

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біометричної інженерії
(повна назва)

Кафедра Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

**СИСТЕМИ ФІЛЬТРАЦІЇ РІДИНИ НА ПІДПРИЄМСТВІ ЗА ДОПОМОГОЮ
СУЧАСНОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ**
(тема)

Виконав:

Студент 4 курсу, групи ЕЕПС-21-1
Петков І. В.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 171 Електроніка
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма «Електронні пристрої та системи»
(повна назва освітньої програми)

Керівник доцент Галат О.Б.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри _____
(підпис)

Бондаренко І.М.
(прізвище, ініціали)

2025 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ Електронної та біомедичної інженерії _____

Кафедра _____ Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв _____

Рівень вищої освіти _____ перший (бакалаврський) _____

Спеціальність _____ 171 Електроніка _____

(код і повна назва)

Тип програми _____ освітньо-професійна _____

Освітня програма _____ «Електронні пристрої та системи» _____

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

« _____ » _____ 20 ____ р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові _____ Петкову Іллі Віталійовичу _____

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи СИСТЕМИ ФІЛЬТРАЦІЇ РІДИНИ НА ПІДПРИЄМСТВІ ЗА ДОПОМОГОЮ СУЧАСНОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ

_____ затверджена наказом по університету від 26.05.2025 р. № 415Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 07_06_2025 р.

3. Вихідні дані до роботи:

3.1 Методи фільтрації – механічна, баромембранна, електрохімічна.

3.2 Тип системи – автоматизований комплекс на базі програмованих логічних контролерів.

3.3 Датчики моніторингу – турбідиметричні, кондуктометричні, ультразвукові, рН-метричні.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі.

4.1. Проаналізувати сучасні методи фільтрації рідин у промислових умовах.

4.2. Дослідити електронні системи моніторингу та контролю якості технологічних рідин.

4.3. Розробити структурну схему електронної системи фільтрації з обґрунтуванням вибору компонентів.

4.4. Оцінити економічну ефективність впровадження електронних систем фільтрації.

4.5. Запропонувати перспективні технології для вдосконалення процесів фільтрації на підприємстві.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри) Презентація 15 слайдів.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № | Назва етапів роботи | Терміни виконання етапів роботи | Примітка |
|---|--|---------------------------------|----------|
| 1 | Аналіз технічного завдання | 07.05.2025 | |
| 2 | Аналітичний огляд джерел | 15.05.2025 | |
| 3 | Систематизація джерел, обробка теоретичної інформації | 25.05.2025 | |
| 4 | Дослідження наукових робіт у даній темі. Виконання розрахунків | 01.06.2025 | |
| 5 | Оформлення пояснювальної записки | 05.06.2025 | |
| 7 | Підготовка презентації | 06.06.2025 | |
| 8 | Здача роботи на кафедру | 07.06.2025 | |
| | | | |

Дата видачі завдання 07 05 2025 р.

Студент _____



(підпис)

Керівник роботи _____

(підпис)

доцент Галат О.Б

(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи: 59 сторінок, 5 рисунків, 8 таблиць.

ЕЛЕКТРОННА СИСТЕМА ФІЛЬТРАЦІЇ, АВТОМАТИЗАЦІЯ, КОНТРОЛЬ ЯКОСТІ, ДАТЧИК, SCADA, ІОТ-ТЕХНОЛОГІЯ, ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ, НОРМАТИВНА БАЗА

Об'єкт дослідження – процеси фільтрації рідини на промислових підприємствах з використанням електронних систем контролю та управління.

Мета роботи – дослідити теоретичні основи та практичні аспекти застосування електронних систем фільтрації рідини на промислових підприємствах, визначити оптимальні технічні рішення для автоматизації процесів очищення та розробити рекомендації щодо впровадження сучасних технологій фільтрації.

Метод – теоретичний та експериментальний аналіз.

Актуальність: Електронні системи фільтрації є критично важливими для сучасної промисловості, забезпечуючи високу якість очищення рідин при оптимальному споживанні енергоресурсів. Автоматизація процесів фільтрації дозволяє досягти стабільних показників якості продукції, знизити експлуатаційні витрати та забезпечити відповідність екологічним нормативам.

У роботі проаналізовано сучасні методи фільтрації рідини в промисловості, технічні характеристики датчиків моніторингу параметрів рідини, розглянуто архітектуру автоматизованих систем керування на базі ПЛК, SCADA-систем та промислових мереж. Досліджено можливості інтеграції ІоТ-технологій. Розроблено структурну схему електронної системи фільтрації рідини з семирівневою ієрархічною архітектурою. Проведено техніко-економічний аналіз ефективності впровадження автоматизованих систем.

ABSTRACT

Explanatory note to the qualification work: 59 pages, 5 drawings, 8 tables.

ELECTRONIC FILTRATION SYSTEMS, AUTOMATION, QUALITY CONTROL, SENSORS, PLC, SCADA, IoT TECHNOLOGIES, ECONOMIC EFFICIENCY, REGULATORY FRAMEWORK

Object of research – liquid filtration processes at industrial enterprises using electronic control and management systems.

Purpose of work – to investigate theoretical foundations and practical aspects of electronic liquid filtration systems application at industrial enterprises, determine optimal technical solutions for cleaning process automation and develop recommendations for implementing modern filtration technologies.

Method – theoretical and experimental analysis.

Relevance: Electronic filtration systems are critically important for modern industry, ensuring high quality liquid cleaning with optimal energy consumption. Filtration process automation allows achieving stable product quality indicators, reducing operational costs and ensuring compliance with environmental standards. Integration of IoT technologies, artificial intelligence systems and predictive analytics opens new opportunities for technological process optimization and enterprise competitiveness enhancement.

The work analyzes modern liquid filtration methods in industry, technical characteristics of liquid parameter monitoring sensors, the architecture of automated control systems based on PLCs, SCADA systems and industrial networks. Possibilities of IoT technology integration are investigated.

A structural scheme of electronic liquid filtration system with seven-level hierarchical architecture is developed. Technical-economic analysis of automated systems implementation efficiency is conducted.

ЗМІСТ

| | |
|---|--|
| ВСТУП..... | 7 |
| РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ СИСТЕМ ФІЛЬТРАЦІЇ РІДИНИ..... | 11 |
| 1.1 Аналіз сучасних методів фільтрації рідини в промисловості | 9 |
| 1.2 Класифікація електронних систем контролю якості рідин | 12 |
| 1.3 Нормативно-правова база експлуатації систем фільтрації на підприємствах України | 16 |
| РОЗДІЛ 2 ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТА КОМПОНЕНТИ ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ ФІЛЬТРАЦІЇ | 19 |
| 2.1 Датчики та сенсори для моніторингу параметрів рідини | 19 |
| 2.2 Автоматизовані системи керування процесом фільтрації | 27 |
| 2.3 Інтеграція IoT-технологій у системи фільтрації рідини | 33 |
| РОЗДІЛ 3 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ ФІЛЬТРАЦІЇ НА ПІДПРИЄМСТВІ..... | 39 |
| 3.1 Розробка структурної схеми електронної системи фільтрації | 39 |
| 3.2 Економічна ефективність впровадження автоматизованої системи фільтрації рідини..... | 47 |
| 3.3 Перспективи вдосконалення та оптимізації системи фільтрації | 49 |
| ВИСНОВКИ..... | 54 |
| ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ..... | Ошибка! Закладка не определена. |
| Додаток А | 63 |
| Додаток В | 63 |

ВСТУП

Сучасна промисловість характеризується постійним зростанням вимог до якості технологічних рідин та стічних вод, що обумовлює необхідність впровадження ефективних систем фільтрації. Розвиток технологій виробництва супроводжується ускладненням складу промислових стоків та підвищенням концентрації забруднюючих речовин, що створює потребу у застосуванні сучасних методів очищення. Традиційні системи фільтрації не завжди забезпечують необхідний рівень очищення для відповідності екологічним нормативам та технологічним вимогам виробництва.

Електронізація процесів фільтрації відкриває нові можливості для підвищення ефективності очищення рідин та автоматизації технологічних операцій. Застосування мікропроцесорної техніки дозволяє реалізувати складні алгоритми управління фільтрувальними установками з урахуванням змінних параметрів вхідної сировини. Інтеграція датчиків якості рідини з системами автоматичного регулювання забезпечує оптимізацію режимів роботи обладнання та зниження витрат на експлуатацію.

Економічні аспекти експлуатації систем фільтрації набувають особливого значення в умовах зростання вартості енергоресурсів та посилення екологічних вимог. Впровадження електронних систем контролю дозволяє знизити споживання електроенергії, оптимізувати витрати фільтрувальних матеріалів та реагентів, скоротити простой обладнання через автоматичне діагностування несправностей. Економічна ефективність сучасних систем фільтрації визначається не лише капітальними витратами, але й експлуатаційними показниками протягом всього життєвого циклу обладнання.

Екологічні вимоги до промислових підприємств постійно посилюються, що обумовлює необхідність модернізації існуючих систем очищення стічних вод. Гармонізація українського законодавства з європейськими стандартами встановлює нові нормативи якості очищених стоків та питної води. Електронні

системи моніторингу забезпечують безперервний контроль відповідності параметрів очищеної рідини встановленим нормативам та автоматичне документування результатів аналізу.

Технологічний прогрес у галузі електроніки створює передумови для розробки інтелектуальних систем фільтрації з функціями самодіагностики та адаптивного управління. Застосування штучного інтелекту та машинного навчання дозволяє прогнозувати зміни якості вхідної сировини та превентивно корегувати параметри процесу фільтрації. Розвиток Інтернету речей відкриває можливості для дистанційного моніторингу та управління системами очищення на географічно розподілених об'єктах.

Інтеграція різних методів фільтрації у комплексні системи очищення потребує створення уніфікованих електронних платформ управління. Сучасні підприємства прагнуть до впровадження цифрових технологій для підвищення ефективності виробництва та зниження впливу на навколишнє середовище. Розробка інноваційних рішень у сфері електронних систем фільтрації відповідає стратегічним напрямкам розвитку промисловості та забезпечує конкурентні переваги підприємств.

Мета роботи – дослідити теоретичні основи та практичні аспекти застосування електронних систем фільтрації рідини на промислових підприємствах, визначити оптимальні технічні рішення для автоматизації процесів очищення та розробити рекомендації щодо впровадження сучасних технологій фільтрації.

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ СИСТЕМ ФІЛЬТРАЦІЇ РІДИНИ

1.1 Аналіз сучасних методів фільтрації рідини в промисловості

Сучасні промислові системи фільтрації рідини характеризуються високим рівнем технологічної складності та різноманітністю методів очищення. Фільтрація рідини являє собою процес розділення неоднорідних систем, що містять тверді частинки, колоїдні речовини або інші домішки, шляхом пропускання через пористе середовище. Процес фільтрації базується на принципі селективного затримання забруднюючих речовин на поверхні або в товщі фільтрувального матеріалу при збереженні проникності для очищуваної рідини [1 – 11].

Механічна фільтрація залишається найпоширенішим методом первинного очищення промислових рідин. Даний процес здійснюється за рахунок різниці розмірів пор фільтрувального матеріалу та забруднюючих частинок. Ефективність механічної фільтрації визначається структурою пористого середовища, швидкістю потоку та фізико-хімічними властивостями очищуваної рідини. Механізм затримання частинок включає ситове просіювання, адгезію та коагуляцію на поверхні фільтра.

Баромембранні процеси представляють собою сучасну технологію фільтрації, що базується на застосуванні напівпроникних мембран під дією трансмембранного тиску. Мікрофільтрація, ультрафільтрація, нанофільтрація та зворотний осмос становлять градацію баромембранних методів залежно від розміру пор мембран. Застосування баромембранних технологій дозволяє досягти високого ступеня очищення рідин від молекулярних забруднень та забезпечити селективне розділення компонентів.

Електрохімічні методи фільтрації застосовуються для видалення іонних забруднень та важких металів з промислових стоків. Електрокоагуляція, електрофлотація та електродіаліз базуються на використанні електричного поля

для інтенсифікації процесів очищення. Механізм дії електрохімічних методів полягає у зміні заряду частинок забруднень, що сприяє їх агрегації та подальшому видаленню з рідкої фази [4].

Адсорбційна фільтрація використовує здатність пористих матеріалів поглинати забруднюючі речовини на своїй поверхні. Активоване вугілля, цеоліти та синтетичні адсорбенти забезпечують ефективне видалення органічних сполук, барвників та ароматичних речовин. Процес адсорбції характеризується високою селективністю та можливістю регенерації адсорбційного матеріалу [8].

Рисунок 1.1 демонструє систематизовану структуру сучасних методів фільтрації рідини, що застосовуються в промислових умовах.

