

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Факультет інформаційних технологій
Кафедра автоматизації, комп'ютерних наук і технологій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти – бакалавр
за освітньо-професійною програмою
«Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

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

тема роботи:

***«Автоматизація системи аспірації аглофабрики з
використанням технологій промислового Інтернету речей»***

Виконав студент гр. АКІТ-23ск	_____	Рябко О. О.
Керівник	_____	Жосан А. А.
Нормоконтроль	_____	Маринич І. А.
Завідувач кафедри	_____	Рубан С. А.

КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет: інформаційних технологій

Кафедра: автоматизації, комп'ютерних наук і технологій

Ступінь вищої освіти: Бакалавр

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедрою: к.т.н. Рубан С.А.

« 29 » січня 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу бакалавра

студентові групи АКІТР-23ск Рябко Олександр Олександровичу

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Автоматизація системи аспірації
аглофабрики з використанням технологій промислового Інтернету речей»

затверджено наказом по університету № 172с від 30.03.2026 р.

2. Термін здачі кваліфікаційної роботи: 10.06.2026 р.

3. Склад кваліфікаційної роботи: Пояснювальна записка обсягом 117 с.,
презентація у Microsoft PowerPoint (14 слайдів) в електронному та
друкованому вигляді

4. Консультанти кваліфікаційної роботи:

Розділ 1-2

доц. Жосан А. А.

Нормоконтроль

доц. Маринич І. А.

5. Календарний план:

№	Етапи роботи	Термін виконання
1	<i>Вступ</i>	<i>01.03.26</i>
2	<i>Розділ 1</i>	<i>05.04.26</i>
3	<i>Розділ 2</i>	<i>01.05.26</i>
4	<i>Висновки</i>	<i>25.05.26</i>
5	<i>Оформлення кваліфікаційної роботи</i>	<i>28.05.26</i>
6	<i>Підготовка презентації та графічного матеріалу</i>	<i>20.05.26</i>
7	<i>Підготовка доповіді до захисту</i>	<i>05.06.25</i>

6. Дата видачі завдання: 29.01.2026 р.

Керівник _____ / Жосан А. А./

7. **Запевнення:** Я, Рябко Олександр Олександрович, запевняю, що ця кваліфікаційна робота виконана самостійно, не містить академічного плагіату, фабрикації, фальсифікації. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Із чинним Положенням про академічну доброчесність Криворізького національного університету ознайомлений.

Чітко усвідомлюю, що в разі виявлення у кваліфікаційній роботі умисних порушень робота не допускається до захисту або оцінюється незадовільно.

Студент _____ / Рябко О. О./

АНОТАЦІЯ

Рябко О. О. Автоматизація системи аспірації аглофабрики з використанням технологій промислового Інтернету речей: кваліфікаційна робота бакалавра : 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка. Кривий Ріг. Криворізький національний університет, 2026. 117 с.

У роботі розглянуто систему аспірації аглофабрики як об'єкт автоматизації, що забезпечує формування розрідження, видалення запиленних газів і контроль екологічних параметрів.

Метою роботи є розроблення системи автоматизації аспірації з використанням технологій промислового Інтернету речей.

У першому розділі проаналізовано технологічний процес агломерації, склад і параметри аспіраційної системи, збурення, режими роботи, існуючі підходи до автоматизації та теоретичну базу керування.

У другому розділі сформовано вимоги до системи, розроблено архітектуру на базі PLCnext, Node-RED, MQTT, ThingsBoard та InfluxDB, побудовано FOPDT-моделі, синтезовано ПІД-регулятори методом ІМС, реалізовано логіку Override Control і gain scheduling, виконано імітаційне моделювання та описано ІоТ-рівень. Результати моделювання підтвердили правильність розрахунку контурів і доцільність обраних алгоритмів у промислових умовах експлуатації. Практична цінність полягає у можливості використання запропонованих рішень для модернізації аспіраційних систем, підвищення стабільності керування, екологічного контролю, енергоефективності та діагностики обладнання.

АВТОМАТИЗАЦІЯ, СИСТЕМА АСПІРАЦІЇ, АГЛОФАБРИКА, ПРОМИСЛОВИЙ ІНТЕРНЕТ РЕЧЕЙ, PLCNEXT, ПЛК, NODE-RED, OPC UA, MQTT, ПІД-РЕГУЛЯТОР, ІМС, OVERRIDE CONTROL

					КНУ КРБ.174.26.10.00.ПЗ					
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	АНОТАЦІЯ			Літ.	Арк.	Аркушів
Розроб.		Рябко О.О.								
Перевір.		Жосан А.А.							3	1
								КНУ АКІТР-23ск		
Н. Контр.		Маринич І.А.								
Затверд.		Маринич І.А.								

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ АСПІРАЦІЇ НА АГЛОФАБРИЦІ ТА ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ	9
1.1 Технологічний процес агломерації та роль системи аспірації.....	9
1.2 Технологічний процес агломерації та роль системи аспірації.....	13
1.3 Технологічний процес агломерації та роль системи аспірації.....	21
1.4 Аналіз існуючих підходів до автоматизації аспіраційних і газоочисних систем	30
1.5 Теоретична база автоматизації системи аспірації	37
1.6 Постановка задачі автоматизації	44
РОЗДІЛ 2 ПРОЄКТУВАННЯ ТА АПРОБАЦІЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ АСПІРАЦІЇ АГЛОФАБРИКИ	53
2.1 Вимоги до системи автоматизації	53
2.2 Загальна архітектура системи автоматизації	56
2.3 Математичне моделювання контурів керування системи автоматизації процесу аспірації	62
2.5 Синтез алгоритмів автоматичного керування системи автоматизації процесу аспірації	68
2.6 Реалізація пріоритетного керування та зміни коефіцієнту підсилення	74
2.7 Імітаційне моделювання та оцінка якості керування.....	83
2.8 Практична реалізація системи на PLCnext та IoT-рівні.....	91
2.9 Рівень аналітики ERS E2 та прогнозного обслуговування.....	103
Висновки до розділу:	106
ВИСНОВКИ	109
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	112

					КНУ КРБ.174.26.10.00.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		5

ВСТУП

Агломераційне виробництво є одним із ключових етапів підготовки залізорудної сировини до доменної плавки. У процесі агломерації подрібнена залізорудна сировина, флюси, паливо та зворотні матеріали спікаються у пористий кусковий продукт — агломерат, який використовується як основний компонент доменної шихти. Стабільність цього процесу значною мірою залежить від ефективної роботи системи аспірації, яка забезпечує відсмоктування газів із зони спікання, створення необхідного розрідження під шаром шихти, очищення відхідних газів від пилу та підтримання безпечних умов експлуатації технологічного обладнання.

Система аспірації аглофабрики є складним технологічним об'єктом, робота якого одночасно пов'язана з технологічними, екологічними та енергетичними аспектами виробництва. З технологічної точки зору вона впливає на газопроникність шару шихти, інтенсивність горіння палива, тепловий режим спікання та якість готового агломерату. З екологічної точки зору система аспірації забезпечує зниження концентрації пилу та інших забруднювальних речовин у відхідних газах до допустимих нормативних значень. З енергетичної точки зору значна потужність тягодутьових вентиляторів обумовлює необхідність раціонального керування їх продуктивністю, зокрема за рахунок застосування частотно-регульованих приводів.

Актуальність автоматизації систем аспірації аглофабрик зумовлена посиленням вимог до екологічної безпеки промислового виробництва, необхідністю зменшення пилових викидів, підвищення енергоефективності та забезпечення надійної роботи газоочисного обладнання.

					КНУ КРБ.174.26.10.00.ПЗ				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ВСТУП				
Розроб.		Рябко О.О.							
Перевір.		Жосан А.А.							
Н. Контр.		Маринич І.А.							
Затверд.		Маринич І.А.			КНУ АКІТР-23ск				

Традиційні підходи до автоматизації таких систем здебільшого орієнтовані на локальне регулювання окремих параметрів, зокрема розрідження або перепаду тиску на фільтрах. Водночас сучасні умови експлуатації потребують комплексного підходу, який поєднує автоматичне керування, моніторинг стану обладнання, накопичення технологічних даних, візуалізацію параметрів у реальному часі та аналітичну обробку інформації.

Особливістю системи аспірації аглофабрики як об'єкта автоматизації є наявність декількох взаємопов'язаних контурів керування та обмежень. Основними регульованими параметрами є розрідження під шаром шихти, перепад тиску на фільтрах, температура газів, концентрація пилу у відхідних газах та продуктивність вентилятора. При цьому система працює під впливом змінних збурень, зокрема коливань продуктивності агломашини, вологості та гранулометричного складу шихти, стану фільтрувальних елементів, температури газів та зовнішніх умов. Це потребує застосування не лише класичних регуляторів, а й логіки пріоритетного керування, яка забезпечує дотримання технологічних та екологічних обмежень.

Метою бакалаврської роботи є розроблення автоматизованої системи керування аспірацією аглофабрики з використанням технологій промислового Інтернету речей, яка забезпечує стабілізацію основних технологічних параметрів, контроль екологічних обмежень, моніторинг стану обладнання та інформаційну підтримку експлуатаційного персоналу.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі завдання:

- проаналізувати технологічний процес аспірації аглофабрики та визначити роль системи аспірації у забезпеченні стабільної роботи агломераційного виробництва;
- охарактеризувати систему аспірації як об'єкт автоматизації, визначити основні регульовані параметри, керуючі впливи, збурення та обмеження;
- виконати аналіз існуючих підходів до автоматизації аспіраційних і газоочисних систем промислових підприємств;

					КНУ КРБ.174.26.10.00.ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– обґрунтувати доцільність використання технологій промислового Інтернету речей для моніторингу, візуалізації, архівування та аналітичної обробки параметрів системи аспірації;

– розробити структуру автоматизованої системи керування аспірацією аглофабрики з урахуванням польового рівня, рівня програмованого логічного контролера, Edge-рівня та рівня ІоТ-моніторингу;

– побудувати математичні моделі основних контурів керування системи аспірації;

– виконати синтез алгоритмів автоматичного регулювання розрідження, перепаду тиску на фільтрах та температури газів;

– провести імітаційне дослідження роботи системи керування та оцінити якість перехідних процесів;

– запропонувати апаратно-програмну реалізацію системи з використанням ПЛК, промислових протоколів обміну даними та ІоТ-платформи.

Об’єктом дослідження є технологічний процес аспірації та газоочищення аглофабрики.

Предметом дослідження є автоматизована система керування аспірацією аглофабрики, що поєднує контури автоматичного регулювання, логіку пріоритетного керування та засоби промислового Інтернету речей для моніторингу й аналітики технологічних параметрів.

Практичне значення роботи полягає у розробленні проєктного рішення автоматизованої системи аспірації аглофабрики, яке може бути використане як основа для модернізації існуючих систем керування газоочисним обладнанням. Запропонована система дозволяє підвищити стабільність підтримання технологічних параметрів, зменшити ризик перевищення допустимих концентрацій пилу у відхідних газах, забезпечити оперативне виявлення небезпечних режимів роботи та створити інформаційну базу для прогнозного обслуговування фільтрів і вентиляторного обладнання.

					<i>КНУ КРБ.174.26.10.00.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ АСПІРАЦІЇ НА АГЛОФАБРИЦІ ТА ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ

1.1 Технологічний процес агломерації та роль системи аспірації

Агломераційне виробництво є одним із важливих етапів підготовки залізорудної сировини до доменного процесу. Його основним призначенням є перетворення дрібнодисперсної залізорудної сировини, флюсів, палива та зворотних матеріалів у кусковий пористий продукт — агломерат, який має необхідну механічну міцність, газопроникність і хімічний склад для подальшого використання у доменній плавці. Необхідність агломерації зумовлена тим, що дрібна залізорудна сировина без попередньої підготовки не може ефективно використовуватися у доменній печі, оскільки погіршує газодинамічний режим шахти печі, знижує продуктивність та підвищує витрати палива.

Технологічний процес агломерації зазвичай реалізується на агломераційних машинах стрічкового типу, зокрема на машинах типу Дуайт-Ллойда. Така машина являє собою безперервний агрегат, у якому шихта розміщується на рухомих палетах, проходить зону запалювання, після чого фронт горіння поступово переміщується зверху вниз через шар матеріалу. У результаті відбувається часткове плавлення легкоплавких компонентів шихти, утворення рідкої фази та подальше спікання частинок у пористий міцний агломерат. Для забезпечення руху фронту горіння через шар шихти необхідне інтенсивне просмоктування повітря та газів через матеріал, що досягається за допомогою системи аспірації.

					КНУ КРБ.174.26.10.01.ПЗ						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Рябко О.О.			РОЗДІЛ 1			Літ.	Арк.	Аркушів	
Перевір.		Жосан А.А.								8	15
Н. Контр.		Маринич І.А.			КНУ АКІТР-23ск						
Затверд.		Маринич І.А.									

Система аспірації аглофабрики є невід'ємною частиною агломераційної машини. Вона забезпечує створення розрідження під шаром шихти, відсмоктування продуктів горіння, транспортування запиленних газів газоходами, їх очищення у газоочисних апаратах і подальше видалення через димову трубу. Таким чином, аспіраційна система одночасно виконує технологічну, екологічну та енергетичну функції.

Технологічна функція системи аспірації полягає у формуванні необхідного газодинамічного режиму спікання. Розрідження під шаром шихти визначає інтенсивність проходження повітря крізь матеріал, швидкість горіння коксової дрібниці, температуру в зоні спікання та рівномірність переміщення фронту горіння. За недостатнього розрідження знижується інтенсивність горіння палива, погіршується прогрів нижніх шарів шихти, збільшується ймовірність отримання недоспеченого агломерату. Надмірне розрідження, навпаки, може призводити до інтенсивного пиловиносу, перевитрати електроенергії тягодутьовими вентиляторами, прискореного зношування газоходів і фільтрувального обладнання. Тому підтримання оптимального розрідження є одним із ключових завдань автоматизації агломераційного процесу.

Екологічна функція системи аспірації пов'язана з очищенням відхідних газів від пилу та інших забруднювальних речовин. Під час спікання залізорудної шихти утворюється значна кількість запиленних газів, які можуть містити тверді частинки, оксиди сірки, оксиди азоту, монооксид вуглецю та інші домішки. Без ефективного газоочищення такі викиди становлять небезпеку для навколишнього середовища та здоров'я персоналу. Тому сучасні аспіраційні системи повинні не лише забезпечувати відсмоктування газів, а й підтримувати концентрацію пилу у відхідних газах на рівні, що відповідає встановленим екологічним вимогам.

Енергетична функція системи аспірації зумовлена значною потужністю тягодутьових вентиляторів. У промислових умовах димососи аспіраційних систем працюють у тривалому безперервному режимі, а їх електроспоживання

					КНУ КРБ.174.26.10.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

є істотною складовою енергетичних витрат аглофабрики. Традиційне регулювання продуктивності вентилятора за допомогою дроселювання потоку заслінками супроводжується значними втратами енергії. Більш ефективним є використання частотно-регульованого електропривода, який дозволяє змінювати частоту обертання вентилятора відповідно до фактичної потреби у витраті газів і підтриманні заданого розрідження.

Типова система аспірації агломераційної машини включає вакуум-камери, розташовані під робочою гілкою палет, всмоктувальні газоходи, колектори, апарати попереднього та основного очищення газів, тягодутьовий вентилятор, частотний привод, димову трубу, систему контрольно-вимірювальних приладів і засоби автоматизації. Запилені гази відсмоктуються з-під шару шихти через вакуум-камери, надходять до газозбірного колектора, проходять через газоочисне обладнання та після очищення видаляються в атмосферу. Як апарати основного очищення можуть використовуватися рукавні фільтри або електростатичні фільтри. Рукавні фільтри забезпечують високу ефективність уловлювання пилу, однак потребують контролю температури газів, перепаду тиску та своєчасного очищення фільтрувальних елементів.

З точки зору автоматизації система аспірації є складним динамічним об'єктом із декількома взаємопов'язаними технологічними параметрами. Основними параметрами, які необхідно контролювати, є розрідження під шаром шихти, перепад тиску на фільтрі, температура газів, витрата газового потоку, концентрація пилу у відхідних газах, частота обертання вентилятора та стан виконавчих механізмів. Керуючими впливами можуть бути частота обертання тягодутьового вентилятора, положення регульовальних заслінок, режими імпульсного очищення фільтрів, а також дії захисної автоматики при перевищенні допустимих значень температури або концентрації пилу.

Особливу роль у роботі системи аспірації відіграє контроль перепаду тиску на фільтрі. Зростання перепаду тиску свідчить про накопичення пилу на фільтрувальних елементах, погіршення газопроникності та збільшення навантаження на вентилятор. Якщо перепад тиску перевищує допустиме

					КНУ КРБ.174.26.10.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

значення, необхідно активувати цикл очищення фільтрів або змінити режим роботи системи. Водночас занадто часте очищення фільтрів може призводити до підвищеного зношування фільтрувальних рукавів і перевитрати стисненого повітря. Тому задача автоматизації полягає не лише в підтриманні заданого перепаду тиску, а й у раціональному керуванні режимами очищення.

Важливим параметром є також температура газів перед фільтром. Для рукавних фільтрів перевищення допустимої температури є небезпечним, оскільки може призвести до пошкодження фільтрувального матеріалу, втрати ефективності очищення та аварійної зупинки обладнання. Зниження температури може здійснюватися шляхом підсмоктування атмосферного повітря, зміни режиму роботи агломації або активації захисних алгоритмів. У системі автоматизації температурний контур доцільно розглядати як обмежувальний, тобто такий, що активується переважно у разі наближення параметра до небезпечного значення.

Сучасні вимоги до промислових систем аспірації передбачають не лише локальне автоматичне регулювання, а й безперервний моніторинг стану обладнання та параметрів викидів. Для цього використовуються системи безперервного контролю викидів, датчики пилу, газоаналізатори, засоби архівування та візуалізації даних. У поєднанні з технологіями промислового Інтернету речей такі засоби дають можливість формувати єдине інформаційне середовище, у якому дані з польового рівня та рівня програмованого логічного контролера передаються до Edge-шлюзу, IoT-платформи або бази даних часових рядів.

Використання IoT-технологій у системі аспірації дозволяє розширити функціональність традиційної автоматизованої системи керування. Зокрема, стає можливим віддалений моніторинг параметрів, побудова дашбордів, зберігання історичних даних, аналіз тенденцій забивання фільтрів, оцінювання енергоефективності роботи вентилятора, формування аварійних повідомлень та інформаційна підтримка екологічної звітності. Це особливо важливо для

					КНУ КРБ.174.26.10.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

підприємств, які працюють в умовах підвищених вимог до прозорості екологічних показників та ефективного управління виробничими ресурсами.

Таким чином, система аспірації аглофабрики є важливим об'єктом автоматизації, від ефективності роботи якого залежать стабільність технологічного процесу спікання, рівень пилових викидів, енергоспоживання та надійність газоочисного обладнання. Її автоматизація має базуватися на комплексному підході, що поєднує класичні контури автоматичного регулювання, логіку пріоритетного керування технологічними та екологічними обмеженнями, а також засоби промислового Інтернету речей для моніторингу, архівування й аналітичної обробки даних.

1.2 Технологічний процес агломерації та роль системи аспірації

Система аспірації аглофабрики є складним багатокомпонентним технологічним об'єктом, у якому поєднуються процеси транспортування газового потоку, очищення запилених газів, регулювання розрідження, захисту газоочисного обладнання та контролю екологічних показників. На відміну від багатьох локальних об'єктів автоматизації, система аспірації має розгалужену просторову структуру, значну кількість взаємопов'язаних параметрів, декілька режимів функціонування та жорсткі технологічні й екологічні обмеження.

Як об'єкт автоматизації система аспірації характеризується тим, що її робота безпосередньо впливає на стабільність агломераційного процесу, якість очищення газів, енергоспоживання тягодутьового обладнання та надійність роботи фільтрів. Основне завдання системи керування полягає у підтриманні необхідного розрідження під шаром шихти за змінних умов роботи агломашини, забезпеченні допустимого перепаду тиску на фільтрах, захисті фільтрувальних елементів від перегріву, контролі концентрації пилу у відхідних газах та своєчасному формуванні сигналів попередження або аварійного захисту.

					КНУ КРБ.174.26.10.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

У загальному вигляді технологічний тракт системи аспірації складається з таких основних елементів:

- вакуум-камер, розташованих під робочою гілкою агломераційної машини;
- всмоктувального колектора та системи газоходів;
- апаратів попереднього очищення газів;
- основного газоочисного апарата, яким може бути рукавний або електростатичний фільтр;
- тягодутьового вентилятора;
- частотно-регульованого електропривода вентилятора;
- димової труби;
- контрольно-вимірювальних приладів;
- програмованого логічного контролера;
- засобів промислового обміну даними, візуалізації, архівування та аналітичної обробки параметрів.

Вакуум-камери виконують функцію локального відсмоктування газів із-під шару шихти. Вони з'єднані з газозбірним колектором, через який запилені гази спрямовуються до газоочисного обладнання. Саме у цій частині системи формується розрідження, необхідне для проходження повітря крізь шар шихти. З точки зору автоматизації важливо контролювати не тільки середнє значення розрідження, а й можливі нерівномірності по довжині агломашини, оскільки вони можуть свідчити про порушення газопроникності шару, підсмоктування повітря або відхилення режиму спікання.

Газоходи та колектори забезпечують транспортування запиленних газів від агломашини до газоочисного обладнання. Для них характерні втрати тиску, що залежать від витрати газу, геометрії тракту, стану внутрішніх поверхонь, наявності місцевих опорів, поворотів, заслінок і відкладень пилу. У процесі експлуатації гідравлічний опір газового тракту може змінюватися, що впливає на навантаження вентилятора та режим підтримання розрідження. Тому для

					КНУ КРБ.174.26.10.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

системи керування важливо враховувати не лише поточне значення тиску, а й тенденції його зміни.

Основне очищення газів виконується у фільтрувальному апараті. У разі використання рукавного фільтра запилений газ проходить через фільтрувальні рукави, на поверхні яких затримуються тверді частинки. Поступове накопичення пилу збільшує гідравлічний опір фільтра, що проявляється у зростанні перепаду тиску. Для відновлення газопроникності фільтрувальних елементів застосовується імпульсне очищення стисненим повітрям. З погляду автоматизації рукавний фільтр є нелінійним об'єктом, оскільки його опір залежить від ступеня забивання, властивостей пилу, вологості газів, частоти очищення та технічного стану фільтрувальних рукавів.

Тягодутьовий вентилятор є головним виконавчим елементом, який створює необхідне розрідження у газовому тракті. Його продуктивність може змінюватися за рахунок частотно-регульованого електропривода. Використання частотного керування є доцільним, оскільки дає змогу плавно змінювати витрату газів відповідно до фактичної потреби технологічного процесу та зменшувати енергоспоживання порівняно з дросельним регулюванням. Для системи керування частота обертання вентилятора є основним керуючим впливом у контурі стабілізації розрідження.

Важливим елементом системи є засоби контролю викидів. Вони забезпечують вимірювання концентрації пилу та, за потреби, газових компонентів у відхідних газах. Такі дані необхідні для контролю відповідності екологічним вимогам, виявлення погіршення ефективності фільтрації та формування сигналів попередження при наближенні параметрів до граничних значень. У сучасних системах автоматизації ці дані доцільно використовувати не лише для оперативного контролю, а й для архівування, побудови трендів, аналізу причин відхилень і підготовки звітних показників.

Основні технологічні параметри системи аспірації, що підлягають контролю та автоматичному регулюванню, наведено у таблиці 1.1.

					<i>КНУ КРБ.174.26.10.01.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

Таблиця 1.1 – Основні технологічні параметри системи аспірації як об'єкта автоматизації

Параметр	Типове робоче значення	Орієнтовний діапазон	Функціональне значення
Розрідження під шаром шихти	–20 кПа	–15...–25 кПа	Визначає газодинамічний режим спікання
Перепад тиску на фільтрі	2,0 кПа	0,5...4,0 кПа	Характеризує стан фільтра та ступінь його забивання
Продуктивність вентилятора	650 тис. м³/год	450...850 тис. м³/год	Забезпечує транспортування газів і створення розрідження
Температура газів перед фільтром	180 °С	120...220 °С	Визначає безпечність роботи фільтрувальних елементів
Концентрація пилу після очищення	до 10 мг/м³	залежить від режиму	Характеризує ефективність газоочищення
Потужність вентилятора	1800 кВт	1200...2400 кВт	Визначає енергетичну ефективність системи

Наведені параметри відрізняються за своїм функціональним призначенням. Частина з них є регульованими величинами, які система повинна підтримувати на заданому рівні. До них належать насамперед розрідження під шаром шихти та перепад тиску на фільтрі. Частина параметрів має обмежувальний характер. Наприклад, температура газів перед фільтром не завжди потребує постійного регулювання, однак при наближенні до граничного значення вона повинна активувати захисні дії. Концентрація пилу після очищення також є переважно контрольованим параметром, який використовується для оцінювання екологічної ефективності системи та формування сигналів попередження.

З точки зору теорії автоматичного керування систему аспірації можна розглядати як багатоконтурний об'єкт із взаємопов'язаними регульованими параметрами.

Основними контурами керування є:

- контур регулювання розрідження під шаром шихти;
- контур контролю та регулювання перепаду тиску на фільтрі;
- контур температурного захисту фільтра;

- контур контролю концентрації пилу у відхідних газах;
- контур керування імпульсним очищенням фільтрів;
- контур енергетичної оптимізації роботи вентилятора.

Контур регулювання розрідження є основним технологічним контуром. Його завдання полягає у підтриманні заданого розрідження шляхом зміни частоти обертання тягодутьового вентилятора. Вхідним сигналом для регулятора є похибка між заданим і вимірним значенням розрідження, а вихідним сигналом — завдання частоти для частотного перетворювача. Особливістю цього контуру є зворотна дія об'єкта: збільшення частоти вентилятора призводить до збільшення розрідження, тобто до зменшення абсолютного значення тиску відносно атмосферного. Тому при реалізації регулятора необхідно правильно враховувати знак коефіцієнта підсилення об'єкта.

Контур перепаду тиску на фільтрі призначений для контролю стану фільтрувальних елементів. Зростання перепаду тиску свідчить про накопичення пилу та збільшення опору фільтра. У найпростішому випадку цей контур може використовуватися для запуску імпульсного очищення при досягненні заданого порогового значення. У більш розвиненій системі перепад тиску може використовуватися також для адаптації параметрів регулятора, оцінювання ступеня забивання фільтра та прогнозування потреби у технічному обслуговуванні.

Температурний контур виконує переважно захисну функцію. Його завдання полягає у запобіганні перегріву фільтрувального обладнання. Якщо температура газів перевищує допустиме значення, система повинна сформулювати попередження, активувати підсмоктування холодного повітря або перевести обладнання у безпечний режим. На відміну від контуру розрідження, температурний контур не обов'язково працює постійно як основний регулятор, а може активуватися лише при наблизенні температури до небезпечної зони.

Контур контролю пилу у відхідних газах є важливим з екологічної точки зору. Він дає змогу оцінювати ефективність очищення та своєчасно виявляти пошкодження фільтрувальних рукавів, порушення режиму регенерації або погіршення роботи газоочисного обладнання. При наближенні концентрації пилу до граничного значення система повинна формувати попередження, а при перевищенні — активувати логіку пріоритетного керування. Це може включати зниження продуктивності, зміну уставки розрідження, запуск додаткового очищення фільтрів або переведення системи у режим порушення.

Керуючі впливи системи аспірації формуються виконавчими механізмами. До них належать частотно-регульований привод вентилятора, регулювальні заслінки, клапани підсмоктування повітря, імпульсні клапани очищення фільтрів та аварійні виконавчі пристрої. Кожен із цих механізмів має власне призначення, обмеження та динамічні властивості. Основні керуючі впливи наведено у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Керуючі впливи та виконавчі механізми системи аспірації

Керуючий вплив	Виконавчий механізм	Основний параметр, на який впливає	Призначення
Частота обертання вентилятора	Частотний перетворювач	Розрідження, витрата газів	Основне регулювання аспірації
Положення регулювальної заслінки	Електропривод заслінки	Витрата газу, перепад тиску	Додаткове регулювання газового потоку
Відкриття клапана підсмоктування	Клапан або заслінка підсмоктування	Температура газів	Захист фільтрів від перегріву
Імпульсне очищення фільтрів	Електромагнітні клапани	Перепад тиску на фільтрі	Відновлення газопроникності рукавів
Зменшення продуктивності агломації	Команда на суміжну систему	Пиловинос, навантаження на аспірацію	Реакція на екологічне порушення
Аварійна зупинка	Захисна автоматика	Усі критичні параметри	Переведення системи у безпечний стан

На роботу системи аспірації діє низка зовнішніх та внутрішніх збурень. До зовнішніх збурень належать зміна продуктивності агломашини, коливання вологості шихти, зміна фракційного складу матеріалу, сезонні зміни температури повітря та атмосферного тиску. До внутрішніх збурень можна віднести поступове забивання фільтрів, зношування фільтрувальних рукавів, відкладення пилу в газоходах, зміну характеристик вентилятора, зменшення герметичності газового тракту та похибки вимірювальних каналів.

Зміна продуктивності агломашини впливає на кількість газів, що утворюються у процесі спікання, та на інтенсивність пиловиносу. Підвищення продуктивності може призвести до збільшення навантаження на аспіраційну систему, зростання концентрації пилу та необхідності збільшення витрати газів. Зміна вологості шихти впливає на газопроникність шару, температуру газів і стабільність фронту горіння. Підвищена вологість може погіршувати проходження газів через шар і створювати додаткові коливання розрідження.

