

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

МР.АКПМ-34.00.00.000 ПЗ

Група АКПМ-24-2

Назар Бажан

2025

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

Бажан Назар Тарасович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 681.53:66.074

(індекс)

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Автоматизація електрофільтра в системі очищення промислових газів

(назва роботи)

Автоматизація та комп'ютерно–інтегровані технології

(назва освітньої програми)

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

(шифр і назва спеціальності)

Консультант з нормоконтролю

асистент

(посада)

Л.І. Лагойда

(підпис)

(дата)

(ініціали та прізвище)

Здобувач освітнього ступеня

АКПм–24–2

(шифр групи)

(підпис)

(дата)

Н.Т. Бажан

(ініціали та прізвище)

Науковий керівник

доц., к.т.н.

(науковий ступінь, вчене звання) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

О.В. Кучмистенко

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

доцент, к.т.н.

(посада)

(підпис)

(дата)

(ініціали та прізвище)

А.І. Лагойда

Рецензент

доц., к.т.н.

(посада)

(підпис)

(дата)

(ініціали та прізвище)

І.І. Чигур

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

Івано–Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра автоматизації та комп'ютерно–інтегрованих технологій

Освітній рівень магістерський

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

(шифр і назва)

робототехніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АКІТ

(А.І. Лагойда)

« » 20 25 року

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

Бажану Назару Тарасовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Автоматизація електрофільтра в системі очищення
промислових газів

керівник роботи к.т.н., Олександр Васильович Кучмистенко

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

затвердені наказом закладу вищої освіти від «10» 11 20 25 року № 699/7

2. Строк подання студентом роботи 11.12.2025

3. Вихідні дані до роботи технологічна схема об'єкта, технологічний
регламент, стандарти, каталоги, методичні вказівки, технічна література.

4. Зміст розрахунково–пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Аналіз процесу електричного очищення промислових газів.

2. Синтез багатовимірної багатозв'язної автоматизованої системи регулювання розподілу газових потоків між електрофільтрами.

3. Синтез системи керування електрорежимом електрофільтра.

4. Побудова архітектури автоматизованої системи керування сухим електрофільтром.

Загальні висновки.

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

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання 20.11.2025

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз процесу електричного очищення промислових газів.	11.11.24–25.11.25	
2	Синтез багатовимірної багатозв'язної автоматизованої системи регулювання розподілу газових потоків між електрофільтрами	22.11.24–31.11.25	
3	Синтез системи керування електрорежимом електрофільтра.	01.12.24–10.12.25	
4	Побудова архітектури автоматизованої системи керування сухим електрофільтром.	05.12.24–10.12.25	

Студент _____
(підпис)

Н.Т. Бажан _____
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

О.В. Кучмистенко _____
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

На магістерську роботу студента Бажана Н.Т. на тему: «Автоматизація електрофільтра в системі очищення промислових газів».

Магістерська робота на здобуття кваліфікації магістра з автоматизації за спеціальністю 174 – Автоматизація, комп'ютерно–інтегровані технології та робототехніка. – Івано–Франківський національний технічний університет нафти і газу, – Івано–Франківськ, 2025 р.

Основні ідеї, результати та висновки: У роботі проведено дослідження процесу електрофільтрації газових потоків та розроблено математичні моделі багатовимірного об'єкта з урахуванням фізики коронного розряду, зарядження та руху частинок, а також газорозподілу. Запропоновано інтелектуальну систему автоматичного управління електрофільтром із використанням методів нечіткої логіки, що дозволяє ефективно враховувати невизначеність, нелінійність та змінність технологічних параметрів.

Сформовано базу нечітких правил, функції належності та інтегровану структуру керування, яка забезпечує адаптивне регулювання електрорежиму й стабілізацію ефективності очистки. Розроблено трирівневу автоматизовану систему управління із застосуванням ПЛК та SCADA–системи для моніторингу, індикації та візуалізації роботи електрофільтра. Проведене моделювання підтвердило підвищення точності регулювання і стабільність роботи системи за умов змін навантаження та параметрів газового потоку.

Пояснювальна записка до магістерської роботи має обсяг 93 сторінки та містить 20 рисунків, 7 таблиць і 16 літературних джерел.

Розроблена система може бути використана для модернізації промислових електрофільтрів, підвищення їх енергоефективності та надійності, а також як навчальний ресурс для студентів, що вивчають автоматизацію промислових газоочисних процесів та інтелектуальні системи керування.

Ключові слова: ЕЛЕКТРОФІЛЬТР, НЕЧІТКА ЛОГІКА, ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ, АВТОМАТИЗАЦІЯ.

ANNOTATION

For the master's thesis of student N.T. Bazhan on the topic: “Automation of an Electrostatic Precipitator in an Industrial Gas Cleaning System.” Master’s thesis submitted for the degree of Master in Automation under specialty 174 – Automation, Computer–Integrated Technologies and Robotics. – Ivano–Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, – Ivano–Frankivsk, 2025.

Main ideas, results, and conclusions: The thesis investigates the process of electrostatic gas filtration and develops mathematical models of a multivariable system that incorporate the physics of corona discharge, particle charging and motion, as well as gas flow distribution. An intelligent automatic control system for the electrostatic precipitator is proposed, based on fuzzy logic methods, enabling effective consideration of uncertainty, nonlinearity, and variability of technological parameters.

A fuzzy rule base, membership functions, and an integrated control structure have been designed to ensure adaptive regulation of the electrical operating mode and stabilization of filtration efficiency. A three–level automated control system has been developed using PLC technologies and a SCADA system for monitoring, indication, and visualization of the precipitator’s operation. The conducted simulations confirmed improved control accuracy and stable system performance under varying load conditions and gas flow parameters.

The explanatory note of the master’s thesis comprises 93 pages and includes 20 figures, 7 tables, and 16 references.

The developed system may be applied for the modernization of industrial electrostatic precipitators, improving their energy efficiency and reliability, and may also serve as an educational resource for students studying automation of industrial gas cleaning processes and intelligent control systems.

Keywords: ELECTROSTATIC PRECIPITATOR, FUZZY LOGIC, INTELLIGENT CONTROL SYSTEMS, AUTOMATION.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ	8
ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ ЕЛЕКТРИЧНОГО ОЧИЩЕННЯ ПРОМИСЛОВИХ ГАЗІВ	12
1.1 Аналіз технологічного процесу	12
1.2 Електрофільтри та особливості процесу електричного очищення промислових газів	14
1.3 Аналіз впливу хімічного складу димових газів на процес електричного очищення.....	19
1.4 Аналіз стану теорій і практики процесу електричної очистки газів та його математичний опис	25
1.5 Огляд сучасних досліджень систем керування процесом очищення промислових газів від пилу	31
1.6 Аналіз технологічного режиму роботи установок пиловловлювання	33
Висновки до розділу 1	38
РОЗДІЛ 2. СИНТЕЗ БАГАТОВИМІРНОЇ БАГАТОЗВ'ЯЗНОЇ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ РОЗПОДІЛУ ГАЗОВИХ ПОТОКІВ МІЖ ЕЛЕКТРОФІЛЬТРАМИ	39
2.1 Розроблення схемних рішень і математичних моделей АСК розподілу газових потоків між електрофільтрами	40
2.2 Аналіз багатовимірної багатозв'язної автоматизованої системи керування розподілом газів по електрофільтрах без використання регуляторів	47
2.3 Налаштування регуляторів ізольованих підсистем із використанням ПД– регуляторів.....	52
2.4 Налаштування багатовимірної багатозв'язної автоматизованої системи керування розподілом газів по електрофільтрах із компенсацією взаємозв'язків	53
Висновки до розділу 2	57
РОЗДІЛ 3. СИНТЕЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОРЕЖИМОМ ЕЛЕКТРОФІЛЬТРА.....	59

3.1 Розробка інтелектуальної системи керування електрорежимом електрофільтра.....	59
3.2 Розробка нечіткого управління електрофільтром	63
3.3 Розробка нечіткого управління електрофільтром з урахуванням електричного режиму	65
Висновки до розділу 3	78
Розділ 4. ПОБУДОВА АРХІТЕКТУРИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ СУХИМ ЕЛЕКТРОФІЛЬТРОМ	79
4.1 Розроблення архітектури АСК сухим електрофільтром.....	80
4.2 Формування вхідних і вихідних сигналів.....	82
4.3 SCADA–система та її функціональні можливості.....	85
Висновки до розділу 4	88
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	89
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	92

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ

ЕФ – Електрофільтр

ЕСФ – Електростатичний фільтр

ПЕО – Питомий електричний опір

ЕВМ – Електричні виконавчі механізми

ANFIS – Адаптивна нейромережа на основі нечіткої системи виведення

FIS – Нечітка функція належності

МІМО – Множинний вхід – множинний вихід

Багатовимірна багатозв’язна (МІМО) система управління

SCADA – Диспетчерське управління та збір даних

TIA Portal – Інтегроване середовище розроблення програмного забезпечення систем автоматизації технологічних процесів (Totally Integrated Automation Portal)

TCP – Протокол керування передаванням (Transmission Control Protocol)

ВСТУП

Актуальність теми. Процес очищення промислових газів від твердих частинок за допомогою електрофільтрів є складним технологічним процесом, що характеризується багатовимірністю, нестационарністю та високою чутливістю до зміни технологічних параметрів. В умовах сучасного виробництва виникає потреба у створенні інтелектуальних систем управління, здатних забезпечувати стабільну ефективність очистки та енергоефективність обладнання. Використання нечіткої логіки для автоматизації процесу електрофільтрації дозволяє враховувати невизначеність та неповноту інформації, адаптивно реагувати на зміни електрорежиму та газового потоку, що забезпечує підвищену стабільність роботи установки.

Обґрунтування вибору теми дослідження. Тема дослідження пов'язана з розробкою інтелектуальної системи керування електрофільтром, що має значення для підвищення ефективності очистки промислових газів у різних виробничих умовах. Оптимізація параметрів електрорежиму, керування газорозподілом та забезпечення стабільного видалення пилу сприяють не лише підвищенню точності та надійності системи, а й зменшенню енергоспоживання, подовженню терміну служби обладнання та мінімізації негативного впливу на довкілля.

Мета і завдання дослідження. Мета дослідження полягає у розробці та вдосконаленні інтелектуальної системи керування електрофільтром на основі нечіткої логіки, здатної ефективно регулювати процес електрофільтрації та адаптуватися до зміни технологічних умов.

Завдання дослідження включали:

- аналіз фізичних процесів та конструктивних рішень електрофільтрів, вивчення механізму коронного розряду, зарядження та переміщення частинок;
- розробку математичних моделей багатовимірного об'єкта та аналіз їхньої динаміки;
- синтез багатовимірної системи автоматизованого керування газорозподілом

та електрорежимом;

- побудову нечіткої системи керування з формуванням функцій належності, бази правил та інтеграцією у єдину керуючу структуру;
- розробку та аналіз автоматизованої системи управління з трирівневою архітектурою, включаючи полеву автоматику, ПЛК та SCADA–систему.

Об’єкт і предмет дослідження. Об’єктом дослідження є процес електрофільтрації газових потоків у промислових електрофільтрах та системи автоматичного керування цим процесом. Предметом дослідження є фізичні, математичні та нечіткі моделі процесу, алгоритми регулювання електрорежиму і газорозподілу, а також інтегровані системи керування, що забезпечують стабільність, точність та енергоефективність роботи електрофільтра.

Методи дослідження. Методи дослідження включають системний аналіз, математичне моделювання, синтез багатовимірних систем управління, побудову нечітких моделей та комп’ютерне тестування розроблених алгоритмів у симуляційних середовищах. Ці методи дозволили комплексно оцінити динаміку процесу, взаємозв’язки між підсистемами та ефективність адаптивного керування.

Новизна отриманих результатів. Новизна роботи полягає у комплексному підході до побудови інтелектуальної системи керування електрофільтром, що включає:

- розробку математичних моделей багатовимірного об’єкта з урахуванням взаємозв’язків між підсистемами та впливу хімічного складу газів;
- впровадження нечітких моделей керування з адаптивним регулюванням параметрів електрорежиму;
- інтеграцію багатовимірної системи та нечітких моделей у єдину систему керування, що підвищує стабільність, точність і енергоефективність процесу;
- використання SCADA–системи та мнемосхем для візуалізації процесу, моніторингу та оперативного реагування на відхилення від нормального режиму.

Зв’язок роботи з науковими програмами та планами. Дослідження відповідає сучасним тенденціям автоматизації промислових процесів, розвитку

інтелектуальних систем управління та оптимізації енергоспоживання у технологічних установках. Результати роботи можуть бути використані для модернізації існуючих систем керування, підвищення ефективності очищення газів і мінімізації впливу на довкілля.

Практичне значення отриманих результатів. Практична значимість полягає у впровадженні розробленої системи керування на промислових електрофільтрах, що забезпечує стабільне очищення газових потоків, зменшення енергоспоживання, оптимізацію роботи обладнання та підвищення надійності технологічного процесу. Розроблені методи можуть слугувати основою для подальших досліджень та вдосконалення систем керування у промислових газоочисних установках.

Структура та обсяг магістерської роботи. Пояснювальна записка до магістерської роботи має обсяг 93 сторінки та містить 20 рисунків, 7 таблиць і 16 літературних джерел. Структура роботи включає вступ, чотири розділи з теоретичним і практичним дослідженням, висновки та список використаних джерел.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ ЕЛЕКТРИЧНОГО ОЧИЩЕННЯ ПРОМИСЛОВИХ ГАЗІВ

1.1. Аналіз технологічного процесу

Енергетична галузь становить фундамент сучасної економіки, забезпечуючи функціонування більшості промислових і соціально-економічних систем. У структурі світового паливно-енергетичного комплексу органічне паливо продовжує відігравати провідну роль, зберігаючи статус основного джерела енергії. За оцінками міжнародних енергетичних агентств, прогнозовані запаси органічного палива становлять для вугілля від 220 до 330 років, для природного газу – близько 35–60 років, тоді як запаси нафти оцінюються в межах 25–50 років. Ці показники свідчать про збереження домінування традиційних джерел енергії у світовому енергетичному балансі в середньостроковій і довгостроковій перспективі.

У наступні десятиліття зростання генерувальних потужностей на глобальному рівні відбуватиметься переважно за рахунок теплових електростанцій, що використовують органічне паливо, зокрема з розширенням практики застосування низькосортних видів палива. Орієнтовна структура введених у дію потужностей характеризується таким розподілом: майже третина припадає на вугілля, близько чверті – на природний газ, приблизно п'ята частина – на гідроенергетику, решта охоплює атомну енергетику, мазут та інші джерела. Такий баланс обумовлений наявністю відпрацьованих технологій спалювання вуглеводневого палива, високим рівнем технологічної надійності теплових станцій і відносною стабільністю світових цін на енергоносії.

Водночас сучасна наукова думка все більше зосереджується на екологічному вимірі енергетики, оскільки діяльність галузі є одним із головних чинників антропогенного впливу на довкілля. Відтак провідні дослідники та державні інституції світу наголошують на необхідності переходу до відновлюваних і

нетрадиційних джерел енергії, а також на всебічному впровадженні політики енергоефективності та раціонального споживання ресурсів. Ці напрями розглядаються як базові умови для зниження екологічних ризиків, пов'язаних із функціонуванням енергетичних підприємств.

Узагальнюючи зазначене, можна стверджувати, що органічне паливо залишатиметься основним енергетичним ресурсом як у найближчій, так і у віддаленій перспективі, хоча відбуватиметься поступова зміна структури його використання. Частка нафти й нафтопродуктів у паливному балансі має тенденцію до скорочення, поступаючись місцем природному газу й вугіллю. Використання природного газу відкриває перспективу розвитку парогазових установок, що демонструють високий коефіцієнт корисної дії, який може сягати 57–60 %. У сфері перероблення твердих палив актуальними стають енерготехнологічні комплекси, орієнтовані на комплексну утилізацію палива та мінімізацію відходів. Зростає значення біоенергетики, що базується на спалюванні біомаси та вторинних продуктів сільськогосподарського чи лісогосподарського походження. Незважаючи на технологічний прогрес, екологічні аспекти енергетики продовжують залишатися предметом постійної уваги через високий рівень викидів шкідливих речовин.

Продукти згоряння органічного палива, які утворюються під час роботи теплових електростанцій, мають потенційно небезпечний вплив на атмосферне повітря, гідросферу та біосферу. Саме тому експлуатація таких об'єктів потребує впровадження системи технічних і технологічних заходів, спрямованих на запобігання забрудненню навколишнього середовища. Головним напрямом природоохоронної діяльності є скорочення викидів токсичних сполук, які надходять в атмосферу внаслідок процесів згоряння палива.

У межах сучасної екологічної політики сформовано законодавчі та санітарно-гігієнічні норми, що регулюють допустимі концентрації шкідливих речовин у промислових викидах. Встановлено обов'язковість застосування систем очищення газових потоків, які забезпечують досягнення нормативного рівня чистоти викидів. Такі вимоги поширюються на всі промислові підприємства,

незалежно від галузевої належності.

Особливої уваги потребує очищення газових викидів від твердих частинок, які утворюються внаслідок неповного згоряння палива. Це завдання має вирішальне значення для енергетики, оскільки теплова енергетика залишається головним джерелом викидів золистих і пилових компонентів. Концентрація частинок у продуктах згоряння визначається характеристиками використовуваного палива, способом його підготовки, технологією подачі й спалювання, а також конструктивними особливостями топкових пристроїв і котлів. Так, під час спалювання бурого вугілля зольність димових газів може сягати 40–42 г/м³, що суттєво перевищує допустимі санітарні норми. Це зумовлює необхідність упровадження вискоелективних технологій очищення газів, серед яких електрофільтри посідають особливе місце завдяки своїй здатності затримувати найдрібніші аерозольні частинки й забезпечувати стабільний рівень очищення навіть при великих об'ємах газового потоку.

1.2. Електрофільтри та особливості процесу електричного очищення промислових газів

Електрофільтри займають провідне місце серед технологічних засобів очищення промислових димових газів, що утворюються внаслідок спалювання органічного палива на теплових електростанціях і промислових підприємствах. Їхня ефективність зумовлена здатністю уловлювати як великі, так і дрібнодисперсні частинки твердих домішок, використовуючи принцип електростатичного осадження, який ґрунтується на дії електричного поля високої напруги.

Одним із найскладніших питань, що виникає під час вибору, розрахунку та експлуатації електрофільтрів, є визначення питомого електричного опору пилу, який підлягає осадженню. Цей параметр має вирішальне значення для ефективності процесу очищення, оскільки саме він визначає поведінку частинок у електричному полі, впливаючи на швидкість їх зарядження та осадження на осаджувальних

електродах. Високе значення питомого опору зменшує провідність шару пилу, що може призводити до зниження стабільності електричного поля, збільшення пробоїв і, відповідно, зменшення ефективності уловлювання частинок.

Практичне визначення питомого електричного опору є складним через велику кількість факторів, які впливають на його значення. До таких факторів належать хімічний склад і дисперсний склад пилу, температура та вологість газового потоку, наявність у газах хімічних домішок, що здатні змінювати електропровідність осажденного шару. Зокрема, сполуки сірки, натрію та хлору можуть істотно знижувати питомий опір завдяки підвищенню іонної провідності поверхневого шару частинок. Навпаки, наявність зольних компонентів із високим вмістом кремнезему або оксидів алюмінію сприяє збільшенню опору, що ускладнює процес осадження.

На сьогодні не існує єдиної уніфікованої методики вимірювання питомого електричного опору пилу. У науковій та промисловій практиці використовуються різні експериментальні підходи, результати яких часто не узгоджуються між собою через різницю у вимірювальних умовах. Це створює значні труднощі при інженерних розрахунках і проектуванні електрофільтрів, адже неточне визначення опору може призвести до некоректного вибору параметрів електричного поля та неефективного очищення газів. Тому розроблення універсальної методики визначення питомого електричного опору пилу залишається актуальним завданням сучасної енергетичної науки, особливо з огляду на різноманіття палив, умов експлуатації та складу промислових викидів.

Ефективність роботи електрофільтра, а також величина електроспоживання системи безпосередньо залежать від конструктивних і експлуатаційних параметрів пристрою. На процес осадження частинок впливають площа поверхні осадження, швидкість руху газів у робочій камері, рівномірність розподілу потоку, напруженість електричного поля, форма та розташування електродів. Крім того, важливе значення мають фізико-хімічні властивості золи, її зольність, вологість, вміст сірки у паливі, надлишок повітря, а також температура димових газів, які надходять у електрофільтр. Кожен із цих факторів може як підвищувати, так і

знижувати ефективність процесу очищення, тому сумарний ефект їх взаємодії є неоднозначним і потребує детального аналітичного дослідження.

Температура димових газів є одним із найважливіших технологічних параметрів, який визначає стабільність роботи електрофільтра. У системах «холодного» типу ефективність осадження частинок зростає зі зниженням температури газового потоку, що пояснюється зменшенням питомого електричного опору пилу і, відповідно, покращенням електропровідності осадженого шару. Зниження температури також супроводжується зменшенням швидкості руху газів, що сприяє більш тривалому контакту частинок із електричним полем і підвищує ступінь їх уловлювання. Як показано на рисунку 1.1, існує виражена залежність між температурою газового потоку та ефективністю роботи електрофільтра, яка демонструє оптимальний температурний діапазон, у межах якого досягається найвищий рівень очищення.

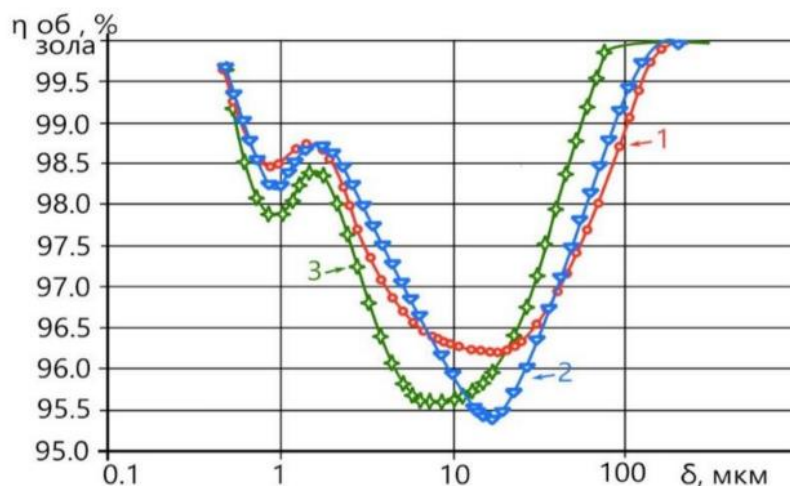


Рис. 1.1. Ефективність уловлювання фракцій легкої золи за різних температур

На рисунку 1.1 представлено залежність ефективності уловлювання фракцій легкої золи від температури газового потоку на вході до електрофільтра. Графічна залежність демонструє, що з підвищенням температури ефективність електричного очищення зменшується, що пов'язано зі зростанням питомого електричного опору

частинок пилу. При температурі ефективної фільтрації $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ (крива 1) спостерігається найвищий ступінь осадження, оскільки за таких умов електропровідність золи є найбільш сприятливою для формування стійкого електричного поля та рівномірного осадження частинок на поверхні електродів.

За подальшого підвищення температури до $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ (крива 2) процес уловлювання частинок дещо ускладнюється, що пояснюється зниженням вологості газової суміші та відповідним зростанням опору шару пилу. За температури $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ (крива 3) ефективність фільтрації помітно знижується, оскільки електростатичне осадження стає менш стабільним через значне збільшення питомого електричного опору та зниження зарядності частинок.

Зі зростанням об'єму димових газів, що надходять до електрофільтра, відбувається пропорційне підвищення швидкості їх руху в робочій зоні апарата, що, у свою чергу, спричиняє зниження ефективності уловлювання частинок золи. Така залежність пояснюється тим, що при збільшенні швидкості газового потоку скорочується час перебування частинок у зоні дії електричного поля, внаслідок чого частина з них не встигає осісти на осаджувальних електродах і потрапляє у вихідні гази.

Підвищення ефективності осадження золи можливе за рахунок збільшення напруженості електричного поля E , що забезпечує більш інтенсивне зарядження частинок і збільшує силу електростатичного притягання до електродів. Водночас рівень напруженості електричного поля обмежується електричною міцністю газового середовища, яка визначає максимальну допустиму напругу, за якої не відбувається пробій газу між електродами.

