

**МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА**

МР.АКПМ-17.00.00.000 ПЗ

Група АКПМ-24-1

**Олена Кріль**

**2025**

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

Кріль Олена Володимирівна

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 681.5:628.3

(індекс)

## МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Розроблення системи автоматизації процесу очищення стічних вод промислових

(назва роботи)

підприємств

Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(назва освітньої програми)

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

(шифр і назва спеціальності)

### Консультант з нормоконтролю

асистент

(посада)

(підпис)

(дата)

Л.І. Лагойда

(ініціали та прізвище)

### Здобувач освітнього ступеня

АКПМ-24-1

(шифр групи)

(підпис)

(дата)

О.В. Кріль

(ініціали та прізвище)

### Науковий керівник

к.т.н., доцент

(науковий ступінь, вчене звання)

Р.Б. Скрип'юк

(підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

### Допущено до захисту

#### Завідувач кафедри

доцент, к.т.н.

(посада)

(підпис)

(дата)

А.І. Лагойда

(ініціали та прізвище)

### Рецензент

к.т.н., доцент

(посада)

(підпис)

(дата)

В.С. Борин

(ініціали та прізвище)

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

**Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу**

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Освітній рівень магістерський

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

(шифр і назва)

робототехніка

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри АКІТ

(А.І. Лагойда)

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ року

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

Кріль Олені Володимирівні

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення системи автоматизації процесу очищення стічних вод промислових підприємств

керівник роботи Скрип'юк Ростислав Богданович, канд. техн. наук, доцент

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

затвержені наказом закладу вищої освіти від «10» листопада 2025 року № 699/7

2. Строк подання студентом роботи 10.12.2025

3. Вихідні дані до роботи Опис технологічного процесу, технологічна схема, статті науково – технічних журналів, збірники, підручники.

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

1. Аналіз процесу підготовки та очищення стічних вод промислових підприємств

2. Розроблення системи керування процесу очищення промислових вод

3. Вибір комплексу технічних засобів автоматизації процесу очищення стічних вод

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

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання 30.10.2024

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз процесу підготовки та очищення стічних вод промислових підприємств	30.09.2025	
3	Розроблення системи керування процесу очищення промислових вод	1.11.2025.	
3	Вибір комплексу технічних засобів автоматизації процесу очищення стічних вод	01.12.2025	

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Кріль О.В. \_\_\_\_\_  
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

Скрип'юк Р.Б. \_\_\_\_\_  
(прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

У магістерській роботі проведено комплексне дослідження процесів підготовки та очищення промислових вод, спрямоване на підвищення ефективності роботи водоочисних систем та впровадження сучасних засобів автоматизації. Розглянуто технології підготовки води, охарактеризовано властивості вихідної води та визначено вимоги до її якості відповідно до потреб промислових підприємств. Проаналізовано фізико-хімічні, механічні та біологічні методи очищення, визначено ключові фактори, що впливають на ефективність водопідготовки, та сформовано технічні вимоги до майбутньої системи керування.

У роботі розроблено математичну модель технологічного процесу очищення стічних вод, виконано ідентифікацію об'єкта керування та побудовано передавальні функції окремих елементів системи — об'єкта регулювання, регулюючого клапана та датчика рівня. На основі цих даних синтезовано систему автоматичного керування рівнем і витратою води та визначено параметри ПІ-регулятора. Моделювання у середовищі MATLAB/Simulink підтвердило ефективність запропонованої системи та її здатність забезпечувати стабільність технологічного процесу в різних умовах експлуатації.

Також обґрунтовано вибір технічних засобів автоматизації, включаючи програмований логічний контролер, датчики, насосне обладнання, фільтрувальні елементи та електромагнітну арматуру. Підібраний комплекс обладнання відповідає вимогам надійності, енергоефективності та економічної доцільності. Результати роботи можуть бути використані для модернізації існуючих систем очищення промислових вод та впровадження нових автоматизованих рішень, спрямованих на підвищення екологічної безпеки та ефективності виробництва.

**Ключові слова:** математична модель, передавальна функція, ПІ-регулятор, очищення промислових вод, технічні засоби автоматизації.

## ANNOTATION

In the master's thesis, a comprehensive study of industrial water treatment and purification processes aimed at improving the efficiency of water treatment systems and implementing modern automation tools. Various water preparation technologies are examined, the properties of the incoming water are described, and the quality requirements according to industrial needs are defined. Physico-chemical, mechanical, and biological purification methods are analyzed, key factors influencing the efficiency of water treatment are identified, and technical requirements for the future control system are formulated.

A mathematical model of the technological process of wastewater treatment has been developed, including identification of the control object and construction of transfer functions for individual system components — the controlled object, the control valve, and the level sensor. Based on these results, an automatic control system for water level and flow rate has been synthesized, and the parameters of the PI controller have been determined. Modeling in MATLAB/Simulink confirmed the effectiveness of the proposed system and its ability to ensure the stability of the technological process under various operating conditions.

The selection of automation equipment has also been substantiated, including a programmable logic controller, sensors, pumping equipment, filtration elements, and electromagnetic valves. The chosen set of devices meets the requirements of reliability, energy efficiency, and economic feasibility. The results of the study can be used to modernize existing industrial water treatment systems and to implement new automated solutions aimed at improving environmental safety and production efficiency.

**Keywords:** mathematical model, transfer function, PI controller, industrial water treatment, automation equipment.

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП.....</b>	<b>9</b>
<b>РОЗДІЛ 1</b>	
<b>АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ ПІДГОТОВКИ ВОДИ ТА ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ.....</b>	<b>14</b>
1.1. Характеристика процесу підготовки води.....	14
1.2. Система очищення води у виробництві.....	16
1.3. Вимоги до підготовки води для підприємства.....	17
1.4. Стадії очищення води у виробництві.....	18
1.5. Обладнання для очищення води для виробництва.....	19
1.6. Фізико-хімічні методи очищення води.....	20
1.6.1. Видалення заліза.....	20
1.6.2. Окиснення.....	20
1.6.3. Коагуляція та флокуляція.....	21
1.6.4. Фільтрація.....	22
1.6.5. Дезінфекція та стерилізація.....	23
1.6.6. Іонообмінні смоли.....	24
1.6.7. Обробка активованим вугіллям.....	25
1.6.8. Метод розділення з використанням мембранних фільтрів.....	27
Висновки до розділу 1.....	28
<b>РОЗДІЛ 2</b>	
<b>РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСУ ОЧИЩЕННЯ ПРОМИСЛОВИХ ВОД.....</b>	<b>29</b>
2.1. Основні методи очищення промислових стічних вод.....	30
2.1.1. Механічне очищення стічних вод .....	30
2.1.2. Фізико-хімічний метод очищення стічних вод.....	31
2.1.3. Біологічний метод очищення стічних вод .....	32
2.1.4. Типова технологічна схема повної очистки стічних вод .....	32

2.2. Дослідження технологічної схеми процесу очищення промислових стічних вод .....	34
2.3. Розроблення функціональної схеми автоматизації .....	36
2.4. Розробка системи керування (математичної моделі) технологічного процесу очищення промислових вод .....	36
2.4.1. Ідентифікація об'єкта керування .....	37
2.4.2. Зміна рівня рідини.....	37
2.4.3. Нелінійне диференціальне рівняння об'єкта керування .....	37
2.4.4. Лінеаризоване диференціальне рівняння об'єкта керування.....	38
2.4.5. Розрахунок параметрів передавальної функції об'єкта управління.....	40
2.4.6. Система управління.....	40
2.4.7. Розрахунок передавальної функції виконавчого механізму і коефіцієнта передачі регулюючого органу вхідної витрат.....	41
2.4.8. Оцінка коефіцієнта передавання датчика рівня.....	42
2.4.9. Логарифмічні амплітудно-фазові частотні характеристики розімкненої системи та її перехідна характеристика.....	43
2.4.10. Розрахунок передавальної функції ПІ-регулятора.....	44
2.4.11. Моделювання системи керування в середовищі MatLAB (Simulink)....	45
Висновки до розділу 2.....	47

## **РОЗДІЛ 3**

<b>ВИБІР КОМПЛЕКСУ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД.....</b>	<b>49</b>
3.1. Обґрунтування вибору комплексу технічних засобів .....	49
3.1.1. Вибір програмованого логічного контролера.....	50
3.1.2. Вибір датчика рівня.....	54
3.1.3. Вибір насосу.....	58
3.1.4. Вибір фільтру.....	60
3.1.5. Вибір електромагнітного клапана.....	63

Висновки до розділу 3.....	64
<b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....</b>	<b>66</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>	<b>68</b>

## ВСТУП

### **Актуальність теми.**

Сучасний розвиток промисловості супроводжується постійним збільшенням обсягів водоспоживання та зростанням кількості стічних вод, що містять широкий спектр хімічних, органічних та мінеральних забруднень. Неefективне очищення таких вод призводить до деградації водних ресурсів, порушення екологічного балансу та значного погіршення стану довкілля. У контексті глобальних екологічних викликів та переходу України до європейських стандартів охорони навколишнього середовища питання підвищення ефективності водопідготовки та очищення промислових стоків набуває особливої актуальності.

Промислові підприємства різних галузей – хімічної, харчової, фармацевтичної, металургійної та інших – пред'являють високі вимоги до якості води, яка використовується у технологічних процесах. Недостатньо очищена вода знижує надійність обладнання, збільшує енергетичні витрати, спричиняє корозійні процеси та утворення відкладень, що призводить до зменшення продуктивності та підвищення експлуатаційних витрат. Тому впровадження сучасних методів очищення води є необхідною умовою стабільної роботи промислових об'єктів.

Особливої важливості набуває автоматизація систем очищення, яка забезпечує безперервний контроль параметрів води, оптимальне регулювання технологічних процесів та оперативне реагування на зміни умов роботи. Використання автоматизованих систем дозволяє підвищити точність дозування реагентів, стабілізувати якість очищення, зменшити споживання енергоресурсів та мінімізувати людський фактор. Застосування сучасних засобів автоматизації та інтелектуальних алгоритмів керування робить процес очищення більш керованим, ефективним і безпечним.

Таким чином, тема дослідження є актуальною, оскільки поєднує дві ключові для сучасного виробництва складові: екологічну безпеку та промислову ефективність. Упровадження раціонально побудованої автоматизованої системи очищення промислових стічних вод є необхідним кроком для забезпечення сталого

розвитку підприємств, підвищення їх конкурентоспроможності та дотримання екологічних норм, що відповідає стратегічним пріоритетам України.

### **Обґрунтування вибору теми дослідження**

У промислових підприємствах процес водопідготовки та очищення стічних вод є обов'язковою складовою технологічного циклу, оскільки саме якість очищення визначає рівень екологічної безпеки, відповідність вимогам природоохоронного законодавства та ефективність подальшої роботи виробничих систем.

Зростання техногенного навантаження на навколишнє середовище, посилення нормативних вимог до скидання стічних вод і необхідність мінімізації впливу промисловості на природні ресурси потребують впровадження сучасних, надійних та економічно доцільних методів очищення. Традиційні системи, що працюють без автоматизації або з мінімальним її рівнем, не здатні забезпечити стабільну якість очищення, своєчасне реагування на коливання параметрів середовища, а також ефективне використання реагентів та енергоресурсів.

Автоматизація процесу очищення стічних вод вирішує ці проблеми шляхом:

- забезпечення безперервного контролю параметрів технологічного процесу;
- підвищення точності регулювання витрати, рівня, тиску та інших показників;
- зменшення ризику аварійних ситуацій;
- скорочення експлуатаційних витрат та людського фактору;
- підвищення стабільності та прогнозованості процесу очищення.

Крім того, сучасні системи автоматизації дозволяють інтегруватися в загальнозаводські системи моніторингу, що сприяє підвищенню ефективності управління підприємством та забезпечує відповідність європейським стандартам якості.

Таким чином, тема дослідження є актуальною, практично значущою та спрямованою на вирішення важливої технічної та екологічної проблеми, що й обумовлює доцільність її вибору.

### **Мета і завдання дослідження.**

Метою дослідження є розроблення ефективної системи автоматизації технологічного процесу очищення стічних вод промислових підприємств, що забезпечує підвищення якості очищення, зменшення енергетичних та експлуатаційних витрат, а також підвищення надійності та стабільності роботи очисних споруд.

### **Завдання дослідження**

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі основні завдання:

1. Проаналізувати типову технологічну схему очищення стічних вод та визначити ключові параметри, які підлягають контролю і регулюванню.
2. Розробити функціональну схему автоматизації технологічного процесу.
3. Побудувати математичну модель об'єкта керування та ідентифікувати основні параметри системи.
4. Розрахувати передавальні функції елементів системи.
5. Провести моделювання системи автоматизації в середовищі MATLAB/Simulink для оцінки її ефективності та стійкості.
6. Обґрунтувати та вибрати комплекс технічних засобів автоматизації.

*Об'єктом дослідження* є технологічний процес очищення стічних вод промислових підприємств.

*Предметом дослідження* є методи, засоби та алгоритми автоматизації технологічного процесу очищення стічних вод, а також процеси контролю та регулювання параметрів (рівня, витрати, тиску тощо) у системі очищення.

### **Методи дослідження**

У роботі застосовано комплекс теоретичних та практичних методів дослідження, спрямованих на аналіз процесів підготовки та очистки промислових стічних вод, а також на розроблення системи автоматизованого керування. Використано математичне моделювання - побудовано математичну модель об'єкта керування, включно з диференціальними рівняннями, передавальними функціями та параметрами регулятора; методи ідентифікації об'єкта - використано для

визначення динамічних характеристик системи, зокрема рівня рідини та поведінки керованих елементів; комп'ютерне моделювання (MATLAB/Simulink) - проведено імітаційне моделювання роботи системи керування з метою оцінювання її стійкості, швидкодії та точності.

### **Наукова новизна отриманих результатів**

Наукова новизна отриманих результатів полягає у вдосконаленні математичного опису технологічного процесу очищення промислових стічних вод та уточненні динамічних характеристик окремих елементів системи автоматичного керування та визначенні передавальних функцій ключових елементів системи керування — об'єкта регулювання, виконавчого механізму (регулюючого клапана) та датчика рівня. Це забезпечує можливість синтезу оптимальних законів керування, підвищує точність регулювання та забезпечує стабільну роботу системи в широкому діапазоні режимів

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами.**

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами полягає у її відповідності актуальним напрямкам досліджень, що стосуються екологічної безпеки, раціонального використання водних ресурсів та впровадження сучасних технологій очищення промислових стічних вод. Робота узгоджується з державними і галузевими програмами щодо зменшення техногенного навантаження на довкілля та підвищення ефективності водоочисних систем на підприємствах.