Стан фільтрів є одним із найбільш важливих внутрішніх факторів. У міру накопичення пилу збільшується перепад тиску, зростає навантаження на вентилятор і змінюються динамічні властивості об'єкта керування. Якщо система використовує фіксовані параметри регулятора, налаштовані для одного стану фільтра, якість регулювання може погіршуватися при зміні ступеня забивання. Саме тому для такого об'єкта доцільно застосовувати адаптивні підходи, зокрема gain scheduling, коли параметри регулятора змінюються залежно від поточного стану фільтра.

Інформаційна структура системи аспірації повинна забезпечувати надійне отримання даних від датчиків і передачу команд до виконавчих механізмів. Для цього до складу системи включаються первинні перетворювачі тиску, перепаду тиску, температури, витрати, концентрації пилу, а також сигнали стану приводів, клапанів і фільтрувальних секцій. Типовий набір вимірювальних і керуючих сигналів наведено у таблиці 1.3.

					КНУ КРБ.174.26.10.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

Таблиця 1.3 – Основні сигнали системи аспірації

Позначення сигналу	Найменування	Тип сигналу	Призначення
PT-101	Розрідження під шаром шихти	Аналоговий вхід	Контроль і регулювання розрідження
PDT-201	Перепад тиску на фільтрі	Аналоговий вхід	Оцінювання стану фільтра
TT-301	Температура газів перед фільтром	Аналоговий вхід	Захист фільтрувальних елементів
FT-401	Витрата газів	Аналоговий вхід	Контроль навантаження аспіраційного тракту
AE-501	Концентрація пилу після очищення	Аналоговий вхід	Екологічний контроль
VFD-101-FREQ	Завдання частоти вентилятора	Аналоговий вихід / мережевий сигнал	Керування продуктивністю вентилятора
VFD-101-RUN	Стан роботи вентилятора	Дискретний вхід	Контроль готовності та роботи привода
PV-301	Клапан підсмоктування повітря	Аналоговий або дискретний вихід	Зниження температури газів
YV-201.1...YV-201.8	Імпульсні клапани очищення	Дискретні виходи	Очищення секцій рукавного фільтра
ALM-PM-HIGH	Перевищення концентрації пилу	Дискретний / програмний сигнал	Формування аварійного повідомлення
MODE	Режим роботи системи	Програмна змінна	Керування логікою станів

Наведена структура сигналів є базовою і може уточнюватися залежно від конкретної конфігурації обладнання. Для промислової реалізації доцільно використовувати уніфіковані сигнали 4–20 мА для аналогових вимірювань, дискретні сигнали 24 В DC для станів і команд, а також промислові цифрові протоколи для обміну даними з частотними приводами, віддаленими модулями введення-виведення та ІоТ-шлюзом.

Важливою особливістю системи аспірації є необхідність узгодження локального автоматичного керування з логікою режимів роботи. У нормальному режимі основним завданням є стабілізація розрідження та

підтримання допустимого перепаду тиску на фільтрі. У режимі попередження система повинна реагувати на наближення концентрації пилу або температури до граничних значень. У режимі порушення пріоритет надається екологічній безпеці та захисту обладнання, навіть якщо це призводить до відхилення технологічних параметрів від оптимальних значень. В аварійному режимі головним завданням є переведення системи у безпечний стан.

Таким чином, система аспірації аглофабрики як об'єкт автоматизації має такі характерні ознаки: багатоконтурність, наявність взаємопов'язаних технологічних параметрів, суттєвий вплив зовнішніх і внутрішніх збурень, нелінійність характеристик фільтрувального обладнання, жорсткі екологічні обмеження та значне енергоспоживання тягодутьового вентилятора. Це обумовлює необхідність побудови комплексної системи автоматизації, яка поєднує класичні контури регулювання, захисну та пріоритетну логіку, засоби моніторингу, архівування й аналітичної обробки даних на основі технологій промислового Інтернету речей.

1.3 Технологічний процес агломерації та роль системи аспірації

Ефективність автоматизованої системи керування аспірацією аглофабрики значною мірою залежить від правильного визначення технологічних параметрів об'єкта, керуючих впливів, зовнішніх і внутрішніх збурень, а також допустимих обмежень. На відміну від простих локальних систем регулювання, система аспірації має декілька взаємопов'язаних цілей: підтримання необхідного розрідження під шаром шихти, забезпечення ефективного газоочищення, захист фільтрувального обладнання, зменшення енергоспоживання та дотримання екологічних вимог. Тому аналіз параметрів об'єкта є необхідним етапом перед побудовою структури системи автоматизації.

Основні параметри системи аспірації можна поділити на чотири групи: регульовані величини, контрольовані параметри, керуючі впливи та збурення.

					КНУ КРБ.174.26.10.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

Регульованими величинами є ті параметри, значення яких система автоматичного керування повинна підтримувати на заданому рівні або в допустимому діапазоні. Контрольовані параметри використовуються для оцінювання стану об'єкта, формування попереджень, аварійних сигналів або аналітичних показників. Керуючі впливи формуються виконавчими механізмами та безпосередньо змінюють режим роботи системи. Збуреннями є фактори, які впливають на об'єкт, але не можуть бути безпосередньо задані системою керування.

До основних регульованих величин системи аспірації належать розрідження під шаром шихти, перепад тиску на фільтрі та температура газів перед газоочисним обладнанням. Розрідження під шаром шихти є головним технологічним параметром, оскільки воно визначає інтенсивність просмоктування повітря через шар матеріалу та безпосередньо впливає на тепловий режим спікання. Недостатнє розрідження може призвести до погіршення газопроникності шару, сповільнення проходження фронту горіння та отримання недоспеченого агломерату. Надмірне розрідження збільшує пиловинос, навантаження на газоочисне обладнання та енергоспоживання вентилятора.

Перепад тиску на фільтрі є параметром, що характеризує стан фільтрувального обладнання. У процесі роботи на поверхні фільтрувальних елементів накопичується пил, що призводить до збільшення гідравлічного опору. Помірне накопичення пилового шару може навіть покращувати ефективність фільтрації, однак надмірне забивання фільтра погіршує проходження газового потоку, підвищує навантаження на вентилятор і може спричинити порушення режиму аспірації. Тому перепад тиску використовується як один із головних показників для запуску імпульсного очищення та оцінювання технічного стану фільтра.

Температура газів перед фільтром є важливим обмежувальним параметром. Для рукавних фільтрів перевищення допустимої температури може призвести до термічного пошкодження фільтрувального матеріалу,

					КНУ КРБ.174.26.10.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

зниження ефективності очищення та аварійної зупинки обладнання. Водночас занадто низька температура газів може сприяти конденсації вологи та налипанню пилу на фільтрувальні елементи. Тому температурний режим повинен контролюватися системою автоматизації, а при наближенні до небезпечних значень має активуватися захисна логіка.

Окрему групу становлять екологічні параметри, насамперед концентрація пилу у відхідних газах після очищення. Цей параметр не завжди є безпосередньо регульованою величиною у класичному розумінні, але він визначає відповідність роботи системи екологічним вимогам. Підвищення концентрації пилу може свідчити про пошкодження фільтрувальних рукавів, неефективне очищення, перевантаження системи аспірації або порушення технологічного режиму. Тому концентрація пилу повинна використовуватися не лише для контролю, а й для формування пріоритетних керуючих дій у разі наближення до граничного значення.

Загальна класифікація технологічних параметрів системи аспірації наведена у таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 – Класифікація технологічних параметрів системи аспірації

Група параметрів	Параметр	Позначення	Основне призначення
Регульовані величини	Розрідження під шаром шихти	$P_{\text{вак}}$	Підтримання газодинамічного режиму спікання
Регульовані величини	Перепад тиску на фільтрі	$\Delta P_{\text{ф}}$	Контроль стану фільтра та запуск очищення
Обмежувальні параметри	Температура газів перед фільтром	$T_{\text{г}}$	Захист фільтрувальних елементів від перегріву
Контрольовані параметри	Концентрація пилу після очищення	$C_{\text{пил}}$	Екологічний контроль ефективності газоочищення
Контрольовані параметри	Витрата газів	$Q_{\text{г}}$	Оцінювання навантаження аспіраційного тракту
Енергетичні параметри	Потужність вентилятора	$N_{\text{в}}$	Оцінювання енергоефективності
Діагностичні параметри	Стан фільтрувальних секцій	$S_{\text{ф}}$	Контроль роботи імпульсного очищення
Діагностичні параметри	Стан частотного привода	$S_{\text{пч}}$	Контроль готовності та справності вентилятора

Керуючі впливи системи аспірації формуються виконавчими механізмами. Основним керуючим впливом є частота обертання тягодутьового вентилятора, яка задається частотним перетворювачем. Зміна частоти обертання впливає на продуктивність вентилятора, витрату газового потоку та рівень розрідження у вакуум-камерах. Цей вплив використовується у головному контурі регулювання розрідження.

Другим важливим керуючим впливом є положення регулювальних заслінок або клапанів газового тракту. Такі виконавчі механізми можуть використовуватися для локального перерозподілу газового потоку, обмеження витрати або реалізації захисних режимів. Однак з енергетичної точки зору регулювання заслінками є менш ефективним, ніж частотне керування вентилятором, оскільки супроводжується додатковими втратами тиску.

Імпульсне очищення фільтрів є окремим видом керуючого впливу. Воно реалізується за допомогою електромагнітних клапанів, які короткочасно подають стиснене повітря у фільтрувальні рукави. Це дозволяє видалити накопичений пиловий шар і зменшити перепад тиску. Керування очищенням може здійснюватися за часовим алгоритмом, за досягненням граничного перепаду тиску або за комбінованою логікою, що враховує як час роботи, так і фактичний стан фільтра.

До керуючих впливів також належать відкриття клапанів підсмоктування атмосферного повітря для зниження температури газів, формування команд попередження оператору, переведення системи у режим обмеження продуктивності та аварійна зупинка обладнання. Частина цих впливів використовується у штатному регулюванні, а частина – лише у захисних і аварійних режимах.

Узагальнений перелік керуючих впливів наведено у таблиці 1.5.

На роботу системи аспірації впливають численні збурення, які можна поділити на технологічні, газодинамічні, експлуатаційні та зовнішні. Технологічні збурення пов'язані зі зміною режиму роботи агломашини та властивостей шихти. До них належать зміна продуктивності агломашини,

					<i>КНУ КРБ.174.26.10.01.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

висоти шару шихти, вологості, гранулометричного складу, вмісту палива та газопроникності матеріалу. Такі фактори змінюють кількість газів, що утворюються у процесі спікання, опір шару шихти та інтенсивність пиловиносу.

Таблиця 1.5 – Основні керуючі впливи системи аспірації

Керуючий вплив	Виконавчий механізм	Основний результат дії
Зміна частоти вентилятора	Частотний перетворювач димососа	Зміна розрідження та витрати газів
Зміна положення заслінки	Електропривод заслінки	Перерозподіл або обмеження газового потоку
Запуск імпульсного очищення	Електромагнітні клапани фільтра	Зниження перепаду тиску на фільтрі
Відкриття підсмоктування повітря	Клапан або заслінка підсмоктування	Зниження температури газів перед фільтром
Корекція уставки розрідження	Програмна логіка ПЛК	Зменшення пиловиносу або навантаження на фільтр
Зниження продуктивності агломашини	Команда до суміжної системи	Зменшення навантаження на аспірацію
Аварійна зупинка	Захисна автоматика	Переведення системи у безпечний стан

На роботу системи аспірації впливають численні збурення, які можна поділити на технологічні, газодинамічні, експлуатаційні та зовнішні. Технологічні збурення пов'язані зі зміною режиму роботи агломашини та властивостей шихти. До них належать зміна продуктивності агломашини, висоти шару шихти, вологості, гранулометричного складу, вмісту палива та газопроникності матеріалу. Такі фактори змінюють кількість газів, що утворюються у процесі спікання, опір шару шихти та інтенсивність пиловиносу.

Газодинамічні збурення пов'язані зі зміною гідравлічного опору газового тракту. Вони можуть виникати через відкладення пилу в газоходах, зміну положення заслінок, підсмоктування неорганізованого повітря через нещільності, зміну опору фільтра або порушення герметичності системи. Такі збурення безпосередньо впливають на розрідження, витрату газів і навантаження вентилятора.

Експлуатаційні збурення виникають унаслідок поступового зношування обладнання. До них належать деградація фільтрувальних рукавів, зменшення ефективності імпульсного очищення, зношування робочого колеса вентилятора, погіршення характеристик частотного привода, забруднення датчиків і збільшення похибок вимірювання. Особливість таких збурень полягає в тому, що вони розвиваються повільно, але істотно впливають на якість керування та надійність системи.

Зовнішні збурення пов'язані зі зміною температури й вологості навколишнього повітря, атмосферного тиску та сезонних умов експлуатації. Вони впливають на густину газів, умови охолодження, характеристики вентилятора та температурний режим фільтра. Хоча такі збурення зазвичай змінюються повільно, їх необхідно враховувати під час аналізу робастності системи керування.

Узагальнення основних збурень наведено у таблиці 1.6.

Таблиця 1.6 – Основні збурення, що діють на систему аспірації

Група збурень	Приклади збурень	Наслідки для системи
Технологічні	Зміна продуктивності, вологості та складу шихти	Коливання розрідження, температури та пиловиносу
Газодинамічні	Зміна опору газоходів, підсмоктування повітря	Порушення витрати газів і навантаження вентилятора
Експлуатаційні	Забивання фільтра, зношування рукавів, деградація вентилятора	Погіршення якості очищення та збільшення енергоспоживання
Вимірювальні	Дрейф датчиків, забруднення вимірювальних каналів	Помилки регулювання та діагностики
Зовнішні	Температура, вологість і тиск навколишнього середовища	Зміна густини газів і температурного режиму

Крім збурень, система аспірації має низку технологічних, екологічних та експлуатаційних обмежень. Технологічні обмеження визначають допустимий діапазон розрідження, перепаду тиску та витрати газів. Екологічні обмеження встановлюють гранично допустимі концентрації пилу та інших забруднювальних речовин у відхідних газах. Експлуатаційні обмеження

пов'язані з допустимою температурою фільтрувальних елементів, максимальною частотою обертання вентилятора, допустимою кількістю пусків імпульсних клапанів, станом обладнання та умовами безпечної роботи.

Особливість автоматизації системи аспірації полягає в тому, що різні обмеження можуть вступати у конфлікт між собою. Наприклад, збільшення частоти вентилятора дозволяє підвищити розрідження та покращити проходження газів через шар шихти, але водночас може збільшити пиловинос і енергоспоживання. Зменшення розрідження може знизити пилове навантаження на фільтр, але погіршити технологічний режим спікання. Часте імпульсне очищення зменшує перепад тиску, але прискорює зношування фільтрувальних рукавів і збільшує витрату стисненого повітря. Тому система керування повинна працювати не лише за принципом стабілізації окремого параметра, а й з урахуванням пріоритетів.

З урахуванням технологічних та екологічних вимог доцільно виділити декілька основних режимів роботи системи аспірації: нормальний режим, режим попередження, режим порушення, режим очищення фільтрів та аварійний режим.

Нормальний режим роботи відповідає штатному стану системи, коли всі основні параметри перебувають у допустимих межах. У цьому режимі контур регулювання розрідження підтримує задане значення, контур перепаду тиску контролює стан фільтра, а система моніторингу відображає поточні параметри та архівує дані. Основною метою нормального режиму є забезпечення стабільного технологічного процесу за мінімально можливого енергоспоживання.

Режим попередження активується у разі наближення одного або декількох параметрів до граничних значень. Наприклад, підвищення концентрації пилу після очищення, зростання температури газів або збільшення перепаду тиску на фільтрі можуть свідчити про погіршення стану системи. У цьому режимі система повинна сформувати попередження оператору, посилити моніторинг відповідного параметра та, за потреби, виконати м'яку корекцію

					<i>КНУ КРБ.174.26.10.01.ПЗ</i>	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

керуючих впливів. До таких дій може належати корекція уставки розрідження, запуск додаткового очищення фільтрів або підготовка до переходу в обмежувальний режим.

Режим порушення активується при перевищенні допустимих значень екологічних або технологічних параметрів. Наприклад, перевищення концентрації пилу після очищення свідчить про те, що система газоочищення не забезпечує необхідної ефективності. У цьому випадку пріоритет має бути наданий екологічній безпеці, навіть якщо це потребує тимчасового зниження продуктивності або відхилення від оптимального технологічного режиму. Система повинна зареєструвати факт порушення, сформувати аварійне повідомлення, активувати додаткове очищення фільтрів або інші дії, спрямовані на повернення параметрів у допустимі межі.

Режим очищення фільтрів пов'язаний із відновленням газопроникності фільтрувальних елементів. Він може активуватися за перевищенням перепаду тиску, за часовим графіком або за комбінованим алгоритмом. У цьому режимі імпульсні клапани очищення вмикаються послідовно, щоб не створювати різких коливань тиску в газовому тракті. Після завершення очищення система аналізує зміну перепаду тиску. Якщо очищення не дало очікуваного ефекту, це може свідчити про погіршення стану фільтрів або несправність імпульсної системи.

Аварійний режим активується у разі виникнення небезпечної ситуації, яка може призвести до пошкодження обладнання або порушення безпечних умов експлуатації. До таких ситуацій належать критичне перевищення температури газів, відмова вентилятора, несправність частотного привода, відсутність сигналу від ключових датчиків, різке зростання перепаду тиску або неможливість забезпечити допустимий рівень викидів. В аварійному режимі система повинна виконати наперед визначену послідовність дій: сформувати аварійне повідомлення, перевести виконавчі механізми у безпечне положення, зупинити або обмежити роботу обладнання та зафіксувати подію в архіві.

					<i>КНУ КРБ.174.26.10.01.ПЗ</i>	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Узагальнена характеристика режимів роботи системи наведена у таблиці 1.7.

Таблиця 1.7 – Основні режими роботи системи аспірації

Режим	Умови активації	Основні дії системи
NORMAL	Усі параметри в допустимих межах	Підтримання розрідження, контроль ΔP , архівування даних
WARNING	Наближення пилу, температури або ΔP до граничного значення	Попередження оператора, корекція уставок, посилений контроль
VIOLATION	Перевищення екологічного або технологічного обмеження	Пріоритетна корекція режиму, додаткове очищення, реєстрація події
CLEANING	Перевищення ΔP або плановий цикл очищення	Послідовне імпульсне очищення секцій фільтра
EMERGENCY	Критична температура, відмова обладнання або небезпечне відхилення	Переведення у безпечний стан, аварійна сигналізація, зупинка або обмеження роботи

Для реалізації зазначених режимів доцільно використовувати логіку пріоритетного керування. Найвищий пріоритет повинні мати аварійні захисти, далі – захист фільтрувального обладнання від перегріву, дотримання екологічних обмежень, підтримання технологічного розрідження та лише після цього — енергетична оптимізація. Такий підхід дозволяє уникнути ситуацій, коли локальне регулювання одного параметра погіршує безпеку або екологічну ефективність системи.

Таким чином, аналіз технологічних параметрів, збурень і режимів роботи показує, що система аспірації аглофабрики є складним багатокритеріальним об'єктом керування. Її автоматизація повинна забезпечувати не лише стабілізацію окремих параметрів, а й узгоджену роботу декількох контурів з урахуванням технологічних, екологічних, енергетичних та експлуатаційних обмежень. Це обґрунтовує необхідність використання комплексної архітектури, яка поєднує локальне ПІД-регулювання, пріоритетну логіку режимів, засоби діагностики стану обладнання та ІоТ-рівень для моніторингу, архівування й аналітичної обробки даних.

1.4 Аналіз існуючих підходів до автоматизації аспіраційних і газоочисних систем

Автоматизація аспіраційних і газоочисних систем промислових підприємств є важливим напрямом підвищення технологічної стабільності, екологічної безпеки та енергоефективності виробництва. Для агломераційного виробництва ця задача має особливе значення, оскільки система аспірації безпосередньо впливає на газодинамічний режим спікання, ефективність очищення відхідних газів і рівень пилових викидів. У роботах, присвячених технології агломерації, підкреслюється, що керування газовим режимом агломації є одним із ключових чинників забезпечення стабільності процесу та якості готового агломерату [1, 2].

Існуючі підходи до автоматизації аспіраційних систем можна умовно поділити на декілька груп: локальне автоматичне регулювання, автоматизація газоочисного обладнання, системи безперервного контролю викидів, SCADA-рішення, енергоефективне керування тягодутьовим обладнанням, а також сучасні IoT-орієнтовані системи моніторингу й аналітики.

Найбільш поширеним традиційним підходом є локальне автоматичне регулювання основних технологічних параметрів. У системах аспірації таким параметром зазвичай є розрідження в газовому тракті або під шаром матеріалу. Регулятор порівнює виміряне значення розрідження із заданим і формує керуючий вплив на виконавчий механізм: частотний перетворювач вентилятора, регульовальну заслінку або інший пристрій зміни витрати газів. Для таких задач широко використовуються ПІД-регулятори, оскільки вони мають просту структуру, добре вивчені властивості та підтримуються більшістю промислових контролерів [11, 12].

Перевагою ПІД-регулювання є можливість забезпечити достатньо якісну стабілізацію параметра без використання складної математичної моделі об'єкта. У промислових умовах ПІД-регулятори часто налаштовуються за експериментальними перехідними характеристиками або за наближеними

					КНУ КРБ.174.26.10.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

моделями першого порядку із запізненням. Для технологічних об'єктів із помірною інерційністю та невеликим запізненням цей підхід є практично виправданим [11, 14]. У випадку системи аспірації аглофабрики ПД-регулювання доцільно використовувати насамперед для контуру розрідження, оскільки цей параметр має безпосередній вплив на режим спікання та може змінюватися за рахунок частоти обертання вентилятора.

Разом із тим застосування лише класичного ПД-регулятора не завжди є достатнім. Система аспірації має декілька взаємопов'язаних параметрів і обмежень: розрідження, перепад тиску на фільтрі, температуру газів, концентрацію пилу, потужність вентилятора та стан фільтрувальних елементів. Зміна одного керуючого впливу може одночасно покращувати один показник і погіршувати інший. Наприклад, збільшення продуктивності вентилятора може стабілізувати розрідження, але водночас підвищити пиловинос і енергоспоживання. Тому у складних режимах потрібна не лише стабілізація окремого параметра, а й узгодження дій декількох контурів.

Для об'єктів із конфліктними технологічними обмеженнями застосовується пріоритетне або селективне керування. Його сутність полягає в тому, що в нормальному режимі працює основний регулятор, а при наближенні параметрів до небезпечних меж пріоритет отримує інший контур або захисна логіка. Такий підхід широко використовується у процесній автоматизації, де одночасно потрібно підтримувати якість регулювання, безпеку та дотримання обмежень [11, 13]. Для системи аспірації це означає, що контур розрідження може бути основним, але при перегріві фільтра, зростанні концентрації пилу або критичному перепаді тиску система повинна змінювати пріоритети керування.

Окремою задачею є автоматизація газоочисного обладнання. У промислових аспіраційних системах як основні апарати очищення часто використовуються рукавні фільтри або електростатичні фільтри. Рукавні фільтри забезпечують високу ефективність уловлювання пилу, однак їх робота істотно залежить від стану фільтрувальних елементів, температури газів,

					КНУ КРБ.174.26.10.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

вологості, характеристик пилу та режиму регенерації [6]. Електростатичні фільтри також широко застосовуються у промисловому газоочищенні, але потребують контролю електричних параметрів, стану електродів і режимів струшування або очищення [7].

Для рукавних фільтрів типовим автоматизованим рішенням є керування імпульсним очищенням за перепадом тиску або за часовим алгоритмом. У найпростішому випадку очищення виконується періодично через заданий проміжок часу. Недоліком такого підходу є те, що він не враховує фактичний стан фільтра: при низькому пиловому навантаженні очищення може бути надмірним, а при високому — недостатнім. Більш ефективним є керування за перепадом тиску, коли імпульсне очищення активується при досягненні встановленого порогу. Такий підхід краще враховує реальний стан фільтрувальних елементів і дозволяє зменшити витрату стисненого повітря та зношування рукавів.

Проте перепад тиску на фільтрі є нелінійним параметром, що залежить не лише від кількості накопиченого пилу, а й від властивостей пилового шару, вологості газів, стану матеріалу рукавів і режиму фільтрації. Через це динамічні властивості контуру перепаду тиску можуть змінюватися у процесі експлуатації. Для таких випадків доцільно застосовувати адаптивні підходи, зокрема планування коефіцієнтів регулятора залежно від стану об'єкта. У теорії автоматичного керування такий підхід відомий як *gain scheduling* і використовується для систем, параметри яких суттєво змінюються в різних робочих режимах [11].

Важливим напрямом автоматизації аспіраційних систем є енергоефективне керування тягодутьовими вентиляторами. Традиційне регулювання витрати газів за допомогою дроселювання потоку заслінками є простим, але енергетично неефективним, оскільки значна частина енергії втрачається на штучно створеному опорі. Більш сучасним підходом є використання частотно-регульованих електроприводів, які дозволяють змінювати частоту обертання вентилятора відповідно до фактичної потреби

технологічного процесу. Згідно із законами подібності вентиляторів, зменшення швидкості обертання дає змогу істотно знизити споживану потужність, що робить частотне керування одним із найбільш ефективних способів енергозбереження у вентиляційних і аспіраційних системах [10].

Ще одним важливим класом рішень є системи безперервного контролю викидів. Для промислових установок, що мають значний вплив на довкілля, моніторинг викидів є необхідною умовою дотримання екологічних вимог. У документах щодо найкращих доступних технологій для виробництва чавуну і сталі розглядаються технології очищення відхідних газів, контролю пилових викидів і моніторингу екологічних параметрів [3]. Європейські вимоги до промислових викидів визначають необхідність обмеження забруднення та застосування найкращих доступних технологій [27, 28]. Додатково питання моніторингу викидів від установок, що підпадають під дію промислового екологічного регулювання, розглянуто у довідковому звіті JRC щодо контролю викидів в атмосферу та воду [32].

Системи безперервного моніторингу викидів можуть включати пиломіри, газоаналізатори, витратоміри, датчики температури, тиску та вологості. Їх дані використовуються для оперативного контролю відповідності екологічним нормам, виявлення аварійних ситуацій, архівування показників і формування звітності. Для забезпечення достовірності таких вимірювань застосовуються вимоги до якості автоматизованих вимірювальних систем, зокрема стандарт EN 14181, адаптований в Україні як ДСТУ EN 14181:2014 [31].

Окреме місце займають SCADA-системи, які забезпечують візуалізацію технологічного процесу, архівування даних, реєстрацію аварій, формування трендів і взаємодію оператора з обладнанням. Для аспіраційної системи SCADA-рівень дозволяє відображати поточні значення розрідження, перепаду тиску, температури, концентрації пилу, стан вентилятора, частотного привода, заслінок і клапанів очищення. Основною перевагою SCADA є зручність оперативного контролю та інтеграція з промисловими контролерами. Водночас традиційні SCADA-системи не завжди забезпечують гнучкі інструменти

					<i>КНУ КРБ.174.26.10.01.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

аналітики, прогнозування стану обладнання та інтеграції з веборієнтованими сервісами.

Сучасним напрямом розвитку систем автоматизації є використання технологій промислового Інтернету речей. На відміну від класичної SCADA-архітектури, ПоТ-підхід орієнтований на розширене збирання даних, їх передавання через стандартизовані протоколи, зберігання у базах часових рядів, побудову вебдашбордів, інтеграцію з аналітичними сервісами та використання інструментів прогнозного обслуговування. Загальні принципи побудови IoT-архітектур визначені у стандарті ISO/IEC 30141:2018 [17].

Для промислового обміну даними одним із найважливіших стандартів є OPC UA. Він забезпечує уніфікований, платформонезалежний і безпечний доступ до даних промислових пристроїв, контролерів і програмних систем [18, 19]. У системі аспірації OPC UA може використовуватися для передавання даних від ПЛК до Edge-шлюзу або верхнього рівня: значень тиску, температури, перепаду тиску, концентрації пилу, станів обладнання, аварійних сигналів і режимів роботи.

Для передавання телеметрії на ПоТ-платформи часто застосовується протокол MQTT. Він побудований за моделлю публікації та підписки, має невеликі накладні витрати та добре підходить для передавання технологічних параметрів у вигляді повідомлень між шлюзом, брокером і прикладними сервісами [20]. У задачі автоматизації аспірації MQTT може використовуватися для передавання телеметрії до платформи моніторингу, формування аварійних повідомлень і взаємодії з аналітичними модулями.

Як Edge-рівень для інтеграції промислових даних часто використовується Node-RED. Це середовище дозволяє будувати потоки обробки даних, інтегрувати OPC UA, MQTT, HTTP API, бази даних і вебсервіси без розроблення великого обсягу програмного коду [21]. У системі аспірації Node-RED може виконувати функції шлюзу між ПЛК і ПоТ-платформою: опитувати змінні контролера, перетворювати структуру даних, формувати MQTT-

повідомлення, виконувати первинну фільтрацію та передавати дані до бази часових рядів.

Для візуалізації та аналітики промислової телеметрії можуть використовуватися IoT-платформи, зокрема ThingsBoard. Така платформа підтримує приймання даних від пристроїв, побудову дашбордів, відображення трендів, налаштування правил обробки подій та формування повідомлень [22]. У межах системи аспірації IoT-платформа може відображати поточний стан обладнання, тренди розрідження, перепаду тиску та температури, динаміку концентрації пилу, стан фільтрувальних секцій і аварійні події.

