

Західноукраїнський національний університет  
Факультет комп'ютерних інформаційних технологій  
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем

## **ВИПУСКНА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

освітнього ступеня "магістр"  
на тему:

Автоматизація промислової установки зворотного осмосу для очистки води /  
Automation of an industrial reverse osmosis plant for water purification

Виконав студент групи АКІТм-21  
Качалуба Назар Ігорович

Керівник роботи: к.т.н., доцент Албанський І.Б.

Західноукраїнський національний університет  
Факультет комп'ютерних інформаційних технологій  
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем  
Освітній ступінь "магістр"

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

Освітньо-професійна програма – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані  
технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри СКС

\_\_\_\_\_ А.І.Сегін

“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

## **ЗАВДАННЯ НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТА**

Качалуби Назара Ігоровича

(прізвище, ім'я по-батькові)

### **1. Тема кваліфікаційної роботи**

Автоматизація промислової установки зворотного осмосу для очистки води /  
Automation of an industrial reverse osmosis plant for water  
purification.

Керівник роботи: к.т.н., доцент Албанський І.Б.

Затверджені наказом по університету від 28 листопада 2024 р. № 938

### **2. Строк подання студентом закінченої кваліфікаційної роботи**

1 грудня 2025р.

### **3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи:**

1. Аналіз та дослідження автоматизованих систем зворотнього осмосу.

2. Структура та функціональні схеми автоматизованих систем керування  
водоочисними установками.

3. Процеси збору й обробки інформації в автоматизованих системах.

4. Математична модель розрахунку часу і нагріву при самозапусках двигунів.

### **4. Основні питання, які потрібно розробити**

1. Дослідження систем автоматизації установок зворотнього осмосу.

2. Обґрунтування вибору основних засобів автоматизації та реалізації  
автоматизованої системи.

3. Розробка методу оптимізації розрахунку нагрівань асинхронних двигунів з  
використанням пристрою плавного пуску.

## 5. Перелік графічного матеріалу у роботі

1. Структурна та функціональна схеми автоматизованого керування промисловою установкою зворотнього осмосу.

### Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1	Албанський І.Б., к.т.н., доцент кафедри СКС		
2	Албанський І.Б., к.т.н., доцент кафедри СКС		
3	Албанський І.Б., к.т.н., доцент кафедри СКС		

7. Дата видачі завдання 2 грудня 2024р.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назви етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Дослідження систем автоматизації установок зворотнього осмосу	12.2024р. – 02.2025р.	виконано
2	Обґрунтування вибору основних засобів автоматизації та реалізація автоматизованої системи	03.2025р. – 06.2025р.	виконано
3	Розробка методу оптимізації розрахунку нагрівань асинхронних двигунів з використанням пристрою плавного пуску	07.2025р. – 11.2025р.	виконано
4	Остаточне оформлення та подача кваліфікаційної роботи на перевірку щодо плагіату та виправлення недоліків	11.2025р. – 12.2025р.	виконано

Студент

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Качалуба Н.І.

Керівник роботи

\_\_\_\_\_  
(підпис)

к.т.н., доцент Албанський І.Б.

## АНОТАЦІЯ

Качалуба Н.І. Автоматизація промислової установки зворотного осмосу для очистки води. – Рукопис.

Дослідження на здобуття освітнього ступеня «магістр» за спеціальністю – 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка», освітньо-професійна програма – «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» - Західноукраїнський національний університет. Тернопіль, 2025.

У роботі: проаналізовані системи автоматизації промислових установок очистки води; визначені основні вимоги та задачі для проектування автоматизованої системи керування промисловою установкою зворотного осмосу; розроблено структуру та функціональну схему автоматизованої системи керування промисловою установкою; обґрунтовано вибір засобів автоматизації; розроблено основної ідеї модифікації алгоритму розрахунку струмів, моментів та нагрівання при плавних запусках двигунів; проведено дослідження алгоритму роботи та математичне моделювання запусків асинхронного двигуна з використанням пристрою плавного пуску.

## ANNOTATION

Kachaluba N.I. Automation of an industrial reverse osmosis installation for water purification. – Manuscript.

Research for obtaining a master's degree in the specialty - 174 "Automation, computer-integrated technologies and robotics", educational and professional program - "Automation and computer-integrated technologies" - Western Ukrainian National University. Ternopil, 2025.

The work: analyzed automation systems for industrial water treatment plants; determined the main requirements and tasks for designing an automated control system for an industrial reverse osmosis plant; developed the structure and functional diagram of an automated control system for an industrial plant; justified the choice of automation tools; developed the main idea of modifying the algorithm for calculating currents, torques and heating during soft starts of engines; conducted a study of the algorithm of operation and mathematical modeling of starts of an asynchronous motor using a soft start device.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	5
ВСТУП	6
1. ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦІЇ УСТАНОВОК ЗВОРОТНЬОГО ОСМОСУ	9
1.1 Аналіз промислових систем автоматизації очистки води	9
1.2 Комплексна складова установок зворотного осмосу та їх різновид	14
1.3 Етапи та особливості проектування систем керування промисловими водоочисними установками	21
2. ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ОСНОВНИХ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТА РЕАЛІЗАЦІЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ	26
2.1 Обґрунтування основних вимог та задач при проектуванні автоматизованої системи керування промисловою установкою зворотного осмосу	26
2.2 Розробка структурної схеми та алгоритму роботи автоматизованої системи керування промисловою установкою	31
2.3 Обґрунтування вибору компонентів структури АСУ ТП	40
3. РОЗРОБКА МЕТОДУ ОПТИМІЗАЦІЇ РОЗРАХУНКУ НАГРІВАНЬ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ПРИСТРОЮ ПЛАВНОГО ПУСКУ	48
3.1 Представлення основної ідеї модифікації алгоритму розрахунку струмів, моментів та нагрівання при плавних запусках двигунів	48
3.2 Розробка математичної моделі розрахунку часу і нагріву при самозапусках	51
3.3 Дослідження алгоритму роботи та математичне моделювання запусків асинхронного двигуна з використанням пристрою плавного пуску	57
ВИСНОВКИ	61
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	65
ДОДАТОК А	68

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

- ТЕЦ - тепловий енергетичний центр;
- ЛМІ - людино-машинний інтерфейс;
- АСУ - автоматизована система управління;
- АСУ ТП - автоматизована система управління технологічним процесом;
- АЦП - аналого-цифровий перетворювач;
- ЦАП - цифро-аналоговий перетворювач;
- ПЗ – програмне забезпечення;
- ПЗМ – постійно запам'ятовуючий пристрій;
- ППП - пристрій плавного пуску;
- ОК - об'єкт керування;
- ПЧ – перетворювач частоти;
- ПІД - пропорційно-інтегрально-диференціальний;
- ОМС - оператор-моніторингова система;
- ПЛК - програмовано-логічний контролер;
- АРМ - автоматизоване робоче місце;
- ІЧ - інфрачервоний;
- ПК - персональний комп'ютер.

## ВСТУП

**Актуальність теми.** У сучасних умовах глобальної водної кризи та посилення екологічних вимог, ефективне управління водними ресурсами стає критично важливим для промисловості. Установки зворотного осмосу (RO) є ключовою технологією для знесолення та очищення води, однак їх ручне керування не забезпечує необхідної ефективності та надійності. Автоматизація цих систем стає не просто перевагою, а необхідністю для забезпечення стабільної роботи та економічної ефективності.

Промисловість стикається зі зростаючими вимогами до якості очищеної води, зниженням експлуатаційних витрат та необхідністю дотримання суворих екологічних стандартів. Автоматизація установок зворотного осмосу дозволяє вирішити ці завдання шляхом оптимального керування технологічними параметрами, мінімізації людського фактора та забезпечення безперервного моніторингу процесів.

Інвестиції в автоматизацію установок зворотного осмосу демонструють швидку окупність за рахунок значного зниження експлуатаційних витрат. Зниження витрат на електроенергію до 25% через оптимізацію роботи насосів високого тиску та використання частотного регулювання. Насоси є основним споживачем енергії в установках RO, і їх оптимальне керування дозволяє досягти значної економії.

Зменшення витрат на хімічні реагенти на 15-30% за рахунок точного дозування та автоматичної корекції дозування відповідно до якості вхідної води. Система автоматично адаптується до змін у складі води, що дозволяє використовувати мінімально необхідну кількість реагентів.

Продовження ресурсу мембран на 20-40% через попередження критичних ситуацій, своєчасне проведення промивок та оптимальне керування параметрами роботи. Мембрани є найбільш дорогими витратними матеріалами в установках RO, тому збільшення їх терміну служби має значний економічний ефект.

Скорочення персоналу та зниження витрат на обслуговування через централізацію керування та моніторингу. Автоматизована система дозволяє одній людині ефективно керувати кількома установками одночасно.

Автоматизація промислових установок зворотного осмосу для очищення води є критично важливою для забезпечення ефективної, економічно вигідної та екологічно безпечної роботи. У сучасних умовах, коли ефективність використання ресурсів стає ключовим чинником успіху, автоматизація установок зворотного осмосу перетворюється з опціонального вдосконалення на обов'язкову вимогу для промислових підприємств. Інвестиції в автоматизацію не лише окупаються за рахунок економії експлуатаційних витрат, але й забезпечують довгострокову стабільність роботи та відповідність сучасним стандартам ефективності.

**Мета і завдання дослідження.** Метою роботи є дослідження методів запуску асинхронних двигунів з використанням пристрою плавного пуску та автоматизація промислової установки зворотного осмосу для очистки води.

Для досягнення поставленої мети роботи необхідно:

- проаналізувати відомі методи і способи запусків та роботи асинхронних двигунів в автоматизованих промислових системах очистки води;
- дослідити існуючі системи промислової очистки води, а саме зупинити увагу на промислових установках зворотного осмосу;
- проаналізувати елементну базу засобів автоматизації та структури промислових автоматизованих систем очистки води, апаратне та програмне забезпечення;
- розробити структурну схему автоматизованої системи керування промисловою установкою зворотного осмосу;
- обґрунтувати вибір засобів автоматизації запропонованої автоматизованої системи;
- оптимізувати метод розрахунку струмів, моментів нагрівання при запусках асинхронних двигунів;

- дослідити алгоритм роботи та математичну модель циклу роботи асинхронних двигунів промислової установки зворотного осмосу.

**Об'єкт дослідження:** процеси керування роботою двигунів та контроль стану основних електричних параметрів автоматизованої системи управління промисловою установкою очистки води.

**Предметом дослідження** є автоматизована система управління установкою очистки води на промисловому об'єкті.

**Наукова новизна одержаних результатів:** розроблений метод оптимізації розрахунків струмів та нагрівання відповідальних вузлів при запусках асинхронних двигунів промислової установки, що забезпечує передачу та ефективне опрацювання отриманих даних від контрольно-вимірювальних засобів автоматизованої системи, який в свою чергу дозволить ефективно працювати насосам високого тиску водоочисної установки.