Дослідження відповідає стратегічним планам розвитку екологічного контролю та автоматизації виробничих процесів, які передбачають удосконалення методів очищення води, оптимізацію технологічних схем та впровадження інтелектуальних систем керування.

### **Практичне значення отриманих результатів**

Проведено вибір комплексу технічних засобів автоматизації, що забезпечує раціональне й технічно обґрунтоване визначення параметрів обладнання — контролера, датчика рівня, насоса, фільтра та електромагнітного клапана. Це дозволяє підвищити надійність системи, оптимізувати витрати на її впровадження

та експлуатацію, а також забезпечити точне й стабільне регулювання технологічних процесів.

Створено функціональну схему автоматизації, яка відображає взаємозв'язки між основними елементами технологічної установки, визначає точки контролю та регулювання, а також забезпечує можливість оперативного керування та моніторингу процесу очищення стічних вод.

### **Структура та обсяг магістерської роботи.**

Робота складається зі вступу, трьох основних розділів, висновків і списку використаних джерел, що охоплює 70 сторінку основного тексту, включає 25 рисунків, 5 таблиць і 17 літературних джерел .

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ ПІДГОТОВКИ ВОДИ ТА ОЧИЩЕННЯ СТИЧНИХ ВОД ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ

#### 1.1. Характеристика процесу підготовки води

Водопідготовка у виробництві відіграє надзвичайно важливу роль у функціонуванні підприємств і загальному розвитку економіки країни. Якість води, що використовується у технологічних процесах, безпосередньо впливає на ефективність виробництва, довговічність обладнання, витрати ресурсів та конкурентоспроможність кінцевої продукції. Очищення води на виробництві є складовою частиною промислової водопідготовки — комплексної галузі, що об'єднує технології, методи та технічні засоби, спрямовані на забезпечення підприємств водою заданих параметрів.

Сучасна промисловість охоплює широкий спектр напрямів, у яких чиста та стабільно підготовлена вода є ключовим елементом виробничого циклу. Зокрема, вона необхідна там, де технологія висуває жорсткі вимоги до хімічного складу, прозорості, мінералізації чи мікробіологічної чистоти. Інтенсивний розвиток промислових ринків змушує підприємства впроваджувати новітні методи та рішення, щоб залишатися конкурентоздатними. У зв'язку з цим модернізація систем водопідготовки набуває стратегічного значення, адже від неї залежить не лише стабільність роботи виробничих ліній, а й відповідність міжнародним стандартам якості.

Заводи та фабрики різних галузей постійно оновлюють технологічний парк, переходять на енергоефективніші та екологічно безпечніші схеми роботи. До таких модернізацій належать і вдосконалені системи очищення води. Вони дозволяють зменшити кількість технологічних збоїв, скоротити витрати на ремонт обладнання та забезпечити стабільний випуск продукції високої якості.

Специфіка водопідготовки залежить від типу виробництва, природних умов регіону, сировинної бази та технічних особливостей технологічного циклу. Наприклад, підприємства харчової та фармацевтичної промисловості встановлюють особливо високі вимоги до води, адже вона фактично є складовою їїнього продукту. Вода повинна бути не просто очищеною, а мати стабільні, контрольовані параметри, що гарантують безпеку та якість кінцевого виробу.

У багатьох сферах виробнича вода виконує роль повноцінної сировини. Вона використовується у виробництві напоїв, на лініях розливу питної та мінеральної води, під час приготування лікарських препаратів, у процесах змішування, екстракції та розчинення різних компонентів. У мікроелектроніці, лабораторних дослідженнях, оптичному виробництві та високоточних видах промисловості якість води має особливо вирішальне значення: навіть незначні домішки можуть викликати дефекти продукції або порушити роботу тонкого технологічного обладнання.

Окрему роль відіграє вода в системах тепло- та парогенерації. У таких установках високий вміст солей чи механічних частинок може викликати утворення накипу, корозію, перегрів обладнання або його передчасний вихід з ладу. Тому стабільно підготовлена вода є основою безпечної та довготривалої експлуатації дорогих промислових агрегатів.

Важливо враховувати, що строк служби технологічного обладнання значною мірою залежить від якості води, яка в ньому циркулює. Надлишкова твердість, корозійноактивні домішки, завислі частинки чи мікроорганізми можуть провокувати різноманітні небажані наслідки — від поступового погіршення продуктивності до серйозних аварійних ситуацій. Саме тому вхідна вода повинна містити мінімальну кількість солей, органічних домішок та мікромеханічних включень, що дозволяє запобігти корозійним процесам, блокуванню трубопроводів та передчасному руйнуванню елементів системи.

Тому якісна промислова водопідготовка є важливим елементом сучасного виробництва. Вона забезпечує не лише стабільний технологічний процес, але й сприяє підвищенню економічної ефективності, енергоощадності та екологічної

безпеки підприємства. У сучасних умовах, коли стандарти якості й вимоги до продукції невідмінно зростають, роль правильно організованої водопідготовки стає ще важливішою.

## **1.2. Система очищення води у виробництві**

Виробничі підприємства споживають різні обсяги очищеної та підготовленої води залежно від масштабу власного виробництва. Одні підприємства використовують воду для технічних цілей, інші – для питних або сировинних. Обладнання для очищення води на виробництві застосовується в таких галузях промисловості:

1. Підігрівальна вода для котелень і теплових станцій. Для стабільної роботи парових і водогрійних котлів потрібна максимально пом'якшена вода жорсткістю менше 2°Ж.

2. На харчових виробництвах продуктів харчування та напоїв. Вода визначає смакові якості продукції та термін її придатності.

3. Для зволожувачів повітря промислового масштабу. Високий вміст у воді твердих солей призводить до утворення нальоту та мінеральних відкладень, що скорочує термін служби обладнання.

4. У виробництві нано- і мікросхем. Дуже важливо отримати воду з мінімальною електропровідністю для точності розрахунків і правильної роботи елементів.

5. На фармацевтичному виробництві для приготування косметики, ліків і медичних розчинів. Здоров'я людини з ослабленим імунітетом безпосередньо залежить від якості лікарських препаратів і розчинів для ін'єкцій.

6. Для виробництва бутильованої води. Така вода повинна мати визначене якісне значення за жорсткістю, вмістом заліза, солей.

7. Для лабораторних випробувань. Результат досліджень залежить від точності експерименту та якості реагентів.

8. Хімічні та нафтові заводи, підприємства з виробництва ламінату, картону й паперу, скла, гальванічні виробництва, молочні заводи – усюди потрібна вода найвищої якості у промислових масштабах [1].

### **1.3. Вимоги до водопідготовки для підприємства**

На кожному виробничому підприємстві встановлюються власні, чітко регламентовані вимоги до якості води. Ці вимоги формуються відповідно до технологічної специфікації заводу, особливостей обладнання та характеристик кінцевої продукції. У різних галузях промисловості вода виконує різні функції — від безпосередньої участі в технологічному процесі до допоміжної ролі у вигляді теплоносія, розчинника або середовища для промивання та охолодження. Саме тому параметри води повинні суворо відповідати нормам, що забезпечують стабільність і безпечність технологічного циклу.

Одними з найбільш вимогливих є галузі мікроелектроніки та фармацевтичного виробництва. Тут необхідна вода з надвисоким ступенем чистоти, вільна не лише від солей та органічних домішок, а й від найменших мікрочастинок і мікробіологічних забруднень. Вона повинна мати дуже високий питомий електричний опір — показник, що характеризує ступінь її очищення. Для таких технологічних процесів застосовують воду з опором у діапазоні 0,1–18 мегом-сантиметрів, що фактично відповідає рівню, близькому до лабораторно чистої або навіть ультрачистої води. Використання води нижчої якості в цих сферах здатне спричинити дефекти продукції, порушення хімічних реакцій, деградацію чутливих матеріалів або збій у роботі високоточних приладів.

На теплових електростанціях, у парових котлах та інших енергетичних установках ключовим параметром є жорсткість води. Високий вміст кальцію та магнію призводить до утворення накипу, що значно знижує теплопровідність, сприяє перегріву поверхонь та пришвидшує зношування обладнання. Тому вода, що подається до таких систем, повинна мати максимально низьку жорсткість. М'яка або знесолена вода забезпечує стабільну роботу парогенераторів, підвищує

їхню енергоефективність та подовжує строк служби обладнання, що є критично важливим у енергетичній галузі.

Не менш значущим параметром є водневий показник, або кислотно-лужний баланс. У багатьох виробничих процесах він повинен залишатися в межах від чотирьох до семи одиниць. Відхилення від цих значень може викликати небажані хімічні реакції, прискорене руйнування обладнання або порушення технологічних операцій. Контроль рН є важливим також для підприємств харчової промисловості, у виробництві напоїв, косметичних та фармацевтичних засобів.

Окремо варто підкреслити важливість повного знезараження води. На будь-якому підприємстві наявність патогенних мікроорганізмів становить небезпеку не лише для обладнання, а й для якості кінцевої продукції та здоров'я споживачів. Тому застосовуються різні методи дезінфекції: ультрафіолетове випромінювання, озонування, хлорування, мембранні технології або їх комбінації. Правильно обраний метод знезараження є вирішальним для забезпечення мікробіологічної стабільності та безпечності виробничого процесу.

Усі вимоги до води детально описуються в технічній документації підприємства: інструкціях, стандартах, технічних завданнях та регламентах. Вони визначають параметри води на кожному етапі підготовки та використання, включно з допустимими рівнями солей, кислотності, чистоти, мікробіологічного стану та іншими характеристиками. Таким чином, система водопідготовки виступає одним із ключових елементів технологічного процесу, що забезпечує стабільну якість продукції, тривалу та безпечну роботу обладнання і відповідність підприємства сучасним екологічним і виробничим стандартам.

#### **1.4. Стадії очищення води у виробництві**

Водопідготовка виробництв здійснюється у кілька етапів залежно від складу води на вході та виході:

- стадія попереднього очищення води заводів;
- видалення заліза та розчинених речовин;

- пом'якшення води;
- освітлення за допомогою сорбційних фільтрів для очищення води на заводі;
- стабілізація показників за допомогою реагентів;
- знесолення та глибока деіонізація води;
- стерилізація та знезаражування як елемент систем водопідготовки на заводі.

Аналізуючи отриману інформацію, спеціалісти підбирають кількість етапів очищення води для виробництва індивідуально для кожного випадку [2].

### **1.5. Обладнання для очищення води для виробництва**

На кожному етапі застосовується певне обладнання для очищення води на виробництві, яке виконує визначені функції:

1. Діскові та промивні сітчасті фільтри, що затримують крупні зависі на вході води в систему.
2. Фільтри для видалення заліза + аератор. Для окиснення заліза зі свердловини застосовується аераційна колона, далі на фільтрувальному завантаженні засипного фільтра видаляються іони вже окисненого заліза та марганцю.
3. Фільтри з іонообмінною смолою для пом'якшення води. Солі жорсткості замінюються іонами натрію та видаляються в дренажну систему.
4. Сорбційні та осадові фільтри. Ці колони призначені для видалення органіки з води та поліпшення смаку і запаху.
5. Реагенти для коригування рН, зв'язування кисню та запобігання утворенню осаду.
6. Промисловий зворотний осмос. Мембранне очищення дозволяє отримати дистильовану воду, очищену від усіх відомих домішок.
7. Установа електродеіонізації та фільтри ФСД. Отримання ультрачистої води для потреб лабораторій і медицини.

8. Лампи й стерилізатори з УФ-випромінюванням. Знезараження води від грибків і мікроорганізмів за рахунок згубної дії хвилі 254 нм.

9. Фільтри патронного типу з різними картриджами. На етапі доочищення відбувається покращення смаку і запаху води та видалення залишкових частинок.

## **1.6. Фізико-хімічні методи очищення води**

### **1.6.1. Видалення заліза**

Попри те, що видалення заліза є теоретично простим, розв'язання цієї проблеми на практиці обов'язково повинно супроводжуватися вимірюваннями та тестами на місці, інакше можуть виникнути значні розбіжності між теоретичними й практичними результатами.

Залізо може бути присутнім у воді або у твердій формі (окисли та гідроокисли), або у розчиненому вигляді. Залізо у твердій формі легко видаляється методом фільтрування через картриджі або гранульований матеріал. Розчинене залізо може бути видалене за допомогою різних методів відповідно до типу його вмісту у воді:

- мінеральне залізо: містить або двовалентне залізо (іони  $Fe^{2+}$ ) у воді з малим вмістом кисню, або тривалентне залізо (іони  $Fe^{3+}$ ) у воді з низьким  $pH$ ;
- органічне залізо: атоми заліза утворюють комплекси з органічними молекулами (особливо гуміновою кислотою) [3].

Метою обробки є перетворення розчинного заліза в іони нерозчинного тривалентного заліза (шляхом окиснення двовалентного заліза або його органічних фракцій), подальше осадження у вигляді гідроокису з устанавленням  $pH$  у межах 7,2–8,2.

### **1.6.2. Окиснення**

Окисно-відновна реакція – це реакція, яка ґрунтується на такому:

- деякі іони втрачають (окиснення) або отримують (відновлення) електрони;
- інші іони втрачають або отримують атоми кисню;
- небажані органічні матеріали перетворюються на воду та  $CO_2$  (а інколи й на азот).
- Якщо реакція відновлення обмежується, суто практично, видаленням розчиненого кисню і перетворенням токсичного шестивалентного хрому в менш токсичний тривалентний хром, то реакції окиснення знаходять широке застосування:
  - дезінфекція;
  - перетворення розчинних сполук у нерозчинні, які легко видаляються фільтруванням (залізо);
  - а також процеси, що ґрунтуються на біотехнологіях.

Для видалення заліза використовується дешевий і доступний реагент – кисень із повітря.

Створення контакту води з повітрям дозволяє розчинити атмосферний кисень. Цей розчинений кисень має низьку окиснювальну здатність, яка, тим не менш, є достатньою для зміни при температурі доквілля мінерального заліза.

### **1.6.3. Коагуляція та флокуляція**

Процеси коагуляції та флокуляції використовуються для відокремлення твердих зависей від води у випадках, коли швидкість природного осідання є занадто низькою для досягнення необхідного ефекту очищення. Успішне очищення води, знезвуглецювання вапняку, ущільнення мулових осадів і зневоднення залежать від правильного застосування принципів коагуляції та флокуляції.

Якщо розглядати очищення поверхневих вод, то, наприклад, забруднена сира вода містить завислі фракції, що складаються з твердих частинок, здатних до осідання; містить частинки, достатньо великі, щоб випадати в осад самостійно, а також розсіяні тверді фракції й частинки, що не осідають швидко. Значна частина

таких неосаджуваних твердих частинок може бути колоїдною. Кожна частинка стабілізується завдяки негативному електричному заряду на її поверхні; таким чином сусідні частинки відштовхуються одна від одної так само, як відштовхуються магнітні полюси.