Важливим доповненням до IoT-рівня є використання баз даних часових рядів, наприклад InfluxDB, для зберігання історичних технологічних параметрів [25]. Накопичені дані можуть використовуватися для аналізу тенденцій, оцінювання ефективності фільтрації, виявлення повільної деградації обладнання, порівняння режимів роботи та розрахунку показників енергоефективності. У поєднанні з аналітичними інструментами це створює основу для прогнозного обслуговування.

Прогнозне обслуговування є одним із ключових напрямів розвитку сучасних промислових систем. Його мета полягає у переході від реактивного ремонту після відмови або планової заміни за фіксованим графіком до обслуговування за фактичним технічним станом обладнання. У літературі прогнозне обслуговування розглядається як поєднання діагностики, аналізу трендів, оцінювання залишкового ресурсу та прийняття рішень щодо обслуговування [33, 34]. Для аспіраційної системи найбільш очевидними об'єктами прогнозного обслуговування є фільтрувальні рукави, імпульсні клапани, вентилятор, електродвигун і частотний перетворювач.

У контексті сучасних екологічних вимог важливою є також інформаційна підтримка звітності щодо забруднення. Директива про промислові викиди встановлює загальні вимоги до запобігання та контролю забруднення від промислових установок [27]. Корпоративна звітність зі сталого розвитку та європейські стандарти ESRS передбачають розкриття інформації щодо впливу

					КНУ КРБ.174.26.10.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

підприємства на довкілля, у тому числі щодо забруднення [29, 30]. Тому дані системи аспірації можуть використовуватися не лише для оперативного керування, а й для підготовки екологічних показників: тривалості роботи в нормативному режимі, кількості перевищень, середніх і максимальних концентрацій пилу, масових викидів та ефективності газоочищення.

Порівняльна характеристика основних підходів до автоматизації аспіраційних і газоочисних систем наведена у таблиці 1.8.

Таблиця 1.8 – Порівняння підходів до автоматизації аспіраційних і газоочисних систем

Підхід	Основне призначення	Переваги	Обмеження
Локальне ПД-регулювання	Стабілізація розрідження, температури або перепаду тиску	Простота, надійність, підтримка у ПЛК	Обмежена робота при зміні режимів і нелінійностях
Частотне керування вентилятором	Енергоефективна зміна продуктивності димососа	Зниження енергоспоживання, плавне регулювання	Потребує узгодження з технологічними та екологічними обмеженнями
Автоматичне очищення фільтрів	Відновлення газопроникності фільтрувальних елементів	Зменшення ΔP , підтримання ефективності фільтрації	Надмірне очищення прискорює зношування рукавів
CEMS	Безперервний контроль пилу та газових компонентів	Підтримка екологічного контролю і звітності	Не є самостійною системою керування
SCADA	Візуалізація, архівування, аварійна сигналізація	Зручність для оператора, інтеграція з ПЛК	Обмежені можливості прогнозу аналітики
IoT-рівень	Збирання, передавання, зберігання та аналітика даних	Вебдашборди, історичні дані, інтеграція з аналітикою	Потребує налаштування кібербезпеки та надійної мережевої інфраструктури
Прогнозне обслуговування	Оцінювання стану обладнання та попередження відмов	Зменшення простоїв, перехід до обслуговування за станом	Потребує накопичення якісних історичних даних

1.5 Теоретична база автоматизації системи аспірації

Розроблення автоматизованої системи керування аспірацією аглофабрики потребує поєднання декількох груп теоретичних положень: основ гідрогазодинаміки, теорії автоматичного регулювання, принципів побудови багаторівневих систем автоматизації, промислового обміну даними та методів моніторингу технічного стану обладнання. Це зумовлено тим, що система аспірації є не лише вентиляційним або газоочисним трактом, а складним динамічним об'єктом із технологічними, екологічними та енергетичними обмеженнями.

З технологічної точки зору система аспірації забезпечує переміщення газового потоку через шар шихти, вакуум-камери, газоходи, фільтрувальне обладнання та димову трубу. Тому її поведінка визначається законами руху газів у трубопроводах і апаратах газоочищення. Основними параметрами такого процесу є витрата газу, швидкість потоку, тиск, розрідження, густина газу, температура та гідравлічний опір тракту.

Базовим співвідношенням для опису руху газового потоку є рівняння нерозривності, яке відображає закон збереження маси:

$$Q = \rho \cdot v \cdot S, \quad (1.1)$$

де Q – масова витрата газу, кг/с; ρ – густина газу, кг/м³; v – середня швидкість потоку, м/с; S – площа поперечного перерізу газоходу, м².

З рівняння (1.1) випливає, що при сталій геометрії газоходу зміна витрати газу безпосередньо пов'язана зі зміною швидкості потоку. У системі аспірації це має важливе значення, оскільки збільшення продуктивності вентилятора підвищує швидкість руху газів, змінює втрати тиску та може впливати на інтенсивність пиловиносу. Тому регулювання продуктивності вентилятора повинно виконуватися з урахуванням не лише необхідного розрідження, а й допустимого пилового навантаження на газоочисне обладнання.

Втрати тиску у газоходах, місцевих опорах, фільтрах і заслінках визначають енергетичні витрати на транспортування газового потоку. Для

					КНУ КРБ.174.26.10.01.ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

інженерного аналізу газових трактів часто використовується рівняння Дарсі-Вейсбаха, відповідно до якого втрати тиску залежать від швидкості потоку, довжини та діаметра газоходу, коефіцієнта тертя і місцевих опорів. У загальному вигляді втрати тиску можна подати як функцію витрати газу:

$$\Delta P = f(Q, R_r), \quad (1.2)$$

де ΔP – втрати тиску в елементі газового тракту; Q – витрата газу; R_r – узагальнений гідравлічний опір.

У реальних аспіраційних системах гідравлічний опір не є сталим. Він змінюється внаслідок забруднення газоходів, накопичення пилу на фільтрах, зміни положення заслінок, підсмоктування повітря через нещільності та деградації обладнання. Це ускладнює побудову точної математичної моделі системи та обґрунтовує використання спрощених динамічних моделей, достатніх для синтезу регуляторів.

Для задач автоматичного керування промисловими процесами часто використовуються моделі першого порядку із запізненням, або FOPDT-моделі. Така модель дозволяє описати основну динаміку об'єкта за допомогою трьох параметрів: коефіцієнта підсилення, сталої часу та транспортного запізнення [11, 14]. Її передавальна функція має вигляд:

$$W(s) = \frac{K \cdot e^{-\tau s}}{T \cdot s + 1}, \quad (1.3)$$

де K – коефіцієнт підсилення об'єкта; T – стала часу; τ – запізнення; s – оператор Лапласа.

Для системи аспірації FOPDT-модель є доцільною, оскільки вона дозволяє описати реакцію основних контурів на зміну керуючого впливу. Наприклад, контур розрідження можна подати як об'єкт, у якому зміна частоти обертання вентилятора призводить до зміни тиску у вакуум-камерах із певною інерційністю та невеликим запізненням. Контур перепаду тиску на фільтрі можна розглядати як динамічну систему, у якій керуючий вплив або режим очищення змінює гідравлічний опір фільтра.

Контур температури газів описує зміну температури перед фільтром у відповідь на підсмоктування холодного повітря або зміну режиму газового потоку.

Перевагою FOPDT-моделей є їх простота та практична придатність для налаштування ПІД-регуляторів. Вони не відображають усіх складних просторових і нелінійних процесів, що відбуваються в аспіраційному тракті, але дають змогу отримати інженерну модель, достатню для аналізу динаміки, вибору структури регулятора та проведення імітаційного моделювання. Такий підхід широко використовується у процесній автоматизації [11].

Основним засобом стабілізації технологічних параметрів у промислових системах є ПІД-регулятор. Його поширення пояснюється універсальністю, відносною простотою реалізації та можливістю налаштування для широкого класу об'єктів [11, 12]. У загальному вигляді закон ПІД-регулювання можна записати так:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + \frac{K_p}{T_i} \cdot \int e(t)dt + K_p \cdot T_d \cdot \frac{de(t)}{dt}, \quad (1.4)$$

де $u(t)$ – керуючий вплив; $e(t)$ – похибка регулювання; K_p – коефіцієнт пропорційної складової; T_i – стала часу інтегрування; T_d – стала часу диференціювання.

Пропорційна складова забезпечує реакцію регулятора на поточну похибку, інтегральна складова усуває статичну похибку, а диференційна складова враховує швидкість зміни похибки та може покращувати динамічні властивості системи. У промисловій реалізації диференційна складова зазвичай фільтрується, оскільки вимірювальні сигнали можуть містити шум, особливо у каналах тиску, перепаду тиску та пиломірів.

Для налаштування ПІД-регуляторів існує декілька підходів, серед яких методи Ziegler-Nichols, Cohen-Coon, налаштування за перехідною характеристикою, оптимізаційні методи та метод внутрішньої моделі. Для систем із технологічними та екологічними обмеженнями важливо не лише забезпечити швидкий перехідний процес, а й уникнути значного

перерегулювання. Тому для системи аспірації доцільним є використання методу внутрішньої моделі – ІМС, який дозволяє отримати більш робастне та плавне регулювання порівняно з агресивними методами налаштування [11, 14].

Метод ІМС базується на використанні моделі об'єкта для вибору параметрів регулятора. Одним із ключових параметрів налаштування є бажана швидкодія замкненої системи. Чим меншим є цей параметр, тим швидше працює регулятор, але тим більш чутливою стає система до похибок моделі та збурень. Чим більшим є цей параметр, тим повільнішим, але більш робастним є регулювання. Для аспіраційної системи доцільно обирати компромісне налаштування, оскільки надмірно швидке регулювання може спричинити коливання розрідження, збільшення навантаження на вентилятор або небажане зростання пиловиносу.

Важливою особливістю контуру розрідження є знак коефіцієнта підсилення об'єкта. Збільшення частоти вентилятора призводить до збільшення розрідження, тобто до зменшення тиску відносно атмосферного. Якщо регульована величина подається як від'ємне значення тиску, об'єкт має від'ємний коефіцієнт підсилення. У такому випадку для забезпечення стійкого негативного зворотного зв'язку регулятор повинен мати зворотну дію. Неправильний вибір напрямку дії регулятора може призвести до формування додатного зворотного зв'язку та втрати стійкості системи.

Крім класичного ПД-регулювання, для системи аспірації важливим є використання логіки пріоритетного керування. Це пов'язано з тим, що в системі одночасно діють технологічні, екологічні та аварійні обмеження. У штатному режимі основним завданням є стабілізація розрідження. Проте при перевищенні температури газів, зростанні концентрації пилу або критичному перепаді тиску на фільтрі пріоритет повинні отримувати захисні та обмежувальні алгоритми. Такий принцип відповідає підходам селективного або Override-керування, які використовуються у процесній автоматизації для роботи з конфліктними обмеженнями [11, 13].

					КНУ КРБ.174.26.10.01.ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Override Control передбачає, що декілька регуляторів або логічних блоків можуть формувати керуючі дії для одного виконавчого механізму, але фактичне керування визначається пріоритетом або селектором. Наприклад, у нормальному режимі частота вентилятора може визначатися регулятором розрідження. Якщо концентрація пилу наближається до граничного значення, система може зменшити уставку розрідження або обмежити продуктивність, щоб зменшити пиловинос. Якщо температура перед фільтром перевищує допустимий рівень, пріоритет отримує температурний захист. Якщо виникає аварія, усі інші контури підпорядковуються логіці безпечної зупинки.

Для системи аспірації доцільною є така послідовність пріоритетів: аварійний захист обладнання, захист фільтра від перегріву, дотримання екологічних обмежень, підтримання технологічного розрідження та енергетична оптимізація. Такий порядок забезпечує, що система не буде підтримувати технологічний параметр ціною порушення безпеки або екологічних вимог.

Ще одним важливим теоретичним підходом є gain scheduling, або планування коефіцієнтів регулятора. Цей метод використовується тоді, коли динамічні властивості об'єкта суттєво змінюються залежно від режиму роботи [11]. Для системи аспірації типовим прикладом є контур перепаду тиску на фільтрі. У міру накопичення пилу фільтр змінює свій гідравлічний опір, а отже змінюється коефіцієнт підсилення об'єкта. Регулятор, налаштований для чистого фільтра, може працювати незадовільно при забитому фільтрі. Тому параметри регулятора доцільно змінювати залежно від поточного перепаду тиску або оціненого ступеня забивання.

Gain scheduling не потребує повної адаптивної ідентифікації моделі в реальному часі. Він передбачає попереднє визначення декількох режимів роботи та відповідних наборів параметрів регулятора. Наприклад, для станів “чистий фільтр”, “нормальне навантаження” та “забитий фільтр” можуть використовуватися різні значення коефіцієнта підсилення регулятора. Перемикання між ними виконується за значенням перепаду тиску або іншого

діагностичного показника. Такий підхід є достатньо простим для реалізації на ПЛК і водночас дозволяє підвищити якість керування в умовах зміни властивостей об'єкта.

Програмна реалізація алгоритмів керування у промислових системах виконується на базі програмованих логічних контролерів. Для таких задач важливим є стандарт ІЕС 61131-3, який визначає мови програмування ПЛК, зокрема Ladder Diagram, Function Block Diagram, Structured Text та інші [15]. Для розроблення алгоритмів регулювання, логіки режимів, обробки аварій і взаємодії з виконавчими механізмами доцільно використовувати структурований підхід із виділенням окремих функціональних блоків.

У системі аспірації на рівні ПЛК мають реалізовуватися найбільш критичні функції: опитування датчиків, фільтрація сигналів, ПІД-регулювання розрідження, контроль перепаду тиску, температурний захист, керування імпульсним очищенням, обробка аварійних ситуацій і формування команд на виконавчі механізми. Ці функції повинні працювати незалежно від наявності зв'язку з верхнім рівнем, оскільки саме ПЛК забезпечує безпосередню безпеку та надійність технологічного процесу.

Верхній рівень автоматизованої системи може виконувати функції візуалізації, архівування, аналітики та інформаційної підтримки персоналу. У сучасних промислових архітектурах для цього дедалі частіше використовуються технології промислового Інтернету речей. Загальні принципи побудови IoT-архітектур передбачають наявність польового рівня, рівня збору даних, комунікаційного рівня, рівня зберігання та прикладного рівня аналітики [1].

У промислових умовах важливо забезпечити надійний і стандартизований обмін даними між ПЛК, Edge-шлюзом, SCADA або IIoT-платформою. Одним із ключових стандартів для такого обміну є OPC UA. Він забезпечує уніфікований доступ до даних промислових пристроїв, підтримує інформаційні моделі, механізми безпеки та платформонезалежну взаємодію [18, 19]. У системі аспірації OPC UA може використовуватися для передавання

					КНУ КРБ.174.26.10.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

значень тиску, температури, перепаду тиску, концентрації пилу, станів обладнання, режимів роботи та аварійних сигналів з ПЛК на Edge-рівень.

Для передавання телеметричних даних від Edge-рівня до IoT-платформи доцільним є використання протоколу MQTT. Він реалізує модель публікації та підписки, у якій пристрої або шлюзи публікують повідомлення у певні топіки, а споживачі даних підписуються на них [20]. Перевагами MQTT є невеликі накладні витрати, простота інтеграції та зручність передавання даних від великої кількості пристроїв. У системі аспірації MQTT може застосовуватися для передавання телеметрії, аварійних подій і діагностичних параметрів.

Роль Edge-рівня полягає у проміжній обробці даних між промисловим контролером і верхнім рівнем. Для цього може використовуватися Node-RED — інструмент візуального створення потоків обробки даних [21]. За його допомогою можна організувати опитування OPC UA-сервера ПЛК, перетворення даних у потрібний формат, публікацію MQTT-повідомлень, запис даних у базу часових рядів і формування простих правил обробки подій.

Для зберігання історичних параметрів доцільно використовувати бази даних часових рядів, оскільки технологічні параметри системи аспірації мають часову природу. Такі дані включають тренди розрідження, перепаду тиску, температури, концентрації пилу, частоти вентилятора, потужності та станів фільтрувальних секцій. Бази часових рядів, зокрема InfluxDB, оптимізовані для запису, зберігання та аналізу таких даних [25].

Для візуалізації технологічних параметрів і побудови дашбордів може використовуватися IoT-платформа ThingsBoard. Вона підтримує приймання телеметрії, відображення поточних значень і трендів, налаштування правил обробки подій і формування сповіщень [22]. У системі аспірації така платформа може забезпечувати відображення стану вентилятора, фільтра, клапанів очищення, концентрації пилу, аварійних повідомлень і показників енергоефективності.

Накопичення історичних даних створює основу для прогнозного обслуговування. Його суть полягає в оцінюванні технічного стану обладнання на основі аналізу фактичних параметрів роботи, виявленні ознак деградації та прогнозуванні моменту, коли обладнання потребуватиме обслуговування [33, 34]. Для системи аспірації такими ознаками можуть бути поступове зростання перепаду тиску після очищення, зменшення ефективності імпульсного продування, збільшення вібрації вентилятора, підвищення енергоспоживання при незмінній продуктивності або збільшення частоти перевищень концентрації пилу.

Теоретична основа прогнозного обслуговування включає трендовий аналіз, порогову діагностику, статистичну обробку даних, виявлення аномалій і побудову простих моделей деградації. Для бакалаврської роботи достатнім є використання концептуального рівня такого підходу: визначення діагностичних параметрів, логіки накопичення історичних даних, критеріїв попередження та способів відображення стану обладнання оператору.

Таким чином, теоретична база автоматизації системи аспірації аглофабрики охоплює як класичні положення теорії автоматичного керування, так і сучасні підходи до промислової цифровізації. Для нижнього рівня системи основними є моделі динаміки газового тракту, ПІД-регулювання, ІМС-налаштування, логіка захистів і пріоритетне керування. Для верхнього рівня важливими є принципи промислового обміну даними, використання OPC UA та MQTT, Edge-обробка, зберігання часових рядів, візуалізація та аналітика. Поєднання цих підходів дозволяє перейти від локальної системи стабілізації розрідження до комплексної автоматизованої системи аспірації з функціями моніторингу, діагностики та підтримки прийняття рішень.

1.6 Постановка задачі автоматизації

Проведений аналіз технологічного процесу агломерації, структури системи аспірації, основних технологічних параметрів, збурень, режимів

					КНУ КРБ.174.26.10.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

роботи та існуючих підходів до автоматизації дає підстави сформулювати задачу розроблення автоматизованої системи керування аспірацією аглофабрики. Необхідність такої системи зумовлена тим, що аспірація одночасно впливає на стабільність процесу спікання, ефективність очищення відхідних газів, енергоспоживання тягодутьового обладнання та дотримання екологічних обмежень.

У традиційних системах керування аспірацією основна увага часто приділяється локальному регулюванню розрідження або підтриманню працездатності фільтрувального обладнання. Такий підхід є необхідним, але недостатнім для сучасних умов експлуатації, оскільки не забезпечує повною мірою комплексне врахування технологічних, екологічних, енергетичних та діагностичних факторів. Система аспірації аглофабрики повинна не лише підтримувати задані параметри, а й своєчасно реагувати на збурення, контролювати стан фільтрів, запобігати перевищенню допустимої концентрації пилу, забезпечувати захист обладнання та формувати дані для подальшого аналізу.

З урахуванням особливостей агломераційного процесу та вимог до промислових газоочисних систем [1–3, 6, 27, 31] об'єктом автоматизації в даній роботі приймається система аспірації аглофабрики, що включає вакуум-камери агломераційної машини, газоходи, фільтрувальне обладнання, тягодутьовий вентилятор із частотно-регульованим приводом, систему імпульсного очищення фільтрів, засоби контролю температури, тиску, перепаду тиску, концентрації пилу та промислові засоби збору і передавання даних.

Основною метою автоматизації є забезпечення стабільної, безпечної, екологічно контрольованої та енергоефективної роботи системи аспірації шляхом поєднання локальних контурів автоматичного регулювання, логіки пріоритетного керування та ІІоТ-рівня моніторингу й аналітичної обробки даних.

Для досягнення цієї мети автоматизована система повинна вирішувати такі основні задачі:

- підтримувати задане розрідження під шаром шихти шляхом керування частотою обертання тягодутьового вентилятора;
- контролювати перепад тиску на фільтрувальному обладнанні та використовувати його як показник ступеня забивання фільтра;
- забезпечувати автоматичне або напівавтоматичне керування імпульсним очищенням фільтрів залежно від перепаду тиску та режиму роботи;
- контролювати температуру газів перед фільтром і активувати захисні дії при наближенні до граничного значення;
- контролювати концентрацію пилу у відхідних газах після очищення та формувати попередження або пріоритетні дії при наближенні до екологічних обмежень;
- реалізувати логіку режимів роботи NORMAL, WARNING, VIOLATION, CLEANING та EMERGENCY;
- забезпечити пріоритетне керування, за якого аварійний захист, захист фільтра та екологічні обмеження мають вищий пріоритет, ніж підтримання оптимального технологічного режиму;
- організувати збирання, передавання, архівування та візуалізацію технологічних параметрів засобами промислового Інтернету речей;
- створити інформаційну основу для аналізу стану фільтрувального обладнання, оцінювання енергоефективності та прогнозного обслуговування.

Для реалізації поставлених задач необхідно визначити основні регульовані величини, керуючі впливи та контрольовані параметри системи. Узагальнена постановка задачі керування наведена у таблиці 1.9.

З точки зору структури автоматизованої системи доцільно передбачити декілька рівнів. Польовий рівень має включати датчики тиску, перепаду тиску, температури, витрати, концентрації пилу, а також виконавчі механізми: частотний привод вентилятора, клапани імпульсного очищення, регульовальні заслінки та клапани підсмоктування повітря.

					КНУ КРБ.174.26.10.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

Таблиця 1.9 – Узагальнена постановка задачі керування системою аспірації

Параметр	Роль у системі керування	Основний керуючий або контрольний вплив	Очікуваний результат
Розрідження під шаром шихти	Основна регульована величина	Частота обертання вентилятора	Стабілізація газодинамічного режиму спікання
Перепад тиску на фільтрі	Регульований і діагностичний параметр	Імпульсне очищення, адаптація параметрів керування	Підтримання працездатності фільтра
Температура газів перед фільтром	Обмежувальний параметр	Підсмоктування повітря, захисна логіка	Захист фільтрувальних елементів від перегріву
Концентрація пилу після очищення	Екологічний контрольний параметр	Корекція режиму, попередження, аварійна логіка	Дотримання екологічних обмежень
Частота вентилятора	Керуючий вплив	Сигнал на частотний перетворювач	Регулювання витрати газів і розрідження
Стан фільтрувальних секцій	Діагностичний параметр	Моніторинг циклів очищення	Оцінювання ефективності регенерації
Потужність вентилятора	Енергетичний параметр	Аналіз режиму роботи	Оцінювання енергоефективності

Рівень програмованого логічного контролера повинен забезпечувати обробку сигналів, реалізацію ПІД-регуляторів, логіку режимів, аварійні захисти та формування команд на виконавчі механізми відповідно до вимог стандарту ІЕС 61131-3 [15].

Edge- та ІоТ-рівень має забезпечувати передавання даних від ПЛК до системи моніторингу, їх попередню обробку, публікацію телеметрії, архівування та візуалізацію. Для промислового обміну даними доцільно використати OPC UA, оскільки цей стандарт забезпечує уніфікований доступ до даних контролера та підтримує платформонезалежну взаємодію промислових систем [18, 19].

Для передавання телеметрії на IoT-платформу доцільно застосувати MQTT, що відповідає моделі publish/subscribe і широко використовується у системах промислового Інтернету речей [20]. Як інструмент інтеграції може бути використано Node-RED [21], а для візуалізації та роботи з телеметрією — IoT-платформу ThingsBoard [22].

Функціонально система автоматизації повинна забезпечувати як локальне керування, так і інформаційно-аналітичні функції. Локальне керування має залишатися працездатним незалежно від стану верхнього рівня, оскільки саме ПЛК відповідає за безпосередню стабілізацію параметрів і безпеку обладнання. IoT-рівень, у свою чергу, повинен розширювати можливості системи за рахунок архівування даних, побудови трендів, формування аварійних повідомлень, аналізу стану фільтрів та підготовки інформації для оцінювання екологічних і енергетичних показників.

З огляду на змінність характеристик фільтрувального обладнання, у системі доцільно передбачити адаптацію параметрів керування перепадом тиску на фільтрі. У міру накопичення пилу гідравлічний опір фільтра змінюється, що впливає на динамічні властивості відповідного контуру. Тому для цього контуру необхідно розглянути можливість використання gain scheduling, тобто зміни параметрів регулятора залежно від поточного стану фільтра [11]. Такий підхід дозволяє підвищити якість керування без значного ускладнення програмної реалізації.

Окремою задачею є реалізація логіки пріоритетного керування. Для системи аспірації доцільно встановити таку послідовність пріоритетів: аварійний захист, захист фільтрувального обладнання від перегріву, дотримання екологічних обмежень, підтримання технологічного розрідження, енергетична оптимізація. Така логіка дозволяє уникнути ситуацій, коли локальне підтримання технологічного параметра призводить до порушення безпеки або екологічних вимог. Теоретичною основою для цього є підходи селективного та Override-керування, що застосовуються у промисловій автоматизації складних процесів [11, 13].

					КНУ КРБ.174.26.10.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

З урахуванням поставлених задач у подальшому проектуванні необхідно виконати такі етапи:

- сформулювати функціональні та нефункціональні вимоги до автоматизованої системи;
- розробити загальну архітектуру системи автоматизації аспірації аглофабрики;
- визначити склад польового обладнання, вимірювальних каналів і виконавчих механізмів;
- сформулювати інформаційну структуру системи, перелік основних сигналів і тегів;
- побудувати математичні моделі основних контурів керування;
- синтезувати регулятори розрідження, перепаду тиску на фільтрі та температури газів;
- розробити логіку пріоритетного керування режимами роботи;
- виконати імітаційне моделювання роботи системи та оцінити якість перехідних процесів;
- запропонувати програмно-апаратну реалізацію на базі ПЛК та засобів ІоТ;
- описати структуру моніторингу, архівування та аналітичної обробки даних.

Очікуваним результатом автоматизації є проєктне рішення системи керування аспірацією аглофабрики, яке забезпечує стабілізацію основних технологічних параметрів, контроль екологічних обмежень, захист фільтрувального обладнання, підвищення енергоефективності роботи вентилятора та створення цифрової інформаційної бази для моніторингу й прогностного обслуговування. Практична цінність такого рішення полягає у можливості його використання як основи для модернізації існуючих аспіраційних систем агломераційного виробництва.

					<i>КНУ КРБ.174.26.10.01.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

Таким чином, постановка задачі автоматизації полягає у розробленні комплексної системи керування аспірацією аглофабрики, що поєднує класичні контури регулювання, пріоритетну логіку захистів і режимів, засоби промислового обміну даними та IoT-інструменти моніторингу й аналітики. Сформульована задача є основою для подальшого проектування та апробації системи у другому розділі роботи.

Висновки за розділом:

У першому розділі бакалаврської роботи виконано аналіз технологічного процесу агломерації та визначено роль системи аспірації у забезпеченні стабільної роботи аглофабрики. Показано, що система аспірації є невід’ємною частиною агломераційної машини, оскільки забезпечує створення розрідження під шаром шихти, відсмоктування та транспортування запиленних газів, їх очищення, а також підтримання безпечних та екологічно прийнятних умов експлуатації обладнання.

Встановлено, що система аспірації виконує одночасно технологічну, екологічну та енергетичну функції. Технологічна функція полягає у формуванні необхідного газодинамічного режиму спікання, екологічна – у зменшенні концентрації пилу та інших забруднювальних речовин у відхідних газах, а енергетична – у раціональному використанні потужності тягодутьового вентилятора. Це обумовлює необхідність комплексного підходу до автоматизації, який враховує не лише підтримання окремих параметрів, а й взаємозв’язок між технологічними, екологічними та енергетичними показниками.

Систему аспірації розглянуто як складний багатоконтурний об’єкт автоматизації. Визначено її основні елементи: вакуум-камери, газоходи, фільтрувальне обладнання, тягодутьовий вентилятор із частотно-регульованим приводом, систему імпульсного очищення фільтрів, засоби контролю температури, тиску, перепаду тиску та концентрації пилу. Визначено основні

					<i>КНУ КРБ.174.26.10.01.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

регульовані величини, контрольовані параметри та керуючі впливи, необхідні для побудови автоматизованої системи керування.

Проаналізовано основні технологічні параметри, збурення та режими роботи системи аспірації. Встановлено, що найбільш важливими параметрами для керування є розрідження під шаром шихти, перепад тиску на фільтрі, температура газів перед фільтром і концентрація пилу після очищення. До основних збурень віднесено зміну продуктивності агломації, вологості та гранулометричного складу шихти, зміну гідравлічного опору газового тракту, забивання фільтрів, зношування обладнання та вплив зовнішніх умов.

Визначено основні режими роботи системи: NORMAL, WARNING, VIOLATION, CLEANING та EMERGENCY. Показано, що для ефективної роботи системи недостатньо лише локального регулювання окремих параметрів. Необхідно реалізувати логіку пріоритетного керування, у якій найвищий пріоритет мають аварійний захист, захист фільтрувального обладнання та дотримання екологічних обмежень, а вже після цього – підтримання оптимального технологічного режиму та енергоефективність.

