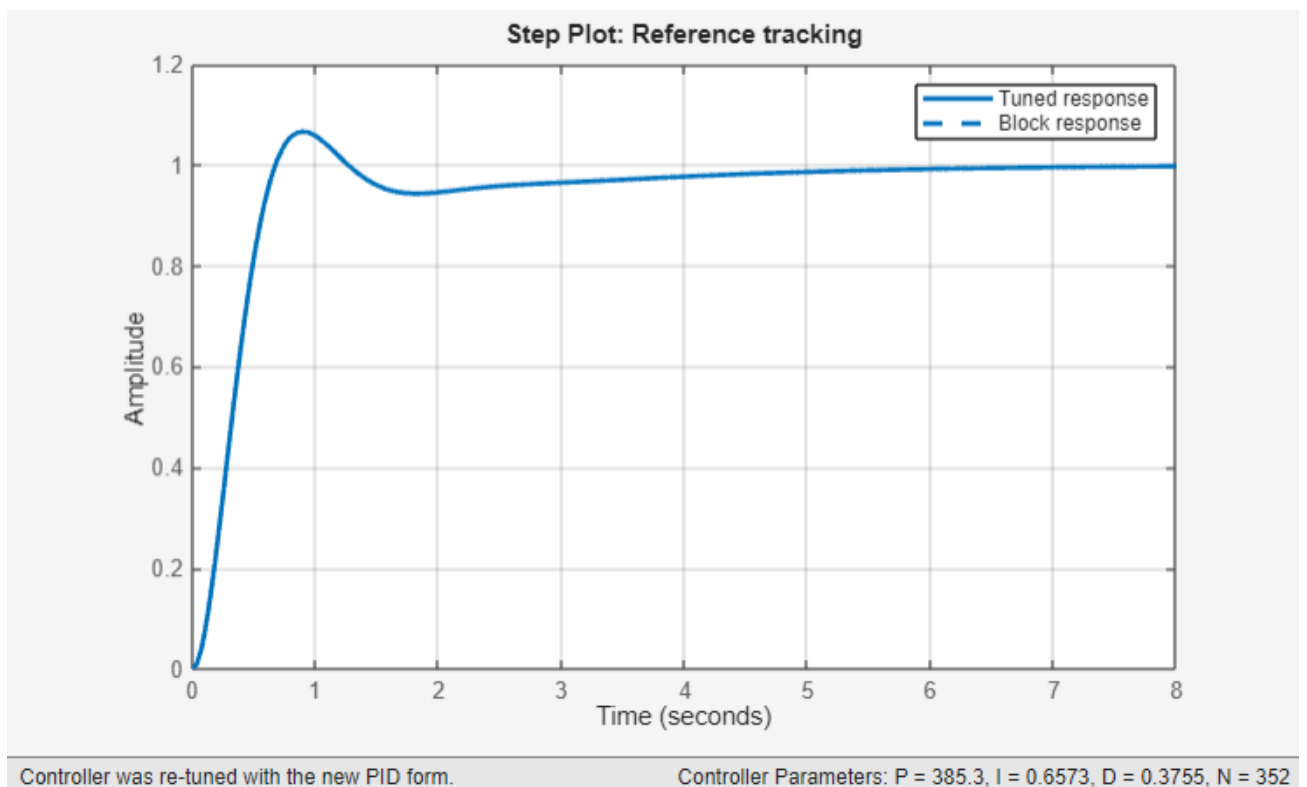


Рисунок 3.17 – Перехідний процес системи з PID-регулятором

Параметри регулятора (рисунок 3.18) можна знайти, натиснувши кнопку «Show Parameters» у верхньому правому кутку (рисунок 3.17).

Controller Parameters			
	Tuned	Block	
P	385.3288	385.3288	
I	0.65726	0.65726	
D	0.37545	0.37545	
N	352.0067	352.0067	

Performance and Robustness			
	Tuned	Block	
Rise time	0.446 seconds	0.446 seconds	
Settling time	4.31 seconds	4.31 seconds	
Overshoot	6.59 %	6.59 %	
Peak	1.07	1.07	
Gain margin	40.1 dB @ 42.4 rad/s	40.1 dB @ 42.4 rad/s	
Phase margin	59.4 deg @ 3.08 rad/s	59.4 deg @ 3.08 rad/s	
Closed-loop stability	Stable	Stable	

Рисунок 3.18 – Параметри PID-регулятора

Перехідний процес системи з PID-регулятором, який був синтезований методом "Auto-tune", показаний на графіці нижче (рисунок 3.19).

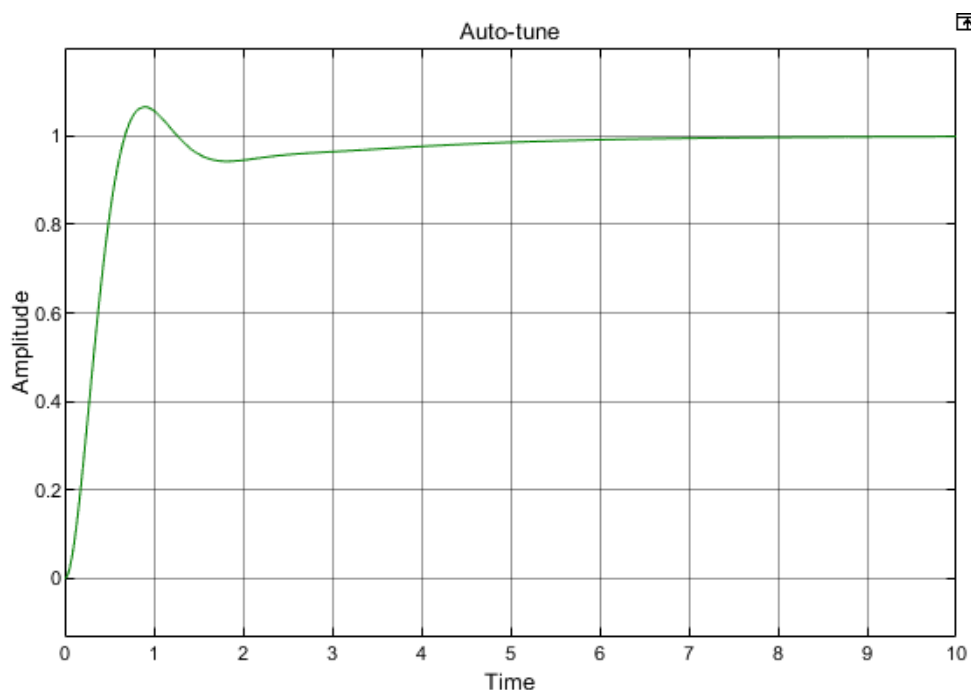


Рисунок 3.19 – Перехідний процес системи з PID-регулятором (Auto-tune)

Ступінь стійкості системи з PID-регулятором (Auto-tune) дорівнює 0.508 (рисунок 3.20).

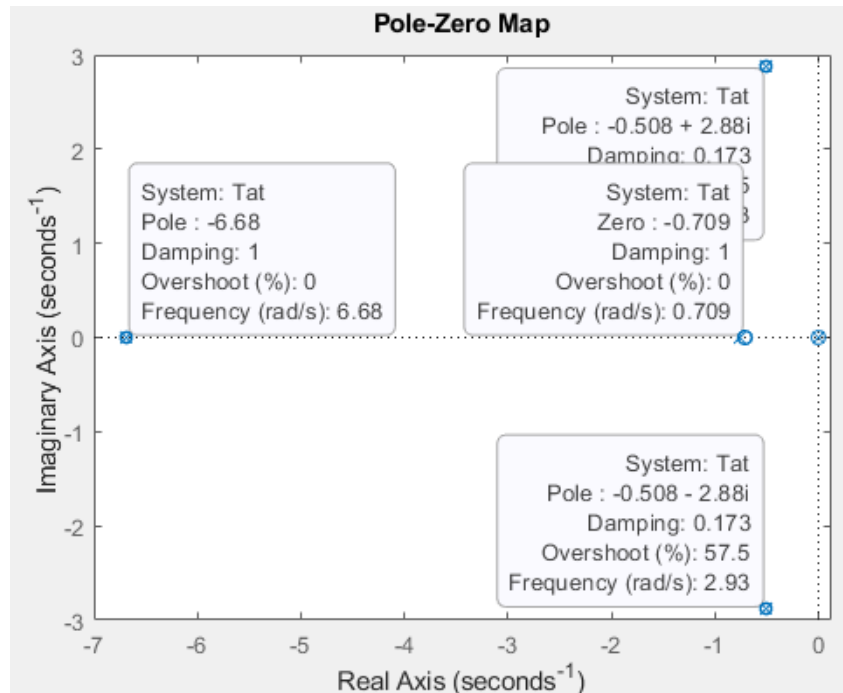


Рисунок 3.20 – Полюси системи з PID-регулятором (Auto-tune) на комплексній площині

3.4 Порівняльний аналіз запропонованих варіантів рішень

Виконаємо порівняльний аналіз усіх виконаних методів налаштування параметрів типового регулятора на основі перехідних характеристик (рисунок 3.21).