**Практичне значення отриманих результатів:** ефективна робота промислової установки зворотного осмосу з мінімальними енергозатратами та максимальною продуктивністю очисних мембран, що дає можливість фільтрувати воду від різного роду домішок з високим ступенем очистки.

**Апробація.** На основі досліджень підготовлено та опубліковано 2 тези доповідей на студентських наукових конференціях (додаток А).

# 1. ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦІЇ УСТАНОВОК ЗВОРОТНЬОГО ОСМОСУ

## 1.1 Аналіз промислових систем автоматизації очистки води

Погана екологічна обстановка у світі безсумнівно позначається на якості води, що використовується у побутових та промислових потребах. Якщо у першому випадку отримання якісної очищеної  $H_2O$  застосовуються часом дуже примітивні, але дієві, картриджні фільтри, то у масштабах виробництва задіяні зовсім інші механізми.

Загалом, суть водопідготовки для виробництва полягає у фільтрації рідини з метою виміщення з неї солей, металів та шкідливих мікроорганізмів. Способів та пристроїв, що існують для цього, кілька — вибір конкретного залежить від характеру виробничого процесу, для якого потрібна очищена вода.

Промислові установки для очистки води пропонуються у досить широкому спектрі, оскільки технології виробництва у різних сферах діяльності потребують очищення води за певними параметрами (рисунок 1). Установки для очищення води потрібні скрізь, де використовується вода. І для різних сфер застосування води є свої вимоги водо підготовки [1].



Рисунок 1.1 – Загальний вигляд промислової установки для очистки води

Устаткування для промислового очищення води затребуване у теплоенергетиці, харчовій промисловості, фармацевтичній промисловості, електроніці, водопідготовці для комунального водопостачання. Для плавальних басейнів також потрібне очищення води з певними параметрами. Оборотні водоохолоджувальні цикли використовуються у виробництві продуктів харчування та напоїв.

Сучасне промислове очищення води здійснюється за допомогою установок, в яких водопідготовка використовує найпередовіші технології. Водопідготовка для будь-яких промислових цілей чи комерційного застосування – це приведення вихідної води до вимог технології виробництва чи господарсько-питного водопостачання. Схеми для підготовки води у промислових установках для очищення води розробляються на підставі аналізу води, вимог певної технології до води, а також необхідної витрати.

Загалом сферами виробництва, де застосовуються промислові установки для очищення води, є [1, 2]:

- теплоенергетика;
- муніципальне будівництво;
- харчова промисловість;
- фармацевтична промисловість.

У свою чергу, у кожній із зазначених галузей промислового виробництва установки для очищення води мають свою специфіку залежно від конкретного призначення. Для теплоенергетики використовуються різні види обладнання для водопідготовки:

- для теплових енергетичних центрів (ТЕЦ) чи міні-ТЕЦ;
- для парових та водогрійних котелень;
- для систем гарячого водопостачання;
- для парогенераторів та зволожувачів.

У муніципальному будівництві установки для водоочищення промислових масштабів застосовуються в процесі водопідготовки:

- для бізнес-центрів;

- для шкіл та дитячих дошкільних закладів;
- для фітнес-центрів;
- для готелів преміум-класу;
- для ресторанів та кафе;
- для житлових комплексів елітного рівня.

У харчовому промисловому виробництві установки для очищення води використовуються:

- у пивоварінні;
- у лікєро-горілчаному виробництві;
- при розливі мінеральної та питної води;
- у виробництві соків та напоїв;
- у виробництві консервів;
- у виробництві морозива;
- у хлібобулочному виробництві.

У фармацевтичній промисловості установки для промислового очищення води застосовуються:

- для лікарень;
- у косметичній промисловості.

Промислові установки для очищення води – це жорсткі, статичні та гнучкі модульні конструкції. Вони дозволяють отримати воду заданої якості з води будь-якого складу для різних за продуктивністю установок – від 10 літрів на годину до 1000 кубічних метрів за годину. Разом з постачанням промислових установок виробники обладнання надають послуги з інжинірингу, послуги з монтажу систем водопідготовки, сервісне обслуговування. Повний спектр обладнання водопідготовки та повний цикл робіт - від первинної консультації до здачі об'єкта «під ключ» з наступним сервісним обслуговуванням.

Для вирішення проблем водопостачання існує таке обладнання [2]:

- самопромиваючі сітчасті фільтри для фільтрації твердих речовин;
- обладнання для захисту від утворення накипу та корозії;

- фільтри з активованим вугіллям, що видаляють запахи та присмаки;
- фільтри знезалізнення;
- фільтри деманганації;
- встановлення дезінфекції води ультрафіолетовим випромінюванням;
- автоматичні установки пом'якшення води;
- установки знесолення води;
- обладнання для термічної дегазації і тому подібне.

Хімічна водопідготовка для парових та водонагрівальних котлів, ТЕЦ різної продуктивності – це один із пріоритетних напрямків виробників систем очистки води. Промислова очистка води забезпечує необхідну якість води. А хімічна підготовка води значно збільшує час ефективної експлуатації котлів, трубопроводів, що дозволяє знизити витрати на ремонт та обслуговування.

У великих містах та мегаполісах країни відкриваючи кран можуть використовувати воду для споживання та приготування їжі тому, що вода з міського водопроводу відповідає усім санітарним нормам, визначеним стандартам ДСТУ, якість якої контролюється на централізованих системах підготовки води. Але вода, яку споживають люди, перш ніж потрапити до нас на кухню, проходить багатокілометровий шлях трубами міського водопроводу, і на цьому шляху набирає в себе все те, що в них накопичується. Зараз за встановленими правилами перед водолічильниками скрізь встановлений сітчастий фільтр, він затримує великі домішки, що містяться у водопровідній воді, такі як пісок, іржа та металева окалина, що потрапляють у водопровід під час ремонту та сервісного обслуговування водопровідних систем. Але великі домішки в основному шкідливі тільки для обладнання, в якому використовується вода, а дрібніші фракції механічних домішок, а також хімічні речовини, що знаходяться у воді в розчиненій формі, не видимі людському оку, залишаються в ній. Не варто забувати, що на централізованих станціях вода проходить знезараження, і в більшості випадків речовинами, що містять хлор. Залишковий хлор – це великий

“помічник”. Він захищає воду від розвитку в ній хвороботворних мікроорганізмів і його концентрація досить мала, щоб мати сильний отруйний вплив на людину. Але від цього він не перестає бути отрутою, навіть кімнатні рослини потрібно поливати попередньо відстояною водою.

Більшість людей звикли до смаку води та напоїв, що споживають. Адже якщо встановити систему доочищення питної води, смак звичних напоїв та страв може змінитися. Вода - це "росіл", смак якого визначає його мінеральний склад. Найпростіше його відчутти, коли у воді є залізо і підвищена жорсткість. Деяким людям цей присмак здається приємним. Але тим, хто ретельно стежить за своїм здоров'ям, засвоюваністю та складом мікроелементів, що потрапляють в організм, встановлення систем доочищення води може дуже допомогти.

Існують дуже прості системи, що включають два-три ступені:

- видалення дрібних «зважених» домішок;
- фільтрація на активованому вугіллі дозволяє зібрати органічні домішки та покращити органолептику (присмак, кольоровість, запах);
- фільтрування через іонообмінну смолу, що знижує жорсткість води, важкі метали та вміст заліза.

Після встановлення такої системи, вода перестає пахнути, і її смак покращується.

Системи доочистки води можуть складатися з групи елементів, що фільтрують, або з одного багатошарового картриджа, компактність якого дозволяє його встановити у найкоротші терміни. Ресурс та фільтруючі властивості елементів зазначені в описі системи та залежать від властивостей вихідної води.

У системах, які пропонує спеціалізовані фірми з продажу обладнання по водопостачанню та водовідведенню, ще зустрічається один крок, що дозволяє додати таку мінеральну речовину як магній, що захищає організм від стресу та сприяє швидкому відновленню після фізичних навантажень. А ще, якщо приготувати каву на воді, насиченій магнієм, напій подарує

незабутній смак та аромат, оскільки кава «розкривається» завдяки цьому мікроелементу.

Системи доочистки питної води так само можуть мати ступінь для більш глибокого очищення - це зворотноосмотичні системи, такі як наприклад BWT Aqa SOURCE і BWT THERO 90. Часто такі системи називають просто осмос, хоча це і не зовсім правильно. Поряд із вищепереліченими ступенями очищення, там встановлена ще й зворотноосмотична мембрана, яка усуває з води всі домішки, включаючи бактерії та більшість вірусів. Вода після таких систем становить практично чисту H<sub>2</sub>O.

Багато хто зауважує, що мінерали, які повинні потрапляти в організм людини і засвоюватися з водою. З мінералами буде все нормально, тому що в їжу, що готується, входить не тільки вода, а ще багато інших продуктів: овочі, м'ясо, фрукти сіль і цукор і тому подібне, зазвичай страви будуть більш дієтичними і зберігати свій природний смак.

Найпростіша система доочистки питної води – це фільтр типу колба, наприклад, BWT Penguin. Він дуже зручний і поміщається навіть у полиці на дверях холодильника. В середині такої ємності розташовується змінний фільтруючий елемент - картридж. Картриджі, які виготовляє на спеціалізованих заводах, не лише фільтрують воду від шкідливих домішок, а й насичують воду магнієм. Ресурс таких картриджів залежить від складу вихідної води, але в середньому становить 1 місяць, після чого підлягає заміні.

## 1.2 Комплексна складова установок зворотного осмосу та їх різновид

Зворотний осмос є однією з найбільш передових та затребуваних технологій для очищення води, що широко застосовується в промисловості. В останні роки необхідність використання якісної води у виробничих процесах значно зросла, особливо в тих галузях, де потрібний високий рівень

чистоти та відсутність шкідливих домішок. За допомогою промислового осмосу підприємства можуть ефективно видаляти з води різні забруднювачі, такі як солі, важкі метали, мікроорганізми та органічні речовини, які могли б вплинути на якість продукції або спричинити корозію та пошкодження обладнання.

Процес зворотного осмосу заснований на пропусканні води через спеціальну напівпроникну мембрану, яка затримує більшість розчинених речовин та забруднювачів. Це дозволяє досягти високого ступеня очищення та адаптувати воду під різні потреби виробництва, від охолодження до використання у хімічних та фармацевтичних процесах. Зворотний осмос відрізняється високою ефективністю і, що важливо, є екологічно безпечним методом, оскільки дозволяє значно скоротити обсяг стічних вод і мінімізувати шкідливий вплив на довкілля.

Основними перевагами використання зворотного осмосу в промисловості є зниження витрат на водопостачання та утилізацію води, можливість повторного використання води та забезпечення стабільної якості води на виході. Системи зворотного осмосу допомагають підприємствам оптимізувати свої виробничі процеси та підвищити загальну економічну ефективність, що робить цю технологію привабливим вибором для компаній у різних галузях, які прагнуть підвищення конкурентоспроможності та стійкості.