Розглянуто існуючі підходи до автоматизації аспіраційних і газоочисних систем. Встановлено, що традиційні рішення на основі ПІД-регулювання, частотного керування вентиляторами, автоматичного очищення фільтрів, SCADA-систем і засобів безперервного контролю викидів є необхідною основою для автоматизації. Однак сучасні вимоги до промислових систем потребують їх доповнення засобами промислового Інтернету речей, які забезпечують збирання, передавання, архівування, візуалізацію та аналітичну обробку технологічних даних.

Сформовано теоретичну базу для подальшого проектування системи автоматизації. Визначено доцільність використання FOPDT-моделей для опису динаміки основних контурів керування, ПІД-регуляторів для стабілізації технологічних параметрів, методу ІМС для отримання робастних налаштувань регуляторів, Override Control для реалізації пріоритетної логіки режимів та gain scheduling для адаптації параметрів керування при зміні стану фільтра.

					КНУ КРБ.174.26.10.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

Обґрунтовано доцільність побудови багаторівневої архітектури системи автоматизації. Нижній рівень має забезпечувати надійне локальне керування та захист обладнання на базі програмованого логічного контролера, а верхній рівень — моніторинг, архівування, візуалізацію та аналітичну обробку даних з використанням OPC UA, MQTT, Edge-шлюзу, IoT-платформи та бази даних часових рядів. Такий підхід дозволяє поєднати класичну промислову автоматизацію з сучасними цифровими інструментами підтримки експлуатації.

На основі проведеного аналізу сформульовано постановку задачі автоматизації. Подальше проектування має бути спрямоване на розроблення структури автоматизованої системи керування аспірацією аглофабрики, визначення вимог до системи, побудову математичних моделей основних контурів, синтез алгоритмів керування, реалізацію логіки режимів, імітаційну перевірку якості керування та обґрунтування IoT-рівня моніторингу й аналітики.

РОЗДІЛ 2

ПРОЄКТУВАННЯ ТА АПРОБАЦІЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ АСПІРАЦІЇ АГЛОФАБРИКИ

2.1 Вимоги до системи автоматизації

На основі аналізу технологічного процесу аспірації аглофабрики, характеристик об'єкта автоматизації, основних збурень, режимів роботи та існуючих підходів до автоматизації сформульовано вимоги до автоматизованої системи керування. Ці вимоги визначають загальну логіку подальшого проєктування системи, вибору її архітектури, розроблення алгоритмів керування та організації ПоТ-рівня моніторингу.

Автоматизована система керування аспірацією аглофабрики повинна забезпечувати стабілізацію основних технологічних параметрів аспіраційного тракту, контроль стану газоочисного обладнання, своєчасне реагування на відхилення, формування аварійних і попереджувальних повідомлень, архівування технологічних даних та інформаційну підтримку оператора. При цьому найбільш критичні функції керування і захисту мають виконуватися на рівні програмованого логічного контролера, а функції візуалізації, архівування та аналітичної обробки даних — на Edge- та ПоТ-рівнях.

Основною функціональною вимогою є підтримання заданого розрідження під шаром шихти. Для цього система повинна вимірювати поточне значення розрідження, порівнювати його із заданим значенням і формувати керуючий вплив на частотно-регульований привод тягодутьового вентилятора. Якість роботи цього контуру безпосередньо впливає на газодинамічний режим спікання, тому регулювання розрідження розглядається як базова функція нижнього рівня автоматизації.

					КНУ КРБ.174.26.05.02.ПЗ						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Рябко О.О.			РОЗДІЛ 2			Літ.	Арк.	Аркушів	
Перевір.		Жосан А.А.								25	37
Н. Контр.		Маринич І.А.									
Затверд.		Маринич І.А.									
					КНУ АКІТР-23ск						

Другою важливою вимогою є контроль перепаду тиску на фільтрувальному обладнанні. Перепад тиску повинен використовуватися як показник ступеня забивання фільтра та ефективності його очищення. При досягненні встановленого порогового значення система має ініціювати цикл імпульсного очищення або сформувати попередження оператору. Крім того, динаміка зміни перепаду тиску може використовуватися для оцінювання технічного стану фільтрів і подальшого прогнозного обслуговування.

Система також повинна забезпечувати контроль температури газів перед фільтром. Ця вимога пов'язана із захистом фільтрувальних елементів від перегріву. При наближенні температури до допустимого граничного значення система має формувати попередження, а у разі небезпечного перевищення — активувати захисні дії, зокрема відкриття клапана підсмоктування повітря або переведення обладнання у безпечний режим.

Окремою функціональною вимогою є контроль концентрації пилу у відхідних газах після очищення. Цей параметр використовується для оцінювання ефективності газоочищення та виявлення порушень у роботі фільтрів. При наближенні концентрації пилу до граничного значення система повинна формувати попередження, а при перевищенні — активувати логіку пріоритетного керування. Така логіка може передбачати корекцію режиму аспірації, запуск додаткового очищення фільтрів або формування сигналу про необхідність втручання оператора.

Важливою вимогою є реалізація режимів роботи системи. У межах проєктованої системи передбачаються режими NORMAL, WARNING, VIOLATION, CLEANING та EMERGENCY. У нормальному режимі система підтримує задане розрідження, контролює перепад тиску, температуру та концентрацію пилу. У режимі попередження вона реагує на наближення параметрів до допустимих меж. У режимі порушення пріоритет надається екологічним і технологічним обмеженням. У режимі очищення виконується імпульсна регенерація фільтрів. В аварійному режимі система повинна перевести обладнання у безпечний стан.

					КНУ КРБ.174.26.05.02.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

Для узгодження роботи різних контурів система повинна реалізовувати логіку пріоритетного керування. Найвищий пріоритет мають аварійний захист і захист обладнання, далі – дотримання екологічних обмежень, підтримання технологічного розрідження та енергоефективність. Такий підхід дозволяє уникнути ситуацій, коли стабілізація одного параметра призводить до порушення безпеки, перегріву фільтра або перевищення допустимої концентрації пилу.

До нефункціональних вимог належать надійність, швидкодія, відмовостійкість, масштабованість, інформаційна відкритість і зручність експлуатації. Система повинна працювати безперервно в умовах промислового виробництва, коректно обробляти відмови датчиків і виконавчих механізмів, формувати аварійні повідомлення та зберігати працездатність базових контурів керування навіть у разі втрати зв'язку з верхнім рівнем. Критичні функції керування та захисту мають бути реалізовані на рівні ПЛК відповідно до принципів промислового програмування за стандартом IEC 61131-3 [15].

З погляду інформаційної взаємодії система повинна підтримувати передавання технологічних даних на верхній рівень для візуалізації, архівування та аналітичної обробки. Для промислового обміну між ПЛК та Edge-рівнем доцільно використовувати OPC UA, який забезпечує стандартизований доступ до даних контролера [18, 19]. Для передавання телеметрії до IoT-платформи може використовуватися MQTT, що відповідає моделі publish/subscribe та добре підходить для передавання промислових даних [20]. Інтеграційний рівень може бути реалізований на базі Node-RED [21], а рівень візуалізації та моніторингу – із застосуванням IoT-платформи ThingsBoard [22].

Важливою вимогою є розмежування функцій керування та аналітики. IoT-рівень не повинен замінювати ПЛК у критичних функціях керування, оскільки затримки передавання даних або порушення мережевого зв'язку можуть негативно вплинути на безпеку технологічного процесу. Тому ПЛК

					<i>КНУ КРБ.174.26.10.02.ПЗ</i>	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

має забезпечувати локальне регулювання, захисти, логіку режимів та керування виконавчими механізмами, а ПоТ-рівень — виконувати функції інформаційно-аналітичної надбудови.

Система повинна забезпечувати архівування основних технологічних параметрів: розрідження, перепаду тиску, температури газів, концентрації пилу, частоти вентилятора, стану клапанів очищення, режиму роботи та аварійних подій. Накопичені дані мають використовуватися для побудови трендів, аналізу причин відхилень, оцінювання енергоефективності та формування інформаційної бази для прогнозного обслуговування фільтрувального й вентиляторного обладнання.

Таким чином, вимоги до системи автоматизації аспірації аглофабрики передбачають поєднання надійного локального керування з можливостями сучасних ПоТ-технологій. Проектована система повинна забезпечувати стабілізацію розрідження, контроль стану фільтрів, температурний і екологічний захист, реалізацію режимів роботи, архівування параметрів та візуалізацію даних. Ці вимоги є основою для подальшого розроблення загальної архітектури системи автоматизації.

2.2 Загальна архітектура системи автоматизації

З урахуванням сформульованих вимог автоматизовану систему керування аспірацією аглофабрики доцільно будувати як багаторівневу систему, у якій функції безпосереднього керування, захисту, збору даних, моніторингу та аналітики розподілені між окремими рівнями. Такий підхід відповідає загальним принципам побудови сучасних промислових систем автоматизації та дозволяє поєднати надійність локального керування з гнучкістю ПоТ-рішень.

У проєктованій системі виділено чотири основні рівні: польовий рівень, рівень програмованого логічного контролера, Edge-рівень інтеграції даних та

					<i>КНУ КРБ.174.26.10.02.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

рівень IoT-моніторингу й аналітики. Кожен із цих рівнів виконує власні функції та взаємодіє з іншими через уніфіковані промислові інтерфейси.

Польовий рівень містить засоби вимірювання технологічних параметрів і виконавчі механізми. До вимірювальних засобів належать датчики розрідження під шаром шихти, датчики перепаду тиску на фільтрі, датчики температури газів перед фільтром, витратоміри газового потоку, датчики концентрації пилу після очищення, а також сигнали стану вентилятора, частотного перетворювача, клапанів очищення та регулювальних заслінок. Виконавчими механізмами є частотно-регульований привод тягодутьового вентилятора, клапани імпульсного очищення фільтрів, клапан або заслінка підсмоктування повітря, а також інші пристрої, що забезпечують зміну режиму роботи аспіраційного тракту.

Рівень програмованого логічного контролера є основним рівнем керування. На ньому реалізуються критичні функції, які безпосередньо впливають на безпеку та стабільність технологічного процесу: опитування датчиків, первинна фільтрація вимірювальних сигналів, масштабування аналогових значень, ПІД-регулювання розрідження, контроль перепаду тиску на фільтрі, температурний захист, керування імпульсним очищенням, обробка аварійних ситуацій і формування команд на виконавчі механізми. Програмна реалізація алгоритмів на цьому рівні повинна відповідати принципам стандарту ІЕС 61131-3 [15].

Найважливішою вимогою до рівня ПЛК є автономність. Навіть у разі втрати зв'язку з Edge-рівнем або IoT-платформою контролер повинен продовжувати виконувати базові функції керування й захисту. Це означає, що верхній рівень не повинен брати на себе функції безпосереднього регулювання розрідження або аварійної зупинки. Його призначення полягає у розширенні інформаційних і аналітичних можливостей системи, а не у заміні локальної автоматики.

					<i>КНУ КРБ.174.26.10.02.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

Edge-рівень виконує функцію проміжної ланки між ПЛК та IoT-рівнем. Його основне призначення полягає у збиранні даних з контролера, перетворенні форматів, первинній обробці телеметрії, публікації повідомлень і передаванні даних до системи моніторингу або бази даних. У межах проєктованої системи Edge-рівень доцільно реалізувати на базі Node-RED, який дозволяє створювати потоки обробки даних та інтегрувати промислові протоколи OPC UA і MQTT [21].

Для обміну даними між ПЛК та Edge-рівнем доцільно використовувати OPC UA. Цей стандарт забезпечує уніфікований доступ до даних промислових пристроїв, підтримує структуроване представлення змінних, механізми безпеки та платформонезалежну взаємодію [18, 19]. У розроблюваній системі ПЛК виступає джерелом технологічних даних, а Edge-шлюз зчитує значення змінних: розрідження, перепаду тиску, температури, концентрації пилу, частоти вентилятора, станів клапанів, режиму роботи та аварійних повідомлень.

Для передавання телеметрії від Edge-рівня до IoT-платформи використовується MQTT. Цей протокол працює за моделлю publish/subscribe, що є зручним для передавання даних від промислових пристроїв до систем моніторингу й аналітики [20]. У такій схемі Node-RED формує MQTT-повідомлення з технологічними параметрами та публікує їх у відповідні топіки. IoT-платформа або інші сервіси підписуються на ці топіки та отримують актуальні дані для відображення, архівування й аналізу.

IoT-рівень призначений для візуалізації, архівування, аналізу технологічних параметрів і підтримки прийняття рішень. На цьому рівні можуть використовуватися IoT-платформа ThingsBoard, база даних часових рядів InfluxDB та аналітичний сервіс. ThingsBoard забезпечує приймання телеметрії, побудову дашбордів, відображення поточних значень і трендів, формування повідомлень та візуалізацію стану обладнання [22]. База даних часових рядів використовується для довготривалого зберігання історичних параметрів і подальшого аналізу тенденцій [25].

					<i>КНУ КРБ.174.26.10.02.ПЗ</i>	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Аналітичний рівень може виконувати розрахунок діагностичних та експлуатаційних показників. До таких показників належать середні та максимальні значення перепаду тиску на фільтрі, тривалість роботи у різних режимах, кількість спрацювань імпульсного очищення, частота аварійних подій, тенденція зростання опору фільтра, питоме енергоспоживання вентилятора та періоди наближення концентрації пилу до граничних значень. Накопичення таких даних створює основу для прогностного обслуговування фільтрів і вентиляторного обладнання [33, 34].

Загальна структура системи автоматизації наведена на рисунку 2.1.

У межах цієї архітектури потік даних має такий вигляд. На польовому рівні датчики формують сигнали про поточний стан аспіраційного тракту. Ці сигнали надходять до ПЛК, де виконуються масштабування, фільтрація, перевірка достовірності та використання у контурах керування. ПЛК формує команди на виконавчі механізми: частотний перетворювач вентилятора, клапани очищення, заслінки та пристрої захисту. Одночасно ПЛК передає основні технологічні параметри на Edge-рівень через OPC UA.

На Edge-рівні Node-RED виконує читання даних з OPC UA-сервера контролера, формує структуровані повідомлення, виконує первинну перевірку значень і передає телеметрію на IoT-рівень через MQTT. Крім того, Edge-рівень може виконувати допоміжні функції: перетворення одиниць вимірювання, об'єднання параметрів у пакети, фільтрацію надлишкових повідомлень, формування подій за простими умовами та дублювання даних у локальне сховище.

На IoT-рівні дані відображаються оператору у вигляді дашбордів, трендів і аварійних повідомлень. Для системи аспірації доцільно передбачити окремі екрани моніторингу: загальний стан системи, контур розрідження, стан фільтрувального обладнання, температура газів, концентрація пилу, робота імпульсного очищення, енергоспоживання вентилятора та журнал подій. Така структура візуалізації дозволяє оператору швидко оцінити стан системи та виявити причину відхилення.

					<i>КНУ КРБ.174.26.10.02.ПЗ</i>	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

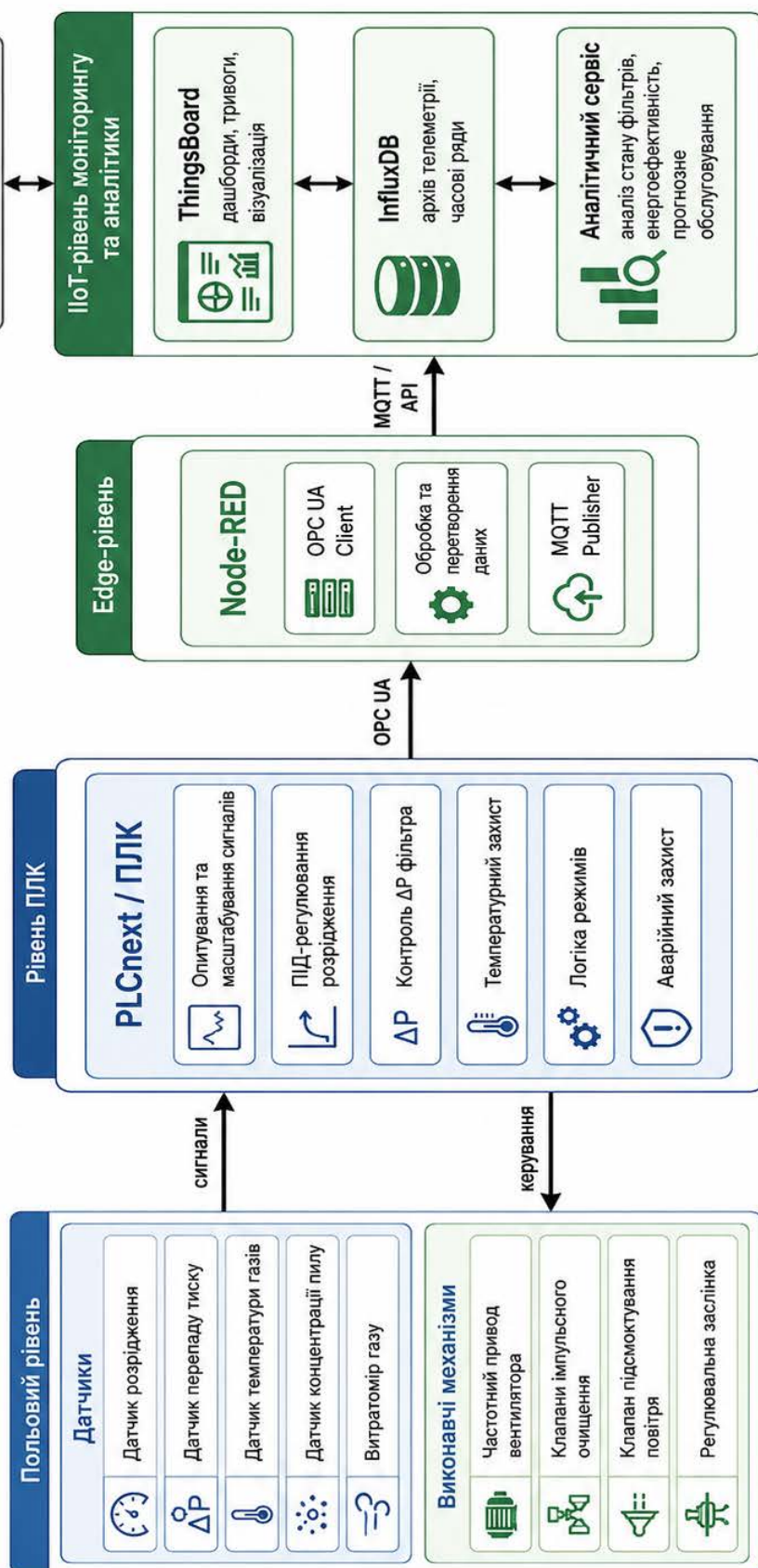


Рисунок 2.1 – Загальна архітектура системи автоматизації процесу аспірації аглофабрики

Важливим принципом побудови архітектури є розмежування потоків керування та потоків даних. Потік керування залишається всередині нижнього рівня: ПЛК отримує сигнали від датчиків, виконує алгоритми керування та подає команди на виконавчі механізми. Потік даних спрямований вгору: від ПЛК до Edge-рівня, далі до IoT-платформи, бази даних і аналітичних сервісів. Такий підхід підвищує надійність системи, оскільки втрата верхнього рівня не призводить до втрати базових функцій керування.

Для захисту системи від некоректних дій верхнього рівня керуючі команди, що можуть надходити з IoT-рівня, повинні бути обмежені. Наприклад, оператор може змінити уставку розрідження або підтвердити аварійне повідомлення, але остаточна перевірка допустимості команди має виконуватися на рівні ПЛК. Це дозволяє запобігти передаванню недопустимих значень уставок або команд, що суперечать поточному режиму роботи системи.

Запропонована архітектура також підтримує подальше масштабування. До системи можуть бути додані додаткові датчики, нові секції фільтрів, вібраційний контроль вентилятора, вимірювання потужності електродвигуна, додаткові газоаналізатори або аналітичні модулі. Завдяки використанню OPC UA та MQTT такі зміни можуть бути реалізовані без повної перебудови структури системи.

Таким чином, загальна архітектура системи автоматизації аспірації аглофабрики поєднує надійне локальне керування на рівні ПЛК із можливостями Edge-інтеграції та IoT-моніторингу. Польовий рівень забезпечує отримання первинних даних і вплив на обладнання, ПЛК реалізує критичні алгоритми керування та захисту, Edge-рівень забезпечує обмін і попередню обробку даних, а IoT-рівень виконує функції візуалізації, архівування та аналітики. Така структура є основою для подальшого розроблення інформаційної структури системи, математичних моделей контурів керування та алгоритмів автоматизації.

					<i>КНУ КРБ.174.26.10.02.ПЗ</i>	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.3 Математичне моделювання контурів керування системи автоматизації процесу аспірації

Математичне моделювання є необхідним етапом розроблення автоматизованої системи керування аспірацією аглофабрики, оскільки дозволяє описати динамічні властивості об'єкта, визначити взаємозв'язок між керуючими впливами та регульованими параметрами, а також підготувати основу для синтезу регуляторів. У межах даної роботи моделювання виконується для трьох основних контурів: контуру розрідження під шаром шихти, контуру перепаду тиску на фільтрі та контуру температури газів перед фільтром.

Система аспірації належить до гідрогазодинамічних об'єктів, для яких характерні відносно швидкі перехідні процеси, порівняно невеликі транспортні запізнення та залежність параметрів від витрати газового потоку, гідравлічного опору тракту й стану фільтрувального обладнання. Побудова повної фізичної моделі такої системи потребувала б детального врахування геометрії газоходів, характеристик вентилятора, локальних опорів, властивостей пилу, стану фільтрів та розподілу тиску вздовж аспіраційного тракту. Для задач синтезу регуляторів у межах бакалаврської роботи доцільно використати спрощені інженерні моделі, які відображають домінуючу динаміку об'єкта.

Для опису основних контурів керування використано модель першого порядку із запізненням – FOPDT. Такий підхід широко застосовується у процесній автоматизації, оскільки дозволяє описати реакцію об'єкта на зміну керуючого впливу за допомогою трьох параметрів: коефіцієнта підсилення, сталої часу та запізнення [11, 14].

					КНУ КРБ.174.26.10.02.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

Загальний вигляд передавальної функції об'єкта має вигляд:

$$W(s) = \frac{K \cdot e^{-\tau s}}{T \cdot s + 1}, \quad (2.1)$$

де K – коефіцієнт підсилення об'єкта; T – стала часу, с; τ – транспортне запізнення, с; s – оператор Лапласа.

Коефіцієнт підсилення K показує, наскільки змінюється вихідна величина при зміні керуючого впливу. Стала часу T характеризує інерційність об'єкта, тобто швидкість наближення параметра до нового усталеного значення. Запізнення τ враховує час, необхідний для поширення впливу по газовому тракту, інерційність вимірювального каналу або затримку реакції виконавчого механізму.

Першим і головним контуром є контур регулювання розрідження під шаром шихти. У цьому контурі регульованою величиною є розрідження P_{vac} , а керуючим впливом — частота обертання тягодутьового вентилятора, яка задається частотним перетворювачем. Зміна частоти вентилятора впливає на витрату газів, а отже – на рівень розрідження у вакуум-камерах агломераційної машини.

У спрощеному вигляді динаміку тиску у газовому тракті можна пояснити через баланс витрат газу. Якщо продуктивність вентилятора перевищує надходження газів з боку агломашини та підсмоктування повітря, розрідження зростає. Якщо ж надходження газів збільшується або продуктивність вентилятора зменшується, розрідження знижується. З урахуванням інерційності газового об'єму та характеристик вентилятора цей процес можна подати FOPDT-моделлю:

$$W_{1(s)} = \frac{\Delta P_{vac}(s)}{\Delta f_v(s)} = \frac{K_1 \cdot e^{-\tau_1 s}}{T_1 \cdot s + 1}, \quad (2.2)$$

де $\Delta P_{vac}(s)$ – зміна розрідження, кПа; $\Delta f_v(s)$ – зміна частоти вентилятора, Гц; K_1 – коефіцієнт підсилення контуру розрідження; T_1 – стала часу контуру; τ_1 – запізнення.

Для подальших розрахунків прийнято такі параметри контуру розрідження:

$$K_1 = -0,025 \text{ кПа/Гц}; \quad T_1 = 12 \text{ с}; \quad \tau_1 = 2 \text{ с}. \quad (2.3)$$

Від’ємний знак коефіцієнта K_1 пояснюється тим, що збільшення частоти вентилятора робить тиск більш від’ємним, тобто збільшує розрідження. Це є важливою особливістю об’єкта, яку необхідно врахувати під час вибору прямої дії регулятора. Для забезпечення стійкого негативного зворотного зв’язку регулятор розрідження повинен працювати зі зворотною дією.

Другим контуром є контур перепаду тиску на фільтрі. Перепад тиску ΔP_f характеризує гідравлічний опір фільтрувального обладнання та використовується як показник ступеня забивання фільтра. У процесі фільтрації пил накопичується на поверхні фільтрувальних рукавів, унаслідок чого зростає опір проходженню газового потоку. Після імпульсного очищення частина пилового шару видаляється, а перепад тиску зменшується.

Динаміка перепаду тиску на фільтрі залежить від витрати газів, концентрації пилу, стану фільтрувальних елементів і режиму очищення. У межах даної роботи для опису контуру використовується модель, у якій керуючим впливом є умовна дія на систему очищення або регулювання газового потоку, а вихідною величиною — перепад тиску на фільтрі. Передавальна функція має вигляд:

$$W_{2(s)} = \frac{\Delta P_f(s)}{\Delta u_f(s)} = \frac{K_2 \cdot e^{-\tau_2 s}}{T_2 \cdot s + 1}, \quad (2.4)$$

де $\Delta P_f(s)$ – зміна перепаду тиску на фільтрі, кПа; $\Delta u_f(s)$ – зміна керуючого впливу, %; K_2 – коефіцієнт підсилення; T_2 – стала часу; τ_2 – запізнення.

Для контуру перепаду тиску прийнято такі параметри:

$$K_2 = 0,15 \text{ кПа/\%}; \quad T_2 = 5 \text{ с}; \quad \tau_2 = 1 \text{ с}. \quad (2.5)$$

На відміну від контуру розрідження, цей об’єкт має додатний коефіцієнт підсилення. Тобто збільшення відповідного керуючого впливу призводить до збільшення регульованої величини або зміни її у тому самому напрямку. Водночас контур перепаду тиску має суттєву нелінійність, оскільки

					КНУ КРБ.174.26.10.02.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

гідравлічний опір фільтра змінюється залежно від кількості накопиченого пилу. Тому параметр K_2 не можна вважати постійним у всьому діапазоні роботи. У подальшому це обґрунтовує застосування gain scheduling, тобто зміни параметрів регулятора залежно від стану фільтра.

Третім контуром є контур температури газів перед фільтром. Цей контур виконує переважно захисну функцію, оскільки перегрів газів може призвести до пошкодження фільтрувальних рукавів. Регульованою величиною є температура T_g , а керуючим впливом – відкриття клапана або заслінки підсмоктування атмосферного повітря. Підсмоктування холодного повітря знижує температуру газового потоку, що проходить через фільтр.

Передавальна функція температурного контуру подається у вигляді:

$$W_{3(s)} = \frac{\Delta T_g(s)}{\Delta u_T(s)} = \frac{K_3 \cdot e^{-\tau_3 s}}{T_3 \cdot s + 1}, \quad (2.6)$$

де $\Delta T_g(s)$ – зміна температури газів, °C; $\Delta u_T(s)$ – зміна положення клапана підсмоктування, %; K_3 – коефіцієнт підсилення температурного контуру; T_3 – стала часу; τ_3 – запізнення.

Для температурного контуру прийнято такі параметри:

$$K_3 = -1,2 \text{ } ^\circ\text{C}/\%; T_3 = 25 \text{ с}; \tau_3 = 5 \text{ с}. \quad (2.7)$$

Від’ємний коефіцієнт підсилення K_3 означає, що збільшення відкриття клапана підсмоктування повітря призводить до зниження температури газів. Через більшу теплову інерційність цей контур має більшу сталу часу порівняно з контуром розрідження та перепаду тиску. Оскільки температурний контур виконує захисну функцію, для нього важливішою є відсутність небезпечного перерегулювання та надійне обмеження температури, ніж максимальна швидкодія.

Зведені параметри математичних моделей основних контурів наведено у таблиці 2.1.

					КНУ КРБ.174.26.10.02.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

Таблиця 2.1 – Параметри FOPDT-моделей контурів керування

Контур керування	Керуючий вплив	Регульована величина	К	Т, с	τ, с	Особливість
Розрідження	Частота вентилятора	Розрідження під шаром шихти	-0,025 кПа/Гц	12	2	Зворотна дія
Перепад тиску	Дія на фільтр / очищення	ΔР фільтра	0,15 кПа/%	5	1	Нелінійність, зміна К
Температура газів	Підсмоктування повітря	Температура перед фільтром	-1,2 °С/%	25	5	Захисний контур

Для подальшого синтезу регуляторів необхідно враховувати не лише числові значення параметрів моделей, а й фізичний зміст кожного контуру. Контур розрідження є основним технологічним контуром, що працює постійно у нормальному режимі. Контур перепаду тиску виконує як регульовальну, так і діагностичну функцію, оскільки його параметри відображають стан фільтра. Контур температури є обмежувальним і повинен активуватися насамперед у разі наближення температури до небезпечного значення.