Порівнявши різні методи синтезу PID-регуляторів, можна зробити висновок, що кожен з них має свої переваги в залежності від цілей. Метод Циглера-Нікольса забезпечує хороший баланс між часом регулювання та перерегулюванням, але все ж таки залишає систему з помітними коливаннями. Метод Чина-Хронеса-Ресвіка значно покращує стабільність, знижуючи перерегулювання, але за рахунок збільшення часу регулювання, що може бути неприйнятним для процесів, де важлива швидкість. Метод Auto-tune показує найкращий результат швидкості реакції і стабільності, забезпечуючи мінімальне перерегулювання і швидкий час регулювання.

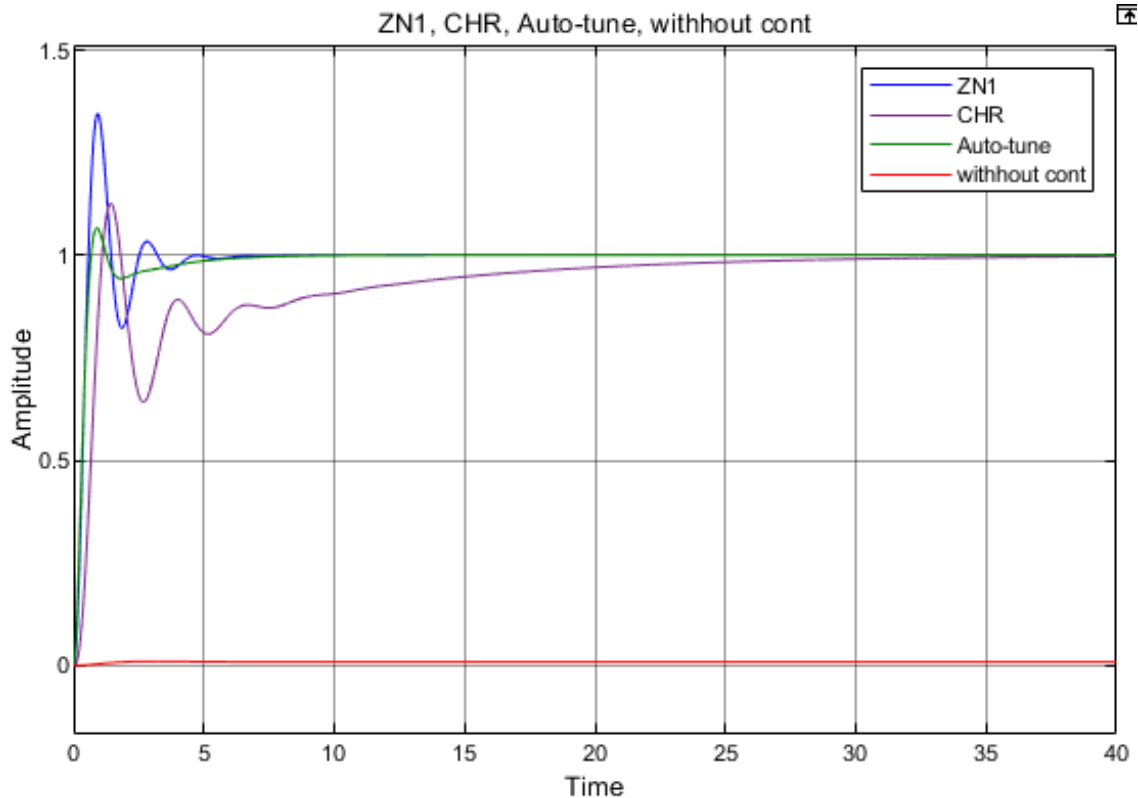


Рисунок 3.21 – Перехідні процеси системи з PID-регулятором за різних методів синтезу

Таблиця 3.9 – Прямі та непрямі показники якості системи без регулятора та з PID-регуляторами синтезованими різними методами

№	Показники якості	Система без регулятора	Метод ZN1	Метод CHR	Метод Auto-tune
1	T_{set}	4.95 с	2.5 с	15.43 с	1.05 с
2	P_{ov}	15%	34 %	12.4%	6.6%
3	M	0	2	-	-
4	μ	-	9.6 %	-	-
5	T	-	1.89 с	-	-
6	e_{ss}	0.9914	0	0	0
7	T_p	3.18 с	0.95 с	1.38 с	0.92 с
8	T_R	1.08 с	0.57 с	1.1 с	0.68 с
9	X	-	-	-	-

В цілому, найкращі характеристики системи, що поєднують мінімальний час регулювання, низький рівень перерегулювання і відсутність помилки, що встановилася, демонструє PID-регулятор, налаштований методом Auto-tune.

Даний регулятор забезпечує оптимальний баланс між швидкодією та стійкістю, роблячи його кращим вибором для автоматизації процесу фільтрації суспензії мідного концентрату.

Висновки до розділу

У третьому розділі бакалаврської роботи розроблено математичні основи системи автоматичного керування процесом фільтрації суспензії мідного концентрату у барабанному вакуум-фільтрі. Побудовано функціональну схему контуру регулювання вакууму, визначено основні елементи системи, зокрема регулятор, виконавчий механізм, регулюючий орган, об'єкт керування та систему зворотного зв'язку. Також визначено вхідні та вихідні параметри системи автоматичного регулювання.

У розділі виконано побудову математичної моделі системи автоматичного керування вакуумом із використанням пакета Matlab System Identification Toolbox. На основі експериментальних даних отримано передавальну функцію об'єкта керування та проведено оцінювання адекватності математичної моделі. Додатково визначено передавальні функції виконавчого механізму та регулюючого органу, після чого сформовано загальну передавальну функцію розімкнутої та замкнутої систем автоматичного регулювання.

Також у розділі проведено аналіз динамічних властивостей системи автоматичного керування. За допомогою першого методу Ляпунова досліджено стійкість розімкнутої та замкнутої систем, виконано аналіз розташування полюсів на комплексній площині та оцінено показники якості перехідного процесу. Визначено основні недоліки системи без регулятора, серед яких значне перерегулювання, недостатня точність та наявність усталеної похибки.

У межах розділу виконано синтез PID-регуляторів різними методами. Проведено налаштування параметрів регулятора методом Циглера–Нікольса, методом Чина–Хронеса–Ресвіка та автоматичним методом Auto-tune у середовищі Matlab Simulink. Для кожного методу виконано моделювання перехідних процесів, визначено показники якості системи та проведено оцінювання стійкості системи автоматичного регулювання.

Наприкінці розділу здійснено порівняльний аналіз різних методів синтезу PID-регуляторів. На основі отриманих результатів встановлено, що метод Auto-tune забезпечує найкраще співвідношення між швидкодією, стійкістю та рівнем перерегулювання системи автоматичного керування процесом фільтрації суспензії мідного концентрату.

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4 РОЗРОБКА ПРОЕКТНОЇ СКЛАДОВОЇ САК

4.1 Вибір технічних засобів автоматизації

Для реалізації системи автоматичного керування доцільно застосувати програмований логічний контролер Siemens SIMATIC S7-1200 або Siemens LOGO. Контролери серії Siemens S7-1200 широко використовуються для автоматизації середніх технологічних процесів та забезпечують високу стабільність роботи системи.