Промислова система зворотного осмосу включає кілька ключових компонентів, кожен з яких відіграє важливу роль в процесі очищення води (рисунки 1.1-1.3). Розуміння роботи кожного елемента системи дозволяє більш точно оцінити можливості та ефективність промислового осмосу для очищення води для різноманітних промислових потреб. Основні елементи, що становлять систему, включають насоси, мембрани, фільтри та ємності для води.

Насоси забезпечують подачу води під високим тиском до мембран, що є необхідною умовою проходження процесу зворотного осмосу. Мембрани, у

свою чергу, відіграють роль основного фільтруючого елемента, затримуючи розчинені солі, органічні речовини та мікроорганізми. Перш ніж вода надходить на мембрану, вона проходить попередню фільтрацію, де видаляються більші частинки та зважені речовини, які могли б пошкодити або засмічити мембрану. Фільтри також можуть включати системи вугільної очистки для видалення хлору та органічних забруднень [3].

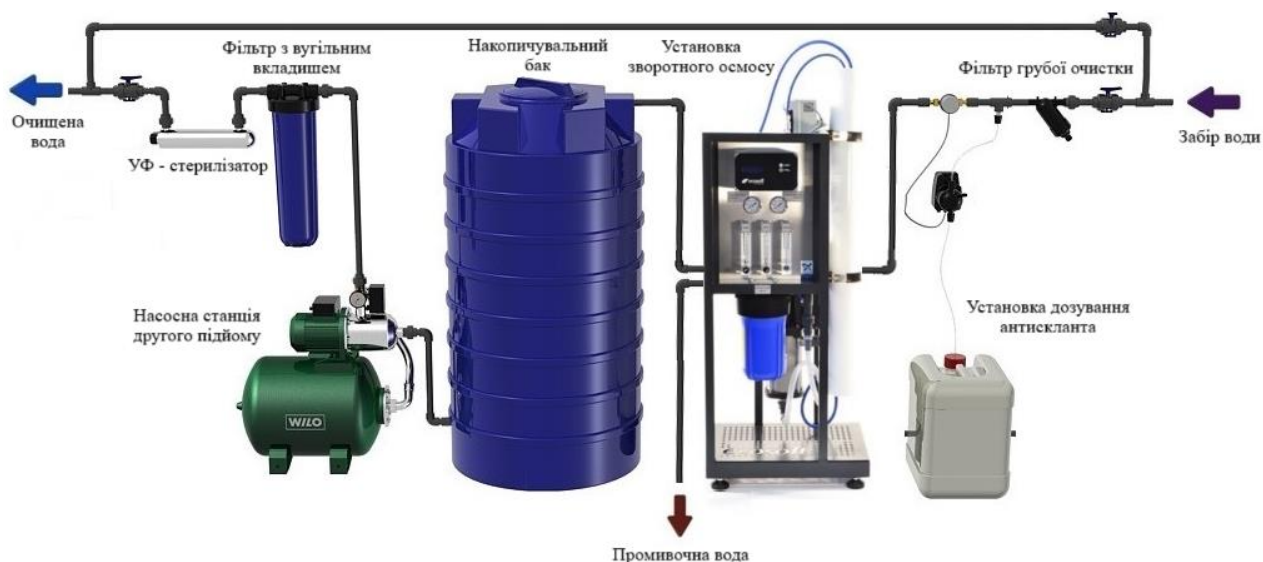


Рисунок 1.2 – Загальний вигляд промислової установки зворотного осмосу

Ємності для води використовуються для збору очищеної води (пермеату) та концентрату - відходів процесу, які містять віддалені забруднювачі та солі. Системи також можуть включати резервуари для проміжного зберігання та змішування води перед подачею у виробництво.

Схема роботи промислового осмосу може включати кілька етапів та вузлів, залежно від конкретних вимог до якості води та обсягу виробництва. Загалом процес починається з попередньої фільтрації, в ході якої видаляються великі частинки і органічні сполуки. Це підготовчий етап, який допомагає продовжити термін служби мембран та збільшити ефективність очищення.

У наступному етапі вода надходить у насос високого тиску, який збільшує напір, достатній для проходження води через мембрану. Мембрана, будучи напівпроникною, пропускає лише молекули води, залишаючи на

своїй поверхні розчинені солі, важкі метали та інші домішки. Пермеат, або очищена вода, проходить через мембрану, тоді як концентрат, що містить забруднювачі, відводиться убік або утилізується.

Схема зазвичай включає кілька мембранних модулів, що працюють послідовно або паралельно, що дозволяє підвищити продуктивність та забезпечити високий ступінь очищення. Очищена вода після мембранної фільтрації може проходити через додаткову постфільтрацію, наприклад, через вугільний фільтр, для видалення залишкових запахів і присмаків.

Кожен компонент у схемі промислового осмосу для води взаємопов'язаний та працює синхронно для досягнення найкращого результату. Успішне впровадження системи потребує уважного проектування та регулярного обслуговування, щоб забезпечити постійну якість та стабільність виробничого процесу.

Застосування промислового зворотного осмосу варіюється в залежності від галузі та специфічних вимог до якості води. Різні види промислових систем зворотного осмосу розроблені з урахуванням потреб в очищенні води для різних виробничих процесів. Галузева специфіка визначає як тип забруднень, які потрібно видаляти, а й необхідну ступінь очищення, що, своєю чергою, впливає на вибір конкретного устаткування. Зворотний осмос для різних галузей на сьогоднішній встановлюється з урахуванням деяких факторів, а саме: особливостей виробництва, забрудненості води та необхідні обсяги.

У хімічному виробництві вода часто використовується як розчинник, рідина, що охолоджує, або реагент. Вода, що містить навіть невелику кількість домішок, може вплинути на якість продукції та стабільність процесів. Системи зворотного осмосу допомагають досягати необхідної чистоти води, забезпечуючи видалення розчинених солей, органічних речовин та мікроорганізмів.

Для харчової промисловості важлива не лише чистота, а й безпека води, оскільки вона може безпосередньо впливати на смак, запах та якість

кінцевого продукту. Зворотний осмос допомагає ефективно видаляти домішки та мікроорганізми, запобігаючи забрудненню продукції та продовжуючи термін її зберігання.

В енергетиці, особливо на теплових та атомних електростанціях, вода є важливим елементом для охолодження та виробництва пари. Використання зворотного осмосу дозволяє значно знизити концентрацію солей у воді, запобігаючи корозії обладнання та збільшуючи його термін служби.

Для виробництва лікарських засобів потрібна високоякісна вода, що відповідає суворим стандартам чистоти. Системи зворотного осмосу, що використовуються у фармацевтиці, допомагають забезпечити воду, вільну від розчинених солей, важких металів та бактерій. Устаткування для фармацевтики часто доповнюється додатковими ступенями фільтрації, такими як ультрафільтрація та деіонізація.

Вибір обладнання для промислового осмосу залежить від ряду факторів, включаючи тип та концентрацію забруднювачів, вимоги до якості води та виробничі обсяги. У разі високих концентрацій солей у вихідній воді потрібне встановлення систем високого тиску, які здатні забезпечити необхідний ступінь очищення. Для видалення специфічних забруднювачів, таких як органічні речовини або важкі метали, може знадобитися додаткова система попередньої обробки, яка допоможе продовжити термін служби мембран та знизити загальні експлуатаційні витрати.

Обладнання для промислового осмосу також варіюється в залежності від того, чи працює підприємство у безперервному чи циклічному режимі. Безперервні системи вимагають більш надійних та зносостійких компонентів, тоді як циклічні системи можуть бути спроектовані з урахуванням можливості періодичного обслуговування та заміни елементів.

Специфіка та складність очищення у кожній галузі визначають не тільки конструкцію, а й вартість системи. Підбір обладнання повинен враховувати і економічну ефективність: системи з високою продуктивністю

та низькими експлуатаційними витратами можуть забезпечити швидку окупність та довгострокову економію для підприємств.

Принцип роботи промислового осмосу полягає у фільтрації води через напівпроникну мембрану, яка затримує більшість розчинених домішок, забезпечуючи високий рівень очищення. Цей метод дозволяє ефективно очищати воду від солей, органічних та неорганічних домішок, мікроорганізмів та інших забруднювачів, що робить його затребуваним у різних галузях промисловості.

Процес зворотного осмосу складається з кількох етапів, які забезпечують поступове очищення води та підготовку її до основного процесу фільтрації через мембрану.

Попередня фільтрація - це перший етап, на якому з води видаляються великі частинки, суспензії та хлор, здатні пошкодити мембрану. Використовуються фільтри механічної очистки, вугільні фільтри або інші попередні системи фільтрації, які готують воду для подальшого проходження через мембрану.

Підйом тиску — для успішного проходження через мембрану вода повинна бути під високим тиском, який перевищує осмотичний тиск. Насоси високого тиску створюють необхідне зусилля, щоб молекули води могли подолати мембранний бар'єр.

Основна мембранна фільтрація - це центральний процес, де вода проходить через мембрану, що відокремлює молекули води від більшості розчинених речовин, включаючи солі, важкі метали та мікроорганізми (рисунок 1.3). Домішки залишаються з одного боку мембрани (концентрат), а очищена вода — з іншого (пермеат) [4, 5].

Збір і доочищення пермеату - після основного етапу фільтрації пермеат (очищена вода) може проходити через додаткові етапи обробки для подальшого зниження концентрації домішок. Це може включати ультрафільтрацію, активоване вугілля або ультрафіолетову дезінфекцію, щоб повністю відповідати вимогам конкретного використання.

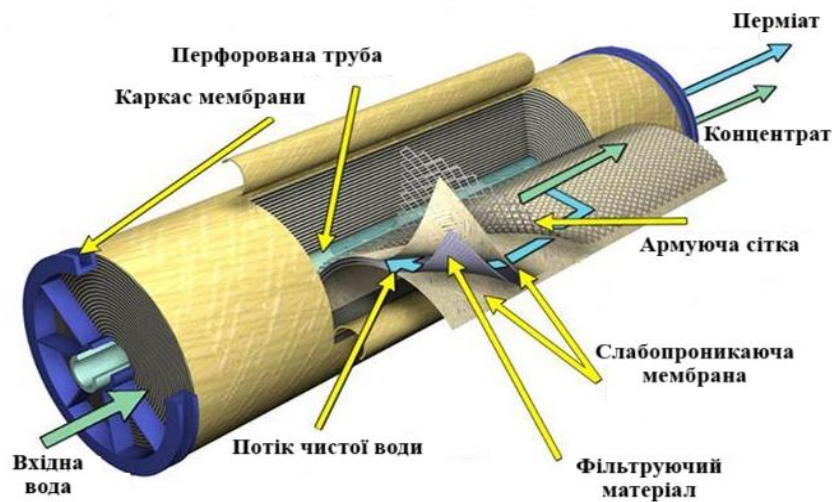


Рисунок 1.3 – Загальний вигляд основної мембрани установки зворотного осмосу

Якість вихідної води впливає на вибір мембран і ефективність процесу. Наприклад, вода з високим вмістом органічних речовин може призвести до забруднення мембран, вимагаючи більш часті заміни чи очищення.