Окремо необхідно врахувати вплив збурень. Для контуру розрідження основними збуреннями є зміна продуктивності агломашини, газопроникності шару шихти, підсмоктування повітря та зміна опору газоходів. У моделі ці впливи можуть бути представлені як додатковий вхід збурення $d_1(t)$, що змінює вихідне значення розрідження. У спрощеному вигляді модель контуру з урахуванням збурення можна записати так:

$$P_{vac}(s) = W_1(s) \cdot f_v(s) + W_{d1}(s) \cdot d_1(s) , \quad (2.8)$$

де $W_{d1}(s)$ – передавальна функція за каналом збурення; $d_1(s)$ – узагальнене збурення продуктивності або газопроникності.

Для контуру перепаду тиску основними збуреннями є зміна пилового навантаження, ефективності очищення, вологості газів і стану фільтрувальних рукавів. Ці фактори змінюють не тільки поточне значення ΔP_f , а й параметри моделі, насамперед коефіцієнт підсилення.

Тому для цього контуру необхідно передбачити зміну параметрів моделі в різних станах фільтра:

$$K_2 = K_2(W_p) , \quad (2.9)$$

де W_p – умовний показник накопичення пилу або ступеня забивання фільтра.

Для температурного контуру збуреннями є зміна температури газів, що надходять з агломашины, коливання витрати газового потоку, температура атмосферного повітря та режим роботи підсмоктування. Ці збурення можуть мати як повільний, так і відносно швидкий характер, однак через більшу інерційність температурного процесу контур не потребує надто агресивного налаштування.

Прийняті моделі є лінійними наближеннями реального об'єкта поблизу робочої точки. Такий підхід є прийнятним для етапу проєктування системи автоматизації, оскільки дозволяє виконати синтез регуляторів, оцінити якість перехідних процесів і перевірити роботу системи в середовищі імітаційного моделювання. У реальних промислових умовах параметри моделей можуть бути уточнені шляхом активної або пасивної ідентифікації за даними експлуатації.

Активна ідентифікація передбачає подання на об'єкт тестового збурення, наприклад невеликої ступінчастої зміни частоти вентилятора, і реєстрацію реакції розрідження. За отриманою перехідною характеристикою можна визначити коефіцієнт підсилення, сталу часу та запізнення. Пасивна ідентифікація базується на аналізі історичних даних нормальної експлуатації, що особливо зручно за наявності IoT-рівня та архіву часових рядів.

Таким чином, для подальшого проєктування системи автоматизації прийнято три FOPDT-моделі, які описують основні контури керування аспірацією аглофабрики: розрідження, перепад тиску на фільтрі та температуру газів. Ці моделі враховують основні динамічні властивості об'єкта, напрям дії керуючих впливів, інерційність і запізнення і є основою для подальшого синтезу алгоритмів автоматичного керування.

					КНУ КРБ.174.26.10.02.ПЗ	Арк.
						67
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.5 Синтез алгоритмів автоматичного керування системи автоматизації процесу аспірації

На основі математичних моделей, отриманих у попередньому підрозділі, виконується синтез алгоритмів автоматичного керування основними параметрами системи аспірації агрофабрики. Метою синтезу є визначення структури регуляторів і розрахунок їх параметрів для забезпечення стійкої роботи системи, допустимої швидкодії, мінімальної статичної похибки та відсутності небезпечного перерегулювання.

У проєктованій системі передбачено три основні контури автоматичного керування: контур розрідження під шаром шихти, контур перепаду тиску на фільтрі та контур температури газів перед фільтром. Перший контур є основним технологічним контуром і працює у штатному режимі постійно. Другий контур використовується для контролю стану фільтра та керування процесом очищення. Третій контур має переважно захисне призначення і активується при наближенні температури газів до допустимого граничного значення.

Для реалізації контурів керування обрано ПІД-регулятор, оскільки він є стандартним і добре відпрацьованим засобом автоматичного регулювання у промислових системах. Його перевагами є проста структура, можливість реалізації на програмованому логічному контролері, підтримка у середовищах промислового програмування та наявність відомих методів налаштування [11, 12].

У загальному вигляді закон ПІД-регулювання можна записати так:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + \left(\frac{K_p}{T_i}\right) \cdot \int e(t)dt + K_p \cdot T_d \cdot \frac{d e(t)}{d t}, \quad (2.10)$$

де $u(t)$ – керуючий вплив; $e(t)$ – похибка регулювання; K_p – коефіцієнт підсилення регулятора; T_i – стала часу інтегрування; T_d – стала часу диференціювання.

Похибка регулювання визначається як різниця між заданим і поточним значенням регульованої величини:

$$e(t) = SP(t) - PV(t) , \quad (2.11)$$

де $SP(t)$ – задане значення параметра; $PV(t)$ – поточне виміряне значення параметра.

Пропорційна складова забезпечує реакцію регулятора на поточну похибку. Інтегральна складова усуває статичну похибку, що важливо для підтримання сталого значення розрідження або перепаду тиску. Диференційна складова враховує швидкість зміни похибки та може покращувати динаміку системи, однак у промисловій реалізації вона повинна використовуватися з фільтрацією, оскільки сигнали тиску, перепаду тиску та концентрації пилу можуть містити шум.

Для налаштування регуляторів використано метод внутрішньої моделі – ІМС. Цей метод є доцільним для об'єктів, які описуються FOPDT-моделями, і дозволяє отримати достатньо робастні налаштування без надмірного перерегулювання [11, 14]. Для системи аспірації це особливо важливо, оскільки перерегулювання розрідження може збільшувати пиловинос, а перерегулювання у контурі температури або перепаду тиску може негативно впливати на роботу фільтрувального обладнання.

Для FOPDT-моделі

$$W(s) = \frac{K \cdot e^{-\tau \cdot s}}{T \cdot s + 1} , \quad (2.12)$$

параметри ПД-регулятора за ІМС-підходом визначаються співвідношеннями:

$$K_p = \frac{T + \frac{\tau}{2}}{K \cdot (\lambda + \tau)} , \quad (2.13)$$

$$T_i = T + \frac{\tau}{2} , \quad (2.14)$$

$$T_d = \frac{T \cdot \tau}{2 \cdot T + \tau} . \quad (2.15)$$

де K, T, τ – параметри моделі об'єкта; λ – параметр налаштування, який визначає бажану швидкодію замкненої системи.

Параметр λ вибирається як компроміс між швидкістю та робастністю. Зменшення λ приводить до швидшого регулювання, але робить систему більш чутливою до похибок моделі та збурень. Збільшення λ робить перехідний процес плавнішим і стійкішим, але зменшує швидкість. Для аспіраційної системи доцільно обирати помірно консервативні значення λ оскільки безпечна та стабільна робота є важливішою за максимально швидке відпрацювання уставки.

Для контуру розрідження використовується модель:

$$W(s) = \frac{K \cdot e^{-\tau \cdot s}}{T \cdot s + 1}, \quad (2.16)$$

з параметрами:

$$K_1 = -0.025 \text{ кПа/Гц}, \quad T_1 = 12 \text{ с}, \quad \tau_1 = 2 \text{ с}. \quad (2.17)$$

Для цього контуру приймається параметр налаштування:

$$\lambda_1 = 2 \cdot \tau_1 = 4.$$

Підставивши параметри моделі у формули ІМС, отримаємо:

$$K_{p1} = \left(12 + \frac{2}{2}\right) (-0.025(4 + 2)) = -86.7, \quad (2.18)$$

$$T_{i1} = 12 + \frac{2}{2} = 13, \quad (2.19)$$

$$T_{d1} = (12)(2 + 2) = 0.92, \quad (2.20)$$

Отже, для контуру розрідження прийнято такі параметри ПІД-регулятора: $K_{p1} = -86.7$, $T_{i1} = 13 \text{ с}$, $T_{d1} = 0.92$.

Від'ємне значення K_{p1} відповідає зворотній дії регулятора. Це пов'язано з тим, що збільшення частоти вентилятора призводить до збільшення розрідження, тобто до зменшення тиску відносно атмосферного. Якщо не врахувати цей знак, у системі може сформуватися додатний зворотний зв'язок, що призведе до нестійкої роботи. Тому для контуру розрідження необхідно або використовувати від'ємний коефіцієнт K_{p1} , або встановити у функціональному блоці ПІД-регулятора напрям дії REVERSE.

Для контуру перепаду тиску на фільтрі використовується модель:

$$W_{2(s)} = \frac{\Delta P_{f(s)}}{\Delta u_{f(s)}} = \frac{K_2 \cdot e^{-\tau_2 \cdot s}}{T_2 \cdot s + 1}. \quad (2.21)$$

з параметрами $K_2=0.15$ кПа/%, $T_2=5$ с, $\tau_2=1$ с.

Для цього контуру приймається параметр налаштування:

$$\lambda_2 = 1.5 \cdot \tau_1 = 1.5. \quad (2.22)$$

Тоді параметри регулятора становлять:

$$K_{p2} = \left(5 + \frac{1}{2}\right) (0.15(1.5 + 1)) = 14.7, \quad (2.23)$$

$$T_{i2} = 5 + \frac{1}{2} = 5.5, \quad (2.24)$$

$$T_{d2} = (5)(2 + 1) = 0.46. \quad (2.25)$$

Отже, для контуру перепаду тиску на фільтрі прийнято: $K_{p2} = 14.7$, $T_{i2} = 5.5$ с, $T_{d2} = 0.46$ с.

На відміну від контуру розрідження, цей контур має додатний коефіцієнт підсилення, тому регулятор працює у прямому напрямі дії. Разом із тим перепад тиску на фільтрі суттєво залежить від стану фільтрувальних елементів. При накопиченні пилу гідравлічний опір фільтра зростає, а коефіцієнт підсилення об'єкта може змінюватися. Тому фіксовані параметри регулятора не завжди забезпечують однакову якість керування для чистого та забитого фільтра.

Для врахування зміни стану фільтра доцільно використати gain scheduling. У цьому випадку коефіцієнт K_{p2} коригується залежно від поточного перепаду тиску або умовного показника забивання W_p . Якщо фільтр чистий, використовується базове налаштування регулятора. При зростанні перепаду тиску та збільшенні коефіцієнта підсилення об'єкта коефіцієнт регулятора зменшується, що дозволяє уникнути коливань і надмірного перерегулювання.

У спрощеному вигляді корекцію коефіцієнта регулятора можна записати так:

$$K_{p2}(W_p) = \frac{K_{p2base}}{k_{gs}(W_p)}. \quad (2.26)$$

де K_{p2base} – базове значення коефіцієнта регулятора; $k_{gs}(W_p)$ – коефіцієнт корекції, що залежить від стану фільтра.

Для температурного контуру використовується модель:

$$W_3(s) = \frac{\Delta T_g(s)}{\Delta u_T(s)} = \frac{K_3 \cdot e^{-\tau_3 \cdot s}}{T_3 \cdot s + 1}, \quad (2.27)$$

з параметрами:

$$K_3 = -1.2, \quad T_3 = 25 \text{ с}, \quad \tau_3 = 5 \text{ с}. \quad (2.28)$$

Оскільки цей контур є захисним і має більшу інерційність, для нього приймається більш консервативне налаштування:

$$\lambda_3 = 2 \cdot \tau_3 = 10 \text{ с}.$$

Параметри регулятора становлять:

$$K_{p3} = \left(25 + \frac{5}{2}\right) (-1.2(10 + 5)) = -1.53, \quad (2.29)$$

$$T_{i3} = 25 + \frac{5}{2} = 27.5, \quad (2.30)$$

$$T_{d3} = (25)(2 + 5) = 2.27. \quad (2.31)$$

Отже, для температурного контуру прийнято: $K_{p3} = -1.53$, $T_{i3} = 27.5 \text{ с}$, $T_{d3} = 2.27 \text{ с}$.

Від'ємне значення K_{p3} пояснюється тим, що збільшення відкриття клапана підсмоктування атмосферного повітря знижує температуру газів перед фільтром. Тому температурний регулятор, як і регулятор розрідження, повинен мати зворотну дію. Основним завданням цього контуру є не швидке відпрацювання уставки, а надійне обмеження температури та захист фільтрувальних елементів від перегріву.

Зведені параметри синтезованих регуляторів наведено у таблиці 2.2.

					КНУ КРБ.174.26.10.02.ПЗ	Арк.
						72
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.2 – Параметри ПІД-регуляторів основних контурів керування

Контур	K_p	T_i, c	T_d, c	Метод налаштування	Напрямок дії
Розрідження	-86.7	13.0	0.92	IMC, $\lambda = 2\tau$	REVERSE
Перепад тиску на фільтрі	14.7	5.5	0.46	IMC, $\lambda = 1.5\tau$	DIRECT
Температура газів	-1.53	27.5	2.27	IMC, $\lambda = 2\tau$	REVERSE

Під час програмної реалізації ПІД-регуляторів необхідно врахувати обмеження керуючих впливів. Частота вентилятора не може виходити за межі допустимого діапазону частотного перетворювача, положення клапана підсмоктування не може перевищувати 0–100 %, а імпульсне очищення фільтрів повинно виконуватися з урахуванням мінімальних пауз між спрацюваннями клапанів. Тому у програмі ПЛК необхідно передбачити насичення вихідних сигналів і захист від накопичення інтегральної складової.

Захист від накопичення інтегральної складової, або anti-windup, є важливим для контурів з обмеженими виконавчими механізмами. Якщо вихід регулятора досягнув фізичної межі, а інтегральна складова продовжує зростати, після зняття обмеження система може мати значне перерегулювання. Для запобігання цьому інтегрування похибки необхідно обмежувати або тимчасово блокувати при досягненні межі керуючого сигналу.

Окремо необхідно врахувати взаємодію ПІД-регуляторів із логікою режимів роботи. У режимі NORMAL основним є контур розрідження. У режимі CLEANING активується алгоритм імпульсного очищення фільтрів, який може тимчасово впливати на перепад тиску та розрідження. У режимі WARNING або VIOLATION коригуються уставки або обмеження з урахуванням екологічних параметрів. У режимі EMERGENCY ПІД-регулятори підпорядковуються аварійній логіці, а виконавчі механізми переводяться у безпечний стан.

Таким чином, у межах підрозділу виконано синтез основних алгоритмів автоматичного керування системою аспірації аглофабрики. Для трьох контурів — розрідження, перепаду тиску на фільтрі та температури газів —

					КНУ КРБ.174.26.10.02.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

розраховано параметри ПІД-регуляторів методом ІМС. Визначено необхідність зворотної дії для контурів розрідження та температури, прямої дії для контуру перепаду тиску, а також обґрунтовано застосування gain scheduling для урахування зміни стану фільтра. Отримані регулятори є основою для подальшої реалізації логіки пріоритетного керування та імітаційного дослідження системи.

2.6 Реалізація пріоритетного керування та зміни коефіцієнту підсилення

У попередньому підрозділі було виконано синтез основних ПІД-регуляторів для контурів розрідження, перепаду тиску на фільтрі та температури газів. Однак для системи аспірації аглофабрики недостатньо лише стабілізувати окремі параметри. У реальних умовах експлуатації система працює за наявності технологічних, екологічних та аварійних обмежень, які можуть вступати у конфлікт між собою. Тому у структурі керування необхідно передбачити логіку пріоритетного керування, або Override Control.

Override Control використовується у промисловій автоматизації для систем, у яких декілька регуляторів або логічних блоків можуть впливати на один і той самий виконавчий механізм, але фактичний керуючий вплив визначається поточним режимом роботи та пріоритетом обмежень [11, 13]. Для системи аспірації це означає, що в нормальному режимі основним є контур регулювання розрідження, але при перегріві фільтра, перевищенні концентрації пилу або аварійному стані обладнання пріоритет повинні отримувати захисні алгоритми.

У проєктованій системі прийнято таку послідовність пріоритетів:

- аварійний захист обладнання;
- захист фільтрувальних елементів від перегріву;
- дотримання екологічних обмежень за концентрацією пилу;
- підтримання технологічного розрідження;
- енергетична оптимізація роботи вентилятора.

					<i>КНУ КРБ.174.26.10.02.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		74

Такий порядок пріоритетів означає, що система не повинна підтримувати оптимальне технологічне розрідження ціною перевищення температури газів, пошкодження фільтра або порушення екологічних обмежень. У штатному режимі керування здійснюється регулятором розрідження, однак у разі виникнення небезпечного або обмежувального режиму його вихід може бути скоригований або тимчасово обмежений логікою вищого пріоритету.

Для реалізації пріоритетного керування в системі виділено п'ять основних режимів: NORMAL, WARNING, VIOLATION, CLEANING та EMERGENCY. Кожен режим має власні умови активації та набір керуючих дій.

У режимі NORMAL усі основні параметри перебувають у допустимих межах. Контур розрідження підтримує задане значення P_{vacSP} шляхом зміни частоти вентилятора. Контур перепаду тиску контролює стан фільтра, але не втручається у роботу системи, якщо ΔP_f не перевищує допустимих меж. Температурний контур перебуває у режимі контролю, а концентрація пилу використовується для екологічного моніторингу.

Режим WARNING активується при наближенні одного або декількох параметрів до граничного значення. Наприклад, якщо концентрація пилу після очищення наближається до встановленого попереджувального рівня, система формує повідомлення оператору та може виконати м'яку корекцію режиму аспірації. Така корекція може полягати у незначному зменшенні уставки розрідження, щоб знизити інтенсивність пиловиносу, або у запуску додаткового очищення фільтра, якщо одночасно спостерігається підвищений перепад тиску.

Режим VIOLATION активується при перевищенні допустимого значення концентрації пилу або іншого екологічного обмеження. У цьому режимі пріоритет отримує не підтримання оптимального технологічного розрідження, а повернення системи у допустимий екологічний стан. Система повинна зареєструвати факт порушення, сформувати аварійне повідомлення,

					КНУ КРБ.174.26.10.02.ПЗ	Арк.
						75
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

активувати очищення фільтрів або інші коригувальні дії. За потреби може бути сформована команда на обмеження продуктивності агломації або переведення аспіраційного тракту у безпечніший режим роботи.

Режим CLEANING призначений для відновлення газопроникності фільтрувальних елементів. Він активується при досягненні перепадом тиску ΔP_f встановленого порога або за плановим циклом очищення. У цьому режимі імпульсні клапани очищення вмикаються послідовно, щоб уникнути різких коливань тиску у газовому тракті. Після завершення циклу система оцінює ефективність очищення за зміною перепаду тиску. Якщо після очищення ΔP_f не зменшується до очікуваного рівня, формується діагностичне попередження про можливе забивання або зношування фільтрувальних рукавів.

Режим EMERGENCY має найвищий пріоритет. Він активується при критичному перевищенні температури газів, відмові вентилятора, аварії частотного перетворювача, втраті сигналу від ключового датчика або іншій ситуації, що може призвести до пошкодження обладнання чи небезпечних умов експлуатації. У цьому режимі ПД-регулятори підпорядковуються аварійній логіці, а виконавчі механізми переводяться у безпечний стан. При цьому система повинна зафіксувати причину аварії, час події та значення основних параметрів.

Загальна логіка вибору режиму може бути подана у вигляді послідовної перевірки умов. Спочатку перевіряються аварійні умови, оскільки вони мають найвищий пріоритет. Далі перевіряється перегрів фільтра, перевищення концентрації пилу, необхідність очищення фільтра та умови попередження. Якщо жодна з цих умов не виконується, система працює у режимі NORMAL.

У спрощеному вигляді алгоритм вибору режиму можна описати так:

- якщо виявлено аварійний стан обладнання або критичне перевищення температури, система переходить у режим EMERGENCY;
- інакше, якщо концентрація пилу перевищує допустиме значення, активується режим VIOLATION;

					КНУ КРБ.174.26.10.02.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		76

- інакше, якщо перепад тиску на фільтрі перевищує поріг очищення, активується режим CLEANING;
- інакше, якщо температура, концентрація пилу або перепад тиску наближаються до граничних значень, активується режим WARNING;
- інакше система працює у режимі NORMAL.

На рівні ПЛК така логіка може бути реалізована у вигляді функціонального блока керування режимами. Вхідними сигналами цього блока є поточні значення P_{vac} , ΔP_f , T_g , C_{pm} , сигнали стану вентилятора, частотного привода, датчиків і клапанів очищення. Вихідними сигналами є поточний режим MODE, дозволи на роботу регуляторів, команди очищення, аварійні сигнали та обмеження для керуючих впливів.

Для запобігання частому перемиканню між режимами необхідно використовувати гістерезис і часові затримки. Наприклад, якщо режим WARNING активується при наближенні концентрації пилу до граничного значення, повернення до NORMAL має відбуватися лише після того, як концентрація стабільно знизиться нижче порога повернення. Це дозволяє уникнути коливань режимів при незначних флуктуаціях вимірювального сигналу.

Окремо реалізується логіка обмеження керуючого впливу. У нормальному режимі сигнал завдання частоти вентилятора формується ПІД-регулятором розрідження. У режимі WARNING цей сигнал може бути обмежений зверху або скоригований відповідно до екологічних умов. У режимі VIOLATION пріоритет отримують дії, спрямовані на зменшення пиловиносу та відновлення ефективності очищення. У режимі EMERGENCY керування частотою вентилятора визначається аварійною логікою, а не регулятором розрідження.

Таким чином, структура керуючого сигналу для вентилятора може бути подана як вибір між кількома джерелами:

- вихід ПІД-регулятора розрідження;
- обмежене значення частоти у режимі WARNING;

					КНУ КРБ.174.26.10.02.ПЗ	Арк.
						77
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- безпечне значення або команда обмеження у режимі VIOLATION;
- аварійна команда у режимі EMERGENCY.

Фактичне значення завдання частоти VFD_101_FREQ_SP визначається логікою селектора, яка враховує поточний режим системи та пріоритети обмежень.

Для більш наочного подання логіки Override Control доцільно окремо показати алгоритм не лише вибору поточного режиму, а й формування відповідних керуючих дій. У такій схемі відображається, яким чином система переходить від аналізу поточного стану до вибору режиму NORMAL, WARNING, VIOLATION, CLEANING або EMERGENCY, а також які саме дії виконуються щодо вентилятора, системи очищення фільтра та аварійного захисту. Відповідну блок-схему наведено на рисунку 2.2.

Наведена блок-схема демонструє, що формування керуючих дій у системі аспірації виконується з урахуванням пріоритетів безпеки, екологічних обмежень і технологічних вимог. У режимі NORMAL система працює на основі ПІД-регулювання розрідження. У режимі WARNING виконується м'яка корекція режиму та посилений контроль параметрів. У режимі VIOLATION пріоритет отримують дії, спрямовані на зниження пиловиносу та відновлення нормативного стану. У режимі CLEANING система виконує послідовне очищення фільтра з подальшою оцінкою ефективності. У режимі EMERGENCY усі штатні алгоритми підпорядковуються аварійній логіці, а обладнання переводиться у безпечний стан.

Другою важливою складовою системи є gain scheduling для контуру перепаду тиску на фільтрі. Необхідність його використання зумовлена тим, що фільтр не є об'єктом із постійними параметрами. У процесі роботи на поверхні фільтрувальних рукавів накопичується пиловий шар, змінюється гідравлічний опір, а отже змінюється динамічна реакція контуру ΔP_f .

Якщо для всіх станів фільтра використовувати один і той самий набір параметрів регулятора, то якість керування може суттєво змінюватися. Регулятор, налаштований для чистого фільтра, може стати надто агресивним

					КНУ КРБ.174.26.10.02.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		78

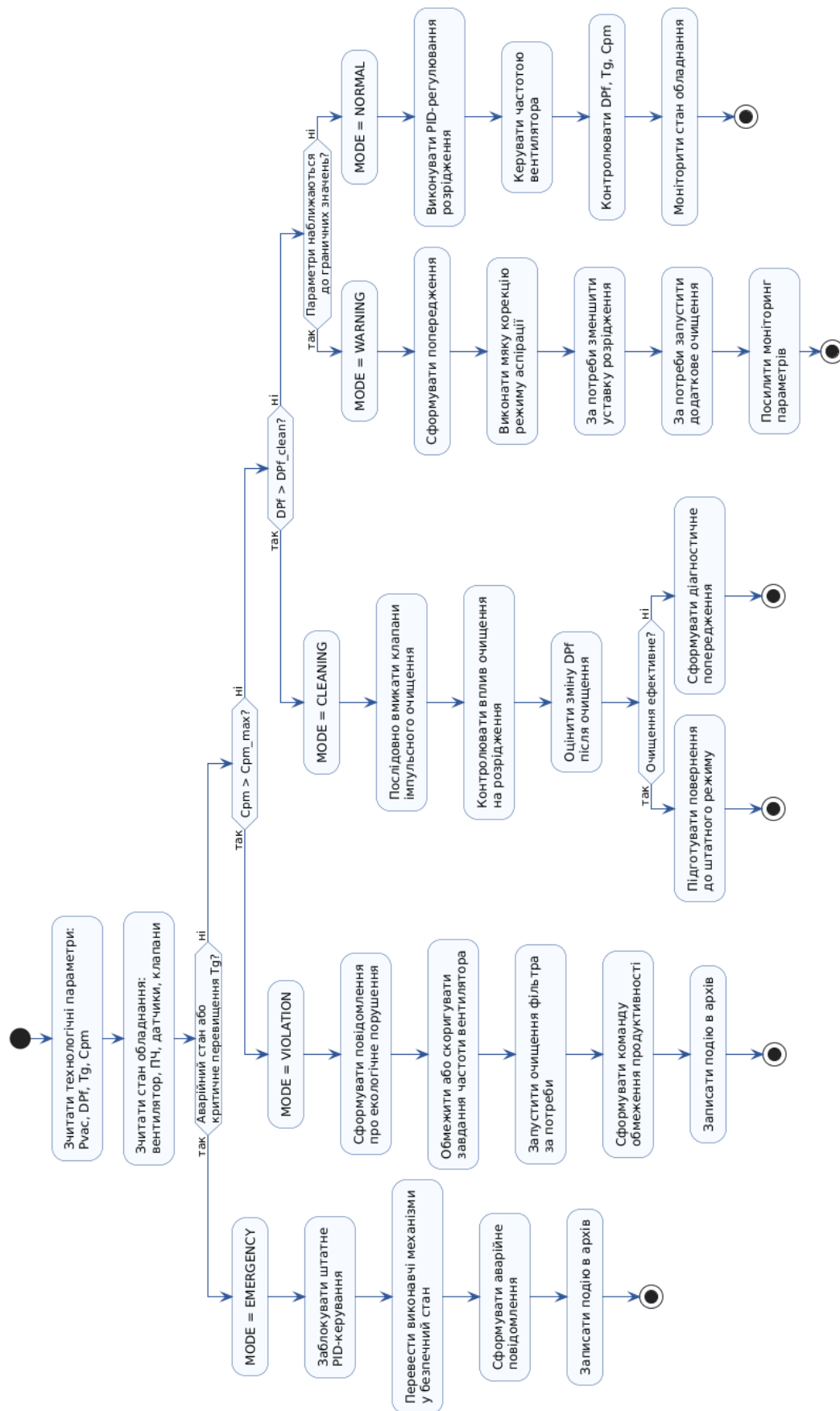


Рисунок 2.2 – Блок-схема алгоритму вибору режиму та формування керуючих дій

при забитому фільтрі, що призведе до коливань. Навпаки, регулятор, налаштований для забитого фільтра, може бути надто повільним у режимі нормального стану. Тому параметри регулятора доцільно змінювати залежно від поточного стану фільтра.

У даній роботі стан фільтра пропонується оцінювати за значенням перепаду тиску ΔP_f . Для спрощення виділяються три умовні зони:

- зона чистого або слабо навантаженого фільтра;
- зона нормального робочого навантаження;
- зона підвищеного забивання фільтра.

У зоні чистого фільтра використовується базове значення коефіцієнта регулятора. У зоні нормального навантаження параметри залишаються близькими до номінальних. У зоні підвищеного забивання коефіцієнт підсилення регулятора зменшується, щоб компенсувати зростання чутливості об'єкта та запобігти коливанням.

У спрощеному вигляді алгоритм gain scheduling можна описати так:

- якщо ΔP_f менше нижнього порога, використовується набір параметрів для чистого фільтра;
- якщо ΔP_f перебуває у робочому діапазоні, використовується номінальний набір параметрів;
- якщо ΔP_f перевищує верхній поріг, використовується зменшене значення K_{p2} та активується підготовка до очищення;
- якщо ΔP_f досягає порога очищення, запускається режим CLEANING.

Приклад логіки зміни коефіцієнта регулятора можна подати так:

- для чистого фільтра: $K_{p2} = K_{p2_{base}}$;
- для нормального стану: $K_{p2} = 0,8 \cdot K_{p2_{base}}$;
- для забитого фільтра: $K_{p2} = 0,4 \cdot K_{p2_{base}}$.

Таке правило є спрощеним, але воно відображає основний принцип gain scheduling: при зростанні гідравлічного опору фільтра коефіцієнт регулятора

					КНУ КРБ.174.26.10.02.ПЗ	Арк.
						80
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зменшується. Конкретні межі зон і коефіцієнти корекції можуть уточнюватися під час імітаційного моделювання або за результатами експлуатаційних даних.

Для наочного подання логіки адаптації параметрів регулятора доцільно окремо показати алгоритм gain scheduling для контуру перепаду тиску на фільтрі. Відповідну блок-схему наведено на рисунку 2.3.