Siemens SIMATIC S7-1200 — це сучасний програмований логічний контролер (PLC) компанії Siemens, призначений для автоматизації технологічних процесів середньої складності. Контролери серії S7-1200 широко застосовуються у системах автоматичного керування насосними станціями, конвеєрами, вентиляційними установками, системами дозування та технологічними процесами безперервного типу, зокрема у фільтраційних установках.



Рисунок 4.1 - Siemens SIMATIC S7-1200

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

Для системи автоматизації процесу фільтрації мідного концентрату контролер S7-1200 є доцільним завдяки таким перевагам:

- підтримка PID-регулювання для стабілізації вакууму;
- наявність аналогових та дискретних входів/виходів;
- підтримка промислових протоколів Profinet, Modbus TCP та Ethernet;
- інтеграція із SCADA-системами;
- можливість роботи в середовищі TIA Portal;
- висока надійність у промислових умовах;
- простота масштабування системи автоматизації.

Основні характеристики CPU 1214C:

- 14 дискретних входів;
- 10 дискретних виходів;
- 2 аналогові входи;
- Ethernet/Profinet;
- підтримка PID Compact;
- швидкодія до 0.08 мкс на операцію;
- можливість підключення НМІ-панелей та SCADA.

У системі керування барабанним вакуум-фільтром контролер виконуватиме:

- зчитування сигналів із датчиків вакууму, температури, рівня та швидкості;
- реалізацію PID-алгоритму регулювання;
- керування частотним перетворювачем вакуумного насоса;
- формування сигналів аварійного захисту;
- передачу даних на операторську панель та SCADA-систему.

У даній роботі для реалізації системи логічного керування барабанним вакуум-фільтром може бути використаний програмований логічний модуль Siemens LOGO!, який є компактним засобом автоматизації для побудови локальних систем керування технологічними процесами.

Контролер даного типу поєднує функції релейної логіки, таймерів, лічильників та елементарної обробки аналогових сигналів, що дозволяє реалізувати базові алгоритми автоматичного керування виконавчими механізмами та контролю параметрів процесу.

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Контролер Siemens LOGO! 8 має вбудовані цифрові та аналогові входи/виходи, підтримує модульне розширення, а також забезпечує можливість підключення додаткових комунікаційних і функціональних модулів. Базові модулі містять 8 дискретних входів та 4 виходи, а також підтримують до 400 функціональних блоків програми, що є достатнім для реалізації нескладних алгоритмів автоматизованого керування.

У контексті даної роботи Siemens LOGO! може бути застосований для: керування приводом обертання барабана; автоматизації роботи вакуумної системи; керування насосним обладнанням; контролю подачі фільтраційної суспензії; обробки сигналів від датчиків рівня, тиску та стану обладнання; реалізації часових циклів роботи установки.

Програмування контролера здійснюється у середовищі LOGO! Soft Comfort із використанням функціонально-блокових схем (FBD) або релейно-контактної логіки, що значно спрощує розробку та налагодження алгоритмів керування. Наявність Ethernet-інтерфейсу забезпечує можливість інтеграції контролера з операторськими панелями HMI, системами диспетчеризації та віддаленим моніторингом технологічного процесу.

Перевагами Siemens LOGO! у межах даної системи є компактність, невисока вартість, простота програмування, висока надійність та достатня функціональність для реалізації локальної автоматизації вакуум-фільтра. Водночас слід зазначити, що даний контролер орієнтований переважно на системи малої та середньої складності, тому його обчислювальні можливості та засоби реалізації складних інтелектуальних алгоритмів є обмеженими у порівнянні з промисловими PLC серії Siemens SIMATIC.

Для регулювання швидкості обертання барабана вакуум-фільтра рекомендується використовувати частотний перетворювач Siemens SINAMICS V20 виробництва компанії Siemens. Даний пристрій призначений для плавного керування асинхронними електродвигунами та широко застосовується у системах промислової автоматизації.

Використання частотного перетворювача дозволить змінювати швидкість обертання барабана залежно від технологічних умов процесу фільтрації. Це забезпечить стабільну товщину осадового шару, покращить процес зневоднення мідного концентрату та зменшить енергоспоживання системи.

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 4.2 - Частотний перетворювач Siemens SINAMICS V20

Основними перевагами частотного перетворювача Siemens SINAMICS V20 є:

- плавне регулювання швидкості електродвигуна;
- підтримка PID-керування;
- вбудований захист від перевантаження та перегріву;
- компактні розміри;
- простота налаштування та експлуатації;
- підтримка протоколу Modbus RTU;
- висока енергоефективність;
- можливість інтеграції з PLC-контролерами серії Siemens SIMATIC S7-1200.

У системі автоматичного керування барабанним вакуум-фільтром частотний перетворювач виконуватиме такі функції:

- регулювання швидкості обертання барабана;
- підтримання стабільного режиму фільтрації;
- зменшення механічних навантажень на електропривід;
- забезпечення плавного пуску та зупинки двигуна;
- підвищення енергоефективності технологічного процесу.

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для вимірювання рівня вакууму в системі барабанного вакуум-фільтра доцільно використовувати промислові вакуумметри WİKA PGT23 або Endress+Hauser Cerabar PMP11. Дані прилади призначені для точного вимірювання розрідження та тиску в промислових системах автоматичного керування.



Рисунок 4.3 - Промисловий вакуумметр WİKA PGT23

Основними перевагами приладів WİKA PGT23 та Endress+Hauser Cerabar PMP11 є:

- висока точність вимірювання;
- стійкість до агресивних промислових середовищ;
- наявність стандартного аналогового виходу 4–20 мА;
- сумісність із PLC-контролерами;
- надійність та довговічність;
- можливість інтеграції у SCADA-системи;
- промисловий ступінь захисту IP65/IP67.

Вакуумметр у системі автоматичного керування виконуватиме такі функції:

- безперервне вимірювання рівня вакууму;
- передача аналогового сигналу на контролер Siemens SIMATIC S7-1200;
- формування сигналів для PID-регулювання;
- контроль аварійних режимів роботи вакуумної системи;
- підвищення стабільності процесу фільтрації.

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для підключення до системи автоматизації рекомендується використовувати аналоговий інтерфейс 4–20 мА, який забезпечує високу завадостійкість та точність передачі сигналу на великі відстані.

Контроль рівня суспензії у кориті барабанного вакуум-фільтра доцільно реалізувати за допомогою ультразвукового рівнеміра Siemens SITRANS Probe LU. Дані прилади призначені для безконтактного вимірювання рівня рідин та суспензій у промислових технологічних процесах.

Використання ультразвукових рівнемірів дозволить забезпечити стабільний контроль рівня суспензії у ванні вакуум-фільтра, що є важливим для рівномірного формування шару осаду на поверхні барабана. Нестабільний рівень суспензії може призводити до нерівномірної фільтрації, погіршення якості зневоднення та зниження продуктивності системи.



Рисунок 4.4 - Ультразвуковий рівнемір Siemens SITRANS Probe LU

Основними перевагами ультразвукових рівнемірів Siemens SITRANS Probe LU є:

- безконтактний принцип вимірювання;
- висока точність контролю рівня;
- стійкість до агресивних та забруднених середовищ;
- наявність аналогового виходу 4–20 мА;
- можливість інтеграції з PLC та SCADA-системами;
- простота монтажу та налаштування;
- висока надійність у промислових умовах.

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У системі автоматичного керування рівнемір виконуватиме такі функції:

- безперервне вимірювання рівня суспензії;
- передача сигналу на контролер Siemens SIMATIC S7-1200;
- забезпечення стабільної подачі суспензії;
- запобігання переповненню або надмірному зниженню рівня;
- підвищення стабільності процесу фільтрації.

Для підключення до системи автоматизації рекомендується використовувати аналоговий інтерфейс 4–20 мА або цифровий протокол HART, що забезпечує високу точність і завадостійкість передачі сигналу.

Контроль температури суспензії є важливим елементом процесу фільтрації мідного концентрату, оскільки температура безпосередньо впливає на в'язкість рідкої фази та швидкість проходження рідини через фільтрувальну тканину. При зміні температури можуть погіршуватися умови фільтрації, збільшуватися час зневоднення осаду та знижуватися продуктивність вакуум-фільтра.

