

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії  
(повна назва)

Кафедра Кафедра мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв  
(повна назва)

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Система фільтрації рідини на підприємстві  
за допомогою сучасної електроніки  
(тема)

Виконав:

студент 4 курсу, групи МНТМН-21-1

Дмитрук Софія Сергіївна  
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 153 Мікро- та  
наносистемна техніка  
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма: «Мікро- та  
наноелектроніка»  
(повна назва освітньої програми)

Керівник ст. викл. каф. МЕЕПП

Васильєв Ю.С.  
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Бондаренко І.М.  
(прізвище, ініціали)

2025 р.

## Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії  
 Кафедра Кафедра мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв  
 Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)  
 Спеціальність 153 Мікро- та наносистемна техніка  
 (код і повна назва)  
 Тип програми освітньо-професійна  
 Освітня програма Мікро- та наноелектроніка»  
 (повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
 (підпис)  
 «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_р.

**ЗАВДАННЯ**

## НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Студентові Дмитрук Софії Сергіївні  
 (прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Система фільтрації рідини на підприємстві за допомогою сучасної електроніки

затверджена наказом університету від 26.05 2025\_\_р. № 414 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії \_\_\_\_\_ 2025\_\_р.

3. Вихідні дані до роботи \_\_\_\_\_

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі: 1.Аналіз існуючих рішень та літератури. 2. Пошук та аналіз елементної бази, розбір принципу роботи елементів та їх підключення. 3. Розробка мінісистеми фільтрації рідин.

4. Виконання кресленників \_\_\_\_\_



## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до передатестаційної роботи містить 55 сторінок, 20 рисунків, 1 таблицю та 26 посилань.

### СИСТЕМА ФІЛЬТРАЦІЇ РІДИНИ НА ПІДПРИЄМСТВІ ЗА ДОПОМОГОЮ СУЧАСНОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ.

Об'єкт дослідження – системи фільтрації рідин, що експлуатуються на промислових підприємствах.

Мета роботи – комплексний аналіз використання сучасної електроніки в системах фільтрації рідин на підприємствах.

Метод – теоретичний і експериментальний.

Актуальність: У сучасних умовах розвитку промисловості, де зростають вимоги до якості продукції, енергоефективності та екологічної безпеки. Особливого значення на сьогодні набуває проблема ефективного очищення технологічних рідин. Фільтрація рідин є критично важливою для багатьох галузей промисловості: хімічної, харчової, фармацевтичної, нафтопереробної та інших. Якість фільтрації безпосередньо впливає на стабільність виробничим вимогам. Таким чином інтеграція електронних компонентів у фільтрувальні системи не тільки автоматизує контроль і управління процесами, а й дозволяє здійснювати моніторинг у режимі реального часу, оптимізувати споживання ресурсів, своєчасно виявляти несправності, підвищувати безпеку і надійність виробництва.

## ABSTRACT

The explanatory note to the pre-certification work contains 55 pages, 20 figures, 1 table and 26 references.

### LIQUID FILTRATION SYSTEM AT THE ENTERPRISE WITH THE HELP OF MODERN ELECTRONICS.

The object of research is liquid filtration systems operated at industrial enterprises.

Purpose - a comprehensive analysis of the use of modern electronics in liquid filtration systems at enterprises.

Method - theoretical and experimental.

Relevance: In the current conditions of industrial development, where the requirements for product quality, energy efficiency and environmental safety are increasing. The problem of effective purification of process liquids is of particular importance today. Filtration of liquids is critical for many industries: chemical, food, pharmaceutical, oil refining and others. The quality of filtration directly affects the stability of production requirements. Therefore, the integration of electronic components into filtration systems not only automates process control and management, but also allows for real-time monitoring, optimises resource consumption, timely detection of faults, and improves production safety and reliability.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	7
ВСТУП .....	8
1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД.....	10
1.1 Основні поняття про промислові фільтри .....	10
1.2 Класифікація промислових фільтрів.....	15
1.2.1 Фільтри періодичної дії.....	16
1.2.2 Фільтри безперервної дії .....	21
1.3 Електронні системи та їх компоненти у системах фільтрації .....	26
1.3.1 Класифікація датчиків .....	28
1.3.2 Класифікація контролерів .....	32
1.3.3 Класифікація виконавчих механізмів .....	34
1.3.4 Класифікація людино-машинних інтерфейсів.....	37
1.3.5 Класифікація комунікаційних модулів .....	38
2 РОЗРОБКА МІНІСИСТЕМИ ФІЛЬТРАЦІЇ РІДИНИ .....	40
2.1 Теоретичні відомості та підбір елементів .....	40
2.1.1 Плата Arduino Uno Rev3.....	40
2.1.2 Датчики вимірювання.....	42
2.1.3 Виконавчий механізм .....	45
2.2 Алгоритм роботи мінісистеми фільтрації рідин .....	48
ВИСНОВКИ.....	51
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ .....	53
ДОДАТОК А.....	<b>ОШИБКА! ЗАКЛАДКА НЕ ОПРЕДЕЛЕНА.</b>
ДОДАТОК Б .....	<b>ОШИБКА! ЗАКЛАДКА НЕ ОПРЕДЕЛЕНА.</b>

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- АСКТП – автоматизовані системи керування технологічними процесами;
- ЕВМ – Електричні виконавчі механізми;
- ЗО – Зворотний осмос;
- МК – Мікроконтролери;
- МФ – Мікрофільтрація;
- НМІ – Human machine interface (людино-машинний інтерфейс);
- НФ – Нанофільтрація;
- ОВП – Окисно-відновлювальний потенціал;
- ОЗП – Оперативний запам'ятовувальний пристрій;
- ПВМ – Пневматичні виконавчі механізми;
- ПЗП – Постійний запам'ятовувальний пристрій;
- ПЛК – Програмовані логічні контролери;
- УФ – Ультрафільтрація;
- ФПАКМ – Фільтр-прес автоматичний камерний мембранний;
- SCADA – Supervisory Control and Data Acquisition (супервізорне керування і збирання даних);

## ВСТУП

Фільтрація рідин – це один із ключових процесів у багатьох галузях промисловості, від хімічного виробництва та фармацевтики до харчової промисловості, енергетики та водоочищення. Якість фільтрації безпосередньо впливає на ефективність виробництва, надійність роботи обладнання та безпеку кінцевого продукту. У зв'язку з цим, автоматизації на основі сучасних електронних засобів керування стає все більш актуальною та перспективною.

В останні роки стрімко зростає рівень інтеграції електроніки у виробничі процеси. Використання датчиків, мікроконтролерів, інтелектуальних виконавчих механізмів та засобів візуалізації дозволяє автоматизувати навіть найскладніші фільтраційні схеми. Впровадження таких технологій сприяє побудові ефективних, адаптивних і надійних систем очищення, які здатні оперативно реагувати на зміну умов і характеристик середовища. Зокрема, у системах фільтрації води або технологічних рідин на промислових об'єктах впровадження мікроконтролерного управління дає можливість автоматично контролювати рівень, тиск, прозорість та інші критичні параметри рідини.

Об'єктом дослідження даної дипломної роботи є системи фільтрації рідин, які експлуатують на підприємствах. Предметом – мінісистема фільтрації, побудована із застосуванням сучасної електроніки. Головна мета роботи – проаналізувати, спроектувати та реалізувати мінісистему, здатну на основі вхідних даних від датчиків приймати рішення про подальші дії в системі, керуючи виконавчими механізмами. Для цього використовується програмований мікроконтролер Arduino Uno Rev3, який завдяки своїй гнучкості, доступності та підтримці численних бібліотек, є ідеальним для реалізації прототипів і навчальних проектів, що мають практичне застосування у виробництві.

У межах дипломної роботи було підібрано три основні сенсори: датчик рівня, датчик тиску та датчик каламутності рідини. Ці сенсори дозволяють всебічно оцінювати якість середовища, яке підлягає фільтрації. Датчик рівня

визначає наявність достатньої кількості рідини у резервуарі, запобігаючи марній роботі обладнання. Датчик тиску контролює працездатність системи і виявляє можливі засмічення або протікання. Датчик каламутності оцінює ступінь забруднення рідини та приймає рішення про необхідність відкриття виконавчого механізму.

Для реалізації логіки керування використовується електромагнітний клапан, який керується за допомогою одноканального модуля з реле. Такий підхід дозволяє забезпечити чітке керування подачею рідини відповідно до даних, отриманих з сенсорів. Вся система живиться від автономного джерела, а саме батареї. Це рішення забезпечує гнучкість у використанні в умовах обмеженого доступу до мережі або під час мобільного застосування.

Актуальність даної теми обумовлена необхідністю впровадження простих, доступних і функціональних рішень для локального очищення рідин на підприємствах. Фільтрація рідин є критично важливою для багатьох галузей промисловості: хімічної, харчової, фармацевтичної, нафтопереробної та інших. Якість фільтрації безпосередньо впливає на стабільність виробничим вимогам. Таким чином інтеграція електронних компонентів у фільтрувальні системи не тільки автоматизує контроль і управління процесами, а й дозволяє здійснювати моніторинг у режимі реального часу, оптимізувати споживання ресурсів, своєчасно виявляти несправності, підвищувати безпеку і надійність виробництва.

## 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

Фільтрація рідин на промислових підприємствах має сильний вплив на ефективність роботи всього підприємства та на його окремі процеси. Добре спланована та правильно підібрана система фільтрації рідини дозволяє значно знизити витрати на обслуговування, продовжити термін служби обладнання підприємства та підтримувати безперервність роботи виробництва. Під рідинами розуміємо олії та мастильні емульсії, охолоджувальну рідину, рідке паливо, клеї, розчинники, воду тощо. Різні види фільтрів та фільтруючих елементів використовуються залежно від типу процесу, системи та умов експлуатації.

### 1.1 Основні поняття про промислові фільтри

Фільтрація — це процес, у якому тверді частинки, присутні в розчині чи суспензії, відокремлюються від рідини або газу за допомогою пористого середовища, яке утримує тверді речовини, але дозволяє рідині проходити.

Пористе середовище, яке використовує для утримання твердих речовин, називається фільтрувальним середовищем. Накопичені тверді речовини на фільтрі називається фільтрувальним осадом, а очищена рідина, що проходить через фільтр — фільтратом.

Процес відділення твердих частинок від рідини відбувається за допомогою різних механізмів. Тому за цими механізмами можна виділити три типи фільтрації:

- поверхнева фільтрація;
- глибинна фільтрація;
- фільтрація з утворенням осаду.

Поверхнева фільтрація — це просіюючий процес, завдяки якому пори або отвори середовища запобігають проходженню твердих частинок.

Механізми проціджування та зіткнення відповідають за поверхневу фільтрацію. Для цієї мети використовуються пластини з отворами або ткани сита. Прикладом є целюлозний мембранний фільтр.

Глибинна (об'ємна) фільтрація — це процес, при якому частинки затримуються всередині об'ємної структури фільтруючого матеріалу завдяки складним, звивистим каналам. Цьому сприяє механізм заплутування. Цей принцип використовується в засипних, картриджних (намотаних, насипних) та деяких мішкових фільтрах.

Фільтрація з утворенням осаду — це механізм фільтрації у якому осад, що накопичується на поверхні фільтра, використовується як фільтр. Фільтри, які використовують цей механізм складаються з грубої ткані, через яку пропускається суспензія твердих частинок, таким чином, що вони перекривають отвори та утворюють фільтрувальний шар. Прикладом такого фільтрувального шару є осад, виготовлений з діатоміту. Цей осад може видаляти колоїдні частинки розміром менше мікрметра з високою ефективністю.

Також поверхневу фільтрацію умовно класифікувати за напрямком потоку:

- фільтрація з прямим потоком;
- фільтрація з перехресним потоком.

Фільтрація з прямим потоком або тупикова фільтрація (рисунок 1.1) є найпростішою формою фільтрації. При такій фільтрації рідина, що подається, проходить через поверхню фільтра під дією тиску. Затримані частинки залишаються на поверхні мембрани, а рідина, що очищається вільно проходить крізь неї. З часом затримані частинки накопичуються на поверхні фільтра або сітки, тоді вони потребують очищення для відновлення їхньої продуктивності. Тому на великих та нових очисних спорудах, як правило, встановлюються механічні самоочисні решітки, тоді як на маленьких та старих очисних встановлюють решітки зручним очищенням. Самоочисні решітки

бувають різних конфігурацій, які дозволяють регулярно очищати та видаляти тверді частинки із отворів решітки

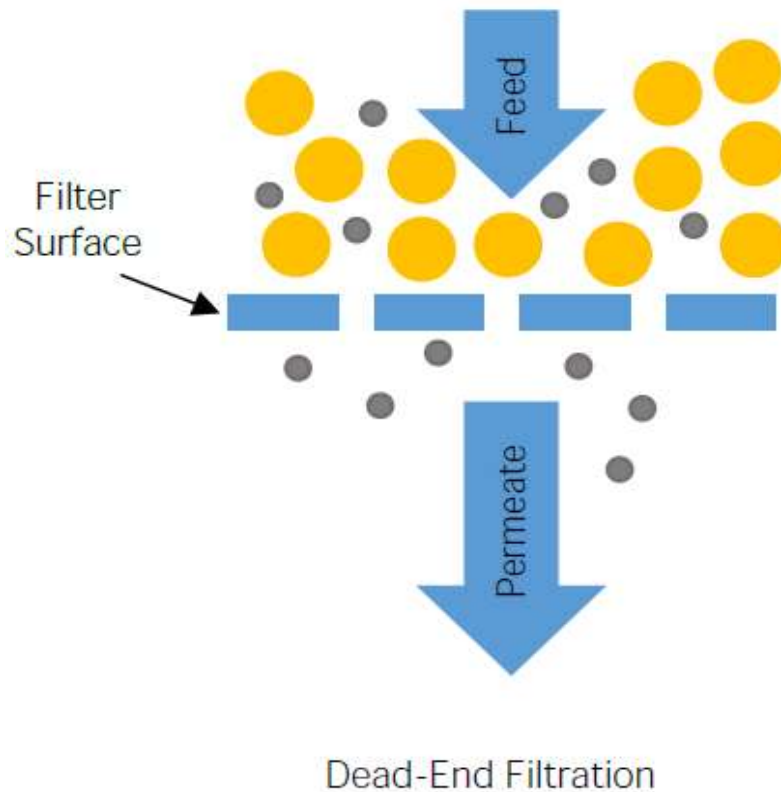


Рисунок 1.1 – Фільтрація з прямим потоком або тупикова фільтрація

Фільтрація з перехресним потоком або тангенціальна фільтрація (рисунок 1.2) — це метод фільтрації, при якому початковий розчин проходить уздовж поверхні мембрани. Постійний турбулентний потік вздовж поверхні мембрани запобігає накопиченню речовин на поверхні мембрани. Різниця тисків на елементів проганяє частину рідини через мембрану (фільтрат), в той час як частинки, які затримуються мембраною (концентрат), продовжують проходити вздовж поверхні мембрани. Цей процес називається перехресним тому що потоки сировини і концентрату перпендикулярні до потоку фільтрату. У той час як тупикова фільтрація має два потоки, перехресна фільтрація має три: сировина, що проходить через фільтр; фільтрат і концентрат (рідина із затриманими частинкам).