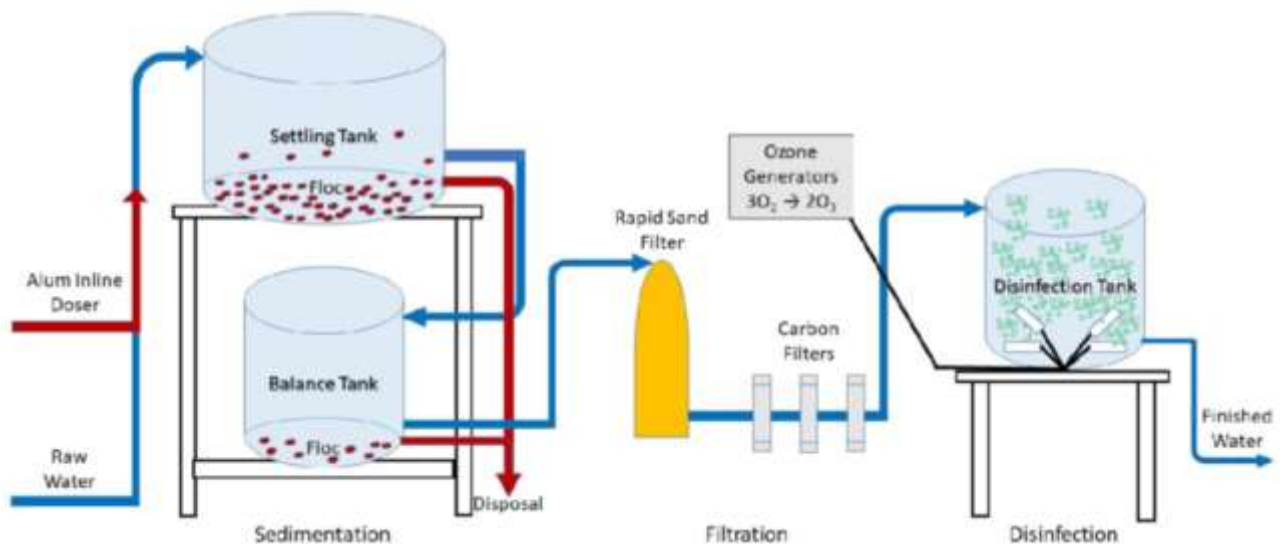


Рисунок 1.1 – Процес фільтрації рідини в промисловості

Схема відображає ієрархічну організацію технологій очищення, розподілених за принципами дії та механізмами відділення забруднень від рідкої фази. Верхній рівень схеми представляє загальну категорію промислової фільтрації, від якої відгалужуються основні технологічні напрями.

Механічна фільтрація на схемі займає центральне положення як найпоширеніший метод первинного очищення промислових рідин. Цей блок включає підкатегорії ситової фільтрації, глибинної фільтрації та поверхневої фільтрації, що базуються на різниці розмірів пор фільтрувального матеріалу та

забруднюючих частинок. Схема показує взаємозв'язок між різними типами механічних фільтрів та їх застосуванням залежно від характеру забруднень.

Баромембранні процеси представлені окремим блоком, що включає градацію методів від мікрофільтрації до зворотного осмосу. Схема відображає послідовність застосування мембранних технологій залежно від розміру молекул забруднень та необхідного ступеня очищення. Стрілки на діаграмі показують можливість комбінування різних мембранних процесів для досягнення максимальної ефективності очищення.

Електрохімічні та адсорбційні методи представлені паралельними блоками, що підкреслює їх специфічне застосування для видалення певних типів забруднень. Схема демонструє взаємодоповнюючий характер цих технологій та можливість їх інтеграції з механічними методами. Біологічна фільтрація займає окрему позицію як екологічно безпечний метод розкладання органічних забруднень.

Комбіновані системи на схемі представлені як результат інтеграції всіх вищезазначених методів у багатоступеневі технологічні комплекси. Схема показує можливості оптимізації процесів очищення шляхом послідовного або паралельного застосування різних технологій. Автоматизовані системи управління на діаграмі представлені як наскрізний елемент, що забезпечує координацію роботи всіх компонентів фільтрувальної установки.

Коагуляція та флокуляція становлять групу хімічних методів очищення рідин, що базуються на дестабілізації колоїдних систем. Застосування коагулянтів та флокулянтів призводить до об'єднання дрібних частинок у більші агрегати, які легше видаляються механічними методами. Ефективність процесу залежить від рН середовища, температури та концентрації реагентів.

Біологічна фільтрація використовує мікроорганізми для розкладання органічних забруднень у промислових стоках. Аеробні та анаеробні біореактори забезпечують трансформацію забруднюючих речовин у нешкідливі продукти. Біофільтри характеризуються високою ефективністю очищення від

біодеградабельних органічних сполук та відносно низькими експлуатаційними витратами.

Комбіновані системи фільтрації поєднують переваги різних методів очищення для досягнення максимальної ефективності. Багатоступенева фільтрація включає послідовне застосування механічних, хімічних та фізико-хімічних методів. Інтеграція різних технологій дозволяє оптимізувати процес очищення залежно від специфіки забруднень та вимог до якості очищеної рідини.

Автоматизовані системи фільтрації забезпечують безперервний контроль параметрів процесу та автоматичне регулювання режимів роботи обладнання. Сучасні системи включають датчики якості, програмовані логічні контролери та інтерфейси людина-машина для моніторингу та управління процесом фільтрації. Автоматизація дозволяє підвищити ефективність очищення, знизити витрати реагентів та забезпечити стабільність якості продукції [15, с. 95].

Тенденції розвитку промислової фільтрації спрямовані на створення енергоефективних технологій з мінімальним впливом на навколишнє середовище. Застосування нанотехнологій, розробка нових мембранних матеріалів та впровадження штучного інтелекту для оптимізації процесів визначають перспективи розвитку галузі. Інноваційні методи фільтрації характеризуються високою селективністю, низьким енергоспоживанням та можливістю регенерації фільтрувальних матеріалів.

1.2 Класифікація електронних систем контролю якості рідин

Електронні системи контролю якості рідин представляють собою комплекс технічних засобів, призначених для автоматичного визначення фізико-хімічних параметрів рідких середовищ у режимі реального часу. Система контролю якості рідин включає сенсори, перетворювачі сигналів, блоки обробки інформації та виконавчі пристрої, що забезпечують безперервний моніторинг та регулювання параметрів технологічного процесу. Класифікація електронних систем базується

на принципах вимірювання, типах контрольованих параметрів та сферах застосування.

Оптичні системи контролю використовують властивості світлового випромінювання для визначення якості рідин. Турбідиметри вимірюють каламутність рідини шляхом аналізу розсіяного світла, що дозволяє оцінити концентрацію зважених частинок. Колориметричні системи визначають інтенсивність забарвлення рідини у визначених діапазонах довжин хвиль, що корелює з концентрацією певних речовин. Спектрофотометричні аналізатори забезпечують детальний аналіз спектральних характеристик рідини для ідентифікації компонентів [16, с. 89].

На рисунку 1.2 відображено архітектуру електронної системи контролю якості рідин, організовану за принципом багаторівневої ієрархії обробки інформації.

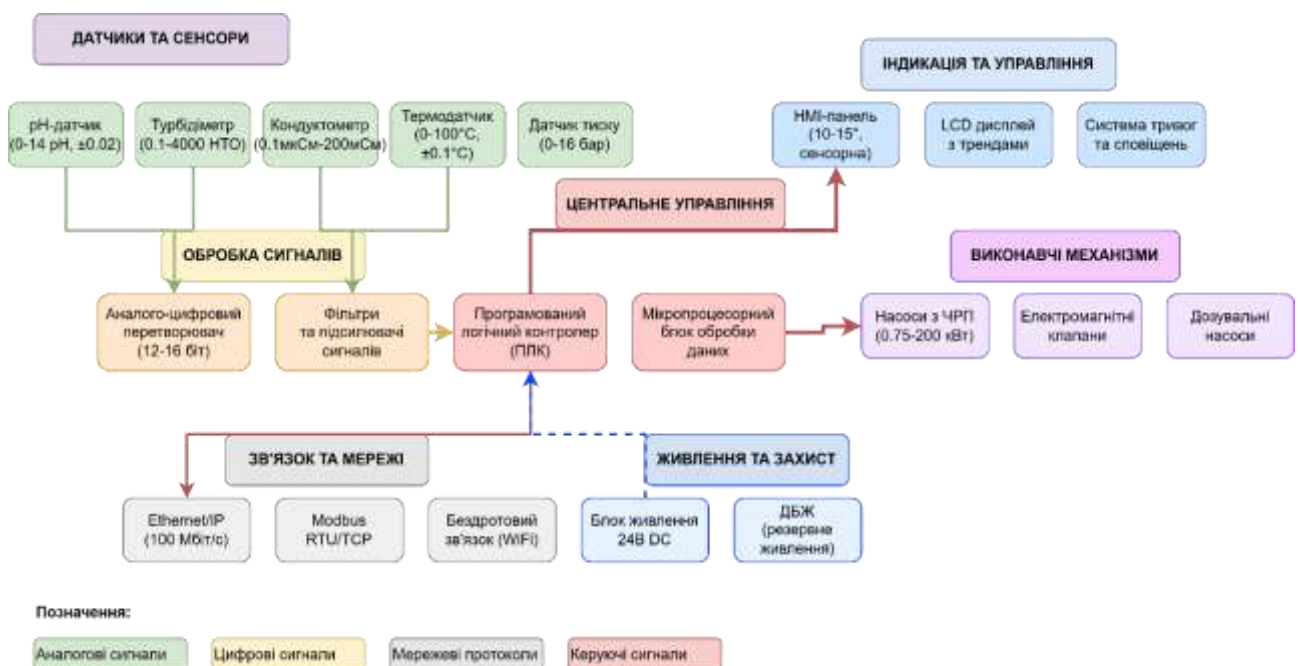


Рисунок 1.2 – Структурна схема електронної системи контролю якості рідини

Схема демонструє потоки даних від первинних сенсорів до систем прийняття рішень та управління технологічним процесом. Верхній рівень

представляє інтерфейси користувача та системи звітності, що забезпечують взаємодію операторів з автоматизованою системою контролю.

Рівень сенсорів на схемі включає різноманітні типи датчиків, згруповані за принципами вимірювання фізико-хімічних параметрів рідини. Оптичні системи контролю представлені блоком турбідиметрів, колориметрів та спектрофотометричних аналізаторів, що використовують властивості світлового випромінювання для оцінки якості рідини. Електрохімічні системи об'єднують кондуктометри, рН-метри та іоноселективні електроди для контролю електричних властивостей середовища.

Блок обробки сигналів на схемі представляє проміжний рівень перетворення аналогових сигналів від датчиків у цифровий формат для подальшої обробки. Аналого-цифрові перетворювачі забезпечують високу роздільну здатність та гальванічну ізоляцію каналів вимірювання. Системи фільтрації сигналів та лінеаризації характеристик датчиків підвищують точність та стабільність вимірювань у складних промислових умовах.

Центральний процесорний блок схеми представляє мікропроцесорні системи контролю, що інтегрують інформацію від множини датчиків та реалізують алгоритми аналізу якості рідини. Програмовані логічні контролери забезпечують обробку сигналів у режимі реального часу та формування керуючих впливів на виконавчі механізми. Системи збору та архівування даних створюють базу для статистичного аналізу тенденцій зміни якості продукції.

Комунікаційний рівень схеми забезпечує передачу даних між розподіленими компонентами системи через промислові мережі та бездротові технології. Телеметричні системи дозволяють здійснювати дистанційний моніторинг якості рідин на географічно розподілених об'єктах. Інтеграція з глобальними інформаційними мережами через Інтернет речей створює можливості для централізованого управління технологічними процесами на рівні підприємства.

Електрохімічні системи контролю базуються на вимірюванні електричних властивостей рідких середовищ. Кондуктометри визначають електропровідність

рідини, що відображає загальну концентрацію іонів у розчині. рН-метри вимірюють концентрацію іонів водню для контролю кислотно-лужного балансу технологічних рідин. Іоноселективні електроди забезпечують селективне визначення концентрації окремих іонів у багатокомпонентних розчинах.

Акустичні системи використовують ультразвукові коливання для визначення властивостей рідких середовищ. Ультразвукові витратоміри вимірюють швидкість потоку рідини без контакту з технологічним середовищем. Акустичні аналізатори щільності визначають питому вагу рідини на основі швидкості поширення звукових хвиль. Ехолокаційні системи контролюють рівень рідини у резервуарах та технологічних апаратах.

Магнітні системи контролю застосовуються для визначення магнітних властивостей рідин та контролю потоків електропровідних середовищ. Електромагнітні витратоміри вимірюють об'ємну витрату рідини на основі закону електромагнітної індукції. Магнітні сепаратори забезпечують видалення феромагнітних забруднень з технологічних рідин. Магнітно-резонансні аналізатори дозволяють визначати молекулярну структуру органічних сполук у рідких середовищах [9].

Теплові системи контролю базуються на вимірюванні теплофізичних властивостей рідин. Термодатчики забезпечують контроль температури технологічних процесів з високою точністю. Калориметричні системи визначають теплоємність рідин для оцінки їх складу. Термогравіметричні аналізатори контролюють вміст вологи та летких компонентів у рідких середовищах.

Мас-спектрометричні системи забезпечують найвищий рівень точності аналізу складу рідин шляхом визначення молекулярних мас компонентів. Газова хроматографія-мас-спектрометрія дозволяє ідентифікувати та кількісно визначати органічні сполуки у складних сумішах. Рідинна хроматографія забезпечує розділення компонентів рідких середовищ для подальшого детального аналізу. Іонна хроматографія специфічно призначена для аналізу іонного складу водних розчинів.

Радіометричні системи використовують радіоактивне випромінювання для визначення щільності та рівня рідин у технологічних апаратах. Гамма-денсиметри забезпечують безконтактне вимірювання щільності рідин у трубопроводах та резервуарах. Нейтронні вологоміри визначають вміст води у вуглеводневих рідинах. Радіоізотопні рівнеміри контролюють рівень агресивних рідин у складних технологічних умовах [11].