Для контролю температури суспензії рекомендується застосувати термодетектор опору типу Pt100 у поєднанні з нормувальним перетворювачем сигналу Siemens SITRANS TH100. Дана комбінація дозволяє забезпечити точне вимірювання температури та надійну передачу сигналу до системи автоматичного керування.



Рисунок 4.5 - Нормувальний перетворювач сигналу Siemens SITRANS TH100

Контроль температури суспензії є важливим елементом процесу фільтрації мідного концентрату, оскільки температура безпосередньо впливає на в'язкість рідкої фази та швидкість проходження рідини через фільтрувальну тканину. При зміні температури можуть погіршуватися умови фільтрації, збільшуватися час зневоднення осаду та знижуватися продуктивність вакуум-фільтра.

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

Термоперетворювачі Pt100 характеризуються:

- високою точністю вимірювання;
- стабільністю характеристик;
- широким діапазоном робочих температур;
- високою надійністю у промислових умовах;
- сумісністю з промисловими системами автоматизації.

Нормувальні перетворювачі Siemens SITRANS TH100 та Phoenix Contact MINI MCR виконують перетворення сигналу термодатчика у стандартний аналоговий сигнал 4–20 мА для подальшої передачі на PLC-контролер Siemens SIMATIC S7-1200.

У системі автоматичного керування температурний канал виконуватиме такі функції:

- безперервне вимірювання температури суспензії;
- передача сигналу на контролер;
- компенсація впливу температурних коливань;
- підвищення стабільності процесу фільтрації;
- формування аварійних сигналів при перевищенні допустимих температурних меж.

Як виконавчий механізм системи регулювання вакууму доцільно використати електропневматичний регулюючий клапан Samson Type 3241. Дані пристрої забезпечують плавне та точне регулювання витрати повітря у вакуумній системі барабанного вакуум-фільтра.



Рисунок 4.6 - Електропневматичний регулюючий клапан Samson Type 3241

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

Використання електропневматичних клапанів дозволяє автоматично змінювати ступінь відкриття регулюючого органу залежно від сигналу, що надходить від PLC-контролера Siemens SIMATIC S7-1200. Це забезпечує стабільне підтримання необхідного рівня вакууму та підвищує ефективність процесу фільтрації мідного концентрату.

Основними перевагами клапанів Samson Type 3241 та Festo VPPM є:

- висока точність регулювання;
- плавна зміна витрати повітря;
- швидка реакція на зміну керуючого сигналу;
- підтримка аналогового сигналу 4–20 мА;
- надійність у промислових умовах;
- сумісність із системами автоматичного керування;
- низький рівень зносу при тривалій експлуатації.

Клапан у системі автоматизації виконуватиме такі функції:

- регулювання рівня вакууму у барабанному вакуум-фільтрі;
- стабілізація процесу фільтрації;
- компенсація зовнішніх збурень;
- підтримання необхідної витрати повітря;
- підвищення точності роботи PID-регулятора.

Клапан Samson Type 3241 доцільно використовувати у системах із безперервним технологічним процесом та підвищеними вимогами до надійності. У свою чергу Festo VPPM є компактним пропорційним регулятором тиску, який добре підходить для швидкодіючих систем автоматичного керування.

Для диспетчерського контролю та візуалізації параметрів процесу рекомендується використовувати операторську панель Siemens KTP700 Basic виробництва компанії Siemens. Дана НМІ-панель призначена для відображення технологічних параметрів, керування обладнанням та взаємодії оператора із системою автоматичного керування.

Використання операторської панелі дозволить забезпечити візуальний контроль процесу фільтрації мідного концентрату у режимі реального часу. На екрані панелі можуть відображатися значення вакууму, рівня суспензії, температури, швидкості обертання барабана, стан виконавчих механізмів та аварійні повідомлення.

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 4.7 - Операторська панель Siemens KTP700 Basic

Основними перевагами панелі Siemens KTP700 Basic є:

- кольоровий сенсорний дисплей;
- підтримка графічної візуалізації технологічного процесу;
- інтеграція з PLC-контролерами Siemens SIMATIC S7-1200;
- підтримка протоколу Profinet;
- можливість архівування та відображення аварій;
- зручне налаштування у середовищі TIA Portal;
- висока надійність у промислових умовах.

У системі автоматичного керування барабанним вакуум-фільтром операторська панель виконуватиме такі функції:

- візуалізація технологічних параметрів;
- відображення стану обладнання;
- введення уставок регулятора;
- сигналізація аварійних режимів;
- ручне та автоматичне керування процесом;
- діагностика роботи системи.

Застосування НМІ-панелі дозволить значно підвищити зручність експлуатації системи автоматизації, зменшити вплив людського фактора та забезпечити оперативний контроль роботи технологічного обладнання.

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4.2 Розробка функціональної схеми автоматизації

Основою для розроблення функціональної схеми є аналіз технологічного процесу роботи барабанного вакуум-фільтра та визначення основних параметрів, які потребують автоматичного контролю й регулювання.

На першому етапі виконується аналіз технологічного процесу фільтрації мідного концентрату та визначається основне технологічне обладнання системи. До складу технологічного об'єкта включаються барабанний вакуум-фільтр, вакуумний насос, система подачі суспензії, трубопроводи вакуумної системи та електропривід обертання барабана. Одночасно визначаються основні технологічні параметри, які підлягають контролю та регулюванню, а саме рівень вакууму, рівень суспензії, температура суспензії та швидкість обертання барабана.