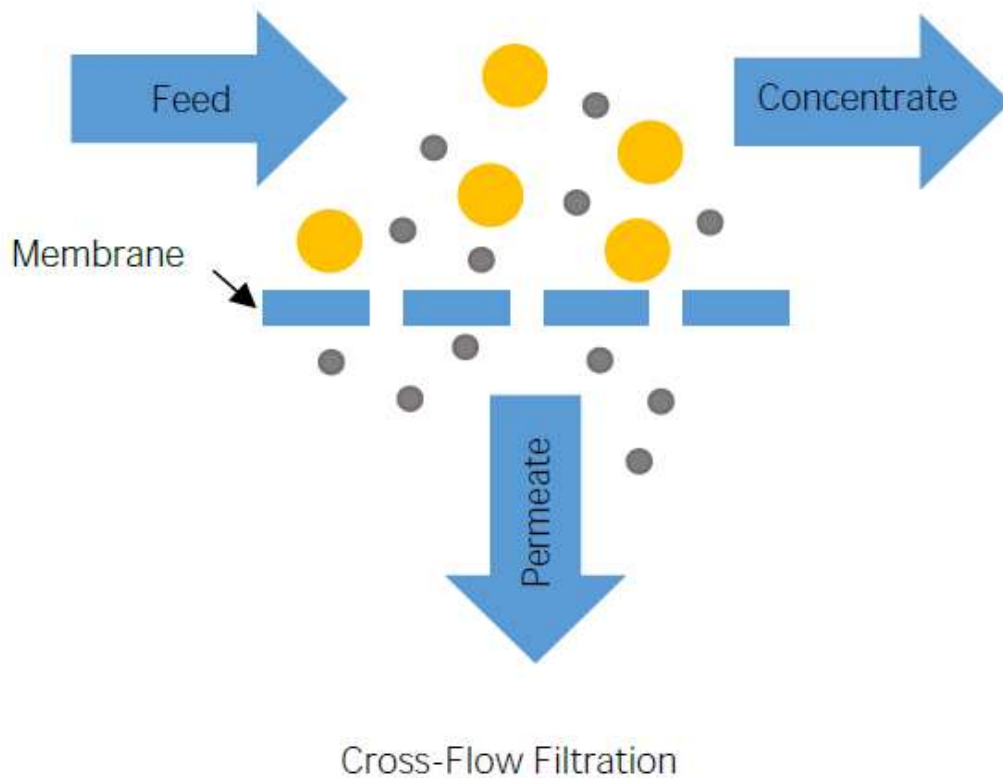


Рисунок 1.2 – Фільтрація з перехресним потоком або тангенціальна фільтрація

Перехресна фільтрація — це чудовий спосіб фільтрування рідин з високою концентрацією речовин, що фільтруються. Потоки сировини, що проходить через фільтр і концентрату допомагають підтримувати поверхню мембрани чистою і вільною від накопичених речовин, завдяки чому мембрана може продовжувати працювати з меншою частиною очищення.

Фільтрація перехресним потоком широко застосовується в чотирьох методах мембранної фільтрації під тиском:

- мікрофільтрація (МФ): видалення бактерій та великих частинок;
- ультрафільтрація (УФ): відділення білків та колоїдів;
- нанофільтрація (НФ): видалення малих органічних молекул;
- зворотний осмос (ЗО): видалення солей та інших розчинених речовин.

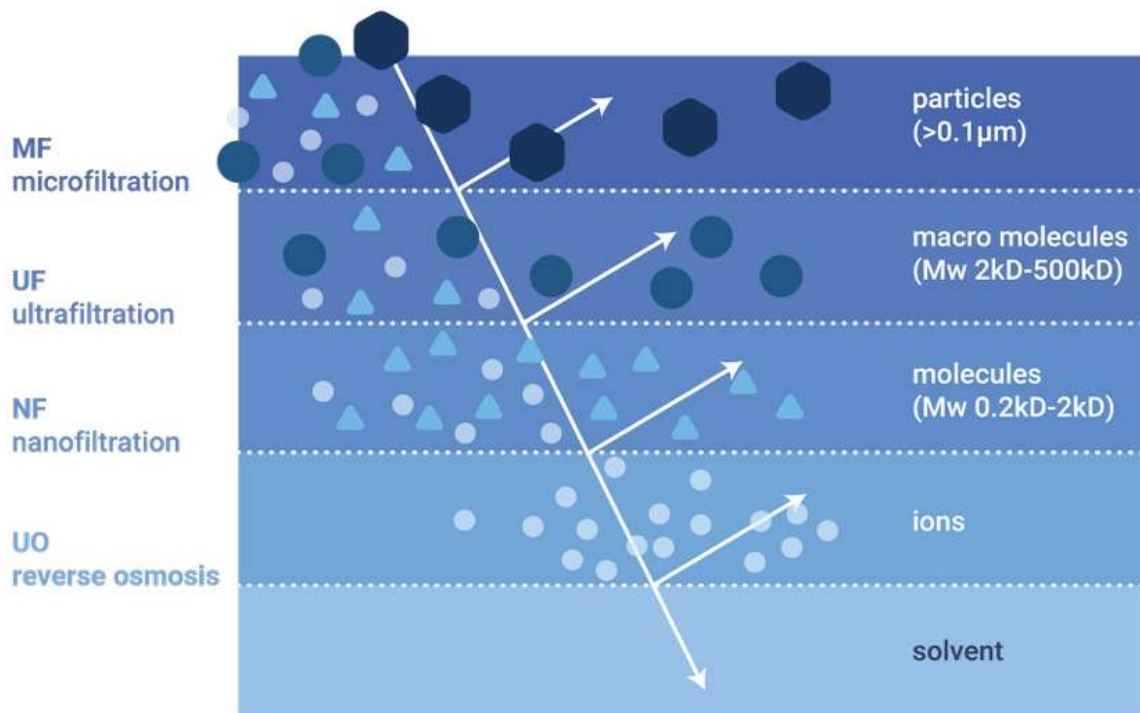


Рисунок 1.3 – Розподіл методів мембранних фільтрацій в порядку зменшення розміру пор мембран

В мікрофільтрації мембрана має розміри отворів від 0,1 до 10 мкм. В основному МФ використовується для повторного видалення великих частинок, колоїдів і бактерій і особливо популярний у харчовій промисловості та виробництві напоїв для розщеплення емульсії олії та води, видалення частинок, концентрації або промивання (наприклад, пігменти, бульйони для бродіння). Для роботи МФ вимагає низький тиск, тому дає більш високий потік.

Ультрафільтрація — це мембрана, що працює під тиском і використовується як в лабораторії, так і промисловості. Мембрана схожа на МФ, але з меншими порами в діапазоні від 0,01 до 0,1 мкм. УФ є кращим, методом розділення, оскільки білки, нуклеїнові кислоти та вуглеводи можна обробляти економічно, навіть у великих масштабах, без використання високих температур, розчинників тощо. Для роботи УФ, як і МФ вимагає низький тиск, що дає більш високий потік.

Нанофільтрація — це новітній процес мембранної фільтрації, який найчастіше використовується для води з низьким загальним вмістом розчинених твердих речовин, з метою пом'якшення та видалення побічних продуктів дезінфекції, таких як природні органічні речовини та синтетичні органічні речовини. Мембрани НФ містять тонкоплівковий композитний шар (<1 мкм) поверх пористого шару (від 50 до 150 мкм) для малої іонної селективності. Здатні відсіювати багатовалентні солі та незаряджені розчинники, пропускаючи при цьому деякі одновалентні солі. Зазвичай НФ використовується для видалення органічних речовин, кольору, запаху, смаку, залишкових кількостей дезінфікуючих засобів і гербіцидів з великих водойм. Прикладами застосування є концентрація та знесолення хімічних продуктів (барвників, оптичних відбілювачів, фармацевтичних препаратів) або відходів. Більш високий робочий тиск необхідний для НФ, тому загальний вихід нижче, ніж у МФ і УФ. НФ може працювати при більш низькому тиску, ніж ЗО, що робить їх ідеальними для досягнення оптимальної комбінації потоку і відторгнення.

Зворотний осмос має більш щільні мембрани, ніж у НФ, які здатні відсіювати всі одновалентні іони, дозволяючи при цьому молекулам води проходити через водні розчини. Поширене застосування для фільтрації ЗО включають в себе опріснення морської води, концентрацію хімічного продукту та концентрацію стічних вод. Для роботи ЗО потрібен найбільший тиск серед всіх методів мембранних фільтрацій, внаслідок чого має загальний вихід нижче ніж у інших.

## 1.2 Класифікація промислових фільтрів

У промисловості застосовуються різні технології фільтрації залежно від типу рідини (питна чи стічна вода, хімічні розчини, нафтопродукти, харчові та інші рідини). По організації роботи класифікують фільтри періодичної і

фільтри безперервної дії, а за величиною робочого тиску поділяють на вакуумні фільтри і фільтри, що працюють під тиском. Фільтри періодичної дії використовуються у виробництвах малої потужності при великому асортименті продуктів, що випускаються; фільтри безперервної дії — у виробництвах великої потужності з безперервним технологічним процесом. До фільтрів періодичної дії відносяться: нутч-фільтри, фільтрпреси, мішкові, стрічкові, патронні, листові. До фільтрів безперервної дії відносяться: барабанні, дискові, карусельні, стрічкові. Класифікацію промислових фільтрів за організацією роботи і за величиною робочого тиску наведено в таблиці 1.1

Таблиця 1.1 – Класифікацію промислових фільтрів

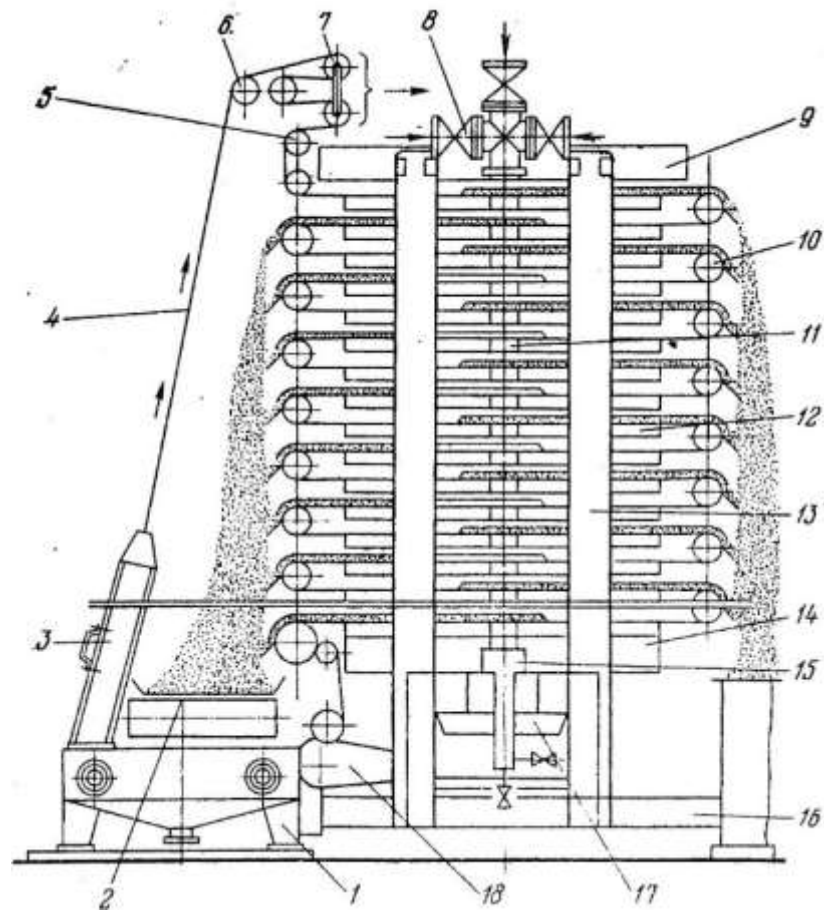
Вакуумні						
Періодичної дії			Безперервної дії			
Нутч-фільтри відкриті	Стрічкові		Барабанні	Дискові	Карусельні	Стрічкові
Фільтри, що працюють під тиском						
Періодичної дії			Безперервної дії			
Фільтрпреси	Нутч- фільтри закриті	Мішкові	Патронні	Барабанні	Дискові	

### 1.2.1 Фільтри періодичної дії.

Автоматичний камерний фільтр з механічним затиском плит або фільтрпрес — це фільтри періодичної дії, що працюють під тиском. Вони складаються з набору вертикальних або горизонтальних плит і рам, між якими затискається фільтрувальна тканина. Суспензія подається в камери між плитами, рідина фільтрується, а осад накопичується. Широко використовуються для фільтрування тонкодисперсних суспензій, що містять від 5 до 500 кг/м<sup>3</sup> твердих частинок, розмірами не більше 3 мм за температури суспензій від 5°C до 90°C. Перевагами фільтрпресу є велика фільтрувальна поверхня відносно до займаної виробничої площі; фільтрація і віджимання осаду в оптимальному шарі під гідравлічним тиском до 15 МПа через гнучкі діафрагми, що різко знижує витрати стислого повітря на просушування осаду.