Мікропроцесорні системи контролю інтегрують різні типи датчиків та забезпечують комплексний аналіз якості рідин. Програмовані логічні контролери обробляють сигнали від множини сенсорів та формують керуючі впливи на виконавчі механізми. Системи збору та обробки даних забезпечують архівування результатів вимірювань та статистичний аналіз тенденцій зміни якості продукції.

Бездротові системи моніторингу дозволяють здійснювати дистанційний контроль якості рідин у віддалених об'єктах. Телеметричні системи передають дані вимірювань через радіоканали або мережі стільникового зв'язку. Супутникові системи зв'язку забезпечують моніторинг якості рідин на географічно розподілених об'єктах. Інтернет речей дозволяє інтегрувати системи контролю якості у глобальні інформаційні мережі для централізованого управління технологічними процесами.

1.3 Нормативно-правова база експлуатації систем фільтрації на підприємствах України

Нормативно-правове регулювання експлуатації систем фільтрації на підприємствах України базується на комплексі законодавчих актів, державних стандартів та технічних регламентів, що визначають вимоги до безпеки, екологічності та ефективності роботи очисного обладнання. Система нормативного регулювання включає закони України, постанови Кабінету Міністрів, накази міністерств та відомств, державні будівельні норми та

стандарти, що встановлюють обов'язкові вимоги до проектування, монтажу та експлуатації систем фільтрації.

Закон України "Про охорону навколишнього природного середовища" встановлює основні принципи екологічної безпеки промислових підприємств та вимоги до очищення стічних вод і промислових викидів. Підприємства зобов'язані забезпечувати ефективне функціонування систем очищення відходів виробництва та дотримуватися встановлених нормативів гранично допустимих концентрацій забруднюючих речовин. Порушення екологічних вимог тягне за собою адміністративну та кримінальну відповідальність керівництва підприємств [20].

Водний кодекс України регламентує використання водних ресурсів та скидання очищених стічних вод у природні водойми. Підприємства повинні отримувати дозволи на спеціальне водокористування та забезпечувати очищення стічних вод до нормативних показників якості. Системи фільтрації повинні забезпечувати видалення забруднюючих речовин до рівня, що не перевищує гранично допустимі концентрації для скидання у водні об'єкти.

Державні санітарні норми та правила встановлюють вимоги до якості питної води та води для технологічних потреб харчової промисловості. Системи фільтрації питної води повинні забезпечувати видалення мікроорганізмів, важких металів, органічних сполук та інших забруднень до рівня, безпечного для здоров'я людини. Контроль якості очищеної води здійснюється акредитованими лабораторіями з періодичністю, встановленою санітарними нормами.

Технічні регламенти безпеки машин та обладнання визначають вимоги до конструкції, виготовлення та експлуатації фільтрувального обладнання. Системи фільтрації повинні відповідати вимогам механічної безпеки, електробезпеки та вибухобезпеки залежно від умов експлуатації. Обладнання підлягає обов'язковій сертифікації відповідності та періодичному технічному огляду [1].

Державні будівельні норми встановлюють вимоги до проектування та будівництва споруд водопостачання та каналізації. Системи фільтрації повинні проектуватися з урахуванням сейсмічної активності регіону, кліматичних умов

та геологічних особливостей будівельного майданчика. Проекти систем очищення підлягають державній експертизі та погодженню з органами санітарно-епідеміологічного нагляду.

Правила техніки безпеки при експлуатації хімічного обладнання регламентують безпечні методи роботи з фільтрувальними установками. Персонал, що обслуговує системи фільтрації, повинен проходити спеціальне навчання та атестацію з питань охорони праці. Робочі місця повинні бути обладнані засобами індивідуального захисту та системами аварійного оповіщення [6].

Стандарти серії ISO 9000 встановлюють вимоги до систем управління якістю на підприємствах, включаючи процеси фільтрації та очищення продукції. Підприємства повинні документувати процедури контролю якості, проводити внутрішні аудити та забезпечувати безперервне покращення технологічних процесів. Сертифікація системи управління якістю підтверджує відповідність підприємства міжнародним стандартам.

Екологічні стандарти серії ISO 14000 встановлюють вимоги до систем екологічного управління на промислових підприємствах. Системи фільтрації розглядаються як елемент екологічної політики підприємства, спрямованої на зменшення негативного впливу на навколишнє середовище. Впровадження екологічних стандартів сприяє покращенню іміджу підприємства та підвищенню конкурентоспроможності продукції.

Перспективи розвитку нормативно-правової бази включають гармонізацію українського законодавства з європейськими директивами та стандартами. Впровадження принципів найкращих доступних технологій стимулює модернізацію систем фільтрації та впровадження інноваційних методів очищення. Цифровізація процедур ліцензування та контролю дозволить підвищити ефективність державного нагляду за дотриманням екологічних вимог підприємствами.

2 ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТА КОМПОНЕНТИ ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ ФІЛЬТРАЦІЇ

2.1 Датчики та сенсори для моніторингу параметрів рідини

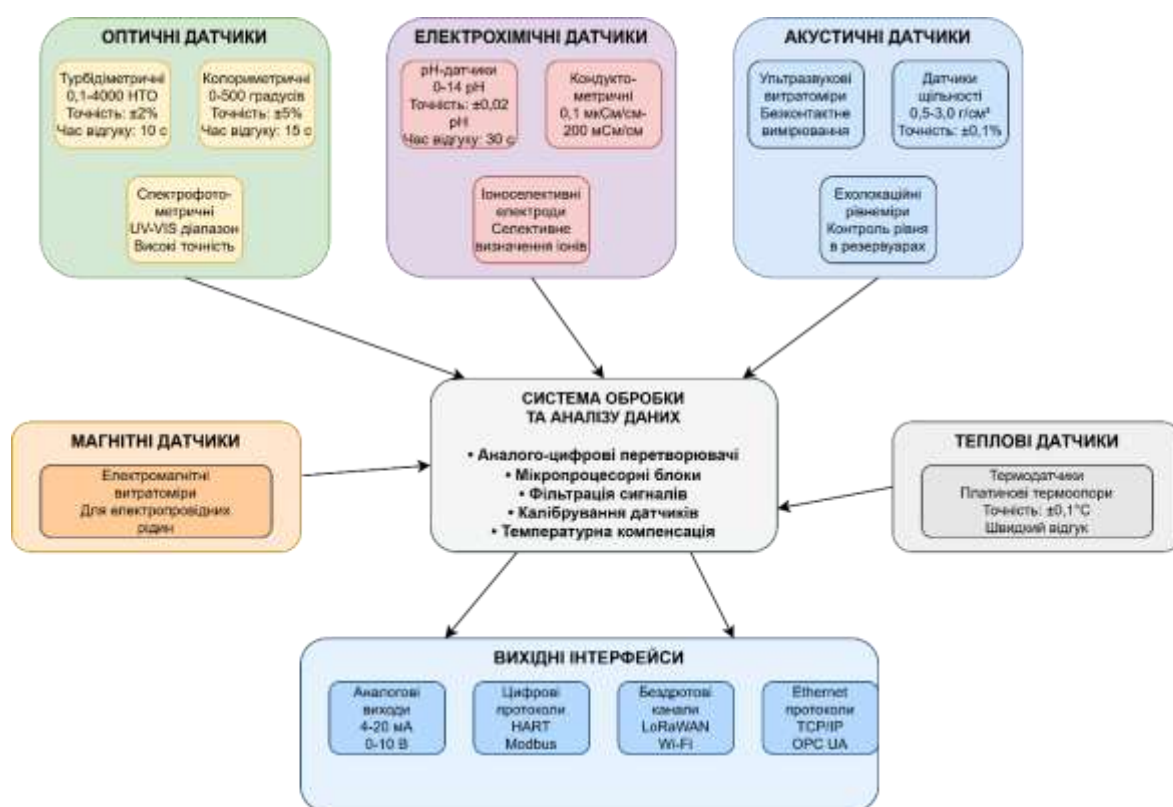
Датчики моніторингу параметрів рідини становлять основу сучасних електронних систем фільтрації, забезпечуючи безперервний контроль якості технологічних процесів. Сенсорні пристрої перетворюють фізичні, хімічні та біологічні параметри рідких середовищ у електричні сигнали, що обробляються системами автоматичного управління. Технологічний розвиток сенсорної техніки характеризується мініатюризацією пристроїв, підвищенням точності вимірювань та розширенням діапазонів контрольованих параметрів.

Турбідиметричні датчики використовують принцип розсіяння світла для визначення концентрації зважених частинок у рідині. Оптичний сенсор складається з джерела світла, детектора та системи обробки сигналу, що забезпечує вимірювання каламутності в діапазоні від 0,1 до 4000 НТО (нефелометричні одиниці каламутності). Принцип роботи базується на законі Релея, згідно з яким інтенсивність розсіяного світла пропорційна концентрації частинок [12]. Турбідиметричні системи характеризуються високою швидкістю відгуку та можливістю безперервного моніторингу процесів фільтрації.

Кондуктометричні датчики вимірюють електричну провідність рідини для визначення загальної концентрації розчинених солей. Електропровідність водних розчинів прямо корелює з концентрацією іонів та використовується для контролю ступеня очищення води від мінеральних домішок. Датчики електропровідності працюють в діапазоні від 0,1 мкСм/см до 200 мСм/см з похибкою вимірювання не більше 2%. Автоматична температурна компенсація забезпечує стабільність показань незалежно від теплових коливань технологічного процесу.

Електрохімічні рН-датчики контролюють кислотно-лужний баланс рідких середовищ шляхом вимірювання електрохімічного потенціалу скляного електрода. Іоноселективний механізм скляної мембрани забезпечує селективну проникність для іонів водню, створюючи потенціал, пропорційний рН розчину. Сучасні рН-датчики характеризуються діапазоном вимірювання 0-14 рН з роздільною здатністю 0,01 рН та стабільністю показань протягом тривалого періоду експлуатації. Комбіновані електроди включають порівняльний електрод для забезпечення стабільного опорного потенціалу.

На рисунку 2.1 представлено систематизовану класифікацію датчиків моніторингу параметрів рідини за принципами фізичного перетворення вимірюваних величин.



ОСНОВНІ ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ:

- Діапазон робочих температур: -40°C до $+85^\circ\text{C}$
- Ступінь захисту: IP65-IP68
- Час відгуку: від 2 до 60 секунд
- Точність вимірювання: 0,02-5% залежно від типу
- Живлення: 12-24 В DC/AC
- Вихідні сигнали: 4-20 мА, 0-10 В, цифрові протоколи

ПЕРЕВАГИ ІНТЕГРОВАНИХ РІШЕНЬ:

- Зменшення кількості точок монтажу
- Спільна температурна компенсація
- Синхронізація вимірювань
- Зниження загальної вартості системи
- Спрощення калібрування та обслуговування
- Модульна архітектура для нарощування функцій

Рисунок 2.1 – Типи датчиків моніторингу

Схема відображає різноманітність сенсорних технологій, що застосовуються для безперервного контролю якості технологічних процесів фільтрації. Структура діаграми організована за функціональними групами датчиків, що вимірюють специфічні характеристики рідких середовищ.

Турбідиметричні датчики на схемі представлені з указанням принципу роботи на основі розсіяння світла та діапазону вимірювання каламутності. Блок-схема показує внутрішню структуру оптичного сенсора з джерелом світла, детектором та системою обробки сигналу. Конструктивні особливості датчика забезпечують стабільні вимірювання в діапазоні від сотих часток до тисяч нефелометричних одиниць каламутності.

Електрохімічні датчики на діаграмі згруповані за типами вимірюваних параметрів, включаючи рН, електропровідність та концентрації специфічних іонів. Схема демонструє принципи роботи скляних електродів для вимірювання кислотності та кондуктометричних комірок для визначення загальної мінералізації води. Температурна компенсація показників забезпечує точність вимірювань незалежно від теплових коливань технологічного процесу.

Ультразвукові датчики представлені на схемі з описом принципу вимірювання щільності та витрати рідини на основі швидкості поширення звукових хвиль. П'єзоелектричні перетворювачі генерують та приймають ультразвукові сигнали, а обробка часових характеристик дозволяє визначати фізичні властивості середовища. Безконтактний принцип вимірювання забезпечує високу надійність датчиків при роботі з агресивними середовищами.

Мультипараметричні датчики на схемі показані як інтегровані рішення для одночасного контролю декількох параметрів якості рідини. Модульна конструкція таких сенсорів дозволяє комбінувати різні принципи вимірювання в єдиному корпусі з мінімальними габаритами та енергоспоживанням. Цифрова обробка сигналів від всіх сенсорних елементів здійснюється єдиним мікропроцесором з автоматичною взаємною компенсацією впливу різних факторів. У таблиці 2.1 представлені деякі технічні характеристики основних типів датчиків якості рідини.

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики основних типів датчиків якості рідини

| Тип датчика | Параметр, що контролюється | Діапазон вимірювання | Точність | Час відгуку |
|--------------------------|----------------------------|---------------------------|----------|-------------|
| Турбідиметричний | Каламутність | 0,1-4000 НТО | ±2% | 10 с |
| Кондуктометричний | Електропровідність | 0,1 мкСм/см - 200 мСм/см | ±2% | 5 с |
| pH-метричний | Кислотність | 0-14 pH | ±0,02 pH | 30 с |
| Оптичний колориметричний | Кольоровість | 0-500 градусів | ±5% | 15 с |
| Ультразвуковий | Щільність | 0,5-3,0 г/см ³ | ±0,1% | 2 с |

Колориметричні датчики визначають інтенсивність забарвлення рідини у визначених спектральних діапазонах для контролю концентрації органічних забруднень. Оптична система включає світлодіодні джерела випромінювання з довжинами хвиль 254, 410, 525 та 620 нм, що дозволяє аналізувати різні типи хромофорних сполук. Фотодіодні детектори перетворюють світловий потік у електричний сигнал, пропорційний концентрації поглинаючих речовин [16, с. 134]. Автоматичне калібрування за еталонними зразками забезпечує стабільність вимірювань протягом тривалого періоду експлуатації.