Оскільки це явище не дозволяє зарядженим частинкам зіштовхуватися одна з одною і формувати більш масивні агрегати, які називаються пластівцями, вони не можуть осісти. Коагуляція визначається як руйнування стійкості таких колоїдів шляхом нейтралізації сил, що утримують їх на відстані одне від одного. Це зазвичай відбувається під час додавання хімічних коагулянтів і прикладання енергії змішування.

Зазвичай використовуються такі хімічні сполуки, як солі алюмінію, солі заліза або поліелектроліти.

#### **1.6.4. Фільтрація**

Фільтрація – це процедура, за допомогою якої рідина, що містить тверді частинки, пропускається через пористе середовище (фільтр), яке затримує тверді фракції, тоді як рідка фракція проходить крізь нього (фільтрується).

Якщо зважені частинки за розміром більші, ніж пори, вони затримуються на поверхні фільтра; таке відбувається під час фільтрації через картридж. У випадку глибокої фільтрації або фільтрувального шару частинки утримуються всередині пористої маси [4].

У будь-якому разі явище, пов'язане з проходженням води через пористе середовище, описується законом Дарсі, який стверджує, що втрата (скидання) тиску  $P$  пропорційна швидкості фільтрації  $R$  (відношення миттєвої витрати потоку  $Q$  до одиниці площі поверхні).

#### **1.6.5. Дезінфекція та стерилізація**

Стерилізація — це операція, якій піддається замкнене середовище і яка приводить до відсутності здатних до регенерації мікробів кількістю не менше 10 об'єктів.

Дезінфекція — це операція, якій піддається відкрите середовище і яка приводить до зниження чисельності здатних до регенерації мікробів на 10. Тому, якщо вода спочатку містила  $10^{12}$  мікробів, вона вважається дезінфікованою, якщо після обробки кількість мікробів у ній становить менше  $10^2$ .

Стосовно водних систем поняття стерильності сформувавши складно, оскільки такі системи є єдиним замкнутим об'єктом. Тому в системі, розглянутій у проєкті, ідеться про дезінфекцію, а не про стерилізацію.

Біоцидні процеси можна класифікувати за рядом критеріїв:

- за природою мікробних штамів, які потрібно знищити: фунгіцидна (пліснява та грибки), альгіцидна (морські водорості), бактерицидна (бактерії) або противірусна (віруси) обробки;

- за характером застосовуваного впливу, який може бути кількох типів: пряма токсичність, коагуляція протеїнів, ензиматичний вплив шляхом блокування обміну речовин або придушення розмноження;

- залежно від застосовуваних методів процеси можуть бути фізичними та хімічними. Серед останніх виділяють окиснювальні та неокиснювальні реагенти.

Ультрафіолетові промені С-типу (зазвичай звані «УФ»), що випромінюються лампами випаровування ртутних парів з довжиною хвилі в діапазоні від 200 до 280 нанометрів, мають потужну біоцидну дію, незалежно від показника рН, і не утворюють екологічно шкідливих побічних продуктів. У даному випадку довжина хвилі становить 254нм. Саме при цій довжині хвилі коефіцієнт поглинання мікроорганізмів досягає найвищого рівня, що забезпечує смертельний вплив на мікробів. Проте застосування цих променів вимагає:

- невеликої товщини води;
- доброї прозорості води, оскільки наявність твердих частинок може призвести до «тіньового ефекту», тобто вони можуть діяти як екран між біоцидним опроміненням і мікроорганізмом, який потрібно знищити.

Існує два типи ламп, у проєкті використані лампи 2-го типу:

- лампи низького тиску;
- лампи високого тиску.

Вони менш ефективні за потужністю (споживають близько 15Вт на кожен Вт УФ-випромінювання), але мають довший термін служби (приблизно 8000–10000 годин, часті вмикання/вимикання скорочують термін служби).

### **1.6.6. Іонообмінні смоли**

Іонообмінні смоли (іоніти) — це тверді нерозчинні сполуки, що мають базову хімічну структуру, з якою пов'язані рухомі іони за допомогою хімічних груп, відомих як «функціональні групи».

Базову структуру отримують у результаті органічного синтезу (шляхом полімеризації сполуки або співполімеризації кількох органічних сполук). Тому іоніти є синтетичними смолами і частіше відомі як «іонообмінні смоли» або просто «іоніти». Функціональні групи отримують або безпосередньо під час полімеризації, або під час подальшої обробки полімерних гранул. Зовні смола нагадує дрібні ікринки.

Кожна смола має різний ступінь спорідненості з різними іонами, з якими вона контактує. Кожного разу, коли смола, що містить іони А, до яких вона має слабку спорідненість, контактує з рідиною, яка містить іони В, до яких спорідненість вища, іони В поглинаються смолою в обмін на іони А. Тому рідина, пропущена через іоніт, втрачає іони В і набуває іони А. У той же час смола втрачає іони А та набуває іони В.

Кожна смола має чітку іонообмінну здатність, вимірювану в еквівалентах на літр смоли. Коли з певного об'єму смоли вивільнені всі рухомі іони, іонний обмін більше не може продовжуватися. Тоді настає стан «насичення», тобто склад води, що виходить зі шару смоли, ідентичний складу оброблюваної води. У такому разі смолу необхідно піддати обробці для відновлення її початкової хімічної структури – регенерації [4].

Під час регенерації розчин, багатий на регенерувальні іони, пропускають через насичену смолу так, щоб регенерувальні іони замінили зв'язані іони, отримані в ході виробничого циклу. Оскільки смола має слабшу спорідненість із регенерувальними іонами, ніж із іонами, зв'язаними під час її циклу, необхідно:

- застосовувати розчини з відносно високою концентрацією регенерувальних іонів;
- пропускати регенерувальний розчин через смолу повільно.
- Регенерувальний розчин зберігається у концентрованому вигляді в контейнері — «ємності для солі», оскільки пом'якшення відбувається натрієм.

Ось переклад українською мовою без доповнень:

### **1.6.7. Обробка активованим вугіллям**

Активоване вугілля у вигляді порошку або гранул отримують шляхом спеціальної обробки природних вуглів (антрацитових, торф'яних) або штучних вуглів (вуглефікованої деревини кокосових пальм). Завдяки своїй мікропористій структурі активовані вугілля мають дуже велику питому активну поверхню на одиницю маси (від 500 до 1000 м<sup>2</sup> на 1 грам), низьку насипну густину (близько 0,5 кг на літр) і, головне, два основні властивості:

- адсорбуючу (зумовлену силами притягання й електростатичними силами, діє на розчинені гази та деякі молекули);
- каталізаторну (пов'язану з наявністю вільних радикалів).

Активоване вугілля у гранулах може виступати як фільтруюче середовище для твердих матеріалів, що можуть бути присутні в оброблюваній воді. Через дуже низьку насипну густину активованого вугілля промивні системи на ньому дуже важко реалізувати у чистому вигляді. Вода з високим ступенем забрудненості або така, що містить великі концентрації зважених твердих речовин, повинна бути попередньо очищена перед обробкою активованим вугіллям, інакше останнє може швидко насититися та втратити свої специфічні властивості.

Шляхом адсорбції активоване вугілля може затримувати широкий спектр органічних молекул та йонів:

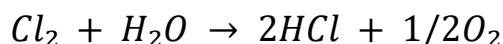
- сірководні;
- сліди деяких важких металів;
- деякі органічні матеріали з низьким рівнем поляризації;
- деякі органічні речовини з високою молярною масою, які надають воді

неприємний колір, запах чи смак, а іноді й токсичність.

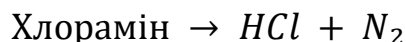
Адсорбційна здатність активованого вугілля стосовно кожного елемента має своє значення для кожного типу вугілля та кожного типу адсорбованої домішки.

У процесі обробки води активоване вугілля використовується завдяки своїм каталізаторним властивостям у реакціях з хлором і хлорамінами (дезодорація шляхом дехлорування) та розпаду озону (нейтралізація токсинів, детоксикація в озонованій воді). Як і будь-який інший каталізатор, активоване вугілля безпосередньо не бере участі у хімічній реакції, яку воно прискорює. Тому теоретично каталізаторна здатність активованого вугілля не обмежена в часі. На практиці ж вода, що піддається обробці активованим вугіллям, майже завжди містить адсорбуючі елементи, які поступово зменшують його активну поверхню.

Активоване вугілля прискорює реакцію води з хлором:



Аналогічним чином активоване вугілля прискорює розпад хлораміну:



У цьому відношенні активоване вугілля дуже часто використовується для видалення залишкового хлору та/або хлорамінів після обробки перехлоруванням. Активоване вугілля застосовується у вигляді гранульованого порошку для наповнення картриджів. Картриджі містять невелику кількість та шар вугілля. Вони мають обмеження щодо обробки потоків води з невеликою швидкістю, що містять низькі концентрації вільного хлору.

### 1.6.8. Метод розділення з використанням мембранних фільтрів

Осмос — це природне явище, при якому розчинник проходить через напівпроникну мембрану, що розділяє розчини різної концентрації. Напівпроникна мембрана — це плівка з матеріалу, який є проникним для води, але непроникним для розчинених мінеральних елементів, колоїдних сполук і бактерій.

Розглянемо систему, що включає контейнер, розділений на два відсіки напівпроникною мембраною. В одному відсіку міститься чиста вода, а в іншому — солоня вода. Можна спостерігати, що чиста вода проходить крізь мембрану та знижує концентрацію солоня води. Рух чистої води в солоній розчин збільшує його об'єм і створює стовп води, фізична дія якого чинить велике тиск на бік мембрани з солоня водою. У результаті такого збільшення тиску настає момент, коли цей тиск зупиняє переміщення чистої води до солоня розчину. Тоді система приходить у рівновагу. Гідростатичний тиск, необхідний для досягнення такого рівноваги, називається осмотичним тиском розчину даної концентрації.

Осмотичний тиск — це фізична властивість, що залежить від концентрації кожного розчину й зростає разом з нею. Осмос є оборотним явищем. Це означає, що розчин солі повинен зазнавати більший тиск, ніж його осмотичний, щоб змінити напрямок потоку води на протилежний. Як тільки це умова виконується, солоний розчин починає виробляти чисту воду. Це явище відоме як зворотний осмос.

Принцип дії зворотного осмосу ґрунтується на фільтрації води під високим тиском через мембрану з ультратонкими порами, які затримують практично всі частинки, мікроорганізми та органічні молекули з молекулярною масою понад 200 дальтонів. Ця мембрана має властивість напівпроникності щодо йонів, що дозволяє, прикладаючи до неочищеної води тиск, що перевищує осмотичний, виділяти чисту воду з розчину солей. Збільшення заряду йона сприяє його затриманню при проходженні через мембрану.

Через дуже малий розмір пор процес очищення води на зворотноосмотичній мембрані є повільним, що потребує використання мембран з великою площею поверхні та достатньо високого тиску. Мембрани являють собою картридж, що містить згорнуту у рулон мембрану. При їх виготовленні використовують матеріали: ацетат целюлози та поліаміди.

## Висновки до розділу 1

У першому розділі було проведено всебічний аналіз процесів підготовки води та очищення стічних вод промислових підприємств, що дозволило комплексно охарактеризувати ключові етапи формування системи водопостачання та водовідведення у виробничих умовах. Розглянуто сутність процесу підготовки води, визначено основні вимоги до її якості, а також описано принципи функціонування систем очищення залежно від потреб конкретного підприємства.

Аналіз показав, що сучасна промислова водопідготовка є багатоступеневим і технологічно складним процесом, який охоплює як первинні стадії механічного очищення, так і глибокі фізико-хімічні методи, спрямовані на вилучення специфічних домішок та забезпечення стабільних показників якості води. Особливу увагу приділено стадіям видалення заліза, процесам окиснення, коагуляції, флокуляції, фільтрації, а також методам дезінфекції, стерилізації та сорбційної обробки. Розглянуто також застосування іонообмінних смол і мембранних технологій, що сьогодні належать до найбільш ефективних і екологічно орієнтованих рішень у галузі водопідготовки.

У ході дослідження висвітлено особливості застосування кожного методу та обладнання залежно від технічних вимог, типу виробництва та характеру домішок у вихідній воді. Встановлено, що правильний вибір системи та технологій очищення не лише забезпечує необхідну якість води для технологічних процесів, а й підвищує довговічність обладнання, зменшує енергетичні витрати та мінімізує негативний вплив виробництва на навколишнє середовище.

Таким чином, результати аналізу підтверджують, що ефективна система підготовки води є критично важливою складовою сучасного промислового підприємства. Вона відіграє вирішальну роль у забезпеченні стабільності технологічного процесу, дотриманні стандартів якості та екологічної безпеки, а також сприяє підвищенню економічної ефективності виробництва.

## РОЗДІЛ 2

### РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ОЧИЩЕННЯ ПРОМИСЛОВИХ ВОД

Процес підготовки води є складним процесом, якому притаманні такі особливості: швидкоплинність, нестационарність, розподіленість параметрів, відсутність безперервної інформації про поточні значення вихідних координат об'єкта.

Управління цим технологічним процесом повинно бути повністю автоматизованим, оскільки процес підготовки води є складним, оператор не в змозі врахувати всі причинні фактори, здійснити складний кількісний аналіз і прийняти правильне рішення, тому якість прийняття рішень залежатиме від досвіду та інтуїції оператора.

Жорсткі норми щодо складу води також підтверджують необхідність розроблення ефективної системи управління цим об'єктом.

Можливим шляхом ефективного розв'язання задачі управління розгляданим об'єктом є створення системи управління, що використовує математичну модель технологічного процесу.

При цьому виникає низка задач, пов'язаних зі створенням достатньо просто реалізовуваної в практичних умовах математичної моделі процесу, розробленням системи управління з використанням моделі тощо.

Для процесу підготовки води задача управління має на меті отримання води з заданим складом за умови забезпечення постійної подачі води у потрібних об'ємах.

У більшості практичних ситуацій задача управління зводиться до ширших рамок якості води та різних видів економії.

Значне підвищення якості води з високими техніко-економічними показниками можна забезпечити за рахунок оптимального управління технологічним процесом.

## **2.1. Основні методи очищення промислових стічних вод**

Існує три методи очищення господарсько-побутових стічних вод: механічний, фізико-хімічний, біологічний. Стандартно до групи очисних споруд входять пристрої механічного очищення. За нормативного ступеня очищення воно може поєднуватись із установками біологічного та фізико-хімічного очищення. Очисні споруди з вищим ступенем очищення включають у себе споруди глибшого очищення.