Також фільтрпрес витрачає 1–2 хв. на допоміжні операції (розкриття плит, вивантаження осаду, закриття преса тощо.), причому досягається хороша регенерація фільтрувальної тканини.

Одним із прикладів фільтрпресу є автоматичний фільтрпрес типу ФПАКМ (рисунок 1.4). Він складається з комплекту горизонтальних фільтруючих плит розташованих між упорною верхньою плитою і нижньою натискною. Верхня упорна плита чотирма стяжками пов'язана з опорною плитою, на якій встановлений механізм гідрозатиску, що опускає, піднімає та ущільнює через натискну плиту комплект фільтруючих плит. Фільтруючі плити підвішені із зазором до верхньої завзятої плити. У зазорах між плитами нескінченною стрічкою протягнута фільтрувальна тканина, що приводиться в рух механізмом під час вивантаження осаду при розсунутих плитах. Механізм пересування включає привід, барабан і натискний ролик. Натяжний пристрій та привід пересування тканини натягують тканину. Після вивантаження осаду тканина протягується через камеру регенерації, де очищається від залишків осаду валками активатора, ножами очищення та промивається водою зрошувальних трубок. Зверху натяжного пристрою встановлений ролик регулювання положення тканини служить для усунення поперечного зміщення тканини щодо фільтруючих плит. Опорна плита та камера регенерації з приводом для переміщення тканини встановлені на загальній рамі. До натискної плити та опорної плити кріпиться телескопічний пристрій, призначений для відведення фільтрату та промивної рідини. Суспензія, промивна рідина та повітря надходять через колектор подачі колектор тиску. Застосування ФПАКМ дозволяє збільшити продуктивність праці в 4...10 разів у порівнянні з рамними фільтрпресами періодичної дії (один оператор може обслуговувати до 10 фільтрпресів) і різко скоротити витрату фільтрувальної тканини. Деталі і вузли ФПАКМ виготовляють з вуглецевих сталей під час роботи з лужними і нейтральними середовищами та із сталі X18H10T і титану під час роботи з кислими середовищами.

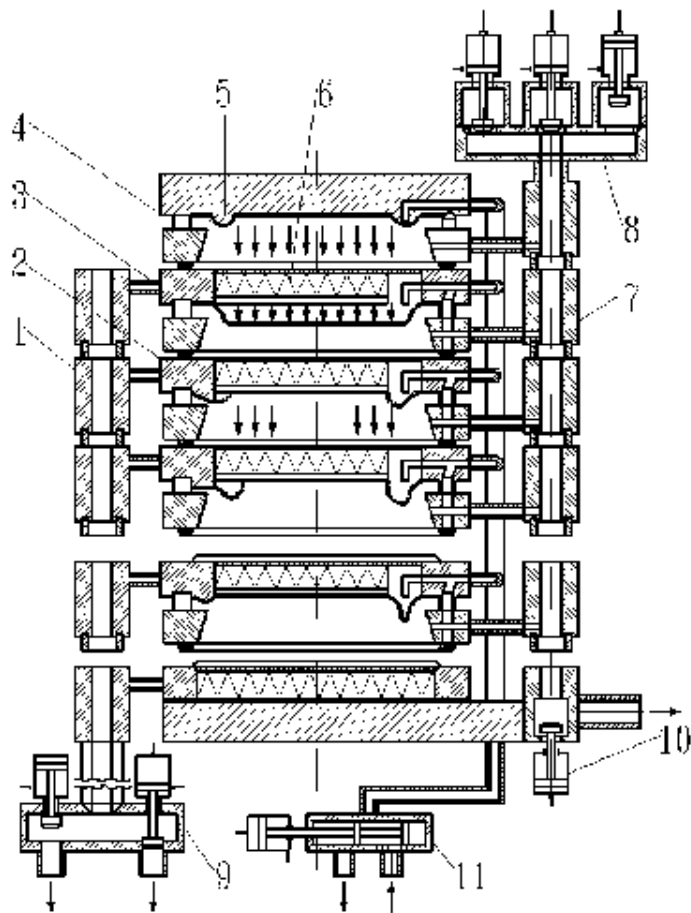


1 – рама; 2 – приймальний лоток; 3 – камера регенерації; 4 – фільтрувальна тканина; 5 – ролик верхній; 6 – ролик регулювання положення тканини; 7 – натяжний пристрій; 8 – колектор подачі; 9 – плита верхня завзята; 10 – ролик тканини; 11 – колектор тиску; 12 – плита фільтруюча; 13 – стяжка; 14 – натискна плита; 15 – блок зливу; 16 – опорна плита; 17 – механізм гідрозатиску; 18 – привід пересування тканини

Рисунок 1.4 – Автоматичний фільтрпрес типу ФПАКМ

Фільтруюча рама (рисунок 1.5) складається з двох частин – нижньої із спіралями і отвором для відведення фільтру і верхньої, яка служить камерою для суспензії і осаду. Рами мають бобишки, що створюють під час їх стиснення колектор подачі і колектор відведення. Між верхньою і нижньою частинами фільтрувальної рами встановлена гумова діафрагма, яка витісняє рідку фазу і спресовує осад. Цикл роботи фільтру включає стадії фільтрації промивки і

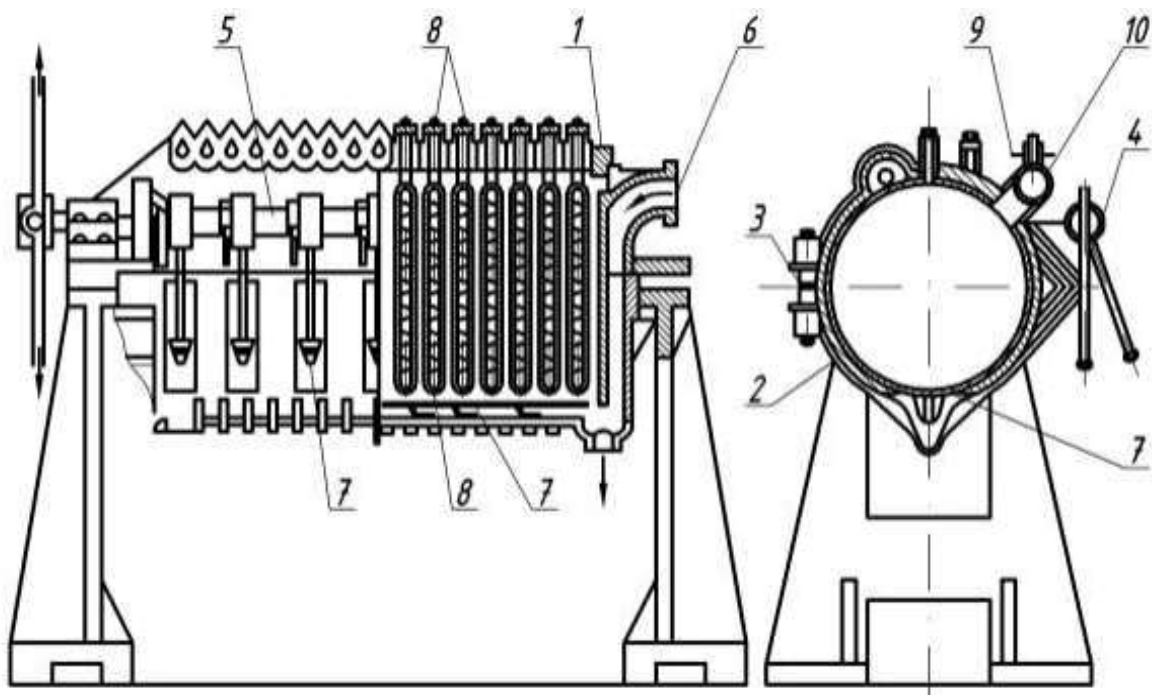
віджимання або просушування і вивантаження осаду. За стиснутих рам суспензія під тиском поступає в простір над фільтрувальною тканиною. Рідка фаза проходить фільтрувальну тканину, тверда фаза затримується, утворюючи шари осаду. Досягши потрібної товщини шару осаду подачу суспензії припиняють і суспензію, що залишилася в порожнині рами, витісняють гумовою діафрагмою, подаючи до неї під тиском воду.



1 – колектор; 2 – фільтрувальна тканина; 3 – нижня плита; 4 – верхня плита; 5 – діафрагма; 6 – спіралі; 7 – колектор подачі; 8,9,10 – блоки клапанів відповідно подачі, відведення і скидання; 11 – клапани колектора тиску

Рисунок 1.5 – Конструкція і схема роботи блоку фільтруючих плит

Листовий (пластинчастий) фільтр (рисунок 1.6) — це різновид фільтрпресу. Представляє собою резервуар, в якому розміщують фільтрувальні елементи, тобто листи. Вони в свою чергу складаються з рамки з натягнутою на неї тканиною. Принцип роботи полягає в тому, що суспензія подається під тиском в резервуар, а фільтрат виводиться трубками з внутрішньої порожнини кожного елемента. Далі осад віджимається від фільтрування поверхні елементів повітрям або паром. Після чого поверхню очищають в ручну або, якщо це доступно за технологічними умовами, осад вимивають іншою рідиною, не відкриваючи фільтр. Листові горизонтальні фільтрпреси з круглими елементами застосовують у процесах очищення оливних середовищ. Існують велике різноманіття листових фільтрів з різною формою, розташуванням резервуару і фільтруючих елементів.



1, 2 – частини корпусу; 3 – вісь; 4 – відкидні болти; 5 – ексцентриковий вал;  
 6 – штуцер введення суспензії; 7 – розподільні грати; 8 – фільтруючий  
 елемент; 9 – колектор; 10 – загальний колектор

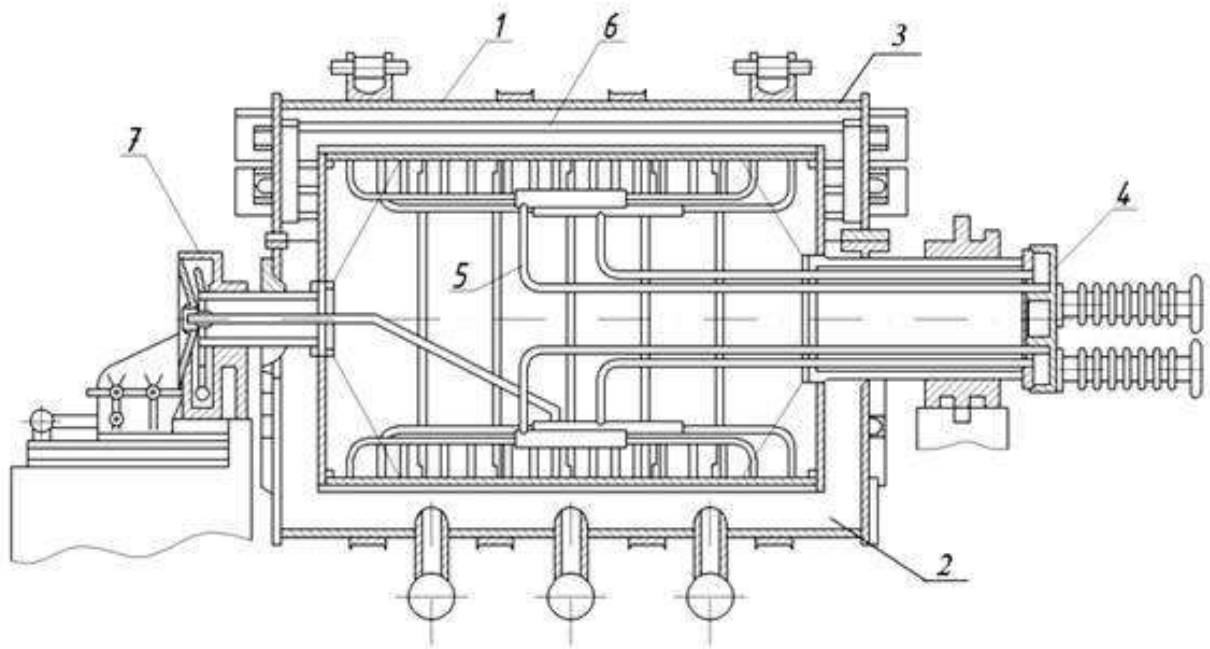
Рисунок 1.6 – Листовий горизонтальний фільтрпрес з круглими елементами

### 1.2.2 Фільтри безперервної дії.

Фільтри безперервної дії називаються так, бо вони проводять декілька операцій одночасно. До цих операцій належать: фільтрація, сушка, промивка, розвантаження і регенерація фільтрувальної тканини. Такі операції проходять безперервно і незалежно одна від одної в кожній зоні фільтру, тому процес роботи фільтру протікає безперервно. Фільтри безперервної дії розрізняють за формою фільтрувальної перегородки і підрозділяють на барабанні, дискові і стрічкові, і за робочим тиском на апарати, що працюють під розрядженням і під тиском. Недоліками фільтрів безперервної дії є складність використання, висока вартість, необхідність встановлення допоміжного устаткування і витрати енергії в більшості на вакуумні насоси та повітродувки.