Ультразвукові датчики щільності використовують залежність швидкості поширення звукових хвиль від фізичних властивостей рідини. П'єзоелектричні перетворювачі генерують ультразвукові імпульси частотою від 1МГц до 5 МГц, що проходять через досліджувану рідину та реєструються приймальним елементом. Час проходження ультразвукових коливань обернено пропорційний щільності середовища, що дозволяє визначати концентрацію розчинених речовин. Безконтактний принцип вимірювання забезпечує високу надійність датчиків при роботі з агресивними рідинами.

Температурні датчики на основі платинових термоопорів забезпечують точний контроль теплового режиму процесів фільтрації. Температурний коефіцієнт опору платини становить $0,00385 \text{ Ом}/(\text{Ом}\cdot^\circ\text{C})$, що забезпечує лінійну залежність опору від температури в широкому діапазоні. Чотирипровідна схема підключення компенсує вплив опору з'єднувальних проводів на точність вимірювання. Захисні гільзи з нержавіючої сталі або тефлону забезпечують стійкість датчиків до корозійного впливу технологічних середовищ.

Датчики рівня рідини на ультразвуковому принципі забезпечують безконтактне вимірювання висоти стовпа рідини в резервуарах та технологічних апаратах. Ехолокаційний принцип базується на вимірюванні часу поширення ультразвукових імпульсів від датчика до поверхні рідини та назад. Компенсація впливу температури та вологості повітря підвищує точність вимірювання до $0,25\%$ від діапазону [17]. Цифрова обробка сигналу дозволяє фільтрувати завади від турбулентності поверхні рідини.

Датчики тиску на основі тензометричних перетворювачів контролюють гідравлічні параметри систем фільтрації. Кремнієві мембрани з імплантованими тензорезисторами деформуються під дією тиску, змінюючи електричний опір пропорційно прикладеному зусиллю. Мостова схема підключення тензоелементів забезпечує високу чутливість та лінійність перетворення. Температурна компенсація мостової схеми компенсує теплові дрейфи нульового сигналу та чутливості датчика.

Електромагнітні витратоміри вимірюють об'ємну витрату електропровідних рідин на основі закону електромагнітної індукції Фарадея. Магнітне поле, створюване котушками збудження, індукує ЕРС у рідині, що рухається через трубопровід. Величина індукованої ЕРС пропорційна швидкості потоку та не залежить від фізичних властивостей рідини. Електроди з платини або нержавіючої сталі забезпечують довготривалу стабільність контакту з технологічним середовищем.

Датчики розчиненого кисню використовують електрохімічний принцип для контролю аеробних біологічних процесів очищення стічних вод.

Полярнографічний метод базується на відновленні кисню на катоді при постійному потенціалі 0,8 В відносно срібного аноду. Струм відновлення пропорційний концентрації розчиненого кисню та не залежить від інших окисників у розчині. Мембранне покриття електродної системи селективно пропускає молекули кисню та захищає електроди від забруднення.

Оптичні датчики розчиненого кисню використовують принцип флуоресцентного гасіння для безреагентного визначення концентрації O_2 . Флуоресцентний індикатор випромінює світло при збудженні синім світлодіодом, а інтенсивність флуоресценції зменшується пропорційно концентрації кисню. Фазовий метод вимірювання забезпечує високу точність та стабільність показань без споживання кисню [13]. Відсутність електролітичних процесів виключає необхідність заміни електродів та періодичного калібрування.

Мультипараметричні датчики інтегрують декілька сенсорних елементів у єдиному корпусі для одночасного контролю різних параметрів рідини. Комбіновані датчики рН/кондуктивності/температури забезпечують комплексний моніторинг якості води з мінімальними габаритами та енергоспоживанням. Цифрова обробка сигналів від всіх сенсорів здійснюється єдиним мікропроцесором з автоматичною температурною компенсацією показань. Модульна конструкція дозволяє замінювати окремі сенсорні елементи без демонтажу всього датчика.

Безпроводні датчики з автономним живленням розширюють можливості моніторингу віддалених об'єктів без прокладання кабельних ліній. Радіомодулі стандарту LoRaWAN забезпечують передачу даних на відстані до 15 км з низьким енергоспоживанням. Літієві батареї забезпечують автономну роботу датчиків протягом 5-7 років без обслуговування. Захист корпусу IP68 дозволяє встановлювати датчики у складних умовах експлуатації з високою вологістю та запиленістю.

2.2 Автоматизовані системи керування процесом фільтрації

Автоматизовані системи керування процесом фільтрації представляють собою комплекс технічних засобів, що забезпечують оптимальне функціонування фільтрувального обладнання без безпосередньої участі оператора. Система автоматичного керування включає контролери, виконавчі механізми, інтерфейси оператора та програмне забезпечення для реалізації алгоритмів управління технологічним процесом. Архітектура сучасних систем базується на принципах децентралізованого управління з використанням промислових мереж передачі даних.

Програмовані логічні контролери становлять основу систем автоматизації фільтрувальних установок, забезпечуючи виконання алгоритмів управління в режимі реального часу. Модульна архітектура ПЛК дозволяє конфігурувати систему відповідно до специфіки технологічного процесу з можливістю масштабування функціональності. Центральний процесорний модуль обробляє сигнали від датчиків та формує керуючі впливи на виконавчі механізми з частотою сканування 1-10 мс [15]. Резервування процесорних модулів забезпечує надійність систем управління технологічними процесами з підвищеними вимогами до безпеки.

Модулі аналогового вводу-виводу забезпечують інтерфейс між датчиками технологічних параметрів та цифровою системою обробки сигналів. Багатоканальні модулі з 16 – 32 аналоговими входами підтримують стандартні сигнали від 4 мА– 20 мА, 0-10 В та термопарні сигнали з роздільною здатністю від 12біт до 16 біт. Гальванічна ізоляція каналів захищає систему управління від електричних завад та коротких замикань у польових ланцюгах. Діагностичні функції модулів сигналізують про обрив або коротке замикання датчиків для своєчасного виявлення несправностей.

Таблиця 2.2 – Характеристики основних компонентів систем автоматизації фільтрації

| Компонент | Технічні параметри | Функціональність | Область застосування |
|----------------------|-------------------------------|----------------------|---------------------------|
| ПЛК середнього класу | 32-128 каналів В/В | Основне управління | Локальні системи |
| НМІ-панель | Екран 10-15", 256 кольорів | Інтерфейс оператора | Місьцеве управління |
| Перетворювач частоти | 0,75–200 кВт | Регулювання насосів | Енергозбереження |
| Пневмопривод | Зусилля 500–5000 Н | Управління засувками | Швидкодія |
| SCADA-система | До 10000 тегів | Диспетчеризація | Централізоване управління |

Дискретні модулі вводу-виводу обробляють сигнали від датчиків граничних положень, кнопок управління та подають команди на електромагнітні клапани, сигнальні лампи та реле. Оптична ізоляція входів забезпечує стійкість до електричних завад та підвищує надійність системи управління. Модулі дискретного виводу з релейними або транзисторними виходами керують виконавчими механізмами з напругою живлення від 24В до 230 В постійного або змінного струму [9]. Діагностика стану виходів дозволяє виявляти несправності навантаження та попереджати аварійні ситуації.

Рисунок 2.2 демонструє семирівневу ієрархічну архітектуру автоматизованої системи управління процесом фільтрації, організовану за принципом розподіленого управління.

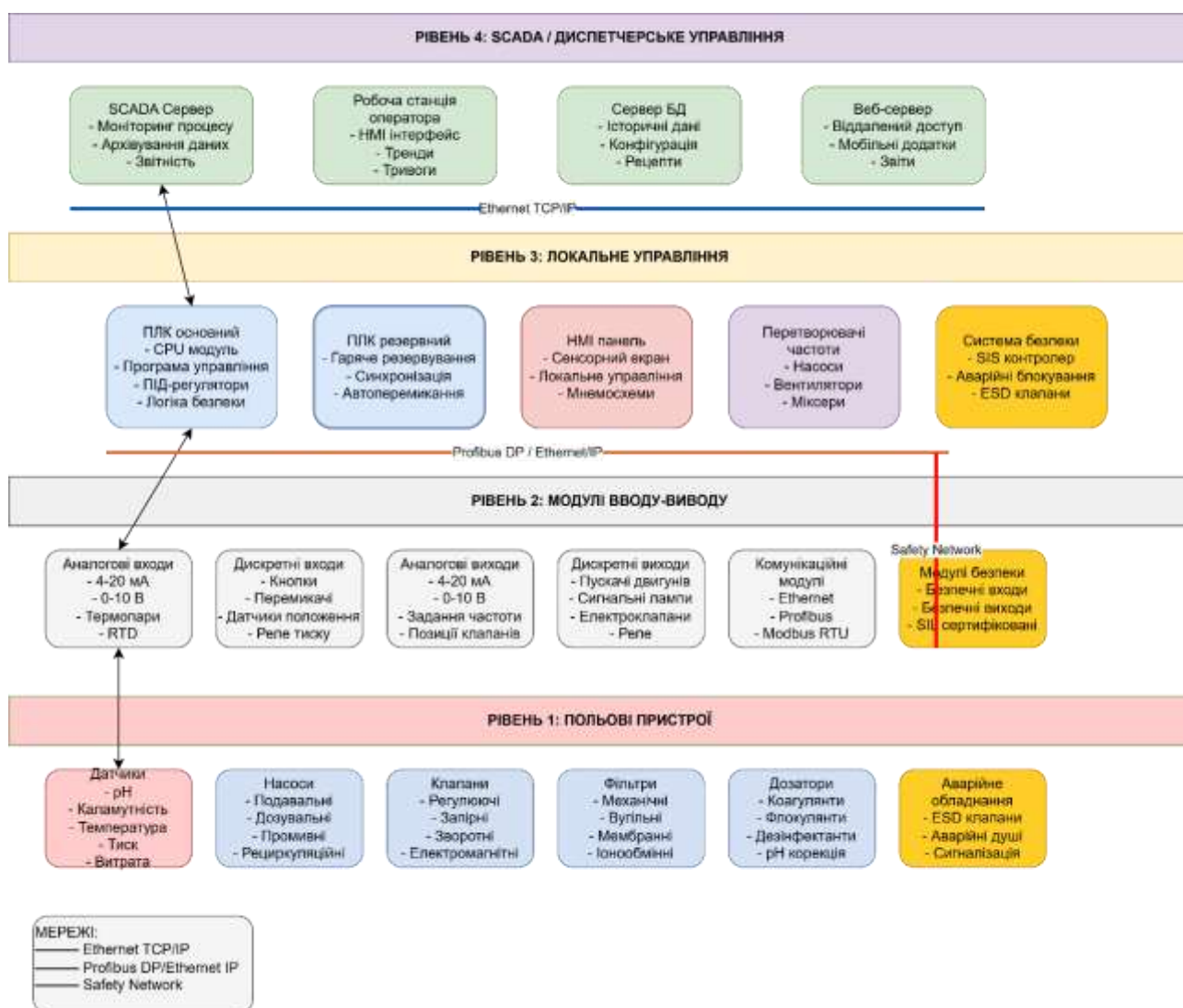


Рисунок 2.2 – Архітектура автоматизованої системи

Схема відображає вертикальну інтеграцію від рівня польових пристроїв до систем диспетчерського управління та горизонтальну координацію компонентів на кожному рівні. Архітектурний підхід забезпечує модульність, масштабованість та відмовостійкість системи автоматизації.

Польовий рівень схеми включає датчики технологічних параметрів та виконавчі механізми, що безпосередньо взаємодіють з обладнанням фільтрації. Турбідиметричні, рН-метричні та кондуктометричні датчики забезпечують безперервний моніторинг якості рідини на входах та виходах фільтрувальних апаратів. Інтелектуальні датчики з цифровими інтерфейсами передають дані разом з діагностичною інформацією про стан сенсорних елементів.

Рівень обробки сигналів представляє проміжну ланку між аналоговими датчиками та цифровою системою управління. Аналого-цифрові перетворювачі забезпечують високу роздільну здатність та гальванічну ізоляцію каналів для захисту від електричних завад. Системи фільтрації та нормалізації сигналів підвищують якість вимірювальної інформації та адаптують її до стандартних форматів обробки.

Центральний рівень управління представлений програмованими логічними контролерами, що реалізують основні алгоритми автоматичного регулювання процесу фільтрації. Модульна архітектура ПЛК дозволяє конфігурувати систему залежно від складності технологічного процесу та кількості контрольованих параметрів. Вбудовані регулятори підтримують задані значення якості очищеної рідини незалежно від збурень процесу.

Верхні рівні схеми представляють системи диспетчерського управління та інтеграції з корпоративними інформаційними системами. SCADA-сервери агрегують дані від розподілених контролерів та формують єдину базу реального часу для моніторингу технологічного процесу. Веб-сервери надають доступ до інформації через браузерні інтерфейси для віддаленого моніторингу та управління системою фільтрації. Промислові мережі Ethernet та Profibus забезпечують надійний обмін даними між компонентами різних рівнів архітектури.