Електрична міцність газової фази зростає при підвищенні концентрації багатоатомних компонентів, таких як діоксид вуглецю (CO_2), водяна пара (H_2O), а також оксиди сірки (SO_2 , SO_3). Ці компоненти сприяють покращенню електропровідності газового потоку завдяки збільшенню кількості іонів і зменшенню імовірності виникнення локальних пробіїв. Крім того, електрична міцність газової фази підвищується зі зниженням температури димових газів, особливо за умов, коли температура перевищує точку роси t_p . У цьому діапазоні

температура безпосередньо впливає на густину газового середовища, і з її зменшенням збільшується кількість зіткнень між іонами та молекулами, що підвищує стабільність електричного поля та запобігає його руйнуванню.

Рівень ефективності уловлювання золи в електрофільтрі значною мірою визначається швидкістю дрейфу заряджених частинок до осаджувальних електродів. Цей процес має вирішальне значення, оскільки швидкість дрейфу визначає, з якою інтенсивністю заряджені частинки переміщуються під дією електричного поля, долаючи опір потоку газів. Зменшення цієї швидкості спричиняє пропорційне зниження ступеня очищення, що математично описується рівнянням Дейча:

$$\eta = 1 - \exp\left(\frac{-\omega L}{H_0 V_r}\right) \eta, \quad (1.1)$$

де: η – ступінь ефективності уловлювання частинок;

ω – швидкість дрейфу заряджених частинок;

L – довжина активної (осаджувальної) зони електрофільтра;

H_0 – міжелектродна відстань;

V_r – середня швидкість газового потоку в електрофільтрі.

Формула Дейча має важливе теоретичне й практичне значення для аналізу процесів електростатичного осадження. Вона демонструє, що ступінь очищення зростає із збільшенням довжини активної зони або швидкості дрейфу частинок, тоді як підвищення швидкості потоку газу або міжелектродної відстані негативно впливає на результат. Таким чином, для забезпечення максимальної ефективності роботи електрофільтра необхідно досягати оптимального співвідношення між швидкістю руху газів, геометричними параметрами установки та напруженістю електричного поля.

У практичних умовах проектування систем очищення газів це рівняння використовується для оцінювання впливу технологічних параметрів на ефективність процесу та для вибору оптимальних режимів роботи електрофільтра. Відповідна оптимізація дозволяє мінімізувати енергетичні втрати, забезпечити стабільність електричного розряду й підтримувати високий ступінь очищення навіть при змінних об'ємах і температурах димових газів.

Ефективність функціонування електрофільтра знижується не лише за умови надмірно високого питомого електричного опору пилу, а й при надмірно низькому його значенні, тобто за підвищеної електропровідності шару осаджених частинок. У такому випадку зменшується здатність частинок утримувати електричний заряд, що призводить до часткової їх розрядки й ослаблення сил електростатичного притягання до осаджувальних електродів. Як наслідок, частина осащеного шару може відриватися під дією газового потоку або механічних вібрацій, повертаючись у газову фазу й знижуючи загальну ефективність очищення.

Надмірно провідний шар пилу спричиняє також зростання інтенсивності розрядів між електродами, що призводить до нестабільності електричного поля. У результаті цього спостерігається коливання потенціалу, зниження напруженості поля в окремих зонах та зменшення швидкості дрейфу заряджених частинок. Таке явище характерне для пилів із високим вмістом сполук, що мають значну електропровідність, зокрема сполук натрію, калію, хлору або сірки, які утворюють на поверхні частинок тонкі іонопровідні шари.

Питоме електричне опір золи визначається складною сукупністю фізико–хімічних чинників, серед яких провідну роль відіграють склад палива, температура та хімічний склад газової фази. Найвищі значення опору характерні для золи, утвореної при спалюванні вугілля з низьким умістом натрію та сірки, оскільки в таких випадках у структурі твердих частинок переважають оксиди кремнію, алюмінію й кальцію, які відзначаються слабкою електропровідністю. Навпаки, у вугіллі, що містить значну кількість сірки або натрію, продукти згоряння мають підвищену іонну провідність, що істотно знижує питомий опір золи.

1.3. Аналіз впливу хімічного складу димових газів на процес електричного очищення

Ефективність процесу електричної очистки димових газів визначається передусім фізико–хімічними властивостями потоку, що підлягає очищенню. Найсуттєвіший вплив мають кількість газів, їх температура, концентрація

шкідливих домішок та дисперсний склад частинок. Саме розмір, форма, питома маса й електропровідність частинок пилу визначають умови їх заряджання та швидкість дрейфу у полі електрофільтра. Зменшення розмірів частинок, підвищення їх злипальності або абразивності призводить до зміни динаміки осадження, ускладнюючи процес очищення. Крім того, на ефективність функціонування електрофільтра суттєво впливають агресивність газового середовища, початкова запиленість і вологість газів, а також параметри робочого процесу – тиск, температура, витрата й стабільність потоку.

Експлуатаційна надійність електрофільтра безпосередньо залежить від дотримання допустимих меж температури та тиску, а також від рівномірності об'єму газу, що проходить крізь систему. Важливим аспектом є й конструкційна адаптація електрофільтрів до умов роботи – можливість їх експлуатації на відкритому повітрі, здатність витримувати навантаження від газоходів і температурних коливань. Усі ці чинники зумовлюють стабільність електричного поля, рівномірність осадження та тривалість служби обладнання.

У сучасній теплоенергетиці, особливо за кордоном, відбувається активний перехід від традиційного спалювання кам'яного або бурого вугілля до комбінованого спалювання, де як додаткове паливо використовується біомаса. Такий підхід відповідає глобальній тенденції до підвищення енергоефективності та зниження шкідливих викидів. Використання біомаси як джерела енергії дозволяє скоротити споживання викопного палива, зменшити обсяг утворення вуглекислого газу й підвищити екологічну стійкість енергетичних процесів. У багатьох країнах, зокрема в Казахстані, створюються умови для розвитку біоенергетики, включно з організацією виробництва екологічно чистого біопалива у вигляді паливних брикетів або гранул. За оцінками експертів ПРООН, лише переробка сільськогосподарських і деревних відходів у Казахстані може забезпечити виробництво біопалива, еквівалентного кільком мільйонам тонн вугілля, а також створити тисячі нових робочих місць.

Сумісне спалювання вугілля з біомасою має низку технологічних переваг. Воно дозволяє підвищити загальний коефіцієнт корисної дії енергетичної

установки, зменшити витрати на модернізацію обладнання, знизити концентрацію шкідливих викидів оксидів сірки, азоту та твердих частинок, а також скоротити собівартість виробленої енергії. Крім того, процес сумісного спалювання сприяє зменшенню викидів парникових газів, що відповідає вимогам міжнародних екологічних стандартів.

Водночас результати експериментальних досліджень свідчать, що біомаса має низку властивостей, які суттєво відрізняють її від традиційних видів палива. Зокрема, для біомаси характерні значні коливання теплотворної здатності, висока вологість, нестабільний хімічний склад і підвищена схильність до утворення шлакових та корозійних відкладень. Ці чинники ускладнюють роботу систем електричного очищення, оскільки зміна складу димових газів впливає на їхню електропровідність, діелектричні властивості та утворення іонів у газовій фазі. За надмірної вологості чи високої концентрації оксидів сірки й азоту знижується електрична міцність газів, що призводить до нестабільності розрядів у міжелектродному просторі та зменшення ефективності осадження золи.

Склад димових газів, що утворюються під час спалювання біомаси, суттєво залежить від її походження. Наприклад, деревна біомаса характеризується низькою зольністю, але містить багато летких органічних сполук, тоді як аграрні відходи мають більший вміст золи, лужних металів і сполук хлору, що можуть викликати підвищене шлакування та корозію поверхонь нагріву. Це вимагає ретельного дослідження складу димових газів перед впровадженням системи автоматичного регулювання процесів очищення, аби забезпечити стабільність електричних параметрів і мінімізувати відхилення в роботі електрофільтра [1].

Порівняльний аналіз фізико-хімічних властивостей біомаси та традиційного палива свідчить, що теплота згоряння біомаси в робочому стані може коливатися у дуже широкому діапазоні – від 9 до 20 МДж/кг залежно від виду сировини. Найвищу теплотворну здатність мають деревні брикети та біопаливо на основі м'ясо-кісткового борошна, тоді як подрібнена тріска або солома характеризуються нижчим енергетичним потенціалом. Такі розбіжності безпосередньо впливають на температуру димових газів, їх об'єм і хімічний склад, а отже, і на ефективність

електричного очищення.

Таблиця 1.1

Фізико–хімічні властивості вугілля та різних видів біомаси

Тип палива	Загальна вологість, %	Зольність, %	Теплотворна здатність, кДж/кг	Вміст сірки, %	Вміст азоту, %	Вміст хлору, %	Вміст фтору, %
Кам'яне вугілля	6–12	8–20	25000– 29000	0,5– 1,8	0,8– 1,3	0,02– 0,05	Н.А.
Буре вугілля	15–30	5–12	16000– 20000	0,3– 1,0	0,5– 1,0	0,02– 0,05	Н.А.
Деревна біомаса (тріска)	35–55	0,3–2,0	8000–11000	0,02– 0,05	0,1– 0,5	0,01– 0,03	Н.А.
Солома злакових культур	10–20	3–8	14000– 16000	0,1– 0,3	0,3– 0,7	0,1– 0,3	0,01– 0,02
Лушпиння соняшника	7–12	2–4	16000– 18000	0,1– 0,2	0,4– 0,6	0,05– 0,10	0,01
Торф паливний	40–55	4–15	8000–14000	0,2– 0,6	0,5– 1,0	0,02– 0,05	Н.А.
Деревні брикети	5–10	0,5–1,0	18000– 20000	0,02– 0,05	0,2– 0,4	0,01– 0,02	Н.А.
Біомаса тваринного походження (м'ясо–кісткове борошно)	5–10	20–25	18000– 20000	0,5– 1,0	4–6	0,1– 0,2	Н.А.

У науковому аспекті подані дані відображають суттєві відмінності між

традиційними вуглецевмісними паливами та біомасою. Вологість і зольність біопалив істотно варіюють залежно від виду сировини, способу зберігання та підготовки до спалювання. Біомаса зазвичай характеризується нижчою теплотворною здатністю, але перевагою є її низький вміст сірки, азоту й хлору, що зменшує утворення токсичних оксидів і сприяє екологічній чистоті процесу горіння.

Особливу увагу слід приділяти підвищеному вмісту лужних елементів та хлоридів у рослинній біомасі, оскільки вони здатні викликати шлакування поверхонь нагріву й зменшення ресурсу експлуатації котельного обладнання. Висока вологість деревної біомаси або торфу обумовлює потребу в попередньому сушінні для підвищення енергетичної ефективності спалювання.

Таким чином, представлені у таблиці фізико-хімічні характеристики демонструють необхідність диференційованого підходу до вибору паливної суміші для котельних агрегатів, оскільки зміна параметрів складу палива безпосередньо впливає на температуру та склад димових газів, а отже – і на ефективність електричної очистки.

Виявлені відмінності у фізичних та хімічних властивостях біомаси та вугілля зумовлюють необхідність розроблення гнучких систем автоматизації, здатних забезпечувати стабільну та ефективну очистку промислових газів, що утворюються при спалюванні різних видів палива в енергетичних котлах. Такі системи мають враховувати змінність складу паливної суміші, особливості кінетики горіння, а також динамічні коливання параметрів газових потоків. Удосконалення автоматизованих систем електричної очистки є одним із напрямів підвищення екологічної безпеки сучасної енергетики, що дозволяє зменшити викиди твердих частинок і токсичних сполук незалежно від характеристик палива.

Результати досліджень, проведених на промислових електростанціях, що здійснюють спалювання біомаси, засвідчили наявність ряду факторів, які сприяють підвищенню вмісту горючих речовин у твердих побічних продуктах згорання. Аналіз показав, що одним із основних чинників є експлуатація котлів, спроектованих для спалювання вугілля, без урахування особливостей біопалива.

Такі агрегати не завжди забезпечують належне перемішування паливно–повітряної суміші, що призводить до стратифікації шару палива, утворення зон локального неповного згорання та збільшення кількості незгорілих частинок у золі.

Важливим чинником є також недостатня якість підготовки біомаси перед подачею у топку. Недостатнє подрібнення або нерівномірність гранулометричного складу палива утруднюють рівномірне згорання, а висока вологість і низька температура займання біомаси ускладнюють стабілізацію полум'я. Значне підвищення частки біомаси в суміші з вугіллям без належної корекції режимів спалювання може викликати порушення теплового балансу камери згорання та підвищення рівня механічного недопалу [2].

Не менш істотним є й недотримання оптимального співвідношення повітря та палива. Надлишок або нестача кисню у зоні горіння зумовлюють неповне окиснення вуглецю й водню, що не лише знижує теплотехнічну ефективність процесу, а й погіршує екологічні показники, збільшуючи кількість продуктів неповного згорання в димових газах. Відсутність систем онлайн–моніторингу ступеня вигорання частинок у леткій золі й шлаку значно ускладнює своєчасне коригування параметрів горіння, що знижує загальну ефективність роботи установки.

Сучасні підходи до енергетичного використання біомаси охоплюють кілька напрямів, серед яких найбільш перспективним є спільне спалювання біомаси з вугіллям у діючих енергетичних котлах. Така технологія дозволяє адаптувати існуючі потужності без необхідності капітальної реконструкції, водночас зменшуючи обсяг викидів оксидів сірки, азоту та вуглекислого газу. Іншим шляхом є застосування спеціалізованих топкових агрегатів, розрахованих виключно на спалювання біомаси, що забезпечує кращу стабільність процесу та підвищену ефективність енергетичного перетворення.

Значний інтерес становить також комбіноване використання біомаси у паливних установках із попередньою газифікацією, що дозволяє отримувати генераторний газ із високою енергетичною щільністю. Цей газ може застосовуватись як у великих енергетичних системах, так і в автономних

когенераційних установках, зокрема в міні-ТЕЦ на базі біомасових газогенераторів. У таких системах створюються умови для комплексного використання біопалива з мінімальним впливом на довкілля, що робить їх перспективним напрямом розвитку сучасної теплоенергетики.

1.4. Аналіз стану теорій і практики процесу електричної очистки газів та його математичний опис

Процес електричної очистки газів ґрунтується на явищі електростатичного осадження твердих частинок із газового потоку під дією електричного поля. У його основі лежить коронний розряд, який виникає між електродами різного потенціалу в умовах високої напруженості електричного поля. Під впливом цього розряду відбувається іонізація молекул газу, внаслідок чого утворюються позитивні та негативні іони, що, у свою чергу, взаємодіють із частинками пилу. Пилові частинки, адсорбуючи на своїй поверхні іони, набувають електричного заряду та починають рухатися в напрямку осаджувальних електродів, де вони накопичуються, утворюючи шар осаду, який періодично видаляється.

Між коронуючими та осаджувальними електродами створюється неоднорідне електричне поле постійного напрямку та значної напруженості. Коронуючі електроди, що мають високий потенціал, слугують джерелом іонізації газового середовища, тоді як осаджувальні електроди, потенціал яких дорівнює нулю, виконують функцію колекторів заряджених частинок. Унаслідок різниці потенціалів між цими електродами утворюється коронний розряд, що характеризується появою стійкого іонного потоку. Саме цей потік забезпечує рух заряджених частинок пилу в напрямку осадження.

У загальному вигляді установка електричної очистки газів складається з електрофільтра та високовольтного агрегата живлення, як показано на рисунку 1.2. Електрофільтр являє собою систему каналів або камер, у яких розміщені коронуючі та осаджувальні електроди, а також механізми струшування осаду. Високовольтний агрегат забезпечує стабільне електроживлення електродів

постійною або імпульсною напругою високого рівня, що необхідна для підтримання коронного розряду.

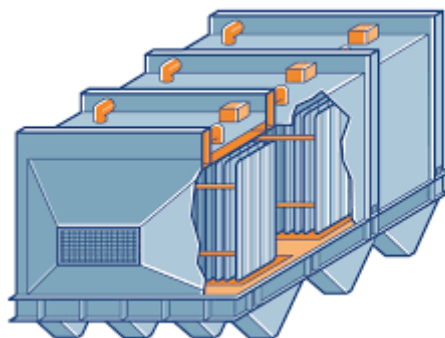


Рис. 1.2. Електрофільтр та високовольтного агрегата живлення

З теоретичної точки зору процес електричної очистки описується рівняннями електростатичного поля, динаміки частинок у полі та закономірностями перенесення заряду. Основою математичного опису є співвідношення між електричними, механічними та гідродинамічними силами, що діють на заряджену частинку в потоці газу. У спрощеному вигляді рух частинки в електричному полі можна описати рівнянням рівноваги сил, де електростатична сила протидіє силам аеродинамічного опору.

Математично ефективність процесу електроосадження часто оцінюється за рівнянням Дейча–Андерсона, яке виражає залежність ступеня очищення від швидкості дрейфу заряджених частинок, довжини активної зони електрофільтра, міжелектродного відстані та швидкості газового потоку. Це співвідношення дозволяє кількісно визначити ефективність електрофільтра залежно від його конструктивних параметрів і фізичних характеристик пилу.

Подальший розвиток теорії електричної очистки газів пов'язаний із уточненням механізмів зарядження частинок, зокрема врахуванням таких факторів, як неоднорідність електричного поля, розмірна дисперсія пилу, турбулентність газового потоку, а також взаємодія частинок між собою. Сучасні моделі також враховують температурні ефекти, вологість газів, зміну питомого електричного опору осаду й утворення вторинних емісій при розряді.

У практиці електричної очистки промислових газів найпоширенішими є

горизонтальні пластинчасті багатопольні електрофільтри, конструкція яких забезпечує високу ефективність осадження твердих частинок при великих об'ємах газових потоків [3]. Електричні поля електрофільтра конструктивно утворюють самостійні секції, що послідовно з'єднані в єдиному корпусі, утворюючи систему електростатичних апаратів, які функціонують за єдиним принципом дії (рис.1.3).

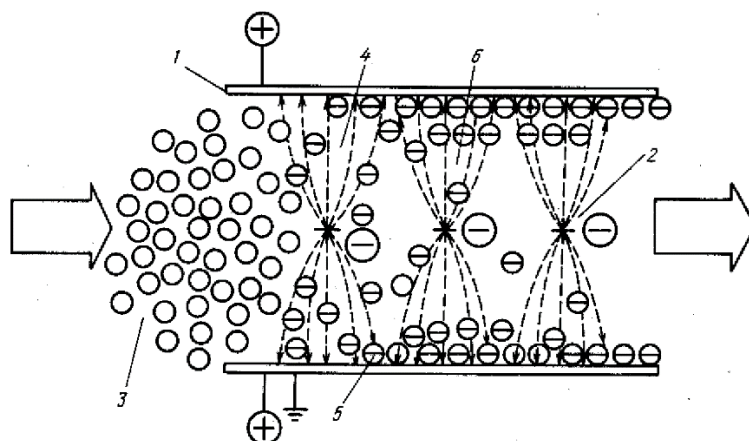


Рис. 1.3. Механізм утворення іонів, зарядження та осадження частинок в електрофільтрі: 1 – осаджувальний електрод; 2 – коронуючий електрод; 3 – частки золи; 4 – електричне поле; 5 – шар осілої золи; 6 – заряджена зола

Кожне поле електрофільтра складається з чергуючих рядів осаджувальних і коронуючих електродів, які формують міжелектродні проміжки, у межах яких відбуваються однакові фізичні процеси іонізації та осадження пилу. Поле поділяється на декілька паралельно працюючих секцій, кількість яких визначається співвідношенням $n = 2a$, де a – число рядів коронуючих електродів. Напруга на всіх електродах залишається постійною і дорівнює напрузі живлення U даного поля. Газовий потік рівномірно розподіляється між усіма секціями, причому масова витрата газу в кожному проміжку дорівнює частці від загальної витрати G , а запиленість на вході кожної секції є ідентичною вхідній запиленості поля.

Для забезпечення рівномірного розподілу газового потоку по поперечному перерізу електрофільтра на його вході встановлюються газорозподільні решітки, які вирівнюють швидкість руху газів і мінімізують турбулентні збурення в активній зоні. Це сприяє рівномірному осадженню частинок пилу та підвищенню загальної ефективності процесу очищення.

Живлення електричних полів здійснюється випрямленим струмом високої напруги, який генерується електричними агрегатами живлення (рисунок 1.4). Основними елементами таких агрегатів є підвищувальний трансформатор, що перетворює змінний струм напругою 220/380 В у високовольтний струм (до 100 кВ), високовольтний випрямляч, який забезпечує стабільну подачу постійного струму, та пристрій керування, який регулює параметри напруги й контролює роботу системи.

У зоні поблизу поверхні коронуючих електродів напруженість електричного поля досягає максимальних значень. При певній різниці потенціалів між електродами виникає коронний розряд, що супроводжується утворенням інтенсивного іонного потоку. Внаслідок цього частинки пилу, зважені в газовому потоці, заряджаються іонами та під дією електростатичних сил рухаються до осаджувальних електродів, де накопичуються у вигляді шару пилу. Очищений газ виводиться з електрофільтра через вихідний патрубок.

Осаджувальні електроди періодично піддаються вібраційному струшуванню, у результаті чого шар осаду руйнується, і пил осипається у збірний бункер, звідки видаляється механічними або пневматичними пристроями. Такий процес забезпечує безперервність роботи електрофільтра та запобігає зниженню його ефективності через наростання шару пилу на поверхнях електродів.

Електричне поле електрофільтра є неоднорідним, тому напруженість поля поступово зменшується зі збільшенням відстані від коронуючих електродів. Завдяки цьому пробій не поширюється на весь міжелектродний простір, а стабілізується локально, формуючи характерну зону коронного розряду, яку можна спостерігати у вигляді світіння навколо коронуючих електродів.

Розподіл іонів у полі електрофільтра має асиметричний характер, що призводить до переважного зарядження частинок пилу іонами, полярність яких збігається з полярністю коронуючого електрода, найчастіше – негативною. Унаслідок цього основна маса пилових частинок рухається в напрямку осаджувальних електродів, отримуючи прискорення під дією електростатичних сил. Невелика кількість частинок, які набувають позитивного заряду,

спрямовується до коронуючих електродів, де вони, втрачаючи заряд, осаджуються на їхній поверхні.

Після осадження пилу очищений газ подається на подальшу конденсацію або утилізацію. Таким чином, багатопольні електрофільтри забезпечують ефективно видалення дрібнодисперсних частинок із промислових газів і становлять важливу складову систем екологічного захисту на сучасних енергетичних і промислових підприємствах.

Основним показником ефективності функціонування електрофільтра є ступінь очищення газового потоку, яка виражається коефіцієнтом пиловловлювання або к.к.д. роботи системи. На цей параметр впливають численні фактори, серед яких визначальне значення мають напруженість електричного поля, температура та швидкість руху газів, рівень запиленості середовища, а також фізико-хімічні властивості частинок пилу. Саме від сукупності цих параметрів залежить результативність осадження зважених частинок та стабільність електричного розряду в міжелектродному просторі.

Основою процесів заряджання, руху та осадження частинок є напруженість неоднорідного електричного поля, що формується між коронуючими та осаджувальними електродами. Цей параметр визначається не лише величиною прикладеної напруги, але й силою коронного струму, який у свою чергу має складну нелінійну залежність від технологічних умов газового потоку. Зміна температури, тиску, вологості, швидкості газів, а також концентрації та дисперсного складу пилу спричиняє коливання сили струму корони, що безпосередньо позначається на стабільності електричного поля.

У процесі дії електричного поля в електрофільтрі безперервно відбуваються три взаємопов'язані явища – іонізація газового середовища, заряджання частинок пилу й осадження їх на поверхні електродів. У промисловій практиці струшування осаджувальних та коронуючих електродів здійснюється без зняття напруги та без зупинки газового потоку, що забезпечує неперервність технологічного циклу. Саме завдяки цій безперервності електричну очистку промислових газів розглядають як динамічний процес із постійною взаємодією між фізичними, електричними та

аеродинамічними явищами.

Характерною особливістю коронного розряду є його виражена нелінійність вольт–амперної характеристики, що ускладнює регулювання електричних режимів у фільтрі. Через це процес пиловловлювання в електрофільтрі має стохастичний і нестационарний характер, оскільки поведінка електричного поля залежить від великої кількості взаємопов'язаних змінних. Електрична очистка газового потоку таким чином належить до складних багатовимірних процесів, у яких спостерігається тісна взаємодія вхідних і вихідних параметрів, а також суттєва залежність від зовнішніх і внутрішніх збурень.

Коронний розряд, що лежить в основі функціонування електрофільтра, належить до фізично нестійких процесів. Зі зростанням прикладеної напруги збільшується сила коронного струму, що підвищує напруженість поля у міжелектродному проміжку. Однак при досягненні критичного рівня напруги може настати пробій газового проміжку, який супроводжується переходом коронного розряду в іскровий або дуговий. Такі явища порушують електропровідність середовища, знижують ефективність осадження частинок і можуть призвести до аварійного режиму.