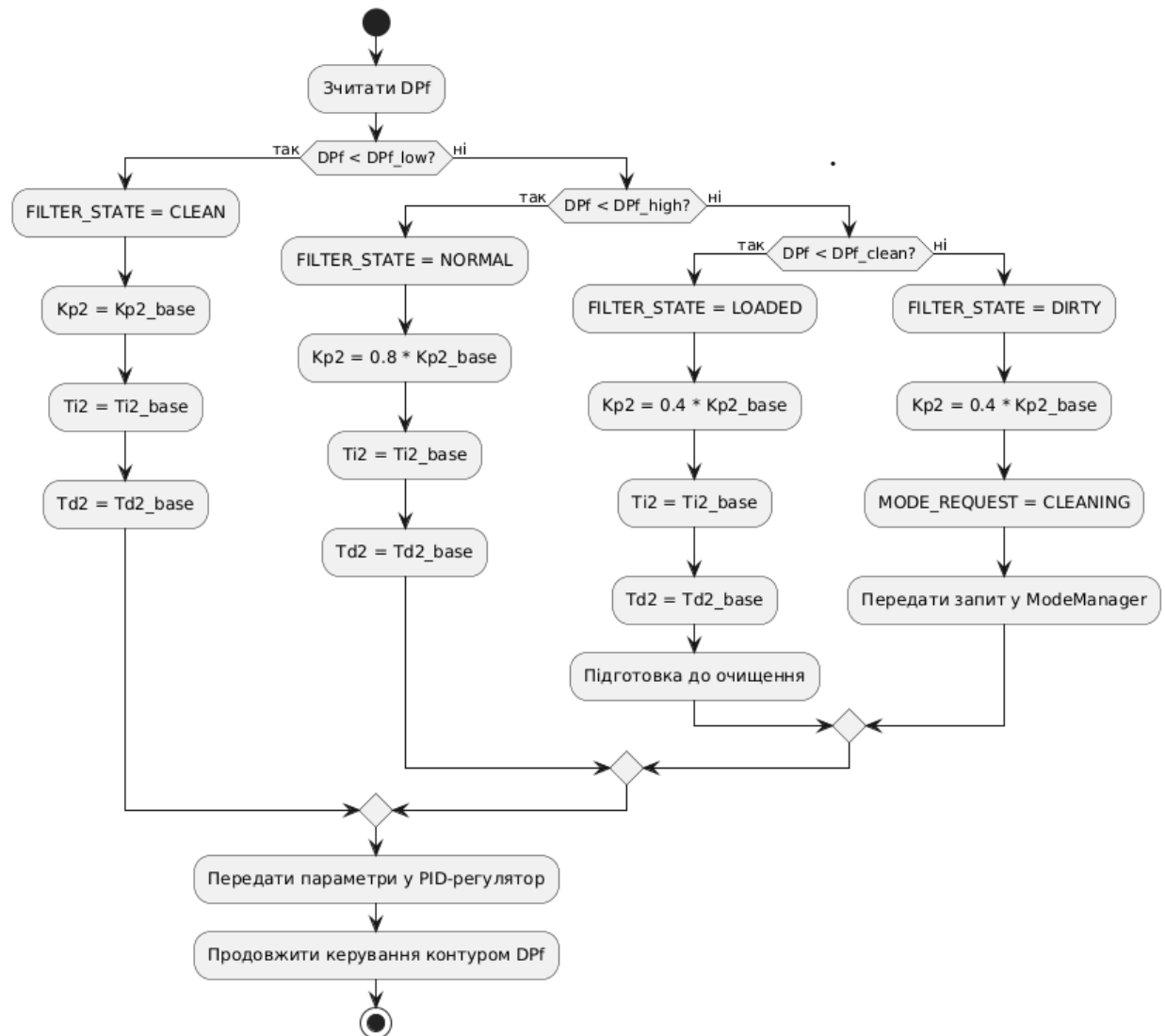


Рисунок 2.3 – Блок-схема алгоритму gain scheduling для контуру перепаду тиску на фільтрі

Як видно з блок-схеми, алгоритм gain scheduling базується на поділі робочого діапазону перепаду тиску на декілька зон. У зоні малого перепаду тиску фільтр вважається чистим, тому використовується базовий набір параметрів регулятора. У зоні нормального навантаження застосовуються

номінальні параметри. При подальшому зростанні перепаду тиску система переходить до більш консервативного налаштування, зменшуючи коефіцієнт підсилення регулятора. Якщо перепад тиску досягає порога очищення, формується команда на перехід до режиму CLEANING. Такий підхід дозволяє враховувати зміну динамічних властивостей фільтра та зменшує ймовірність коливань у контурі керування.

Для промислової реалізації важливо забезпечити плавність перемикавання параметрів. Різка зміна коефіцієнта регулятора може спричинити стрибок керуючого сигналу. Тому під час переходу між зонами доцільно використовувати гістерезис або плавну інтерполяцію коефіцієнтів. У межах бакалаврської роботи достатнім є використання зонального перемикавання з гістерезисом, оскільки такий варіант простий для реалізації на ПЛК та зрозумілий для подальшого аналізу.

Gain scheduling також може використовуватися як елемент діагностики. Якщо система часто переходить у зону підвищеного забивання або очищення не приводить до помітного зменшення ΔP_f , це свідчить про погіршення стану фільтра. Така інформація може передаватися на IoT-рівень для побудови трендів і формування рекомендацій щодо обслуговування.

Загальна взаємодія Override Control та gain scheduling полягає у тому, що перший механізм визначає поточний режим системи та пріоритет керуючих дій, а другий адаптує параметри регулятора перепаду тиску відповідно до стану фільтра. Разом ці підходи дозволяють забезпечити більш стійку та безпечну роботу аспіраційної системи в умовах зміни технологічних параметрів і стану обладнання.

У програмній структурі ПЛК логіку доцільно реалізувати у вигляді окремих функціональних блоків. Блок ModeManager визначає поточний режим системи. Блок VacuumControl реалізує ПІД-регулювання розрідження. Блок FilterControl контролює перепад тиску, виконує gain scheduling і формує команди очищення. Блок TemperatureProtection контролює температуру газів і формує захисні дії. Блок AlarmManager відповідає за аварійні та

					КНУ КРБ.174.26.10.02.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		82

попереджувальні сигнали. Така модульна структура спрощує налагодження, тестування і подальшу модернізацію програми.

Таким чином, реалізація Override Control та gain scheduling є важливою складовою проєктованої системи автоматизації аспірації аглофабрики. Override Control забезпечує узгодження роботи контурів керування з технологічними, екологічними та аварійними обмеженнями, а gain scheduling дозволяє врахувати зміну динамічних властивостей фільтра в процесі експлуатації. Застосування цих підходів підвищує надійність, безпечність і адаптивність системи керування.

2.7 Імітаційне моделювання та оцінка якості керування

Для перевірки працездатності синтезованих алгоритмів керування виконано імітаційне моделювання основних контурів системи аспірації аглофабрики. Метою моделювання є оцінювання якості перехідних процесів, перевірка стійкості системи, аналіз реакції на збурення та підтвердження доцільності використання методу ІМС для налаштування ПІД-регуляторів.

Імітаційна модель побудована на основі отриманих моделей FOPDT. Для дослідження розглянуто три основні контури: контур розрідження під шаром шихти, контур перепаду тиску на фільтрі та контур температури газів перед фільтром. У моделі враховано інерційність об'єктів, транспортне запізнення, обмеження керуючих впливів, а також можливість подання зовнішніх збурень. Основними показниками якості прийнято перерегулювання, час встановлення, статичну похибку та характер перехідного процесу.

Першим досліджувався контур регулювання розрідження (рис. 2.4). Цей контур є головним технологічним контуром системи аспірації, оскільки від стабільності розрідження залежить газодинамічний режим спікання. У моделі регульованою величиною є P_{vac} , а керуючим впливом – частота обертання

тягодутьового вентилятора f_v . Регулятор налаштовано методом ІМС з параметром $\lambda = 2\tau$.

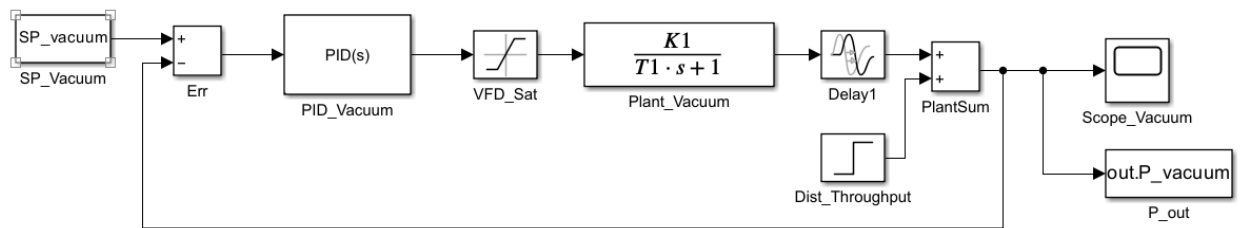


Рисунок 2.4 – Simulink-схема імітаційного моделювання Блок-схема алгоритму gain scheduling для контуру перепаду тиску на фільтрі

На рисунку 2.5 наведено перехідний процес відпрацювання уставки розрідження для різних методів налаштування регулятора: ІМС з $\lambda = 2\tau$, ІМС з $\lambda = \tau$ та методом Зіглера-Нікольса (Ziegler-Nichols).

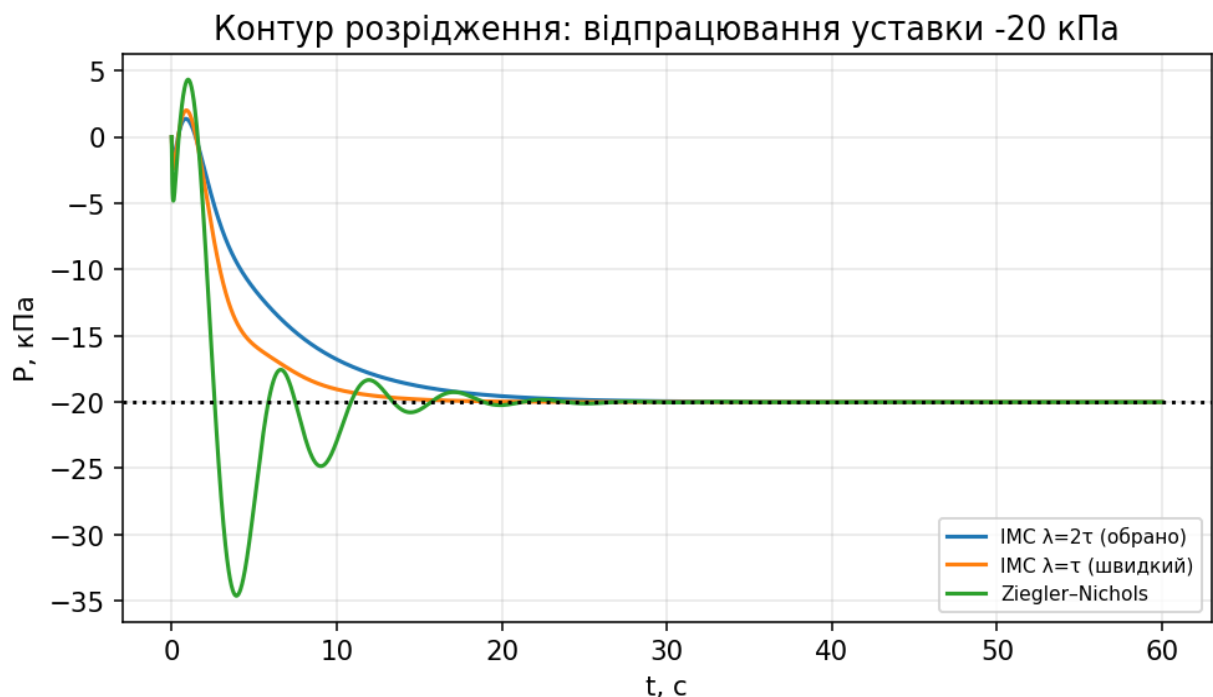


Рисунок 2.5 – Відпрацювання уставки розрідження для різних методів налаштування регулятора

Результати моделювання показали, що обране налаштування ІМС з $\lambda = 2\tau$ забезпечує аперіодичний перехідний процес без перерегулювання. Час встановлення становить приблизно 20 с, що є прийнятним для гідрогазодинамічного об'єкта аспіраційної системи. Більш швидко налаштування ІМС з $\lambda = \tau$ забезпечує менший час реакції, однак має менший запас робастності. Метод Ziegler-Nichols дає більш агресивне керування та може призводити до коливань і значного перерегулювання, що є небажаним для системи з екологічними та технологічними обмеженнями [11, 14].

Окремо перевірено реакцію контуру розрідження на збурення, яке імітує зміну продуктивності агломашини або газопроникності шару шихти. У реальному об'єкті такі збурення можуть виникати внаслідок зміни вологості, гранулометричного складу шихти, висоти шару або режиму спікання. У моделі збурення подається як додатковий вплив на вихід контуру.

На рисунку 2.6 наведено реакцію системи на стрибкоподібне збурення продуктивності.

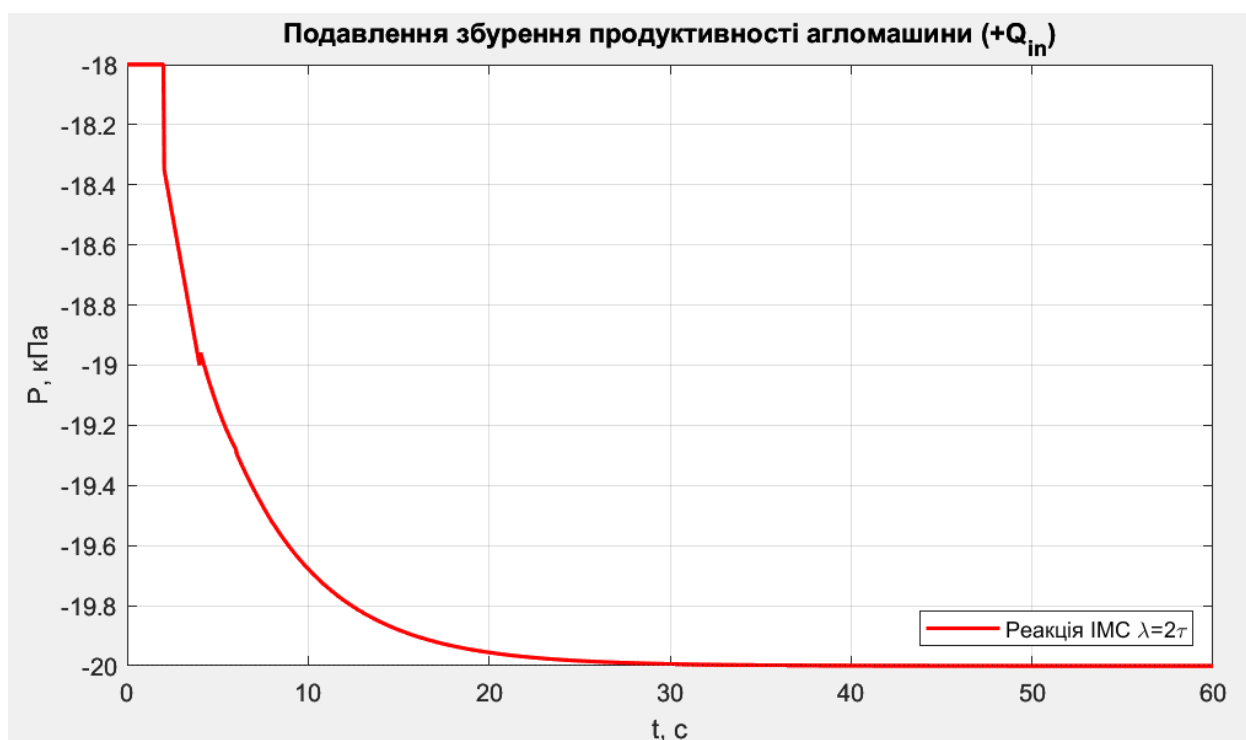


Рисунок 2.6 — Реакція контуру розрідження на збурення продуктивності агломашини

За результатами моделювання встановлено, що регулятор повертає розрідження до заданого значення без залишкової статичної похибки. Максимальне відхилення розрідження при збуренні не перевищує приблизно 2,5 кПа, а час відновлення становить близько 15–20 с. Така поведінка є прийнятною для системи аспірації, оскільки короткочасне відхилення компенсується без переходу системи у коливальний режим.

Другим етапом було дослідження контуру перепаду тиску на фільтрі. Для цього контуру порівнювалися два варіанти налаштування: ІМС та Cohen-Coon. Метод Cohen-Coon зазвичай забезпечує швидшу реакцію, однак може давати суттєве перерегулювання. Для фільтрувального обладнання це небажано, оскільки різкі зміни перепаду тиску можуть призводити до нестабільної роботи системи очищення та додаткових навантажень на фільтрувальні елементи.

На рисунку 2.7 наведено порівняння перехідних процесів контуру перепаду тиску для налаштувань ІМС та Cohen-Coon.

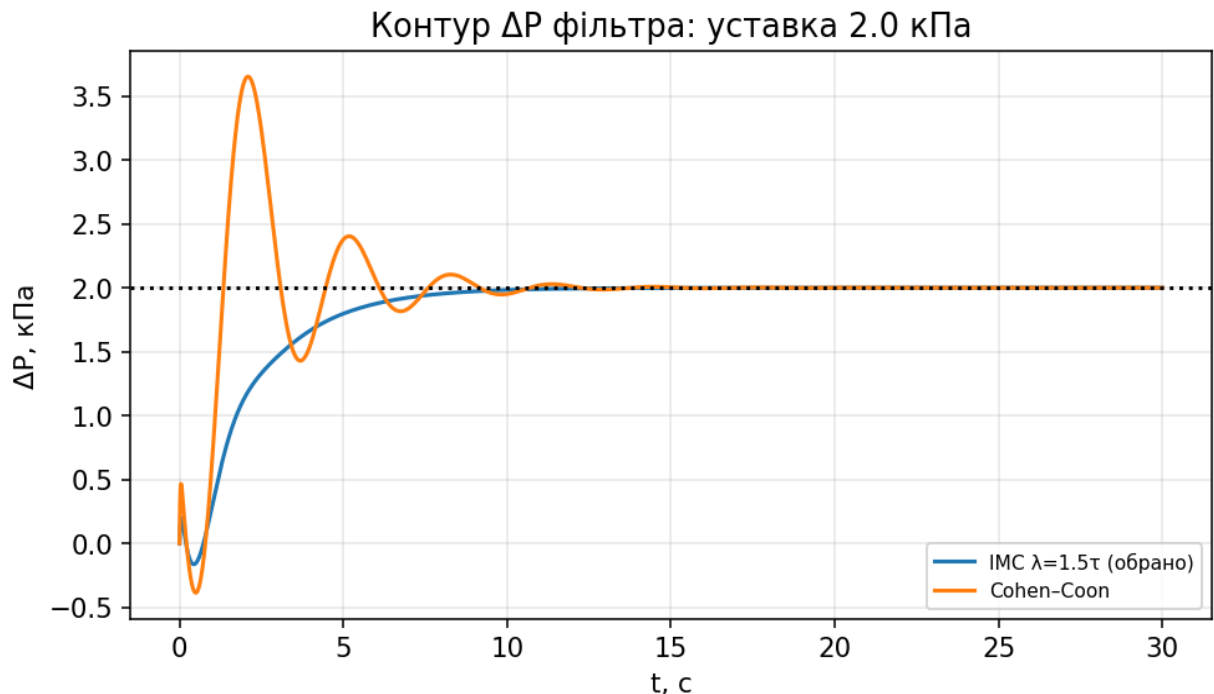


Рисунок 2.7 – Порівняння методів налаштування контуру перепаду тиску на фільтрі

Моделювання показало, що метод Cohen-Coon забезпечує швидший вихід на задане значення, але супроводжується перерегулюванням близько 28 %. Для системи аспірації такий характер процесу є небажаним, оскільки контур перепаду тиску пов'язаний зі станом фільтрувального обладнання. Налаштування ІМС забезпечує більш плавний аперіодичний процес без значного перерегулювання, тому саме цей метод прийнято як основний для подальшого використання.

Особливу увагу приділено впливу стану фільтра на якість керування. У процесі експлуатації фільтр поступово забивається пилом, унаслідок чого змінюється його гідравлічний опір і коефіцієнт підсилення об'єкта. Якщо використовувати фіксовані параметри регулятора, налаштовані для одного стану фільтра, при зміні гідравлічного опору можливе погіршення якості керування або поява коливань.

Для усунення цього недоліку запропоновано використання gain scheduling. У моделі розглянуто ситуацію, коли коефіцієнт підсилення об'єкта при забиванні фільтра зростає у декілька разів. У такому випадку базовий регулятор стає надмірно агресивним. При застосуванні gain scheduling коефіцієнт K_{p2} зменшується залежно від стану фільтра, що дозволяє зберегти плавний характер перехідного процесу.

На рисунку 2.8 наведено порівняння роботи контуру перепаду тиску без gain scheduling та з його використанням.

Результати моделювання підтверджують, що використання gain scheduling дозволяє зменшити коливальність контуру та забезпечити стійку роботу при зміні стану фільтра. Це особливо важливо для тривалої експлуатації системи, оскільки фільтр протягом робочого циклу постійно переходить між станами чистого, нормально навантаженого та забитого.

Третім етапом досліджувався температурний контур. Цей контур має більшу інерційність порівняно з контуром розрідження і перепаду тиску, оскільки зміна температури газів відбувається повільніше.

					КНУ КРБ.174.26.10.02.ПЗ	Арк.
						87
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

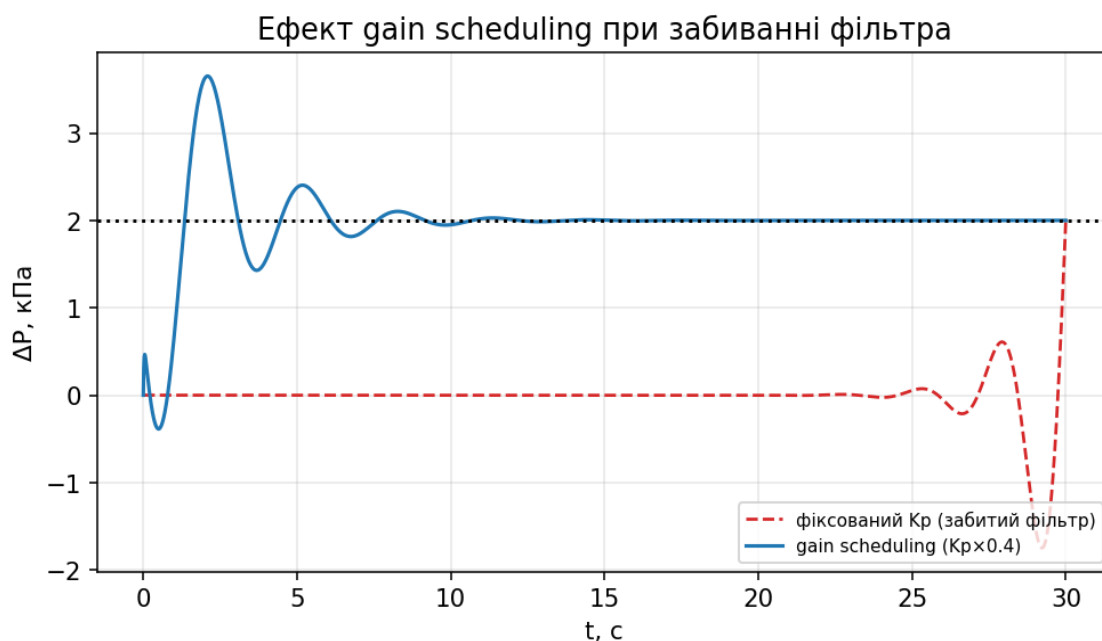


Рисунок 2.8 – Вплив gain scheduling на якість керування перепадом тиску на фільтрі

Регулятор температури виконує захисну функцію та активується при наближенні температури T_g до небезпечного значення. Керуючим впливом є відкриття клапана підсмоктування атмосферного повітря.

На рисунку 2.9 наведено перехідний процес температурного контуру.

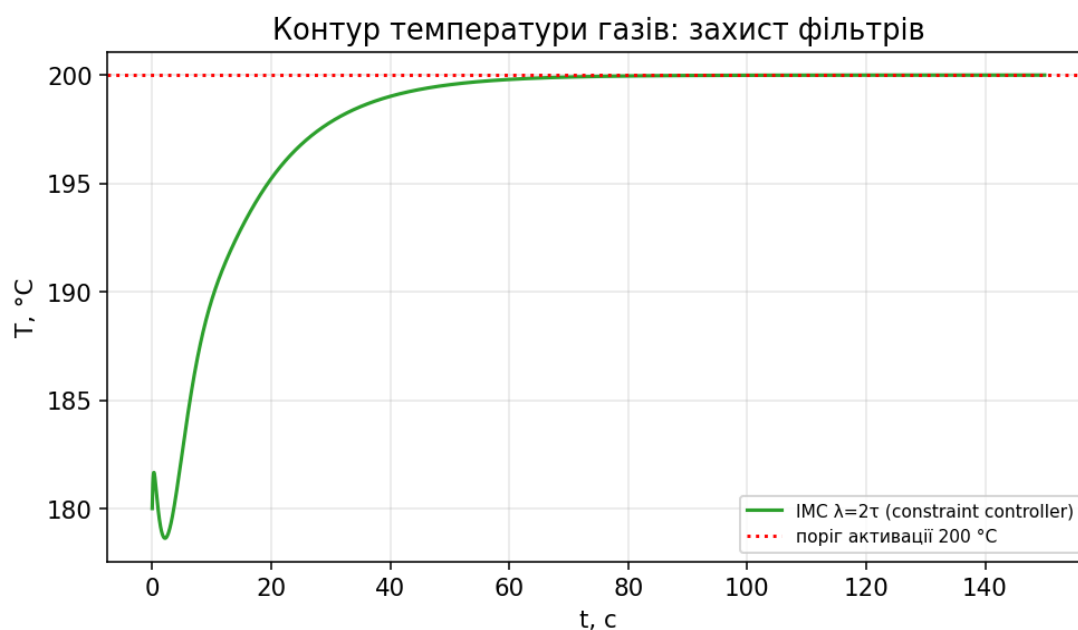


Рисунок 2.9 – Перехідний процес контуру температури газів перед фільтром

За результатами моделювання встановлено, що температурний контур забезпечує плавне зниження температури без перерегулювання. Час встановлення є більшим, ніж для інших контурів, і становить близько 50 с. Це пояснюється більшою сталою часу температурного процесу. Така швидкодія є прийнятною, оскільки контур має захисне призначення, а основною вимогою до нього є надійне обмеження температури та відсутність різких коливань керуючого впливу.

Зведені результати оцінювання якості керування наведено у таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Показники якості керування основних контурів

Показник	Контур розрідження	Контур перепаду тиску	Температурний контур
Метод налаштування	IMC, $\lambda = 2\tau$	IMC, $\lambda = 1,5\tau + \text{gain scheduling}$	IMC, $\lambda = 2\tau$
Перерегулювання, %	0	0	0
Час встановлення, с	≈ 20	≈ 8	≈ 50
Статична похибка	≈ 0	≈ 0	≈ 0
Характер процесу	Аперіодичний	Аперіодичний	Аперіодичний
Основне призначення	Технологічне регулювання	Контроль стану фільтра	Захист обладнання

З отриманих результатів видно, що всі контури забезпечують відсутність статичної похибки та перерегулювання. Контур розрідження має достатню швидкодію для компенсації збурень аспіраційного тракту. Контур перепаду тиску забезпечує швидку реакцію на зміну стану фільтра, а використання gain scheduling підвищує його стійкість при зміні параметрів об'єкта. Температурний контур має найбільший час встановлення, однак це відповідає його фізичній природі та захисному призначенню.

Для додаткового порівняння методів налаштування можна використовувати інтегральні критерії якості, зокрема IAE та ITAE. Критерій IAE характеризує сумарну абсолютну похибку протягом перехідного процесу, а ITAE додатково враховує час існування похибки.

Результати обчислення інтегральних критеріїв для трьох методів налаштування контуру розрідження наведено у таблиці 2.4.

Таблиця 4.2 – Інтегральні критерії якості контуру розрідження

Метод	IAE	ITAE	Перерегулювання, %
IMC $\lambda=2\tau$ (обрано)	1,00	1,00	0
IMC $\lambda=\tau$	0,78	0,82	0
Ziegler-Nichols	0,71	1,45	21

Аналіз інтегральних критеріїв показує, що агресивні методи налаштування можуть мати менше значення IAE за рахунок швидшої початкової реакції, однак при цьому погіршувати ITAE через коливання та тривалі залишкові відхилення. Для системи аспірації важливішим є плавний і робастний характер процесу, тому метод IMC є більш доцільним, ніж агресивні налаштування типу Ziegler-Nichols або Cohen-Coon.

Окремо оцінено робастність системи до варіацій параметрів об'єкта. Для цього параметри FOPDT-моделей змінювалися в межах очікуваної невизначеності. Основними факторами невизначеності є зміна стану фільтра, коливання витрати газів, зміна газопроникності шару шихти, відкладення пилу в газоходах і зміна характеристик вентилятора. Моделювання показало, що обрані IMC-налаштування зберігають стійкість системи при помірних відхиленнях параметрів. Це підтверджує доцільність використання консервативного налаштування з достатнім запасом стійкості.

Важливим результатом моделювання є підтвердження доцільності пріоритетної логіки керування. Під час виникнення збурень або наближення параметрів до граничних значень система повинна не просто продовжувати підтримувати технологічне розрідження, а змінювати пріоритети відповідно до поточного режиму. Наприклад, при зростанні температури газів пріоритет отримує температурний захист, при перевищенні концентрації пилу –

екологічні обмеження, а при зростанні перепаду тиску – режим очищення фільтра. Такий підхід зменшує ризик переходу системи у небезпечний стан.