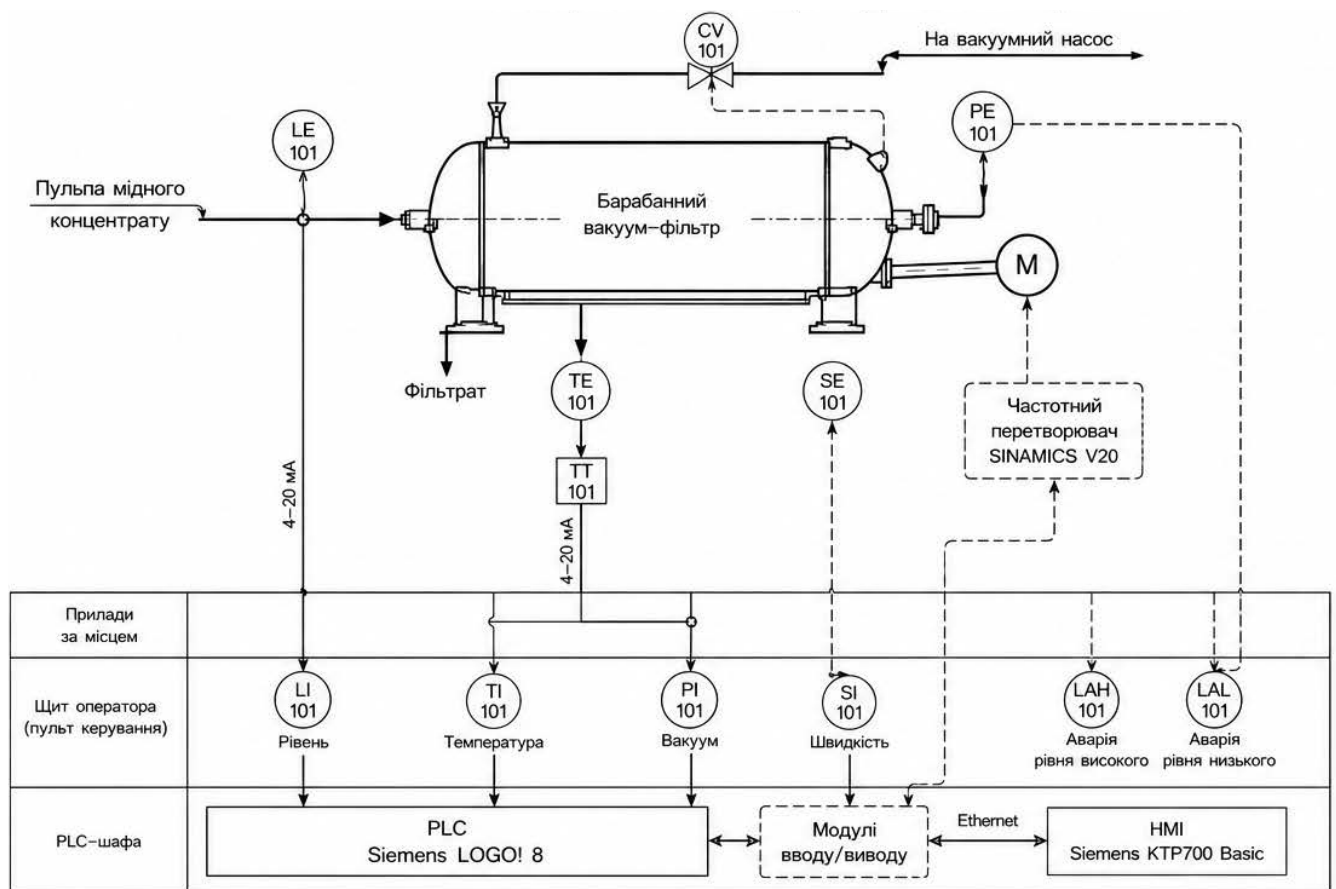


Рисунок 4.8 - Функціональна схема САК

На другому етапі визначаються функціональні задачі автоматизації технологічного процесу. Для системи автоматичного керування передбачається автоматичне регулювання вакууму, контроль рівня суспензії, контроль температури, керування швидкістю обертання барабана, аварійна сигналізація та диспетчерський контроль параметрів процесу. Відповідно до вимог функціональної схеми для кожного технологічного параметра формуються

контури вимірювання, регулювання та сигналізації.

На третьому етапі виконується вибір технічних засобів автоматизації та визначаються місця їх встановлення. Для вимірювання рівня суспензії використовується ультразвуковий рівнемір LE-101, для контролю температури — термометр опору Pt100 TE-101 із нормувальним перетворювачем TT-101, а для контролю вакууму — датчик розрідження PE-101. Як виконавчий механізм системи регулювання вакууму застосовується електропневматичний клапан CV-101. Для керування швидкістю обертання барабана використовується частотний перетворювач Siemens SINAMICS V20 та електропривід барабана. Центром системи автоматизації виступає PLC-контролер Siemens LOGO! 8, а для диспетчерського контролю застосовується HMI-панель Siemens KTP700 Basic. На четвертому етапі виконується побудова структури функціональної схеми відповідно до вимог нормативних документів. Технологічне обладнання розташовується у верхній частині креслення, а засоби автоматизації — відповідно до їх фізичного розміщення: за місцем, на щиті оператора та у PLC-шафі. Для кожного приладу використовуються стандартні умовні графічні позначення згідно вимог функціональних схем автоматизації. На схемі також відображаються лінії зв'язку між елементами системи: аналогові сигнали 4–20 мА, дискретні сигнали, цифрові Ethernet-з'єднання та силові лінії живлення.

На п'ятому етапі реалізуються контури автоматичного регулювання та контролю. Для контуру регулювання вакууму формується замкнена система керування, у якій сигнал від датчика вакууму PE-101 надходить до PLC-контролера, де обробляється PID-регулятором, після чого формується керуючий сигнал на електропневматичний клапан CV-101. Аналогічно реалізуються контури контролю температури, рівня суспензії та швидкості обертання барабана. Для аварійних ситуацій передбачається сигналізація високого та низького рівня суспензії, а також контроль перевищення температурних меж.

На завершальному етапі до функціональної схеми додаються допоміжні таблиці та пояснювальні елементи відповідно до вимог технічної документації. На кресленні розміщуються перелік функцій автоматизації, таблиця умовних позначень ліній зв'язку, перелік приладів та засобів автоматизації, а також інформація про розміщення приладів у системі. Побудована функціональна схема забезпечує повне відображення структури системи автоматичного керування процесом фільтрації мідного концентрату та відповідає вимогам до оформлення проектною документації систем автоматизації.

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4.3 Розробка програмного забезпечення для PLC

Для реалізації логічного управління барабанним вакуум-фільтром на основі проведеного порівняльного аналізу сучасних засобів автоматизації було обрано програмний комплекс Siemens LOGO! Soft Comfort, який забезпечує можливість створення надійних та ефективних алгоритмів керування технологічними процесами.

Використання даного програмного середовища обумовлено його функціональністю, простотою програмування, наявністю засобів візуального проектування та достатніми можливостями для реалізації локальної системи автоматизації барабанного вакуум-фільтра.

Вартість програмного забезпечення для контролера Siemens LOGO! є відносно невисокою у порівнянні з професійними PLC-платформами серії SIMATIC S7.

Для програмування контролера використовується середовище LOGO! Soft Comfort, яке постачається у вигляді однокористувацької ліцензії.

Станом на 2026 рік середня вартість ліцензії LOGO! Soft Comfort V8 становить приблизно 50–80 євро залежно від постачальника та типу поставки. Окремі офіційні дистриб'ютори пропонують програмне забезпечення за ціною близько 150–180 євро, що зазвичай включає розширену підтримку або комерційні умови постачання.

Перевагою LOGO! Soft Comfort є наявність демонстраційної версії, яка дозволяє створювати та тестувати програми без придбання повної ліцензії, однак без можливості завантаження програми у фізичний контролер.

В основу реалізації системи покладено розроблений алгоритм логічного управління, який забезпечує автоматизацію основних режимів роботи фільтра, контроль технологічних параметрів, координацію роботи виконавчих механізмів та захист обладнання від аварійних ситуацій.

Алгоритм передбачає керування приводом обертання барабана, вакуумною системою, насосним обладнанням, а також обробку сигналів від технологічних давачів і контроль стану системи в режимі реального часу.

Для системи автоматичного керування процесом фільтрації мідного концентрату на базі Siemens LOGO! 8 доцільно використовувати програмне середовище LOGO! Soft Comfort виробництва компанії Siemens.

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Дане програмне забезпечення призначене для розроблення, налаштування, моделювання та тестування програм керування для контролерів серії Siemens LOGO!

Середовище LOGO! Soft Comfort дозволяє створювати алгоритми автоматичного керування у вигляді функціональних блокових схем (FBD) або релейно-контактних схем (LAD), що значно спрощує процес програмування та налагодження систем автоматизації.

У системі керування процесом фільтрації мідного концентрату програмне середовище LOGO! Soft Comfort використовуватиметься для:

- створення алгоритму автоматичного регулювання вакууму;
- програмування логіки роботи вакуумного насоса;
- реалізації PID-регулювання;
- обробки сигналів від датчиків рівня, температури та вакууму;
- налаштування аварійної сигналізації;
- моделювання та тестування роботи системи;
- діагностики стану входів та виходів контролера.

Основними перевагами середовища LOGO! Soft Comfort є:

- зручний графічний інтерфейс;
- підтримка мов програмування FBD та LAD;
- можливість онлайн-моніторингу роботи системи;
- вбудований режим симуляції;
- швидке налаштування параметрів;
- інтеграція з HMI-панелями та PLC Siemens;
- простота обслуговування та модернізації системи.

У середовищі LOGO! Soft Comfort можуть бути реалізовані:

- автоматичне підтримання заданого рівня вакууму;
- контроль температури суспензії;
- регулювання швидкості обертання барабана;
- аварійне відключення обладнання;
- диспетчерський контроль технологічного процесу.

Для моделювання роботи системи програмне забезпечення містить вбудований симулятор, який дозволяє перевірити правильність роботи алгоритму без підключення реального обладнання.

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Це значно спрощує процес налагодження системи автоматичного керування та зменшує ймовірність помилок під час запуску.

На початковому етапі виконується створення нового проекту та вибір типу контролера Siemens LOGO! 8. У програмі задається конфігурація обладнання, визначаються дискретні та аналогові входи/виходи контролера, а також параметри мережевого підключення.

На цьому етапі також виконується:

- 1) вибір мови програмування (FBD або LAD);
- 2) налаштування адрес входів та виходів;
- 3) створення структури майбутньої системи керування.