Метод попереднього очищення призначений для підготовки стічних вод до біологічних або фізико-хімічних методів очищення. У результаті механічна обробка забезпечує скорочення до 91% завислих речовин і 19% органічної речовини. До елементів механічних очисних споруд належать решітки, різні види уловлювачів, фільтрувальні елементи, решітки та відстійники. Для видалення з стоків важких мінеральних домішок застосовують спеціальні пісколовки [5].

### **2.1.1. Механічне очищення стічних вод**

Властивість природного самоочищення стічних вод використовується в механічному методі очищення. Існуючі нерозчинні забруднювальні речовини (пісок, нафта, мінеральні домішки, продукти нафтопереробки) видаляються механічними очисними спорудами до 85%. Речовини, що містяться у воді, уловлюються сачками або решітками, після чого витягуються з води, подрібнюються у спеціальних дробарках і повертаються у стічні води.

Септики та відстійники переважно затримують нерозчинені завислі речовини. Існують маслоуловлювачі, жирууловлювачі, флотаційні пристрої для видалення продуктів нафтопереробки, масел та інших плаваючих речовин з густиною, близькою до густини води.

Септики є звичайними очисними спорудами. Завдяки фільтрувальним і очисним властивостям ґрунту стічні води очищуються повторно. Спочатку до септика надходять стічні води, частина їх фільтрується ґрунтом, а нерозчинені

залишки осідають на дні, де відбувається процес анаеробного мікробіологічного розкладання з виділенням метану. У результаті вода очищується на 50–65%, а нерозчинені відходи залишаються на дні септика.

Під час подальшої обробки очищені септичні стоки невеликими порціями надходять на фільтраційні споруди (фільтраційні колодязі, підземні фільтраційні поля, фільтраційні траншеї або піщано-гравійні фільтри) і фільтруються самим ґрунтом, який є ідеальним середовищем для життєдіяльності мікроорганізмів, що розкладають органіку. Взимку цей процес уповільнюється через зниження активності ґрунтових бактерій унаслідок промерзання ґрунту, і стічні води без очищення можуть просочуватися у ґрунтові води. Що стосується нерозчинних фракцій на дні септика, то вони підлягають видаленню спеціальним асенізаторським транспортом [6].

### **2.1.2. Фізико-хімічний метод очищення стічних вод**

Другий метод очищення стічних вод — фізико-хімічний. Хімічні методи очищення ґрунтуються насамперед на утворенні накипу, що сприяє осадженню плаваючих речовин при введенні в стічні води розчинів певних реагентів. Установки фізико-хімічного очищення складаються з пристроїв для підготовки та дозування реагенту, змішувачів для перемішування стічних вод із реагентом, реакційних камер для первинного утворення накипу, відстійників для осадження плаваючих та напівколоїдних речовин. Дотримання правильного співвідношення реагентів є важливою вимогою, оскільки реагенти досить дорогі. Цей метод застосовується переважно для очищення промислових стічних вод. Говорячи про фізико-хімічні методи очищення, детально зупинимося на флоатації. Флоатація — складний фізико-хімічний процес. Він полягає у створенні комплексу частинка–бульбашка–повітря або газ, спливанні цього комплексу та знятті утвореного пінного шару. Процес флоатації переважно застосовують під час збагачення корисних копалин та очищення стічних вод [7].

### **2.1.3. Біологічний метод очищення стічних вод**

Біологічне очищення — це біохімічне руйнування органічних речовин мікроорганізмами у процесі їхньої життєдіяльності, коли бактерії використовують ці речовини як джерело енергії. У результаті цих процесів небезпечні органічні речовини окиснюються і розкладаються на безпечні неорганічні речовини.

Під час біологічного очищення стічні води спочатку ретельно очищаються решітками, а потім за допомогою занурювальних насосів перекачуються до первинного відстійника. Речовини з густиною, більшою за густину води, видаляються шляхом звичайного осадження. При звичайному відстоюванні зі стічних вод видаляється незначна кількість нерозчинених органічних домішок і значна частина завислих речовин. Для забезпечення високої ефективності та надійності відстійника його обладнують тонкошаровими елементами, у яких процеси відстоювання відбуваються у шарах середньої висоти. Осад періодично видаляється під дією гідростатичного тиску, а плаваючі забруднення прибираються вручну за допомогою сітчастих черпаків.

Наступний етап — очищення води в біологічних очисних спорудах, тобто біореакторі, де відбувається мінералізація органічних сполук, що містять азот, за допомогою спеціального біоценозу активного мулу. Біохімічні реакції, що проходять за участю ферментів активного мулу, розкладають складні органічні сполуки. Окиснення органічних сполук, що містять вуглець, азот, сірку, фосфор, до мінеральних солей, вуглекислого газу та води відбувається в ході аеробних процесів [8].

### **2.1.4. Типова технологічна схема повної очистки стічних вод**

Типовою технологічною схемою повної очистки є комплекс очисних споруд, улаштованих таким чином, щоб перед надходженням стічних вод у ставок вони проходили механічну, біологічну очистку та знезараження (рисунок 2.1).

У процесі очистки стічних вод у будь-якій комплексній формі утворюється мул, оскільки він містить багато мікроорганізмів, що не вважається безпечним за санітарними нормами.

До його складу входять розбавлені водою тверді речовини та неприємний запах. У результаті типова технологічна схема повної переробки повинна включати в себе спеціальні переробні підприємства.

Стічні води, що надходять на очисні споруди, проходять через решітки, пісколовки, відстійники та знезаражуються хлором.

Перед первинними відстійниками можна використовувати преаератори для посилення осадження завислих речовин у вигляді біофлокуляторів, які відбирають частину надлишкового активного мулу. Сирий мул із первинних відстійників надходить у метантенки [9].

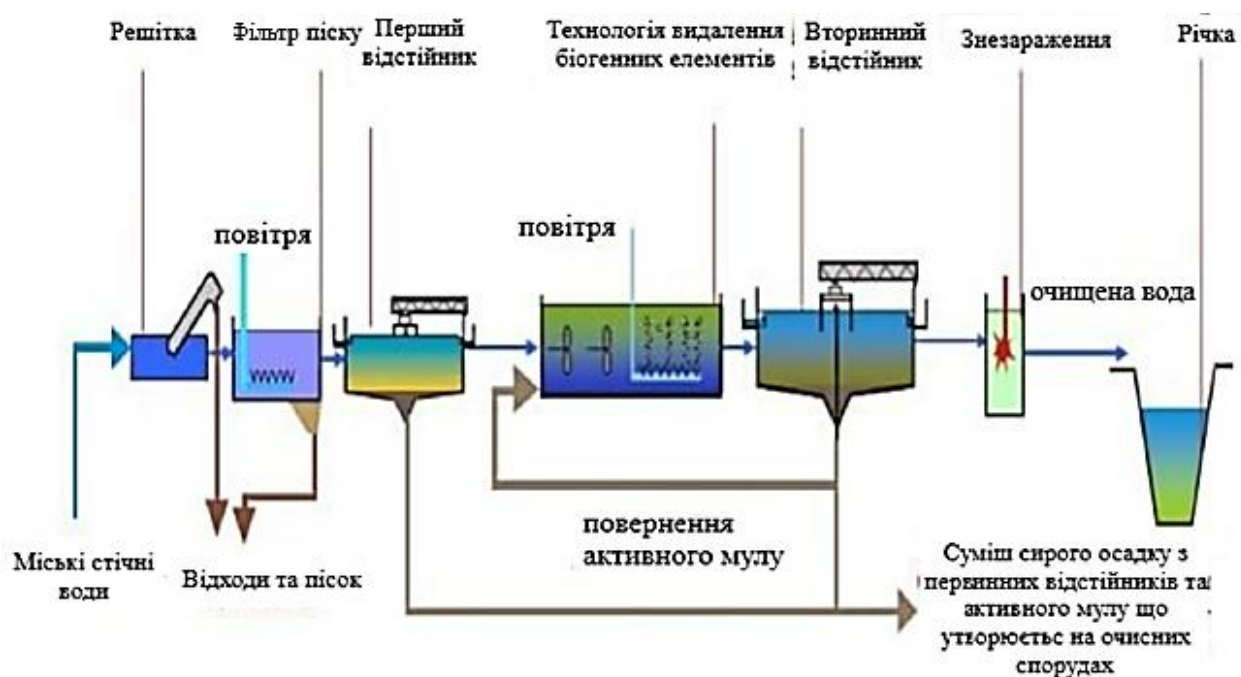


Рис. 2.1. Типова технологічна схема повної очистки стічних вод

Стічні води, що надходять на очисні споруди, проходять через решітки, пісколовки, відстійники та знезаражуються хлором. Перед первинними відстійниками можна використовувати преаератори для посилення осадження завислих речовин у вигляді біофлокуляторів, що відбирають частину

надлишкового активного мулу. Сирий мул із первинних відстійників надходить у метантенки.

Притік повітря необхідний для нормальної життєдіяльності бактерій активного мулу в аеротенку, що забезпечується спеціальними агрегатами подачі повітря, розташованими в моторному відсіку.

Суміш очищених стічних вод і активного мулу з аеротенка надходить у вторинний відстійник, де осідає активний мул, а основна його маса повертається в аеротенк. У вторинному відстійнику, за рахунок його збільшення, маса мулу зростає під впливом активного мулу, ця його частина (надлишковий мул) видаляється з вторинного відстійника, а мул надходить у згущувач, де об'єм мулу зменшується у 4–6 разів, а ущільнений надлишковий осад видаляється у розчинник. Чисті стічні води знезаражуються (зазвичай хлоруються) у баку та направляються у водосховище.

## **2.2. Дослідження технологічної схеми процесу очищення промислових стічних вод**

У магістерській роботі розглянуто технологічну схему процесу підготовки та очищення стічних вод, яка включає низку технологічних операцій, що перетворюють забруднену воду на готову технічну воду після обробки (рисунок 2.2) [1].

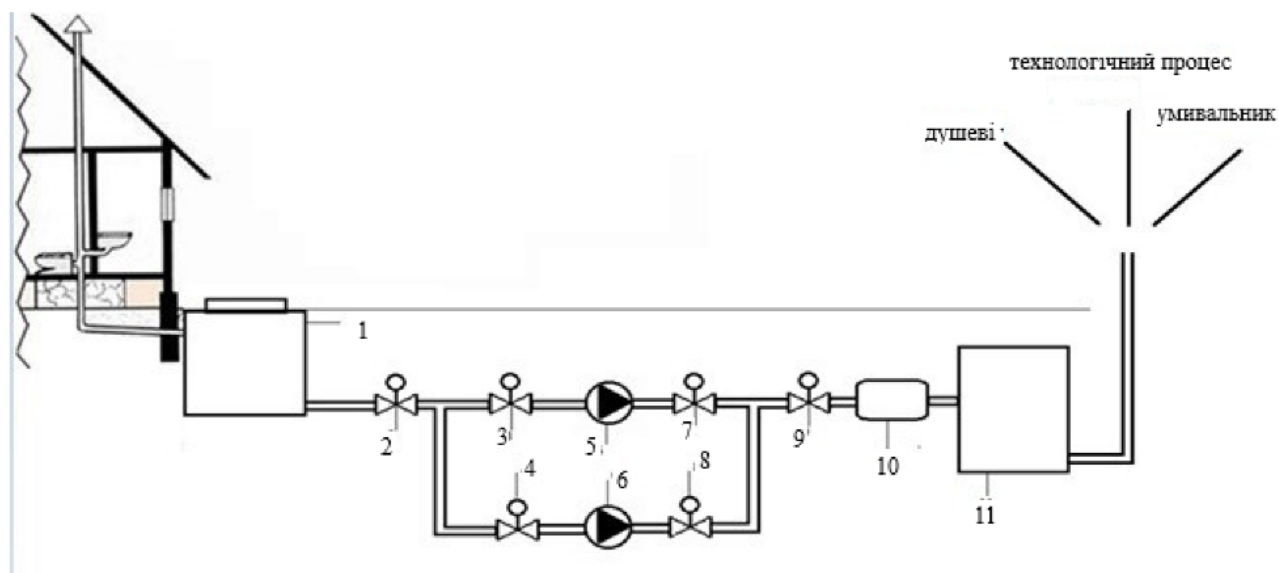


Рис. 2.2. Технологічна схема процесу очищення промислових стічних вод

На рисунку 2.2 прийняті такі позначення: 1 - Приймальний резервуар; 2 - Головна засувка; 3 - Засувка №1; 4 - Засувка №2; 5 - Насос №1; 6 - Насос №2; 7 - Клапан №1; 8 - Клапан №2; 9 - Відсікаюча засувка; 9 – Фільтр; 10 – Резервуар.

Зазначена технологічна схема подана на рисунку 2.2, з якого видно, що система відведення стоків спрямовує використану воду самопливом у приймальний резервуар (1), де накопичується вся рідина. Далі насос (5) або аварійний насос (6) по чергово перекачує рідину через фільтр (10). Фільтр виконує функцію механічного очищення, після якого освітлена рідина надходить у кінцевий резервуар (11). Отриману технічну воду можна використовувати у технологічному процесі, душових, умивальниках тощо.

Головна засувка (2) виконує функції відкриття або закриття потоку: при заповненні приймального резервуара (1) до граничного рівня головна засувка (2) відкривається разом із відсікаючою засувкою (9), після чого вмикається насос (5) або аварійний насос (6) для перекачування рідини у кінцевий резервуар (11). При зниженні рівня у приймальному резервуарі головна та запірні засувки закриваються, а насос вимикається. У разі аварійної ситуації застосовують ручні клапани (7), (8) і засувки (3), (4).

Окрім механічного очищення, додатково здійснюють хімічну очистку з метою видалення стійких хімічних домішок. У приймальну ємність (1) як рідкий

дезінфікувальний засіб додають гіпохлорит натрію, який добре підходить для знезараження води, оскільки є сильним окисником.

### 2.3. Розроблення функціональної схеми автоматизації

Функціональна схема автоматизації є проєктним документом, який відображає конкретну функціональну структуру автоматичного керування або регулювання. На схемі можуть бути розміщені датчики, регулятори, елементи керування та інші елементи автоматики.

У магістерській роботі представлена функціональна схема автоматики очищення стічних вод (рисунок 2.3). На цій схемі показано вхідні аналогові, а також вхідні та вихідні дискретні сигнали, що відображаються на моніторі. До аналогового сигналу підключено датчик рівня, тобто пристрій автоматики, а до дискретних сигналів підключені регулювальні органи — засувки та клапани.