Перетворювачі частоти забезпечують плавне регулювання швидкості обертання насосів та вентиляторів для оптимізації енергоспоживання систем фільтрації. Векторне управління асинхронними двигунами забезпечує високу точність підтримання швидкості та моменту незалежно від навантаження. Вбудовані ПД-регулятори підтримують тиск або витрату на заданому рівні шляхом автоматичного коригування частоти живлення двигуна. Функції енергозбереження оптимізують споживання електроенергії залежно від навантаження технологічного процесу.

Пневматичні та електричні виконавчі механізми реалізують керуючі впливи системи автоматизації на технологічне обладнання. Пневмоприводи

забезпечують швидке переміщення засувки та клапанів з високим зусиллям при простоті конструкції та високій надійності. Електроприводи характеризуються високою точністю позиціонування та можливістю програмування складних траєкторій руху. Зворотний зв'язок за положенням виконавчого органу забезпечує контроль правильності виконання команд управління.

Інтерфейси оператора у вигляді сенсорних панелей забезпечують візуалізацію технологічного процесу та дистанційне управління обладнанням. Кольорові TFT-дисплеї з діагоналлю від 7 дюймів до 15 дюймів відображають мнемосхеми технологічного процесу, тренди параметрів та повідомлення про тривоги. Резистивні або ємнісні сенсорні екрани забезпечують інтуїтивне управління системою через графічний інтерфейс [13]. Захист корпусу IP65 дозволяє встановлювати панелі у виробничих приміщеннях з підвищеною вологістю та запиленістю.

Промислові комп'ютери забезпечують платформу для виконання SCADA-систем диспетчерського управління та збору даних. Безвентиляторна конструкція з твердотільними накопичувачами забезпечує надійну роботу в умовах вібрацій та перепадів температури. Резервування блоків живлення та мережевих адаптерів підвищує відмовостійкість системи диспетчеризації. Промислові операційні системи реального часу забезпечують детерміновану обробку сигналів з гарантованим часом відгуку.

SCADA-системи інтегрують локальні контролери у єдину систему диспетчерського управління технологічним комплексом. Драйвери протоколів Modbus, Profibus, Ethernet/IP забезпечують обмін даними з обладнанням різних виробників. Архівування технологічних параметрів у реляційних базах даних дозволяє аналізувати тенденції процесу та формувати звіти про роботу обладнання. Система тривоги сповіщає оперативний персонал про відхилення параметрів від нормальних значень.

Алгоритми автоматичного регулювання забезпечують підтримання технологічних параметрів на заданих рівнях незалежно від збурень процесу. ПІД-регулятори з автоналаштуванням параметрів адаптуються до динамічних

характеристик об'єкта управління. Каскадні схеми регулювання підвищують якість перехідних процесів при управлінні об'єктами з транспортним запізненням [11]. Нечіткі регулятори забезпечують управління нелінійними об'єктами з невизначеними параметрами.

Системи управління електроприводами інтегруються з загальною системою автоматизації через промислові мережі. Розподілене управління дозволяє розмістити частину алгоритмів безпосередньо в інтелектуальних приводах для зменшення навантаження на центральний контролер. Синхронізація роботи декількох приводів забезпечує координоване управління технологічним процесом. Функції безпеки блокують роботу приводів при виявленні аварійних ситуацій.

Системи керування якістю інтегрують результати аналізу параметрів рідини з алгоритмами управління процесом фільтрації. Адаптивні алгоритми коригують режими роботи обладнання залежно від якості вхідної сировини та вимог до очищеної продукції. Прогнозуючі моделі оптимізують споживання реагентів та енергоресурсів на основі прогнозування змін технологічного процесу [5]. Експертні системи надають рекомендації оператору щодо оптимізації режимів роботи обладнання.

Резервні системи управління забезпечують безперервність технологічного процесу при виході з ладу основного обладнання. Гаряче резервування контролерів з автоматичним переключенням гарантує час відновлення менше 1 секунди. Дублювання каналів зв'язку виключає втрату управління при пошкодженні мережевих кабелів. Автономні системи безпеки забезпечують безпечну зупинку процесу при критичних відмовах основної системи управління.

Кібербезпека систем автоматизації включає захист від несанкціонованого доступу та кібератак на промислові мережі. Сегментація мереж з демілітаризованими зонами ізолює системи управління від корпоративних мереж. Системи виявлення вторгнень моніторять мережевий трафік на предмет

аномальної активності. Криптографічний захист протоколів зв'язку забезпечує цілісність та конфіденційність передавання даних між компонентами системи.

2.3 Інтеграція IoT-технологій у системи фільтрації рідини

Інтеграція технологій Інтернету речей у системи фільтрації рідини відкриває нові можливості для дистанційного моніторингу, прогновної аналітики та оптимізації технологічних процесів. IoT-платформи забезпечують збір, передачу та аналіз великих обсягів даних від розподілених сенсорних мереж для підвищення ефективності очисного обладнання. Архітектура IoT-систем включає рівень сенсорів, комунікаційний рівень, рівень обробки даних та рівень додатків для взаємодії з користувачами.

Безпроводні сенсорні мережі забезпечують гнучке розгортання систем моніторингу без прокладання кабельних ліній. Протоколи LoRaWAN, NB-IoT та Sigfox оптимізовані для передачі невеликих обсягів даних на великі відстані з мінімальним енергоспоживанням. Топологія зіркової мережі дозволяє підключати до 1000 кінцевих пристроїв до одного базового шлюзу з радіусом покриття до 15 км у сільській місцевості [3]. Adaptive Data Rate автоматично оптимізує швидкість передачі даних залежно від якості радіоканалу.

Граничні обчислення переносять частину обробки даних безпосередньо до сенсорних пристроїв для зменшення навантаження на мережу передачі даних. Мікроконтролери з вбудованими алгоритмами машинного навчання здійснюють первинну обробку сигналів датчиків та передають тільки агреговані результати. Локальне прийняття рішень дозволяє швидко реагувати на аварійні ситуації без затримок, пов'язаних з передачею даних до хмарних сервісів. Автономні алгоритми виявлення аномалій попереджають про несправності обладнання до їх критичного розвитку.

Таблиця 2.3 – Характеристики IoT-протоколів для систем фільтрації

| Протокол | Дальність зв'язку | Швидкість передачі | Енергоспоживання | Топологія мережі |
|---------------|------------------------------|--------------------|-----------------------|------------------|
| LoRaWAN | До 15 км | 0,3-50 кбіт/с | 10-15 років автономії | Зіркова |
| NB-IoT | Покриття стільникової мережі | До 250 кбіт/с | 5-10 років автономії | Стільникова |
| Sigfox | До 40 км | 100 біт/с | 15-20 років автономії | Зіркова |
| WiFi 6 | До 100 м | До 9,6 Гбіт/с | Постійне живлення | Mesh |
| Bluetooth 5.0 | До 200 м | До 2 Мбіт/с | 2-5 років автономії | Mesh |

Хмарні платформи IoT забезпечують масштабовану інфраструктуру для збору, зберігання та аналізу даних від тисяч сенсорних пристроїв. Сервіси AWS IoT Core, Microsoft Azure IoT Hub та Google Cloud IoT надають готові рішення для швидкого розгортання IoT-додатків. Еластичне масштабування обчислювальних ресурсів автоматично адаптується до змін навантаження на систему. Глобальна доступність хмарних сервісів забезпечує доступ до даних з будь-якої точки світу через веб-інтерфейси та мобільні додатки.

Протоколи передачі даних MQTT та CoAP оптимізовані для обмеження пропускну здатності та переривчастих з'єднань IoT-пристроїв. MQTT забезпечує надійну доставку повідомлень через брокер повідомлень з підтримкою QoS рівнів 0, 1 та 2. Механізм publish/subscribe дозволяє ефективно розподіляти дані між множиною споживачів [9]. CoAP використовує UDP-протокол для мінімізації накладних витрат при передачі коротких повідомлень від сенсорів з обмеженими ресурсами.

Аналітика великих даних застосовує методи машинного навчання для виявлення прихованих закономірностей у роботі систем фільтрації. Алгоритми кластеризації групують режими роботи обладнання для оптимізації технологічних параметрів. Регресійні моделі прогнозують зміни якості очищеної рідини залежно від параметрів вхідної сировини. Нейронні мережі виявляють складні нелінійні залежності між параметрами процесу для підвищення точності прогнозування.

Цифрові двійники систем фільтрації створюють віртуальні моделі обладнання для симуляції різних режимів роботи без ризику для реального процесу. Математичні моделі калібруються за історичними даними експлуатації для досягнення максимальної відповідності реальному обладнанню. Віртуальні експерименти дозволяють оптимізувати параметри процесу та перевіряти ефективність нових алгоритмів управління [4]. Прогнозна аналітика на основі цифрових двійників попереджає про необхідність технічного обслуговування обладнання.

Блокчейн-технології забезпечують незмінність записів про якість очищеної рідини для підтвердження відповідності екологічним нормативам. Розподілений реєстр зберігає хеші результатів аналізів з мітками часу для запобігання фальсифікації даних. Смарт-контракти автоматизують виконання угод між постачальниками та споживачами очищеної води на основі об'єктивних показників якості. Децентралізована архітектура виключає необхідність довірених третіх сторін для верифікації результатів очищення.

Кібербезпека IoT-систем потребує комплексного підходу до захисту від зловмисних атак на критичну інфраструктуру. Автентифікація пристроїв на основі криптографічних сертифікатів запобігає підключенню несанкціонованих пристроїв до мережі. Шифрування трафіку протоколами TLS 1.3 та DTLS забезпечує конфіденційність передаваних даних. Системи виявлення аномалій аналізують поведінку мережевих пристроїв для ідентифікації потенційних загроз безпеки.

Штучний інтелект інтегрується у IoT-платформи для автоматичної оптимізації режимів роботи систем фільтрації. Генетичні алгоритми знаходять оптимальні комбінації параметрів процесу для мінімізації енергоспоживання при забезпеченні необхідної якості очищення. Системи нечіткої логіки обробляють неточні та неповні дані від сенсорів для прийняття рішень в умовах невизначеності [13]. Експертні системи акумулюють знання досвідчених операторів для автоматизації діагностики несправностей обладнання.

Мобільні додатки забезпечують доступ до IoT-платформ через смартфони та планшети для дистанційного моніторингу систем фільтрації. Нативні додатки для iOS та Android синхронізуються з хмарними сервісами для отримання актуальних даних про стан обладнання. Push-повідомлення сповіщають користувачів про критичні події та необхідність втручання оператора. Офлайн-режим дозволяє переглядати кешовані дані при відсутності мережевого з'єднання.

Доповнена реальність використовується для візуалізації невидимих параметрів процесу фільтрації та підтримки технічного обслуговування обладнання. AR-окуляри відображають дані від IoT-сенсорів безпосередньо на зображенні реального обладнання для інтуїтивного сприйняття стану системи. Інтерактивні інструкції з обслуговування накладаються на зображення обладнання для навчання персоналу. Дистанційна експертна підтримка дозволяє досвідченим фахівцям надавати консультації через AR-інтерфейс.

Цифрова екосистема об'єднує IoT-платформи різних виробників обладнання для створення інтегрованих рішень управління водними ресурсами. API-інтерфейси забезпечують сумісність між системами різних постачальників для уникнення технологічної залежності від одного виробника. Стандарти IEC 61850 та OPC UA гармонізують протоколи обміну даними між компонентами розподіленої системи [2]. Відкриті платформи сприяють інноваційному розвитку галузі через залучення сторонніх розробників.

Таблиця 2.4 – Економічні показники впровадження IoT у системи фільтрації

| Показник | Традиційні системи | IoT-системи | Економія |
|---|--------------------|-------------|----------|
| Витрати на моніторинг, \$/рік | 25000 | 8000 | 68% |
| Споживання електроенергії, кВт·год/м ³ | 0,85 | 0,62 | 27% |
| Витрати реагентів, \$/м ³ | 0,15 | 0,11 | 27% |
| Час простою обладнання, год/рік | 120 | 45 | 62% |
| Витрати на обслуговування, \$/рік | 18000 | 12000 | 33% |

Предиктивна аналітика на основі IoT-даних дозволяє планувати технічне обслуговування обладнання на основі фактичного стану, а не регламентованих інтервалів. Алгоритми виявлення аномалій аналізують тренди деградації компонентів для прогнозування часу до відмови. Оптимізація запасів запчастин базується на прогнозах потреби в заміні компонентів. Скорочення незапланованих простоїв підвищує загальну ефективність обладнання та рентабельність виробництва.

Інтеграція з Enterprise Resource Planning системами забезпечує автоматичне планування ресурсів на основі прогнозів роботи систем фільтрації. Дані про споживання реагентів та електроенергії автоматично передаються до модулів планування закупівель. Інтеграція з системами управління персоналом оптимізує графіки роботи операторів залежно від режимів роботи обладнання [10]. Автоматичне формування звітності для регулюючих органів знижує адміністративне навантаження на підприємство.

Стандартизація IoT-рішень для систем фільтрації сприяє зниженню вартості впровадження та підвищенню сумісності обладнання. Консорціум Industrial Internet Consortium розробляє референтні архітектури для промислових IoT-додатків. Сертифікація сумісності пристроїв різних виробників забезпечує

можливість створення гетерогенних систем. Типові рішення для різних галузей промисловості прискорюють впровадження IoT-технологій.