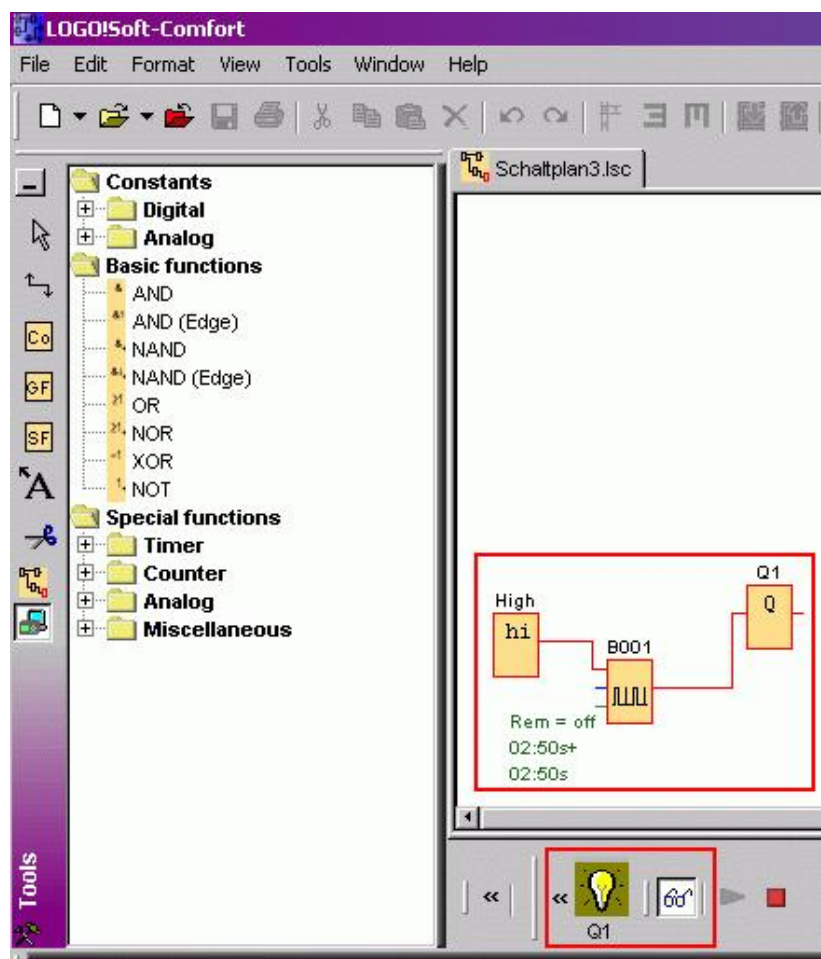


Рисунок 4.9 - Головне вікно середовища LOGO! Soft Comfort

Далі створюється функціональна схема автоматичного керування технологічним процесом. У середовищі LOGO! Soft Comfort використовуються функціональні блоки, які з'єднуються між собою логічними зв'язками.

На даному етапі реалізуються: обробка сигналів від датчиків вакууму, температури та рівня; алгоритм PID-регулювання; керування вакуумним насосом; керування електропневматичним клапаном; формування аварійної сигналізації; автоматичний та ручний режими роботи.

Для побудови схеми використовуються: логічні елементи AND, OR, NOT; таймери; тригери; аналогові блоки; PID-блоки; блоки порівняння та математичної обробки сигналів.

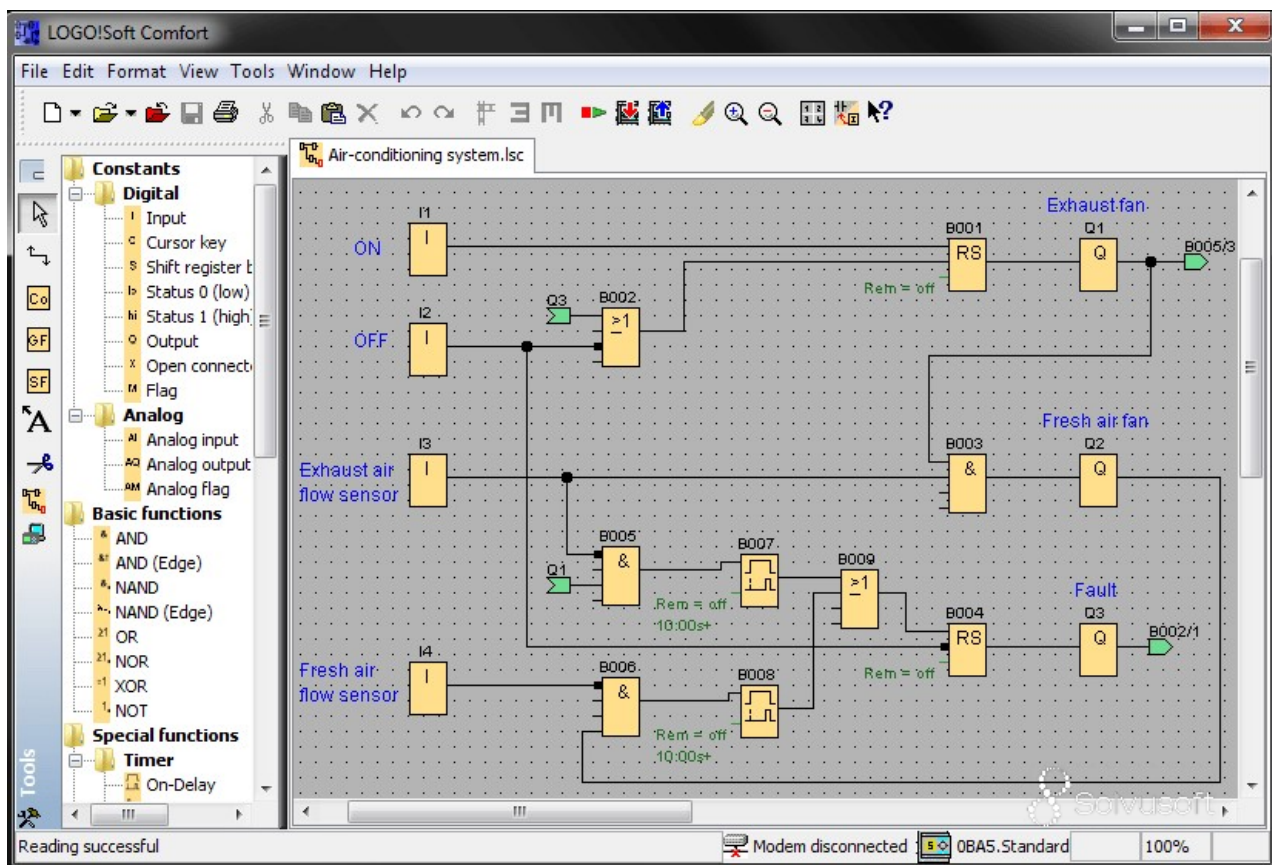


Рисунок 4.10 - Вікно побудови функціональної схеми керування

Після побудови функціональної схеми виконується налаштування параметрів усіх блоків системи.

На цьому етапі задаються: уставки PID-регулятора; межі допустимих значень температури; рівні аварійної сигналізації; часові затримки; коефіцієнти масштабування аналогових сигналів; режими роботи виконавчих механізмів. Також виконується прив'язка фізичних входів і виходів PLC до відповідних елементів схеми.

Після налаштування програми запускається режим симуляції. Вбудований симулятор LOGO! Soft Comfort дозволяє перевірити правильність роботи алгоритму без підключення реального обладнання. У режимі тестування перевіряється: реакція системи на зміну рівня вакууму; робота PID-регулятора; спрацювання аварійної сигналізації; логіка запуску та зупинки системи; коректність роботи датчиків та виконавчих механізмів. Симуляція дозволяє виявити помилки програми ще до завантаження у контролер.