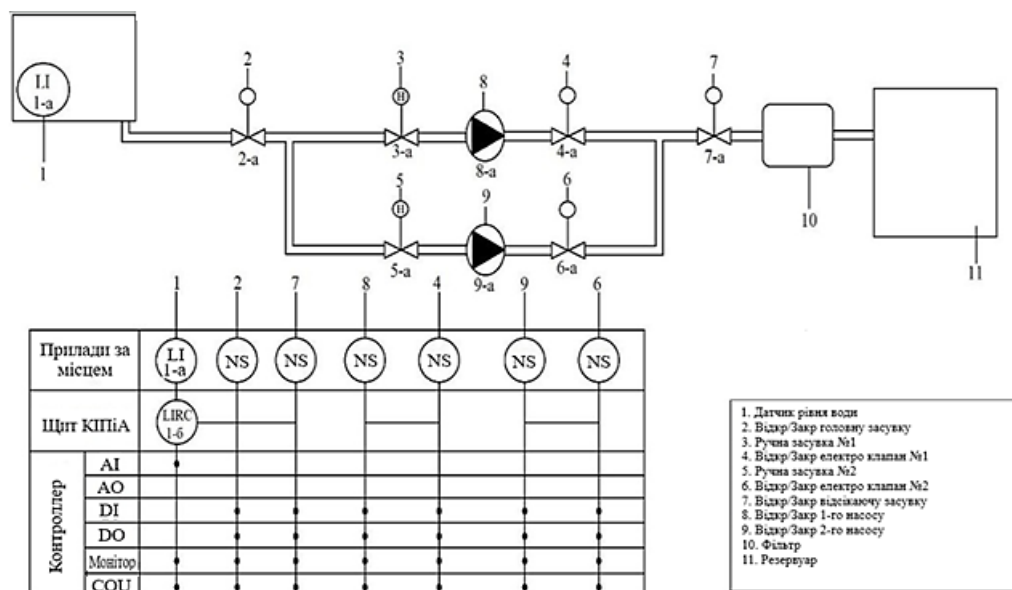


Рис. 2.3. Функціональна схема автоматизації

### 2.4. Розробка системи керування (математичної моделі) технологічного процесу очищення промислових вод

### 2.4.1. Ідентифікація об'єкта керування

Для системи керованою величиною вважається рівень води в приймальній ємності  $h$ , а проточна вода  $Q_n$  — керуючим впливом. Метою керування є  $h = h_n$  — реверсивне регулювання за наявності специфічних збурювальних впливів на вхідний та вихідний витратні канали.

Проектування структури автоматичного регулювання технологічного процесу здійснюється шляхом визначення процесу як об'єкта регулювання, тобто шляхом зіставлення технологічного процесу з математичною моделлю для виконання керування та регулювання [10].

### 2.4.2. Зміна рівня рідини

Залежність між витратою води  $Q_n$ , що надходить у бак, водою, що виходить із бака  $Q_0$ , і рівнем води  $h$  у баку аналогічна зв'язку між цими витратами та запасом. Диференціальне рівняння (формула 2.1) має вигляд кінематичного рівняння, яке показує збільшення або зменшення подачі води:

$$\frac{d}{dt}[Bh(t)] = Q_n(t) - Q_0(t) \quad (2.1)$$

Під час виведення динамічних залежностей між тиском, витратою та рівнем води необхідно враховувати закони збереження маси, імпульсу та енергії, а також вимогу безперервності.

### 2.4.3. Нелінійне диференціальне рівняння об'єкта керування

При нестачі зовнішнього напору води рідина буде витікати з приймальної ємності під дією власної ваги. Для цього використовується рівняння Бернуллі, яке має такий вигляд:

$$\frac{v^2}{2} = \frac{Pg}{\rho} + gh = const \quad (2.2)$$

Де

$P$  — тиск усередині рідини, кПа;  $\rho$  — густина рідини, кг/м<sup>3</sup>.

У результаті витрата води, що витікає з каналу або отвору в баку під дією сили тяжіння, дорівнює:

$$Q_0(t) = \mu\sqrt{2gh(t)} \quad (2.3)$$

де  $\mu$  — коефіцієнт витрати.

Звідси співвідношення рівня води та витрати на вході має вигляд:

$$\frac{d}{dt}[Bh(t)] = Q_n(t) - \mu\sqrt{2gh(t)} \quad (2.4)$$

З формули (2.4) видно, що рівень води  $h(t)$  у приймальній ємності повинен збільшуватися при ступінчастому збільшенні витрати поданої води  $Q_n(t)$ . При цьому внаслідок підвищення рівня збільшується відводимий потік  $Q_0(t)$ , що враховує ефект саморегуляції.

Таким чином, гравітація відіграє ключову роль негативного зворотного зв'язку під час контролю та регулювання рівня води. Саморегулююче правило є нелінійним типом залежності рівня від витрати.

#### 2.5.4. Лінеаризоване диференціальне рівняння об'єкта керування

Виконаємо лінеаризацію рівняння виду:

$$\frac{d}{dt}[Bh(t)] + \mu\sqrt{2gh(t)} = Q_n(t) \quad (2.5)$$

де  $A$  — площа приймальної ємності у зоні номінального режиму, тобто відхилення рівня рідини та витрати від номінальних значень не перевищує 8%, що передбачає заміну нелінійної функції на лінійну.

$$Q_0(t) = \mu\sqrt{2gh} \quad (2.6)$$

Рівняння лінеаризації у зоні номінального режиму:

$$Q_0(t) = \mu \frac{\sqrt{2gh}}{2\sqrt{h_0}} \cdot \bar{h} \quad (2.7)$$

$Q_0 = f\sqrt{h}$  — нелінійна функція.

$\bar{Q}_0 = \bar{f}\bar{h}$  — лінійна функція в області номінального режиму.

Тоді:

$$B \frac{d\bar{h}}{dt} + \mu \frac{\sqrt{2g\bar{h}}}{2\sqrt{h_0}} \cdot \bar{h} = \bar{Q}_n(t) \quad (2.8)$$

У номінальному визначеному режимі:

$$Q_{n0} = \mu \sqrt{2gh_0} = Q_\alpha \quad (2.9)$$

Проведемо перетворення Лапласа:

$$Bp\bar{h}(s) + \mu \frac{\sqrt{2g}}{2\sqrt{h_0}} \times \bar{h}(s) = \bar{Q}_n(s) \quad (2.10)$$

або

$$B \frac{2\sqrt{h_0}}{\mu\sqrt{2g}} + p\bar{h}(s) + \bar{h}(s) = \frac{2\sqrt{h_0}}{\mu\sqrt{2g}} \times \bar{Q}_n(s) \quad (2.11)$$

Помноживши чисельник і знаменник на  $\sqrt{h}$  отримуємо:

$$B \frac{2h_0}{Q_0} + p\bar{h}(s) + \bar{h}(s) = \frac{2h_0}{Q_0} \times \bar{Q}_n(s) \quad (2.12)$$

де  $T$  — постійна часу:

$$T = B \frac{2h_0}{Q_{n0}} \quad (2.13)$$

Коефіцієнт передачі об'єкта керування:

$$k = \frac{2h_0}{Q_{n0}} \quad (2.14)$$

Передавальна функція об'єкта керування, тобто рівень бака, що об'єднує вхід  $Q_n$  і рівень води  $h$  у зоні нормального режиму, має вигляд:

$$W(s) = \frac{\bar{h}(s)}{\bar{Q}_n(s)} = \frac{k}{1+Ts} \quad (2.15)$$

Постійна часу  $T$  характеризує інерційні властивості об'єкта керування і прямо пропорційна площі поперечного перерізу  $B$  приймальної ємності та обернено пропорційна нормальному значенню вхідної витрати  $Q_{n0}$  [10].

Перехідна функція, що відповідає передавальній функції:

$$\bar{h}(t) = \bar{Q}_n 2 \frac{h_0}{Q_{n0}} (1 - e^{-\frac{2Bh_0 t}{Q_{n0}}}) \quad (2.16)$$

Перехідна функція відображає відхилення від стану об'єкта керування в нормальному режимі:

$$\bar{h}(t) = h_0 + \bar{Q}_n 2 \frac{h_0}{Q_{n0}} (1 - e^{-\frac{2Bh_0 t}{Q_{n0}}}) \quad (2.17)$$

### 2.4.5. Розрахунок параметрів передавальної функції об'єкта управління

Передавальна функція цього об'єкта управління розраховується за наступними параметрами:

$h_0 = 1,5$  (м) – нормальний режим за рівнем води;

$Q_{n0} = 200$  ( $\frac{\text{л}}{\text{год}}$ ) – нормальне значення вхідної витрати при  $h_0$ ;

$d = 0,5$  (м) – діаметр напірного резервуара.

Розрахунок нормальної вхідної витрати:

$$Q_{n0} = 200 * \frac{1}{3600} * \frac{1}{10000} \approx 0.00005 \left[ \frac{\text{м}^3}{\text{с}} \right]$$

Розрахунок коефіцієнта передачі  $K$  розраховується за формулою (2.14):

$$K = \frac{2 * 1.5}{0.00005} = 60000 \left[ \frac{\text{м}/\text{м}^3}{\text{с}} \right]$$

Розрахунок постійної часу  $T$  розраховується за формулою (2.13):

$$T = B \frac{2 * h_0}{Q_{n0}}$$

де  $B$  – площа поперечного перерізу резервуара

$$B = \frac{\pi * d^2}{4} = \frac{3.14 * 0.5^2}{4} = 0.1963 \text{ (м}^2\text{)}$$

Тоді

$$T = 0.1963 * \frac{2 * 1.5}{0.00005} = 11775 \text{ (с)}$$

Передавальна функція об'єкта управління буде мати вигляд:

$$W(p) = \frac{h(p)}{Q_n(p)} = \frac{K}{1 + Tp} = \frac{60000}{1 + 11775p}$$

### 2.4.6. Система управління

Початкова структурна схема системи автоматичного управління (рисунок 2.4):

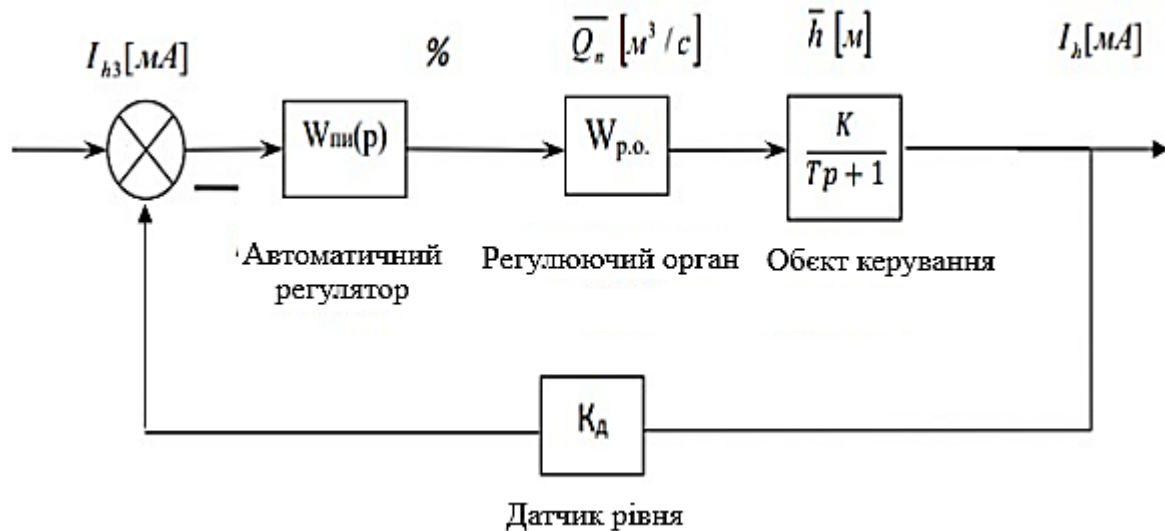


Рис. 2.4. Початкова структурна схема

де  $I_{h3} [mA]$  – початкове задаюче значення системи автоматичного управління на регулювання заданого рівня  $h$   $h3$ ;

$I_h [mA]$  – вихідне значення рівня  $h$  для даної системи;  $K_d$  – коефіцієнт передачі датчика рівня  $h$ ;

$W_{\pi}(p)$  – передавальна функція автоматичного регулятора.

#### 2.4.7. Розрахунок передавальної функції виконавчого механізму і коефіцієнта передачі регулюючого органу вхідної витрати

Регулюючим органом і виконавчим механізмом є електричний оборотний двигун.

Визначення передавальної функції виконавчого механізму:

За паспортними даними застосовується двигун типу ДАУ-23, потужність ( $N_{дв}$ ) якого становить 25 Вт, напруга живлення двигуна ( $U_{п}$ ) 220 В, кількість полюсів ( $n$ ) 12, навантаження ( $M_{н}$ ) – 40 Нм.

Передавальна функція двигуна розраховується за формулою:

$$W_{дв}(p) = \frac{k}{p(1+Tp)} \quad (2.18)$$

Дальше вирахуємо  $k$  і  $T$ :

$$k = 0.14 * \frac{N_{дв} * n}{MH} = 0.14 * \frac{25 * 12}{40} = 0.05$$

$$T = 3.3 * \frac{N_{дв}}{n * U_{п}} = 3.3 * \frac{25}{12 + 220} = 0.031$$

Передавальна функція двигуна:

$$W_{дв}(p) = \frac{k}{p(1 + Tp)} = \frac{0.05}{p(1 + 0.031p)}$$

Розрахунок коефіцієнта підсилення регулюючого органа  $K_{po}$  тобто клапана:

$$k_{p.o} = \frac{2 * \Delta Q_{n0}}{\Delta \%} = \frac{2 * 0.00005}{100\%} = \frac{0.0001}{100\%} = 0.000001 \left[ \frac{m^3/c}{\%} \right]$$

де  $Q_{n0}$  — приріст номінальної вхідної витрати;

% — приріст ступеня відкриття клапана (у відсотках).

Загальна передавальна функція виконавчого механізму має вигляд

$$W_{um}(p) = \frac{1.05 * 0.000001}{p(1 + 0.031p)}$$

#### 2.4.8. Оцінка коефіцієнта передавання датчика рівня

Коефіцієнт підсилення передавання датчика рівня розраховується як співвідношення вихідного значення датчика  $i$ [mA] до вхідного значення  $h$ [м]:

$$K_d = \frac{\Delta i [mA]}{\Delta h [m]} \quad (2.19)$$

Найвища висота рівня води в резервуарі, яку за ідеєю має вимірювати датчик рівня, відповідає 4 [м], а зміна уніфікованого вихідного значення датчика рівня при зміні рівня в діапазоні (0–4) [м] відповідає

Тоді:

$$K_d = \frac{\Delta i}{\Delta h} = \frac{16}{4} = 4 \left[ \frac{mA}{m} \right]$$

Передавальна функція датчика рівня має вигляд:

$$W_{\phi}(p) = \frac{i(p)}{h(p)} = \frac{K_d}{T_{\phi}p + 1} = \frac{4}{4p + 1} \left[ \frac{mA}{m} \right]$$

Загальна структура системи керування має вигляд (рисунок 2.5).