Сталий розвиток IoT-екосистем потребує врахування життєвого циклу електронних компонентів та їх утилізації. Модульна архітектура IoT-пристроїв дозволяє модернізувати окремі компоненти без заміни всього пристрою. Використання біодеградабельних матеріалів у корпусах сенсорів зменшує екологічний вплив електронних відходів [1]. Програми збору та переробки електронних компонентів забезпечують відповідальне поводження з відходами виробництва.

Навчання персоналу для роботи з IoT-системами включає розвиток компетенцій у сфері цифрових технологій та аналітики даних. Сертифіковані програми підготовки операторів IoT-систем забезпечують стандартизацію знань та навичок персоналу. Симулятори віртуальної реальності дозволяють безпечно навчати роботі з обладнанням без ризику для реального процесу. Постійне підвищення кваліфікації персоналу необхідне для ефективного використання можливостей IoT-технологій.

3 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ ФІЛЬТРАЦІЇ НА ПІДПРИЄМСТВІ

3.1 Розробка структурної схеми електронної системи фільтрації

Структурна схема електронної системи фільтрації (рис. 3.1) представляє собою ієрархічну архітектуру взаємопов'язаних компонентів, що забезпечують автоматизований контроль та управління процесами очищення рідин. Схема включає рівень польових пристроїв, рівень локального управління, рівень диспетчеризації та рівень підприємства для інтеграції з корпоративними інформаційними системами. Архітектурний підхід базується на принципах модульності, масштабованості та відмовостійкості для забезпечення надійного функціонування технологічного процесу.

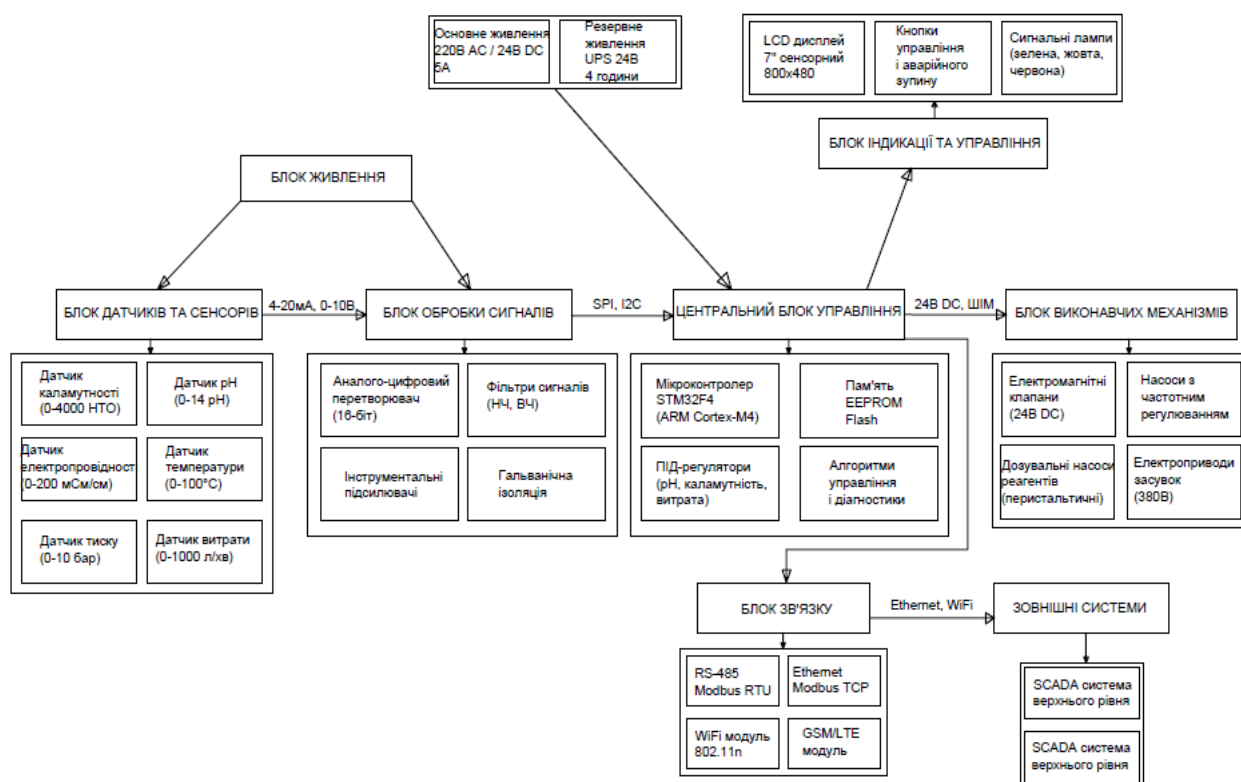


Рисунок 3.1 – Структурна схема електронної системи контролю та управління процесом фільтрації рідини

Структурна схема представляє ієрархічну систему управління процесом фільтрації рідини, організовану за принципом "знизу-вгору" від рівня польових пристроїв до рівня диспетчерського управління. Схема демонструє комплексний підхід до автоматизації, де кожен рівень має специфічні функції та забезпечує певний ступінь автономності управління.

Рівень 1 – Датчики та сенсори (польовий рівень). На нижньому рівні схеми розташовані первинні перетворювачі фізичних параметрів:

Датчики якості рідини:

- турбідиметричні датчики - контролюють каламутність рідини в діапазоні 0,1-4000 НГО з точністю $\pm 2\%$;
- рН-датчики - вимірюють кислотно-лужний баланс у діапазоні 0-14 рН з роздільною здатністю 0,01 рН;
- кондуктометричні датчики - визначають електропровідність від 0,1 мСм/см до 200 мСм/см;
- датчики температури - контролюють тепловий режим процесу з точністю $\pm 0,1^\circ\text{C}$.

Датчики технологічних параметрів:

- датчики тиску - моніторять гідравлічні режими в діапазоні 0-16 бар;
- витратоміри - контролюють об'ємні витрати рідини з точністю $\pm 0,5\%$;
- датчики рівня - відстежують заповнення резервуарів та фільтрів.

Рівень 2 – Обробка сигналів. Другий рівень включає компоненти для первинної обробки аналогових сигналів:

Аналого-цифрові перетворювачі (АЦП):

- перетворюють аналогові сигнали 4-20 мА та 0-10 В у цифровий формат;
- забезпечують роздільну здатність 12-16 біт для високої точності вимірювань;
- здійснюють гальванічну ізоляцію каналів для захисту від електричних завад.

Фільтри та підсилювачі:

- придушують високочастотні завади та наводки;
- нормалізують сигнали до стандартних рівнів;
- забезпечують лінеаризацію характеристик датчиків.

Рівень 3 - Центральне управління. Серцевиною системи є програмований логічний контролер (ПЛК), який виконує основні функції управління:

Функції ПЛК:

- збір та обробка даних від усіх датчиків з частотою сканування 1-10 мс;
- реалізація алгоритмів управління включаючи ПІД-регулювання, каскадні схеми;
- логічне управління виконавчими механізмами за заданими алгоритмами;
- функції безпеки з блокуванням небезпечних режимів роботи;
- діагностика системи з виявленням несправностей обладнання.

Архітектура ПЛК:

- модульна побудова з можливістю нарощування функціональності;
- резервування процесорних модулів для підвищення надійності;
- вбудована пам'ять для зберігання програм та архівних даних.

Рівень 4 - Виконавчі механізми. Четвертий рівень представлений пристроями, що реалізують керуючі впливи на технологічний процес:

Електричні приводи:

- перетворювачі частоти для плавного регулювання швидкості насосів (0,75-200 кВт) ;
- серводвигуни для точного позиціонування засувки та клапанів;
- електромагнітні клапани для швидкого перемикання потоків.

Пневматичні виконавчі механізми:

- пневмоприводи з зусиллям 500-5000 Н для управління великими засувками;
- пневматичні клапани для регулювання витрат реагентів;
- системи пневмоавтоматики для логічного управління.

Рівень 5 - Індикація та управління. П'ятий рівень забезпечує інтерфейс між системою та оператором:

Локальні панелі оператора:

- сенсорні НМІ-панелі з діагоналлю 10-15 дюймів;
- відображення мнемосхем технологічного процесу в реальному часі;
- тренди параметрів для аналізу динаміки процесу;

- система тривоги з класифікацією за пріоритетом.

Елементи індикації:

- світлові сигналізатори стану обладнання;
- цифрові табло для відображення параметрів;
- звукова сигналізація аварійних ситуацій.

Рівень 6 - Зв'язок та мережі. Шостий рівень організовує обмін інформацією між компонентами системи:

Промислові мережі:

- ethernet/IP для високошвидкісного обміну даними (100 Мбіт/с) ;
- profibus/Profinet для інтеграції обладнання різних виробників;
- modbus RTU/TCP для зв'язку з простими пристроями;
- foundation Fieldbus для інтелектуальних датчиків.

Топологія мережі:

- ріркова топологія для критичних з'єднань;
- резервування каналів зв'язку для підвищення надійності;
- оптоволоконні лінії для великих відстаней.

Рівень 7 - Живлення та захист. Верхній рівень забезпечує енергопостачання та захист системи:

Система живлення:

- основне живлення 380/220 В, 50 Гц від промислової мережі;
- резервне живлення від дизель-генераторів або ДБЖ;
- стабілізатори напруги для чутливого обладнання;
- фільтри мережевих завад для підвищення якості електроенергії.

Система захисту:

- грозозахист для зовнішніх ліній зв'язку;
- автоматичні вимикачі та запобіжники;
- система заземлення та вирівнювання потенціалів.

Інформаційні потоки. Схема демонструє двонаправлені інформаційні потоки.

Східні потоки (знизу-вгору):

- дані від датчиків надходять до системи обробки;
- результати обробки передаються до ПЛК;
- агреговані дані направляються до SCADA-системи.

Нисхідні потоки (згори-вниз):

- команди управління від ПЛК до виконавчих механізмів;
- налаштування параметрів датчиків;
- конфігураційні дані для польових пристроїв.

Принципи побудови:

- модульність - можливість нарощування функціональності;
- масштабованість - адаптація до різних обсягів виробництва;
- відмовостійкість - резервування критичних компонентів;
- відкритість - використання стандартних протоколів;
- безпека - багаторівневий захист від відмов та кібератак.

Переваги структури:

- розподілене управління знижує навантаження на центральний контролер;
- ієрархічна організація спрощує діагностику та обслуговування;
- стандартизовані інтерфейси забезпечують сумісність обладнання;
- можливість поетапної модернізації без зупинки виробництва.

Представлена структурна схема відображає сучасний підхід до побудови систем автоматизації процесів фільтрації, що забезпечує високу ефективність, надійність та безпеку технологічного процесу.

Рівень польових пристроїв включає датчики технологічних параметрів, виконавчі механізми та локальні контролери для безпосереднього взаємодії з обладнанням фільтрації. Датчики каламутності, рН, електропровідності та температури забезпечують безперервний моніторинг якості рідини на входах та виходах фільтрувальних апаратів. Інтелектуальні датчики з цифровими інтерфейсами HART або Foundation Fieldbus передають дані разом з діагностичною інформацією про стан сенсорних елементів. Розподілені модулі вводу-виводу розміщуються безпосередньо біля технологічного обладнання для мінімізації довжини кабельних ліній.

Програмовані логічні контролери середнього рівня інтегрують сигнали від польових пристроїв та реалізують базові алгоритми автоматичного регулювання процесу фільтрації. Модульна архітектура ПЛК дозволяє конфігурувати систему залежно від кількості контрольованих параметрів та складності технологічного процесу. Вбудовані ПІД-регулятори підтримують задані значення тиску, витрати та якості очищеної рідини незалежно від збурень процесу [17]. Функції безпеки блокують роботу обладнання при виявленні аварійних ситуацій та формують сигнали для аварійної зупинки процесу.

Система збору та обробки даних забезпечує централізоване управління розподіленими контролерами через промислові мережі Ethernet/IP або Profinet. SCADA-сервер агрегує дані від усіх підсистем фільтрації та формує єдину базу даних реального часу для моніторингу технологічного процесу. Архівний сервер зберігає історичні дані з можливістю компресії та індексації для швидкого пошуку та аналізу трендів. Веб-сервер надає доступ до даних через браузерний інтерфейс для віддаленого моніторингу системи. У таблиці представлена структура електронної системи фільтрації за рівнями автоматизації.

Таблиця 3.1 – Структура електронної системи фільтрації за рівнями автоматизації

| Рівень | Компоненти | Функції | Протоколи зв'язку |
|----------------|------------------------------|-------------------------|---------------------------|
| Польовий | Датчики, виконавчі механізми | Вимірювання, управління | HART, Foundation Fieldbus |
| Контрольний | ПЛК, локальні панелі | Регулювання, блокування | Modbus RTU/TCP |
| Диспетчерський | SCADA-сервер, робочі станції | Моніторинг, управління | Ethernet/IP, OPC UA |
| Підприємства | ERP-система, сервери БД | Планування, звітність | SQL, Web Services |

Підсистема управління насосним обладнанням включає перетворювачі частоти з векторним управлінням для плавного регулювання продуктивності насосів залежно від навантаження системи. Каскадне регулювання тиску забезпечує стабільну подачу рідини на фільтрувальні апарати незалежно від коливань споживання. Алгоритми енергооптимізації мінімізують споживання електроенергії шляхом автоматичного вибору оптимальної кількості працюючих насосів [9]. Захист двигунів від перевантаження та сухого ходу запобігає пошкодженню обладнання при аварійних режимах.