Барабанні фільтри (рисунок 1.7) широко поширені в хімічній промисловості особливо такі, які працюють під розрядженням, тобто вакуумні фільтри. За конструкцією барабанні фільтри розділяють на апарати із зовнішньою і внутрішньою фільтруючою поверхнею. Чередування операцій у барабанних фільтрах відбувається за допомогою розподільної головки або спеціальних клапанів. У середині барабана розташована система розподільних труб, що зв'язують поверхню обичайки барабана з диском, що обертається, який приварений до торця правої цапфи. Барабан спирається двома цапфами на підшипники ковзання, встановлені поза корпусом фільтру. У місцях виходу цапф з корпусу передбачені сальникові ущільнення. Ліва цапфа закінчується черв'ячним колесом приводу барабана. На правій цапфі встановлена розподільна головка барабана. У верхній частині корпусу над барабаном розташований ряд труб, по яким до поверхні барабана подається розчинник для промивки осаду. На утворюючій барабана встановлений ніж для знімання осаду, який потрапляє потім в шнек і виводиться через штуцер. Частина нижньої поверхні барабана занурена в суспензію. У барабані є декілька робочих зон: фільтрації, промивки осаду розчинником, просушування, здування і знімання осаду.

Різні конструкції барабаних фільтрів використовують для різних речовин. Наприклад для розділення висококонцентрованих суспензій з важкою твердою фазою є вакуум-фільтри з неглибоким зануренням барабана в рідину. Ці фільтри дозволяють знімати тонкий шар осаду, оскільки його фільтрувальна поверхня легко очищається. Для фільтрації колоїдних і легких речовин служать вакуум-фільтри барабанного типу з намивною, зернистою або волокнистою фільтруючою поверхнею. Для фільтрації рідини з важкими зваженими частинками застосовують також барабанні вакуум-фільтри з внутрішньою фільтруючою поверхнею.

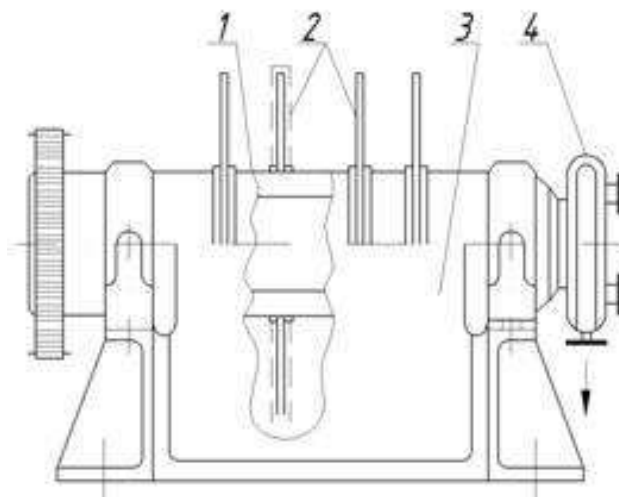


1 – барабан; 2 – нижнє напівкорито; 3 – кришка; 4 – розподільна головка; 5 – система розподільних труб; 6 – пристрій для промивки осаду; 7 – привід барабана

Рисунок 1.7 – . Барабанний вакуум-фільтр

Дискові фільтри (рисунок 1.8) мають розвиненішу фільтрувальну поверхню, чим барабані. Диски для них виготовляють з окремих секторів. Дисковий фільтр порівняно з іншими фільтрами має найбільшу фільтруючу поверхню відносно зайнятої їм площі. Ще однією перевагою дискового

фільтру є можливість ремонту окремих дисків, а також маленькі витрати фільтруючої тканини і невеликі витрати енергії. Недоліком цих фільтрів є погана промивка осаду, при якому розбавляється суспензія у ванні фільтру. Як і барабанні фільтри, дискові фільтри виготовляють для роботи під тиском. Дискові фільтр, які працюють під тиском мають аналогічну будову з дисковими вакуум-фільтрами. Тобто їх конструкція передбачає вал з дисками поміщений у закритому корпусі, в якому подачею свіжого повітря або інертного газу створюється тиск до 0,7 МПа. Каламутний і чистий фільтрат виходить окремо через кінці дискового валу. Осад знімається з поверхні диска ножами і виводиться з апарату шнековим пристроєм з пружинним клапаном. Для полегшення відділення осаду і зменшення зносу фільтрувальної перегородки застосовують опуклі сектори. Осад знімають з поверхні дисків за допомогою стиснутого повітря (для здування) і ножів або валків (для відриву осаду). Похилі пластини, що закріплені на шарнірах і ролики, що котяться поверхнею диска направляють та допомагають у відокремленні осаду. Ролики притискаються до диска противагами. Іноді дискові фільтри під тиском застосовують тільки для згущення суспензій, тоді їх конструкція спрощується.



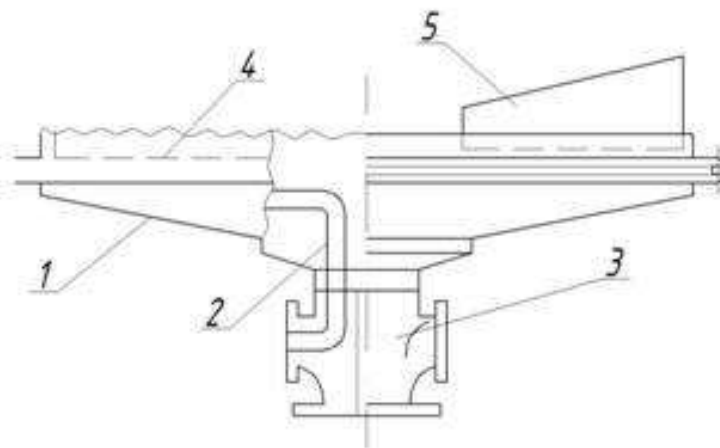
1 – порожнистий вал; 2 – диски; 3 – ванна; 4 –розподільна головка

Рисунок 1.8 – Дисковий вакуумний фільтр

Тарілчастий фільтр або планфільтр (рисунок 1.9) використовують для суспензій, чий осад складається з важких і грубозернистих матеріалів і його необхідно ретельно промивати. Принцип роботи полягає в тому, що суспензія поступає на горизонтальний диск з низькими бортами, обтягнутий фільтруючою тканиною. Після повного обороту диска осад видаляється ножами, а фільтрат проходить через тканину і потрапляє в осередки диска, де видаляється через канали у вертикальному валу. Деякі планфільтри мають перекидні сектори, що дозволяє краще очищати тканину.

Перевагами тарілчастих фільтрів є прискорений процес фільтрації завдяки тому, що напрямок тиску суспензії співпадає з напрямком природного осадження частинок твердої фази. Також сюди входить зручність промивки і можливість фільтрації суспензії її з неоднорідними за величиною частинками.

До недоліків планфільтрів належать громіздкість установки, маленька фільтрувальна поверхня, складність знімання осаду і регенерації тканини.



1 – горизонтальний порожнистий диск; 2 – трубки для зливу фільтрату; 3 – розподільна головка; 4 – фільтрувальна тканина; 5 – ніж

Рисунок 1.9 – Тарілчастий вакуум-фільтр

Стрічковий вакуум-фільтр (рисунок 1.10) складається з довгого столу, на якому розташовані вакуум-камери. Ці камери мають нижні патрубки для

підключення колекторів для збору фільтрату або промивної рідини. Зверху до вакуум-камер щільно прилягає гумова стрічка з бортами. Ця стрічка натягнута між приводним барабаном і натяжним барабаном. Полотно фільтрувальної тканини притискається до гумової стрічки за допомогою натяжних роликів. Суспензія надходить на стрічку з лотка. Фільтрація відбувається, коли стрічка з суспензією проходить над вакуум-камерами. В результаті рідина проходить крізь тканину, а тверді частинки утворюють осад на поверхні. Промивна рідина подається на осад через форсунки. Після проходження зони фільтрації, на приводному барабані, фільтрувальна тканина відділяється від гумової стрічки і обгинає валик. В цей момент осад відділяється від тканини і потрапляє до бункера. Під час руху між роликами тканина висушується та очищається.

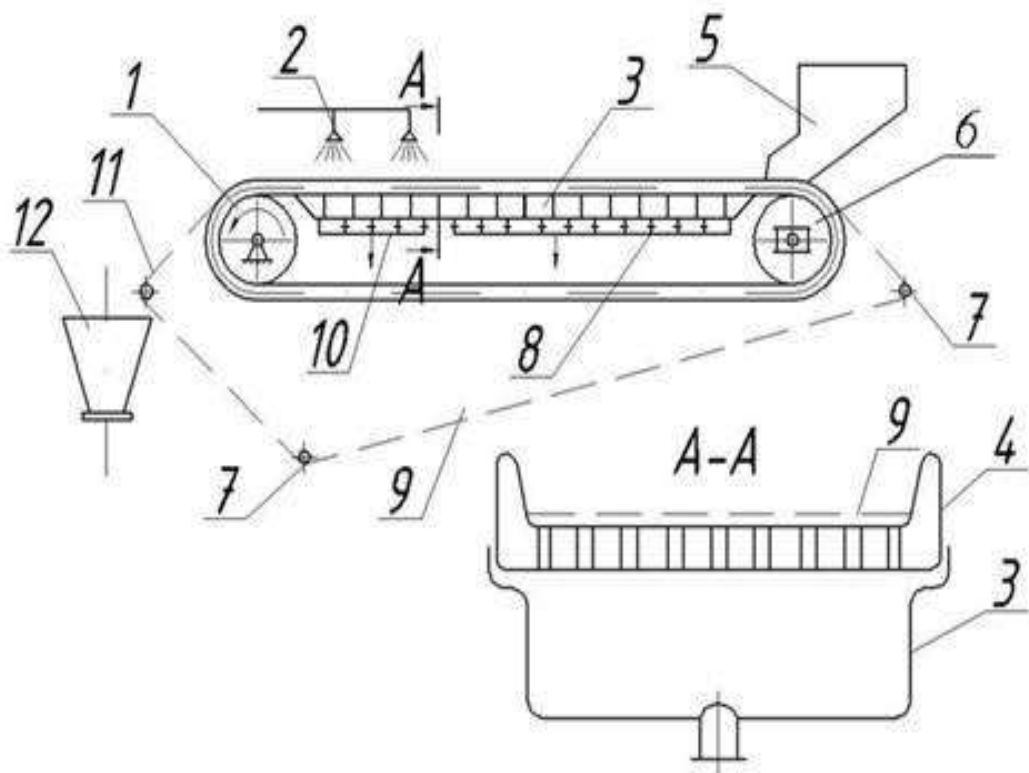
Перевагами стрічкових фільтрів є відсутність розподільної головки, можливість осадження крупних частинок під дією сили тяжіння. Цей процес прискорює фільтрацію, також сюди входить можливість роботи з тонким шаром осаду.

Існують і недоліки стрічкових фільтрів до яких входять маленька поверхня фільтрації, малий коефіцієнт використання фільтрувальної тканини. Крім того, вони вимагають рівномірної подачі суспензії, а отриманий фільтрат може бути каламутним і фільтрована суспензія може охолоджуватися в процесі.

Удосконаленою версією є безперервно діючий фільтр, що працює під тиском. Проте, його робочий тиск незначний через плоскі стінки корпусу.

Існують також стрічкові капілярні фільтри. У них рідка фаза суспензії поглинається капілярами повстяної стрічки, тоді як тверда фаза залишається на поверхні. Промивання та зневоднення осаду здійснюється за допомогою таких же стрічок. Ці фільтри підходять для суспензії з низьким вмістом рідини.

До переваг стрічкових капілярних фільтрів належать простота конструкції, відсутність допоміжних пристроїв для створення розрядження або тиску, досить значна продуктивність.



1 – приводний барабан; 2 – форсунки; 3 – вакуум-камери; 4 – нескінченна гумова стрічка; 5 – лоток для подачі суспензії; 6 – натяжний барабан; 7 – натяжні ролики; 8 – колектор фільтрату; 9 – фільтрувальна тканина; 10 – колектор промиваючої рідини; 11 – валик для знімання осаду; 12 – бункер для осаду

Рисунок 1.10 – Схема стрічкового вакуум-фільтра

### 1.3 Електронні системи та їх компоненти у системах фільтрації

Сучасні системи фільтрації рідини на підприємствах все частіше впроваджують електронні компоненти та системи для забезпечення ефективної та автоматизованої роботи. У фільтраційних системах рідин електронні компоненти та системи використовуються для моніторингу, контролю та автоматизації процесів очищення.

Базовими компонентами електронних систем, що застосовуються у фільтрації є:

- датчики або сенсори: Пристрої, що вимірюють фізичні або хімічні параметри процесу і перетворюють їх на електричні сигнали;
- контролери: Спеціалізований компонент системи, який отримує сигнали від датчиків, обробляє їх відповідно до закладеного алгоритму та видає керуючі команди на виконавчі механізми. До них належать мікроконтролери (МК) та програмовані логічні контролери (ПЛК);
- виконавчі механізми або актуатори: Пристрої, що безпосередньо впливають на процес фільтрації, виконуючи команди контролера. Це можуть бути насоси, клапани, засувки, приводи очисних механізмів тощо;
- інтерфейси людина-машина (НМІ): Засоби візуалізації даних та взаємодії оператора з системою. Це можуть бути операторські панелі, сенсорні екрани або комп'ютерні системи з програмним забезпеченням SCADA;
- комунікаційні модулі: Забезпечують обмін даними між різними компонентами системи (датчиками, контролерами, НМІ) та з системами вищого рівня управління, використовуючи промислові мережі та протоколи.

Роль кожного з цих компонентів є важливою для ефективної автоматизації фільтрації. Наприклад Датчики надають інформацію про стан процесу, контролери приймають рішення на основі цієї інформації та заданої логіки, виконавчі механізми реалізують ці рішення, НМІ забезпечує взаємодію з оператором, а комунікаційні модулі пов'язують усе в єдину функціональну систему.

### 1.3.1 Класифікація датчиків.

Датчики є фундаментальними елементами будь-якої автоматизованої системи фільтрації, забезпечуючи зворотний зв'язок про стан процесу. Їх можна класифікувати за різними ознаками.

Енергетичні властивості вхідних величин датчиків дають змогу розділити їх за видом вхідних величин на активні та пасивні. Активні датчики потребують зовнішнього джерела живлення для своєї роботи, а пасивні в свою чергу не потребують зовнішнього живлення, оскільки генерують сигнал за рахунок енергії вимірюваного процесу (наприклад, термопари) або змінюють свої параметри під його впливом.