Особливо небезпечним є процес так званого запирання корони, який виникає при надлишковій концентрації дрібнодисперсних частинок аерозолі. У цьому випадку струм корони різко зменшується, майже зникаючи, що спричиняє різке зниження ефективності очищення газів. Іншим несприятливим явищем є зворотне коронування, за якого з поверхні осаджувальних електродів починають виділятися позитивні іони, що рухаються в напрямку коронуючих електродів. Унаслідок цього відбувається часткова нейтралізація негативних іонів і пилових частинок, а також їх повторне відривання від поверхні, що призводить до погіршення пробивної міцності проміжку та зменшення робочої напруги.

Таким чином, підтримання оптимальної напруги та стабільного режиму коронного розряду є складним завданням, що потребує високої точності регулювання електричних параметрів. Сукупність описаних явищ визначає необхідність створення систем автоматичного керування, здатних забезпечувати

стабільність процесу електричної очистки, запобігати пробоям, зворотному коронуванню та іншим перехідним режимам, які знижують ефективність фільтра.

1.5. Огляд сучасних досліджень систем керування процесом очищення промислових газів від пилу

У сучасних дослідженнях систем керування процесом очищення промислових газів від пилу спостерігається тенденція до впровадження автоматизованих та інтелектуальних підходів, які забезпечують підвищення ефективності, точності та надійності процесів. Такі системи спрямовані на зменшення експлуатаційних витрат завдяки мінімізації ручного контролю, використанню цифрових двійників для моделювання та прогнозування перебігу процесів, а також застосуванню алгоритмів машинного навчання.

Інтелектуальні системи керування, засновані на методах прогнозувального регулювання (MPC), нечіткої логіки та штучних нейронних мереж, дозволяють адаптивно реагувати на зміну характеристик запиленого потоку, оптимізуючи режими роботи фільтраційних апаратів. У промислових установках такі системи забезпечують динамічний моніторинг концентрації частинок, регулювання швидкості потоку газу та стабілізацію процесів осадження пилу. Застосування PID-регуляторів у поєднанні з прогнозувальними алгоритмами дозволяє компенсувати інерційність системи та запобігати коливанням параметрів очищення.

У роботі [4] здійснено діагностику процесу горіння шляхом аналізу динаміки сигналів вимірювань інтенсивності полум'я із застосуванням авторегресійних моделей (ARMA). Використання нечітких нейронних мереж, зокрема моделі ANFIS_grid, забезпечило високу точність прогнозування станів полум'я, що підтверджує доцільність їх застосування у системах керування горінням пилоподібного вугілля та біомасових сумішей. Такий підхід дозволяє не лише підвищити стабільність процесу, а й зменшити утворення шкідливих домішок.

Дослідження [5] пропонує метод визначення джерел токсичності за допомогою біотестування, що базується на зміні кольорових характеристик рослин

під впливом токсичних агентів. Цей підхід дає змогу здійснювати дистанційний моніторинг стану довкілля, використовуючи обробку зображень, отриманих із безпілотних літальних апаратів, що робить його перспективним для оцінки ефективності систем очищення у реальних умовах.

У роботі [6] розглядаються методи візуалізації процесу горіння для аналізу структури полум'я. Параметри, такі як форма, площа та центр тяжіння, визначалися методами порогової обробки зображень, що дає змогу використовувати отримані показники як індикатори стабільності процесу. Це важливо для налаштування систем автоматичного керування подачею палива та повітря.

Застосування алгоритмів машинного навчання для оцінювання теплової потужності та коефіцієнта надлишку повітря продемонстровано у дослідженнях [7–9]. Метод k -ближчих сусідів (k -NN) використовувався для моделювання залежності між геометричними параметрами полум'я та режимами горіння. Оптиковолоконні системи контролю дозволили отримати точні сигнали від різних зон полум'я, що підвищує точність регулювання співвідношення паливо–повітря.

Особливу увагу в сучасних роботах приділено моделюванню процесів електрофільтрації. У статті [10] наведено аналіз електрофільтрів, що використовуються в промислових системах очищення газів, із акцентом на чисельні методи та фізико–хімічні закономірності процесів зарядження й осадження пилових частинок. У результатах, наведених у [4], запропоновано структурні рішення для побудови алгоритмів керування електрофільтром, реалізовано імітаційне моделювання процесів осадження частинок та досліджено ефективність різних схем регулювання. Проте залишається актуальною проблема ефективного уловлювання дрібнодисперсних частинок, які мають високу рухливість та потребують значних енергетичних витрат для створення оптимальних умов осадження.

Загалом сучасні тенденції в автоматизації систем очищення промислових газів від пилу характеризуються інтеграцією методів штучного інтелекту, цифрового моделювання та адаптивного керування. Це створює передумови для підвищення стабільності технологічних процесів, енергоефективності систем і

відповідності екологічним нормативам.

1.6. Аналіз технологічного режиму роботи установок пиловловлювання

Технологічний режим роботи установок пиловловлювання формується під впливом комплексу параметрів, що характеризують як фізико–хімічні властивості газового середовища, так і характеристики частинок пилу. Найважливішими серед них є температура, тиск, витрата, вологість та хімічний склад газу, а також дисперсний і хімічний склад пилових частинок. Ці фактори безпосередньо визначають ефективність процесу осадження пилу в електрофільтрах і стабільність роботи системи очищення.

Параметри процесу поділяють на вхідні, вихідні та режимні. До вхідних належать температура, тиск, витрата, запиленість, вологість, а також дисперсність пилу й вміст у газовій суміші окремих хімічних компонентів. Вихідними параметрами є залишкова запиленість і хімічний склад очищеного газу, його температура, тиск, витрата та кількість уловленого пилу. Режимні параметри визначаються гідравлічним опором апаратів, рівномірністю розподілу газового потоку між паралельно працюючими секціями, частотою та інтенсивністю регенерації фільтрувального матеріалу або очищення електродів електрофільтра, а також величинами струму й напруги на коронуючих електродах [11].

Більшість з цих параметрів підлягають безперервному автоматичному контролю, тоді як частина вимірюється періодично із застосуванням лабораторного обладнання. Складність середовища, у якому функціонують датчики (висока температура, агресивність газів, наявність смолистих сполук, токсичність, запиленість), вимагає підвищеної надійності вимірювальної техніки та систем передавання імпульсів. Водночас значна кількість параметрів, особливо хімічного складу та вологості агресивних газів, усе ще не має надійних засобів автоматичного контролю, що ускладнює побудову повністю автоматизованих систем керування.

Вимірювання запиленості газів до і після очищення має вирішальне значення для оцінки ефективності пиловловлюючих апаратів. Проте більшість існуючих

систем базується на періодичному відборі проб. Автоматичні вимірювальні прилади з безперервною реєстрацією результатів перебувають переважно на стадії розроблення або обмеженого промислового впровадження. Через складність прямого вимірювання маси пилу в потоці газу активно розвиваються непрямі методи контролю, що базуються на оптичних, електричних і акустичних явищах, які змінюються залежно від концентрації частинок у середовищі.

Системи керування пиловловлюванням належать до класу складних технологічних об'єктів, які характеризуються багатовимірними зв'язками між численними параметрами. Це обумовлює високий рівень складності задач автоматичного керування, які не завжди можуть бути розв'язані традиційними централізованими підходами. Особливо це стосується електрофільтрів, де взаємодія електричних, гідродинамічних і механічних процесів вимагає використання децентралізованих систем керування.

Децентралізований підхід ґрунтується на принципі декомпозиції задачі керування, коли загальний процес розподіляється на функціональні підсистеми, кожна з яких вирішує окрему частину завдання. У контексті електрофільтра виділяють три основні підсистеми: підсистему керування розподілом газів між паралельно працюючими електрофільтрами, підсистему керування електричним режимом та підсистему керування механізмом струшування електродів.

Підсистема керування розподілом газів забезпечує підтримання манометричного режиму пиловловлюючої установки, який залежить від тиску або розрідження в окремих секціях. Оптимальне розподілення газових потоків гарантує рівномірність навантаження на електрофільтри, що запобігає локальному перевантаженню і сприяє стабільній роботі системи. У випадках, коли охолодження газів здійснюється підсмоктуванням повітря, у передфільтровій зоні підтримується розрідження, тоді як для систем, де гази направляються на подальшу переробку, забезпечується невеликий надлишковий тиск, що унеможливорює надходження повітря з атмосфери.

Підсистема керування електричним режимом відповідає за стабілізацію напруги та струму коронного розряду, що безпосередньо впливає на інтенсивність

іонізації газу та зарядження частинок пилу. Оптимізація електричних параметрів дозволяє підвищити ефективність уловлювання пилу на 0,6–1,2 %, забезпечуючи стабільну роботу установки при мінімальних енергетичних витратах і запобігаючи появі явища зворотної корони.



Рис. 1.4. Підсистеми керування очищення газу у електрофільтрі

Підсистема керування процесом струшування електродів регулює частоту та інтенсивність ударів по осаджувальних і коронуючих електродах. Її мета полягає в забезпеченні рівноваги між ефективністю очищення електродів від налиплого пилу та мінімізацією зносу механічних вузлів. Правильно підібрані параметри вібрації сприяють збереженню стабільності електричного поля, зменшенню енергоспоживання та подовженню строку експлуатації електродної системи [12].

Ефективне функціонування системи пиловловлювання в електрофільтрі можливе лише за умови комплексної автоматизації її підсистем, інтегрованих у єдину децентралізовану систему керування, побудовану на основі функціональної декомпозиції. Це забезпечує адаптивність системи до змін технологічного режиму, підвищення стабільності процесу очищення та зниження витрат енергії при збереженні високої ефективності уловлювання пилу.

1.7. Основні задачі досліджень

Процес електричного очищення газів належить до класу складних керованих систем, які проявляють багатовимірність, структурну взаємозалежність динамічних змінних, високу ступінь нестационарності та стохастичність характеристик. Такі властивості ускладнюють формування оперативної та достовірної інформаційної моделі об'єкта, знижують можливості прямого вимірювання ряду параметрів і унеможливають вибір режимів роботи на основі звичайних статичних залежностей. У цих умовах побудова ефективного керування неможлива без використання математичного моделювання, що створює формалізовану основу для прогнозування поведінки системи, непрямой оцінки фізичних величин, які не піддаються прямому вимірюванню, а також вибору керуючих впливів у ситуаціях невизначеності, обмеженості даних або динамічних змін властивостей газового потоку.

Аналіз властивостей промислових газів, що відводяться із зон високотемпературного горіння, та конструктивно–функціональних особливостей електрофільтрів свідчить про необхідність формування такої системи керування, у якій забезпечується максимальна стабільність процесу уловлювання частинок, підвищення ефективності електричної сепарації та зменшення коливань запиленості очищеного газу. Узагальнення результатів дослідження сучасних автоматизованих систем показало, що потреба у вдосконаленні режимів керування є найбільш вираженою в трьох функціональних напрямках: регулюванні розподілу газових потоків між паралельно працюючими секціями електрофільтрів, адаптивному управлінні електричними режимами та оптимізації процесу струшування коронуючих і осаджувальних електродів.

У світлі виявлених особливостей сформовано комплекс дослідницьких завдань, спрямованих на побудову математичних описів процесів, розроблення методів оптимізації керуючих дій та створення нових алгоритмічних рішень. Центральним елементом роботи є побудова математичної моделі багатозв'язаного об'єкта, що описує закономірності розподілу газів між паралельно працюючими

електрофільтрами. Така модель дає можливість відтворити взаємовплив поточкорозподілу, гідродинамічного опору та умов іонізації газового середовища, що створює передумови для подальшої оптимізації режимів роботи.

Також дослідницькою лінією є розроблення нечіткої моделі керування електричним режимом, побудованої на основі експериментальних характеристик реальних електрофільтрів. Використання нечіткої логіки дозволяє формалізувати взаємозалежності, які не описуються лінійними закономірностями, врахувати стохастичність газових потоків, а також відтворити вплив побічних явищ, зокрема ефектів зворотної корони або коливань електропровідності пилового шару.

Структурна схема системи керування електрофільтром, наведена на рисунку 1.5, конкретизує логічну послідовність взаємодії підсистем і демонструє загальні принципи побудови комбінованого алгоритму керування. У рамках цієї схеми формуються методи синтезу алгоритмів керування газорозподілом і електричним режимом, адаптованих до властивостей багатозв'язаних об'єктів. Після побудови моделей здійснюється їх чисельне моделювання, а також верифікація на основі даних, отриманих із реальних виробничих установок, що дозволяє забезпечити відповідність теоретичних результатів фактичним умовам експлуатації.



Рис. 1.5. Структурна схема установки очищення газу електрофільтрами

Особлива увага приділяється впливу хімічного складу газів на процеси струшування електродів, оскільки саме цей фактор визначає природу адгезійних властивостей пилу, швидкість формування пилового шару та інтенсивність його відриву. На підставі аналізу формуються рекомендації щодо оптимізації режимів роботи струшувальних механізмів та підвищення довговічності вузлів електрофільтра.

Висновки до розділу 1

У цьому розділі було представлено системний аналіз фізичних процесів, конструктивних рішень і функціонування електрофільтрів, що застосовуються для очищення промислових газів від твердих частинок. Розглянуто формування електричного поля в багатопольових установках, механізм коронного розряду, зарядження частинок та їхнє переміщення до осаджувальних електродів. Показано, що неоднорідність поля та специфіка іонізаційних процесів визначають ефективність осадження пилу.

Проаналізовано принципи організації газорозподілу, роботу високовольтних перетворювачів і конструкцію електродних систем. Підкреслено, що електрофільтр виступає складним багатовимірним, нестационарним і стохастичним об'єктом керування, що ускладнює забезпечення стабільної ефективності очищення.

Оцінка існуючих систем автоматизації дала можливість виокремити напрями підвищення ефективності процесу: оптимізацію газорозподілу між паралельними секціями, керування електричним режимом та вдосконалення процесів видалення пилу з електродів. На основі цього сформульовано завдання дослідження, що охоплюють побудову математичної моделі багатозв'язного об'єкта, розробку нечетких моделей керування та врахування впливу хімічного складу газів при використанні біопалива.

РОЗДІЛ 2

СИНТЕЗ БАГАТОВИМІРНОЇ БАГАТОЗВ'ЯЗНОЇ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ РОЗПОДІЛУ ГАЗОВИХ ПОТОКІВ МІЖ ЕЛЕКТРОФІЛЬТРАМИ

Синтез багатовимірної багатозв'язної автоматизованої системи регулювання розподілу газових потоків між електрофільтрами формує методологічну основу для підвищення ефективності процесів очищення та стабілізації режимів роботи електростатичних апаратів. Такий процес передбачає створення інтегрованої структури керування, здатної охопити складну сукупність взаємозалежних змінних, серед яких особливе значення мають витрата газу, електрофізичні параметри середовища, просторово–структурні характеристики руху газу та рівень його рівномірного розподілу між секціями, що візуально узагальнюється на рисунку 2.1.

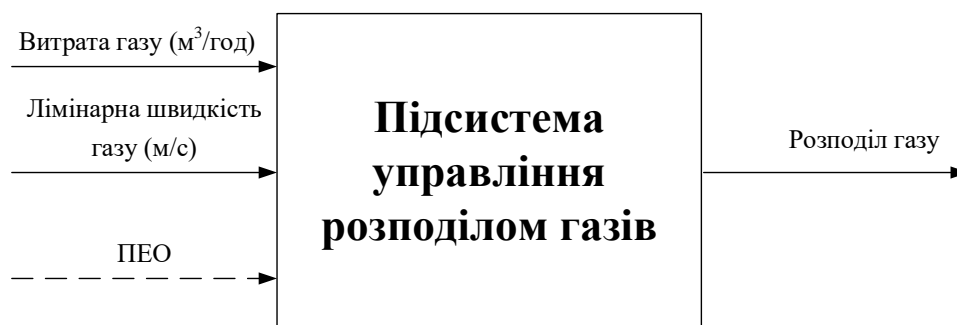


Рис. 2.1. Підсистема системи керування очищенням газу в електрофільтрі

Функціонування такої системи ґрунтується на урахуванні складної взаємодії між параметрами газового потоку, яка проявляється в неперервній зміні гідродинамічних характеристик, коливаннях електричного поля, неоднорідності концентрації твердих частинок та зміні їх зарядового стану під впливом електричних і газодинамічних факторів. У цих умовах виникає необхідність створення структури керування, що здатна охопити весь спектр взаємопов'язаних факторів, сформуванню адекватну реакцію на зміну режимів роботи обладнання та забезпечити стабільний технологічний результат. Саме тому система керування має використовувати багатовимірний регулятор, який відтворює складні кореляції

між вхідними та вихідними змінними, що дозволяє оптимізувати процес очищення газу в реальному часі.

Таке керування потребує детального аналізу динаміки газових потоків у каналах електрофільтра, оскільки ефективність осадження частинок визначається умовами їх перенесення, інтенсивністю електричного поля та рівномірністю розподілу об'ємних потоків по робочих секціях. Формування адекватної системи керування можливе лише за використання математичних моделей газодинамічних процесів, здатних точно відображати континуальні властивості середовища, його реакцію на зміну параметрів та здатність до стабілізації під впливом зовнішніх збурень. У цьому контексті застосування моделей багатозв'язного типу набуває визначального значення, адже вони дозволяють відтворити повний спектр взаємодії між підсистемами електрофільтра та забезпечити узгодженість регулюючих дій у кожному каналі.

Крім моделювання, вагоме значення має використання методів прогнозування й адаптації, оскільки фактичні параметри газу на вході та виході електрофільтра змінюються під впливом температурних коливань, характеристик сировини, нестабільності процесів згоряння чи інших технологічних факторів. Тому система має бути здатною до оцінювання майбутнього стану потоку та завчасної корекції регуляторних дій, що сприяє підвищенню рівномірності розподілу газу, зниженню енергетичних витрат та збереженню стабільних умов для зарядження й осадження частинок.

2.1. Розроблення схемних рішень і математичних моделей АСК розподілу газових потоків між електрофільтрами

Розроблення схемних рішень і математичних моделей багатовимірної багатозв'язної автоматизованої системи регулювання розподілу газових потоків між електрофільтрами формує теоретичну та конструктивну основу для створення інтелектуально керованих технологічних комплексів очищення газів. Такий процес відкриває можливість системної інтерпретації взаємодії структурних компонентів,

що включають сенсорні підсистеми, виконавчі механізми, регуляторні блоки та канали передавання інформації, які у своїй сукупності формують замкнену структуру керування з високим ступенем взаємозалежності параметрів. Схеми, що відтворюють ці взаємодії, дозволяють візуально представити динамічні та інформаційні зв'язки між елементами системи, тоді як математичні моделі відображають поведінку об'єкта в часі, описуючи перехідні процеси, структурні характеристики газодинамічного середовища та нелінійні реакції електрофільтра на регуляторні впливи.

Математичне моделювання в цьому контексті стає універсальним механізмом дослідження, оскільки дозволяє висвітлити вплив таких параметрів, як витрата газу, швидкість його руху, електрофізичні умови зарядження частинок, а також структурні взаємодії між окремими секціями технологічної установки. Використання сучасних методів інтелектуального моделювання, серед яких особливе значення мають алгоритми нечіткої логіки та нейронні мережі, суттєво розширює можливості аналітичного апарату, дозволяючи відтворити процеси, які неможливо точно описати традиційними лінійними моделями. Завдяки цьому вдається більш глибоко дослідити взаємозалежність параметрів і сформувати модель, здатну адаптуватися до мінливих умов експлуатації.

У структурній схемі системи автоматичного керування приймаються позначення, які відображають взаємодію між задаючими сигналами, поточними значеннями витрати газу, швидкістю руху газів на вході секцій електрофільтра, передаточними функціями регуляторів та моделями об'єкта керування. Передаточні функції, що описують основні канали керування, а також функції, які відображають вплив перехресних зв'язків між окремими каналами, формують цілісну структуру багатовимірного керування, де кожен параметр впливає на стан інших, створюючи складний динамічний ландшафт регуляторних реакцій.

Процес керування режимом розподілу газів у системі електрофільтрів ґрунтується на постійному спостереженні за фактичними параметрами газового потоку та формуванні коригувальних впливів, спрямованих на вирівнювання навантаження між секціями. У цьому процесі формується науково обґрунтована

методологія, згідно з якою система аналізує просторово–часовий розподіл витрати газу, визначає ділянки з надмірним або недостатнім навантаженням і здійснює коригування швидкості руху газів шляхом зміни положення регулюючих елементів. Такий механізм не лише забезпечує рівномірність розподілу, а й сприяє підвищенню ефективності процесу осадження частинок, оскільки оптимальне співвідношення швидкостей газового потоку є необхідною умовою стабільного утримання електричного поля та ефективного осадження аерозольних домішок.

Застосування принципу керування з постійною зворотним зв'язком забезпечує можливість безперервної адаптації регуляторних дій до змін зовнішніх і внутрішніх умов, серед яких видозміна складу газу, коливання його температури, зміна режимів роботи технологічної установки чи перехідних процесів у системі електрофільтрації. Завдяки цьому система керування підтримує стабільність газорозподілу та створює умови для сталого функціонування всієї технологічної лінії (рис.2.2).

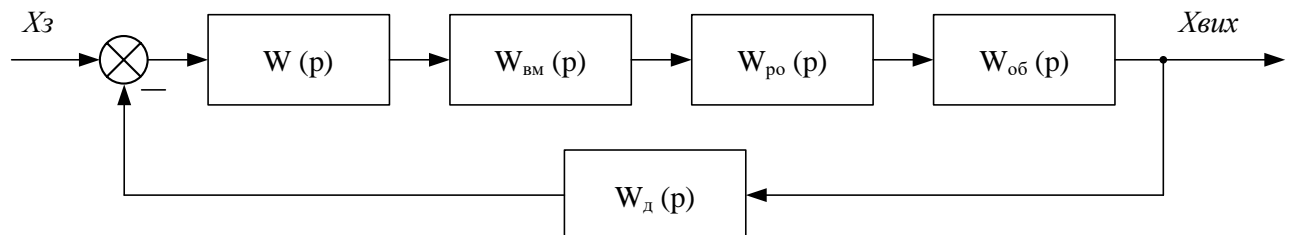


Рис. 2.2. Узагальнена схема процесу керування розподілом газів в електрофільтрах

Тому моделі та схеми, що використовуються для побудови багатовимірної та багатозв'язної системи керування, забезпечують не лише теоретичний опис її структури, а й створюють інструментальний апарат для синтезу, аналізу та подальшої оптимізації регуляторних стратегій. Вони формують підґрунтя для створення високоефективних систем очищення газів, що здатні забезпечити рівномірний розподіл потоків, підвищити ефективність електростатичного осадження та стабілізувати технологічний процес у широкому діапазоні режимів.

Передавальна функція об'єкта керування по каналу «витрата газу –

розрідження» може бути представлена як передавальна функція аперіодичного звена першого порядку із запізнюванням:

$$W_{об}(p) = \frac{k_{об}}{(T_{об} * p + 1)} * e^{-p * \tau_{об}}, \quad (2.1)$$

де $k_{об} = 6$, $T_{об} = 30$ с, $\tau_{об} = 3$ с.

Виконавчий механізм складається з виконавчого механізму (електродвигун – ВМ) і керуючого органу (однопластинчаста поворотна заслінка круглого перерізу). Передавальна функція виконавчого механізму – електродвигуна у контурі керування витратами газу має вигляд:

$$W_{ВМ}(p) = \frac{K}{T * p}, \quad (2.2)$$

де K – відношення повного відкриття заслінки до максимального значення вхідного сигналу (100 % / 1), T – стала часу виконавчого механізму, визначена часом розгону електродвигуна. Для даного механізму:

$$W_{ВМ}(p) = \frac{100}{20 * p}. \quad (2.3)$$

Передавальна функція регулюючого органу $W_{ро}(p)$ (заслінки) є коефіцієнтом підсилення і визначається як відношення максимальної витрати газу до значення повного відкриття заслінки:

$$W_{ро}(p) = 0,5. \quad (2.4)$$

Передавальна функція датчика розрідження, розташованого перед електрофільтром, має вигляд:

$$W_{д}(p) = 1,5. \quad (2.5)$$

Технологічна схема з перехресними передавальними функціями для розподілу газів по електрофільтрах являє собою важливий інструмент проектування та оптимізації систем очищення повітря, оскільки вона враховує не лише елементи керування та моніторингу, такі як датчики, регулятори та виконавчі механізми, але й динамічні взаємодії між різними компонентами системи (рисунки 2.3). Перехресні передавальні функції відображають складні залежності між змінними, такими як витрата газу, концентрація забруднювачів і ефективність фільтрації, що дозволяє адаптувати процеси розподілу газів у режимі реального часу, забезпечуючи високу точність і стабільність роботи системи.