Система управління хімічним дозуванням автоматично подає коагулянти, флокулянти та дезінфектанти пропорційно витраті та якості оброблюваної рідини. Перистальтичні дозувальні насоси забезпечують точне дозування реагентів з похибкою не більше 1% від заданого значення. Контролери дозування розраховують необхідну кількість реагентів на основі результатів аналізу якості вхідної рідини та заданих параметрів очищення. Система контролю рівня реагентів сповіщає про необхідність поповнення баків та блокує дозування при їх вичерпанні.

Підсистема промивки фільтрів автоматизує процеси зворотної промивки та хімічної регенерації фільтрувальних матеріалів. Датчики перепаду тиску контролюють ступінь забруднення фільтрів та ініціюють промивку при досягненні граничних значень. Програмовані цикли промивки оптимізують витрати промивної води та хімічних реагентів залежно від типу фільтрувального матеріалу [13]. Автоматичні клапани керують потоками промивної рідини для забезпечення ефективної регенерації фільтрів.

Система діагностики та технічного обслуговування моніторить стан обладнання та прогнозує необхідність планового обслуговування. Аналіз вібрацій насосів та компресорів виявляє ознаки зносу підшипників та розбалансування роторів. Контроль струму споживання електродвигунів дозволяє діагностувати механічні несправності та погіршення характеристик обладнання. Експертна система формує рекомендації щодо оптимальних термінів заміни компонентів на основі аналізу трендів деградації.

Інтерфейс оператора включає промислові сенсорні панелі та робочі станції для візуалізації технологічного процесу та дистанційного управління обладнанням. Мнемосхеми відображають поточний стан всіх компонентів системи з кольоровою індикацією аварійних ситуацій. Тренди параметрів дозволяють аналізувати динаміку процесу та виявляти відхилення від нормальних режимів роботи. Система тривоги класифікує повідомлення за пріоритетом та забезпечує їх квітування оператором.

Підсистема звітності автоматично формує регулярні звіти про роботу системи фільтрації для внутрішнього контролю та регулюючих органів. Звіти включають статистичні дані про якість очищеної рідини, споживання реагентів та електроенергії, час роботи обладнання. Інтеграція з лабораторною інформаційною системою автоматично включає результати аналізів у звіти про якість продукції [4]. Експорт даних у стандартних форматах забезпечує сумісність з корпоративними системами управління.

Система резервування забезпечує безперервність технологічного процесу при виході з ладу основного обладнання. Гаряче резервування серверів SCADA з автоматичним переключенням гарантує час відновлення менше 30 секунд. Резервні канали зв'язку через різні фізичні середовища виключають втрату управління при пошкодженні основних мережевих кабелів. Дублювання критичних датчиків дозволяє продовжувати контроль процесу при відмові окремих сенсорів.

Підсистема енергоменеджменту оптимізує споживання електроенергії системою фільтрації шляхом координації роботи енергоємного обладнання. Алгоритми балансування навантаження розподіляють споживання протягом доби для уникнення пікових тарифів. Рекуперація енергії при промивці фільтрів зменшує загальне енергоспоживання системи [11]. Моніторинг якості електроенергії виявляє гармонічні спотворення та коливання напруги, що можуть вплинути на роботу чутливого обладнання.

Система кібербезпеки захищає промислову мережу від несанкціонованого доступу та кібератак. Мережевий екран сегментує промислову мережу від

корпоративної інфраструктури з контролем трафіку за білими списками. Система виявлення втручань моніторить мережеву активність та сповіщає про підозрілі дії. Криптографічний захист протоколів зв'язку забезпечує цілісність та автентичність передаваних даних між компонентами системи.

3.2 Економічна ефективність впровадження автоматизованої системи фільтрації рідини

Економічна ефективність впровадження автоматизованої системи фільтрації визначається співвідношенням інвестиційних витрат та отриманих економічних вигод протягом життєвого циклу обладнання. Капітальні витрати включають вартість обладнання, монтажних робіт, налагодження та навчання персоналу, а експлуатаційні витрати складаються з вартості енергоресурсів, реагентів, обслуговування та амортизації. Розрахунок економічної ефективності базується на методах дисконтування грошових потоків з урахуванням фактора часу та ризиків інвестиційного проекту.

Зниження витрат на електроенергію становить основну складову економічного ефекту від автоматизації систем фільтрації. Застосування перетворювачів частоти для регулювання швидкості насосів забезпечує економію електроенергії до 40% порівняно з нерегульованими системами. Оптимізація режимів промивки фільтрів зменшує споживання електроенергії на 15-25% за рахунок скорочення часу промивних циклів [7]. Автоматичне відключення неробочого обладнання в періоди низького навантаження додатково знижує енергоспоживання системи.

Оптимізація споживання хімічних реагентів досягається за рахунок точного дозування залежно від якості вхідної рідини та поточних параметрів процесу. Автоматичні системи дозування забезпечують економію коагулянтів та флокулянтів до 20-30% порівняно з ручним управлінням. Зменшення передозування реагентів знижує вторинне забруднення очищеної рідини та витрати на додаткову обробку. Моніторинг залишкових концентрацій

дезінфектантів оптимізує їх споживання при забезпеченні необхідного рівня знезараження. Ефективність впровадження автоматизації фільтрації представлена в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Економічні показники впровадження автоматизації фільтрації

| Показник | До автоматизації | Після автоматизації | Економія |
|---|------------------|---------------------|----------|
| Споживання електроенергії, кВт·год/м ³ | 0,95 | 0,62 | 35% |
| Витрати на реагенти, грн/м ³ | 4,8 | 3,4 | 29% |
| Трудовитрати персоналу, люд·год/добу | 48 | 24 | 50% |
| Втрати продукції через брак, % | 3,2 | 1,1 | 66% |
| Витрати на обслуговування, грн/рік | 285000 | 195000 | 32% |

Скорочення трудовитрат обслуговуючого персоналу досягається за рахунок автоматизації рутинних операцій контролю та управління технологічним процесом. Зменшення потреби в ручному контролі параметрів та регулюванні обладнання дозволяє скоротити штат операторів на 40-60%. Централізоване управління декількома системами фільтрації одним оператором підвищує продуктивність праці персоналу. Автоматичне формування звітності виключає затрати часу на ручне заповнення документації.

Підвищення якості очищеної продукції забезпечує додатковий економічний ефект за рахунок зменшення браку та повторної обробки. Стабілізація параметрів очищення знижує частку продукції, що не відповідає стандартам якості, з 5-8% до 1-2%. Безперервний контроль якості дозволяє оперативно коригувати параметри процесу для запобігання виробництву

неякісної продукції [9]. Покращення репутації підприємства через стабільну якість продукції сприяє збільшенню обсягів реалізації.

Зменшення витрат на технічне обслуговування обладнання досягається за рахунок впровадження систем предиктивної діагностики та планового обслуговування. Моніторинг стану обладнання дозволяє проводити ремонт за фактичним станом замість регламентованих інтервалів. Раннє виявлення несправностей запобігає дорогим капітальним ремонтам та продовжує ресурс обладнання. Оптимізація запасів запчастин на основі прогнозування потреби знижує витрати на складування.

Скорочення простоїв обладнання через автоматичну діагностику та сигналізацію несправностей збільшує річний фонд робочого часу та продуктивність системи. Швидке виявлення та локалізація аварійних ситуацій зменшує час відновлення роботи системи з 4-6 годин до 30-60 хвилин. Резервування обладнання та автоматичне перемикання на резервні агрегати забезпечує безперервність технологічного процесу [2]. Планування ремонтних робіт у періоди низького навантаження мінімізує втрати виробництва.

Зниження екологічних платежів досягається за рахунок покращення якості очищення стічних вод та зменшення скидів забруднюючих речовин. Стабільне дотримання нормативів якості очищених стоків виключає штрафні санкції екологічних органів. Оптимізація процесів очищення зменшує утворення осадів та відходів, що потребують утилізації. Документування параметрів очищення забезпечує прозорість звітності перед регулюючими органами.

Економія водних ресурсів забезпечується за рахунок оптимізації процесів промивки фільтрів та повторного використання очищеної води. Автоматичне управління циклами промивки зменшує витрати промивної води на 20-30% без погіршення ефективності регенерації фільтрів. Замкнуті цикли водопостачання з багаторазовим використанням очищеної води знижують споживання свіжої води [4]. Встановлення лічильників води з дистанційною передачею даних забезпечує точний облік споживання.

Підвищення надійності систем водопостачання та водовідведення забезпечує додатковий економічний ефект через зменшення ризиків техногенних аварій. Безперервний моніторинг параметрів та автоматичне блокування аварійних режимів запобігає пошкодженню обладнання та забрудненню навколишнього середовища. Страхові компанії надають знижки на страхування екологічних ризиків при наявності сертифікованих систем автоматичного контролю. Репутаційні втрати від екологічних інцидентів можуть значно перевищувати прямі збитки.

Інтеграція з корпоративними інформаційними системами забезпечує синергетичний ефект від оптимізації бізнес-процесів підприємства. Автоматична передача даних про споживання ресурсів до систем планування виробництва оптимізує закупівлі та логістику. Аналітика великих даних виявляє приховані резерви економії та можливості підвищення ефективності [5, с. 234]. Цифровізація процесів знижує адміністративні витрати та прискорює прийняття управлінських рішень.

Термін окупності інвестицій в автоматизацію систем фільтрації становить зазвичай 2,5-4 роки залежно від масштабу впровадження та специфіки технологічного процесу (табл. 3.3).

Таблиця 3.3 – Розрахунок терміну окупності інвестицій в автоматизацію

| Рік експлуатації | Інвестиційні витрати, тис. грн | Економічний ефект, тис. грн | Дисконтований дохід, тис. грн |
|------------------|--------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| 0 | 2850 | 0 | -2850 |
| 1 | 0 | 1240 | 1127 |
| 2 | 0 | 1350 | 1114 |
| 3 | 0 | 1420 | 1066 |
| 4 | 0 | 1480 | 1011 |
| 5 | 0 | 1520 | 943 |

Чиста приведена вартість проекту за 10 років експлуатації перевищує інвестиційні витрати в 2-3 рази при ставці дисконтування 10-12%. Індекс прибутковості інвестицій складає 1,8-2,5, що свідчить про високу економічну ефективність проектів автоматизації. Аналіз чутливості показує стійкість економічних показників до змін основних параметрів проекту.

Фінансування проектів автоматизації може здійснюватися за рахунок власних коштів підприємства, банківських кредитів або лізингових схем. Державні програми підтримки енергоефективності надають субсидії та пільгові кредити для впровадження ресурсозберігаючих технологій. Механізми енергосервісу дозволяють фінансувати проекти за рахунок гарантованої економії енергоресурсів. Лізинг обладнання розподіляє інвестиційні витрати протягом терміну експлуатації та включає технічне обслуговування.

3.3 Перспективи вдосконалення та оптимізації системи фільтрації

Перспективи розвитку систем фільтрації рідини тісно пов'язані з впровадженням інноваційних технологій штучного інтелекту, машинного навчання та цифрових двійників для оптимізації технологічних процесів. Адаптивні алгоритми управління на основі нейронних мереж забезпечують автоматичне налаштування параметрів фільтрації залежно від змін якості вхідної сировини та вимог до очищеної продукції [1]. Системи підтримки прийняття рішень інтегрують експертні знання з результатами математичного моделювання для оптимізації режимів роботи обладнання.

Технології машинного навчання дозволяють створювати прогностичні моделі для передбачення змін якості рідини та оптимального планування технічного обслуговування обладнання. Алгоритми глибокого навчання аналізують великі масиви історичних даних для виявлення прихованих закономірностей у роботі систем фільтрації. Методи ансамблевого навчання поєднують результати різних моделей для підвищення точності прогнозування. Онлайн-навчання дозволяє моделям адаптуватися до змін технологічного процесу в режимі реального часу.

Цифрові двійники систем фільтрації створюють віртуальні копії реального обладнання для симуляції різних сценаріїв роботи та оптимізації параметрів без ризику для технологічного процесу. Високоточні математичні моделі калібруються за даними реальної експлуатації для максимальної відповідності фізичним процесам. Віртуальні експерименти дозволяють тестувати нові алгоритми управління та оцінювати їх ефективність до впровадження на реальному обладнанні. Цифрові двійники забезпечують підготовку операторів через симуляції аварійних ситуацій.

Розвиток нанотехнологій відкриває нові можливості для створення високоефективних фільтрувальних матеріалів з унікальними властивостями. Наномембрани забезпечують селективне видалення специфічних забруднень на молекулярному рівні з мінімальним енергоспоживанням. Наночастинки з каталітичними властивостями інтенсифікують процеси розкладання органічних забруднень [12]. Самоочисні поверхні на основі фотокаталітичних матеріалів зменшують потребу в хімічній регенерації фільтрів.

Таблиця 3.4 – Перспективні технології оптимізації систем фільтрації

| Технологія | Переваги | Економічний ефект | Термін впровадження |
|------------------|-----------------------|-------------------------|---------------------|
| Штучний інтелект | Адаптивне управління | Економія 15-25% | 2-3 роки |
| Цифрові двійники | Оптимізація процесів | Зниження витрат 10-20% | 1-2 роки |
| Наномембрани | Селективна фільтрація | Підвищення якості 30% | 5-7 років |
| Блокчейн | Верифікація якості | Зниження контролю 40% | 3-5 років |
| Квантові сенсори | Надточні вимірювання | Покращення точності 50% | 7-10 років |

Інтеграція технологій доповненої реальності забезпечує інтуїтивне візуальне відображення невидимих параметрів технологічного процесу

безпосередньо на зображенні реального обладнання. AR-окуляри дозволяють операторам бачити температурні поля, потоки рідини та концентрації забруднень у вигляді кольорових накладок на реальні об'єкти. Інтерактивні інструкції з обслуговування відображаються безпосередньо на обладнанні для навчання персоналу. Дистанційна експертна підтримка через AR-технології дозволяє досвідченим фахівцям надавати консультації.