За типом вихідного сигналу датчики поділяють на аналогові і цифрові. Аналогові датчики генерують неперервний сигнал, пропорційний вимірювальній величині, а цифрові – дискретний сигнал, який обробляється мікроконтролером або ПЛК.

За принципом дії датчики поділяють: механічні, електричні, п'єзоелектричні, оптичні, ємнісні, індуктивні, резистивні, ультразвукові, радарні. Також датчики поділяють за вимірювальною величиною: датчики тиску, потоку, рівня, температури, каламутності, рН та провідності.

Датчики тиску та перепаду тиску необхідні для моніторингу загального тиску в системі та, що особливо важливо, для контролю ступеня забруднення фільтруючих елементів. Тобто сигналізація про перевищення допустимих значень перепаду тиску до і після фільтра свідчить про його засмічення та необхідність очищення або заміни. Принцип роботи датчика тиску полягає в тому, що тиск визначається як величина сили, прикладеної до одиниці площі, у результаті чого на поверхню діє однакова протилежна сила. Датчики тиску використовують цей принцип, виявляючи прикладену силу та перетворюючи її в електричні сигнали, які безпосередньо відповідають прикладеному тиску.

Датчики потоку або витратоміри вимірюють швидкість потоку для забезпечення оптимальних умов фільтрації, що запобігає перевантаженню фільтрів. Також датчики вимірюють об'єм рідини, що проходить через

фільтраційну систему. Ця інформація використовується для контролю потоків при промивці, продуктивності, оптимізації процесу фільтрації та дозування реагентів. Деякі сучасні датчики потоку, як FlexFlow створені на основі калориметричного принципу вимірювання. Вони вимірюють потік на основі охолодження нагрітого елемента потоком рідини і можуть одночасно вимірювати температуру середовища.

Датчики рівня контролюють кількість рідини в резервуарах, баках-збірниках фільтрату, ємностях для реагентів, сигналізуючи про досягнення мінімального або максимального рівня, що важливо для безперервності процесу та запобігання аварійним ситуаціям. Зазвичай ці датчики працює як сигналізація високого рівня, який вимірює умови переповнення в резервуарах або працює як маркер для запису умов сигналізації низького рівня. Існують різні типи датчиків рівня: поплавковий датчик, ємнісний датчик, датчик провідності. Принцип роботи поплавкового датчика полягає в принципі плавучості, тобто тіло частково рухається і занурюється на поверхню рідини, долаючи ту саму відстань, на яку рухається рівень рідини. Робота ємнісного датчика заснована на зміні ємності. У ємнісному датчику є дві пластини: одна пластина діє як ізольований електрод, а інша пластина діє як стінка резервуара. Ємність залежить від рівня рідини. Порожній резервуар має низьку ємність, тоді як наповнений має більшу ємність. Принцип роботи датчика провідності полягає в зміні опору між двома провідниками. Провідниковий зонд слугує індикатором рівня рідини для визначення висоти електропровідних середовищ у металевих ємностях для води чи інших резервуарах. Він працює в парі з ізольованим зондом і підсилювачем провідності. Коли рідина не торкається зонда, електричний опір між ним і металевою стінкою резервуара залишається високим або навіть нескінченим. У міру підняття рівня рідини до зонда опір поступово зменшується.

Датчики температури – це прилади, що використовуються для вимірювання температури середовища. Існують три основні види датчиків: термометри, датчики температури опору та термопари. Всі три датчика

вимірюють фізичну властивість (тобто обсяг рідини, струм через провід), яке змінюється в залежності від температури. Термометри – це найпоширеніші датчики температури. Принцип дії полягає на зміні тиску робочої речовини в замкненій системі термометра залежно від температури. Залежно від виду робочої речовини термометра, межі вимірювання температури складають від  $-50$  до  $+1300^{\circ}\text{C}$ . Термометр опору – прилад для вимірювання температури, на основі чутливого елемента, електричний опір, якого залежить від температури. Принцип дії термометрів опору базується на властивості провідників і напівпровідників змінювати свій електричний опір при зміні температури. Термопара – чутливий елемент термоелектричного перетворювача у вигляді двох ізольованих провідників із різнорідних матеріалів, з'єднаних на одному кінці, принцип дії якого ґрунтується на використанні термоелектричного ефекту для вимірювання температури. Контроль температури рідини є важливим, оскільки температура впливає на в'язкість рідини, швидкість хімічних реакцій, ефективність фільтрації та може бути критичною для збереження цілісності фільтруючих матеріалів або запобігання пошкодженню іншого обладнання.

Датчики каламутності використовуються для оцінки концентрації зважених часток у рідині, що є прямим показником ефективності фільтрації та якості очищеної води. Вони можуть автоматично ініціювати цикли очищення або сигналізувати про необхідність втручання. Для роботи датчики каламутності використовують два методи нефелометричний або метод згасання. Нефелометрія – це метод, що полягає у спрямуванні світлового променя на зразок рідини і вимірюванні інтенсивності світла, розсіяного під кутом  $90^{\circ}$  відносно напрямку променя. Цей спосіб оцінки каламутності офіційно визнаний Агентством з охорони навколишнього середовища (EPA) під назвою Метод 180.1. Альтернативний підхід вимірювання називається методом загасання, який вимірює зменшення інтенсивності світла між джерелом світла і детектором, розташованим навпроти нього під кутом  $180^{\circ}$ .

Датчики провідності вимірюють здатність рідини проводити електричний струм, що залежить від концентрації розчинених іонів. Вони є важливими для моніторингу процесів знесолення (наприклад, у системах зворотного осмосу або іонного обміну), контролю якості води та запобігання корозії або утворенню накипу. Принцип роботи датчика провідності полягає вимірюванні здатності розчину проводити електричний струм між двома електродами. У розчині, струм протікає завдяки руху іонів. Таким чином, збільшення концентрації іонів у розчині призведе до більших значень провідності. Ці датчики Особливо корисні у фармацевтичній та біофармацевтичній промисловості для забезпечення чистоти продукту та води для ін'єкцій. Можуть інтегруватися в системи керування для автоматичного регулювання процесів.

Датчики рН – це високоточний прилад, призначений для вимірювання рівня кислотності чи лужності (рН) розчинів. Принцип дії датчика рН заснований на електрохімічному методі: спеціальний чутливий електрод (рН-електрод) занурюється в досліджуваний розчин, і на поверхні виникає електричний потенціал, пропорційний активності іонів водню. Цей потенціал порівнюється з потенціалом електрода порівняння і різниця між ними перетворюється на значення рН, яке відображається на вимірювальному приладі або передається в систему управління.

Датчиками окисно-відновного потенціалу (ОВП) називають електроди, метал яких не приймає участі в окисно-відновній реакції, а тільки переносить електрони. Процес окиснення та відновлення відбувається між речовинами, що знаходяться в розчині, у який занурено електрод. Отже, до окисно-відновних або редокс-електродів належать електроди, які складаються з інертного металу (Pt, Au), зануреного в розчин, в якому містяться окиснена та відновлена форми одного і того ж елемента.

Датчики рН та ОВП використовують для контролю та корекції рН. Це допомагає в оптимізації процесів коагуляції, осадження, захищає мембрани зворотного осмосу (які чутливі до екстремальних значень рН). Також

допомагає в моніторингу ОВП для контролю процесів дезінфекції та видалення окислювачів або відновників.

### 1.3.2 Класифікація контролерів.

Контролери є центральними елементами автоматизованих систем фільтрації, що приймають рішення та керують процесами на основі отриманих даних від датчиків та закладених алгоритмів. Основні типи контролерів, що використовуються в промисловості, включають мікроконтролери (МК) та програмовані логічні контролери (ПЛК).

Мікроконтролер – це обчислювально-керуючий пристрій, реалізований у вигляді мікросхеми, призначений для виконання функцій контролю й керування периферійним устаткуванням. Часто МК є функціонально-орієнтованими, тобто мають специфічне призначення з визначеною та, по суті, незмінною логікою роботи, сфокусованою на конкретне завдання. МК являють собою закінчену мікропроцесорну систему обробки інформації, що реалізована у вигляді однієї великої інтегральної мікросхеми. МК поєднує в межах одного напівпровідникового кристала основні функціональні блоки мікропроцесорної керуючої системи: центральний процесор, постійний запам'ятовувальний пристрій (ПЗП), оперативний запам'ятовувальний пристрій (ОЗП), периферійні устрої для введення й виводу інформації.

Основні переваги МК – це гнучкість програмування для конкретних завдань та відносно низька вартість, що робить їх привабливими для невеликих або спеціалізованих систем. Однак, для складних промислових систем фільтрації їхні можливості можуть бути обмежені через меншу кількість входів і виходів, обмежену обчислювальну потужність та меншу стійкість до жорстких промислових умов порівняно з ПЛК.

Програмований логічний контролер (ПЛК) – це спеціалізований мікропроцесорний керуючий пристрій, пристосований до використання безпосередньо у виробничих умовах і програмований спрощеними мовами, доступними користувачам, які не мають спеціальної підготовки з програмування. За принципом дії ПЛК є спрощеною версією комп'ютера, в

якому керуючий автомат реалізується програмно. В основу структурної організації ПЛК покладена типова структура мікропроцесорного пристрою, оснащеного модулями зв'язку з керованим об'єктом, а також пультом (пристроєм) користувача, за допомогою якого реалізуються функції програмування, відлагодження, діагностування керуючої програми і відображення станів керованого об'єкта. Для зберігання програми, що управляє (УП), використовуються різного типу ПЗП або ОЗП з підживленням. Для пам'яті даних використовується ОЗП, а іноді і ОЗП з підживленням. Послідовний інтерфейс використовується для стикування з іншими мікропроцесорними системами.

За типом конструкції ПЛК поділяють на:

- моноблочні або одноплатні ПЛК мають фіксований набір входів-виходів, розміщених поряд з центральним процесором, пам'яттю і блоком живлення;
- модульні ПЛК складаються з стійки (шасі), в яку встановлюються окремі модулі вводу/виводу ся у різній комбінації і кількості залежно від необхідної конфігурації. Це дозволяє гнучко конфігурувати систему під конкретні потреби;
- розподілені ПЛК мають модулі вводу/виводу, які утворюють єдину систему управління, можуть бути рознесені на значні відстані.

Переваги ПЛК полягають у їхній простоті використання, що досягається завдяки можливості програмування за допомогою принципів електричних схем, логічним рівнянь або алгоритмічної мови. ПЛК добре пристосовані до роботи в умовах промислового виробництва завдяки оптоелектронній гальванічній розв'язці та широкому діапазону допустимих умов експлуатації. Їх модульна конструкція дозволяє створювати контролери різного функціонального призначення з обмеженого набору уніфікованих модулів, що забезпечує гнучкість систем управління. Використання ПЛК значно знижує витрати на проектування і скорочує термін розробки завдяки можливості

паралельного проектування та виготовлення систем. До того ж ПЛК дозволяють легко коригувати алгоритми керування безпосередньо під час монтажу або модернізації обладнання. Велика номенклатура модулів вводу/виводу забезпечує сумісність із різноманітними датчиками та виконавчими механізмами, що сприяє ефективному створенню комплексних систем. Наявність вбудованої функціональної діагностики полегшує експлуатацію та підвищує надійність як самого контролера, так і всього технологічного обладнання.

Вибір між МК та ПЛК для конкретної системи фільтрації залежить від складності завдання, кількості контрольованих параметрів, вимог до надійності та умов експлуатації. Для простих, локальних завдань можуть бути достатніми МК, тоді як для комплексних, багатопараметричних систем фільтрації на промислових підприємствах перевага надається ПЛК через їхню вищу продуктивність, надійність та функціональність.

### 1.3.3 Класифікація виконавчих механізмів.

Виконавчі механізми або актуатори – це пристрої або системи, які виконують функцію перетворення вхідного сигналу в механічну дію. Виконавчий механізм, як правило, складається з трьох основних пристроїв: сервомотора (серводвигуна), джерела живлення та навантаження.

За видом споживаної енергії виконавчі механізми поділяють на електричні, пневматичні і гідравлічні. Найбільшого поширення набули електричні ВМ. Пневматичні і гідравлічні виконавчі механізми застосовуються у разі необхідності отримання великої потужності при переміщенні робочого органу та у вибухонебезпечних середовищах.

Електричні виконавчі механізми (ЕВМ) поділяються на два типи: контактні та безконтактні. У контактних механізмах керування пуском здійснюється реверсивним магнітним пускачем, а в безконтактних механізмах – магнітним підсилювачем. Загалом, ЕВМ включають такі основні компоненти: реверсивний електродвигун; редуктор, що зменшує швидкість обертання вихідного валу; вихідний елемент, що передає зусилля або крутний

момент на регулюючий орган; додаткові пристрої, такі як кінцеві вимикачі, для зупинки механізму в крайніх положеннях; пристрої зворотного зв'язку, необхідні для роботи в системах автоматичного регулювання або для дистанційного відображення положення вихідного елемента; а в деяких модифікаціях – штурвал ручного привода.

Пневматичні виконавчі механізми (ПВМ) поділяються на мембранні та поршневі (рисунок 1.11). У мембранному ПВМ рух вихідного штока в одному напрямку забезпечується тиском стисненого повітря в мембранній камері, а в зворотному напрямку – силою стиснутої пружини (пружинні мембранні ПВМ). Ці механізми мають вихідний шток, який здійснює поворотно-поступальні рухи і зазвичай з'єднаний з регулюючими елементами. Залежно від напрямку руху штока при підвищенні тиску повітря в мембранній камері розрізняють механізми прямого і зворотного дії. У поршневих ПВМ сила, що переміщує вихідний шток, створюється тиском робочого середовища в поршневих камерах. У порівнянні з мембранними насосами, вони характеризуються більшим ходом вихідного штока.