З точки зору енергоефективності результати моделювання також підтверджують доцільність використання частотно-регульованого привода вентилятора. Підтримання розрідження шляхом зміни частоти вентилятора дозволяє уникнути надмірного дроселювання газового потоку та зменшити енергоспоживання порівняно з керуванням лише заслінками. Такий підхід відповідає загальним рекомендаціям щодо підвищення ефективності вентиляторних систем [10].

Таким чином, імітаційне моделювання підтвердило працездатність синтезованих алгоритмів керування системою аспірації аглофабрики. Контур розрідження забезпечує стабільне відпрацювання уставки та компенсацію збурень, контур перепаду тиску дозволяє контролювати стан фільтра, а gain scheduling покращує якість керування при зміні його гідравлічного опору. Температурний контур забезпечує захист фільтрувального обладнання від перегріву. Отримані результати є основою для подальшого опису практичної реалізації системи на рівні ПЛК та ІоТ-інфраструктури.

2.8 Практична реалізація системи на PLCnext та ІоТ-рівні

Практична реалізація автоматизованої системи аспірації аглофабрики передбачає розподіл функцій між рівнем програмованого логічного контролера, Edge-рівнем інтеграції даних та ІоТ-рівнем моніторингу й аналітики. Такий підхід дозволяє забезпечити надійне локальне керування технологічним процесом і водночас реалізувати сучасні функції збору, архівування, візуалізації та аналізу даних.

Основні алгоритми керування та захисту реалізовано на базі програмованого логічного контролера сімейства PLCnext Control. Цей рівень є критичним для роботи системи, оскільки саме він безпосередньо взаємодіє з датчиками та виконавчими механізмами. На рівні ПЛК виконуються

					<i>КНУ КРБ.174.26.10.02.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		91

опитування вимірювальних каналів, масштабування аналогових сигналів, фільтрація даних, ПІД-регулювання розрідження, контроль перепаду тиску на фільтрі, температурний захист, керування імпульсним очищенням, вибір режиму роботи та обробка аварійних ситуацій.

Програмна реалізація алгоритмів виконана у середовищі PLCnext Engineer із використанням мов стандарту IEC 61131-3, зокрема Structured Text та Function Block Diagram [15, 23]. Для даної задачі використано модульну структуру програми, у якій кожна функціональна частина системи реалізується окремим функціональним блоком. Це спрощує налагодження, тестування та подальше розширення програми.

У структурі програми ПЛК були виділені такі основні функціональні блоки:

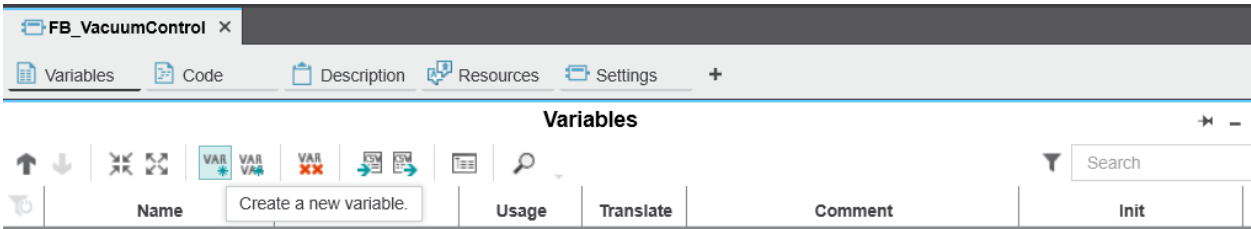
- InputProcessing – обробка, масштабування та фільтрація вхідних сигналів;
- VacuumControl – ПІД-регулювання розрідження під шаром шихти;
- FilterControl – контроль перепаду тиску на фільтрі, запуск очищення та gain scheduling;
- TemperatureProtection – контроль температури газів і формування захисних дій;
- ModeManager – визначення поточного режиму роботи системи;
- CleaningSequencer – послідовне керування клапанами імпульсного очищення;
- AlarmManager – формування аварійних і попереджувальних сигналів;
- DataPublisher – підготовка змінних для передавання на Edge-рівень через OPC UA.

Блок InputProcessing виконує первинну обробку вимірювальних сигналів. Аналогові сигнали від датчиків тиску, перепаду тиску, температури, витрати газів і концентрації пилу перетворюються з уніфікованого діапазону у фізичні одиниці вимірювання. Наприклад, сигнал 4–20 мА від датчика розрідження масштабується у кПа, сигнал від датчика температури – у градуси

					<i>КНУ КРБ.174.26.10.02.ПЗ</i>	Арк.
						92
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Цельсія, а сигнал пиломіра – у мг/м³. На цьому ж етапі виконується перевірка сигналів на вихід за допустимі межі, обрив лінії, коротке замикання або зависання значення.

Блок VacuumControl реалізує головний контур регулювання розрідження. На його вхід надходять поточне значення P_{vac} , задане значення P_{vacSP} , дозвіл на роботу регулятора та обмеження, сформовані логікою режимів. Виходом блока є завдання частоти вентилятора VFD_101_FREQ_SP (рис. 2.10). Оскільки контур розрідження має зворотну дію, у параметрах ПІД-регулятора враховано від’ємний коефіцієнт підсилення або встановити відповідний напрям дії регулятора.



Name	Type	Usage	Translate	Comment	Init
SP_vacuum	REAL	Input	☐	уставка розрідження, Па	REAL#-20000.0
PV_pressure	REAL	Input	☐	вимірний тиск, Па	REAL#0.0
Enable	BOOL	Input	☐	дозвіл роботи контуру	TRUE
dt	REAL	Input	☐	крок дискретизації, с	REAL#0.1
Override_SP	REAL	Input	☐	корекція уставки від рівня 2	REAL#0.0
Override_act	BOOL	Input	☐	прапор активного override	FALSE
VFD_freq	REAL	Output	☐	частота VFD, Гц (0..50)	REAL#0.0
Loop_error	REAL	Output	☐		REAL#0.0
Kp	REAL	Local	☐		REAL#-86.7
Ti	REAL	Local	☐		REAL#13.0
Td	REAL	Local	☐		REAL#0.923
error	REAL	Local	☐		REAL#0.0
P_term	REAL	Local	☐		REAL#0.0
I_term	REAL	Local	☐		REAL#0.0
D_term	REAL	Local	☐		REAL#0.0
I_sum	REAL	Local	☐		REAL#0.0
prev_err	REAL	Local	☐		REAL#0.0
out_raw	REAL	Local	☐		REAL#0.0
FREQ_MAX	REAL	Local	☐		REAL#50.0
FREQ_MIN	REAL	Local	☐		REAL#0.0
N_filt	REAL	Local	☐	фільтр похідно	REAL#10.0

Рисунок 2.10 – Інтерфейсна частина блоку FB_VacuumControl з описом змінних

Крім того, у блоці реалізовані обмеження мінімальної та максимальної частоти, а також захист від накопичення інтегральної складової (рис. 2.11).

```

1 IF NOT Enable THEN
2     I_sum := 0.0; prev_err := 0.0; VFD_freq := 0.0;
3     RETURN;
4 END_IF;
5 (* --- ефективна уставка з урахуванням override (рівень 2) --- *)
6 IF Override_act THEN
7     eff_SP := Override_SP;
8 ELSE
9     eff_SP := SP_vacuum;
10 END_IF;
11 (* --- похибка --- *)
12 error := eff_SP - PV_pressure;
13 Loop_error := error;
14 (* --- пропорційна складова --- *)
15 P_term := Kp * error;
16 (* --- інтегральна складова з anti-windup (умовне інтегрування) --- *)
17 I_sum := I_sum + (Kp / Ti) * error * dt;
18 IF I_sum > FREQ_MAX THEN I_sum := FREQ_MAX;
19 ELSIF I_sum < FREQ_MIN - FREQ_MAX THEN I_sum := FREQ_MIN - FREQ_MAX;
20 END_IF;
21 I_term := I_sum;
22 (* --- диференційна складова з фільтром --- *)
23 D_filt := (Td / (Td + N_filt*dt)) * D_filt
24         + (Kp*Td*N_filt / (Td + N_filt*dt)) * (error - prev_err);
25 D_term := D_filt;
26 prev_err := error;
27 (* --- сума та насичення --- *)
28 out_raw := P_term + I_term + D_term;
29 IF out_raw > FREQ_MAX THEN
30     VFD_freq := FREQ_MAX;
31     (* back-calculation anti-windup *)
32     I_sum := I_sum - (out_raw - FREQ_MAX);
33 ELSIF out_raw < FREQ_MIN THEN
34     VFD_freq := FREQ_MIN;
35     I_sum := I_sum - (out_raw - FREQ_MIN);
36 ELSE
37     VFD_freq := out_raw;
38 END_IF;

```

Рисунок 2.11 – Реалізація логіки блоку FB_VacuumControl на мові ST

Блок FilterControl відповідає за контроль перепаду тиску на фільтрі. Він аналізує поточне значення ΔP_f , порівнює його з порогами нормального стану, підвищеного навантаження та очищення. Якщо ΔP_f зростає, блок змінює параметри регулятора за алгоритмом gain scheduling. При досягненні порога ΔP_{f_clean} формується запит на перехід у режим CLEANING. Також блок може

оцінювати ефективність очищення за різницею перепаду тиску до і після циклу імпульсної регенерації.

Блок TemperatureProtection виконує захист фільтрувальних елементів від перегріву. Він контролює температуру газів перед фільтром T_g та порівнює її з попереджувальним і аварійним порогами. При наближенні температури до допустимої межі формується сигнал WARNING_TEMP, а при критичному перевищенні – сигнал аварійного захисту. Як керуючий вплив може використовуватися відкриття клапана підсмоктування атмосферного повітря або команда переведення системи у безпечний режим.

Блок ModeManager визначає поточний режим роботи системи. На його входи надходять сигнали аварій, концентрація пилу C_{pm} , температура T_g , перепад тиску ΔP_f , стан вентилятора, частотного перетворювача, датчиків і клапанів. На основі пріоритетної логіки блок формує значення MODE, яке може набувати станів NORMAL, WARNING, VIOLATION, CLEANING або EMERGENCY. Це значення використовується іншими блоками для дозволу або обмеження відповідних керуючих дій.

Блок CleaningSequencer реалізує послідовне вмикання клапанів імпульсного очищення фільтра. З метою недопущення різких коливань тиску клапани вмикаються не одночасно, а по черзі з заданою тривалістю імпульсу та паузою між секціями. Після завершення циклу очищення блок передає інформацію про виконання операції до FilterControl і AlarmManager. Якщо після очищення перепад тиску не зменшився, формується діагностичне попередження про можливе погіршення стану фільтрувальних елементів.

Блок AlarmManager централізовано обробляє аварійні та попереджувальні сигнали. До таких сигналів належать перевищення концентрації пилу, перегрів газів, високий перепад тиску, аварія частотного привода, відмова вентилятора, недостовірність сигналу датчика або неефективність очищення. Для кожної події фіксується тип, час виникнення, поточний режим системи та значення основних технологічних параметрів. Ці

					КНУ КРБ.174.26.10.02.ПЗ	Арк.
						95
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

дані надалі передаються на IoT-рівень для відображення оператору та запису в архів.

Логіку блоків FilterControl, TemperatureProtection, ModeManager, CleaningSequencer, AlarmManager зібрано у функціональному блоці FB_OverrideControl, інтерфейсну частину якого наведено на рис. 2.12.

Name	Type	Usage	Translate	Comment	Init	Access
T_gas	REAL	Input	☐	температура газів, °C	REAL#0.0	
Dust_conc	REAL	Input	☐	концентрація пилу, мг/м³	REAL#0.0	
dP_filter	REAL	Input	☐	перепад тиску фільтра, Па	REAL#0.0	
Emergency_stop	BOOL	Output	☐		FALSE	
Vacuum_SP_override	REAL	Output	☐		REAL#20000.0	
Override_active	BOOL	Output	☐		FALSE	
Production_throttle	REAL	Output	☐		REAL#1.0	
Pulse_jet_start	BOOL	Output	☐		FALSE	
Air_sucker_active	BOOL	Output	☐		FALSE	
Kp_scale_dP	REAL	Output	☐	множник для gain scheduling	REAL#1.0	
ESRS_log_event	BOOL	Output	☐		FALSE	
EMERGENCY_T	REAL	Local	☐		REAL#240.0	Private
IED_DUST	REAL	Local	☐		REAL#10.0	Private
WARN_DUST	REAL	Local	☐		REAL#9.0	Private
FILTER_T	REAL	Local	☐		REAL#200.0	Private
PULSE_dP	REAL	Local	☐		REAL#3500.0	Private

Рисунок 2.12 – Інтерфейсна частина блоку FB_OverrideControl з описом змінних

Фактично блок реалізує логіку пріоритетного керування за схемою п'яти пріоритетних рівнів: безпека обладнання (пріоритет 1), регуляторна відповідність IED (пріоритет 2), захист фільтрів (пріоритет 3), технологічна стабільність (пріоритет 4), енергоефективність (пріоритет 5). Вищий пріоритет завжди переважає нижчий, що реалізовано через ранній вихід (RETURN) при спрацюванні аварійного захисту. У цьому ж блоці реалізовано адаптивний gain scheduling для контуру ΔP фільтра у вигляді таблиці множників коефіцієнта залежно від стану фільтра (рис. 2.13).

```

5  =====*)
6  (* скидання прапорів кожного циклу *)
7  Emergency_stop := FALSE; Override_active := FALSE;
8  Production_throttle := 1.0; Pulse_jet_start := FALSE;
9  Air_sucker_active := FALSE; ESRS_log_event := FALSE;
10
11  (* ----- PRIORITY 1: безпека обладнання ----- *)
12  IF T_gas >= EMERGENCY_T THEN
13      Emergency_stop := TRUE;
14      Vacuum_SP_override := 0.0;
15      RETURN; (* нічого більше не виконуємо *)
16  END_IF;
17  (* ----- PRIORITY 2: регуляторна відповідність (IED) ----- *)
18  IF Dust_conc >= IED_DUST THEN
19      Production_throttle := 0.9; (* знизити продуктивність на 10% *)
20      Pulse_jet_start := TRUE;
21      ESRS_log_event := TRUE; (* запис порушення у ESRS E2 *)
22      Override_active := TRUE;
23      Vacuum_SP_override := -19000.0;
24  ELSEIF Dust_conc >= WARN_DUST THEN
25      Override_active := TRUE;
26      Vacuum_SP_override := -19000.0; (* менш агресивне розрідження *)
27  ELSE
28      Vacuum_SP_override := -20000.0;
29  END_IF;
30  (* ----- PRIORITY 3: захист фільтрів ----- *)
31  IF T_gas >= FILTER_T THEN
32      Air_sucker_active := TRUE;
33  END_IF;
34  IF dP_filter >= PULSE_dP THEN
35      Pulse_jet_start := TRUE;
36  END_IF;
37  (* ----- Gain scheduling для контуру ΔP filter ----- *)
38  IF dP_filter < 1500.0 THEN Kp_scale_dP := 1.0; (* CLEAN *)
39  ELSEIF dP_filter < 2500.0 THEN Kp_scale_dP := 0.7; (* NORMAL *)
40  ELSEIF dP_filter < 3500.0 THEN Kp_scale_dP := 0.5; (* LOADED *)
41  ELSE Kp_scale_dP := 0.3; (* CLOGGED *)
42  END_IF;

```

Рисунок 2.13 – Реалізація логіки блоку FB_OverrideControl на мові ST

Для передачі даних на верхні рівні ПЛК повинен надавати доступ до основних технологічних змінних через OPC UA-сервер. До переліку таких змінних входять P_{vac} , P_{vacSP} , ΔP_f , T_g , C_{pm} , f_v , VFD_101_FREQ_SP, стан вентилятора, стан клапанів очищення, поточний режим MODE, а також аварійні та попереджувальні сигнали. Використання OPC UA забезпечує стандартизований доступ до даних контролера, структуроване представлення змінних і можливість безпечної взаємодії з Edge-рівнем [18, 19].

Edge-рівень доцільно реалізувати на базі Node-RED. Його призначення полягає у зчитуванні даних із OPC UA-сервера ПЛК, попередній обробці телеметрії, формуванні повідомлень і передаванні даних на ІоТ-рівень. Типовий потік Node-RED для системи аспірації може містити такі вузли: OPC UA Client, Function, MQTT Out, InfluxDB Out (рис. 2.14). Вузол OPC UA Client зчитує параметри з контролера, Function формує структуру повідомлення, MQTT Out передає телеметрію на платформу моніторингу, а InfluxDB Out записує дані у базу часових рядів.

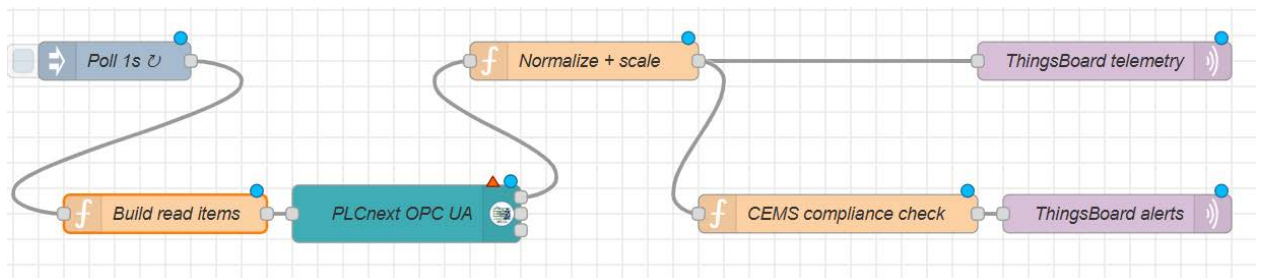


Рисунок 2.14 – Реалізація основного потоку програми у Node-RED

Для передавання телеметрії використовується протокол MQTT. Дані можуть бути організовані за тематичними топіками: aspiration/telemetry/process, aspiration/telemetry/filter, aspiration/telemetry/fan, aspiration/telemetry/emissions, aspiration/events/alarms та aspiration/system/mode. Такий поділ спрощує маршрутизацію повідомлень і дозволяє окремо обробляти технологічні параметри, стан обладнання, аварії та режими роботи [20].

На рис. 2.15 наведено код функції, що формує запит на читання змінних з ПЛК за їх ідентифікаторами вузлів OPC UA.

Після читання значень змінних за допомогою вузла OPC UA Client, функція «Normalize+scale» виконує нормалізацію та масштабування сирих значень вимірних параметрів у інженерні одиниці (рис. 2.16). Підготовлені вузлом дані надсилаються далі до хмарної платформи аналітики з використанням вузла MQTT out, основні налаштування якого наведено на рис. 2.17.

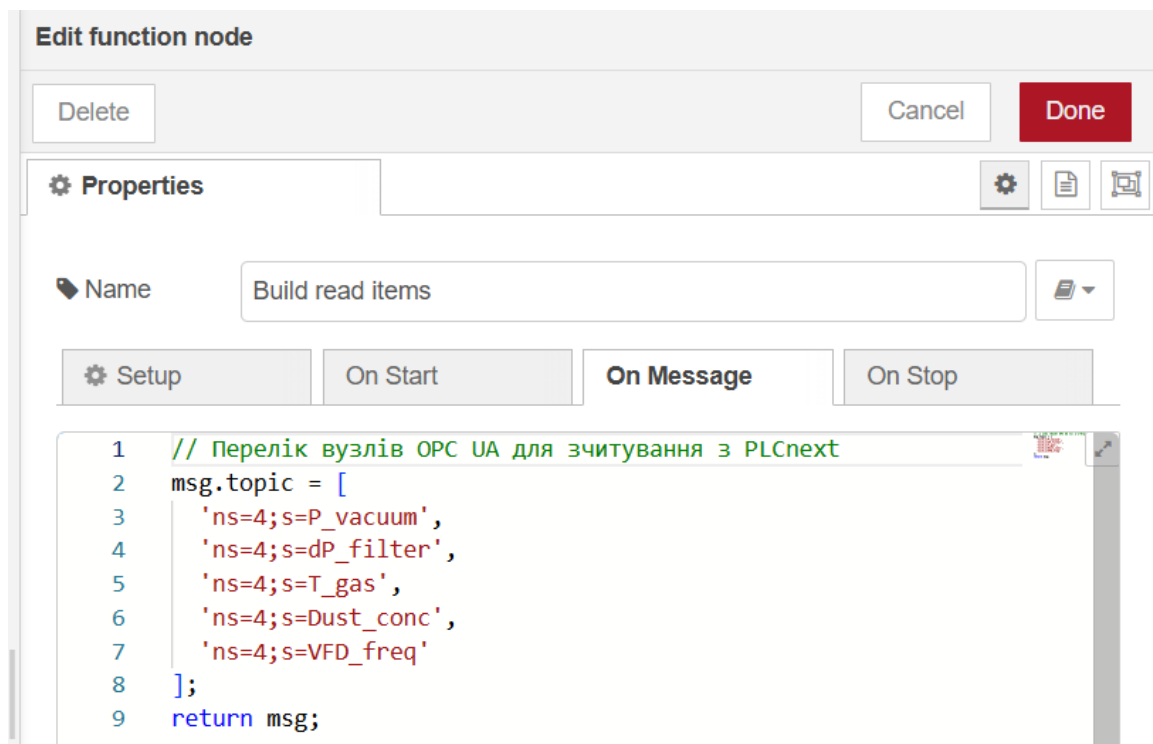


Рисунок 2.15 – Код функції формування запиту на читання змінних

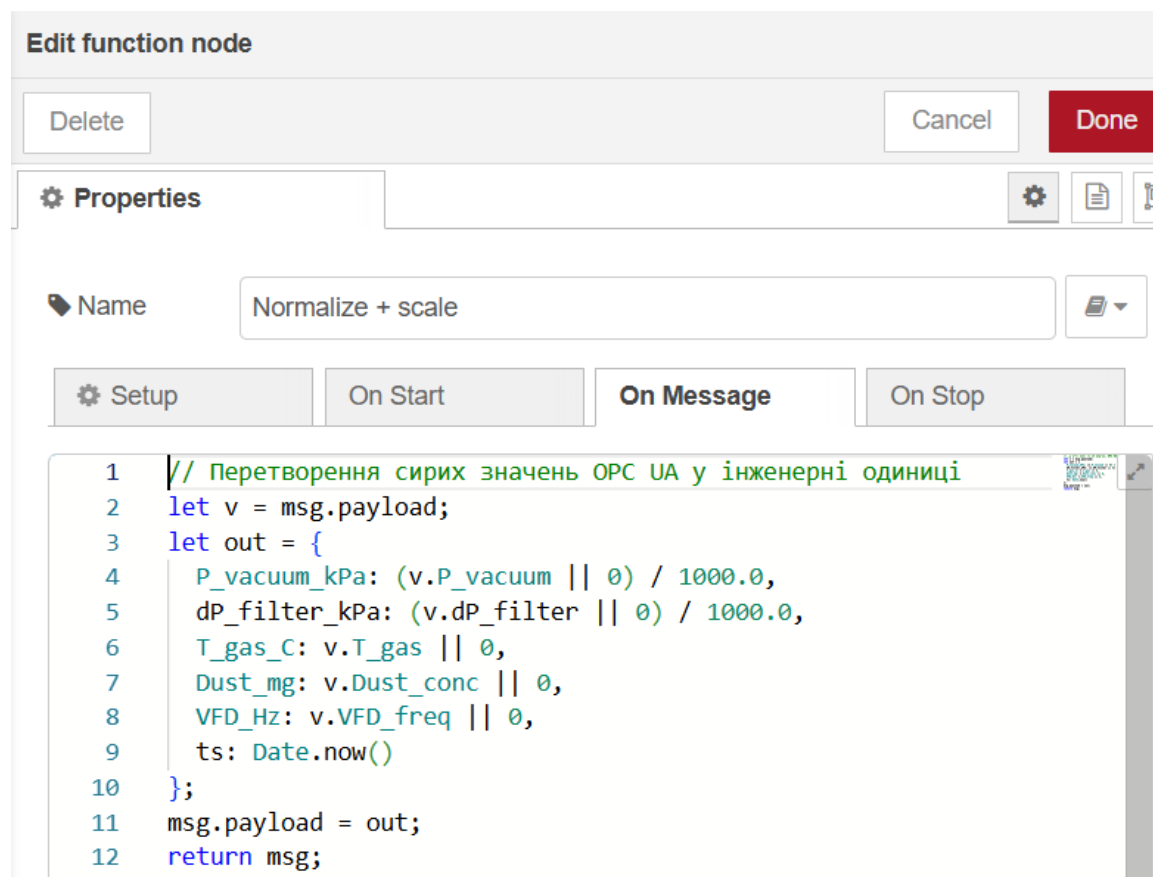


Рисунок 2.16 – Код функції нормалізації та масштабування зчитаних даних

Edit mqtt out node

Delete

Cancel

Done

⚙ Properties

⚙ 📄 🖨

🌐 Server

ThingsBoard CE

✎

+

📄 Topic

v1/devices/me/telemetry

⚙ QoS

1

⌵

🔄 Retain

⌵

🏷 Name

ThingsBoard telemetry

Tip: Leave topic, qos or retain blank if you want to set them via msg properties.

Рисунок 2.17 – Основні налаштування вузла для відправки даних до MQTT-брокера платформи аналітики

Приклад структури MQTT-повідомлення для основних технологічних параметрів може мати вигляд:

```
{
  "ts": 1710000000000,
  "P_vac": -20.1,
  "DPf": 2.2,
  "T_g": 181.5,
  "C_pm": 7.8,
  "f_v": 38.5,
  "MODE": "NORMAL "
}
```

Таке повідомлення містить часову мітку, поточні значення основних параметрів і режим роботи системи. У реальній системі до нього також доцільно додати ознаку якості сигналів, ідентифікатор джерела даних і статуси аварій.

					КНУ КРБ.174.26.10.02.ПЗ	Арк.
						100
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

На рис. 2.18 наведено код реалізації функцій контролю за дотриманням екологічних норм і надсилання алертів.

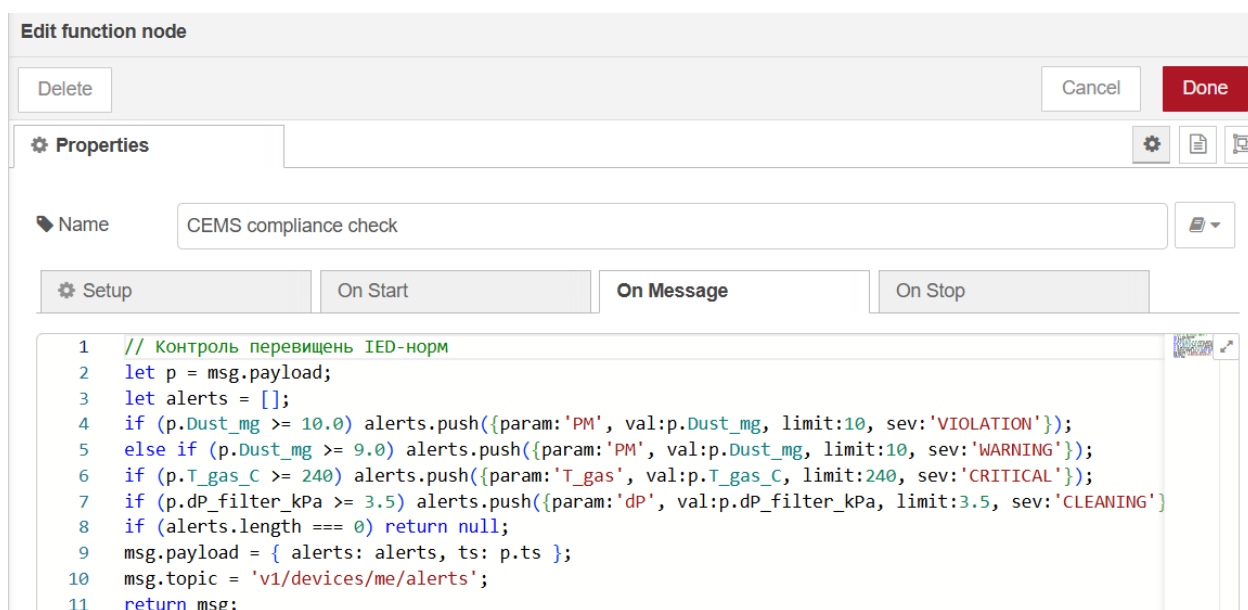


Рисунок 2.18 – Код реалізації функції «CEMS compliance check» контролю за дотриманням екологічних норм

На IoT-рівні дані приймаються платформою ThingsBoard або іншим аналогічним засобом моніторингу. Для системи аспірації доцільно створити декілька дашбордів: загальний огляд системи, контур розрідження, стан фільтра, температура газів, концентрація пилу, робота вентилятора, цикл очищення та журнал аварій. На головному екрані оператор повинен бачити поточний режим системи, основні параметри, стан виконавчих механізмів і активні попередження [22].

База даних часових рядів InfluxDB використовується для довготривалого зберігання технологічних параметрів. Доцільно архівувати не лише поточні значення P_{vac} , ΔP_f , T_g , C_{pm} , а й частоту вентилятора, споживану потужність, кількість спрацювань клапанів очищення, тривалість перебування у різних режимах і факти аварійних подій. Накопичення цих даних дозволяє аналізувати динаміку роботи системи, виявляти поступове забивання фільтра, оцінювати ефективність очищення та контролювати енергоспоживання [25].