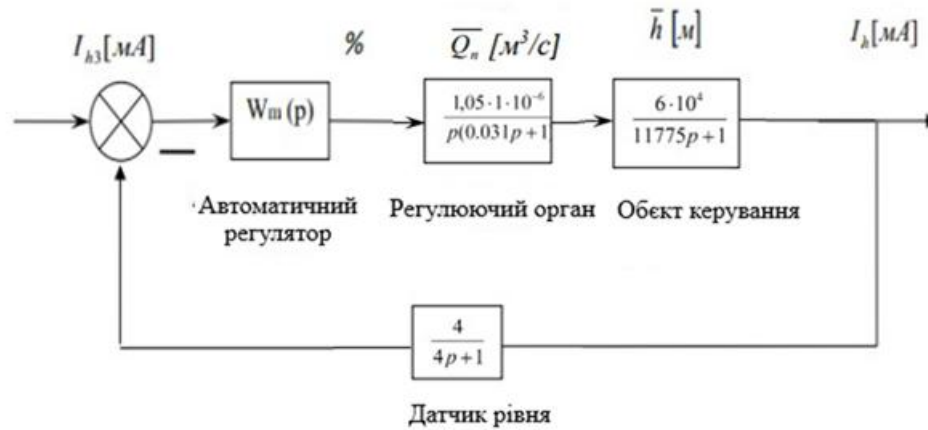


Рис.2.5. Структурна схема керування

#### 2.4.9. Логарифмічні амплітудно-фазові частотні характеристики розімкненої системи та її перехідна характеристика

Розімкнена система автоматичного керування має передавальну функцію:

$$W_{роз}(p) = \frac{0.063}{(1 + 0.031p)(1 + 11775p)}$$

ЛАФЧХ будується наближеним методом, тобто визначається частота  $\omega = 1/T_1 = 32.25$  [1/с], до якої ЛАЧХ має вигляд прямої на рівні  $20 \lg K = 20 \lg 0.063 = 24$  дБ — це значення є коефіцієнтом передавання. ЛАЧХ має вигляд лінії з нахилом  $-20$  дБ/дек до сполучної частоти  $\omega = 1/T_2 = 8 \cdot 10^{-5}$  [1/с] ( $T_2 = 11775$  с). Звідси нахил ЛАЧХ додатково змінюється на  $-20$  дБ/дек і становить  $-40$  дБ/дек.

Логарифмічна амплітудно-фазова частотна характеристика вихідної розімкненої системи при  $T_1 = 0,031$ ,  $T_2 = 11775$  має вигляд:

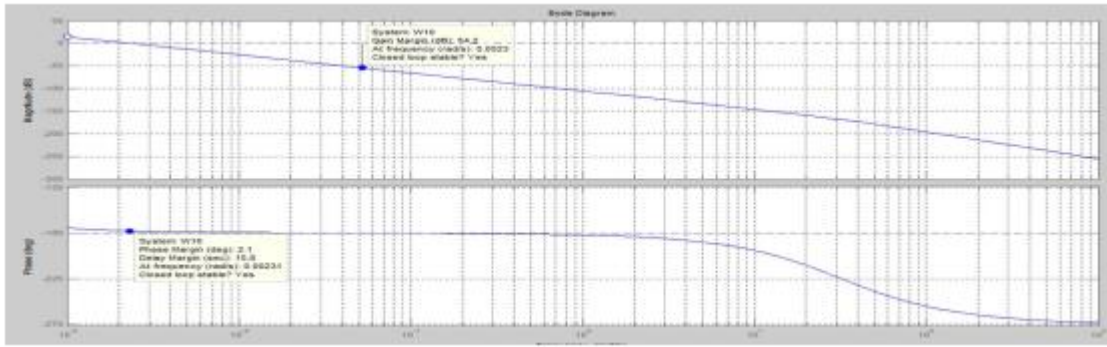


Рис. 2.6. Логарифмічна амплітудно-фазова частотна характеристика вихідної розімкненої системи при  $T_1 = 0,031, T_2 = 11775$

#### 2.4.10. Розрахунок передавальної функції ПІ-регулятора

ЛАЧХ розімкненої системи

Якщо ЛАЧХ розімкненої системи містить наявні частоти (у секторі, що відтинається лініями  $\pm 20$  дБ, нахил  $-20$  дБ/дек), то:

- замкнена система автоматичного керування є стійкою;
- перехідна функція замкнутої САК дуже близька до монотонної;
- час регулювання дорівнює  $t_p = 1/\omega_{cp}$

Структура розімкненої вихідної системи з ПІ-регулятором (рисунок 2.7)

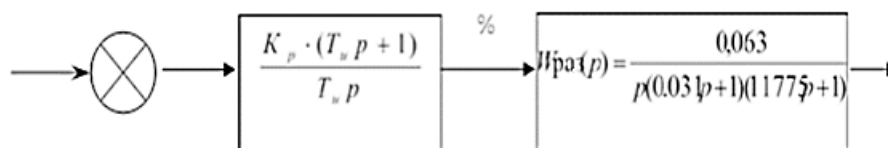


Рис. 2.7. Структура розімкнутої системи з ПІ-регулятором

Частота зрізу була знайдена з рисунка 2.4 за бажаною ЛАЧХ:

$$\omega_{cp} = \frac{3}{t_p} = \frac{3}{1298} \approx 0.00231$$

Передавальна функція ПІ-регулятора:

$$W_{\pi}(p) = \frac{\%(p)}{i(p)} K \frac{1 + T_u p}{T_u p}$$

Розраховуємо коефіцієнт підсилення ПІ-регулятора:

$$\omega_{cp} = \frac{3}{t_p} = \frac{3}{1298} \approx 0.00231 \text{ — частота зрізу,}$$

$$K_s \frac{0.063}{1298} = 0.0231$$

Звідси  $K_p = 47.5$

Будуємо ЛАЧХ ПІ-регулятора при  $T_u = 11775c$ ,  $K_p = 47.5$  (рисунок 2.8).

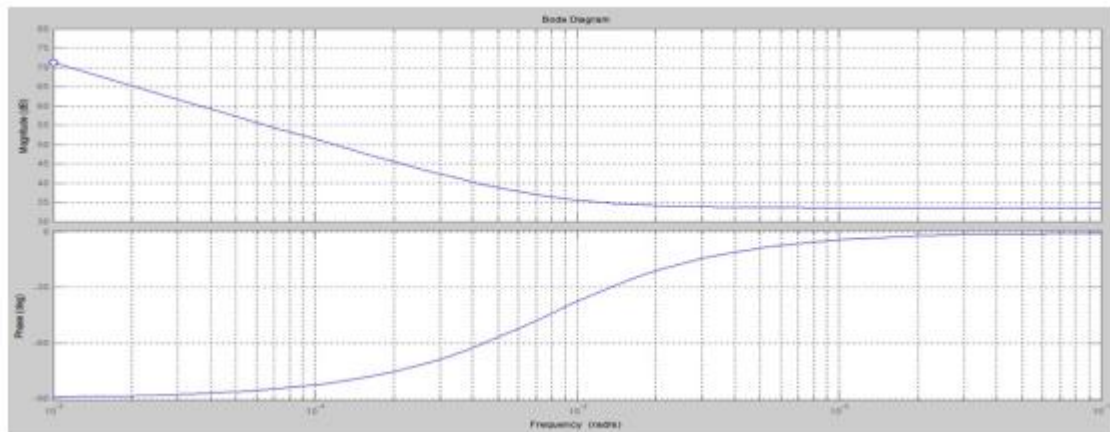


Рис. 2.8. ЛАЧХ ПІ-регулятора

Система автоматичного керування регулятора є стійкою. Функція є перехідною, близькою до монотонної, час її регулювання  $t_p = 1298c$  статична похибка  $st = 0c$

#### 2.4.11. Моделювання системи керування в середовищі MatLAB (Simulink)

Структура САК зворотного зв'язку під час моделювання має вигляд (рисунок 2.9).

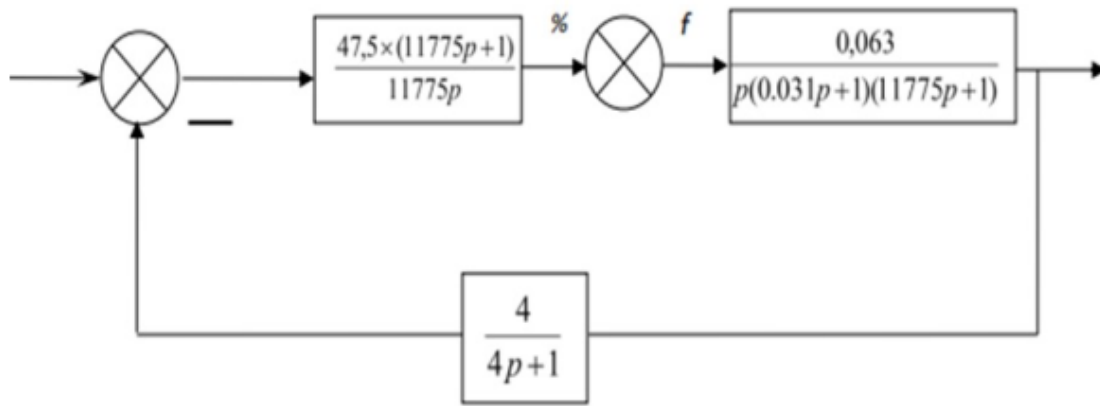


Рис. 2.9. Структура системи автоматичного керування

Модель системи керування в середовищі MatLAB (Simulink) (рисунок 2.10):



Рис. 2.10. Схема моделювання замкненої системи

Отримуємо перехідну характеристику (рисунок 2.11):

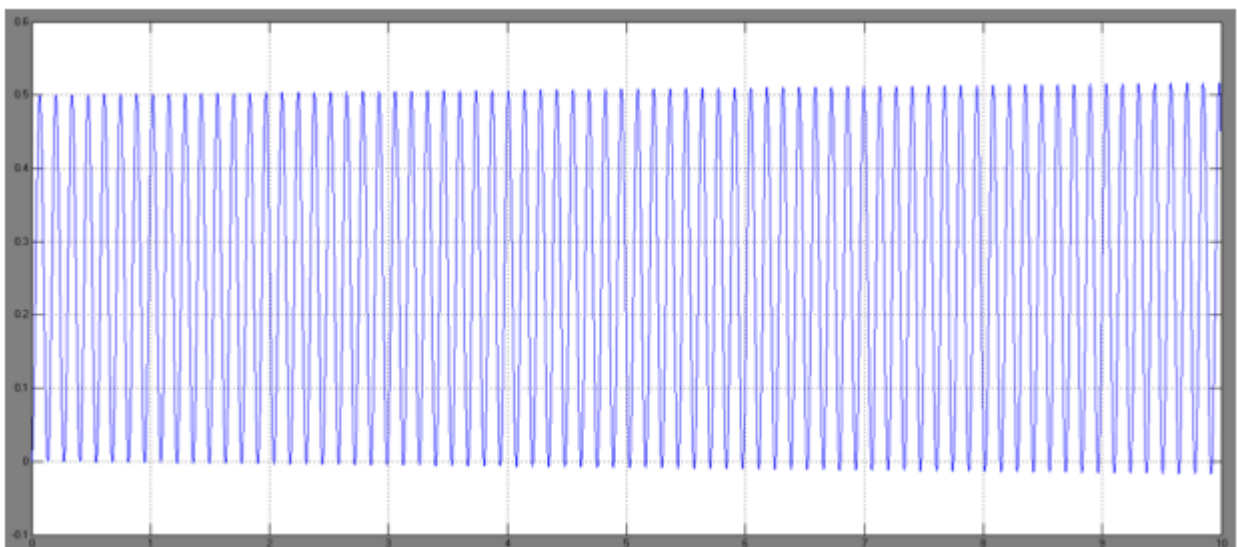


Рис. 2.11. Перехідна характеристика вихідної розімкненої системи

Будуємо модель замкненої системи керування з регулятором у MatLAB (Simulink) (рисунок 2.12):

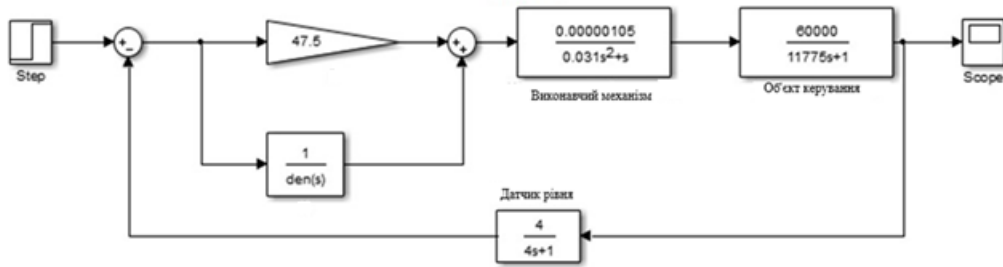


Рис. 2.12. Схема замкненої системи з ПІ-регулятором

Отримуємо перехідну характеристику (рисунок 2.13):

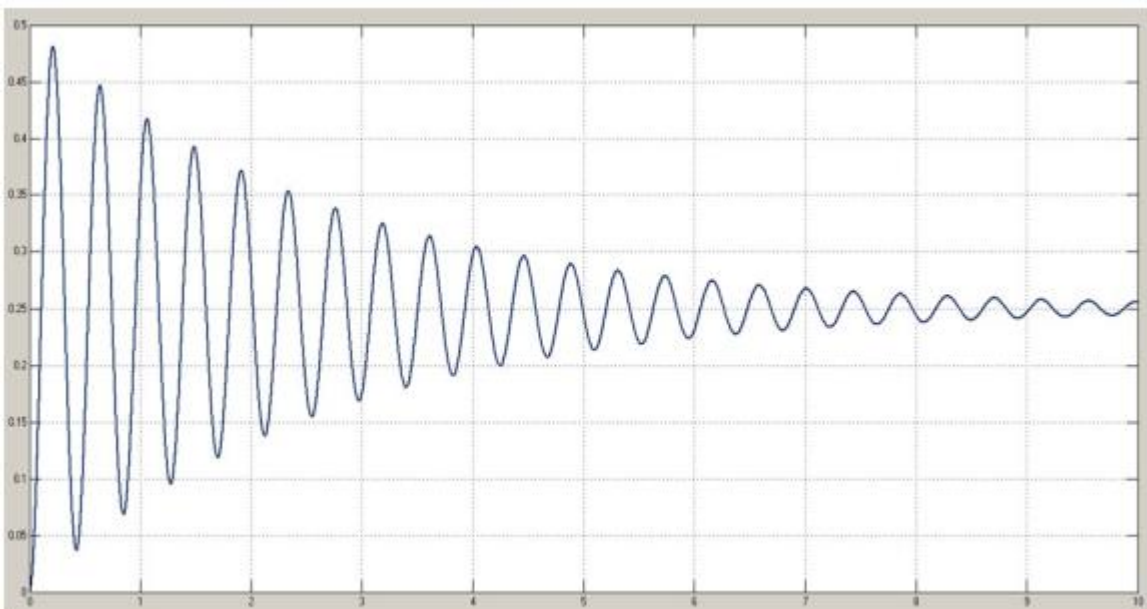


Рис. 2.13. Перехідна характеристика системи

## Висновки до розділу 2

У другому розділі проведено огляд основних методів очищення стічних вод, включаючи механічні, фізико-хімічні та біологічні процеси. Було встановлено, що ефективна система очищення потребує комплексного використання різних технологічних підходів, оскільки кожен метод має власну область застосування та забезпечує видалення певних груп забруднень. Розглянута типова технологічна

схема продемонструвала взаємозв'язок між окремими стадіями очищення, підтвердивши необхідність інтегрованого підходу до побудови технологічної лінії.