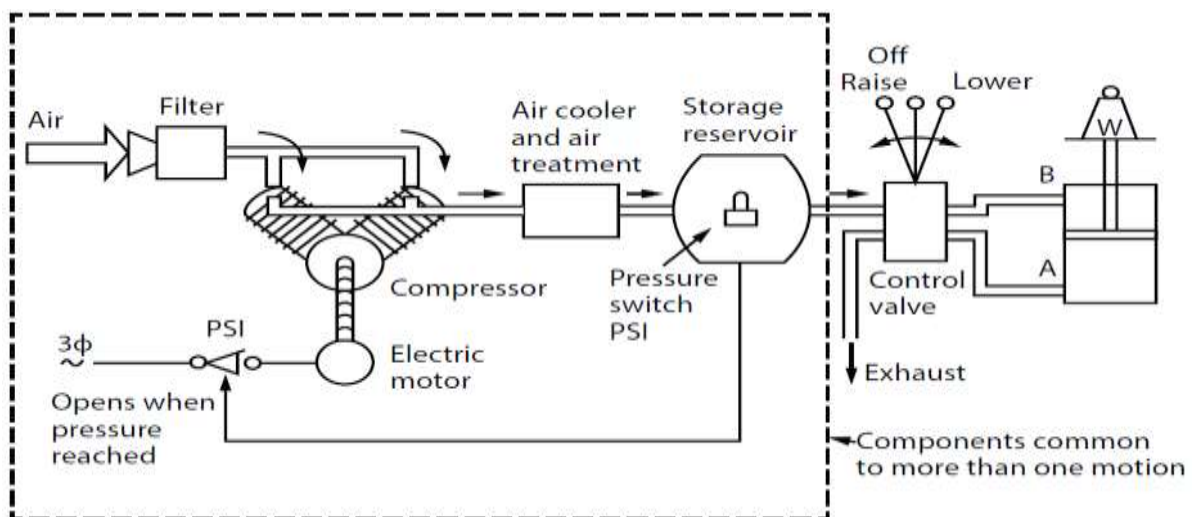


Рисунок 1.11 – Схематичне зображення пневматичної системи

Гідравлічні системи використовуються для генерування, керування та передачі потужності через рідину під тиском. Основні компоненти, що беруть участь у приведенні в дію виконавчого механізму в гідравлічній системі,

показані на рисунку 1.12. Насос використовується для приведення в дію електродвигуна, що забезпечує потік рідини, де тиск, напрямок та швидкість потоку рідини змінюються за допомогою різного набору клапанів.

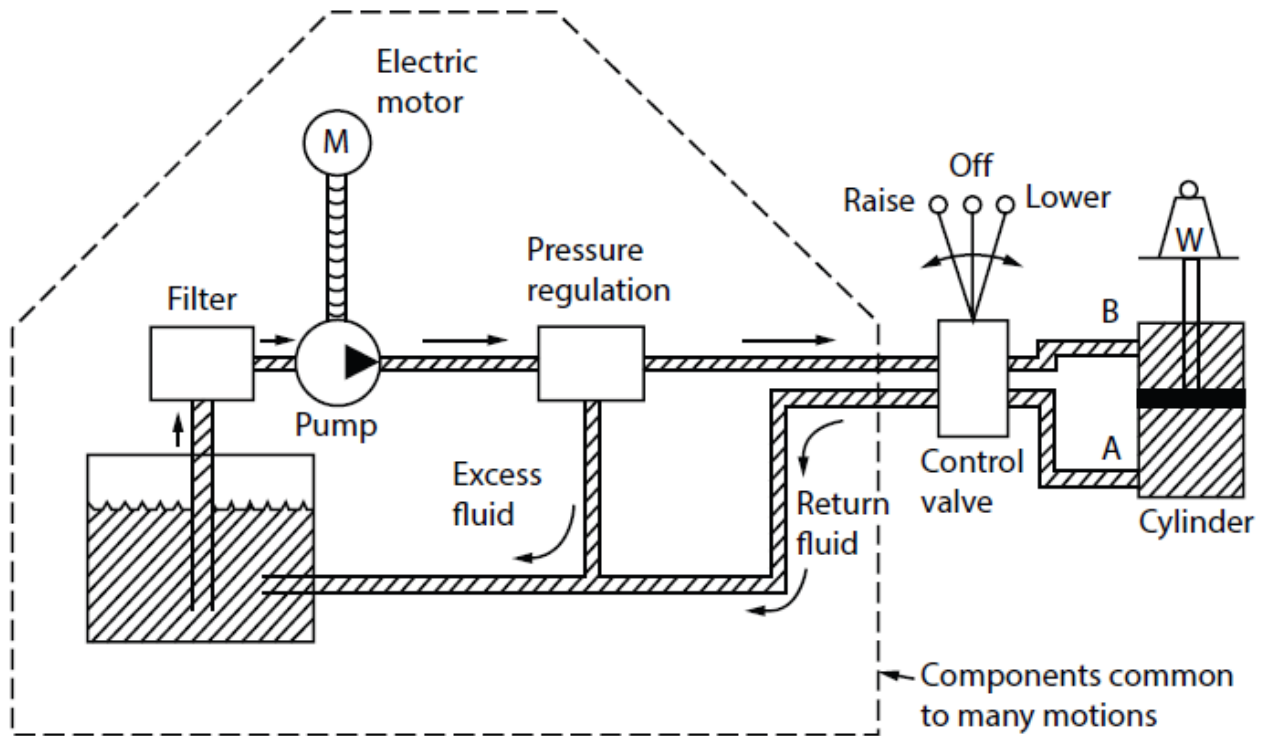


Рисунок 1.12 – Схематичне зображення гідравлічної системи

Гідравлічні виконавчі механізми використовуються для перетворення гідравлічної енергії в механічну. Вони також застосовуються для керування та передачі потужності з меншими швидкостями. Вихідна потужність залежить від швидкості потоку, перепаду тиску та загального ККД. Ключовою особливістю гідравліки є більше співвідношення потужності до ваги порівняно з пневматичними та електричними системами, а також придатність для роботи в складних та агресивних умовах.

Вибір типу виконавчого механізму для конкретної задачі у системі фільтрації залежить від багатьох факторів, включаючи необхідне зусилля або крутний момент, швидкість спрацьовування, точність позиціонування, умови експлуатації (температура, тиск, агресивність середовища, вибухонебезпечність), доступність джерела енергії та економічні міркування.

Сучасні системи автоматизації часто використовують комбінацію різних типів актуаторів для досягнення оптимальної продуктивності.

#### 1.3.4 Класифікація людино-машинних інтерфейсів.

Людино-машинні інтерфейси та комунікаційні модулі є критично важливими компонентами сучасних електронних систем фільтрації, забезпечуючи взаємодію оператора з системою та обмін даними між її елементами.

Людино-машинний інтерфейс (НМІ) – це засіб взаємодії оператора (людини) з технічним або автоматизованим обладнанням, який забезпечує зручне управління, моніторинг і контроль за роботою технологічних процесів. З одного боку НМІ дає можливість людині контролювати стан процесу та системи, а з іншого – забезпечує можливість втрутитися в процес керування. Під «машиною» в цьому випадку розуміється система з усіх технічних засобів, що бере участь у процесі вимірювання, контролю, сигналізації та керуванні, а під «людиною» – оператор-технолог, який бере безпосередню участь у процесі керування. Отже, людина задіяна у процесі керування, тому вона є частиною цієї системи, а саме автоматизованої системи керування технологічними процесами (АСКТП). НМІ можна розділити на два типи: операторські панелі та SCADA.

Операторські панелі або панелі оператора – це невеликі мікропроцесорні засоби з текстовим або графічним дисплеєм для відображення інформації та елементами керування – кнопками або/та сенсорним екраном. Передня частина таких панелей захищена від пилу, бруду, вологи, що дає змогу оператору керувати процесом безпосередньо біля об'єкта. Для захисту іншої частини панелі її розміщують у спеціальному щиті. Для великих АСКТП панель оператора не забезпечує можливості контролю за всім процесом, архівування великої кількості параметрів, зв'язку з іншими системами керування процесами та виробництвом у цілому. Ці функції можуть бути реалізовані засобами людино-машинного інтерфейсу, побудованим на базі комп'ютерів зі спеціалізованим програмним забезпеченням. На виробництві

такі автоматизовані робочі місця оператора-технолога розміщуються, як правило, в спеціально обладнаних диспетчерських, які захищають комп'ютери від пагубного впливу виробничих умов та надають можливість нормально працювати операторам. У диспетчерських приміщеннях для керування об'єктами з великим обсягом інформації застосовують також настінні екрани, інколи комбінуючи їх з пультами та щитами керування.

SCADA-системи (Supervisory Control and Data Acquisition) – це програмно-апаратні комплекси, що забезпечують більш розширені функції моніторингу, керування, збору та аналізу даних на рівні всього підприємства або великої установки. Зазвичай ці системи використовують при побудові комплексної АСКТП на базі програмованих контролерів.

#### 1.3.5 Класифікація комунікаційних модулів.

Комунікаційні модулі та промислові мережі забезпечують надійний та ефективний обмін даними між усіма компонентами автоматизованої системи фільтрації (датчиками, контролерами, виконавчими механізмами, НМІ) та інтеграцію з системами вищого рівня (SCADA). Сучасні ПЛК, датчики та виконавчі механізми часто мають вбудовані комунікаційні порти або підтримують установку додаткових комунікаційних модулів для підключення до різних промислових мереж. Системи промислових мереж можна класифікувати за різними категоріями залежно від функціональності: мережі польового рівня, мережі рівня керування та мережі інформаційного рівня.

На польовому рівні (Field-level networks) розподілені пристрої, такі як датчики, виконавчі механізми, модулі вводу/виводу, приводні блоки, взаємодіють із системами автоматизації через потужну систему зв'язку в режимі реального часу. Передача даних є циклічною та характеризується коротким циклом шини. Реальна тривалість циклу шини залежить від застосування. Вона варіюється від десятих мікросекунд до сотень мілісекунд.

Керуючий рівень (Control-level networks або Cell level) забезпечує зв'язок між програмованими контролерами (ПЛК, ІРС) та з ІТ-системами. Цей потік

інформації вимагає передачі пакетів даних та потужних комунікаційних функцій.

Інформаційний рівень (Information-level networks) – це найвищий рівень заводу або системи промислової автоматизації. Контролер заводського рівня збирає управлінську інформацію з рівнів області та керує всією системою автоматизації. На інформаційному рівні існують великомасштабні мережі, наприклад, глобальні мережі Ethernet для планування виробництва та обміну управлінською інформацією.

## 2 РОЗРОБКА МІНІСИСТЕМИ ФІЛЬТРАЦІЇ РІДИНИ

### 2.1 Теоретичні відомості та підбір елементів

Метою цього дослідження є розробка мінісистеми фільтрації рідини, яка складається мікроконтролера, декілька датчиків та виконавчого елемента. Потрібно підібрати мікроконтролер підходящий для керування виконавчим механізмом та датчиками.

#### 2.1.1 Плата Arduino Uno Rev3.

Одним із ключових елементів побудови мінісистеми фільтрації рідини є мікроконтролер, здатний ефективно збирати, аналізувати та обробляти сигнали з датчиків і відповідним чином керувати виконавчими механізмами (наприклад електромагнітними клапанами чи насосами). Для цього проекту обираємо плату Arduino Uno Rev3, яка є однією з найпоширеніших і найзручніших платформ для створення електронних систем у навчальних, промислових і науково-дослідних цілях.

Arduino Uno Rev3 (рисунок 2.1) побудована на основі 8-бітного мікроконтролера ATmega328P, що працює на тактовій частоті до 16 МГц. Мікроконтролер має 32 КБ флеш-пам'яті для зберігання програм, 2 КБ оперативної пам'яті SRAM для обчислень та 1 КБ EEPROM для зберігання постійних налаштувань. Крім того, плата оснащена додатковим мікроконтролером ATmega16U2, який виконує функцію USB-конвертера, забезпечуючи зв'язок з персональним комп'ютером без потреби у сторонньому програмному забезпеченні.

З погляду функціональності, Arduino Uno Rev3 має 14 цифрових входів/виходів, з яких 6 можуть використовуватись для керування ШІМ-сигналами, що дозволяє підключати реле, моторні драйвери або світлодіоди. Також доступно 6 аналогових входів (A0-A5), які дають змогу зчитувати дані

з аналогових датчиків, таких як сенсор мутності, тиску тощо. Крім того, Arduino має стандартні інтерфейси зв'язку для взаємодії з іншими модулями чи периферією, а саме UART, SPI та I<sup>2</sup>C. Плата живиться від 5 В через USB або зовнішній блок живлення з діапазоном вхідної напруги 6-20 В, що дає достатню гнучкість у виборі джерела живлення.