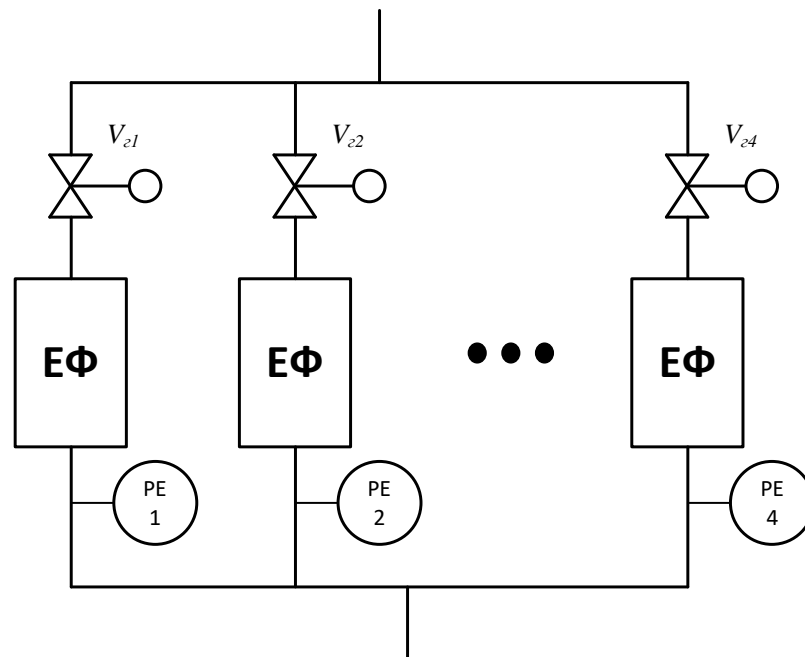


Рис. 2.3. Технологічна схема розподілу газів по електрофільтрах

У цій технологічній схемі передавальні функції репрезентують математичні моделі, що описують взаємодію між різними елементами системи, серед яких клапани, насоси, фільтрувальні модулі та інші вузли, задіяні у процесах керування параметрами газового потоку. Особливістю такої структури є наявність перехресних зв'язків, що відображають взаємний вплив змінних і параметрів на роботу електрофільтрів. Це формує більш повне уявлення про те, як динаміка витрати газу, зміна розрідження або коливання концентрацій домішок можуть трансформуватися в реакцію системи та впливати на ефективність електростатичної очистки.

Розгляд структурної схеми з перехресними передавальними функціями дає можливість інженеру глибше аналізувати механізми взаємодії між підсистемами, формуючи підґрунтя для подальшої оптимізації параметрів. Такий аналіз дозволяє уточнювати стратегії керування, орієнтуючи їх на підвищення стабільності та енергетичної доцільності процесів розподілу газових потоків між електрофільтрами. Використання перехресних залежностей забезпечує здатність системи адаптуватися до змінних технологічних умов, що в умовах реального виробництва є принциповим для збереження високої ефективності очищення газів

та стійкості роботи обладнання.

Застосування цього підходу у проектуванні забезпечує можливість формування системи керування, здатної підтримувати необхідні параметри навіть за істотних зовнішніх збурень або стохастичних флуктуацій технологічних змінних. Це створює основу для розвитку високоточних та адаптивних технічних рішень, спрямованих на ефективне функціонування електрофільтрів у складних і мінливих умовах промислової експлуатації, що відображено на рисунку 2.4.

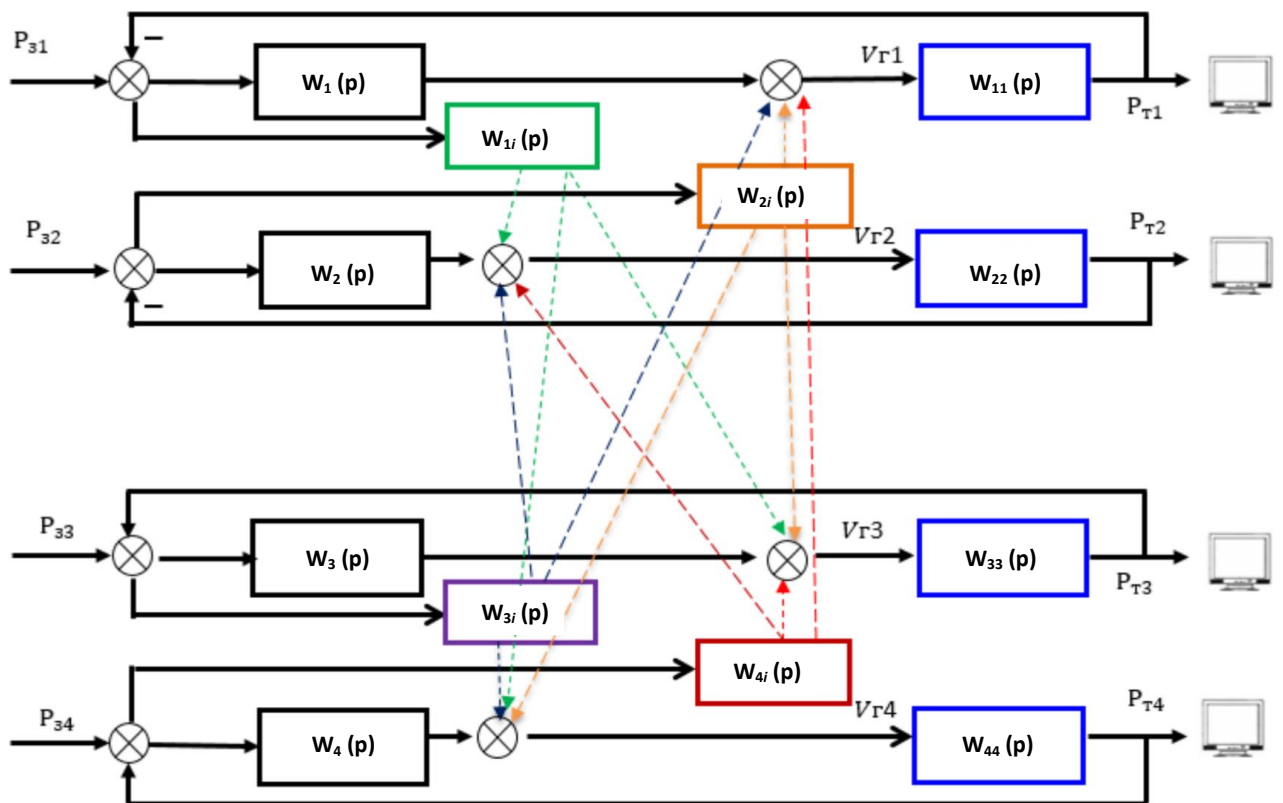


Рис. 2.4. Структурна схема з перехресними передавальними функціями

Нижче подано передавальні функції у стандартизованому вигляді, з коректними українськими позначеннями та форматуванням, яке без проблем перетворюється у Microsoft Word. Усі функції надано стрічкою, без використання спеціальних символів, які можуть втратити форматування.

$$W_{11}(p) = \frac{5}{(25p + 1)} * e^{-3p} ;$$

$$W_{12}(p) = \frac{0.7}{(10 * p + 1)} ;$$

$$\begin{aligned}
W_{13}(p) &= \frac{0.5}{(14*p + 1)}; \\
W_{14}(p) &= \frac{0.3}{(7*p + 1)}; \\
W_{21}(p) &= \frac{0.7}{(10*p + 1)}; \\
W_{22}(p) &= \frac{6}{(31p + 1)} * e^{-3p}; \\
W_{23}(p) &= \frac{0.7}{(15*p + 1)}; \\
W_{24}(p) &= \frac{0.5}{(5*p + 1)}; \\
W_{31}(p) &= \frac{0.5}{(14*p + 1)}; \\
W_{32}(p) &= \frac{0.7}{(15*p + 1)}; \\
W_{33}(p) &= \frac{6}{(30p + 1)} * e^{-3p}; \\
W_{34}(p) &= \frac{0.7}{(12*p + 1)}; \\
W_{41}(p) &= \frac{0.3}{(7*p + 1)}; \\
W_{42}(p) &= \frac{0.5}{(5*p + 1)}; \\
W_{43}(p) &= \frac{0.7}{(12*p + 1)}; \\
W_{44}(p) &= \frac{5}{(24p + 1)} * e^{-3p}.
\end{aligned} \tag{2.6}$$

У системі, що містить чотири електрофільтри, кожний фільтр характеризується двома фундаментальними параметрами: поточним значенням розрідження на виході, позначеним як $P_{\text{п}}$, та розрідженням на вході, яке виконує роль завдання регулятора і позначається як P_3 . Якщо розглядати окремий електрофільтр як ізольований об'єкт керування, його динамічні властивості у каналі взаємозв'язку між витратою газів і розрідженням описуються передавальною функцією аперіодичної ланки першого порядку з наявністю запізнювання. Така передавальна функція для одного окремого об'єкта має вигляд

$$W_{\text{об}}(p) = \frac{k_{\text{об}}}{T_{\text{об}} * p + 1} * e^{-p * \tau_{\text{об}}}. \tag{2.7}$$

Це означає, що кожний електрофільтр реагує на зміну керуючих впливів із

зумовленою інерційністю та часовою затримкою, що є характерним для газодинамічних процесів у каналах протікання та у зонах осадження частинок. Однак система не може бути коректно охарактеризована шляхом аналізу лише окремої ланки, оскільки чотири електрофільтри утворюють єдиний комплекс із суттєвими взаємними впливами, що проявляються як у перехресних зв'язках між окремими каналами, так і в складній зміні розподілу витрат газів.

Таким чином, досліджуваний об'єкт має структуру МІМО-типу, де кожен окремий канал є частиною багатовимірної і багатозв'язної системи. Між окремими підсистемами існує фізичний і динамічний взаємозв'язок: перша підсистема впливає на другу, третю та четверту, а аналогічні взаємовпливи простежуються між усіма іншими елементами комплексу. Крім того, будь-який вхідний сигнал, що подається на конкретний електрофільтр, не лише змінює його локальну реакцію, але й опосередковано впливає на роботу сусідніх підсистем через зміну розподілу тисків і витрат у загальному газовому колекторі.

Такі перехресні зв'язки формують складну динамічну картину, що вимагає моделювання в межах багатовимірного простору, де вихід одного каналу одночасно є збурювальним впливом для інших. Аналіз цієї структури відкриває можливість оцінити взаємодію підсистем на глибинному рівні, що є необхідним для синтезу адекватних законів керування, здатних забезпечити стабільну роботу всього комплексу електрофільтрів. Саме багатовимірне моделювання дозволяє отримати коректні результати щодо поведінки кожного об'єкта в умовах взаємозалежності та визначити ефективні стратегії керування газорозподілом, які мінімізують нерівномірність потоків, покращують умови осадження частинок і підтримують стале значення розрідження на заданих технологічних рівнях.

2.2. Аналіз багатовимірної багатозв'язної автоматизованої системи керування розподілом газів по електрофільтрам без використання регуляторів

Аналіз багатовимірної та багатозв'язної автоматизованої системи керування

розподілом газів по електрофільтрах у режимі, коли регулятори відсутні, становить важливу складову дослідження базових властивостей об'єкта. У такому режимі система функціонує виключно за рахунок власних внутрішніх газодинамічних механізмів, що дозволяє оцінити її природну реакцію на збурення, які виникають під дією змінних вхідних параметрів. Відсутність регуляторів забезпечує можливість спостерігати незмінні законом керування взаємозв'язки між підсистемами, такими як газорозподільчі клапани, магістральні канали, електрофільтри та елементи вимірювання, що дає змогу ідентифікувати реальну структуру внутрішніх впливів.

Таке дослідження дає можливість виявити природну інерційність каналів, ступінь взаємного впливу між електрофільтрами, часові запізнення, а також особливості реакції системи на перерозподіл витрати газів. Аналіз поведінки системи без регуляторів дозволяє встановити фактичну форму перехідних процесів, які визначають характер встановлення розрідження в кожному з електрофільтрів, а також дає змогу оцінити стійкість системи у її відкритому контурі. У такому стані система функціонує як багатовимірна газодинамічна структура, у якій будь-яке локальне збурення у витраті або розрідженні поширюється на інші підсистеми, формуючи складну картину внутрішніх взаємодій.

У випадку відсутності регуляторів електрофільтри реагують на зміну умов на вході в залежності від конфігурації мережі, геометрії газових каналів та характеристик апаратів, що формує перехідні процеси з вираженою нерівномірністю. Такі процеси демонструють природні межі роботи системи, зокрема здатність електрофільтрів до самовстановлення параметрів у режимах, що не підтримуються активними керуючими сигналами. Саме на цьому етапі стає можливим визначити рівень взаємних перешкод, що виникають між фільтрами внаслідок перехресних зв'язків у МІМО-структурі.

Аналіз без регуляторів створює основу для подальшого синтезу законів керування, оскільки дозволяє оцінити ступінь необхідної компенсації взаємних впливів, визначити характерні часові масштаби зміни параметрів, а також

сформуванати вимоги до регуляторів щодо швидкодії та точності. У досліджуваній системі можна спостерігати характерні перехідні процеси в окремих підсистемах, які відображають фундаментальні властивості об'єкта і є вихідною інформацією для подальшого формування компенсаторів, коригувальних пристроїв та багатовимірних регуляторів. Графічне представлення таких процесів наведено на рисунку 2.5, що демонструє природну динаміку окремих каналів у відкритому контурі.

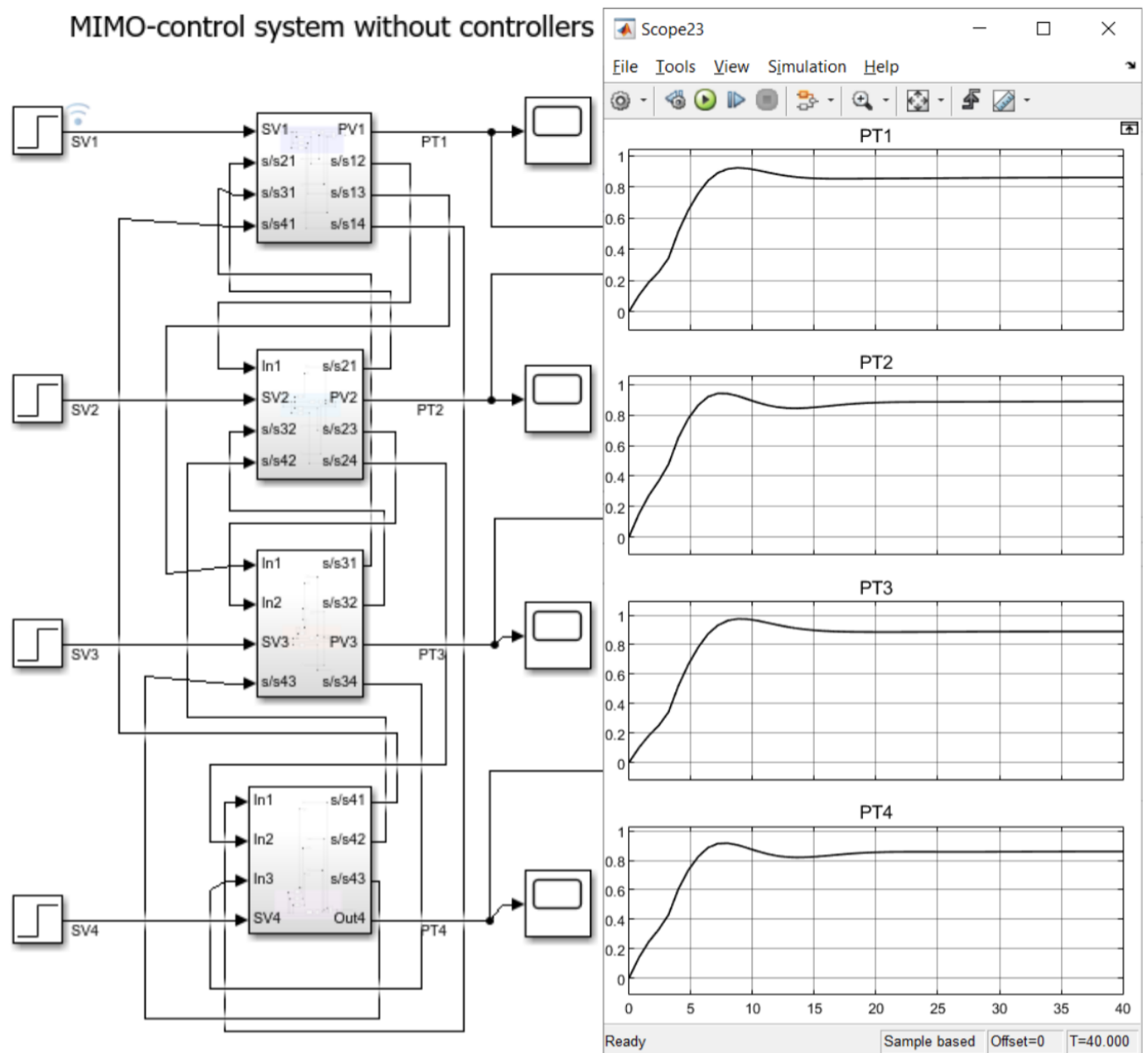


Рис. 2.5. Демонстрація перехідних процесів ізольованих підсистем

Динаміка параметрів у цих підсистемах набуває вираженого нестабільного характеру, оскільки навіть незначні зміни вхідних умов призводять до помітних відхилень і нерівномірності розрідження в каналах газорозподілу. У таблиці 2.1 відображено числові характеристики таких перехідних процесів, які дозволяють кількісно оцінити властивості кожної з підсистем у відкритому контурі.

У відкритій конфігурації багатовимірна структура електрофільтрів реагує на зовнішні збурення без внутрішніх механізмів компенсації, що призводить до формування перевантажених режимів та коливальних процесів, які не затухають належним чином. Це відображає природну інерційність і чутливість технологічного комплексу до впливів, що виникають у газорозподільчих каналах. Відсутність регуляторів формує середовище, у якому домінують неузгоджені взаємодії між підсистемами, оскільки кожен фільтр відповідає на локальні зміни без урахування стану сусідніх елементів, що особливо відчутно в умовах багатозв'язності системи.

Такі перехідні процеси підтверджують необхідність впровадження керуючих засобів, здатних формувати компенсуючий вплив для зменшення внутрішніх коливань та усунення нерівномірності динамічних реакцій. Використання регуляторів дозволяє стабілізувати поведінку кожного об'єкта, забезпечити узгодженість між ними та створити передумови для рівномірного розподілу газів між електрофільтрами. Стабілізація перехідних процесів у таких багатовимірних структурах є основою для підвищення довговічності обладнання і забезпечення стійкого функціонування газоочисної системи в умовах змінного навантаження. Зокрема, саме керування визначає здатність системи працювати у контрольованих параметрах і реагувати на збурення без втрати функціональної ефективності.

Таблиця 2.1 містить прямі оцінки якості перехідних процесів для чотирьох підсистем і слугує фактичною основою для подальшого синтезу регуляторів, які повинні компенсувати спостережувані відхилення та сформувати необхідний рівень динамічної стійкості комплексу.

Таблиця 2.1

Прямі оцінки якості перехідних процесів чотирьох підсистем

Показник	1 sub	2 sub	3 sub	4 sub
Час врегулювання, с	15	15	17	15
Перерегулювання, %	10	10	7	5
Кількість коливань М	1	1	1	1
Усталена похибка	0,15	0,10	0,10	0,15
Час досягнення максимуму, с	0,8	0,8	0,9	0,9
Час наростання, с	5	4	5	5

Аналіз динаміки підсистем у режимі роботи без регуляторів засвідчив, що процеси характеризуються помітною неточністю, оскільки похибка розузгодження не прямує до нуля навіть після завершення перехідних фаз. Виявлене перерегулювання в діапазоні 5–10% вказує на наявність внутрішніх, некомпенсованих коливальних компонентів, що проявляються при виході системи на усталений режим. Незважаючи на те, що коливальність залишається в межах допустимого рівня, її наявність за відсутності регуляторів демонструє недостатню здатність підсистем самотійно згладжувати динамічні відхилення.

Поведінка системи у такому режимі підкреслює необхідність інтеграції елементів керування, які зможуть забезпечити компенсацію внутрішніх динамічних спотворень, зменшити перерегулювання та сформувати умови для нівелювання похибки у сталому режимі. Застосування регуляторів забезпечить більш точне формування керувальних впливів, стабілізацію розподілу газових потоків між електрофільтрами та підвищення стійкості системи за умов змін зовнішніх і внутрішніх факторів. Такий підхід є необхідною передумовою для отримання стабільних режимів роботи та підвищення загальної ефективності технологічного процесу.

2.3. Налаштування регуляторів ізольованих підсистем із використанням ПД–регуляторів

Процес налаштування регуляторів для багатовимірного та багатозв'язного об'єкта посідає фундаментальне місце у формуванні ефективного та стійкого керування складною технічною системою. Одним з раціональних підходів до вирішення цього завдання є початкова адаптація регуляторів саме для ізольованих підсистем, які виділяються в результаті декомпозиції. Декомпозиція виконує роль інструмента структурного аналізу, оскільки дає змогу представити цілісний об'єкт у формі сукупності окремих підсистем, що мають власні динамічні властивості та внутрішні закономірності. Її застосування сприяє поглибленому вивченню структури об'єкта, дозволяє чітко окреслити провідні елементи та з'ясувати характер їхньої взаємодії, а також зменшує загальну складність системи, переводячи її у форму, придатну для подальшого математичного аналізу та синтезу.

Після проведення декомпозиції взаємозв'язки між підсистемами тимчасово виключаються, що створює умови для незалежного дослідження кожної частини системи. У такому контексті виконують проектування та налаштування ПД–регулятора, орієнтованого на оптимальну роботу підсистеми без впливу зовнішніх збурень і зворотних зв'язків з інших компонентів. Такий підхід дає можливість урахувати індивідуальні динамічні властивості кожної підсистеми та забезпечити необхідну точність, швидкодію і рівень затухання перехідних процесів.

Після завершення індивідуальної настройки регуляторів підсистеми знову інтегруються у багатовимірну структуру, де відновлюється дія міжканальних зв'язків. На цьому етапі визначальною стає узгодженість регуляторів між собою, оскільки у багатозв'язній системі будь-який керувальний вплив, сформований у межах однієї підсистеми, може змінювати стан інших. Відповідно, кінцевий результат залежить не лише від якості налаштування окремих регуляторів, а й від гармонізації їхньої взаємодії у загальній структурі, що забезпечує підвищення стійкості та покращення динамічних характеристик системи у різних експлуатаційних умовах.

Для кожної з ізольованих підсистем був розроблений та налаштований ПД–регулятор, що дозволило сформувати бажані перехідні процеси та забезпечити необхідні показники швидкодії, стабілізації та точності (рисунок 2.6). Результати моделювання свідчать, що в умовах відсутності міжканальних впливів сформовані динамічні процеси відповідають вимогам, проте згідно з постановкою задачі подальший аналіз має враховувати наявні взаємозв'язки між підсистемами. Відновлення цих зв'язків є вирішальним етапом, оскільки саме він демонструє реальну поведінку багатовимірного об'єкта, де корекція кожного регулятора має відбуватися з урахуванням взаємного впливу всіх елементів системи.

2.4. Налаштування багатовимірної багатозв'язної автоматизованої системи керування розподілом газів по електрофільтрах із компенсацією взаємозв'язків

Процес налаштування багатовимірної багатозв'язної автоматизованої системи керування розподілом газів по електрофільтрах набуває принципово нового змісту після відновлення міжканальних взаємозв'язків, які були тимчасово вилучені під час аналізу ізольованих підсистем. У такій структурі будь–яка зміна в одному каналі неодмінно трансформується у збурення для інших компонентів, що формує складну багатоканальну динаміку, характерну для систем МІМО. Урахування цих взаємозалежностей потребує застосування регуляторів, здатних не лише стабілізувати окрему підсистему, але й компенсувати впливи, що виникають внаслідок взаємодії з іншими каналами.

Відновлення міжканальних зв'язків змінює поведінку системи, розширюючи діапазон можливих динамічних режимів. У таких умовах коригування властивостей регуляторів ґрунтується на необхідності сформувати узгоджене керування, яке забезпечує стійкий характер перехідних процесів з урахуванням взаємних дій підсистем. Зростає роль механізмів компенсації, оскільки саме вони пригнічують ті складові впливів, що призводять до збільшення перерегулювання, зменшення запасів стійкості та зростання тривалості встановлення параметрів.