Температура води також впливає на ефективність осмосу: за низьких температур в'язкість води збільшується, що вимагає підвищення тиску і може знизити продуктивність системи.

Рівень рН та наявність хімічних забруднювачів можуть викликати проблеми, особливо при тривалому використанні систем, тому для промислового осмосу часто розробляються спеціалізовані системи попередньої водопідготовки.

Використання технологій зворотного осмосу в промисловості стало невід'ємною частиною сучасного виробництва, де чистота та якість води відіграють вирішальну роль. Промислові системи осмосу забезпечують високий рівень очищення, дозволяючи видаляти як солі жорсткості, а й важкі метали, органічні сполуки та інші домішки. Ці системи значно підвищують ефективність виробничих процесів, скорочують витрати на воду, енергоресурси та обслуговування обладнання.

Ключові перевагами зворотного осмосу для промисловості є:

- високий рівень очищення - видалення до 99% домішок, що гарантує стабільну якість води для різних виробничих потреб;

- економія витрат - зниження витрат на купівлю води, очищення стічних вод та обслуговування виробничого обладнання;

- довговічність та надійність - регулярне обслуговування та чищення мембран забезпечують довгий термін служби системи та стабільну роботу обладнання;

- гнучкість застосування - системи осмосу підходять для різних галузей промисловості — харчової до хімічної, адаптуючись під специфічні вимоги.

При виборі системи зворотного осмосу для підприємства важливо враховувати декілька ключових факторів: обсяг водоспоживання, рівень забруднення вихідної води, вимоги до якості очищеної води, а також бюджет на встановлення та експлуатацію.

### 1.3 Етапи та особливості проектування систем керування промисловими водоочисними установками

У промислових системах (харчова, фармацевтична, енергетична, хімічна галузі) процес зворотного осмосу є енергоємним та чутливим, тому вимагає точного автоматизованого керування для забезпечення стабільності параметрів і якості очищеної води. Основною метою автоматизації керування установками очистки води це забезпечити [5]:

- стабільну якість пермеату (очищеної води);
- оптимальний тиск і витрати в системі;
- захист мембран від пошкодження або засолювання;
- безперебійну роботу з мінімальним втручанням оператора;
- моніторинг і архівування технологічних параметрів.

Типова структура автоматизованої установки зворотного осмосу включає:

1 - сенсори:

- тиску (аналогові, 4–20 мА);
- витрати (електромагнітні або ультразвукові витратоміри);
- рівня (поплавкові, гідростатичні, ємнісні);
- провідності та рН;
- температури (Pt100 або термопари);

2 - виконавчі механізми:

- електроклапани подачі, промивки, скидання;
- частотно-керовані насоси;
- засувки з електроприводом;
- дозувальні насоси реагентів (антискалант, NaOCl, кислота);

3 - контролер (PLC):

- здійснює збір сигналів, керування виконавчими механізмами, реалізацію алгоритмів автоматичного регулювання (ПД-регулятори);
- може бути інтегрований у SCADA-систему для візуалізації й дистанційного контролю;

4 - людино-машинний інтерфейс (HMI):

- сенсорна панель оператора для контролю параметрів, запуску циклів промивки, налаштування аварійних меж.

До типових режимів автоматизованої роботи установки зворотного осмосу можна віднести описані в таблиці 1.1 режими та їх опис [5, 6].

Таблиця 1.1 – Режими автоматизованої роботи промислової установки зворотного осмосу

Режим	Опис
Автоматичний запуск/зупинка	За рівнем у баку, тиском або таймером
Промивання мембран (CIP)	Автоматичне керування клапанами й насосами для промивки
Регулювання тиску подачі	Частотне керування насосом для стабільної продуктивності
Аварійне відключення	При перевищенні тиску, низькому рівні, високій провідності тощо
Режим очікування (Stand-by)	Економія енергії при простой системи

До переваг автоматизованого керування очисною промисловою установкою можна віднести:

- стабільну якість пермеату незалежно від змін у вихідній воді;
- зниження споживання електроенергії за рахунок частотного керування;
- подовження ресурсу мембран завдяки точному регулюванню тиску та промивкам;
- повна реєстрація параметрів і діагностика несправностей;
- мінімальна участь оператора, висока надійність.

Робота насоса високого тиску регулюється встановленням граничних значень тиску на вході та виході. Насос призначений для підвищення тиску в системах очищення води (рисунок 1.4). У таких системах часто потрібний додатковий тиск для здійснення процесу фільтрації і насос призначений заповнити нестачу магістрального тиску. Насос для підвищення вхідного тиску води для побутових та промислових систем зворотного осмосу, підходить майже до всіх систем зворотного осмосу різних виробників.

Роботу насоса високого тиску можна додатково регулювати за допомогою інверторного приводу (частотника), який використовує частотну модуляцію для управління станом насоса. Для підвищення енергоефективності процесів опріснення в систему інтегровано пристрій рекуперації енергії, його робота також контролюється за допомогою системи програмовано-логічного контролера (ПЛК).



Рисунок 1.4 – Насос високого тиску для систем очистки води

Послідовність запуску та зупинки пристрою зворотного осмосу автоматизована та контролюється системою ПЛК (рисунок 1.5). Система координує роботу насосів-дозаторів, насосів високого тиску та клапанів з електроприводом синхронно з рівнями в баках, швидкістю потоку та тиском. Ця автоматизація підвищує ефективність та надійність системи зворотного осмосу.



Рисунок 1.5 – ПЛК та його обв'язка автоматизованої системи зворотного осмосу

Промивання пристрою зворотного осмосу під низьким тиском здійснюється тоді і тільки тоді, коли система ПЛК автоматизує протокол відключення, керуючи промивним клапаном та насосом, ініціюючи промивання під низьким тиском на поверхні мембрани. Цей крок допомагає зберегти цілісність мембрани та продовжити термін служби пристрою зворотного осмосу.

Система моніторингу та сигналізації робочих параметрів - система ПЛК, яка також служить як автоматичний монітор роботи насосів високого тиску, насосів-дозаторів та електричних клапанів (рисунок 1.6). У разі будь-якої несправності у роботі система видає сигнал тривоги. Він постійно відстежує такі параметри, як температура, швидкість потоку, тиск, рівень рідини, провідність, окислювально-відновний потенціал та рН, видаючи сигнал тривоги при виявленні будь-яких ненормальних умов роботи. Таким

чином, система ПЛК динамічно визначає робочий стан пристрою зворотного осмосу на основі умов реального часу.



Рисунок 1.6 – Автоматичний моніторинг, контроль та регулювання за допомогою контролера (ПЛК)

Автоматичний контроль та регулювання дозування хімікатів, що використовується в технологічному процесі очистки води виконується згідно алгоритму автоматизованої системи керування (АСК). Система ПЛК дозволяє автоматично регулювати дозування різних хімічних речовин. Це регулювання засноване на сигналі 4-20 мА або імпульсному сигналі, що видається пристроями, які вимірюють такі параметри, як витрата, рН та окислювально-відновний потенціал. Завдяки таким коригуванням в режимі реального часу ПЛК забезпечує ефективність системи зворотного осмосу за одночасного зниження ймовірності втрат хімікатів.

## 2. ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ОСНОВНИХ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТА РЕАЛІЗАЦІЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ

2.1 Обґрунтування основних вимог та задач при проектуванні автоматизованої системи керування промисловою установкою зворотного осмосу

Установки зворотного осмосу є ключовими технологіями для знесолення та очищення води в промислових масштабах. Ефективність їх роботи безпосередньо залежить від якості системи автоматичного керування, що забезпечує стабільність процесу, мінімізацію експлуатаційних витрат та довговічність мембран. Основними факторами, що впливають на ефективність функціонування є:

- температура вхідної води;
- сольове навантаження;
- рН середовища;
- тиск та швидкість потоку.

Критичними параметрами контролю установки зворотного осмосу є: вхідні параметри, процесні змінні, вихідні показники. Відповідно вхідні параметри включають в себе: якість сировини, температуру, витрату. Процесні змінні у свою чергу: тиск, витрату, концентрацію, індекс щільності. А також вихідні показники включають: якість пермеату, продуктивність, стабільність.

До основних вимог проектування АСУ ТП відносять технологічні і функціональні вимоги. Технологічні і функціональні вимоги у свою чергу це є забезпечення стабільності процесу [6]:

- підтримка оптимального тиску в межах 15-80 бар;
- контроль якості вхідної води ( $SDI < 5$ );
- стабілізація температури ( $\pm 2^\circ\text{C}$ );
- захист мембранних модулів;

- попередження гідроударів;
- контроль наростання забруднень;
- автоматична промивка при досягненні критичних параметрів;
- керування ПУСКОМ/СТОПОМ;
- контроль процесом;
- аварійні функції.

Архітектура системи автоматизації представляє собою рівневі структури АСУ ТП та апаратне забезпечення. Рівневі структури АСУ ТП включають в себе архітектуру установки зворотного осмосу, що поділяється на п'ять підрівнів, а саме [6, 8]:

- РІВЕНЬ 4: КОРПОРАТИВНИЙ;
  - інтеграція з ERP;
  - аналітика ефективності;
  - управління ресурсами;
- РІВЕНЬ 3: ВИРОБНИЧИЙ (MES);
  - оптимізація режимів;
  - управління якістю;
  - облік енерговитрат;
- РІВЕНЬ 2: ДИСПЕТЧЕРСЬКИЙ (SCADA);
  - візуалізація техпроцесу;
  - архівування даних;
  - генерація звітів;
- РІВЕНЬ 1: КЕРУЮЧИЙ (PLC);
  - логіка керування;
  - регулювання параметрів;
  - аварійні алгоритми;
- РІВЕНЬ 0: ПОЛЬОВИЙ;
  - датчики (тиск, витрата, рН);
  - виконавчі механізми;
  - перетворювачі сигналів.

Апаратне забезпечення в архітектурі системи автоматизації водоочисної установки включає два основних і невід'ємних блоки програмно-апаратних засобів (контролери та мережі, сенсорне обладнання).

Контролери та мережі під цим розуміються:

- промислові PLC (Siemens S7-1500, Allen-Bradley);
- промислові мережі (PROFIBUS, Ethernet/IP);
- резервовані системи живлення.

Сенсорне обладнання:

- сенсори тиску (0-100 бар);
- витратоміри з кориолісовим принципом;
- аналізатори якості води (рН, провідність, мутність).

Алгоритми керування включають в себе багатоконтурну систему регулювання та алгоритми оптимізації (мінімізація енерговитрат). Контур контролю якості має два способи управління, а саме:

- адаптивне керування на основі онлайн-аналізу;
- корекція режиму роботи за результатами якості пермеату.

Система безпеки та захисту автоматизованої системи керування установкою зворотного осмосу включає у своєму складі технологічні захисти та кібербезпеку. Технологічні захисти автоматизованої системи у свою чергу залежать від аварійних контурів:

- захист від перетиску (тиск  $> 85\%$  від максимального);
- контроль рівня в баках;
- захист від сухого ходу насосів.