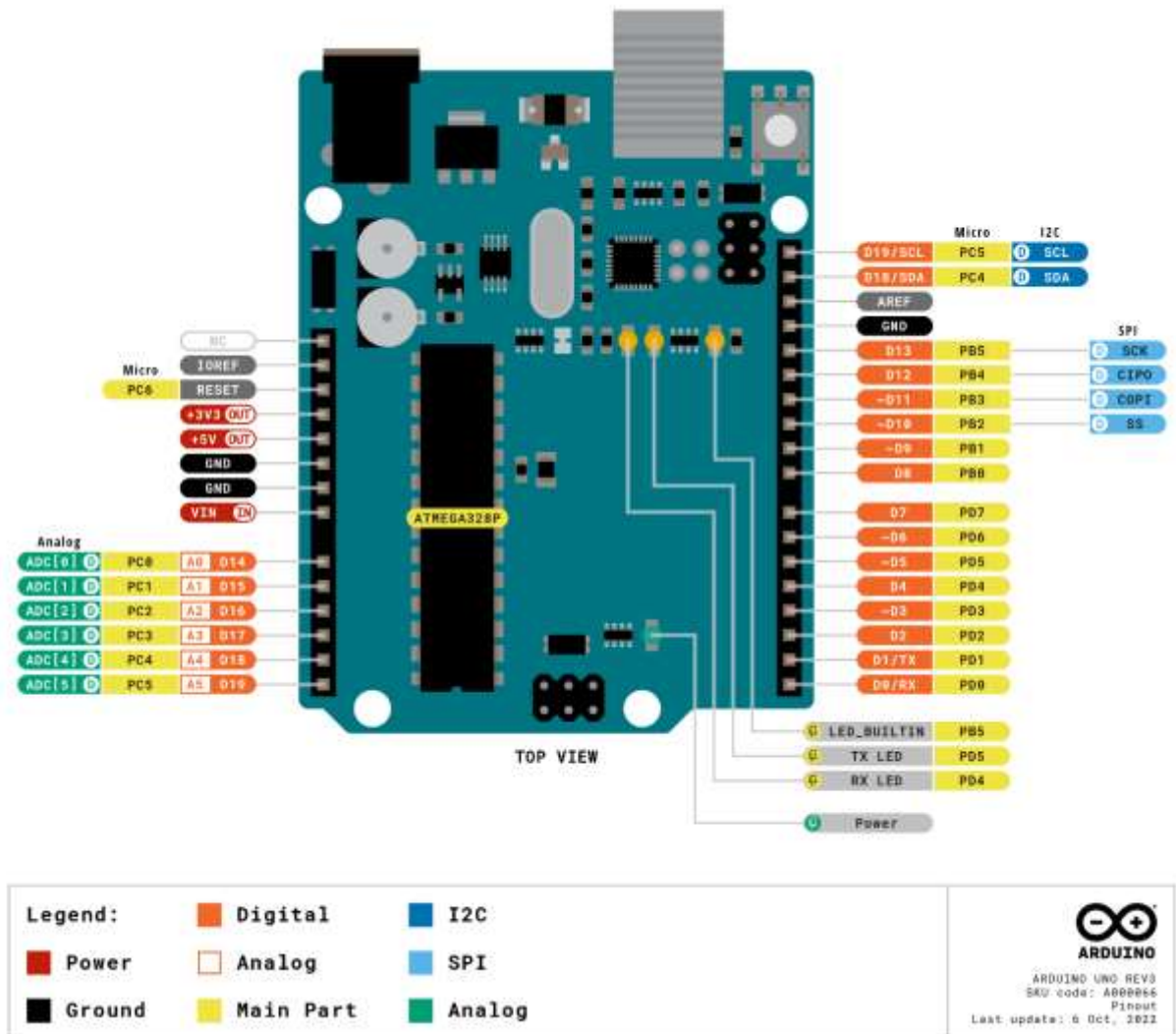


Рисунок 2.1 – Схема розпіновки плати Arduino Uno Rev3

До переваг Arduino Uno можна віднести простоту у використанні, велику спільноту користувачів та широку базу прикладів та бібліотек, доступних Arduino Software (IDE) та Arduino Project Hub. Це значно полегшує розробку і налагодження програмного забезпечення для початківців, а також дозволяє

швидко реалізовувати складні задачі досвідченим розробникам. Arduino підтримує програмування як у середовищі десктопної IDE, так і через хмарний редактор Arduino Cloud, що дає змогу працювати з платою навіть без локальної інсталяції.

### 2.1.2 Датчики вимірювання.

Системи фільтрації рідин повинні вимірювати показники рідини за допомогою датчиків. У нашій системі будуть використовуватися три датчика: рівня, тиску та мутності.

Датчики рівня для мінісистеми фільтрації рідин обираємо Water Level Sensor for Arduino (рисунок 2.2).

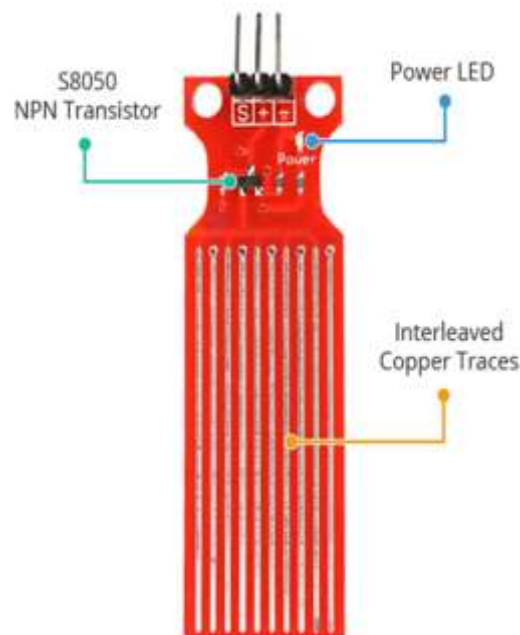


Рисунок 2.2 – Датчик рівня Water Level Sensor for

Цей сенсор працює при напрузі живлення від 3,3 до 5 В постійного струму та споживає менше 20 мА струму, що робить його енергоефективним і сумісним з Arduino Uno Rev3. Він має аналоговий вихід, що дозволяє зчитувати точні значення рівня води, а також цифровий вихід для встановлення порогових значень. Інтерфейс складається з трьох контактів: VCC, GND та сигналу, що спрощує підключення до мікроконтролера.

Матеріал сенсора корозійностійка друкована плата, що забезпечує довговічність при контакті з водою. Переваги використання цього датчика включають простоту інтеграції з Arduino Uno Rev3, високу чутливість та точність вимірювання, а також низьке енергоспоживання. Завдяки своїй конструкції, сенсор легко інтегрується в системи автоматичного контролю рівня рідини, дозволяючи ефективно моніторити та керувати процесами фільтрації. Його компактні розміри та легкість у використанні роблять його ідеальним вибором для проектів, де важлива економія простору та ресурсів.

Датчик тиску для системи фільтрації використовуємо Analog Pressure Sensor REV-11-1107 (рисунок 2.3).



Рисунок 2.3 – Датчик тиску Analog Pressure Sensor REV-11-1107

Цей датчик працює від стандартного джерела живлення 5 В постійного струму та споживає струм не більше ніж 10 мА, що робить його повністю сумісним з технічними можливостями Arduino Uno Rev3. Датчик має аналоговий вихід у діапазоні від 0,5 В до 4,5 В, пропорційний тиску в системі, що дозволяє мікроконтролеру точно обчислювати значення в реальному часі.

Діапазон вимірювання від 0 до 200 PSI, що охоплює потреби як побутових, так і напівпромислових систем. Час відгуку менше 2 мс забезпечує швидке реагування системи на зміну тиску, а точність становить  $\pm 1,5\%$  від повної шкали, що гарантує достовірність зчитування даних. Завдяки наявності стандартного триконтактного інтерфейсу (VCC, GND та сигналу) його легко інтегрувати в електронну схему без додаткових модулів. Переваги цього датчика є компактність, висока стійкість до перевантажень і точність при низькому енергоспоживанні. Його використання в системі фільтрації дозволяє не лише оцінювати поточний тиск, а й здійснювати контроль за станом фільтру, що є критично важливим для своєчасного реагування системи.

Датчик каламутності будемо використовувати Turbidity sensor SKU SEN0189 (рисунок 2.4).



Рисунок 2.4 – Датчик каламутності Turbidity sensor SKU SEN0189

Даний сенсор функціонує при робочій напрузі 5 В постійного струму та споживає в середньому 30 мА, що робить його сумісним із більшістю мікроконтролерів, зокрема з Arduino Uno Rev3. Основною перевагою датчика є аналоговий вихідний сигнал у діапазоні 0-4,5 В, що прямо пропорційно

змінюється відповідно до ступеня забруднення води. Це дає змогу реалізувати плавне керування системою фільтрації, реагуючи на найменші зміни в якості води. Діапазон вимірювання становить до 3000 NTU (або 3000 мг/л), що цілком достатньо для побутових і промислових застосувань. Точність пристрою складає  $\pm 5\%$  або 0,5 NTU (або 0,5 мг/л), залежно від того, яке значення більше, що дозволяє точно контролювати навіть незначне зменшення прозорості. Конструкція датчика включає фоточутливий елемент та корпус із полімерних матеріалів, стійких до корозії та механічних навантажень. Завдяки простому триконтактному інтерфейсу (VCC, GND та сигналу) цей датчик легко інтегрується в систему, а стабільний аналоговий сигнал забезпечує надійний зворотній зв'язок у режимі реального часу.

### 2.1.3 Виконавчий механізм.

У процесі автоматизації мінісистеми фільтрації рідин важливу роль відіграє вибір надійного виконавчого механізму, який забезпечує ефективне керування потоком рідини. Враховуючи технічні характеристики обраних сенсорів та мікроконтролера Arduino Uno Rev3, доцільним є використання електромагнітного клапана, який відповідає вимогам системи за параметрами напруги, струму тиску.

Електромагнітний клапан GEVAX 1901 KBND016-120 (рисунок 2.5) є оптимальним вибором для мінісистеми фільтрації рідин завдяки своїм технічним характеристикам та надійності. Клапан має номінальний діаметр 12 мм (1/2 в дюймах) та працює при напрузі 12 В постійного струму, що забезпечує сумісність з живленням системи. Його конструкція передбачає непряме керування з нормальним закритим станом, тобто в знеструмленому стані клапан залишається закритим, що підвищує безпеку експлуатації. Робочий діапазон тиску становить від 0,5 бар до 16 бар, що дозволяє використовувати його в системах з різними параметрами тиску. Клапан виготовлений з латуні, а ущільнення виконані з NBR (нітрильних каучук – синтетичний полімер), що забезпечує стійкість до води, повітря та

нафтопродуктів. Завдяки низькому споживанню енергії (потужність котушки 10 Вт) та простоті інтеграції з мікроконтролером через реле.



Рисунок 2.5 – Електромагнітний клапан GEVAX 1901 KBND016-120

Для забезпечення безпечної та ефективної роботи мінісистеми фільтрації рідин необхідно використовувємо зовнішнє джерело живлення на 12 В (батарею на 12 В) та проміжний елемент керування – реле. Враховуючи технічні характеристики мікроконтролера і електромагнітного клапана обираємо одноканальний модуль з реле JQC-3FF-S-Z 12V для Arduino (рисунок 2.6).



Рисунок 2.6 – Одноканальний модуль з реле JQC-3FF-S-Z 12V для Arduino

Одноканальний модуль з реле JQC-3FF-S-Z 12V забезпечує ефективне керування електромагнітний клапан GEVAX 1901 KBND016-120 за допомогою мікроконтролера Arduino Uno Rev3. Цей модуль має номінальну напругу котушки 12 В постійного струму та опір приблизно 400 Ом, що відповідає споживанню струму близько 30 мА. Контакти реле здатні комутувати струм до 10А при напрузі 250 В змінного струму або 30 В постійного струму, що забезпечує надійне керування навантаження з високим струмом. Модуль оснащений оптоізоляцією, яка забезпечує гальванічну розв'язку між мікроконтролером та високовольтною частиною, підвищуючи безпеку системи. Завдяки сумісності з логічними рівнями Arduino Uno Rev3, цей модуль дозволяє безпосередньо керувати реле без додаткових компонентів. Вся мінісистема фільтрації рідин, включаючи сенсори, мікроконтролер та електромагнітний клапан буде живитися від одного

джерела – батареї на 12 В, що спрощує конструкцію та підвищує автономність системи. Використання модуля реле JQC-3FF-S-Z 12V забезпечує надійне та безпечне керування процесами фільтрації в автоматизованих системах.

## 2.2 Алгоритм роботи мінісистеми фільтрації рідин

Враховуючи технічні характеристики всіх елементів мінісистеми фільтрації рідин з'єднуємо їх між собою (рисунок 2.7).

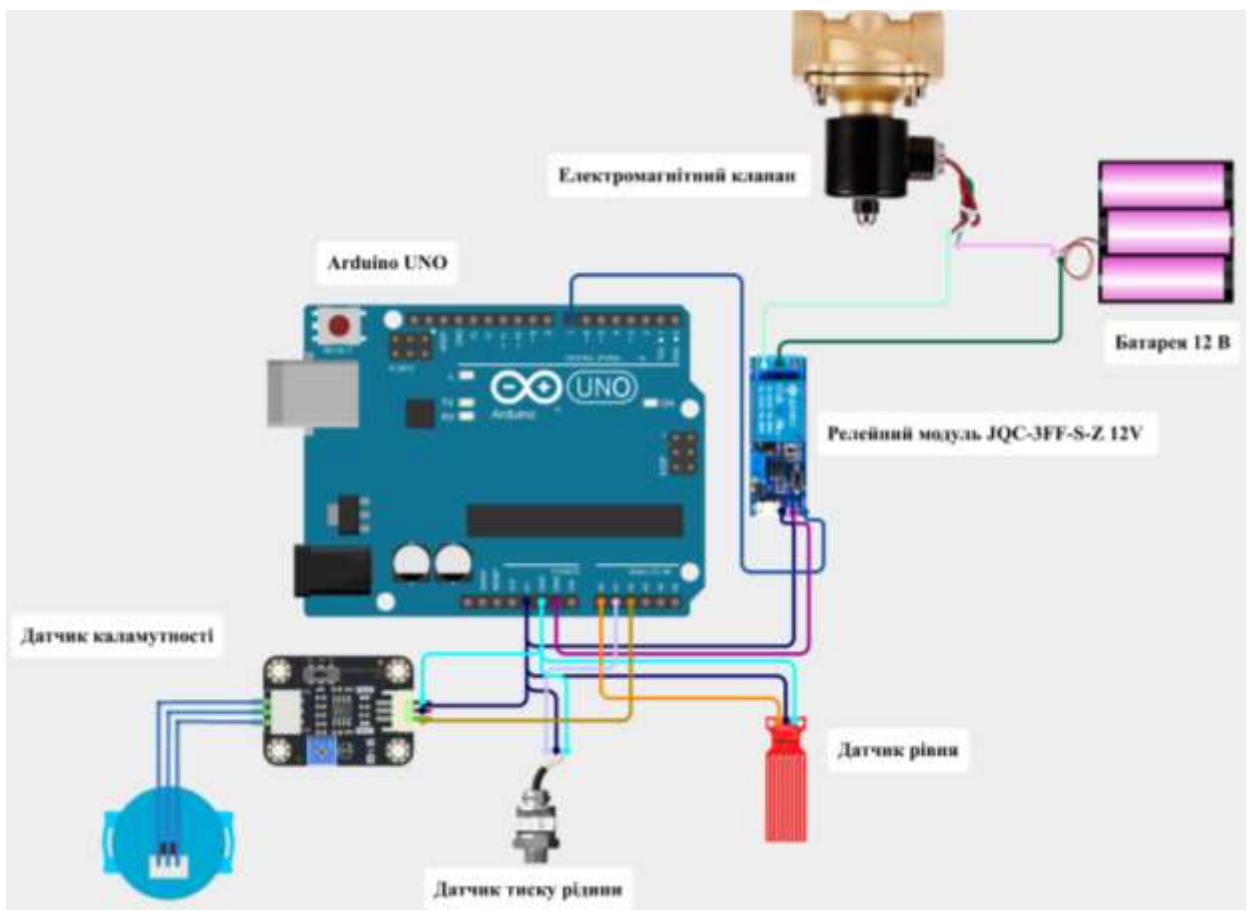


Рисунок 2.7 – Мінісистема фільтрації рідин

На рисунку 2.7 представлено електричну схему з'єднання компонентів мінісистеми фільтрації рідин. Центром схеми є мікроконтролер Arduino Uno Rev3, до якого підключено три сенсори: датчик каламутності, датчик рівня, датчик тиску. Всі сенсори підключені через аналогові та цифрові входи