Аналітичний сервіс може бути реалізований як окремий програмний модуль, який періодично зчитує дані з бази часових рядів, виконує розрахунок діагностичних показників і передає результати назад на ПоТ-платформу. До таких показників належать середній перепад тиску за зміну, швидкість зростання ΔP_f після очищення, ефективність регенерації фільтра, кількість циклів очищення, середня концентрація пилу, кількість перевищень, середня частота вентилятора та питоме енергоспоживання. На основі цих показників можна формувати рекомендації щодо обслуговування фільтрів і вентиляторного обладнання [33, 34].

Особливу увагу під час практичної реалізації необхідно приділити розмежуванню функцій керування та моніторингу. ПоТ-рівень не повинен безпосередньо керувати критичними виконавчими механізмами без перевірки на рівні ПЛК. Наприклад, якщо оператор змінює уставку розрідження через вебінтерфейс, ПЛК повинен перевірити, чи перебуває нове значення в допустимому діапазоні та чи не суперечить воно поточному режиму роботи. Це дозволяє уникнути небезпечних команд і зберегти пріоритет локальної автоматики.

У межах проєктованої системи також необхідно передбачити базові заходи кібербезпеки. До них належать обмеження доступу до OPC UA-сервера, використання облікових записів і паролів, розмежування прав користувачів, налаштування мережових правил, захист MQTT-брокера та резервне копіювання конфігурації Node-RED і ПоТ-платформи. Для промислової системи це важливо, оскільки несанкціонований доступ до технологічних даних або команд керування може вплинути на безпеку виробництва.

Практична реалізація системи може бути розгорнута поетапно. На першому етапі реалізуються локальні контури керування на ПЛК: регулювання розрідження, контроль перепаду тиску, температурний захист і логіка очищення. На другому етапі налаштовується OPC UA-обмін між ПЛК і Edge-рівнем. На третьому етапі створюється Node-RED-потік для обробки

					<i>КНУ КРБ.174.26.10.02.ПЗ</i>	Арк.
						102
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

телеметрії та передавання даних через MQTT. На четвертому етапі налаштовуються дашборди, архівування та базові аналітичні показники. Такий поетапний підхід зменшує ризики впровадження і дозволяє перевіряти працездатність системи на кожному рівні.

Таким чином, практична реалізація системи автоматизації аспірації аглофабрики передбачає використання ПЛК PLCnext для критичних функцій керування та захисту, Node-RED як Edge-шлюзу для інтеграції даних, MQTT для передавання телеметрії, ThingsBoard для візуалізації та InfluxDB для архівування часових рядів. Запропонована структура дозволяє поєднати надійність локальної промислової автоматики з можливостями IoT-моніторингу, діагностики та прогнозного обслуговування.

2.9 Рівень аналітики ESRS E2 та прогнозного обслуговування

Третій рівень реалізовано Python-сервісом на основі бібліотек pandas та scikit-learn. Сервіс виконує дві основні функції: формування квартальних звітів ESRS E2 «Забруднення» (кумулятивні викиди PM, NO_x, SO₂, інтенсивність викидів, частка часу відповідності нормам) та прогнозне обслуговування фільтрів на основі тренду базового перепаду тиску.

Стандарт ESRS E2 містить шість груп вимог до розкриття інформації (E2-1...E2-6). Фокусом розроблюваної системи є вимога E2-4 «Забруднення повітря, води та ґрунту».

Кумулятивні викиди обчислюються інтегруванням добутку концентрації забруднювача та об'ємної витрати газів за звітний період. Інтенсивність викидів визначається як відношення кумулятивних викидів до маси виробленого агломерату. Частка відповідності розраховується як відсоток часу, протягом якого концентрація пилу не перевищувала ліміт IED.

Алгоритм прогнозу базується на лінійній регресії тренду базового перепаду тиску $\Delta P_{\text{baseline}}$ (мінімального значення після кожного циклу очищення), який поступово зростає внаслідок незворотного забивання

					КНУ КРБ.174.26.10.02.ПЗ	Арк.
						103
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

тканини фільтра. При досягненні порогу 2,5 кПа рекомендується заміна рукавів. Частину реалізації алгоритму наведено у лістингу на рис. 2.19.

```
def predict_filter_replacement(history_df: pd.DataFrame) -> dict:
    """Прогноз дати заміни рукавів за трендом  $\Delta P_{baseline}$ .

    history_df: індекс – час, колонки 'dP', 'time_since_clean'.
    Повертає словник з прогнозом залишкового ресурсу.
    """

    # 1. Виокремлюємо baseline  $\Delta P$  (мінімум одразу після очищення)
    df_base = history_df.query('time_since_clean < 60')
    df_base = df_base['dP'].resample('1D').min().dropna()

    if len(df_base) < 5:
        return {'status': 'INSUFFICIENT_DATA', 'days_remaining': None}

    # 2. Лінійна регресія тренду
    X = np.arange(len(df_base)).reshape(-1, 1)
    y = df_base.values
    model = LinearRegression().fit(X, y)
    slope = model.coef_[0]
    intercept = model.intercept_
    r2 = r2_score(y, model.predict(X))

    # 3. Прогноз дня досягнення критичного рівня 2.5 кПа (2500 Па)
    DP_LIMIT = 2500.0
    if slope <= 0:
        return {'status': 'STABLE', 'days_remaining': None, 'confidence': r2}

    days_to_replace = (DP_LIMIT - intercept) / slope
    days_remaining = max(0, days_to_replace - len(df_base))

    return {
        'status': 'OK',
        'days_remaining': round(days_remaining),
        'replacement_date': (datetime.now() + timedelta(days=days_remaining)).date().isoformat(),
        'confidence': round(r2, 3),
        'baseline_trend_per_month_Pa': round(slope * 30, 1),
    }
```

Рисунок 2.19 – Фрагмент коду реалізації функції для прогнозування дати заміни рукавів

Рисунок 2.20 ілюструє прогнозування дати заміни: екстраполяція лінійного тренду дозволяє визначити залишковий ресурс фільтра з точністю $R^2 \geq 0,85$.

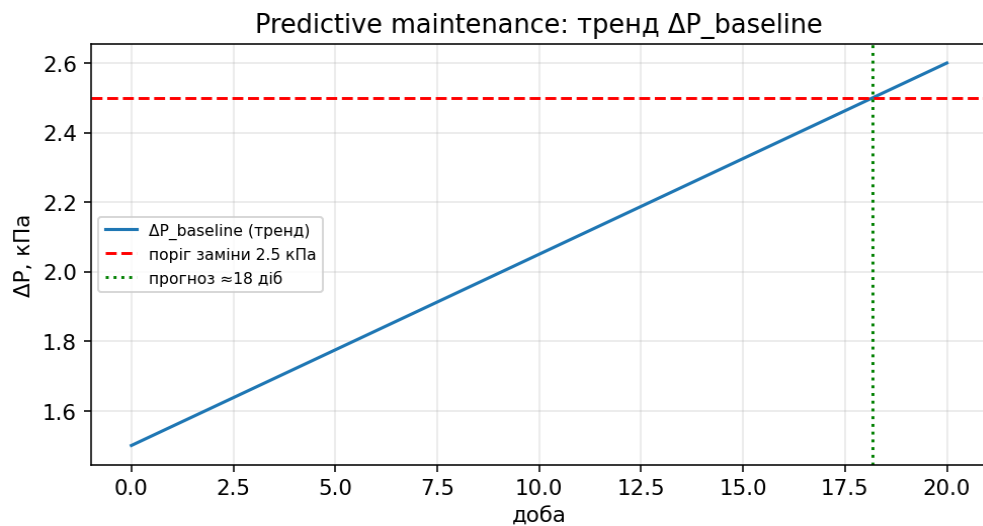


Рисунок 2.20 – Прогнозування заміни фільтрів за трендом $\Delta P_{\text{baseline}}$

Рисунок 2.21 демонструє роботу логіки Override Control при змодельованому перевищенні викидів пилю. За відсутності пріоритетного керування концентрація пилю перевищує ліміт IED 10 мг/м³, тоді як активація override знижує розрідження та повертає концентрацію у допустимі межі за час менше 5 с, забезпечуючи дотримання регуляторних вимог.

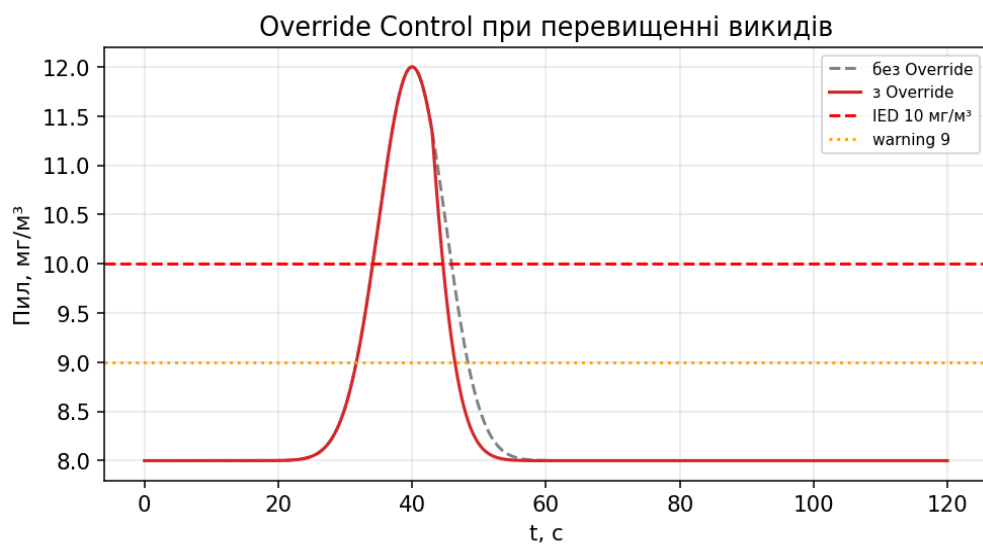


Рисунок 2.21 – Реакція Override Control на перевищення викидів пилю

Висновки до розділу:

У другому розділі було виконано проектування та апробацію системи автоматизації аспірації аглофабрики з використанням технологій промислового Інтернету речей. На основі результатів аналізу, проведеного у першому розділі, сформовано вимоги до системи, визначено її основні функції, обмеження та принципи розподілу задач між нижнім рівнем автоматизації, Edge-рівнем і ПоТ-рівнем.

Розроблено загальну архітектуру системи автоматизації, яка включає польовий рівень датчиків і виконавчих механізмів, рівень ПЛК PLCnext, Edge-рівень на базі Node-RED та ПоТ-рівень для моніторингу, архівування й аналітики. Обґрунтовано, що критичні функції керування, захисту та аварійного реагування повинні виконуватися безпосередньо на рівні ПЛК, тоді як верхні рівні мають забезпечувати візуалізацію, накопичення історичних даних, діагностику та інформаційну підтримку персоналу.

Розроблено інформаційну структуру системи, визначено основні технологічні змінні, сигнали керування, стани обладнання, аварійні та діагностичні параметри. Запропоновано структуру тегів для ПЛК, групування змінних для OPC UA та тематичні MQTT-топіки для передавання телеметрії на ПоТ-рівень. Це дозволило сформулювати єдину інформаційну модель системи аспірації та забезпечити логічний зв'язок між рівнем керування і рівнем моніторингу.

Для основних контурів системи аспірації побудовано спрощені динамічні моделі типу FOPDT. Окремо розглянуто контур розрідження, контур перепаду тиску на фільтрі та температурний контур. Такі моделі є достатніми для інженерного синтезу регуляторів і подальшого імітаційного дослідження якості керування.

На основі отриманих моделей виконано синтез ПІД-регуляторів методом ІМС. Визначено параметри регуляторів для контуру розрідження, перепаду тиску на фільтрі та температури газів. Обґрунтовано необхідність зворотної дії для контурів розрідження та температури, а також прямої дії для

					<i>КНУ КРБ.174.26.10.02.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		106

контур перепад тиску. Для запобігання небажаним режимам роботи передбачено обмеження керуючих впливів і захист від накопичення інтегральної складової.

Розроблено логіку Override Control, яка забезпечує пріоритетне керування системою з урахуванням технологічних, екологічних та аварійних обмежень. Виділено режими NORMAL, WARNING, VIOLATION, CLEANING та EMERGENCY, а також визначено порядок їх пріоритетності. Така логіка дозволяє системі не лише підтримувати задане розрідження, а й реагувати на перегрів фільтра, перевищення концентрації пилу, зростання перепаду тиску та аварійні стани обладнання.

Для контуру перепаду тиску на фільтрі запропоновано використання gain scheduling. Це дозволяє змінювати параметри регулятора залежно від поточного стану фільтра, який оцінюється за значенням перепаду тиску. Такий підхід враховує зміну гідравлічного опору фільтрувальних елементів у процесі експлуатації та підвищує стійкість системи керування при переході фільтра між станами чистого, нормально навантаженого та забитого.

Проведено імітаційне моделювання основних контурів керування. Результати моделювання показали, що ІМС-налаштування забезпечує аперіодичний характер перехідних процесів, відсутність статичної похибки та прийнятний час встановлення. Показано, що застосування gain scheduling покращує роботу контуру перепаду тиску при зміні стану фільтра, а температурний контур забезпечує плавне захисне регулювання без небезпечного перерегулювання.

Описано практичну реалізацію системи на базі PLCnext та IoT-рівня. Запропоновано модульну структуру програми ПЛК із функціональними блоками InputProcessing, VacuumControl, FilterControl, TemperatureProtection, ModeManager, CleaningSequencer, AlarmManager та DataPublisher. Для передавання даних на верхній рівень передбачено використання OPC UA, Edge-обробку в Node-RED, публікацію телеметрії через MQTT. Виконано апробацію IoT-рівня та аналітичних функцій.

					КНУ КРБ.174.26.10.02.ПЗ	Арк.
						107
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Отже, у другому розділі розроблено комплексне технічне рішення для автоматизації системи аспірації аглофабрики. Запропонована система поєднує локальне автоматичне керування на рівні ПЛК із можливостями IoT-моніторингу, архівування та аналітики. Це дозволяє підвищити стабільність технологічного процесу, забезпечити контроль екологічних параметрів, покращити діагностику стану обладнання та створити основу для подальшого впровадження прогностичного обслуговування.

					<i>КНУ КРБ.174.26.10.02.ПЗ</i>	Арк.
						108
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі вирішено задачу розроблення системи автоматизації аспірації аглофабрики з використанням технологій промислового Інтернету речей. Актуальність роботи зумовлена необхідністю підвищення стабільності роботи аспіраційних систем, забезпечення контролю пилових викидів, зменшення енергетичних витрат та впровадження сучасних засобів моніторингу й діагностики промислового обладнання.

У першому розділі проаналізовано технологічний процес агломерації та визначено роль системи аспірації у забезпеченні газодинамічного режиму спікання, видаленні запилених газів і зниженні шкідливих викидів. Показано, що система аспірації є складним об'єктом автоматизації, у якому взаємодіють процеси транспортування газового потоку, очищення запилених газів, регулювання розрідження, контролю температури, перепаду тиску та концентрації пилу.

Виконано аналіз системи аспірації як об'єкта керування. Визначено основні технологічні параметри, керуючі впливи, збурення та режими роботи системи. Обґрунтовано, що для ефективного керування такою системою недостатньо лише локального регулювання окремих параметрів, оскільки необхідно враховувати технологічні, екологічні, енергетичні та аварійні обмеження.

Проаналізовано існуючі підходи до автоматизації аспіраційних і газоочисних систем. Показано доцільність використання ПД-регулювання, ІМС-налаштування, Override Control, gain scheduling, а також сучасних засобів промислового обміну даними та ІоТ-моніторингу. Сформовано теоретичну базу роботи, яка включає FOPDT-моделі, методи синтезу регуляторів, принципи пріоритетного керування, адаптації параметрів регулятора, ОРС

					КНУ КРБ.174.26.10.00.ПЗ						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ВИСНОВКИі				Літ.	Арк.	Аркушів
Розроб.		Рябко О.О.									
Перевір.		Жосан А.А.								64	2
									КНУ АКІТР-23ск		
Н. Контр.		Маринич І.А.									
Затверд.		Маринич І.А.									

UA, MQTT, Edge-обробку, архівування часових рядів і діагностичну аналітику.

У другому розділі сформовано вимоги до системи автоматизації аспірації аглофабрики та розроблено її загальну архітектуру. Запропонована структура включає польовий рівень датчиків і виконавчих механізмів, рівень ПЛК PLCnext, Edge-рівень на базі Node-RED та ІоТ-рівень для моніторингу, архівування й аналітики. Такий розподіл функцій дозволяє залишити критичні алгоритми керування та захисту на рівні ПЛК, а функції візуалізації, накопичення даних і діагностики реалізувати на верхніх рівнях системи.

Розроблено інформаційну структуру системи, визначено основні технологічні змінні, сигнали керування, аварійні повідомлення, діагностичні параметри, групи OPC UA-змінних і MQTT-топіки для передавання телеметрії. Це забезпечує узгоджений обмін даними між рівнем керування, Edge-шлюзом і ІоТ-платформою.

Для основних контурів керування побудовано спрощені динамічні моделі типу FOPDT. На їх основі виконано синтез ПД-регуляторів методом ІМС для контуру розрідження, контуру перепаду тиску на фільтрі та температурного контуру. Обґрунтовано вибір напрямів дії регуляторів, необхідність обмеження керуючих впливів і використання захисту від накопичення інтегральної складової.

Розроблено логіку Override Control для вибору режимів роботи системи NORMAL, WARNING, VIOLATION, CLEANING та EMERGENCY. Запропонована логіка забезпечує пріоритет аварійного захисту, температурного захисту фільтра, дотримання екологічних обмежень, підтримання технологічного розрідження та енергетичної оптимізації. Для контуру перепаду тиску на фільтрі запропоновано алгоритм gain scheduling, який дозволяє змінювати параметри регулятора залежно від поточного стану фільтра.

Проведено імітаційне моделювання основних контурів керування. Результати моделювання показали, що ІМС-налаштування забезпечує аперіодичний характер перехідних процесів, відсутність статичної похибки та прийнятний час встановлення. Показано, що використання gain scheduling

					КНУ КРБ.174.26.10.00.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		110

підвищує стійкість контуру перепаду тиску при зміні гідравлічного опору фільтра, а температурний контур забезпечує плавне захисне регулювання.

Описано практичну реалізацію системи на базі PLCnext та IoT-рівня. Запропоновано модульну структуру програми ПЛК із функціональними блоками для обробки сигналів, регулювання розрідження, контролю фільтра, температурного захисту, вибору режимів, керування очищенням, обробки аварій і передавання даних. Для верхнього рівня обґрунтовано використання OPC UA, Node-RED, MQTT, ThingsBoard та InfluxDB.

Практична цінність роботи полягає у розробленні структурованого технічного рішення, яке може бути використане як основа для модернізації аспіраційних систем аглофабрик. Запропонована система дозволяє підвищити стабільність технологічного процесу, забезпечити оперативний контроль екологічних параметрів, покращити діагностику стану фільтрувального та вентиляторного обладнання, а також створити основу для впровадження прогностичного обслуговування.

Розроблена система автоматизації поєднує класичні методи автоматичного керування з сучасними технологіями промислового Інтернету речей, що дозволяє підвищити ефективність, надійність та інформаційну прозорість роботи системи аспірації аглофабрики.

					<i>КНУ КРБ.174.26.10.02.ПЗ</i>	Арк.
						111
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Cores A., Verdeja L. F., Ferreira S., Ruiz-Bustanza Í., Mochón J. Iron ore sintering. Part 1. Theory and practice of the sintering process. DYNA. 2013. Vol. 80, No. 180. P. 152–171. URL: https://www.researchgate.net/publication/265477115_Iron_ore_sintering_Part_1_Theory_and_practice_of_the_sintering_process (дата звернення: 16.05.2026).

2. Cores A., Verdeja L. F., Ferreira S., Ruiz-Bustanza Í., Mochón J., Robla J. I., González Gasca C. Iron ore sintering. Part 3: Automatic and control systems. DYNA. 2015. Vol. 82, No. 190. P. 227–236. DOI: <https://doi.org/10.15446/dyna.v82n190.44054>. URL: <https://www.redalyc.org/pdf/496/49637154030.pdf> (дата звернення: 16.05.2026).

3. Remus R., Aguado-Monsonet M. A., Roudier S., Sancho L. D. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Iron and Steel Production. Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2013. 597 p. URL: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC69967> (дата звернення: 16.06.2026).

4. European Environment Agency. EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023. 2.C.1 Iron and steel production. Copenhagen : European Environment Agency, 2023. URL: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/emep-eea-guidebook-2023> (дата звернення: 16.05.2026).

5. United States Environmental Protection Agency. AP-42: Compilation of Air Pollutant Emission Factors. Chapter 12.5: Iron and Steel Production. Research Triangle Park : U.S. EPA. URL: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2020-11/documents/c12s05.pdf> (дата звернення: 16.05.2026).

					КНУ КРБ.174.26.10.00.ПЗ					
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ			Літ.	Арк.	Аркушів
Розроб.		Рябко О.О.								
Перевір.		Жосан А.А.							112	3
								КНУ АКІТР-23ск		
Н. Контр.		Маринич І.А.								
Затвердив		Маринич І.А.								

6. United States Environmental Protection Agency. Air Pollution Control Technology Fact Sheet: Fabric Filter — Pulse-Jet Cleaned Type. EPA-452/F-03-025. Research Triangle Park : U.S. EPA, 2003. URL: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-10/documents/ff-pulse.pdf> (дата звернення: 16.05.2026).

7. United States Environmental Protection Agency. Air Pollution Control Technology Fact Sheet: Dry Electrostatic Precipitator (ESP) — Wire-Plate Type. EPA-452/F-03-028. Research Triangle Park : U.S. EPA, 2003. URL: https://airknowledge.gov/ILT/PERM242/Current/CI/05PERM242_Handout_ESP_EPA_Fact_Sheet2.pdf (дата звернення: 16.05.2026).

8. Cooper C. D., Alley F. C. Air Pollution Control: A Design Approach. 4th ed. Long Grove : Waveland Press, 2010. 839 p. URL: <https://www.waveland.com/browse.php?t=380> (дата звернення: 16.05.2026).

9. Hinds W. C. Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles. 2nd ed. New York : Wiley, 1999. 483 p. URL: <https://archive.org/details/aerosoltechnolog0002hind> (дата звернення: 16.05.2026).

10. U.S. Department of Energy, Air Movement and Control Association International. Improving Fan System Performance: A Sourcebook for Industry. Washington : U.S. Department of Energy, 2003. URL: https://www.energy.gov/sites/default/files/2014/05/f16/fan_sourcebook.pdf (дата звернення: 16.05.2026).

11. Seborg D. E., Edgar T. F., Mellichamp D. A., Doyle F. J. Process Dynamics and Control. 4th ed. Hoboken : John Wiley & Sons, 2016. 512 p. URL: <https://www.wiley.com/en-us/Process%2BDynamics%2Band%2BControl%2C%2B4th%2BEdition-p-9781119285915> (дата звернення: 16.05.2026).

12. Åström K. J., Hägglund T. PID Controllers: Theory, Design, and Tuning. 2nd ed. Research Triangle Park : ISA — The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 1995. 343 p. URL: <https://www.isa.org/products/pid-controllers-theory-design-and-tuning-secon-1> (дата звернення: 16.05.2026).

					<i>КНУ КРБ.174.26.10.02.ПЗ</i>	Арк.
						113
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

13. Stephanopoulos G. Chemical Process Control: An Introduction to Theory and Practice. Englewood Cliffs : Prentice Hall, 1984. 696 p. URL: <https://www.amazon.com/Chemical-Process-Control-Introduction-Practice/dp/0131286293> (дата звернення: 16.05.2026).

14. Skogestad S. Simple analytic rules for model reduction and PID controller tuning. Journal of Process Control. 2003. Vol. 13, No. 4. P. 291–309. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0959-1524\(02\)00062-8](https://doi.org/10.1016/S0959-1524(02)00062-8). URL: <https://skoge.folk.ntnu.no/publications/2003/tuningPID/finalpaper.pdf> (дата звернення: 16.05.2026).

15. IEC 61131-3:2013. Programmable controllers — Part 3: Programming languages. Geneva : International Electrotechnical Commission, 2013. URL: <https://webstore.iec.ch/en/publication/4552> (дата звернення: 16.05.2026).

16. IEC 61511-1:2016. Functional safety — Safety instrumented systems for the process industry sector — Part 1: Framework, definitions, system, hardware and application programming requirements. Geneva : International Electrotechnical Commission, 2016. URL: <https://webstore.iec.ch/en/publication/24241> (дата звернення: 16.05.2026).

17. ISO/IEC 30141:2018. Internet of Things (IoT) — Reference Architecture. Geneva : International Organization for Standardization, 2018. URL: <https://www.iso.org/standard/65695.html> (дата звернення: 16.05.2026).

18. OPC Foundation. OPC UA Online Reference. URL: <https://reference.opcfoundation.org/> (дата звернення: 16.05.2026).

19. OPC Foundation. Unified Architecture. URL: <https://opcfoundation.org/about/opc-technologies/opc-ua/> (дата звернення: 16.05.2026).

20. OASIS. MQTT Version 5.0. OASIS Standard. 2019. URL: <https://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v5.0/mqtt-v5.0.html> (дата звернення: 16.05.2026).

21. Node-RED. User Guide. URL: <https://nodered.org/docs/user-guide/> (дата звернення: 16.05.2026).

					<i>КНУ КРБ.174.26.10.02.ПЗ</i>	Арк.
						114
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

22. ThingsBoard. ThingsBoard Documentation. URL: <https://thingsboard.io/docs/> (дата звернення: 16.05.2026).

23. Phoenix Contact. PLCnext Engineer Online Help. URL: <https://engineer.plcnext.help/latest/AboutThisDoc.htm> (дата звернення: 16.05.2026).

24. Phoenix Contact. AXC F 2152 — Controller. Product Documentation. URL: <https://www.phoenixcontact.com/en-nl/products/controller-axc-f-2152-2404267> (дата звернення: 16.05.2026).

25. InfluxData. InfluxDB Documentation. URL: <https://docs.influxdata.com/> (дата звернення: 16.05.2026).

26. Docker Inc. Docker Documentation. URL: <https://docs.docker.com/> (дата звернення: 16.05.2026).

27. Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council of 24 November 2010 on industrial emissions. Official Journal of the European Union. 2010. L 334. P. 17–119. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2010/75/oj/eng> (дата звернення: 16.05.2026).

28. Commission Implementing Decision 2012/135/EU of 28 February 2012 establishing the best available techniques (BAT) conclusions under Directive 2010/75/EU on industrial emissions for iron and steel production. Official Journal of the European Union. 2012. L 70. P. 63–98. URL: https://eur-lex.europa.eu/eli/dec_impl/2012/135/oj (дата звернення: 16.05.2026).

29. Directive (EU) 2022/2464 of the European Parliament and of the Council of 14 December 2022 as regards corporate sustainability reporting. Official Journal of the European Union. 2022. L 322. P. 15–80. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2022/2464/oj/eng> (дата звернення: 16.05.2026).

30. Commission Delegated Regulation (EU) 2023/2772 of 31 July 2023 supplementing Directive 2013/34/EU as regards sustainability reporting standards. Official Journal of the European Union. 2023. L. URL: https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_del/2023/2772/oj/eng (дата звернення: 16.05.2026).

					<i>КНУ КРБ.174.26.10.02.ПЗ</i>	Арк.
						115
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

31. ДСТУ EN 14181:2014. Вікиди стаціонарних джерел. Забезпечення якості автоматизованих вимірювальних систем (EN 14181:2014, IDT). Чинний від 2016-01-01. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=63145 (дата звернення: 16.05.2026).

32. Brinkmann T., Both R., Scalet B. M., Roudier S., Delgado Sancho L. JRC Reference Report on Monitoring of Emissions to Air and Water from IED Installations. Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2018. URL: https://bureau-industrial-transformation.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2019-12/ROM_2018_08_20.pdf (дата звернення: 16.05.2026).

33. Jardine A. K. S., Lin D., Banjevic D. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. Mechanical Systems and Signal Processing. 2006. Vol. 20, No. 7. P. 1483–1510. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2005.09.012>.

34. Achouch M., Dimitrova M., Ziane K., Sattarpanah Karganroudi S., Dhouib R., Ibrahim H., Adda M. On Predictive Maintenance in Industry 4.0: Overview, Models, and Challenges. Applied Sciences. 2022. Vol. 12, No. 16. Article 8081. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12168081>. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/16/8081> (дата звернення: 16.05.2026).

35. Моркун Н. В., Маринич І. А. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавру для студентів спеціальності 151 “Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології”. Кривий Ріг : Видавничий центр КНУ, 2019. 50 с.

36. ДСТУ 3008:2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. Київ, ДП «УкрННЦ», 2015. 26с. (Інформація та документація).

37. ДСТУ 8302:2015. Бібліографічне посилання. Загальні вимоги та правила складання Київ, ДП «УкрННЦ», 2016. 16 с. (Інформація та документація).

					<i>КНУ КРБ.174.26.10.02.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		116

38. ДСТУ 3582:2013. Бібліографічний опис. Скорочення слів і словосполучень в українській мові. Загальні вимоги та правила. Київ, ДП «УкрННЦ», 2013. 23 с. (Інформація та документація)

39. ДСТУ 3651.0-97 Метрологія. Одиниці фізичних величин. Основні одиниці фізичних величин Міжнародної системи одиниць. Основні положення, назви та позначення Київ, Держстандарт України, 1998. 27 с. (Інформація та документація)

					<i>КНУ КРБ.174.26.10.02.ПЗ</i>	Арк.
						117
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		