З наявністю в автоматизованій системі керування передбаченої функції резервування систем, відбувається:

- дублювання критичних сенсорів;
- резервування каналів зв'язку;
- наявність автономного живлення.

У сфері кібербезпеки для автоматизованої системи проводяться ряд заходів щодо захисту мережевого середовища у вигляді [7]:

- сегментації мережі;
- аутентифікації користувачів;
- шифрування даних;
- регулярне оновлення ПЗ.

Інтеграція з супутніми системами виконується на основі коректної роботи підсистем попередньої підготовки та систем моніторингу енергоефективності. Для ефективної роботи автоматизованої системи керування очисною установкою використовуються інтеграційні інтерфейси, які забезпечують:

- обмін даними з фільтрами попередньої очистки;
- керування системою дозування інгібіторів;
- координацію роботи з установками ультрафільтрації.

Системи моніторингу енергоефективності забезпечує стабільну і безперебійну роботу промислової установки очистки води на основі показників ефективності, таких як:

- питома енергомідкість [кВт·год/м<sup>3</sup>];
- коефіцієнт відновлення [%];
- термін служби мембран.

Вимоги до програмного забезпечення включають перелік основних пунктів та функціональних потреб, що забезпечать ефективність коректної роботи установки на усіх етапах очистки і виходу якісного пермеату. Організація роботи SCADA-систем забезпечить візуалізацію та наочне представлення роботи установки для кращого розуміння і відображення технологічних процесів і контрольованих параметрів. До обов'язкових функцій SCADA-системи потрібно віднести:

- візуалізацію технологічної схеми;
- тренди-пріоритети параметрів;
- автоматичне звітування;
- систему тривоги та подій.

Функціонування SCADA-системи передбачає створення ряду баз даних та аналітичних центрів обробки інформації на основі яких будуть прийматися рішення та вестися журнали подій і аварій. Структура баз даних передбачає наявність введення [8]:

- архівування технологічних параметрів;
- ведення історії подій;
- статистики ефективності;
- прогнозування ресурсу мембран.

Випробування та впровадження проектованої та розробленої очисної промислової установки зворотного осмосу відбувається на основі стандартизованих етапів. Серед стандартних протоколів передбачених єдиними стандартами ДСТУ та ISO можна виділити також наступні етапи впровадження, пер за все фази проектування, такі як:

- розробка функціональної схеми;
- вибір обладнання;
- програмування ПЗ.

До основних фаз впровадження можна віднести наступні:

- пуско-налагоджувальні роботи;
- навчання персоналу;
- випробування в робочих умовах.

У свою чергу критерії приймального контролю включають технологічні критерії, такі як:

- стабільність роботи в номінальному режимі;
- точність підтримки параметрів;
- швидкість реакції на збурення.

Наявність економічних показників дозволяє зробити висновок про ефективність роботи та доцільність проектування автоматизованої системи керування очисною установкою по таких умовах, як:

- відповідність проектним витратам;
- досягнення планової енергоефективності;

- виконання норм якості продукту.

Ключові аспекти проектування є комплексний підхід до проектування АСУ ТП установки зворотного осмосу, яка потребує інтеграції технологічних, апаратних та програмних рішень. Пріоритет безпеки включає те, що система повинна забезпечувати надійний захист обладнання та стабільність технологічного процесу. Гнучкість та масштабованість забезпечує те, що архітектура повинна дозволяти модернізацію та розширення функціоналу системи.

Перспективами розвитку АСУ ТП промислової установки зворотного осмосу є [9]:

- впровадження штучного інтелекту для прогнозування забруднення мембран;
- використання цифрових двійників для оптимізації режимів роботи;
- інтеграція з системами Smart Grid для мінімізації енерговитрат.

До додаткових рекомендації, щодо покращення функціонування технологічних процесів установки та ефективної роботи можна віднести наступні умови:

- застосування модульного принципу побудови системи;
- передбачення резервування критичних компонентів;
- забезпечення інтеграції з корпоративними системами управління.

## 2.2 Розробка структурної схеми та алгоритму роботи автоматизованої системи керування промисловою установкою

Загальна структура алгоритму роботи промислової установки зворотного осмосу розроблено на основі АСУ ТП. Алгоритм роботи установки зворотного осмосу побудований на принципах багаторівневої автоматизації, де кожен рівень відповідає за певний спектр функцій. Основа системи - це модульний підхід, який дозволяє здійснювати поетапний запуск, контроль та зупинку технологічного процесу. Головна мета алгоритму -

забезпечити стабільну роботу установки при мінімальному втручанні оператора, підтримуючи оптимальні технологічні параметри та запобігаючи аварійним ситуаціям.

Система функціонує за принципом "безумовної безпеки" - будь-яке порушення технологічного режиму або вихід параметрів за допустимі межі призводить до автоматичного втручання системи керування, а в критичних випадках - до аварійної зупинки обладнання. Структурна схема автоматизованої системи керування промисловою установкою зворотного осмосу представлена на рисунку 2.1 [8-10].

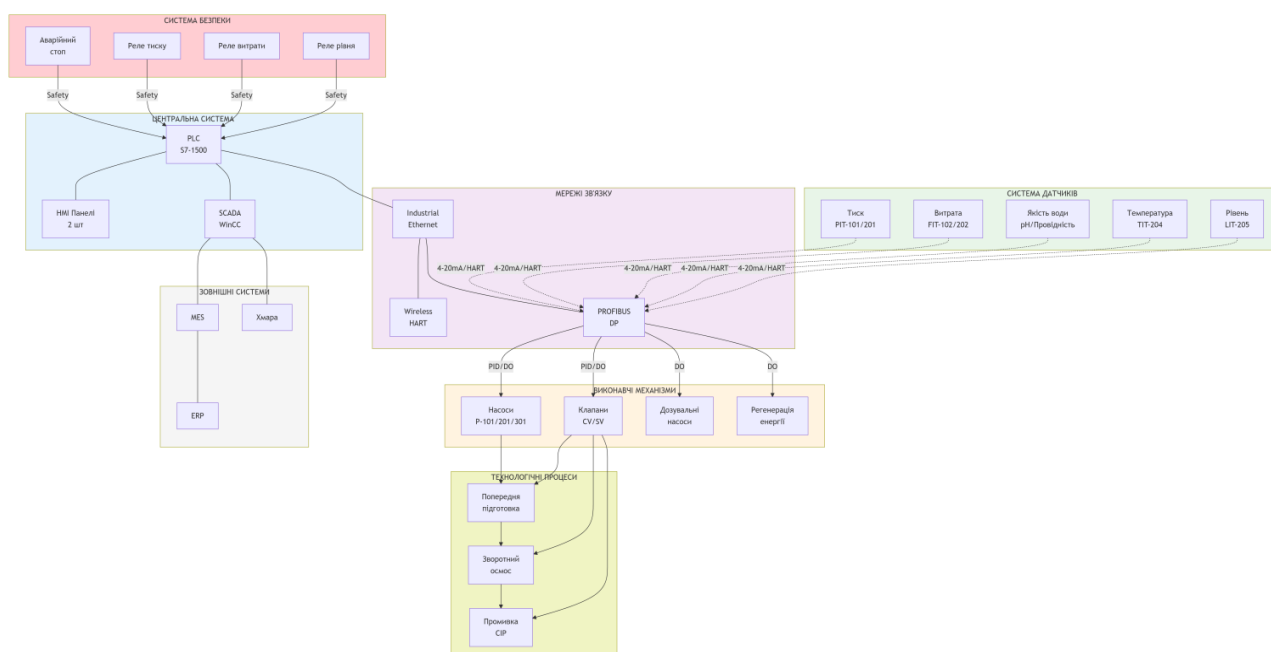


Рисунок 2.1 – Структурна схема АСУ ТП промислової установки зворотного осмосу

Алгоритм включає чотири основні групи процедур: пускові операції, робочі цикли, сервісні функції та аварійні протоколи. Пускові операції забезпечують підготовку системи до роботи та поетапний запуск обладнання. Робочі цикли підтримують стабільну роботу установки в основному режимі. Сервісні функції відповідають за обслуговування та відновлення продуктивності системи. Аварійні протоколи активуються при виникненні нештатних ситуацій.

Алгоритм пуску та ініціалізації включає в себе попередній контроль та перевірки системи. Процедура запуску починається з комплексної перевірки всіх систем установки. Система автоматично перевіряє стан аварійних стопових (грибкових) кнопок, положення запірної арматури, рівні води в технологічних баках та наявність живлення. Особлива увага приділяється контролю тиску в мережі подачі сирій води та перевірці справності основних сенсорів (датчиків) - тиску, витрати, якості води.

Після успішного завершення попередніх перевірок система проводить аналіз якості вхідної води. Контролюється індекс щільності сухого залишку (SDI), мутність, загальне сольове навантаження. Якщо показники якості води відповідають технологічним вимогам, система отримує дозвіл на подальший запуск.

Послідовність запуску підсистем відбувається згідно встановленого алгоритму роботи системи. Запуск установки відбувається за строго визначеною послідовністю. Спочатку активується система попередньої підготовки води - відкриваються заслінки подачі сировини, запускаються насоси першого підйому, вмикаються фільтри механічного очищення. Після стабілізації параметрів після попередньої обробки система переходить до запуску основного технологічного обладнання.

Насос високого тиску запускається в режимі плавного розгону з початковою швидкістю 30% від номінальної. Система поступово підвищує тиск у мембранних модулях, контролюючи динаміку зростання за допомогою сенсорів тиску. Коли тиск досягає робочого значення, система автоматично переходить до стадії стабілізації параметрів.

Основний робочий алгоритм в процесі режиму стабільної роботи виконується поетапно згідно вище представленої структурної схеми роботи АСУ ТП. В основному робочому режимі система підтримує оптимальні технологічні параметри за допомогою PID-регуляторів. Контролер безперервно коригує швидкість насоса високого тиску для підтримки заданого рівня тиску в мембранних модулях. Паралельно регулюється

положення регулюючих клапанів для забезпечення необхідної витрати пермеату та концентрату.

Система моніторингу якості продукції постійно аналізує провідність пермеату, що дозволяє оперативно виявляти погіршення якості очищеної води. При збільшенні солевого проходження система автоматично коригує робочі параметри - зменшує ступінь відбору пермеату або збільшує тиск для компенсації зниження продуктивності мембран.

Адаптивне керування параметрами центрального ПЛК дозволяє коректно керувати установкою. Алгоритм передбачає адаптацію робочих параметрів до змінних умов експлуатації. Система автоматично враховує температуру вхідної води, коригуючи тиск для компенсації змін в'язкості рідини. При зниженні температури система підвищує робочий тиск для підтримки стабільної продуктивності, а при підвищенні температури - знижує для економії енергії.

Контролер (ПЛК) також відстежує тенденції до забруднення мембран, аналізуючи динаміку зростання перепаду тиску та зниження продуктивності. На основі цих даних система оптимізує тривалість робочих циклів та частоту промивок для максимального продовження ресурсу мембран.