Arduino, а їх живлення здійснюється через стабілізований вихід 5 В. Одноканальний релейний модуль JQC-3FF-S-Z з'єднаний з цифровим виходом Arduino Uno Rev3 для подачі керуючого сигналу. Саме реле, в свою чергу керує електромагнітним клапаном. Вся система живиться від батареї 12 В, яка паралельно подає живлення на Arduino Uno Rev3 (через VIN) та клапан (через реле). Така конфігурація дозволяє реалізувати замкнений автоматизований цикл контролю якості рідини, що проходить через фільтрацію.

Алгоритм роботи системи (рисунок 2.8) передбачає періодичне зчитування даних із сенсорів.

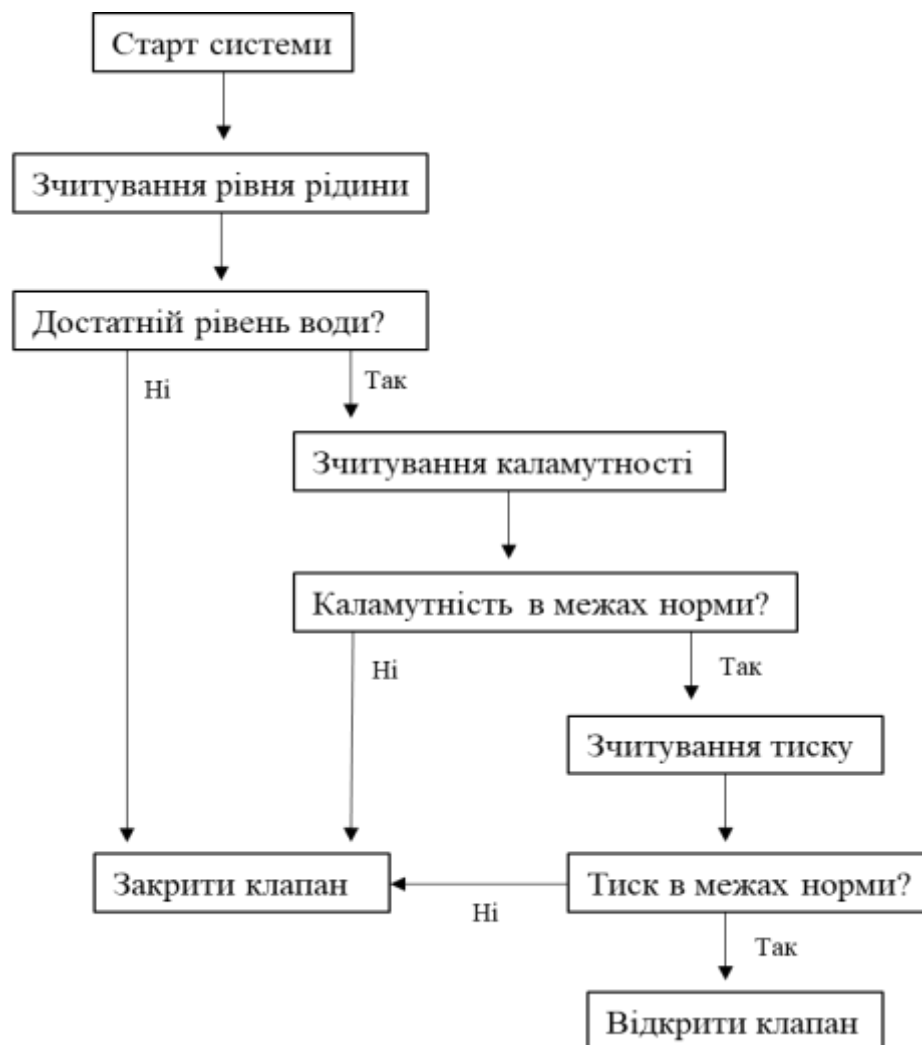


Рисунок 2.8 – Діаграма алгоритму роботи мінісистеми фільтрації рідин

Першим кроком Arduino Uno Rev3 перевіряє наявність рідини в системі за допомогою датчик рівня. Якщо рідина відсутня (тобто рівень нижче мінімального), система автоматично відключає електромагнітний клапан, щоб уникнути марної роботи та не допустити перегріву. Якщо рівень рідини в резервуар достатній, тоді відбувається зчитування даних з датчика каламутності. Якщо мутність рідини вище за допустиме значення (тобто вода забруднена), тоді система блокує подачу рідини через клапан, щоб уникнути надходження неочищеної рідини. У випадку якщо вода достатньо чиста, тоді перевіряється тиск у системі. При недостатньому тиску (нижче встановленого порогу) мікроконтролер дає команду, що фільтр забруднений або є витік, і блокує клапан. Лише коли всі умови одночасно виконуються – достатній рівень рідини, достатній тиск, чиста рідина. Arduino Uno Rev3 активує цифровий вихід, який подає керуючий сигнал на релейний модуль. Далі реле замикає ланцюг живлення клапана і відкриває його, забезпечуючи протікання рідини.

Процес відбувається циклічно, з оновленням показників кожні 500 мс для стабільної та актуальної реакції системи на зміну умов.

## ВИСНОВКИ

У результаті виконання дипломної роботи було реалізовано проект мінісистеми фільтрації рідини, заснованої на сучасних засобах електроніки та мікроконтролерному керуванні. Основною метою дослідження було створення компактної, енергоефективної, надійної та автоматизованої системи. Вона здатна в режимі реального часу здійснювати контроль за ключовими параметрами рідини: рівнем, тиском та прозорістю.

У ході роботи було проаналізовано існуючі принципи фільтрації рідин, види промислових фільтрів та засоби автоматизації. Обґрунтовано необхідність використання сучасних мікроконтролерних платформ для побудови таких систем. Для проекту було обрано Arduino Uno Rev3, як основну обчислювальну платформу. Дана платформа завдяки своїй простоті, функціональності та гнучкості ідеально підходить для керування малими системами. Також було обрано та проаналізовано три типи сенсорів: аналоговий датчик каламутності (DFRobot SEN0189), аналоговий датчик тиску (REV Robotics REV-11-1107) та цифровий датчик рівня рідини. Ці компоненти забезпечили стабільну роботу системи та надали точні значення необхідних параметрів.

Виконавчим механізмом було обрано електромагнітний клапан GEVAX 1901-KBND016-120 з живленням 12 В постійного струму, який дозволяє фізично відкривати або закривати потік рідини залежно від логіки, закладеної в алгоритм керування. Керування клапаном здійснюється через одноканальний релейний модуль JQC-3FF-S-Z, що дозволяє безпечно та ефективно керувати електромагнітним клапаном за допомогою мікроконтролера. Уся система живиться від одного джерела акумуляторної батареї 12 В, що забезпечує автономність і мобільність пристрою.

Особливу увагу було приділено розробці алгоритму роботи системи. Він представляє собою поетапну логіку контролю: перевірка наявності рідини, аналіз каламутності, оцінка тиску в системі. За умови відповідності всіх

параметрів встановленим нормам, подання сигналу на відкриття електромагнітного клапана. Такий підхід дозволяє з високим рівнем надійності контролювати якість рідини, що подається у технологічний процес. Усі рішення приймаються автоматично на основі аналізу даних, без участі оператора, що зменшує ймовірність людських помилок.

Під час дослідження було також побудовано електричну схему, створено діаграму алгоритму. У перспективі можливе удосконалення даної системи шляхом використання потужніших мікроконтролерів, підключенням модулів бездротової передачі даних (наприклад, ESP32 з Wi-Fi/Bluetooth), інтеграцією із SCADA-системами та побудовою більш складної схеми фільтрації. Отже, дана робота є вагомим прикладом використання сучасної електроніки в автоматизації виробничих процесів і може слугувати відправною точкою для подальших досліджень і розробок у цій сфері.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Rakesh Patel, Devarshi Shah, Bhupendra G. Prajapati and Manisha Patel Overview of industrial filtration technology and its applications. Indian Journal of Science and Technology. Oct. 2010. Vol. 3 №10.
2. Rohit Saini, Dr. Sandeep.G. Thorat Overview of filters for industrial based application. International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science. March 2024. Vol. 6 №3.
3. Membrane filtration processes dead-end or cross-flow. Technical bulletin MANN+HUMMEL Gruppe.
4. Cross/Tangential Flow Filtration Handbook. STERLITECH Corporation.
5. Chapter 14 Sterile filtration, filing, and lyophilization of product. Montgomery County Community College 2016.
6. Хімічна технологія та обладнання підприємств. Навчальний посібник для студентів спеціальності 133 – «Галузеве машинобудування» денної та заочної форм навчання / О.Д. Клименко, Е.Л.Селезньов. – Луцьк: Луцький НТУ, 2018. – 136 с.
7. Сорокіна К. Б. Очисні споруди водопостачання : конспект лекцій для студентів денної і заочної форм навчання освітнього рівня «бакалавр» спеціальності 192 – Будівництво та цивільна інженерія, спеціалізація «Цивільна інженерія (Водопостачання та водовідведення)»/К. Б. Сорокіна; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. – 84 с.
8. Фільтри виробництва компанії MDI. Фармацевтична галузь. Жовтень 2020. Том 82 № 5.
9. Choosing the Best Filtration Method for Your Liquid Processing Application. Reprinted from Processing's Filtration/Separation Handbook.
10. Технологія та обладнання одержання питної та технічної води: Фізикохімічні основи і алгоритми розрахунків процесів водопідготовки: навч. посіб. для студ. спеціальності 161 «Хімічні технології та

- інженерія», спеціалізації «Хімічні технології неорганічних речовин та водоочищення» / Н.М. Толстопалова, А.Л. Концевой, І.В. Косогіна, С.А. Концевой ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 130 с.
11. Сусліков Л.М., Студеняк І.П. Первинні вимірювальні перетворювачі фізичних величин: Навчальний посібник. – Ужгород: Видавництво УжНУ, 2018. – 311 с.
  12. Catalog fluid Sensors. Wenglor – the innovative family.
  13. Differential pressure sensors QBM32xx. Smart Infrastructure SIEMENS.
  14. Efficient flow measurement. Electromagnetic flow meters CombiFlow and flow sensors FlexFlow. Baumer Passion for Sensors.
  15. Датчик рівня рідини – різні типи датчиків рівня та їх роботи. [Електронний ресурс]: <https://uk.fmuser.net/wap/content/?15581.html>.
  16. S. Noorjannah Ibrahim, A. L. Asnawi, N. Abdul Malik, N. F. Mohd Azmin, A. Z. Jusoh, F. N. Mohd Isa. Web based Water Turbidity Monitoring and Automated Filtration System: IoT Application in Water Management. International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE). Vol. 8, No. 4, August 2018, pp. 2503-2511.
  17. Датчик провідності. Vernier SCIENCE EDUCATION.
  18. Наливайко О. М. Конспект лекцій з дисципліни “Мікропроцесорні пристрої” для студентів спеціальності “Електромеханічні системи автоматизації та електропривід”: Вид-до Донбаська державна машинобудівна академія. Краматорськ 2012. с. 151.
  19. І.Ш. Невлюдов, С.П. Новоселов, О.В. Сичова Технологія програмування промислових контролерів в інтегрованому середовищі CODESYS: Навчальний посібник – Харків: ХНУРЕ, 2019. – 264 с.
  20. Папушин Ю.Л., Білецький В.С. Основи автоматизації гірничого виробництва. – Донецьк: Східний видавничий дім, 2007. – 168 с.

21. Mohanraj Thangamuthu, Tamilarasi Thangamuthu, Gobinath Velu Kaliyannan, Moganapriya Chinnasamy and Rajasekar Rathinasamy. Fluid Power Actuators. April 2020. p.187-209.
22. Пупена О.М., Розроблення людино-машинних інтерфейсів та систем збирання даних з використанням програмних засобів SCADA/HMI.: Навч. посіб. Київ : Видавництво Ліра-К, 2020. — 594 с.
23. Igor Belai, Peter Drahos The industrial communication systems PROFIBUS AND PROFINet. Applied Natural Sciences. January 2009.
24. Arduino UNO R3 Datasheet.
25. REV Robotics Analog Pressure Sensor REV-11-1107 Datasheet.
26. DFRobot Turbidity sensor SKU SEN0189 Datasheet.