Подальше дослідження технологічної схеми дозволило сформуванню структурне розуміння об'єкта керування, визначити ключові параметри процесу та встановити вплив збурень на якість очищення. На основі цього була розроблена функціональна схема автоматизації, що відображає послідовність роботи обладнання, логіку взаємодії технічних засобів керування та місця встановлення датчиків, виконавчих механізмів і регулюючих органів.

У рамках математичного моделювання виконано ідентифікацію об'єкта керування, визначено динамічні властивості системи та отримано диференціальну модель зміни рівня рідини в очищувальних ємностях. Подальший розрахунок параметрів передавальних функцій об'єкта, виконавчого механізму, регулюючого органу та датчика рівня дав змогу сформуванню узгодженої математичної структури системи. Особливу увагу приділено побудові логарифмічних частотних характеристик, що дозволило оцінити стійкість та якість регулювання у розімкненому режимі.

На заключному етапі розроблено передавальну функцію ПІ-регулятора та проведено моделювання системи керування в середовищі MATLAB/Simulink. Модель підтвердила працездатність розробленої системи, забезпечивши необхідну динамічну точність, рівень стабільності та швидкодію за умови впливу зовнішніх збурень.

## РОЗДІЛ 3

### ВИБІР КОМПЛЕКСУ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД

#### 3.1. Обґрунтування вибору комплексу технічних засобів

Ефективність та надійність функціонування системи автоматизованого керування технологічним процесом очищення промислових стічних вод безпосередньо залежать від коректного вибору комплексу технічних засобів. Саме ці засоби забезпечують взаємодію між фізичними параметрами процесу та логікою керування, дозволяють оперативно реагувати на зміни у стані об'єкта та підтримувати необхідні технологічні режими.

У процесі розроблення системи автоматизації першочерговим завданням є формування переліку обладнання, здатного забезпечити реалізацію структурної та функціональної схем керування. До складу такого комплексу входять засоби збору, перетворення, передавання та обробки інформації, виконавчі пристрої, а також програмно-апаратні засоби логічного й алгоритмічного керування.

Під час вибору контролера враховуються такі критерії, як обсяг і типи сигналів, необхідні для обробки, можливість масштабування, стабільність роботи в умовах промислових перешкод, а також сумісність з іншими складовими системи. Для задач очищення стічних вод доцільно застосовувати програмовані логічні контролери універсального типу, здатні забезпечити стабільне керування насосами, клапанами, змішувачами, аераторами та іншими елементами технологічної лінії. Такі контролери дозволяють реалізувати алгоритми підтримання рівня води, регулювання витрати, контролю рН та електропровідності, а також реагування на аварійні ситуації.

Окреме місце у структурі засобів автоматизації займають виконавчі механізми, до яких належать електроприводи, регулюючі клапани, насосне обладнання та запірні арматури із сервоприводами. Виконавчі пристрої забезпечують практичну реалізацію керуючого впливу, тому їх вибір повинен

відповідати характеристикам робочого середовища, параметрам тиску, витрати, температури та агресивності стічних вод. Надійність виконавчих механізмів критично важлива, оскільки від їхнього стану залежить безперервність технологічного процесу та якість очищення.

Важливим компонентом є й первинні засоби вимірювання, функція яких полягає у збиранні достовірних даних про стан технологічної установки. До них належать датчики рівня, витрати, тиску, температури, електропровідності, мутності, концентрації розчиненого кисню та інші прилади. Саме завдяки цим засобам система отримує інформацію для аналізу й оперативного регулювання процесу. Під час вибору датчиків необхідно враховувати їх точність, швидкодію, методику обслуговування, стійкість до забруднення та хімічного впливу, а також умови монтажу на об'єкті.

Комплекс технічних засобів доповнюється засобами реєстрації та візуалізації — панелями оператора, які дозволяють персоналу контролювати параметри процесу в реальному часі, фіксувати відхилення та здійснювати коригування режимів роботи.

### **3.1.1. Вибір програмованого логічного контролера**

Контролер фірми Siemens S7-300

Програмований логічний контролер SIMATIC S7-300 призначений для побудови систем автоматизації низького та середнього ступеня складності.

Модульна конструкція контролера S7-300 (рисунок 3.1), робота з природним охолодженням, можливість застосування структур локального та розподіленого вводу-виводу, широкі комунікаційні можливості, велика кількість функцій, підтримуваних на рівні операційної системи, висока зручність експлуатації та обслуговування забезпечують можливість отримання оптимальних рішень для побудови систем автоматичного керування технологічними процесами в різних галузях промислового виробництва [12].



Рис. 3.1. Контролер Siemens S7-300

Використання кількох типів центральних процесорів різної продуктивності, наявність широкої гама модулів вводу-виводу дискретних та аналогових сигналів, функціональних модулів і комунікаційних процесорів підвищує ефективність застосування контролерів SIMATIC S7-300 [12].

Контролер фірми ОВЕН (ПЛК 100)

Контролер ОВЕН ПЛК100 (рисунок 2.15) призначений для створення систем керування малими та середніми об'єктами.

Крім того, ці контролери дуже зручно використовувати для створення систем диспетчеризації різних об'єктів у промисловості[13].



Рис. 3.2. Контролер ОВЕН ПЛК100

Для обміну даними під час створення систем керування та диспетчеризації на базі ОВЕН ПЛК100 можна використовувати як дротові засоби — вбудовані

інтерфейси Ethernet, RS-232, RS-485, так і бездротові — радіо, GSM, ADSL-модеми.

Контролер Arduino Uno

Контролер Arduino Uno побудований на ATmega328 (рисунок 3.3).

Платформа має 14 цифрових входів/виходів (6 з яких можуть використовуватися як виходи ШІМ), 6 аналогових входів, кварцовий генератор 16 МГц, роз'єм USB, силовий роз'єм, роз'єм ICSP та кнопку перезавантаження.

Для роботи необхідно підключити платформу до комп'ютера за допомогою USB-кабелю або подати живлення від адаптера AC/DC чи батареї.

На відміну від попередніх плат, що використовували FTDI USB-мікроконтролер для зв'язку через USB, нова Arduino Uno використовує мікроконтролер ATmega8U2 [14].



Рис. 3.3. Контролер Arduino Uno

Uno розроблена так, щоб перед записом нового коду перезавантаження здійснювалася самою програмою Arduino на комп'ютері, а не натисканням кнопки на платформі [14].

Одна з ліній мікросхеми ATmega8U2, які управляють потоком даних, підключена до виводу перезавантаження мікроконтролера ATmega328 через конденсатор 100нФ. Активація цієї лінії, тобто подання сигналу низького рівня, перезавантажує мікроконтролер.

Програма Arduino, використовуючи цю функцію, завантажує код одним натисканням кнопки Upload у середовищі програмування. Подача сигналу низького рівня по лінії DTR узгоджена з початком запису коду, що скорочує тайм-аут завантажувача.

Порівняльний аналіз програмованих логічних контролерів наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

### Порівняльний аналіз ПЛК

Характеристики	Arduino Uno	Овен	Siemens
Процесор	ATmega8U2	RISC-ARM9	S7-300
Напруга	(рекомендована) 7–12 В, (гранична) 6–20 В	220 В змінного струму і 24 В постійного струму	24/48/72/96/110 В DC, 110/230 В AC
Вхідний струм	40 мА	75 мА	80 мА
Обсяг оперативної пам'яті	32 КБ (ATmega328)	8 МБ	до 8 МБ
Аналогові модулі вводу	6	до 8 входів	до 8 входів

Продовження таблиці 3.1.

Характеристики	Arduino Uno	Овен	Siemens
Цифрові входи/виходи	14	14	16
Інтерфейси	USB-UART	Ethernet 10/100 Mbit/s, RS-485, RS-232 (2 канали), USB 2.0 Device, USB 2.0 Host	PROFIBUS DP, PROFIBUS DP/DRIVE, Industrial Ethernet/PROFINET, PtP

У даному проєкті підходить кожен із представлених контролерів, але мій вибір зупинився на контролері Siemens, оскільки він зручний у використанні та економічно вигідний. Він повністю відповідає параметрам, необхідним для цього проєкту.

### 3.1.2. Вибір датчика рівня

Прилад NivoCap (рисунок 3.4) належить до ємнісних вимірювачів рівня та працює за двопровідною схемою.

Оснований на принципі вимірювання електричної ємності датчика. Особливістю ємнісного перетворювача рівня є те, що його потрібно «навчити» роботі в конкретному середовищі вимірювання, зафіксувавши дві контрольні точки рівня продукту.

Рівнеміри цього типу мають високий поріг чутливості, що дає їм перевагу перед багатьма іншими приладами, на діапазон вимірювання яких суттєво впливає наявність мертвої зони [15].



Рис. 3.4. Рівнемір NivoCap

Ємнісний вимірювач рівня NivoCap має низку переваг:

- а) високий поріг чутливості, що дає можливість якісного вимірювання при низькому рівні продукту;
- б) використання як вимірювача рівня для рідких, так і сипучих твердих матеріалів;
- в) досить низька вартість;
- г) мала інерційність приладу, що дозволяє стабілізувати роботу при складних спрацюваннях;
- д) вимірювання рівня непровідних продуктів із низькою діелектричною проникністю — аж до  $\epsilon r = 1,5$ ;
- е) можливість програмування на місці;
- ж) гарантійний строк — 5 років.

Ємнісний перетворювач рівня NivoCap добре підходить як економічне рішення для вимірювання рівня провідних та непровідних рідин, а також сипучих матеріалів. Для конкретного застосування NivoCap легко підібрати потрібну комплектацію.

NivoCap призначений для вимірювання рівня (об'єму) непровідних і провідних рідких середовищ, а також сипучих твердих матеріалів. Наприклад:

1. рідкі гази;
2. паливо, оливи;
3. спирти;
4. вода;
5. гранули.

Ємнісні рівнеміри FineTek EB [16] застосовуються для безперервного контролю рівня у резервуарі та підходять для різних видів рідких і сипучих речовин (рисунок 2.18).

Використання ємнісного датчика в пристроях серії FineTek EB дозволяє працювати практично з будь-якими типами рідких, сипучих та гранульованих продуктів. При цьому датчик FineTek EB забезпечує високу точність вимірювання при безперервному контролі.



Рис. 3.5. Рівнемір FineTek EB

Ультразвуковий датчик відстані — модуль HC-SR04 використовує акустичне випромінювання для визначення відстані до об'єкта (рисунок 3.6).

Цей безконтактний датчик забезпечує високу точність і стабільність вимірювань.

Діапазон вимірювань: від 2 см до 400 см.

На показання датчика практично не впливають сонячне випромінювання та електромагнітні шуми.

Модуль поставляється у комплекті з передавачем і приймачем [17].

Порівняльний аналіз датчиків рівня представлений у таблиці 2.2.

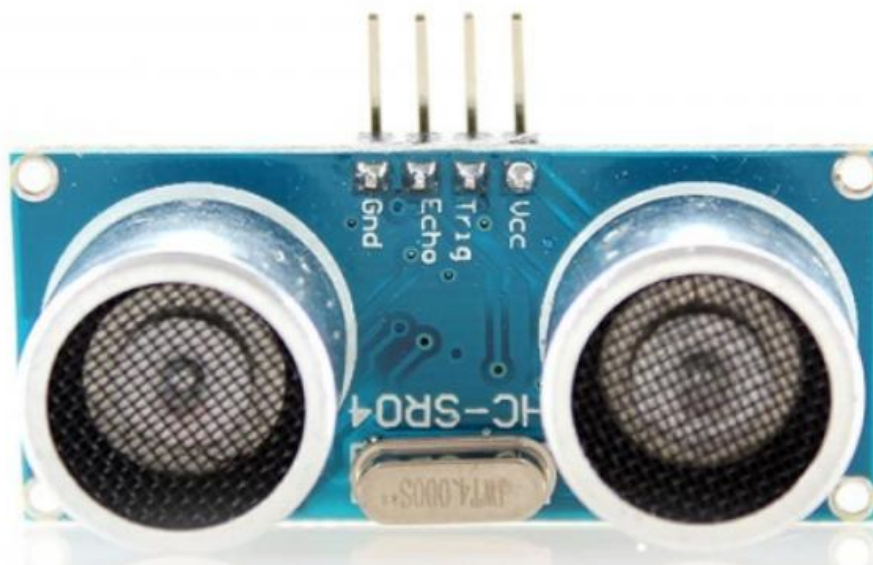


Рис. 3.6. Ультразвуковий датчик відстані HC-SR04

Таблиця 3.2

### Порівняльний аналіз датчика рівня

Характеристики	NivoCap	HC-SR04	FineTek EB
Напруга живлення	12...36 В постійного струму	+5 В постійного струму	12...36 В постійного струму
Вихідний струм	4...20 мА	Не більше 2 мА	4...20 мА
Діапазон вимірювань	0,2...20 м	від 2 см до 400 см	до 50 м
Температура середовища	25°C ... + 70°C з використанням обігрівача: - 70°C ... + 70°C	-40°C ÷ 50°C	у межах від -50°C до +200°C
Допустимий тиск у резервуарі	40 бар	40 бар	45 бар
Вага	2,5 кг	100 грамів	2,3 кг

Найбільш підходящим для даного проєкту є датчик HC-SR04 — це ультразвуковий далекомір, який відповідає всім параметрам для даного проєкту та простий у підключенні до контролера Arduino Uno, який був обраний раніше.

### 3.1.3. Вибір насосу

#### Насос HANIL PB-43-1

Циркуляційний насос (рисунок 3.7) з мокрим ротором і різьбовим з'єднанням. Має попередньо встановлювані ступені частоти обертання для регулювання потужності. Застосовується в системах опалення, промислових циркуляційних системах, системах подачі холодної води та системах кондиціонування.