Система безпеки та аварійні протоколи багаторівневої системи захисту організовані на основі багаторівневого алгоритму роботи. Алгоритм безпеки реалізований за трирівневою схемою. Перший рівень - попереджувальні сигнали та коригування параметрів при незначних відхиленнях. Другий рівень - активне втручання з частковим обмеженням роботи обладнання при серйозніших порушеннях. Третій рівень - аварійна зупинка при критичних ситуаціях, що загрожують пошкодженню обладнання.

Система безперервно моніторить тиск у різних точках технологічного тракту. При перевищенні допустимих значень система послідовно застосовує заходи зниження тиску - зменшує швидкість насоса, відкриває байпасні клапани, і якщо це не допомагає - відключає насос високого тиску.

Обробка специфічних аварійних ситуацій згідно закладеного алгоритму роботи. Окремий підрозділ алгоритму відведений для обробки типових аварійних ситуацій. У разі втрати живлення система автоматично активує аварійне освітлення та здійснює коректне закриття всіх технологічних клапанів. При виявленні зниження якості вхідної води система обмежує продуктивність установки для запобігання швидкому забрудненню мембран.

Особливий протокол передбачений для випадків розгерметизації системи. Сенсори витoku автоматично виявляють падіння тиску та ініціюють негайне відключення насосного обладнання з одночасним сигналом тривоги для обслуговуючого персоналу.

Алгоритми обслуговування та сервісу, а також автоматизована промивка мембран передбачена в програмному циклі роботи ПЛК установки. Система автоматично ініціює цикл хімічної промивки мембран при досягненні критичних параметрів продуктивності. Алгоритм промивки включає кілька послідовних етапів: попереднє промивання прісною водою, циркуляція кислотного розчину для видалення неорганічних відкладень, промивка нейтралізуючим розчином, циркуляція лужного розчину для видалення органічних забруднень, та фінальне промивання.

Кожен етап контролюється за допомогою сенсорів рН, провідності та тиску. Система автоматично підтримує оптимальну концентрацію миючих розчинів та температуру промивки. Після завершення циклу проводиться автоматична перевірка ефективності промивки шляхом порівняння продуктивності мембран до та після обробки.

Прогностичне обслуговування передбачене в загальному алгоритмі роботи установки. Алгоритм передбачає функції прогностичного обслуговування на основі аналізу журналу подій та даних роботи установки. Система відстежує тенденції до погіршення ключових параметрів - зростання перепаду тиску на мембранах, зниження солережекції, збільшення енергоспоживання. На основі цих даних формується прогноз часу настання

критичного зниження продуктивності та генеруються рекомендації щодо планового обслуговування.

Система автоматично веде журнал роботи обладнання, фіксуючи кількість робочих годин, циклів пуску/зупинки, кількість проведених промивок [10]. Ця інформація використовується для планування профілактичного обслуговування та заміни витратних матеріалів.

Оптимізаційні та енергозберігаючі алгоритми включають в себе динамічне керування енергоефективністю. Алгоритм оптимізації енергоспоживання передбачає динамічне коригування робочих параметрів для мінімізації витрат електроенергії. Система автоматично визначає оптимальне співвідношення тиску та витрати, що забезпечує мінімальне питоме енергоспоживання на одиницю отриманого пермеату.

Особливу увагу приділено роботі насоса високого тиску - основного споживача енергії в установці. Алгоритм використовує частотне регулювання для підтримки оптимальної швидкості обертання насоса відповідно до поточних технологічних потреб. При зниженні потреби на очищену воду система автоматично знижує продуктивність, зберігаючи при цьому високий ККД обладнання.

Інтелектуальне керування системою регенерації енергії включене окремим пунктом в алгоритмі роботи установки. В установках, обладнаних системами регенерації енергії, алгоритм оптимізує роботу турбодетандерів або інших енерговідновлювальних пристроїв. Система автоматично регулює параметри роботи енергорекупераційного обладнання для максимізації повернення енергії з концентрату.

Контролер безперервно аналізує ефективність роботи системи регенерації та коригує її робочі параметри для досягнення максимального енергетичного ККД. При виході з ладу або неефективній роботі системи регенерації алгоритм автоматично переходить на роботу в базовому режимі без втрати технологічної ефективності.

Інтеграційні та звітні функції, а також обмін даними з вищими рівнями АСУ ТП відбувається на основі передбачених протоколів зв'язку. Алгоритм передбачає комплексну інтеграцію з системами керування підприємством. Через стандартні промислові інтерфейси здійснюється обмін даними з MES та ERP системами. У реальному часі передаються дані про виробничі показники - обсяги виробленої продукції, витрати хімічних реагентів, енергоспоживання, якісні характеристики продукції.

Система автоматично формує заявки на матеріали та запасні частини на основі аналізу витрат та прогнозу потреб. При наближенні часу планового технічного обслуговування генеруються автоматичні повідомлення для служби головного механіка та відділу матеріально-технічного постачання.

Автоматизована звітність та архівування даних відбувається періодично згідно встановленим налаштуванням ПЛК. Алгоритм передбачає автоматичне формування різноманітних звітів технологічного та економічного характеру. Щогодини система генерує звіти про основні технологічні параметри, щодня - зведені звіти про роботу установки, щомісяця - аналітичні звіти для керівництва [11, 12].

Всі технологічні параметри архівуються в базі даних з можливістю подальшого аналізу. Система зберігає повну історію змін параметрів, тривог та втручань оператора. Ця інформація використовується для розслідування причин аварійних ситуацій, аналізу ефективності роботи та вдосконалення технологічного процесу.

Перспективи розвитку та вдосконалення алгоритму і напрями подальшої оптимізації дають можливість адаптувати установку до різної специфіки роботи при виготовленні тої чи іншої продукції. Алгоритм розроблений з урахуванням можливості подальшого розширення функціоналу. Перспективним напрямом є впровадження елементів штучного інтелекту для прогнозування технологічних параметрів та автоматичної оптимізації режимів роботи. Машинне навчання дозволить системі

адаптуватися до специфічних умов експлуатації та індивідуальних особливостей конкретної установки.

Іншим напрямом розвитку є інтеграція з системами "розумної" енергетики, що дозволить оптимізувати роботу установки з урахуванням поточних тарифів на електроенергію та графіків навантаження підприємства.

Практичне значення та переваги роботи АСУ ТП дають економічне обґрунтування встановлення зазначеної установки на виробничій площадці. Реалізація описаного алгоритму забезпечує значне підвищення ефективності роботи установки зворотного осмосу. Автоматизація дозволяє знизити витрати на обслуговування, зменшити вплив людського фактора, підвищити стабільність технологічного процесу та якість продукції. Запропонований підхід дозволяє досягти оптимального балансу між продуктивністю, енергоефективністю та довговічністю обладнання.

Система, побудована на основі описаного алгоритму, демонструє високу надійність та ефективність у промислових умовах, що підтверджується успішним впровадженням на різних об'єктах водопідготовки (рисунок 2.2) [12]. Алгоритм реалізує багаторівневу систему керування з автоматичними перевірками безпеки, адаптивним регулюванням параметрів та протоколами дій у аварійних ситуаціях.

До ключових елементів алгоритму можна віднести наступні [13]:

- пуск та ініціалізація - верхня частина схеми (перевірка безпекових умов - контроль аварійних стопів, положень клапанів; аналіз якості води - перевірка SDI, мутності, солевого навантаження; запуск підсистем - послідовний пуск обладнання з контролем проміжних параметрів);

- нормальна робота - центральна частина (PID-регулювання - автоматична підтримка оптимальних параметрів; безперервний моніторинг - контроль тиску, витрати, якості продукції; адаптивне керування - коригування параметрів відповідно до змінних умов);

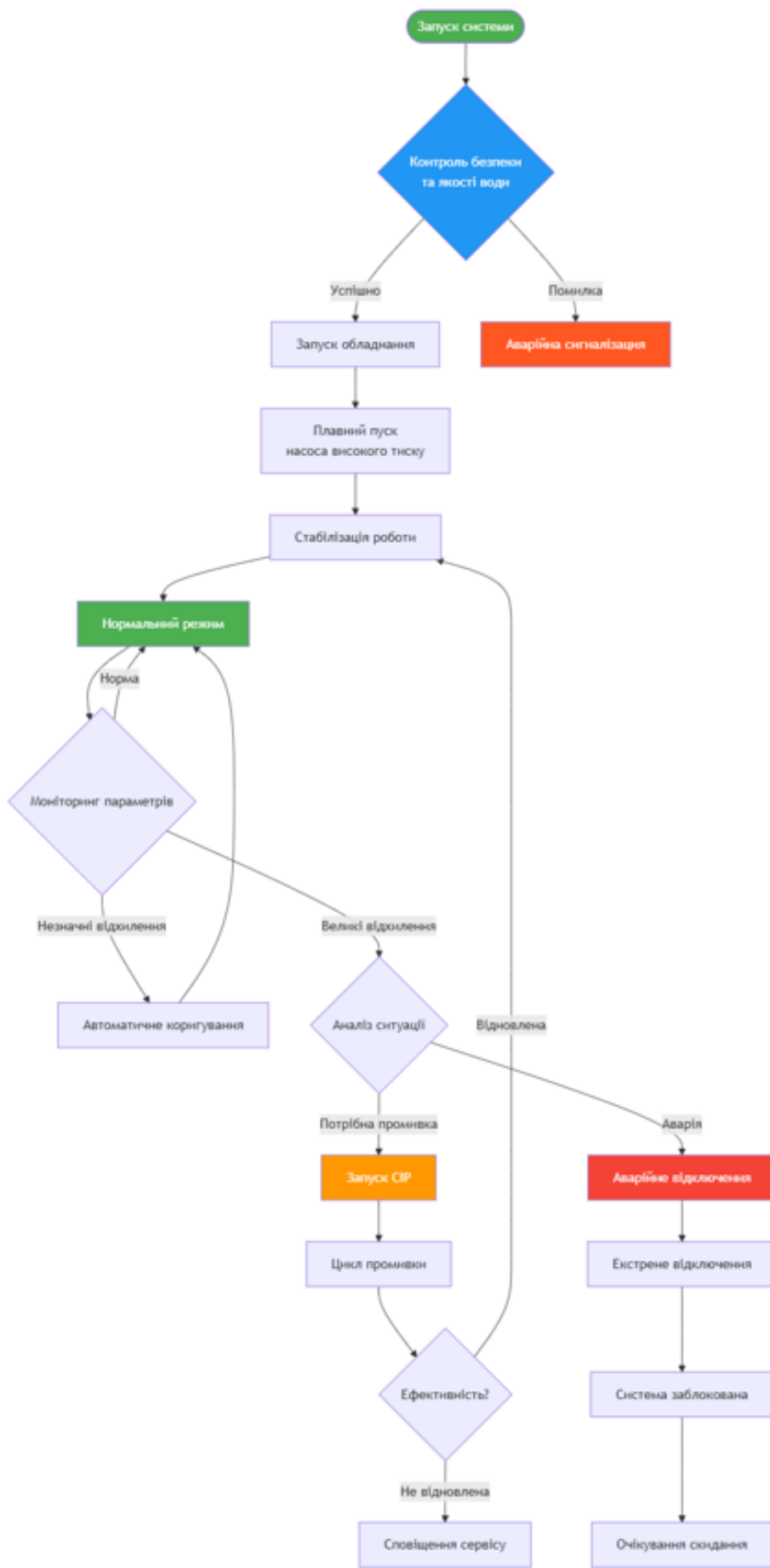


Рисунок 2.2 – Блок-схема алгоритму роботи установки зворотного осмосу

- система безпеки - права частина (рівень 1 - попередження та незначні коригування; рівень 2 - захист обладнання з частковим обмеженням роботи; рівень 3 - аварійне відключення з повною блокуванням системи);

- обслуговування - нижня частина (автоматична промивка - кислотна та лужна обробка мембран; перевірка ефективності - контроль відновлення продуктивності; планове обслуговування - координація з сервісними службами).