Поступове введення взаємозв'язків дає змогу оцінити ступінь впливу кожного каналу на інші і визначити, наскільки суттєво змінюється динаміка цілого об'єкта після інтеграції всіх зворотних зв'язків. Такий поетапний підхід забезпечує можливість адаптації параметрів регуляторів у режимі, максимально наближеному до реальних умов функціонування. У результаті цього формується система керування, здатна підтримувати стабільний розподіл газів між електрофільтрами навіть у ситуаціях, коли зміна витрати, розрідження або інших технологічних параметрів у будь-якій підсистемі викликає реакцію у всій структурі.

Побудова регуляторів із компенсацією взаємозв'язків базується на розумінні структури передавальних функцій об'єкта, що задають характер міжканального впливу. Зміни у будь-якому з цих зв'язків трансформують поведінку системи, тому корекція параметрів регуляторів має забезпечувати не лише досягнення необхідних статичних і динамічних характеристик, але й пригнічення побічних ефектів взаємодії каналів. Саме такий підхід створює передумови для формування узгодженого керування, що забезпечує необхідну точність, стабільність і швидкодію системи у робочих режимах.

На рисунку 2.6 представлені перехідні процеси ізольованих підсистем, для яких попередньо були налаштовані ПДД-регулятори. Ці результати формують базу для подальшого аналізу поведінки системи після введення міжканальних зв'язків, що у наступних підрозділах дозволить оцінити ефективність компенсації та ступінь покращення динамічних характеристик.

Аналіз багатовимірної багатозв'язної автоматизованої системи керування розподілом газів по електрофільтрах без використання регуляторів є важливим етапом для розуміння базової динаміки системи та її характеристик у відсутності зовнішніх впливів керуючих пристроїв. У такому контексті можна виділити внутрішні зв'язки та взаємодії між різними компонентами системи, такими як клапани, фільтри, насоси та елементи керування. Аналіз без регуляторів дозволяє виявити природні динамічні процеси, тимчасові затримки та ефекти, що виникають при зміні вхідних параметрів. Це забезпечує базове розуміння поведінки системи в її природному стані та може слугувати відправною точкою для подальшого

налаштування та оптимізації регуляторів. Усвідомлення внутрішніх взаємозв'язків без регуляторів є фундаментом для ефективного впровадження керуючих стратегій, спрямованих на підвищення стабільності та ефективності процесів розподілу газів у системі електрофільтрів.

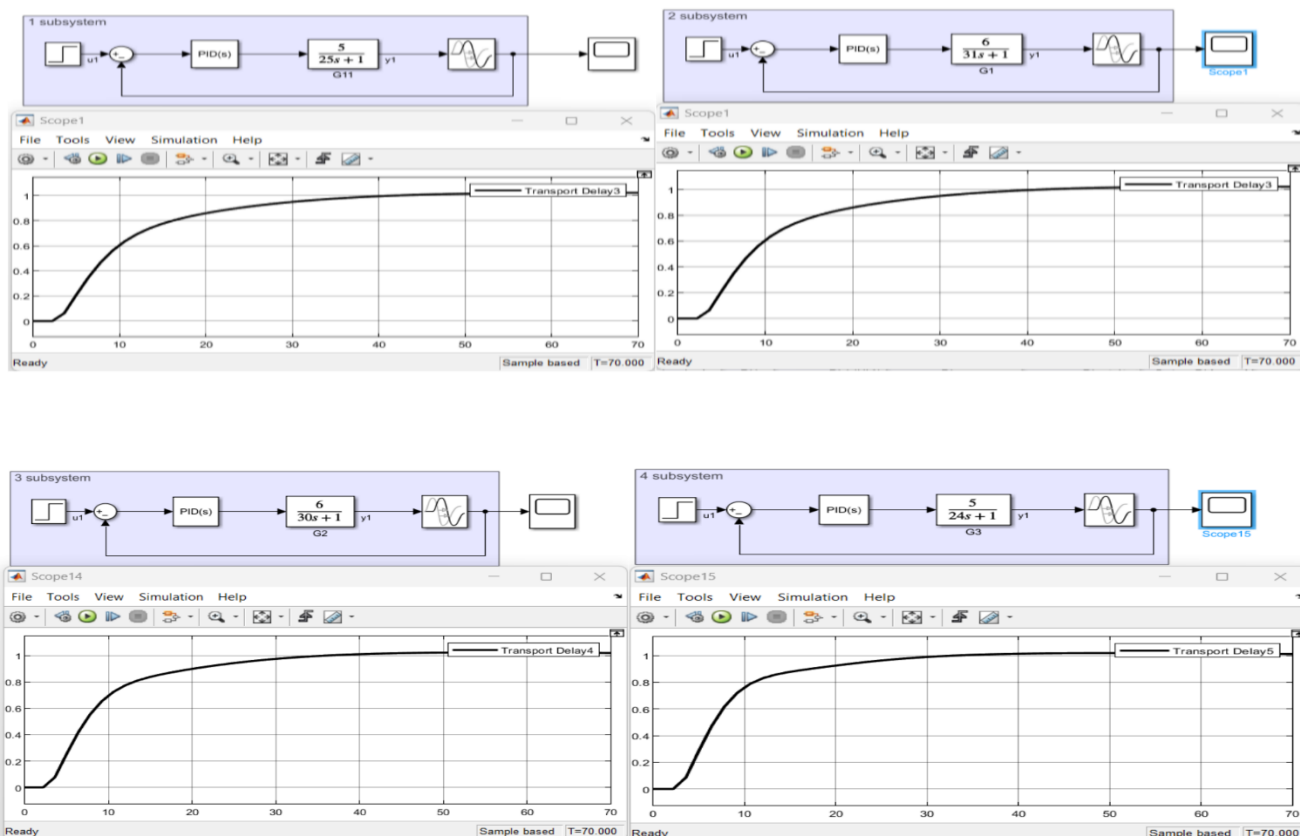


Рис. 2.6. Перехідні процеси ізольованих підсистем

Системи керування розподілом газів по електрофільтрах без застосування регуляторів демонструють характерні перехідні процеси у ізольованих підсистемах (рис.2.7). Відсутність керування призводить до неповнотних та коливальних процесів, що проявляється у динаміці ізольованих компонентів. Спостерігаються помітні перепади та коливання параметрів при зміні вхідних умов, що підкреслює необхідність впровадження керуючих пристроїв для корекції та стабілізації системи.

Таблиця 2.2 відображає прямі оцінки якості перехідних процесів для чотирьох підсистем.

Таблиця 2.2

Прямі оцінки якості перехідних процесів для чотирьох підсистем

Оцінка якості	1sub	2sub	3sub	4sub
Час встановлення (settling time), с	30	40	25	30
Перерегулювання (overshoot)	0	0	0	0
Кількість коливань, М	0	0	0	0
Установлена помилка (steady-state error)	0	0	0	0
Час досягнення першого максимуму (peak time)	0	0	0	0
Час наростання (rise time)	5	4	5	5

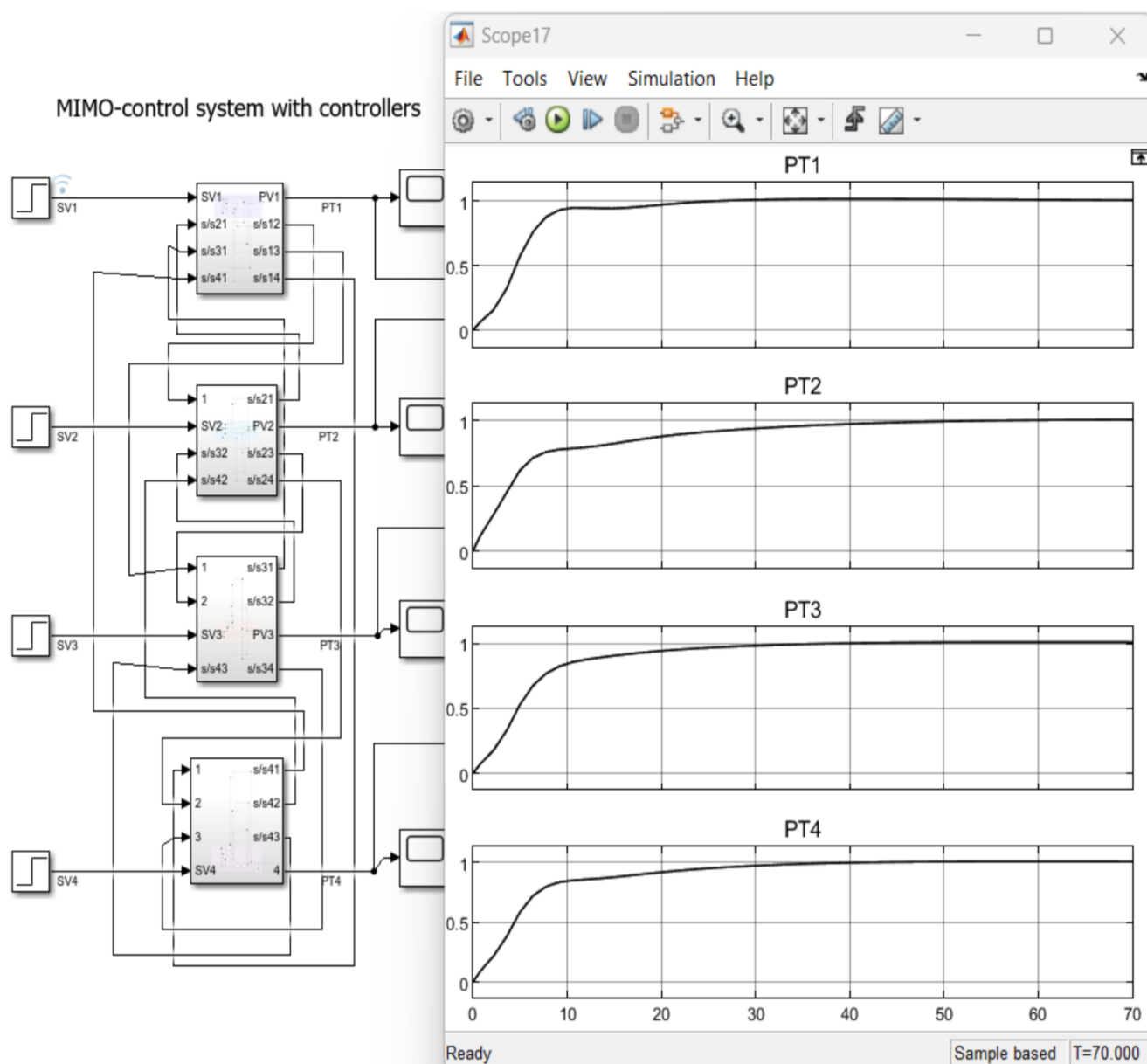


Рис. 2.7. Перехідні процеси ізольованих підсистем

Показники коливальності МІМО–системи з компенсацією взаємозв’язків значно покращилися – коливання відсутні. Швидкодія системи зростає та відповідає поставленим вимогам. Точність керування забезпечує досягнення встановлених значень, перехідні процеси прагнуть до уставки, а перерегулювання відсутнє, що свідчить про стабільну і ефективну роботу системи в умовах взаємодії всіх підсистем.

Удосконалена система керування електрофільтром, яка формує уставку P_3 , забезпечує більш точне керування основними параметрами процесу фільтрації та дозволяє адаптувати роботу пристрою до змінних умов експлуатації. Це сприяє підвищенню ефективності очищення промислових газів від пилу та золі, зменшенню енергоспоживання та подовженню терміну служби обладнання.

МІМО–система керування електрофільтром дозволяє одночасно ефективно контролювати кілька параметрів, роблячи процес фільтрації більш гнучким і точним. Така структура забезпечує високу ефективність очищення газів і мінімізацію концентрації пилу на виході, одночасно оптимізуючи енергетичні витрати та підвищуючи ресурс обладнання.

Кожна передатна функція моделює поведінку конкретного вхідного параметра щодо відповідного вихідного сигналу, а в МІМО–системах необхідно враховувати взаємні залежності між входами і виходами. Керування в таких системах ускладнюється, оскільки зміна одного вхідного сигналу може впливати на кілька вихідних.

МІМО–система керування електрофільтром використовує набір передаточних функцій для моделювання залежності між численними вхідними та вихідними параметрами. Це дозволяє розробникам та інженерам проектувати системи керування, здатні враховувати взаємопов’язані процеси та ефективно регулювати продуктивність електрофільтра.

Висновки до розділу 2

У даному розділі було проведено детальний аналіз та синтез багатовимірної

багатозв'язної автоматизованої системи керування розподілом газів по електрофільтрах. Було розглянуто структуру системи, побудову схем та математичних моделей, що описують динаміку та взаємозв'язки між підсистемами. Проведено аналіз роботи системи без регуляторів, що дозволило виявити природні перехідні процеси, коливання та помилки розбалансування, підкресливши необхідність впровадження керуючих пристроїв для стабілізації та підвищення точності роботи.

Далі здійснено налаштування ПІД-регуляторів для ізольованих підсистем, що забезпечило оптимальні характеристики перехідних процесів на рівні окремих об'єктів. Після введення взаємозв'язків між підсистемами проведено компенсацію їхнього впливу, що дозволило підвищити стабільність, усунути коливання та забезпечити точне досягнення заданих значень параметрів. Було підтверджено, що МІМО-система керування забезпечує ефективне одночасне керування кількома параметрами, враховує взаємозалежності між входами та виходами, підвищує точність, зменшує енергоспоживання та подовжує термін служби обладнання.

РОЗДІЛ 3

СИНТЕЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОРЕЖИМОМ ЕЛЕКТРОФІЛЬТРА

3.1. Розробка інтелектуальної системи керування електрорежимом електрофільтра

Метою даного дослідження є створення інтелектуальної системи керування електрофільтром, здатної адаптивно реагувати на зміни електрорежимів, оптимізувати процес фільтрації у режимі реального часу та одночасно знижувати енергоспоживання. Сучасні промислові установки функціонують у широкому діапазоні умов, включаючи коливання параметрів газового потоку, зміну концентрації забруднюючих частинок та динамічне розподілення електричного поля всередині фільтра. Традиційні методи керування не завжди забезпечують необхідну гнучкість і ефективність, що зумовлює необхідність застосування інтелектуальних алгоритмів.

Використання нечіткого керування дозволяє врахувати нелінійність процесу електрофільтрації, підвищити його стійкість до зовнішніх впливів та адаптувати роботу системи до змінних умов експлуатації. Даний підхід базується на побудові системи, яка використовує експертні знання та евристичні правила для керування процесом очищення повітря, що робить його більш точним і надійним в умовах невизначеності.

Розробка запропонованої системи керування спрямована на підвищення ефективності очищення газових викидів за рахунок оптимального керування параметрами електрофільтра, такими як напруга на електродах, сила струму розряду та швидкість осадження частинок. Це, у свою чергу, дозволяє не лише підвищити продуктивність процесу, а й суттєво зменшити енергоспоживання, що особливо актуально в сучасних умовах ресурсозбереження та екологічної безпеки.

Підсистема керування електричним режимом електрофільтра в сучасних промислових процесах набуває надзвичайної значущості, оскільки ефективна

фільтрація шкідливих частинок із газових викидів безпосередньо впливає на екологічну безпеку та енергоспоживання підприємств. Сучасні електрофільтри, призначені для очищення повітря від твердих частинок, функціонують у складних умовах змінних електричних режимів, що вимагає застосування адаптивних і нечітких методів керування для оптимізації процесу фільтрації та мінімізації витрат електроенергії.

Процес електрофільтрації є багатовимірною системою, у якій взаємодія вхідних змінних із самим фільтром формує специфічні вихідні характеристики. Складність управління полягає у необхідності синхронного контролю різних параметрів, що визначають ефективність осадження пилу та стабільність електричного режиму. На рисунку 3.1 представлено схему електрофільтра, що ілюструє його основні елементи та взаємозв'язки в процесі керування.

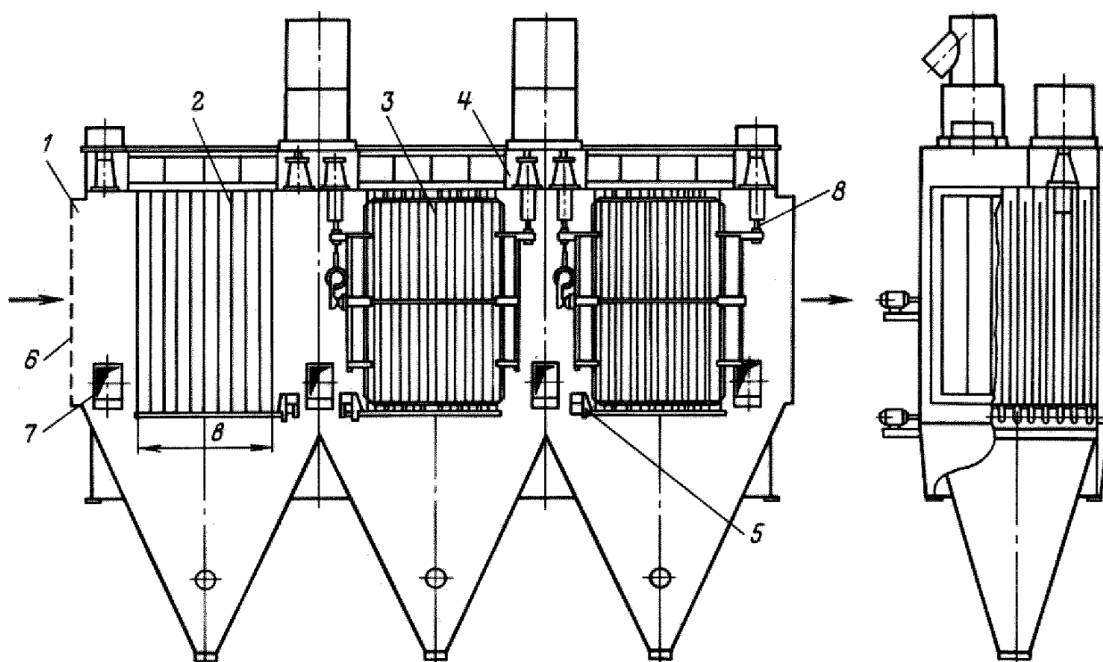


Рис. 3.1. Електрофільтр типу УГ: 1 – корпус; 2 – електрод осадний; 3 – електрод коронуючий; 4 – механізм струшування коронуючих електродів; 5 – механізм струшування осадних електродів; 6 – газорозподільні ґрати; 7 – бункер для золи; 8 – ізолятор

Управління електричним режимом передбачає безперервний моніторинг і регулювання таких параметрів, як напруга на електродах, струм, потужність,

запиленість газового потоку та витрата газу. Основною метою є підтримка оптимальних умов для ефективного уловлювання частинок при мінімальному енергоспоживанні. Технологія нечіткого керування дозволяє адаптивно реагувати на коливання вхідних параметрів, забезпечуючи автоматичне коригування режимів роботи у реальному часі, що зображено на рисунку 3.2.

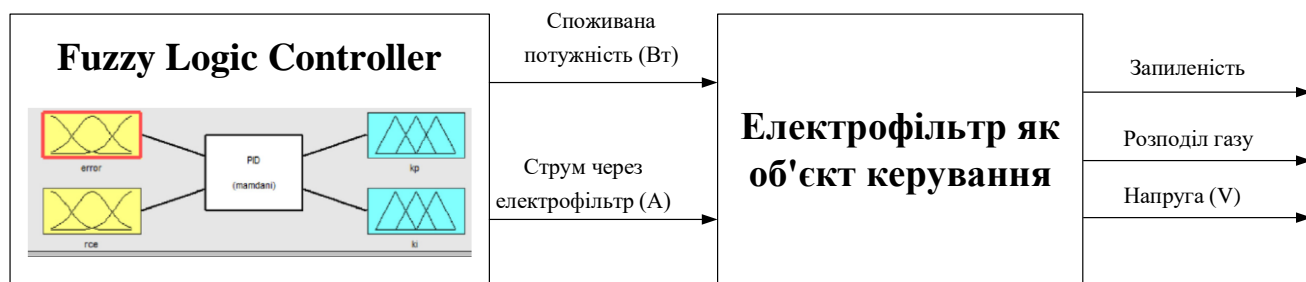


Рис. 3.2. Технологія нечіткого керування

Регульовані параметри включають напругу на електродах, яка повинна бути достатньо високою для іонізації газу, проте не перевищувати порогів пробою і виникнення іскрових розрядів. Напруга зазвичай варіюється в межах 30–80 кВ, підбираючись залежно від поточних умов експлуатації. Запиленість газового потоку на вході та виході електрофільтра дозволяє оцінити ефективність процесу й своєчасно коригувати роботу системи. Витрата газу безпосередньо впливає на час перебування частинок у електричному полі та, відповідно, на ефективність їх осадження.

Керуючі параметри визначають стабільність та ефективність роботи системи. Струм електрофільтра характеризує кількість іонів, що утворюються в процесі іонізації, і прямо впливає на інтенсивність осадження пилу. Потужність, що подається на фільтр, є функцією напруги та струму, її оптимізація дозволяє досягти необхідного рівня іонізації при мінімальних витратах енергії.

Для забезпечення високої ефективності процесу застосовуються датчики, які безперервно вимірюють напругу, запиленість і витрату газу. Отримані дані аналізуються системою управління і порівнюються з нормативними значеннями. На основі цього аналізу здійснюється автоматичне регулювання напруги. Наприклад, при збільшенні запилення або зміні витрати газу система коригує

напругу на електродах для підтримки оптимального рівня іонізації, що підвищує ефективність осадження частинок і запобігає виникненню небажаних розрядів.

Додатково реалізовано механізм зворотного зв'язку, у якому значення запилення на виході використовуються для динамічної корекції параметрів управління. У разі підвищення концентрації частинок система може підвищити напругу, змінити витрату газу або скорегувати струм, забезпечуючи оптимальний режим роботи електрофільтра.

Процес керування електричним режимом електрофільтра є складним і динамічним, оскільки він передбачає постійний моніторинг та регулювання параметрів, які безпосередньо впливають на ефективність уловлювання пилу та енергоспоживання системи. У даному контексті управління полягає в підтриманні оптимальних умов роботи, що забезпечує максимальну продуктивність фільтра при мінімальних витратах енергії.

Серед основних регульованих параметрів напруга на електродах відіграє визначальну роль. Вона повинна бути достатньо високою для ефективної іонізації газового потоку, проте не перевищувати порогів пробою та виникнення іскрових розрядів. Як правило, робочий діапазон напруги знаходиться в межах від 30 до 80 кВ і підбирається залежно від поточних умов експлуатації, з урахуванням концентрації пилу та витрати газу. Запиленість газового потоку, що вимірюється на вході та виході електрофільтра, дозволяє оцінювати ефективність його роботи та своєчасно коригувати параметри управління. Витрата газу визначає час перебування частинок у полі електродів, що безпосередньо впливає на ефективність осадження.

До управляючих параметрів, що формують роботу системи, належать струм електрофільтра та подана потужність. Струм відображає інтенсивність утворення іонів у процесі іонізації газу, що безпосередньо впливає на швидкість та ефективність осадження пилу. Потужність, яка подається на фільтр, розраховується як функція напруги та струму; її оптимізація дозволяє досягти необхідного рівня іонізації при мінімальних енергетичних витратах.

Для забезпечення безперебійної та ефективної роботи електрофільтра

використовується система датчиків, що постійно фіксують напругу, запиленість та витрату газу. Дані надходять у систему керування, де вони аналізуються та порівнюються з нормативними показниками. На основі цього здійснюється автоматична регуляція напруги. Наприклад, при збільшенні запилення або зміні витрати газу система оперативно коригує напругу на електродах, підтримуючи оптимальний рівень іонізації та запобігаючи небажаним електричним розрядам.

Особливе значення має механізм зворотного зв'язку, у рамках якого виміряні значення вихідної запиленості використовуються для динамічної адаптації параметрів керування. У випадку підвищення запилення на виході електрофільтра система здатна збільшити напругу, змінити витрату газу або відкоригувати струм, забезпечуючи тим самим стабільний та ефективний режим роботи.

3.2. Розробка нечіткого управління електрофільтром

Розробка нечіткого управління електрофільтром з урахуванням електричного режиму є сучасним підходом у промислових технологіях очищення газових викидів, що дозволяє підвищити ефективність фільтрації та оптимізувати енергоспоживання. У цьому контексті система управління формується на основі аналізу взаємозв'язку між вхідними та вихідними змінними, які характеризують стан електрофільтра та умови його роботи.