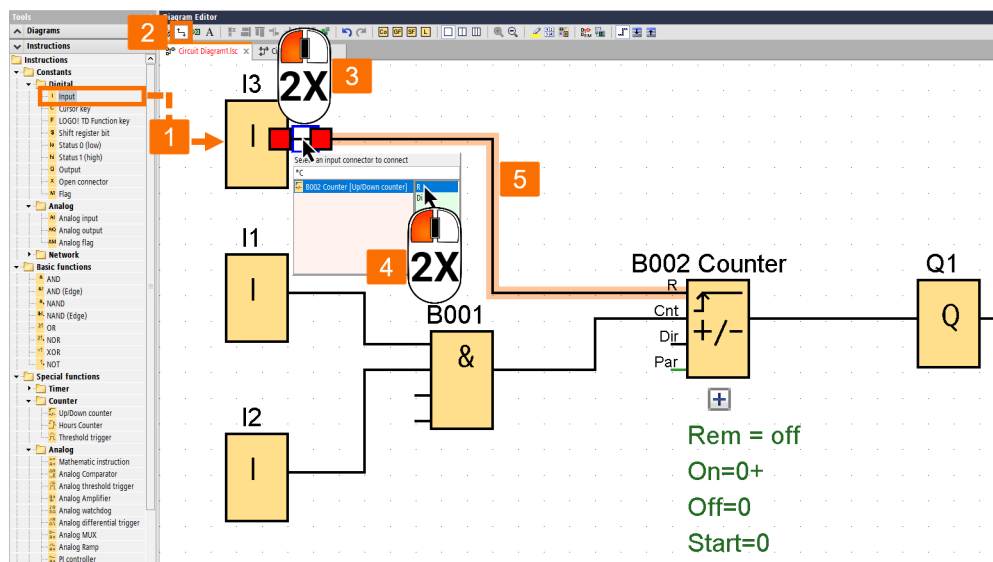


Рисунок 4.11 - Алгоритм роботи системи автоматичного керування процесом фільтрації

Після запуску системи виконується онлайн-моніторинг роботи програми. LOGO! Soft Comfort дозволяє у режимі реального часу контролювати стан входів, виходів та внутрішніх змінних контролера. У процесі налагодження здійснюється: перевірка роботи датчиків; контроль сигналів керування; коригування параметрів PID-регулятора; оптимізація алгоритму керування; аналіз аварійних ситуацій.

Центральна частина інтерфейсу є основним вікном візуалізації технологічного процесу фільтрації мідного концентрату. У цьому вікні відображено барабанный вакуум-фільтр, вакуумний насос, регулюючий клапан та основні елементи вакуумної системи. У режимі реального часу відображаються основні технологічні параметри процесу, серед яких рівень суспензії, рівень вакууму, температура суспензії, швидкість обертання барабана та ступінь відкриття вакуумного клапана. Також показується поточний режим роботи системи, який у даному випадку встановлено як автоматичний режим керування.

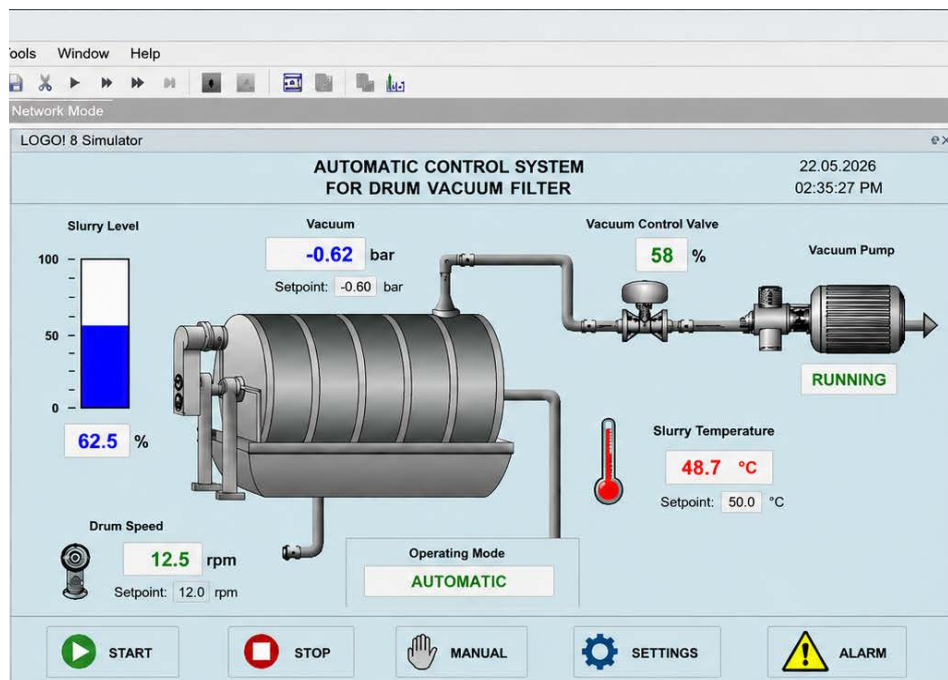


Рисунок 4.12 - Центральна частина інтерфейсу візуалізації технологічного процесу фільтрації мідного концентрату

На екрані відображається, що вакуумний насос перебуває у стані RUNNING, а система підтримує заданий рівень вакууму -0.60 bar за допомогою PID-регулятора.

Значення параметрів постійно оновлюються відповідно до роботи системи автоматичного керування.

У нижній центральній частині інтерфейсу розташована панель керування системою, яка містить кнопки запуску та зупинки процесу, перемикач ручного режиму, налаштування параметрів системи та перегляду аварійних повідомлень. За допомогою цієї панелі оператор може запускати або зупиняти систему фільтрації, переходити між ручним та автоматичним режимами роботи, змінювати уставки регулятора та контролювати аварійні ситуації.

У нижній центральній частині інтерфейсу розташована панель керування системою, яка містить кнопки запуску та зупинки процесу, перемикач ручного режиму, налаштування параметрів системи та перегляду аварійних повідомлень. За допомогою цієї панелі оператор може запускати або зупиняти систему фільтрації, переходити між ручним та автоматичним режимами роботи, змінювати уставки регулятора та контролювати аварійні ситуації.

У представленій ситуації система зафіксувала попередження про підвищену температуру суспензії, зміну уставки вакууму та запуск автоматичного режиму роботи. Журнал подій використовується для архівування інформації про роботу системи, аналізу аварійних ситуацій та діагностики несправностей.

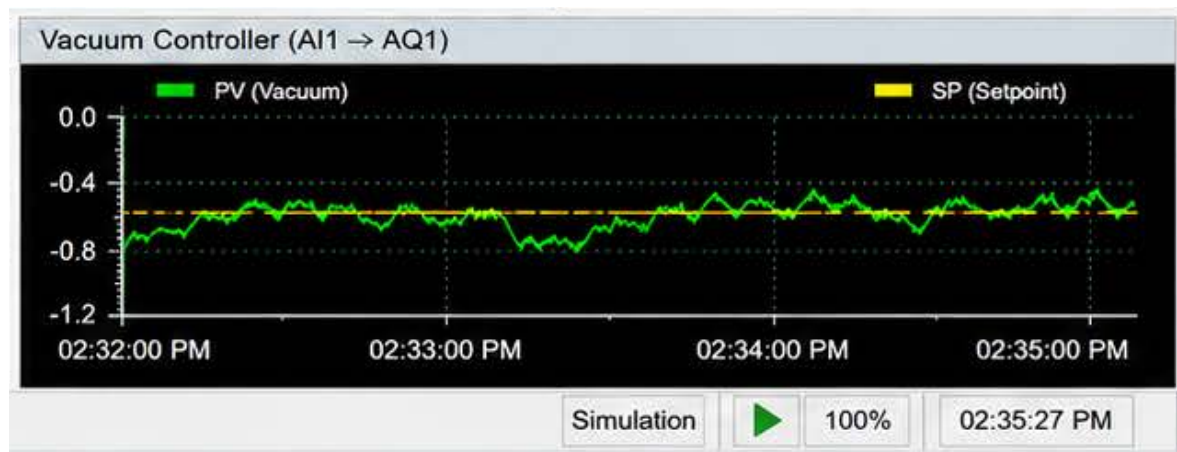


Рисунок 4.15 - Графік роботи PID-регулятора вакууму

У правому нижньому куті інтерфейсу розташовано графік роботи PID-регулятора вакууму. На графіку відображаються поточне значення вакууму та задана уставка регулятора. Даний графік демонструє реакцію системи на зміну параметрів та дозволяє оцінити стабільність роботи PID-регулятора, наявність коливань або перерегулювання. У представленому режимі видно, що система автоматичного керування стабільно підтримує рівень вакууму поблизу заданого значення з незначними коливаннями.