Рис. 3.7. Насос HANIL PB-43-1

#### Насос PH-042E

Насос PH-042E — одинарний фланцевий циркуляційний насос типу inline з сухим ротором у чавунному корпусі для застосування в циркуляційних системах (рисунок 3.8). Насос використовується для перекачування робочого середовища у системах водопостачання, опалення, кондиціонування та охолодження, а також для підвищення тиску.

Продуктивні насоси WILO PH-123 E серії PH без проблем функціонують при оптимальному робочому тиску, витримуючи температуру навколишнього середовища не більше 40 °C, і можуть застосовуватися тривалий час. Це стає

можливим завдяки вбудованому тепловому захисту двополюсного електродвигуна з класом ізоляції F. Усі деталі насоса WILO PH-123 E виготовлені з міцних і надійних матеріалів, що забезпечують довговічність обладнання. Також ці пристрої дуже просто та зручно монтуються, не створюючи зайвих труднощів для установників.

Порівняльний аналіз насосів наведено в таблиці 3.3.



Рис. 3.8. Насос PH-042E

Таблиця 3.3

### Порівняльний аналіз насоса

Характеристики	Насос PH-042E	HANIL PB-43-1
Споживана потужність	90 Вт	40 Вт
Напруга	220 В	220 В
Діаметр труби	32 мм	32 мм
Максимальний тиск	6 бар	4 бар
Продуктивність, Q	3,6 м <sup>3</sup> /год	3,3 м <sup>3</sup> /год
Мінімальна температура рідини	1 °C	1 °C
Максимальна температура рідини	100 °C	80 °C
Температура навколишнього середовища	до 40 °C	до 40 °C
Вага	3,5 кг	3,8 кг

У даному випадку підходящим для цього проєкту за технічними параметрами є насос HANIL PB-43-1. Звичайно, його потужність і продуктивність менші, ніж у насоса PH-042E, проте він вигідніший з економічної точки зору і цілком підходить для реалізації даного проєкту.

### 3.1.4. Вибір фільтру

Сітчастий фільтр — найпростіший пристрій фільтрації, що належить до групи фільтрів грубого механічного очищення (рисунок 2.22). Він має найменші розміри, а його конструкція є елементарною. Фільтрувальний елемент — металева сітка, що забезпечує фільтрацію від великих зважених частинок розміром понад 400–500 мкм.

Встановлюється як на подачу холодної, так і гарячої води — максимальна робоча температура води становить близько 120 °С, максимальний робочий тиск — близько 20 бар.

Переваги:

- низька вартість;
  - проста конструкція;
  - мінімальні габарити;
  - універсальність монтажу (може встановлюватися як на вертикальний, так і горизонтальний трубопровід);
  - широкий діапазон робочих температур;
  - не потребує заміни витратних матеріалів;
  - не потребує встановлення редукторів тиску.
- Недоліки:
- затримує тільки великі механічні домішки (понад 400–500 мкм);
  - потребує демонтажу заглушки та переривання циклу подачі води для очищення сітки.

Сфера застосування - системи холодного та гарячого водопостачання квартир, котеджів тощо.



Рис. 3.9. Сітчастий фільтр

### Картриджний фільтр

Картриджні фільтри, що використовуються в побуті, належать до фільтрів тонкого очищення (рисунок 3.10). Вони відрізняються матеріалом колби — метал або пластик; типом фільтрувального елемента — металева чи полімерна сітка, гофрований паперовий, поліестерний або спеціальний картридж; розміром комірки фільтрувального елемента; робочим тиском; пропускною здатністю та максимальними робочими температурами.

Матеріал колби залежить від призначення:

- для холодної води зазвичай використовуються пластикові колби,
- для гарячої — металеві.

Пластикові колби можуть бути як прозорі, так і непрозорі.

Матеріал фільтрувальної сітки (метал або полімер) майже не впливає на якість фільтрації, оскільки фільтрувальний елемент регулярно замінюється. Заміна здійснюється у міру забруднення, але, як правило, не рідше ніж раз на два місяці.

Картриджні фільтри побутового та напівпромислового призначення розраховані на стандартний тиск водопроводу та можуть застосовуватися практично без обмежень.

У разі потреби зниження тиску в системі водопроводу застосовуються картриджні фільтри зі вбудованим редуктором з діапазоном регулювання від 1 до 6 бар.



Рис. 3.10. Картриджний фільтр

Порівняльний аналіз для фільтрів подано в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4

#### Порівняльний аналіз фільтра

Характеристики	Картриджний фільтр	Сітчастий фільтр
Робоче середовище	Вода	Вода
Діаметр	32 мм	32 мм
Робоча температура	73 °С	120 °С
Робочий тиск	близько 25 бар	близько 20 бар
Продуктивність	25 л/хв	15 л/хв
З'єднання	Різьбове	Різьбове

У даному випадку можна обрати як сітчастий фільтр, так і картриджний фільтр. Якщо з метою економії обрати фільтр, то більш вигідним є сітчастий фільтр, а якщо обрати за показниками продуктивності — то картриджний фільтр. Але у нашому випадку сітчастий фільтр за продуктивністю підходить до даного проєкту.

### 3.1.5. Вибір електромагнітного клапана

#### Електромагнітний клапан SLP-15

Клапани з електромагнітним керуванням призначені для контролю потоку робочого середовища (рідина, пари, газу, масла), що перебуває під тиском (рисунок 3.11).



Рис. 3.11. Електромагнітні клапани серії SLP-15

Електромагнітні клапани серії SLP — це серія клапанів з непрямим (пілотним) керуванням, які приводяться в дію електромагнітом та шляхом підсилення за рахунок мембрани і потоку робочого середовища (підходить для використання при достатньо високому тиску).

#### Електромагнітний клапан Вору 2W025-08

Тип електромагнітного клапана — нормально закритий, з різьбовим з'єднанням. Даний клапан застосовується у технологічному процесі, де виконує функцію подачі та відведення рідини (рисунок 3.12).

Цей тип клапана є надійним і більш невибагливим у роботі, а також під час роботи споживає мінімальну кількість енергії.



Рис.3.12. Електромагнітний клапан Вору 2W025-08

Порівняльний аналіз клапанів представлено в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5

#### Порівняльний аналіз клапанів

Характеристики	Вору 2W025-08	Клапан SLP-15
Тиск	0,2– 10 бар	0,1– 10 бар
Діаметр	32 мм	32 мм
Температура	від - 5 °С до 80 °С	від - 1 °С до 80 °С
Частота	50– 80 Гц	40– 70 Гц
Напруга	220 В	220 В і 24 В
Вага	300 г	350 г

У даному випадку обирається електромагнітний клапан Вору 2W025-08, оскільки він повністю підходить для даного проекту та є економічно вигідним.

#### Висновки до розділу 3

У третьому розділі здійснено комплексний аналіз технічних засобів, необхідних для побудови системи автоматизованого керування технологічним процесом очищення стічних вод, а також обґрунтовано вибір обладнання, яке забезпечує надійну та ефективну роботу всієї системи.

На основі оцінки вимог до технологічного процесу, умов експлуатації та функціональних можливостей різних типів контролерів було визначено, що програмований логічний контролер Siemens S7-300 є оптимальним рішенням для реалізації завдань проєкту. Він забезпечує високу надійність, широкий спектр комунікаційних можливостей, гнучкість конфігурації та стійкість до промислових перешкод, що є критично важливим у системах очищення промислових вод.

У процесі добору первинних засобів вимірювання проведено порівняння датчиків рівня різних типів. З урахуванням технічних параметрів, простоти інтеграції та можливості використання в умовах очищення стічних вод визначено, що найдоцільнішим є використання ультразвукового датчика HC-SR04, який забезпечує достатню точність, стабільність вимірювань та простоту підключення.

Під час аналізу насосного обладнання було розглянуто два основні варіанти циркуляційних насосів. З огляду на економічність експлуатації, конструктивні особливості та відповідність вимогам технологічного процесу оптимальним вибрано насос HANIL PB-43-1, який забезпечує стабільну роботу системи при менших експлуатаційних витратах.

Окрему увагу приділено вибору фільтрувального обладнання. Порівняння картриджних та сітчастих фільтрів показало, що для запропонованої технологічної системи найбільш доцільним є застосування сітчастого фільтра, який має достатню продуктивність, просту конструкцію та не потребує частого технічного обслуговування, що сприяє здешевленню експлуатації.

Під час порівняльного аналізу електромагнітних клапанів визначено, що клапан Вору 2W025-08 найбільш повно відповідає вимогам проєкту за технічними характеристиками, умовами роботи та економічною доцільністю, що забезпечує надійну реалізацію функцій подачі та відведення води у технологічному процесі.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У ході виконання роботи проведено дослідження процесів підготовки та очищення промислових вод, розроблено систему автоматизованого керування технологічним процесом та обґрунтовано вибір комплексу технічних засобів, необхідних для її надійного функціонування.

У першому розділі виконано детальний аналіз сучасних технологій підготовки води та очищення стічних вод. Розглянуто властивості вихідної води, вимоги підприємств до її якості, етапи технологічної підготовки та основне обладнання, що застосовується у промислових системах. Особливу увагу приділено фізико-хімічним методам очищення, які є критично важливими для забезпечення стабільної роботи виробничих процесів. Проведений огляд дав можливість визначити ключові фактори, які впливають на якість водопідготовки, та сформувані технічні вимоги до майбутньої автоматизованої системи.

У другому розділі досліджено технологічну схему очищення промислових стічних вод та виконано математичний опис об'єкта керування. Проведено структурне моделювання, ідентифікацію елементів системи та побудовано передавальні функції для окремих технологічних ланок. На основі аналізу динамічних характеристик об'єкта синтезовано систему автоматичного керування рівнем та витратою води, а також підбрано параметри ПІ-регулятора. Моделювання в середовищі MATLAB/Simulink підтвердило працездатність розробленої системи та її здатність забезпечувати стабільність роботи технологічного процесу в штатних і змінних умовах.

У третьому розділі обґрунтовано вибір обладнання для реалізації системи автоматизації. Визначено найбільш доцільний тип програмованого логічного контролера, датчика рівня, насосного обладнання, фільтрувальних елементів та електромагнітної арматури. Підбір технічних засобів здійснено з урахуванням вимог технологічного процесу, умов експлуатації, надійності, енергоефективності та економічної доцільності. У результаті сформовано оптимальний комплекс

обладнання, здатний забезпечити ефективне функціонування автоматизованої системи очищення промислових вод.

Сформована система керування є технічно обґрунтованою, адаптованою до вимог сучасного виробництва та здатною підвищити ефективність очищення стічних вод, знизити енерговитрати, мінімізувати втручання оператора та підвищити загальну екологічну безпеку підприємства.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Орлов В.О., Литвиненко Л.Л., Орлова А.М. Водопостачання промислових підприємств: навч. посіб. К. : Знання, 2014. 278 с.
2. Айрапетян Т. С. Конспект лекцій з дисципліни «Технологія очистки промислових стічних вод» / Т. С. Айрапетян ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2017. – 73 с.
3. Саблій Л.А., Мацнев А.І. Водовідведення на промислових підприємствах: навч. посіб. Рівне: Українська державна академія водного господарства, 1998. 219 с. 21. Саблій Л.А. Фізико-хімічне та біологічне очищення висококонцентрованих стічних вод: автореф. дис. на здобуття наук, ступеня докт. техн. наук / Л. А. Саблій. К.. 2011. 40 с
4. Кравченко В.С. Водопостачання та водовідведення: Навчальний посібник.- Рівне: Укр. держ. акад. водного гос-ва, 1997.- 235 с.
5. Брик М. Т. Енциклопедія мембран: у 2 т. Київ: ВД «Києво-Могилянська академія», 2005. Т. 1. 658 с
6. Ковальчук В.А. Очистка стічних вод. Рівне: ВАТ «Рівненська друкарня», 2002. 622 с.
7. Правила приймання стічних вод підприємств у комунальні та відомчі системи каналізації міст та селищ України. КДП – 204 - №12 Укр. 218 – 92.
8. Правила приймання та скиду (водовідведення) стічних вод підприємств у систему каналізації м. Дніпропетровська. Дніпропетровськ, 2003. – 57 с.
9. Запольський А.К., Мішкова-Кліменко Н.А., Астрелін І.М., Брик М.Т., Гвоздик П.І., Князькова Т.В. Фізико-хімічні основи технології очищення стічних вод: Підручник. К.: Лібра, 2000. 552 с.
10. Автоматизація системи очищення промислових стічних вод методом флоатації. Режим доступу: <https://e-protection.com.ua/portfolio-items/avtomatizatsiya-sistemy-ochistki-promyshlennyh-stochnyh-vod-metodom-flotatsii/>.

11. Методичні вказівки з оформлення графічної частини конструкторської документації проектів автоматизації. Структурні, функціональні та принципові схеми / укладач О.Ю. Журавльов. – Суми: Вид-во СумДУ, 2006. – 48с.

12. Siemens S7-300. Режим доступу: <https://www.siemens.com/ua/uk/produkty/avtomatyzatsiya-promyslovosti/systemy-avtomatyzatsiyi/systemy-promyslovoyi-avtomatyzatsiyi-simatic/plc-kontrolery-simatic/simatic-s7-300.html>.

13. Моноблочний контролер ОВЕН ПЛК-100. Режим доступу: <https://ukrspecavtomat.com.ua/uk/products/oven-plk-100/>.

14. Плата Arduino UNO R3 (ATmega328P) та інтерфейс ATmega16U2. Режим доступу: [https://arduinokit.com.ua/ua/p2443129646-plata-arduino-uno.html?srsltid=AfmBOooiPjajCh\\_7CR2qwiKw-veVgLzLx9XcgcGvYPt-OW63V7jU0lzd](https://arduinokit.com.ua/ua/p2443129646-plata-arduino-uno.html?srsltid=AfmBOooiPjajCh_7CR2qwiKw-veVgLzLx9XcgcGvYPt-OW63V7jU0lzd).

15. Датчик рівня Nivelco NIVOCAP СТК-304-2. Режим доступу: <https://trade-control.com.ua/ua/nivocap-ctk-304-2>.

16. Ємнісний датчик рівня FineTek SA. Режим доступу: <https://simpletech.com.ua/ua/datchyky-rivnia/yemnisnyi-datchyk-rivnia-finetek-sa>

17. Ультразвуковий датчик відстані HC-SR04. Режим доступу: <https://arduino.ua/prod182-yltrazvykovoi-datchik-rasstoyaniya-hc-sr04?srsltid=AfmBOoo7Sla4uCDKdgPojwg2QwiP9-uHuQzsjW5nrU5yC8Za4vQtHWvE>.