Вхідні змінні нечіткого регулятора включають напругу на електродах, концентрацію пилу в газовому потоці та витрату газу на вході електрофільтра. Напруга є визначальним параметром, який формує інтенсивність іонізації газу та, відповідно, ефективність уловлювання частинок. Зміни напруги безпосередньо впливають на роботу фільтра та рівень споживаної енергії. Концентрація пилу відображає ступінь забруднення газового потоку та є показником ефективності очищення. Витрата газу визначає швидкість проходження частинок через електроди, впливаючи на тривалість їх взаємодії з електричним полем та на результативність осадження.

Вихідні змінні регулятора включають струм електрофільтра та споживану

потужність. Струм характеризує електричні процеси в фільтрі, його значення визначає інтенсивність утворення іонів та ефективність осадження пилу. Потужність, що споживається системою, є критерієм енергетичної ефективності, і її оптимізація дозволяє забезпечити максимальну продуктивність фільтрації при мінімальних витратах електроенергії. Взаємозв'язок між вхідними та вихідними параметрами формує комплексну динамічну систему, управління якою потребує використання адаптивних алгоритмів, здатних реагувати на зміни умов експлуатації (рис.3.3).

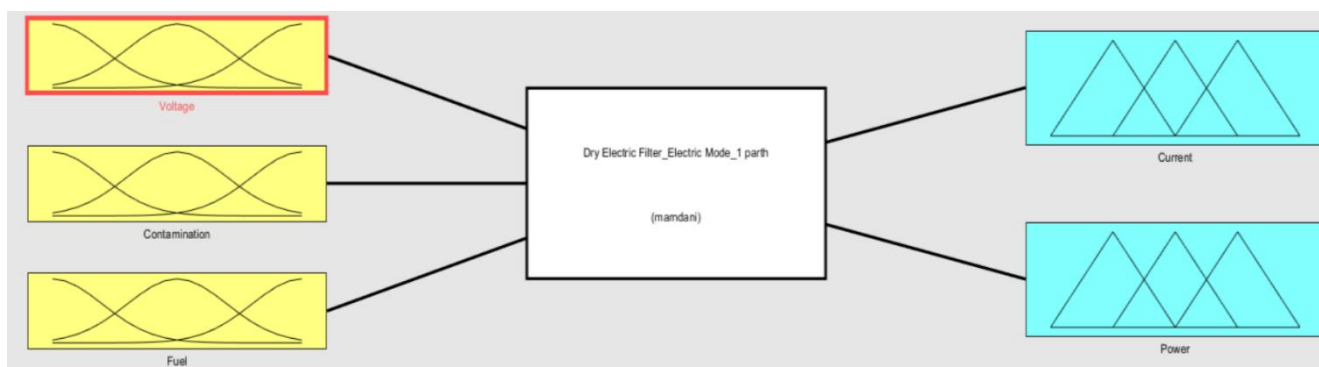


Рис. 3.3. Розробка нечіткого управління

Розробка нечіткого управління передбачає врахування змінності електрорежимів, характерної для промислових процесів. Це включає коливання напруги, струму та інших параметрів електромережі, які можуть істотно впливати на роботу електрофільтра. Система нечіткого управління здатна адаптуватися до цих змін, забезпечуючи стабільну роботу та підтримання високого рівня очищення газових викидів незалежно від коливань електричних параметрів.

Ще одним важливим аспектом є оптимізація енергоспоживання. Використання нечітких алгоритмів дозволяє регулювати режим роботи електрофільтра таким чином, щоб досягати необхідного рівня очистки газів при мінімальних витратах електроенергії. Такий підхід сприяє не лише зменшенню витрат на енергоресурси, але й зниженню негативного впливу виробничих процесів на навколишнє середовище, що є важливим у сучасних умовах промислової екології.

3.3. Розробка нечіткого управління електрофільтром з урахуванням електричного режиму

Електрофільтр є складною системою, яка інтегрує різні поля та параметри, що впливають на ефективність його роботи. Для наукового аналізу доцільно виділити кілька основних полів, кожне з яких формує певний аспект функціонування пристрою та взаємодіє з іншими, забезпечуючи комплексну ефективність фільтрації.

Електричне поле формує основу процесу електрофільтрації, оскільки саме воно забезпечує притягування та утримання твердих частинок у газовому потоці. Це поле створюється прикладанням високої напруги між електродами, що сприяє розділенню частинок і газів та визначає продуктивність та ефективність очищення.

Механічне поле описує фізичні процеси, пов'язані з рухом газів і частинок всередині електрофільтра. Сюди входять параметри швидкості потоку, його тиск та напрямок руху, що безпосередньо впливають на тривалість взаємодії частинок з електродами та загальну ефективність процесу фільтрації.

Поле заряду частинок визначає процес надання твердим часткам електричного заряду, що дозволяє їм ефективно притягуватися до електродів. Цей параметр критично важливий для підвищення утримання пилу та стабільності роботи електрофільтра, оскільки рівень заряду безпосередньо впливає на швидкість осадження частинок.

Теплове поле враховує виникнення тепла внаслідок електричних втрат, тертя та інших фізичних факторів. Контроль температурного режиму є необхідним для запобігання перегріванню системи та забезпечення стабільної та довготривалої експлуатації електрофільтра.

Поле потоку газу визначає ефективність розподілу газового потоку всередині фільтра. Рівномірність потоку, його швидкість та інші параметри впливають на тривалість перебування частинок у електричному полі і, відповідно, на ефективність очищення газів.

Взаємодія між усіма цими полями формує складну динамічну систему, де

ефективне управління кожним параметром істотно впливає на результативність роботи електрофільтра. Особливе значення має поле електричного режиму, яке інтегрує параметри електричних характеристик та режимів роботи пристрою. Для промислових електрофільтрів, що використовуються для очищення газових викидів, стабільність та оптимальність цього поля визначають ефективність процесу, зменшують негативний вплив на навколишнє середовище та підвищують енергетичну ефективність системи.

Налаштування нечіткого управління електричним режимом у середовищі Fuzzy Logic MATLAB передбачає кілька етапів. На першому етапі визначаються вхідні та вихідні змінні, які будуть використовуватися в системі, включаючи лінгвістичні параметри, що відображають фізичні процеси всередині електрофільтра (Таблиця 3.1). Наступним кроком є визначення функцій належності для кожної змінної, що формує нечіткі множини та дозволяє зіставляти конкретні числові значення з лінгвістичними термінами (рис.3.2–3.8).

Для вхідної змінної "Voltage" формується нечіткої множини, що включає визначення універсального діапазону значень напруги, розбиття його на підмножини (A–G) та визначення функцій належності для кожного підмножини. Це дозволяє системі нечіткого управління адаптивно реагувати на зміни напруги, підтримуючи оптимальний електричний режим та ефективність фільтрації незалежно від коливань вхідних параметрів.

Таблиця 3.1

Вхідні та вихідні змінні електричного режиму

№	Напруга, кВ	ФП	Запиленість, мг/м ³	ФП	Витрата газу на вході, м ³ /год	ФП	Струм електрофільт ра, А	ФП	Потужність, Вт	ФП
1	55.1	G	150,2	G	85,3	A	245,0	H	33,6	B
2	52.8	E	149,7	D	85,1	A	216,0	E	33,6	B
3	50.5	B	149,2	A	84,8	A	188,0	B	33,6	B
4	52.6	E	149,3	B	84,7	A	206,5	D	33,6	B
5	54.6	G	149,5	C	84,6	A	225,2	F	33,5	A

Продовження таблиці 3.1

№	Напруга, кВ	ФП	Запиленість, мг/м ³	ФП	Витрата газу на вході, м ³ /год	ФП	Струм електрофільтр а, А	ФП	Потужність, Вт	ФП
6	54.5	G	149,4	C	84,7	A	233,0	G	33,6	B
7	54.7	G	149,3	B	84,6	A	241,2	H	33,6	B
8	51.6	D	149,6	E	84,6	A	187,5	B	33,6	B
9	48.5	A	150,0	I	84,6	A	134,2	B	33,6	B
10	51,1	C	149,9	H	85,0	A	187,5	B	33,6	B
11	53,6	F	150,1	G	85,4	B	241,2	H	33,6	B
12	51,9	D	150,0	G	85,7	B	210,0	D	33,7	C
13	50,5	B	149,7	F	86,0	C	179,0	A	33,7	C
14	51,7	D	149,8	F	86,3	C	198,8	C	33,7	C
15	53,2	F	149,9	F	86,6	C	218,0	E	33,7	C
16	53,4	F	150,0	H	87,1	C	222,0	F	33,8	D
17	53,6	F	150,2	I	87,6	D	226,0	F	33,8	D
18	53,1	F	150,1	J	86,9	C	224,0	F	33,9	E
19	52,7	E	150,0	J	86,1	C	222,0	F	33,9	E
20	53,3	F	150,2	J	86,4	C	229,0	F	33,9	E

Функції належності визначають ступінь, до якого конкретне значення напруги відноситься до кожного нечіткого підмножини. Вони відображають не жорсткі границі, а плавні переходи між рівнями напруги, що дозволяє системі нечіткого управління гнучко реагувати на зміну параметрів. Наприклад, значення 52 кВ може частково належати до підмножини «Середня напруга» і одночасно до підмножини «Висока напруга» з певним ступенем приналежності, що забезпечує більш точне та адаптивне керування електричним режимом електрофільтра.

Візуалізація функцій належності дозволяє наочно продемонструвати, як значення змінної «Voltage» співвідноситься з різними рівнями напруги. Графічне представлення цих функцій дозволяє інженерам і розробникам системи швидко оцінити, як нечіткі правила впливають на управління іонізацією газового потоку, а також полегшує процес налаштування параметрів системи.

На рисунку 3.4 показано формування нечіткої множини для вхідної змінної «Voltage», де кожне підмножина (A–G) має свою функцію належності, що відображає ступінь впливу конкретного значення напруги на логіку управління. Це формує основу нечітких правил, які забезпечують адаптивну регуляцію напруги, стабілізуючи електричний режим і підвищуючи ефективність осадження частинок у процесі електрофільтрації.

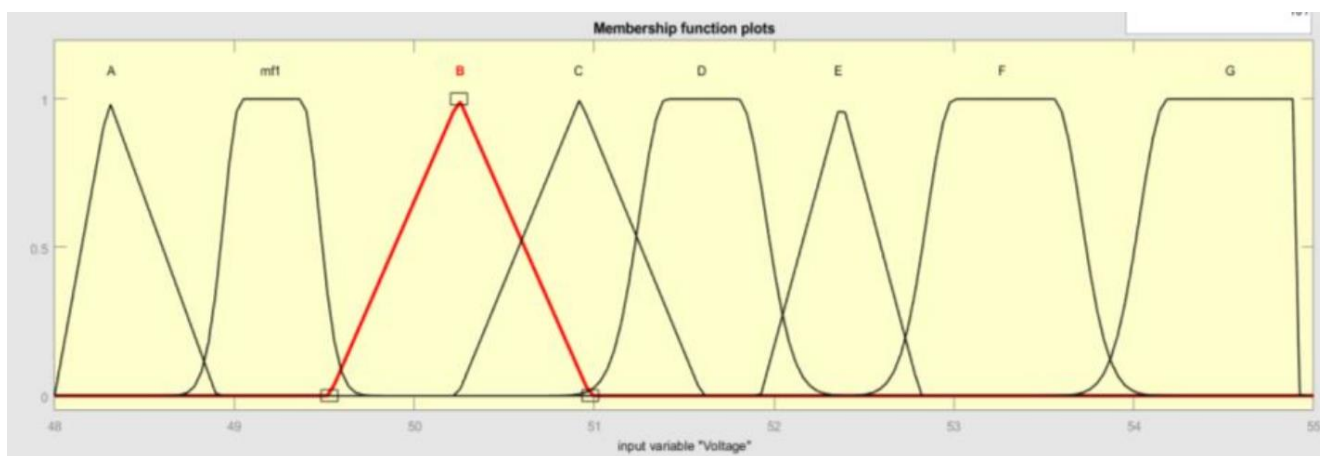


Рис. 3.4. Формування нечіткої множини для вхідної змінної «Voltage»

Процес формування нечіткої множини для вхідної змінної «Contamination» передбачає визначення універсального діапазону значень концентрації пилу в газовому потоці та його розподіл на нечіткі підмножини, позначені літерами F–J. Кожна підмножина характеризується своєю функцією належності, яка визначає ступінь приналежності конкретного значення концентрації до відповідного рівня забруднення [13].

Такий підхід дозволяє системі нечіткого управління більш гнучко реагувати на зміни рівня пилу в газовому потоці. Наприклад, якщо концентрація пилу становить $149,7 \text{ мг/м}^3$, вона може частково належати до підмножини «F» та одночасно до «G» з різним ступенем приналежності. Це забезпечує плавне і адаптивне регулювання параметрів електрофільтра, у тому числі напруги та струму, для підтримання високої ефективності очищення.

На рисунку 3.5 продемонстровано формування нечіткої множини для вхідної змінної «Contamination», де графічно відображено, як конкретні значення концентрації пилу співвідносяться з різними рівнями забруднення. Візуалізація

функцій належності полегшує процес налаштування нечіткого регулятора та дозволяє розробникам системи оцінити вплив змін вхідних параметрів на результати фільтрації.

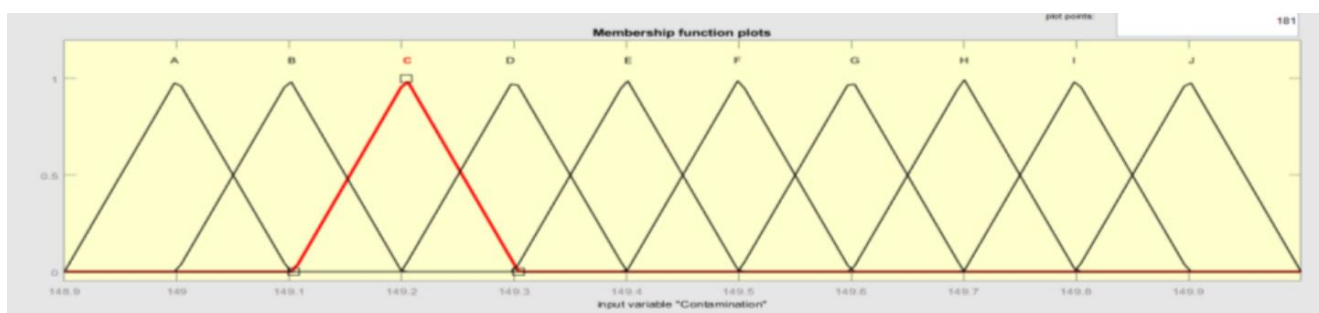


Рис. 3.5. Формування нечіткої множини для вхідної змінної «Contamination»

Рисунок 3.6 ілюструє формування нечіткого множини для вхідної змінної «Fuel», що відповідає витраті газу на вході електрофільтра. Процес починається з визначення універсальної множини значень витрати газу, яке охоплює весь діапазон можливих режимів роботи системи. Цей діапазон поділяється на нечіткі підмножини, позначені літерами А–D, кожна з яких відповідає певному рівню витрати газу.

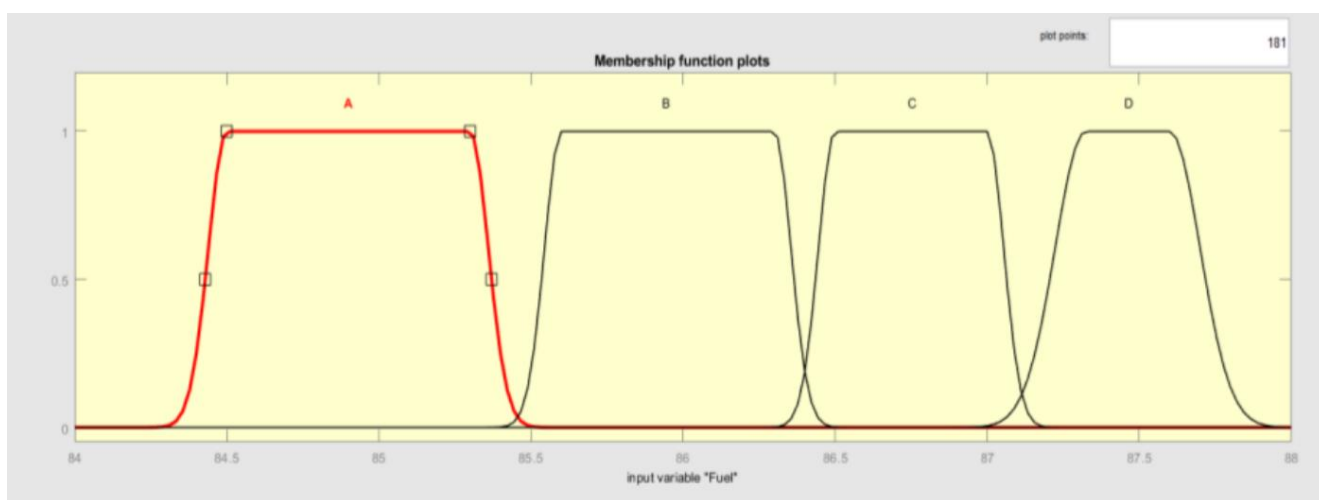


Рис. 3.6. Формування нечіткої множини для вхідної змінної «Fuel»

Для кожного підмножини визначаються функції належності, які відображають ступінь приналежності конкретного значення витрати газу до відповідної категорії. Таке представлення враховує невизначеність та наближення реальних даних, дозволяючи нечіткій системі управління гнучко реагувати на

зміни умов експлуатації. Наприклад, при значенні витрати газу $84,7 \text{ м}^3/\text{год}$ система може одночасно частково належати до підмножин «А» і «В», що забезпечує плавне регулювання параметрів електрофільтра, таких як напруга на електродах або струм.

Візуалізація функцій належності дозволяє наочно оцінити, як різні рівні витрати газу впливають на роботу системи управління. Це полегшує процес налаштування нечіткого регулятора, а також забезпечує більш точний моніторинг і оптимізацію процесів фільтрації газового потоку. Завдяки такій моделі можна підтримувати стабільний режим роботи електрофільтра, підвищувати ефективність уловлювання пилу та зменшувати енергоспоживання в умовах змінної подачі газу.

Процес формування нечіткого множини для вхідної змінної «Current», що відповідає струму електрофільтра, передбачає визначення універсального діапазону значень струму, який охоплює весь спектр робочих режимів пристрою. Цей діапазон поділяється на нечіткі підмножини, позначені літерами А–Н, кожна з яких відповідає певному рівню струму, що протікає через електрофільтр під час його експлуатації.

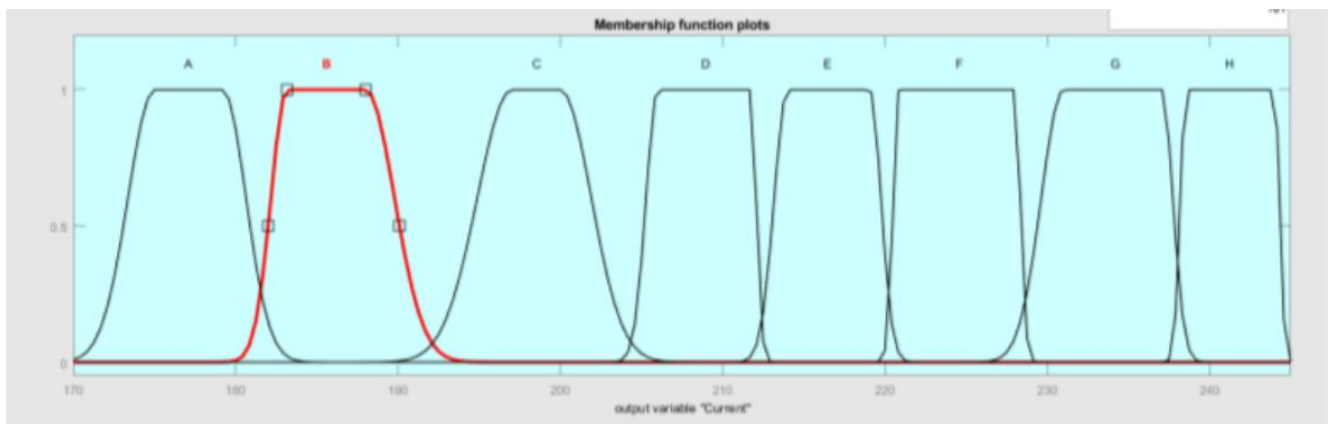


Рис. 3.7. Формування нечіткої множини для вхідної змінної «Current»

Наступним етапом є визначення функцій належності для кожного підмножини. Ці функції відображають ступінь приналежності конкретного значення струму до відповідної категорії, що дозволяє нечіткій системі управління враховувати плавні переходи між рівнями струму. Наприклад, якщо струм становить $243,8 \text{ А}$, він може частково належати до підмножини «Н» і одночасно до «Г» з певним ступенем приналежності. Це забезпечує адаптивне регулювання

параметрів електрофільтра, зокрема напруги та потужності, для підтримання стабільного електричного режиму і високої ефективності осадження пилю.

Використання функцій належності дозволяє моделювати невизначеність і непередбачувані коливання струму, що виникають під час змінних умов роботи електрофільтра. Такий підхід підвищує точність та надійність управління, забезпечує плавне регулювання та оптимізацію енергоспоживання, що є критично важливим для промислових процесів очищення газових потоків.

Рисунок 3.8 ілюструє формування нечіткого множення для вихідної змінної «Power», яка відображає потужність електрофільтра. Процес починається з визначення універсального діапазону значень потужності, що охоплює всі робочі режими фільтра. Діапазон поділяється на нечіткі підмножини, позначені літерами А–Е, кожна з яких відповідає певному рівню споживаної потужності.

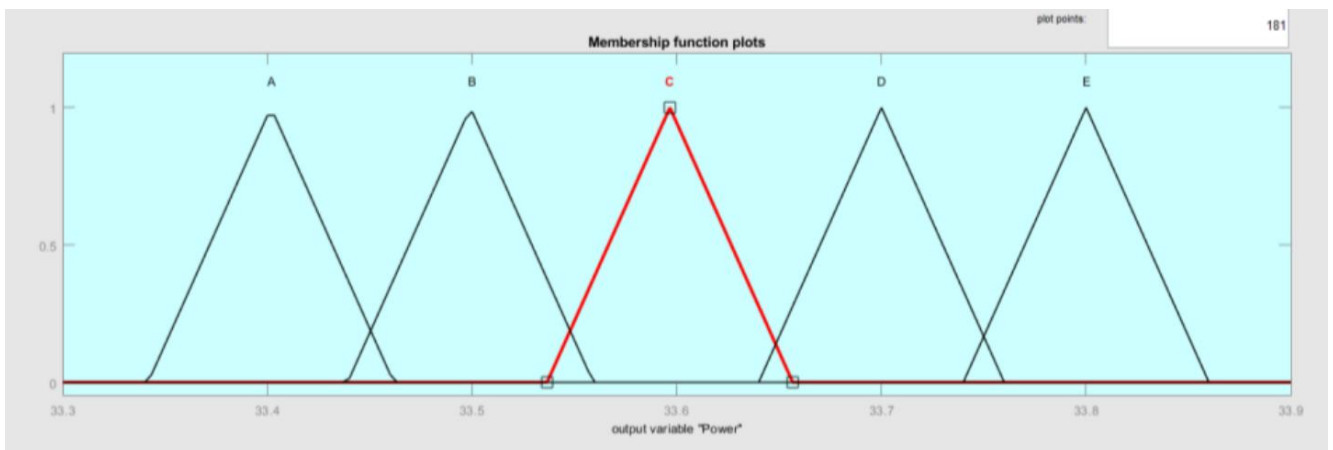


Рис. 3.8. Формування нечіткої множини для вхідної змінної «Power»

Для кожної підмножини визначаються функції належності, які описують ступінь приналежності конкретного значення потужності до відповідної категорії. Таке представлення дозволяє враховувати невизначеність і наближення в даних, що особливо важливо для промислових систем моніторингу та управління електрофільтрацією, де зміни навантаження та параметрів потоку газу можуть бути непередбачуваними.

Створення нечітких правил передбачає побудову логічних залежностей між вхідними та вихідними змінними системи управління електрофільтром. Основна ідея полягає в тому, щоб на основі поточних значень таких параметрів, як напруга

на електродах, концентрація пилю та витрата газу, визначати оптимальні значення вихідних змінних – струму та потужності електрофільтра.