У нижньому лівому куті екрана розташоване інформаційне вікно контролера Siemens LOGO! 8, у якому відображаються технічні параметри PLC-контролера, IP-адреса, режим роботи, час циклу програми та рівень використання пам'яті. Це вікно використовується для контролю стану контролера, перевірки мережевого підключення та оцінювання навантаження системи автоматичного керування.

Таким чином, представлений інтерфейс забезпечує повноцінний диспетчерський контроль процесу фільтрації мідного концентрату, дозволяє оператору здійснювати моніторинг технологічних параметрів, керувати обладнанням у режимі реального часу та оперативно реагувати на виникнення аварійних ситуацій.

Висновки до розділу

У четвертому розділі бакалаврської роботи виконано вибір та обґрунтування сучасних технічних засобів автоматизації для системи керування процесом фільтрації суспензії мідного концентрату. Проведено аналіз вимог до вимірювальних приладів, виконавчих механізмів та засобів диспетчерського контролю, необхідних для забезпечення стабільної та ефективної роботи барабанного вакуум-фільтра.

У межах розділу обґрунтовано використання термоперетворювачів опору типу для контролю температури суспензії. Розглянуто основні характеристики датчиків температури, зокрема високу точність вимірювання, стабільність параметрів, широкий діапазон робочих температур та сумісність із промисловими системами автоматизації.

Також запропоновано використання електропневматичного регулюючого клапана Samson Type 3241. Розглянуто принцип його роботи та основні переваги, серед яких висока точність регулювання, плавна зміна витрати повітря, швидка реакція на зміну керуючого сигналу та сумісність із PLC-контролерами. Визначено основні функції клапана у системі автоматизації, а саме регулювання рівня вакууму, стабілізацію процесу фільтрації, компенсацію зовнішніх збурень та підвищення точності роботи PID-регулятора.

Крім того, у розділі виконано розроблення функціональної схеми автоматизації процесу фільтрації мідного концентрату відповідно до вимог нормативно-технічної документації. Визначено основні контури автоматичного регулювання, контролю та аварійної сигналізації. На функціональній схемі відображено технологічне обладнання, засоби автоматизації, PLC-контролер, НМІ-панель, виконавчі механізми та лінії зв'язку між елементами системи. Також описано основні етапи побудови функціональної схеми автоматизації та принципи розміщення приладів за місцем, на щиті оператора та у PLC-шафі.

Виконано розроблення програмного забезпечення системи автоматичного керування процесом фільтрації мідного концентрату на базі контролера Siemens LOGO! 8 із використанням програмного середовища LOGO! Soft Comfort.

У режимі тестування перевірено реакцію системи на зміну рівня вакууму, роботу PID-регулятора, спрацювання аварійної сигналізації та коректність функціонування датчиків і виконавчих механізмів.

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
						65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У бакалаврській роботі виконано аналіз технологічного процесу фільтрації суспензії мідного концентрату як об'єкта автоматичного керування та досліджено особливості роботи барабанного вакуум-фільтра. Розглянуто основні етапи процесу фільтрації, принцип дії вакуумної системи, процес утворення та зневоднення осаду, а також визначено основні технологічні параметри, що впливають на ефективність роботи системи. Проаналізовано основні збурення процесу, серед яких зміна властивостей суспензії, коливання рівня вакууму, температурні зміни, нерівномірна подача суспензії та зношування фільтрувальної тканини. Для кожного збурення визначено можливі наслідки та способи компенсації засобами автоматичного керування.

У роботі виконано обґрунтування вибору методів розв'язання поставлених завдань та визначено основні підходи до побудови автоматизованої системи керування процесом фільтрації мідного концентрату. Для дослідження динамічних властивостей системи використано методи математичного моделювання, теорії автоматичного керування та комп'ютерного аналізу динамічних систем. Обґрунтовано доцільність використання PID-регулятора як основного засобу підвищення ефективності системи автоматичного регулювання. Також розглянуто методи синтезу параметрів PID-регулятора, зокрема метод Циглера–Нікольса, метод Чина–Хронеса–Ресвіка та автоматичне налаштування Auto-tune у середовищі Matlab Simulink.

У процесі виконання роботи побудовано математичну модель системи автоматичного регулювання вакууму барабанного вакуум-фільтра та визначено передавальні функції основних елементів системи, зокрема виконавчого механізму, регулюючого органу та об'єкта керування. Проведено ідентифікацію об'єкта автоматизації за допомогою пакета System Identification Toolbox у середовищі Matlab Simulink та отримано математичну модель системи з високим рівнем адекватності. На основі побудованої моделі виконано аналіз стійкості розімкнутої та замкнутої систем автоматичного регулювання за першим методом Ляпунова. Досліджено перехідні процеси системи без регулятора та визначено основні показники якості, зокрема час регулювання, перерегулювання, усталену похибку та запаси стійкості системи.

У роботі виконано синтез PID-регуляторів різними методами налаштування та проведено порівняльний аналіз їх ефективності.

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
						66
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для системи автоматичного регулювання вакууму здійснено синтез PID-регулятора методом Циглера–Нікольса, методом Чина–Хронеса–Ресвіка та методом автоматичного налаштування Auto-tune. За результатами моделювання визначено основні показники якості перехідних процесів для кожного способу налаштування регулятора. Проведений аналіз показав, що використання PID-регулятора дозволяє суттєво підвищити точність та швидкодію системи автоматичного керування, зменшити усталену похибку та забезпечити стабільність процесу фільтрації суспензії мідного концентрату.

Крім того, у бакалаврській роботі виконано вибір сучасних технічних засобів автоматизації для реалізації системи керування процесом фільтрації мідного концентрату. Для побудови системи автоматизації обрано PLC-контролер Siemens LOGO! 8, частотний перетворювач Siemens SINAMICS V20, операторську панель Siemens KTP700 Basic, датчики вакууму, температури та рівня, а також електропневматичний регулюючий клапан Samson Type 3241. Розроблено функціональну схему автоматизації процесу фільтрації мідного концентрату відповідно до вимог нормативної документації та стандартів оформлення технічних креслень. На схемі відображено основні контури автоматичного регулювання, засоби вимірювання, виконавчі механізми, PLC-контролер та НМІ-панель оператора.

Також у роботі розроблено алгоритм логічного керування технологічним процесом та реалізовано структуру системи диспетчерського контролю й візуалізації параметрів процесу фільтрації. Для програмної реалізації системи використано середовище LOGO! Soft Comfort, у якому створено алгоритми автоматичного керування, аварійної сигналізації та контролю технологічних параметрів у режимі реального часу. Результати виконаної роботи підтверджують доцільність застосування сучасних засобів автоматизації та PID-регулювання для підвищення ефективності процесу фільтрації мідного концентрату в умовах промислового виробництва.

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
						67
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

1. Ладанюк А. П., Власенко Л. О., Кишенько В. Д. Теорія автоматичного керування технологічними процесами : навчальний посібник. Київ : Ліра-К, 2018. 288 с.
2. Кузьо І. В., Сорока Б. С. Системи автоматизації технологічних процесів : навчальний посібник. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2019. 240 с.
3. Бойко О. В., Барабаш В. М. Моделювання та оптимізація систем автоматичного керування. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 276 с.
4. Гаврилук М. І., Кравець О. П. Основи автоматизації технологічних процесів. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2020. 198 с.
5. Федорчук В. А., Романюк О. Н. Мікропроцесорні засоби автоматизації та керування. Вінниця : ВНТУ, 2021. 310 с.
6. Бендзик М. П., Козак Л. В. Проєктування систем автоматизації технологічних процесів. Тернопіль : ТНТУ ім. І. Пулюя, 2022. 264 с.
7. Савчук О. В., Гнатюк Я. І. SCADA-системи та промислові мережі в автоматизації виробництва. Львів : Новий Світ-2000, 2023. 248 с.
8. Михалевич В. М., Климюк О. П. Програмовані логічні контролери в системах автоматизації. Житомир : Державний університет «Житомирська політехніка», 2021. 232 с.
9. Петренко І. М., Бондаренко Р. С. Технічні засоби автоматизації технологічних процесів. Дніпро : НТУ «Дніпровська політехніка», 2020. 290 с.
10. Коваленко О. С., Ярошенко В. В. Системи автоматичного регулювання та керування. Київ : НУХТ, 2019. 312 с.

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
						68
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		