Перевагами запропонованого алгоритму є [14]:

- автоматизація - мінімальне втручання оператора;
- безпека - багаторівневий захист обладнання;
- адаптивність - автоматична корекція параметрів;
- ефективність - оптимізація роботи та енергоспоживання;
- надійність - комплексне відновлення після аварійних ситуацій.

Алгоритм забезпечує стабільну та безпечну роботу установки зворотного осмосу в автоматичному режимі з можливістю ручного втручання лише для критичних ситуацій та планового обслуговування.

### 2.3 Обґрунтування вибору компонентів структури АСУ ТП

Сьогодні автоматизовані системи управління технологічними процесами є невід'ємною частиною будь-якого сучасного виробництва. Однак сама установка та пусконаладження системи — лише половина справи. Дане випробування починається в момент, коли обладнання переходить в експлуатацію. Саме тоді стає очевидною роль обслуговування АСУ ТП — комплексу дій та організаційних заходів, що дозволяють підтримувати системи у працездатному стані, мінімізувати простої та забезпечити надійну роботу всього підприємства.

Досвід ефективних підприємств у цій сфері показує, що якісне обслуговування АСУ ТП впливає на економічні показники компанії, а також на гнучкість та безпеку виробництва. У другому розділі розглянуті ключові

аспекти розробки та проектування АСУ ТП, спираючись на знання та досягнення в даному напрямку світових виробників обладнання та засобів автоматизації. На рисунку 2.3 представлена загальна структура АСУ ТП промислової установки зворотного осмосу, алгоритм роботи якої розглянутий у підрозділі 2.2 [15]. Структура включає в себе ряд: сенсорних пристроїв, виконавчих механізмів (різного типу) та контролера керування (ПЛК), а також провідні і безпроводні засоби та пристрої зв'язку.

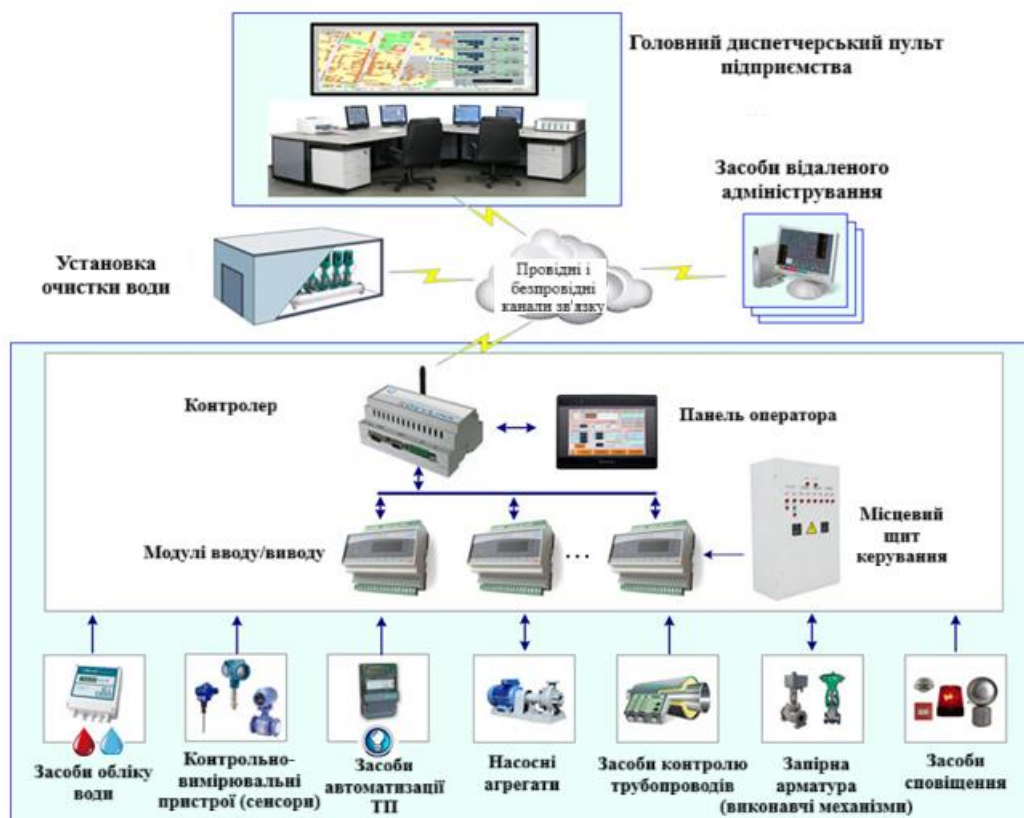


Рисунок 2.3 – Загальна структура АСУ ТП установки зворотного осмосу

ПЛК ОВЕН КосМастер (рисунок 2.4) застосовується для вирішення локальних завдань автоматизації: водопідготовка, водоочищення, вентиляція, опалення та інше. Запропонований на ринку засобів автоматизації випускається в корпусі 7 DIN та має у своїй комплектації до 24 каналів вводу/виводу. Для розширення власних входів/виходів передбачено підключення внутрішньої шини модулів розширення ПЗМ. Для інтеграції в SCADA-систему та керування зовнішніми пристроями для приладу може бути встановлене до двох інтерфейсів RS-485 з підтримкою протоколів

Modbus RTU/ASCII. Створення алгоритму здійснюється користувачем FBD за допомогою безкоштовного середовища програмування Owen Logic. Завантаження алгоритму здійснюється за допомогою кабелю miniUSB [16].



Рисунок 2.4 – Загальний вигляд програмованого реле керування  
ОВЕН КосМастер

Особливостями пристрою є обладнання, яке може підключається до нього, а саме:

- 4 аналогових входи - PT100, PT1000, 4...20 мА, 0...10 В, 0...4 кОм, режим дискретного входу;
- 2 аналогових виходу- 4...20 мА або 0...10 В;
- дискретні входи – 24 В або 230 В;
- дискретні виходи – електро-магнітне реле чи транзисторні ключі.

У різних модифікаціях пристрою ПР200 можна підключити різного роду сенсори, а саме:

- сенсори електропровідності та солемісту;
- кондуктометричні сенсори рівня;
- сенсори тиску.

ОВЕН КосМастер - електронний блок (програмований контролер) з готовими алгоритмами для керування установками зворотного осмосу з сенсорами електропровідності в комплекті та призначений для застосування

в побутових та промислових системах. Прилад забезпечує захист системи від аварійних ситуацій, контролює якість води, управляє виконавчими механізмами.

Сенсор електричної провідності ASCK-0,1 (сенсор EC) – це сенсор якості води, який використовується для вимірювання здатності розчину проводити електричний струм [17]. Ядро сенсора електричної провідності - це зонд, який вимірює електричну провідність та інтегрує компоненти точної технології, тому його часто називають зондом електричної провідності. Він використовується в поєднанні з контролером електропровідності для досягнення точного вимірювання та онлайн-контролю електропровідності.



Рисунок 2.5 – Загальний вигляд сенсора електропровідності типу ASCK-0,1

Електрична провідність ( $\sigma$ ) або конкретна провідність - це міра здатності матеріалу проводити електричний струм. Електрична провідність вимірюється в Siemens на метр (S/M) або частіше мілісіменс на метр (MS/M). Siemens - це одиниця провідності та є взаємною одиницею опору, Ом. Вимірювання провідності є звичайними вимірюваннями в багатьох промислових та екологічних застосуваннях і є швидким, недорогим і надійним способом вимірювання кількості іонів у розчині. Розчинені речовини чи солі у воді визначають провідність розчину. У міру збільшення кількості розчинених іонів здатність розчину переносити електричний заряд також збільшується. Саме цей заряд дозволяє сенсору провідності виміряти

провідність. Якщо концентрація іонів у розчині висока, провідність висока, що призводить до швидкого струму. Коли концентрація іонів низька, струм повільніший, а показання менше. Вони часто використовуються в гідропоніці, аквакультурі та прісноводних системах для моніторингу кількості поживних речовин, солей або домішок у воді.

Стандартним завданням поширеним у промисловості, зокрема — у харчовій, є сигналізація досягнення рідиною в ємності певного рівня. Існує багато методів для вирішення цього завдання, але найпростішим і недорогим способом є застосування кондуктометричного сенсора рівня AELC 09 (рисунок 2.6).



Рисунок 2.6 – Загальний вигляд кондуктометричного сенсора рівня AELC 09

Такі сенсори успішно можуть працювати з електропровідними рідинами провідністю 0,2 см/м і більше. До подібних рідин належать питна та технічна вода, слабкі розчини лугів, кислот, стічні води та харчові рідини (наприклад, квас або пиво).

Принцип роботи кондуктометричних сенсорів заснований на тому, що при досягненні рідиною в ємності певного рівня робоча рідина замикає електрод сенсора на корпус металевого резервуара або на додатковий електрод самого сенсора, викликаючи в ланцюгу сенсора електричний струм. У результаті замикання ланцюга сенсора призводить до спрацьовування реле, яке, своєю чергою, управляє відповідною схемою.

Промислові сенсори тиску призначені для вимірювання тиску рідини або газу відповідно до будь-якого стандартного для галузі принципу роботи. Для звичайних галузей промисловості, таких як машинобудування та

автоматизація, напівпровідникова промисловість, сенсори тиску потребують високої надійності та довгострокової стабільності. Провідні виробники обладнання автоматизації пропонує різні серії промислових сенсорів тиску із загальним дизайном, гарною точністю 0,5% FS і 0,25% FS відповідно до потреб споживача. Для прикладу сенсори MPM-489 (рисунок 2.6) представлені на ринку з кількома виходами аналогового постійного струму 4-20 мА, 1-5 В постійного струму та цифровим RS485 і тому подібне [18].



Рисунок 2.7 – Загальний вигляд сенсора тиску MPM-489

Сенсор тиску MPM-489 розроблено для загальної промисловості. Сенсор містить високостабільний п'єзорезистивний елемент, спеціалізовану схему та високоміцний корпус з нержавіючої сталі, що має інтегровану конструкцію зі стандартизованим виходом. Сенсор тиску орієнтований під різні різьбові з'єднання та має кілька варіантів електричного підключення, що відповідає вимогам до точного вимірювання систем автоматизованого керування.