Для цього формується база правил, яка відображає інженерні знання та емпіричні дані про роботу пристрою. Кожне правило встановлює зв'язок між конкретними рівнями вхідних змінних і відповідними діями для вихідних параметрів. Наприклад, якщо концентрація пилю висока, а витрата газу невелика, система може підвищити напругу на електродах або скоригувати струм, щоб підтримувати ефективне осадження частинок.

Таблиця 3.2 відображає структуру такої бази правил. Вона включає комбінації вхідних змінних і відповідні значення вихідних змінних, визначені як нечіткі множини. Кожна комбінація дозволяє системі приймати рішення в умовах невизначеності та змінного середовища, забезпечуючи адаптивну регуляцію електричного режиму.

Таблиця 3.2

База правил

№	1 ВХ	2 ВХ	3 ВХ	1 ВИХ	2 ВИХ	№	1 ВХ	2 ВХ	3 ВХ	1 ВИХ	2 ВИХ
1	G	G	A	H	B	11	F	G	B	H	B
2	E	D	A	E	B	12	D	G	B	D	C
3	B	A	A	B	B	13	B	F	C	A	C
4	E	B	A	D	B	14	D	F	C	C	C
5	G	C	A	F	A	15	F	F	C	E	C
6	G	C	A	G	B	16	F	H	C	F	D
7	G	B	A	H	B	17	F	I	D	F	D
8	D	E	A	B	B	18	F	J	C	F	E
9	A	I	A	B	B	19	E	J	C	F	E
10	C	H	A	B	B	20	F	J	C	F	E

Рисунок 3.9 ілюструє графічне представлення бази правил, демонструючи, як вхідні параметри поєднуються у нечіткі правила та впливають на вихідні змінні. Така візуалізація допомагає інженерам оцінити, які рішення приймає система для

різних комбінацій умов, а також оптимізувати логіку управління для досягнення високої ефективності очищення газових потоків при мінімальному енергоспоживанні.

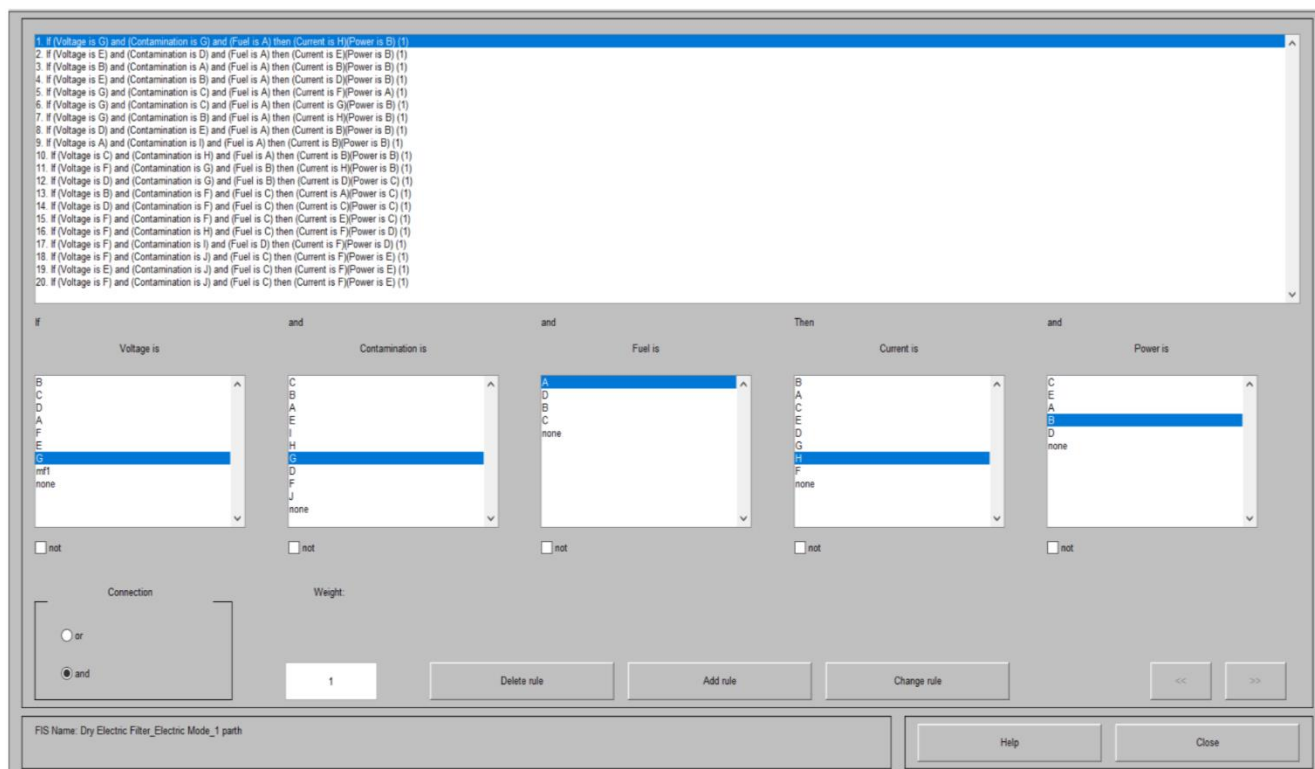


Рис. 3.9. Формування бази правил

Визначення логіки управління на основі нечітких правил є важливим етапом проектування системи електрофільтрації, оскільки саме на цьому етапі встановлюються взаємозв'язки між вхідними та вихідними змінними через нечітку логіку. На підставі аналізу поточного стану таких параметрів, як потужність, ступінь забруднення газового потоку або інші релевантні характеристики електрофільтра, формулюються нечіткі правила, які визначають, як зміни у вхідних умовах повинні відобразитися на керуючих діях. Наприклад, якщо поточна потужність електрофільтра висока, а рівень забруднення газу також підвищений, система може прийняти рішення збільшити ефективність фільтрації шляхом корекції напруги або струму, забезпечуючи оптимальне осадження частинок.

Такі правила мають перевагу зрозумілості та прозорості, оскільки відображають експертні знання про роботу електрофільтра і дозволяють передбачати реакції системи в різних ситуаціях. Наступним кроком є застосування

нечіткої системи виводу, яка на основі сформованої бази правил визначає нечітке управління вихідними змінними, зокрема регулювання потужності або швидкості роботи електрофільтра.

Створення нечіткої системи передбачає інтеграцію всіх її компонентів у єдину структуру, здатну забезпечувати ефективне управління та контроль процесів фільтрації газових потоків в електрофільтрі. Цей етап є завершальним у побудові системи нечіткого управління, оскільки на ньому відбувається об'єднання всіх елементів – вхідних і вихідних змінних, функцій належності та бази правил – у цілісну структуру, здатну приймати рішення на основі нечіткої логіки.

В основу такої системи закладається механізм нечіткого виводу, який дозволяє трансформувати вхідні нечіткі дані у керуючі дії на виході. Наприклад, на підставі поточного рівня забруднення газу, напруги на електродах та витрати газу система визначає оптимальні значення струму та потужності електрофільтра. Це забезпечує адаптивне регулювання електричного режиму, підтримку стабільності процесу осадження частинок і оптимізацію енергоспоживання.

Візуалізація структури нечіткої системи, представлена на рисунку 3.10, демонструє, як усі компоненти – вхідні змінні, функції належності, база правил і вихідні змінні – взаємодіють між собою. Такий підхід дозволяє створити інтегровану систему управління, здатну гнучко реагувати на змінні умови експлуатації, підтримуючи високий рівень ефективності фільтрації та забезпечуючи надійний контроль за якістю очищення газових потоків у промислових умовах.

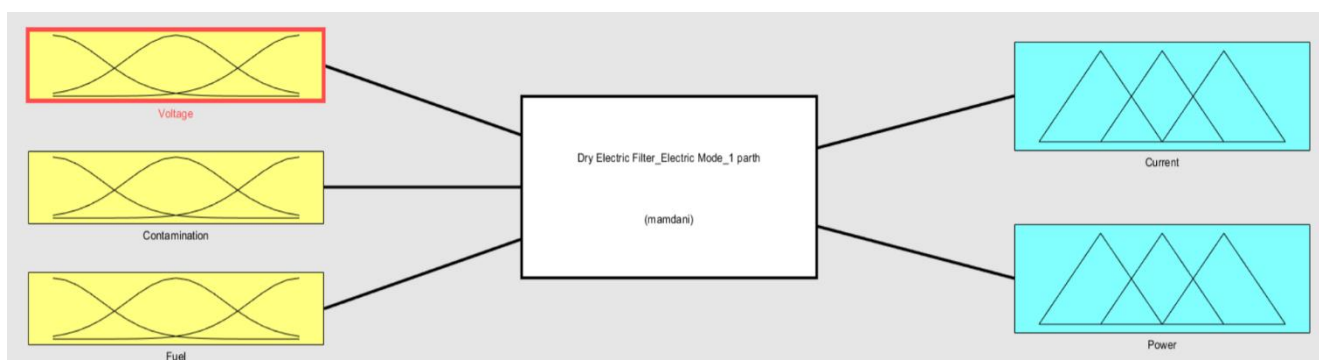


Рис. 3.10. Візуалізація структури нечіткої системи

Інтеграція всіх компонентів у єдину нечітку систему дозволяє автоматично адаптувати управління електрофільтром до змін у зовнішньому середовищі або вхідних умовах, забезпечуючи стабільну та оптимальну роботу пристрою за різних робочих сценаріїв. Такий підхід створює ефективний механізм автоматизованого регулювання, що поєднує моніторинг, аналіз і керуючі дії в одному комплексі, дозволяючи підтримувати високий рівень очищення газових потоків і зменшувати енергоспоживання.

Наступним етапом є налаштування та тестування системи. Це передбачає корекцію параметрів функцій належності та правил виводу, що визначають поведінку системи при різних комбінаціях вхідних значень. Тестування здійснюється за допомогою набору вхідних даних, щоб переконатися, що система реагує передбачувано та ефективно (рисунок 3.11).

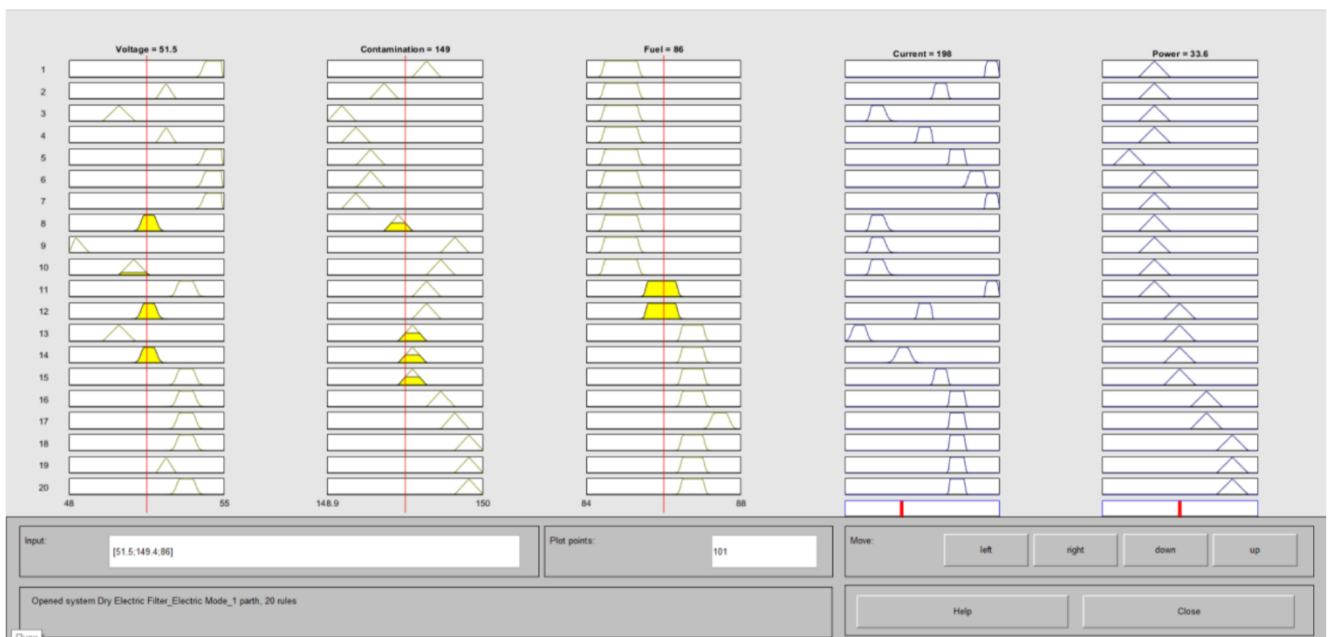


Рис. 3.11. Візуалізація структури нечіткої системи

На підставі результатів тестування проводиться оптимізація параметрів. Це включає тонке регулювання функцій належності та адаптацію правил виводу для підвищення продуктивності системи, забезпечення більш точної реакції на змінні умови та максимізацію ефективності процесу фільтрації. Такий підхід гарантує, що нечітка система управління не лише забезпечує стабільну роботу електрофільтра, але й здатна гнучко адаптуватися до виробничих коливань, підтримуючи

оптимальний баланс між якістю очищення та енергоефективністю.

У процесі тестування нечіткої системи електрофільтра відкривається можливість цілеспрямованої оптимізації її параметрів, що охоплюють як функції належності, так і логічні правила, які формують реакцію системи на змінні режими роботи. Аналіз отриманих результатів дозволяє ідентифікувати ділянки, де модель може демонструвати недостатню точність або обмежену адаптивність у відповідь на специфічні умови експлуатації. Корекція параметрів функцій належності, які задають ступінь відповідності вхідних величин відповідним нечітким множинам, у поєднанні з уточненням логічних правил, що визначають співвідношення між вхідними та вихідними змінними, створює можливість підвищення чутливості та гнучкості системи.

Такий послідовний, ітеративний підхід до оптимізації сприяє тому, що нечітка система електрофільтра поступово набуває здатності точніше реагувати на широкий спектр робочих сценаріїв, включно зі змінними рівнями запиленості, нестабільністю електрорежиму або варіативністю газодинамічних параметрів. Адаптивність, що формується внаслідок таких коригувань, забезпечує стабільну ефективність системи у реальному часі та підвищує загальний рівень фільтрації в промислових умовах [14].

Розроблення нечіткого управління електрофільтром із урахуванням особливостей електрорежимів другого та третього полів ґрунтується на глибокій інтеграції лінгвістичних змінних, функцій належності та правил виводу в єдину адаптивну систему регулювання. Налаштування нечіткої системи для полів 2 і 3 здійснюється за аналогічним алгоритмічним підходом, що застосовувався при побудові моделі для першого поля, проте враховує специфіку електродинамічних процесів, характерних саме для цих ділянок електрофільтра. Визначення вхідних і вихідних змінних для кожного поля здійснюється на основі експериментальних даних і діапазонів електрорежимних параметрів, що подані у відповідних таблицях.

Сформований набір лінгвістичних термів типу А–J забезпечує можливість тонкого відображення градацій напруги, струму, запиленості та супутніх показників, що впливають на електрогідродинамічний стан потоку. Наступний етап

полягає у побудові функцій належності, які відображають взаємозв'язок між числовими значеннями параметрів і якісними оцінками їх стану. Графічні моделі цих функцій, наведені у додатках, дозволяють відстежити закономірності зміни параметрів та сформуванню інтуїтивно зрозумілу основу для подальшої побудови правил керування.

Формування нечітких правил забезпечує логічне зв'язування вхідних умов із необхідними коригуваннями електрорежиму. Ці правила відтворюють експертні знання про взаємодію між параметрами та дозволяють системі враховувати відхилення в роботі електрофільтра, пов'язані зі змінами запиленості, напруги, струму чи газодинамічних характеристик. Інтеграція всіх компонентів у завершену нечітку систему створює багаторівневий механізм нечіткого виводу, який забезпечує адаптивну реакцію на змінні умови технологічного процесу.

Подальше налаштування та тестування моделі дозволяють визначити ступінь відповідності системи реальним даним і поведінці електрофільтра в промислових умовах. Аналіз результатів випробувань створює підґрунтя для оптимізації функцій належності та правил керування, що підвищує точність регулювання і забезпечує більш стійку роботу системи за динамічних умов. Такий ітераційний процес дає можливість адаптувати нечітку систему до широкого спектра експлуатаційних сценаріїв та забезпечити ефективну стабілізацію електрорежимів.

Розроблені алгоритми управління для другого і третього полів сприяють формуванню інтелектуальної системи регулювання електрофільтра, яка здатна функціонувати в умовах невизначеності, нелінійності та мінливості забруднювальних потоків. Це підвищує точність налаштування електрорежимів, зменшує енерговитрати, мінімізує небажані коливання струму й напруги, а також забезпечує стійку роботу обладнання.

Узагальнюючи викладене, застосування запропонованого алгоритму нечіткого управління для полів 2 і 3 формує основу для створення високоефективної автоматизованої системи очищення, яка здатна адаптуватися до реальних промислових умов, забезпечувати підвищений рівень фільтрації та підтримувати стабільний технологічний режим [14].

Висновки до розділу 3

У даному розділі було здійснено комплексний підхід до побудови нечіткої системи керування електрофільтром, що охоплює всі етапи формування універсальних множин, побудови функцій належності, створення бази правил та інтеграції цих компонентів у єдину керуючу структуру. Проведено детальний аналіз параметрів електрорежиму для першого, другого та третього полів, що дало можливість сформувати лінгвістичні змінні і забезпечити адекватне відображення реальних технологічних характеристик у межах моделі. Сформовані функції належності відтворюють властиві процесу невизначеність та неповноту інформації, а побудовані нечіткі правила дозволяють реалізувати інтелектуальний механізм прийняття рішень у змінних умовах експлуатації.

Розроблена система продемонструвала здатність адаптуватися до коливань параметрів електрофільтра та забезпечувати відповідну корекцію управляючих сигналів. Тестування моделі підтвердило ефективність підходу, що створює умови для подальшої оптимізації функцій належності та структури правил, спрямованої на підвищення точності регулювання. Здійснена інтеграція нечітких моделей для різних полів електрорежиму формує узгоджену систему керування, яка підсилює стабільність та ефективність процесу електрофільтрації.

РОЗДІЛ 4

ПОБУДОВА АРХІТЕКТУРИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ СУХИМ ЕЛЕКТРОФІЛЬТРОМ

Автоматизована система керування сухим електрофільтром посідає важливе місце у структурі сучасних технологій очищення промислових газів, оскільки забезпечує підвищення екологічної безпеки виробництва та зменшення впливу техногенних процесів на довкілля. У промислових умовах підприємства стикаються з необхідністю стабільного вилучення дрібнодисперсних частинок, аерозолів та твердих домішок із газових потоків, що зумовлює використання обладнання, здатного функціонувати в умовах значних коливань навантаження, температури, електричних характеристик та концентрації забруднювальних речовин. У цьому контексті сухий електрофільтр розглядається як ефективний апарат, у якому реалізується процес електричного осадження частинок у полі високої напруги, що дозволяє досягати значного ступеня очищення газів завдяки керованому формуванню коронного розряду та раціональному розподілу електричного поля.

Проте досягнення високої ефективності електрофільтрації неможливе без застосування системи автоматичного керування, здатної підтримувати стабільність режимів, адаптуватися до динамічних змін технологічного процесу і своєчасно реагувати на відхилення робочих параметрів від номінальних значень. В умовах реальної експлуатації властивості газового середовища можуть змінюватися у широких межах, що відображається на інтенсивності коронного розряду, здатності частинок заряджатися, швидкості їх переміщення до осаджувальних електродів та загальній результативності процесу очищення. Автоматизована система керування сухим електрофільтром формує комплекс дій, спрямованих на підтримання оптимальних електротехнічних і гідродинамічних параметрів, що забезпечує стабільну роботу апарата в умовах технологічної невизначеності.

Архітектура такої системи включає інтеграцію вимірювальних, виконавчих та обчислювальних підсистем, які у взаємодії створюють інформаційне поле для

прийняття рішень у режимі реального часу. Функціонування системи передбачає безперервний збір даних про електричні параметри розряду, стан газового потоку, ступінь запиленості, температуру та інші показники, що визначають поведінку електрофільтра. На основі отриманої інформації здійснюється керування блоком живлення, контроль рівня іонізації, регулювання напруги та струму, а також підтримання умов, необхідних для стабільного осадження частинок на електродах. Важливою складовою є також діагностування елементів електрофільтра та виявлення можливих відмов, що дає змогу підвищувати надійність та довговічність обладнання.

4.1. Розроблення архітектури АСК сухим електрофільтром

Архітектура автоматизованої системи керування сухим електрофільтром ґрунтується на багаторівневій структурі, що забезпечує узгодженість дій між технічними засобами, алгоритмічними модулями та системами візуалізації. Така структурна організація дозволяє інтегрувати процеси вимірювання, регулювання та аналізу в єдине інформаційно–керувальне середовище, здатне працювати у складних виробничих умовах. Трирівневе компонування забезпечує можливість адаптивного масштабування, розширення функціональності та підвищення надійності, оскільки кожен рівень виконує окремий набір завдань і водночас формує єдину систему, що реагує на зміну технологічних параметрів у режимі реального часу.

На базовому рівні системи зосереджені первинні вимірювальні перетворювачі та виконавчі пристрої, які безпосередньо взаємодіють із технологічним середовищем електрофільтра. Цей рівень формує первинний інформаційний потік, що включає дані про температуру, тиск, параметри газового потоку, інтенсивність електричного розряду та характеристики осадження частинок. Окрім цього, у його межах реалізуються механізми, що забезпечують фізичний вплив на обладнання, зокрема системи струшування електродів, повітряні та дренажні вузли, а також елементи заземлення, необхідні для

запобігання електричним перенавантаженням. Саме на цьому рівні формується основний обсяг інформації, який надалі перетворюється в елементи керувальної дії.

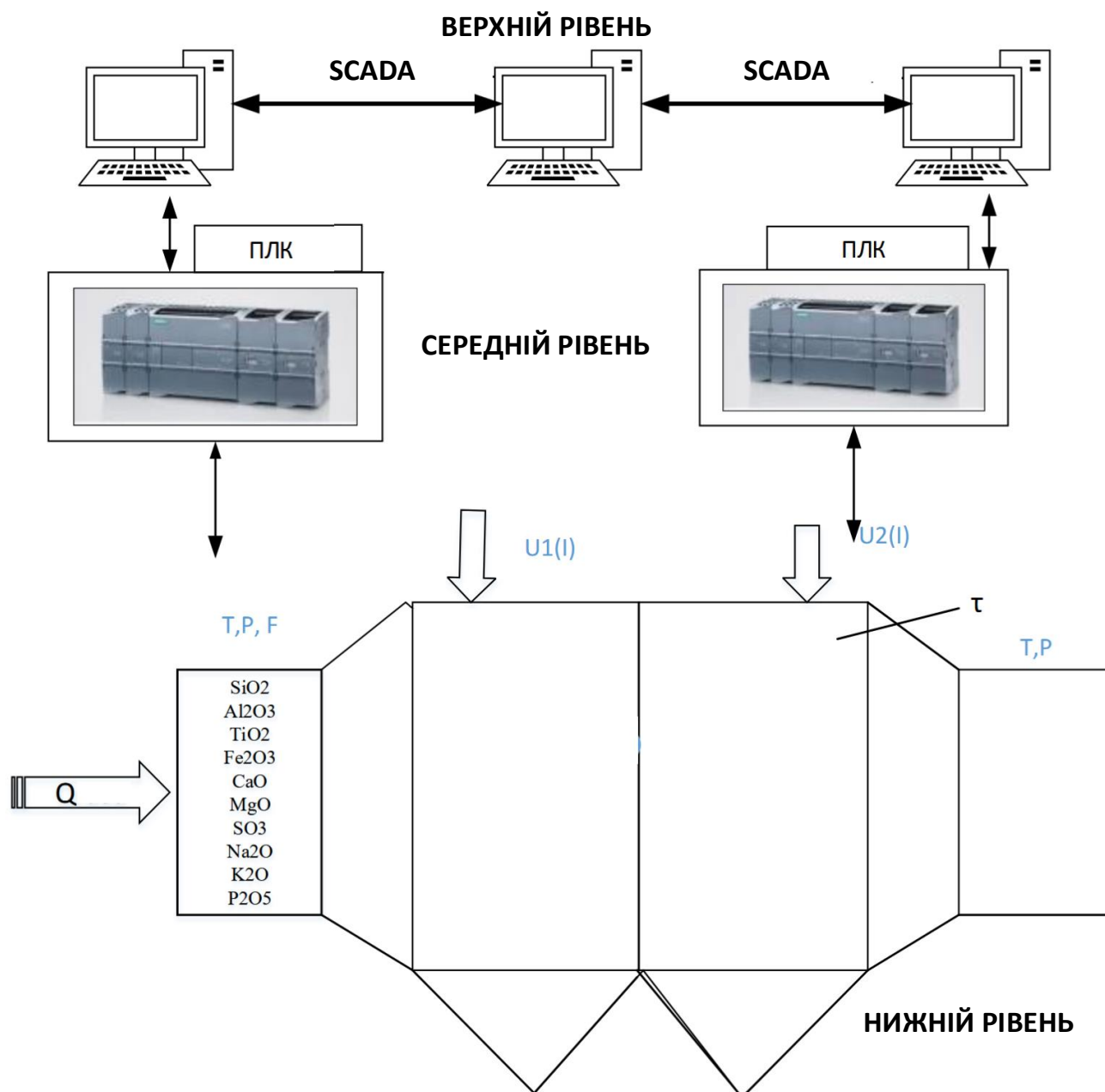


Рис. 4.1. Архітектура автоматизованої системи керування сухим електрофільтром

Середній рівень виконує функцію інтелектуального центру обробки даних, що реалізується через програмовані логічні контролери типу Siemens S7–1200 [15]. Контролери здійснюють обробку інформації, формують реакцію на динамічні

зміни процесу електрофільтрації, визначають необхідні регульовальні дії та забезпечують обмін даними між різними сегментами системи. На цьому рівні відтворюється логіка алгоритмів керування, реалізується підтримання електротехнічних режимів фільтра, а також формується взаємодія з верхнім рівнем через промислові протоколи Profinet, Modbus TCP та OPC UA, що гарантує високу швидкість і надійність передачі інформації та інтеграцію з іншими технологічними комплексами.