Блокчейн-технології забезпечують незмінність записів про якість очищеної рідини та прозорість звітності перед регулюючими органами. Розподілений реєстр зберігає криптографічно захищені дані про результати аналізів з мітками часу для запобігання фальсифікації. Смарт-контракти автоматизують виконання угод між постачальниками та споживачами очищеної води на основі об'єктивних показників якості. Токенізація екологічних активів створює нові механізми фінансування природоохоронних проєктів.

Квантові сенсори майбутнього покоління забезпечать надвисоку чутливість вимірювання концентрацій забруднень на рівні окремих молекул. Квантові магнітометри детектують магнітні поля, створювані іонами важких металів у розчинах. Квантові гравіметри вимірюють зміни щільності рідини з точністю до 10^{-12} г/см³ [16]. Квантова криптографія забезпечить абсолютну безпеку передачі даних між компонентами системи автоматизації.

Автономні роботи для обслуговування систем фільтрації виконуватимуть рутинні операції очищення, калібрування датчиків та заміни фільтрувальних елементів без участі людини. Мобільні роботи з маніпуляторами навігують у промислових приміщеннях для візуального контролю стану обладнання. Дрони здійснюють інспекцію важкодоступних ділянок трубопроводів та резервуарів. Роботи-лаборанти автоматизують відбір проб та лабораторний аналіз якості рідини.

Біотехнології інтегруються з традиційними методами фільтрації для створення гібридних систем очищення з використанням мікроорганізмів. Біореактори з іммобілізованими ферментами забезпечують селективне розкладання специфічних органічних забруднень. Генетично модифіковані

бактерії створюються для деградації стійких ксенобіотиків та важких металів. Біосенсори на основі живих клітин забезпечують високочутливе виявлення токсичних речовин.

Енергонезалежні технології фільтрації використовують відновлювані джерела енергії та фізичні процеси без зовнішнього енергопостачання. Сонячні дистилятори забезпечують очищення води в районах з обмеженим доступом до електроенергії. Вітрові насоси створюють тиск для роботи мембранних систем без електричних двигунів [11]. Гравітаційні фільтри використовують потенціальну енергію для створення робочого тиску.

Модульні мобільні системи фільтрації забезпечують швидке розгортання очисних потужностей для ліквідації наслідків екологічних аварій та забезпечення населення якісною питною водою в надзвичайних ситуаціях. Контейнерні установки включають повний комплект обладнання для механічної, хімічної та біологічної очистки з автономним енергопостачанням. Швидкокомпоновані з'єднання дозволяють розгорнути систему протягом 2-4 годин. Супутниковий зв'язок забезпечує дистанційний моніторинг роботи мобільних установок.

Персоналізовані системи очищення адаптуються до індивідуальних потреб споживачів та специфічних вимог технологічних процесів. Штучний інтелект аналізує склад вхідної рідини та автоматично конфігурує оптимальну схему очищення. Модульна архітектура дозволяє комбінувати різні методи фільтрації залежно від типу забруднень. Самонавчальні алгоритми адаптуються до змін якості вхідної сировини та оптимізують параметри процесу.

Циркулярна економіка в системах фільтрації передбачає максимальне повторне використання відходів та побічних продуктів очищення. Осади після фільтрації переробляються у добрива або будівельні матеріали замість утилізації на полігонах. Регенерація фільтрувальних матеріалів продовжує їх ресурс та зменшує утворення відходів [8]. Замкнуті цикли водокористування мінімізують споживання свіжої води та скидання стічних вод.

Соціальні інновації включають залучення громадськості до моніторингу якості води через мобільні додатки та краудсорсинг. Громадянська наука дозволяє збирати дані про стан водних об'єктів від волонтерів з портативними аналізаторами. Освітні програми підвищують екологічну свідомість населення та сприяють раціональному водокористуванню. Партнерство з місцевими громадами забезпечує сталу експлуатацію очисних споруд.

Регуляторні інновації включають розробку нових стандартів якості води з урахуванням нових типів забруднень та методів очищення. Адаптивне регулювання дозволяє оперативно змінювати нормативи залежно від результатів наукових досліджень. Цифрові дозволи спрощують процедури ліцензування та контролю дотримання екологічних вимог. Міжнародна гармонізація стандартів сприяє розвитку глобального ринку технологій очищення води.

ВИСНОВКИ

Проведене дослідження електронних систем фільтрації рідини на промислових підприємствах підтверджує актуальність впровадження сучасних технологій автоматизації для підвищення ефективності процесів очищення. Аналіз теоретичних основ показав, що інтеграція різних методів фільтрації з електронними системами контролю дозволяє досягти стабільних показників якості очищеної продукції при оптимальному споживанні ресурсів. Класифікація електронних систем контролю якості рідин за принципами роботи та сферами застосування виявила широкий спектр технічних рішень для різних галузей промисловості.

Нормативно-правова база експлуатації систем фільтрації в Україні характеризується поступовою гармонізацією з європейськими стандартами, що створює додаткові стимули для модернізації очисного обладнання. Встановлені вимоги до проектування, монтажу та експлуатації систем фільтрації забезпечують безпеку персоналу та відповідність екологічним нормативам. Розвиток цифрових технологій у сфері нормативного регулювання сприяє спрощенню процедур ліцензування та контролю за дотриманням стандартів якості.

Технічні характеристики компонентів електронних систем фільтрації демонструють високий рівень розвитку сенсорної техніки та засобів автоматизації. Датчики моніторингу параметрів рідини забезпечують точність вимірювань до 0,02 рН для кислотності та 2% для електропровідності при швидкості відгуку від 2 до 30 секунд. Автоматизовані системи керування на базі програмованих логічних контролерів реалізують складні алгоритми управління з частотою сканування 1-10 мілісекунд, що забезпечує стабільність технологічного процесу.

Інтеграція IoT-технологій у системи фільтрації відкриває нові можливості для дистанційного моніторингу та прогнозової аналітики. Безпроводні протоколи

LoRaWAN та NB-IoT забезпечують передачу даних на відстані до 15 км з автономністю роботи сенсорів до 15 років. Хмарні платформи дозволяють обробляти дані від тисяч пристроїв одночасно, а алгоритми машинного навчання виявляють приховані закономірності для оптимізації процесів очищення.

Розроблена структурна схема електронної системи фільтрації включає сім основних функціональних блоків: датчики та сенсори, обробка сигналів, центральне управління, виконавчі механізми, індикація та управління, зв'язок та живлення. Модульна архітектура забезпечує масштабованість системи від 32 до 128 каналів вводу-виводу залежно від складності технологічного процесу. Резервування обладнання та дублювання каналів зв'язку гарантують безперервність роботи системи при відмовах окремих компонентів.

Економічна ефективність впровадження автоматизованих систем фільтрації характеризується терміном окупності 2,5-4 роки при індексі прибутковості 1,8-2,5. Економія електроенергії становить до 35%, реагентів - до 29%, а трудовитрат персоналу - до 50% порівняно з традиційними системами управління. Зниження втрат продукції через брак з 3,2% до 1,1% забезпечує додатковий економічний ефект від стабілізації якості очищення. Витрати на технічне обслуговування зменшуються на 32% завдяки впровадженню систем предиктивної діагностики.

Перспективи розвитку систем фільтрації пов'язані з впровадженням технологій штучного інтелекту, цифрових двійників та нанотехнологій. Адаптивні алгоритми управління на основі нейронних мереж забезпечать економію ресурсів до 25%, а наномембрани підвищують селективність очищення на 30%. Квантові сенсори майбутнього покоління дозволять детектувати забруднення на рівні окремих молекул з точністю на порядки вищою за сучасні технології.

Впровадження електронних систем фільтрації рідини на промислових підприємствах є економічно обґрунтованим та технічно реалізованим рішенням для підвищення ефективності виробництва. Інтеграція сучасних технологій автоматизації, IoT та штучного інтелекту створює синергетичний ефект, що

забезпечує конкурентні переваги підприємств та відповідність сучасним екологічним вимогам. Подальший розвиток галузі буде визначатися інноваційними технологіями та цифровою трансформацією промислових процесів.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Boriak V. Порівняльний аналіз якості фільтрації і прогнозування двоконтурного і триконтурного адаптивних експоненціальних фільтрів. Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. 2019. Т. 1, № 53. С. 45–49.
2. Гунько І. В. та ін. Комплексна система фільтрації для замкнених гідросистем сільськогосподарського обладнання. Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2021. № 1 (112). С. 113–125.
3. Грек В. М. Система автоматизованого керування станції рекуперації етилацетату. 2021. <https://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/83895>, (дата звернення 25.05.2024).
4. Дейниченко Г. В. та ін. Звіт про науково-дослідну роботу "Дослідження процесів мембранного розділення полікомпонентних рідинних систем у харчовій промисловості" (остаточний). 2022. <https://repo.btu.kharkov.ua/handle/123456789/55161>, (дата звернення 26.05.2024).
5. Дейниченко Г. В. та ін. Сучасні технології баромембранних процесів у харчовій промисловості. Обладнання та технології харчових виробництв. 2021. Т. 43, № 2. С. 86–93.
6. Єрмошин В. В., Карасюк Г. О., Гончар С. Ф. Дослідження кіберризиків автоматизованих систем управління технологічними процесами. Elektronnoe Modelirovanie. 2022. Т. 44, № 1. https://www.researchgate.net/profile/Serhii-Honchar/publication/360435524_Research_of_Current_Cyber_Risks_of_Automated_Technological_Process_Control_Systems/links/62c2d10bbe9e947a47ab8de0/Research-of-Current-Cyber-Risks-of-Automated-Technological-Process-Control-Systems.pdf, (дата звернення 26.05.2024).
7. Іваненко О. М. Синтез системи автоматичного керування процесом фільтрації напоїв на базі мікропроцесорної техніки. 2021. <https://reposit.nupp.edu.ua/handle/PoltNTU/13657>, (дата звернення 28.05.2024).

8. Коваленко О. О. Виробництво парфумів на спиртовій основі з розробкою парфумерної композиції. 2024.

<https://dSPACE.nuft.edu.ua/server/api/core/bitstreams/12e46178-a265-4ebb-b16c-09f7e836102c/content>, (дата звернення 28.05.2024).

9. Ларіонова І. Ю. Автоматизована система керування технологічним процесом виробництва парфумерних рідин. 2019.

<https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/77d3cdf4-7b0c-4f62-9633-59eff7768254/content>, (дата звернення 29.05.2024).

10. Мельнічук Д. Е. Застосування баромембранних процесів в технологіях харчових виробництв. 2024.

<https://dSPACE.nuft.edu.ua/server/api/core/bitstreams/e40566e6-d996-46d7-82a2-51fda3b301f2/content>, (дата звернення 29.05.2024).

11. Molchanov V. F., Chernyshov A. V. Постановка нестационарної граничної задачі фільтрації рідини у пористому середовищу. HERALD of the Donbass State Engineering Academy. 2019. № 2 (46). С. 150–154.

12. Навроцький Н. А. Розробка системи автоматизації процесу бродиння та фільтрації пивного сула. 2022.

<https://dSPACE.nuft.edu.ua/server/api/core/bitstreams/fa0b40a4-8a59-414a-96fd-3d079e23ba60/content>, (дата звернення 30.05.2024).

13. Осипенко Б. А. Розробка системи автоматизації процесу фільтрації та пастеризації пива : дис. 2024.

<https://dSPACE.nuft.edu.ua/server/api/core/bitstreams/ebdce3de-eea3-4d1d-b104-794d1f6bcbfd/content>, (дата звернення 30.05.2024).

14. Паращак О. М. Фільтрування вимірюваних параметрів в автоматизованих системах управління транспортом нафти при перехідних процесах у нафтопроводі. // Збірник тез доповідей підготовлено за матеріалами Міжнародної наукової інтернет-конференції (випуск 70) 22–23 вересня 2022 р. на сайті www.konferenciaonline.org.ua. 2022. С. 62.

15. Пиляк Н. В., Стахів В. А. Розробка та дослідження автоматизованої системи керування фільтрувальною установкою : кваліф. робота магістра.

Тернопіль : ТНТУ, 2021. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/36512>, (дата звернення 31.05.2024).

16. Подворний В. Т. Програмно-апаратна система дослідження екологічного стану водного середовища. 2025. <https://openarchive.nure.ua/entities/publication/05785682-aff8-4b12-b9b5-3765d3edd100>, (дата звернення 31.05.2024).

17. Розганяєв В. О. Автоматизація процесу налагодження фільтрації рідин промисловими фільтрами. 2019. <https://krs.chmnu.edu.ua/jspui/handle/123456789/552>, (дата звернення 02.06.2024).

18. Стецюк П. А., Багликова Т. О. Ефективність управління інноваційною діяльністю підприємства. // Економіка. Менеджмент. Бізнес. 2020. № 3. С. 32–38.

19. Стріха Л. О. та ін. Дослідження оптимізованої технології виробництва олії соняшникової та якісних показників продукції. // Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки. 2021. № 4. С. 54–60.

20. Хадарцев О. В., Моргун А. В. Оцінка та удосконалення системи управління проектами на підприємстві. 2019. <https://reposit.nupp.edu.ua/handle/PoltNTU/14826>, (дата звернення 02.05.2024).