Верхній рівень архітектури представлений SCADA–системами таких типів, як WinCC, Ignition або AVEVA System Platform, що забезпечують операторам повний огляд стану технологічного процесу, передбачають можливість візуального контролю за параметрами та створюють єдиний інформаційний простір для аналітичної роботи. SCADA–рівень забезпечує накопичення, зберігання та обробку даних у базах реального часу, що дозволяє проводити детальний ретроспективний аналіз, виявляти відхилення та прогнозувати поведінку системи в умовах змін робочих характеристик. Оператор отримує доступ до всіх функцій керування через автоматизоване робоче місце, що формує інтерфейс взаємодії людини з технологічним об'єктом та забезпечує виявлення нештатних ситуацій.

4.2. Формування вхідних і вихідних сигналів

У контексті побудови автоматизованої системи керування сухим електрофільтром важливим аспектом є формування повного набору вхідних і вихідних сигналів, які забезпечують узгоджену роботу всіх технологічних підсистем. Мовиться про інформаційний обмін між датчиками, виконавчими механізмами та контролерами, що створює умови для безперервної оцінки стану електрофільтра та реалізації керувальних дій відповідно до алгоритмів регулювання. Якісне опрацювання цих сигналів дає змогу підтримувати технологічну стабільність процесу електрофільтрації, підвищуючи ефективність осадження частинок і забезпечуючи безпечну експлуатацію обладнання.

Вхідні сигнали формують основу інформаційного середовища, оскільки саме

вони відображають реальні параметри технологічного процесу. Значення температури і тиску газового середовища визначають умови руху газового потоку та впливають на інтенсивність коронного розряду. Показники електричної напруженості є віддзеркаленням стану електричного поля між коронуючими та осаджувальними електродами, а зміни концентрації частинок у газі дозволяють оцінювати ступінь запиленості та визначати, наскільки ефективно працює система осадження. Такі параметри постійно контролюються датчиками, що забезпечує високу точність вимірювань і дозволяє контролеру вчасно реагувати на зміну режимів роботи.

Вихідні сигнали є результатом оброблення вхідної інформації та реалізації логіки керування. Вони спрямовуються до фізичних виконавчих пристроїв, які забезпечують необхідні технологічні дії. Система струшування електродів працює для видалення накопичених частинок із поверхонь осаджувальних пластин, що запобігає зниженню ефективності очищення. Елементи заземлення виконують функцію стабілізації електричного потенціалу та захисту від перенапруг, що сприяє надійності електротехнічної частини фільтра. Система продувки керується сигналами контролера для формування заданих режимів очищення поверхонь, а керування подачею напруги забезпечує оптимальний рівень коронного розряду, необхідний для ефективного заряджання та осадження частинок.

Для забезпечення результативної роботи автоматизованої системи керування електрофільтром необхідно сформувати повний та структурно узгоджений комплекс вхідних і вихідних сигналів, які відображають стан технологічного процесу та визначають керувальні дії на виконавчі елементи. Така інформаційна структура формує основу для точного моніторингу параметрів газового середовища, стану електричного поля та роботи електромеханічних вузлів, забезпечуючи можливість адаптивного регулювання режимів електрофільтрації. Вхідні сигнали є джерелом оперативних даних про умови роботи, тоді як вихідні сигнали реалізують логічні рішення, сформовані контролером у процесі обробки інформації.

У межах системи значну роль відіграють аналогові вхідні сигнали (таблиця

4.1), що надходять від датчиків температури газового потоку, тиску в камері електрофільтра, струму високовольтного трансформатора та напруги між електродами. Ці показники визначають фізичні умови, у яких відбувається заряджання та осадження частинок, і дозволяють контролеру підтримувати стабільність електротехнічного режиму, запобігаючи небезпечним коливанням коронного розряду. Дискретні входи відображають стан допоміжного обладнання, серед якого аварійні сигнали від вентилятора та інформація про режим роботи механізму струшування, що має важливе значення для своєчасного видалення шару осаджених частинок з електродів.

Таблиця 4.1

Датчики та вхідні сигнали (AI, DI)

№	Тип сигналу	Опис	Модуль
1	AI (4–20 мА)	Температура газу на вході	AI 4xI
2	AI (4–20 мА)	Температура газу на виході	AI 4xI
3	AI (4–20 мА)	Тиск газу в камері	AI 4xI
4	AI (4–20 мА)	Струм високовольтного трансформатора	AI 4xI
5	AI (0–10 В)	Напруга на електродах	AI 4xV
6	DI (24 В)	Аварійний сигнал вентилятора	DI 8xDC
7	DI (24 В)	Стан роботи механізму струшування	DI 8xDC

Вихідні сигнали формують керувальний комплекс (таблиця 4.2), який визначає реакцію системи на відхилення та зміни параметрів процесу. Дискретні виходи активують або деактивують виконавчі механізми, зокрема систему струшування та клапани продувки, що забезпечує підтримання чистоти електродів і стабільність їх електричних характеристик. Аналогові виходи формують керування потужністю високовольтного трансформатора, визначаючи значення струму і напруги, які забезпечують оптимальний рівень коронного розряду та

максимальну ефективність осадження частинок.

Таблиця 4.2

Вихідні сигнали системи керування

№	Тип сигналу	Опис	№
1	DO (24 В)	Керування механізмом струшування	1
2	DO (24 В)	Команда на відкриття клапана продувки	2
3	АО (4–20 мА)	Регулювання потужності високовольтного трансформатора	3

Інформація, подана у таблицях, формує структурований опис вхідних та вихідних сигналів, що використовуються системою. Вхідні сигнали охоплюють вимірювання температури газів на вході та виході, параметри тиску, струму та напруги, а також дискретні повідомлення про технічний стан вузлів. Вихідні сигнали включають керування механізмами струшування, відкриттям клапанів продувки та регулюванням потужності трансформатора. Такий склад сигналів дозволяє системі працювати не лише в автоматичному режимі, але й забезпечує можливість напівавтоматичного управління, що є важливим для контролю процесу оператором у випадку нестандартних ситуацій або необхідності технологічного обслуговування.

4.3. SCADA–система та її функціональні можливості

SCADA–система є комплексним програмним забезпеченням, що забезпечує централізований моніторинг, контроль та аналітичну обробку технологічних процесів у складі автоматизованої системи управління сухим електрофільтром. Вона надає оператору широкі можливості для візуалізації процесів, включаючи інтерактивні мнемосхеми, анімацію та графічні тренди, що дозволяє здійснювати постійний контроль параметрів роботи електрофільтра в режимі реального часу та

оперативно реагувати на будь-які відхилення від заданих режимів.

Одним із важливих функціональних компонентів SCADA є модуль моніторингу технологічних параметрів, який забезпечує реєстрацію, аналіз та прогнозування таких показників, як температура та тиск газового потоку, напруженість електричного поля, концентрація пилових частинок та рівень осаду в камері електрофільтра. Передача даних від польових пристроїв до SCADA здійснюється за допомогою промислових протоколів OPC UA, Profinet та Modbus TCP, що гарантує високу швидкість обміну інформацією та надійність функціонування системи навіть у разі виникнення позаштатних ситуацій.

SCADA-система також автоматизує формування звітності щодо концентрації частинок та ефективності роботи газоочисного обладнання, що дозволяє проводити комплексний аналіз продуктивності установки, виявляти технологічні вузькі місця та приймати рішення щодо підвищення ефективності очищення газових потоків. Крім того, до складу системи входить модуль сигналізації та оповіщення, який миттєво повідомляє про критичні ситуації, такі як перевищення допустимих концентрацій шкідливих речовин, аварійні відмови обладнання або порушення електричних параметрів.

Не менш важливою функцією SCADA є архівація технологічних даних, що забезпечує довготривале зберігання інформації про роботу системи, можливість ретроспективного аналізу, виявлення закономірностей зміни параметрів процесу та прогнозування потенційних відмов обладнання. Інтеграція SCADA з ERP/MES-рівнями підприємства сприяє оптимізації управління ресурсами, автоматизації процесів звітності та підвищенню ефективності планування виробництва.

Мнемосхема, розроблена у середовищі WinCC RT Professional в TIA Portal V18, демонструє можливість інтеграції з комплексними SCADA-системами для подальшого моніторингу, аналізу даних та оптимізації процесів очищення газів. Такий підхід суттєво підвищує рівень автоматизації та мінімізує необхідність ручного втручання в управління технологічним процесом [16].

Мнемосхема призначена для управління процесом очистки газів, надаючи оператору можливість у реальному часі контролювати стан фільтрів,

налаштовувати параметри роботи вентиляторів і клапанів, а також оцінювати продуктивність системи. Завдяки інтеграції SCADA WinCC RT Professional у загальну систему моніторингу підприємства забезпечується високий рівень координації процесів, а використання TIA Portal V18 дозволяє автоматизувати операції, оптимізувати енергоспоживання та підвищити екологічну безпеку виробництва.

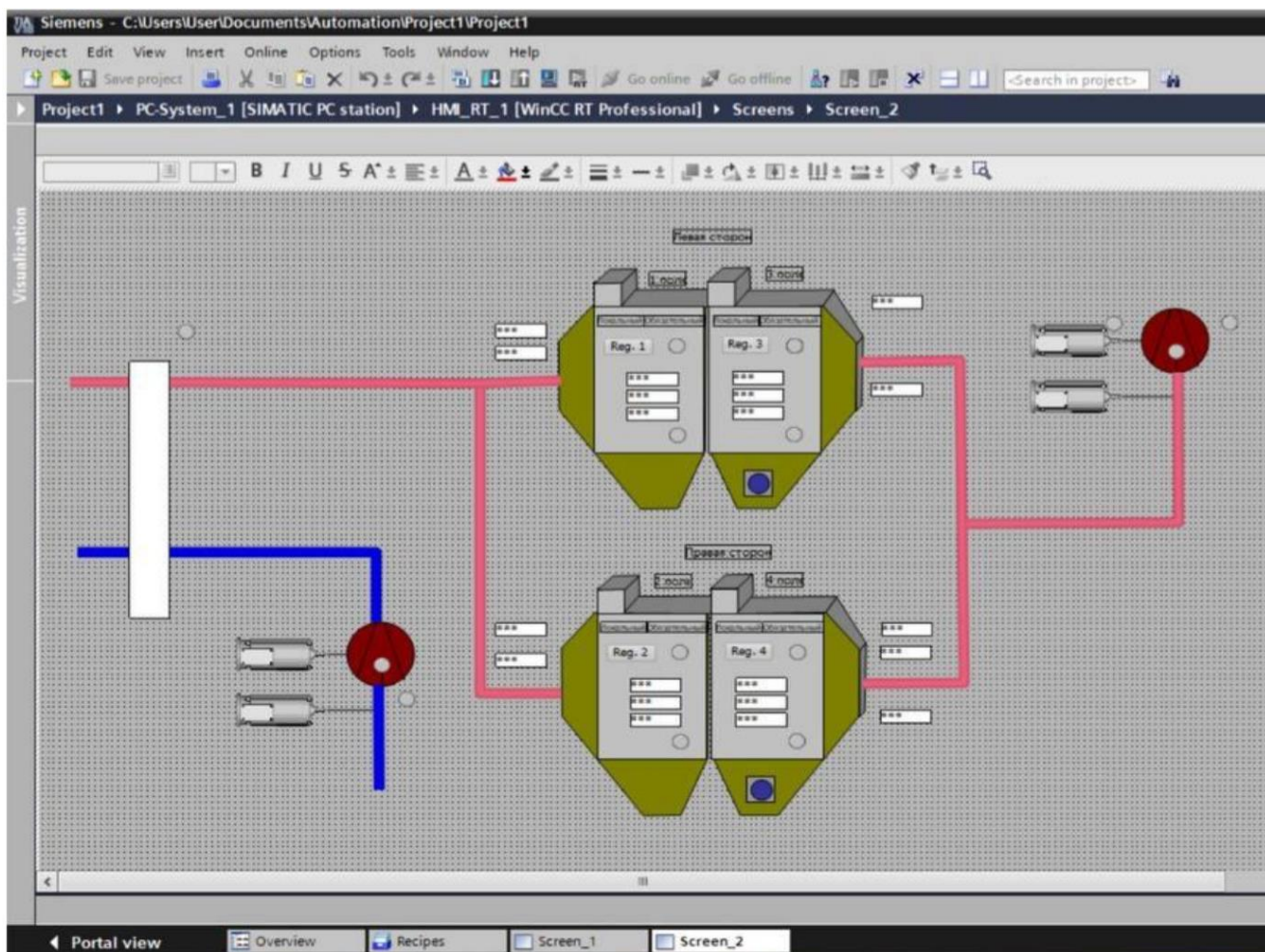


Рис. 4.2. Мнемосхема SCADA–системами для подальшого моніторингу, аналізу даних та оптимізації процесів очищення газів.

Представлена мнемосхема, створена в середовищі TIA Portal з використанням WinCC RT Professional, відображає візуалізацію процесу очищення газу та функціонування електрофільтра. Таке графічне подання технологічних

даних підкреслює значення наочності для оператора, забезпечуючи інтуїтивно зрозуміле управління системою. Мнемосхеми дозволяють не лише відслідковувати поточний стан обладнання та параметри газових потоків, а й оперативно реагувати на відхилення від заданих режимів, коригувати роботу вентиляторів, клапанів і системи напруги електродів, що підвищує ефективність очищення та стабільність роботи електрофільтра. Крім того, інтеграція мнемосхем у SCADA–систему сприяє комплексному аналізу процесів, автоматичному формуванню звітності та оптимізації виробничих операцій на рівні підприємства.

Висновки до розділу 4

У цьому розділі було розглянуто будову та функціональні можливості автоматизованої системи управління сухим електрофільтром, зокрема трирівневу архітектуру, що включає полеву автоматику, програмовані логічні контролери та SCADA–систему. Було детально охарактеризовано вхідні та вихідні сигнали системи, що забезпечують ефективне управління процесами осадження часток та регулювання параметрів електрофільтра.

Особлива увага приділялася SCADA–системі та її функціональним компонентам, які дозволяють здійснювати моніторинг, архівацію та аналіз технологічних параметрів, автоматизоване формування звітності, сигналізацію та оповіщення про критичні ситуації. Мнемосхеми, створені у середовищі TIA Portal, демонструють наочне представлення процесу очистки газів і функціонування електрофільтра, забезпечуючи інтуїтивне управління та оперативне реагування на відхилення від нормального режиму.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У магістерській роботі проведено дослідження процесу розробки інтелектуальної системи управління електрофільтром на основі нечіткої логіки, що забезпечує автоматизоване регулювання процесу електрофільтрації та забезпечує високу ефективність очищення газових потоків за різноманітних виробничих умов, одночасно підвищуючи стабільність роботи та енергоефективність системи.

У першому розділі магістерської роботи було представлено системний аналіз фізичних процесів, конструктивних рішень і функціонування електрофільтрів, що застосовуються для очищення промислових газів від твердих частинок. Розглянуто формування електричного поля в багатопольових установках, механізм коронного розряду, зарядження частинок та їхнє переміщення до осаджувальних електродів. Показано, що неоднорідність поля та специфіка іонізаційних процесів визначають ефективність осадження пилу. Проаналізовано принципи організації газорозподілу, роботу високовольтних перетворювачів і конструкцію електродних систем. Підкреслено, що електрофільтр виступає складним багатовимірним, нестационарним і стохастичним об'єктом керування, що ускладнює забезпечення стабільної ефективності очищення. Оцінка існуючих систем автоматизації дала можливість виокремити напрями підвищення ефективності процесу: оптимізацію газорозподілу між паралельними секціями, керування електричним режимом та вдосконалення процесів видалення пилу з електродів. На основі цього сформульовано завдання дослідження, що охоплюють побудову математичної моделі багатозв'язного об'єкта, розробку нечітких моделей керування та врахування впливу хімічного складу газів при використанні біопалива.

У другому розділі магістерської роботи було проведено детальний аналіз та синтез багатовимірної багатозв'язної автоматизованої системи керування розподілом газів по електрофільтрах. Було розглянуто структуру системи, побудову схем та математичних моделей, що описують динаміку та взаємозв'язки між підсистемами. Проведено аналіз роботи системи без регуляторів, що дозволило

виявити природні перехідні процеси, коливання та помилки розбалансування, підкресливши необхідність впровадження керуючих пристроїв для стабілізації та підвищення точності роботи. Далі здійснено налаштування ПД–регуляторів для ізольованих підсистем, що забезпечило оптимальні характеристики перехідних процесів на рівні окремих об’єктів. Після введення взаємозв’язків між підсистемами проведено компенсацію їхнього впливу, що дозволило підвищити стабільність, усунути коливання та забезпечити точне досягнення заданих значень параметрів. Було підтверджено, що МІМО–система керування забезпечує ефективно одночасне керування кількома параметрами, враховує взаємозалежності між входами та виходами, підвищує точність, зменшує енергоспоживання та подовжує термін служби обладнання.

У третьому розділі магістерської роботи було здійснено комплексний підхід до побудови нечіткої системи керування електрофільтром, що охоплює всі етапи формування універсальних множин, побудови функцій належності, створення бази правил та інтеграції цих компонентів у єдину керуючу структуру. Проведено детальний аналіз параметрів електрорежиму для першого, другого та третього полів, що дало можливість сформулювати лінгвістичні змінні і забезпечити адекватне відображення реальних технологічних характеристик у межах моделі. Сформовані функції належності відтворюють властиві процесу невизначеність та неповноту інформації, а побудовані нечіткі правила дозволяють реалізувати інтелектуальний механізм прийняття рішень у змінних умовах експлуатації. Розроблена система продемонструвала здатність адаптуватися до коливань параметрів електрофільтра та забезпечувати відповідну корекцію управляючих сигналів. Тестування моделі підтвердило ефективність підходу, що створює умови для подальшої оптимізації функцій належності та структури правил, спрямованої на підвищення точності регулювання. Здійснена інтеграція нечітких моделей для різних полів електрорежиму формує узгоджену систему керування, яка підсилює стабільність та ефективність процесу електрофільтрації.

У четвертому розділі магістерської роботи було розглянуто будову та функціональні можливості автоматизованої системи управління сухим

електрофільтром, зокрема трирівневу архітектуру, що включає полеву автоматику, програмовані логічні контролери та SCADA–систему. Було детально охарактеризовано вхідні та вихідні сигнали системи, що забезпечують ефективне управління процесами осадження часток та регулювання параметрів електрофільтра. Особлива увага приділялася SCADA–системі та її функціональним компонентам, які дозволяють здійснювати моніторинг, архівацію та аналіз технологічних параметрів, автоматизоване формування звітності, сигналізацію та оповіщення про критичні ситуації. Мнемосхеми, створені у середовищі TIA Portal, демонструють наочне представлення процесу очистки газів і функціонування електрофільтра, забезпечуючи інтуїтивне управління та оперативне реагування на відхилення від нормального режиму.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Теорія автоматичного керування [Текст] : підручник Для студ. вищ. техн. закладів освіти / М. Г. Попович, О. В. Ковальчук. – К.: Либідь, 1997. – 543 с.
2. Лю, Дж., Цзян, Т., Лі, Х., Ван, Чж.–Л. Triboelectric filtering for air purification / Nanotechnology. – 2019. – Т. 30, № 29. – Стаття 292001. – DOI: 10.1088/1361-6528/ab0e34.
3. Апарати сухого очищення газів : навчальний посібник [Електронний ресурс] / за ред. – Харків : ХНАГХ, 2013. – 15 с. – URL: <https://k.twirpx.link/file/836865/>
4. Gr Z., Войцік В., Громашек К., Котира А., Смаїлова С., Єралієва Б., Кумаргажанова С., Іманбек Б. Application of Fuzzy Neural Networks in Combustion Process Diagnostics // Energies. – 2024. – Т. 17, № 1. – Ст. 212. – DOI: 10.3390/en17010212. – URL: <https://doi.org/10.3390/en17010212>
5. Kalashnikova V., Kotyra A., Mamyrbayev O. Colorimetric parameters modeling of test micro–ecosystems for lands pollution remote sensing // Journal of Ecological Engineering. – 2021. – Лют. – DOI: 10.12911/22998993/130889. – URL: <https://doi.org/10.12911/22998993/130889>
6. Kotyra A., Bazil G., Wójcik W. Biomass co–combustion characterization based on analysis of flame image sequence // 8th International Conference “New Electrical and Electronic Technologies and their Industrial Implementation” (NEET 2013), Zakopane, Poland, June 18–21, 2014. – ISBN 978–83–63569–49–5.
7. Kotyra A., Wójcik W., Zhussupbekov S. Identification of biomass co–combustion operating point using image processing // Proc. of SPIE. – 2014. – Vol. 9291 : 13th International Scientific Conference on Optical Sensors and Electronic Sensors / Eds. J. Golebiowski, R. Gozdur. – Art. 929108. – DOI: 10.1117/12.2077741.
8. Kotyra A., Wójcik W., Zhussupbekov S. Application of fiber optic flame monitoring system for estimation burner input parameters // Proc. of SPIE. – 2014. – Vol. 9228 : Optical Fibers and Their Applications / Eds. J. Dorosz, R. S. Romaniuk. – Art. 922800.

9. Iskakova A. M., Kotyra A., Wójcik W., Zhussupbekov S. Application of fiber optic flame monitoring system for estimation burner input parameters // *Optical Fibers and Their Applications*. – 2014. – Proc. of SPIE, Vol. 9228. – DOI: 10.1117/12.2077741.
10. Gromaszek K., Wójcik W., Kotyra A., Shegebayeva Zh., Imanbek B. Modelling and analysis of electrostatic precipitator (ESP) in combustion process // *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)*. – NEET 2015, Zakopane.
11. Попієль П., Войцик В. Оптичне вимірювання вмісту паливних часток у попелі й шлаку : дис. докт. / Політехніка Любелська. – Люблін, 2014. – 127 с.
12. Войцик В., Попієль П., Лавінський Т. Аналіз вмісту горючої золи в попелі й шлаку шляхом спільного спалювання біомаси з вугільним пилом / Польська екологічна інженерія через п'ять років після вступу до ЄС. – Люблін : Комітет Польської академії наук, Екологічна інженерія, Т. 3, 2009. – С. 273-278.
13. Zadeh L.A. *Fuzzy Sets and Systems*. – New York: Academic Press, 1975. – 403 p.
14. Skogestad S., Postlethwaite I. *Multivariable Feedback Control: Analysis and Design*. – 2nd ed. – Chichester: Wiley, 2005. – 592 p.
15. Siemens AG. SIMATIC S7–1200 Easy Book : manual / Siemens AG. – 01/2015. – A5E02486774–AG. – URL: https://support.industry.siemens.com/cs/attachments/39710145/s71200_easy_book_en-US_en-US.pdf
16. Siemens AG. Totally Integrated Automation Portal (TIA Portal) – програмне забезпечення для автоматизації / Siemens AG. – Siemens, без дати випуску. – URL: <https://www.siemens.com/ua/uk/produkty/avtomatyzatsiya-promyslovosti/prohramne-zabezpechennya-dlya-avtomatyzatsiyi/tia-portal.html>