Клапан електромагнітний KV335 виконаний з нержавіючої сталі, тип - фланцевий, нормально-закритий, застосовується для дистанційного керування потоками робочої середовища: вода, повітря, нафтопродукти, спирти, масла, гази та інші середовища, не агресивні до застосовуваних матеріалів. Штатно комплектується котушкою АС 220В (рисунок 2.8). Можлива поставка з котушкою DC 24 В, АС 24 В, DC 12 В [19].



Рисунок 2.8 Загальний вигляд електромагнітного клапана KV335

Клапан прямого дії не вимагає для спрацювання наявності перепаду тиску і використовується для робочої середовища з максимальною в'язкістю 20 сСт. Час спрацювання і пропускна здатність залежать від перепаду тиску. Подача робочої середовища одностороння, у відповідності з вказівником на корпусі. Установка клапана на трубопроводі - котушкою вверху. Котушка клапана зйомна, з виводом кабелю і гвинтовим зажимом. Управління клапаном здійснюється безперервно, подається робоча напруга на котушку.

Для автоматизації промислових установок очистки води провідними виробниками насосного обладнання розроблена та випущена на ринок спеціальна лінійка насосів для системи зворотного осмосу WTS 2-18 (рисунок 2.9).



Рисунок 2.9 – Загальний вигляд насоса WTS 2-18

Зменшені габаритні розміри дозволяють проводити монтаж в обмежених просторах без втрати напору і продуктивності, а головна якість ЛЕО залишається на високому рівні, завдяки використанню у виробництві тільки матеріалів високої якості та багатостадійному контролю продуктів на всіх етапах виробництва.

До основних характеристик насоса можна віднести [20]:

- продуктивність - 3,5 м<sup>3</sup>/Г;
- висота підйому - 161 м;
- максимальна температура - 70 С<sup>0</sup>;
- потужність - 2200 Вт;
- напруга - 380 В;
- матеріал корпусу - нержавіюча сталь;
- матеріал робочого колеса - нержавіюча сталь.

### 3. РОЗРОБКА МЕТОДУ ОПТИМІЗАЦІЇ РОЗРАХУНКУ НАГРІВАНЬ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ПРИСТРОЮ ПЛАВНОГО ПУСКУ

3.1 Представлення основної ідеї модифікації алгоритму розрахунку струмів, моментів та нагрівання при плавних запусках двигунів

У сучасних регульованих електромеханічних системах якомога частіше застосовують плавний пуск асинхронних двигунів, котрим характерно зменшення пускового струму як наслідок, збільшення терміну служби машини. Незважаючи на те, що в сучасному виробництві пуск двигуна зачасто здійснюється від перетворювача частоти (ПЧ), застосування пристроїв плавного пуску (ППП) досі залишається дешевою альтернативою та допомагає уникнути високих навантажень на мережу, а також надто швидкого запуску. Останнє може призвести до гідравлічних ударів, ривків у механізмі, обриву транспортерних стрічок і тому подібне.

За допомогою ППП забезпечується приведення у відповідність до вимог з експлуатації кількісних значень струмів обмоток електричної машини та моменту обертання ротора протягом пуску. Характерно, що струм обмотки статора двигуна пропорційний напрузі, а момент обертання пропорційний квадрату напруги. Це означає, що в результаті керування напругою двигуна за допомогою електронного ППП в ході процесу пуску регулюється також споживаний пусковий струм і створюваний в двигуні початковий пусковий момент.

Також невід'ємною вимогою забезпечення автоматизованих виробничих процесів є вимога автоматичного відновлення режиму роботи асинхронних електродвигунів, що використовуються в електрообладнанні, після короткочасного порушення електропостачання, яке супроводжується вибігом ротора. Під терміном «вибіг» мається на увазі вихід ротора з режиму роботи при номінальному ковзанні у разі зниження чи відключення напруги.

Якщо сказати коротко фізична картина описується наступним чином, що при тимчасовому зменшенні напруги, яка підводиться в недостатніх межах асинхронні двигуни відповідальних механізмів не відключаються, а одночасно з відновленням напруги на шинах електроустановки двигуни запускаються автоматично, без участі персоналу. Тим самим технологічний процес виробництва не порушується. Автоматичне відновлення роботи електродвигунів при короткочасному порушенні електропостачання прийнято називати самозапуском.

У третьому розділі кваліфікаційної роботи пропонується метод оптимізації розрахунку нагрівань частин активного обсягу великих асинхронних двигунів з використанням пристрою плавного пуску за певних видів навантажувальних характеристик. Розрахунок нагрівань обумовлюється необхідністю визначення ступеня старіння ізоляції та прогнозування зменшення терміну служби електричної установки (машини).

Метод оптимізації розрахунку нагрівань елементів активного об'єму асинхронного двигуна базується на автоматизації обчислення нагрівань при моделюванні процесу самозапуску двигуна після відновлення аварійного зниження напруги мережі  $U$  той же час використання пристрою плавного пуску має на увазі суттєве просідання моментної характеристики двигуна. Дане явище, незважаючи на зниження пускових струмів, явно позначається як на часі запуску двигуна, так і на часі його дозапуску при вибігу ротора відповідно на величині нагрівань частин активного обсягу машини, аж до можливості запуску, що може вивести двигун з ладу і призвести до аварії на відповідальних виробничих об'єктах [20, 21].

Запропоновано комплексну модифікацію алгоритму розрахунку струмів та моментів, а також нагрівання частин активного об'єму асинхронної машини при плавному пуску та автоматизація обробки масиву даних розрахунку на конкретному прикладі асинхронного двигуна.

Короткі замикання в мережах, що викликають зникнення чи зниження напруги, як правило, короткочасні. Через свої специфічні особливості ротори

асинхронних двигунів не встигають зупинитися, що забезпечує продовження технологічного процесу виробництва. Однак із зростанням ковзання ротор загальмовується, що супроводжується зростанням струму в провідниках обмоток статора та ротора, що у свою чергу, може призвести до неприпустимим перегріванням і, як наслідок, швидшому старінню ізоляції.

З цього випливає те, що має місце підвищене навантаження електричного ланцюга живлення. Тобто ланцюг живлення під час пуску двигуна повинен бути розрахований на вище навантаження.

Незважаючи на те, що при використанні ППП у разі аварійної ситуації самозапуск не здійснюється і двигун перед наступним пуском повинен бути зупинений повністю, алгоритм розрахунку нагрівань при пуску з ППП схожий на алгоритм розрахунку нагрівань при самозапуску. Відповідно автоматизація розрахунку пускових нагрівів при плавному пуску може ґрунтуватися на алгоритмі підрахунку нагрівів активних частин машини при дозапуску.

Реалізація плавного пуску асинхронного двигуна розглядається на прикладі високовольтного асинхронного двигуна 5АЗМВ-3150/6000У2,5 у поєднанні з пристроєм тиристорного регулювання напруги.

Вирішення задачі зводиться до наступних етапів [21]:

- модифікація алгоритму розрахунку мінімально можливого пускового струму, забезпечує режим гарантованого пуску, з урахуванням раніше розробленого алгоритму розрахунку необхідних параметрів при самозапуску двигуна;

- автоматизація розрахунку масиву значень пускових струмів та моментів з метою зменшення трудомісткості та часу розрахунку.

### 3.2 Розробка математичної моделі розрахунку часу і нагріву при само запусках

Процедура математичного моделювання має розгалужений характер та складається з кількох блоків та підблоків. Перед розрахунком нагрівів струмопровідних частин двигуна (обмотка статора, стержні та короткозамикаючі кільця ротора) необхідно обчислити час самозапуску. Для цього необхідні наступні вихідні дані [22]:

- $P_{ном}$  - номінальна потужність, кВт;
- $n_{ном}$  – синхронна частота обертання магнітного поля статора, об/хв;
- $J_{дв}$  – динамічний момент інерції ротора,  $кг \times м^2$ ;
- $J_{мех}$  – динамічний момент інерції механізму навантаження,  $кг \times м^2$ ;
- $s$  – ковзання (набір значень);
- $M^*$  – відповідне ковзне значення обертового моменту.

В якості набору значень ковзання обрана наступна числова послідовність:

1; 0,9; 0,8; 0,7; 0,6; 0,5; 0,4; 0,3; 0,2; 0,15; 0,1; 0,05; значення  $S_{кр}$ ,

де  $S_{кр}$  – критичне значення ковзання.

Крім того, необхідно задати статичну залежність моменту опору механізму від ковзання  $M_c(S)$ , а також мінімальне значення надлишкового моменту  $M_{i \min}$ , тобто час відсутності напруги  $t_U = 0$  сек., і дискретність часу відновлення напруги  $t_{відн.}$ , сек. Детальне завдання наведених вище параметрів представлено у довідковій літературі.

Із представлених вихідних даних необхідно виділити наступні величини:

- початкове ( $\alpha_1$ ) та кінцеве ( $\alpha_2$ ) значення відносного зниження напруги

$$\alpha = \frac{U_{п}}{U_{н}},$$

де  $U_{п}$  - величина напруги просідання,  $U_{н}$  – величина номінального значення напруги;

- $M_i$  - значення надлишкового моменту.

Розрахунок часу самозапуску складається із двох основних підблоків. Сене першого полягає у визначенні всіх необхідних для розрахунку часу само запуску величин, другого – в аналізі задоволення основних вимог умовам самозапуску.

Дискретність часу відновлення ( $\Delta t, c$ ) визначає точність розрахунку часу самозапуску. При розрахунку можна вважається, що відрізки  $\alpha_1 \dots \alpha_2$  і  $0 \dots t_{\text{відн}}$  змінюються лінійно згідно із законом  $y = x$ . Шляхом лінійної інтерполяції відрізок  $\alpha_1 \dots \alpha_2$  розбивається на число частин, що відповідає заданій дискретності, при цьому кожному відрізьку часу відповідає значення  $\alpha_i$  [23].

Перетворенням диференціального рівняння зміни моменту з встановлених значень отримана залежність зміни часу вибігу від ковзання:

$$\tau(s) = \frac{2\pi n_{\text{ном}} (J_{\text{дв}} + J_{\text{мех}})}{30} \int_0^1 \frac{ds}{M_i(s)}$$

Із запропонованої залежності, підставляючи  $\tau(s) = t_U=0$ , знаходиться ковзання вибігу  $S_{\text{виб}}$ .

В подальшому, враховуючи квадратичну залежність між напругою та моментом, програма знаходить надлишкові моменти для кожного значення ковзання при всіх наявних за результатами розбиття на відрізьки величин  $\alpha$ , після чого отримані результати зводяться в таблицю (таблиця 3.1).

Аналогічно вираховується мінімальне значення  $\alpha_{\text{min}}$ , у якому фізично можливий запуск/дозапуск асинхронного двигуна.

Надалі відповідно представленому виразу:

$$\tau = kT \int_0^1 \frac{ds}{M_i(s)}$$

обчислюється значення часу пуску для кожного значення  $\alpha$ , при твердженні, що дана величина відносного зниження напруги постійна для всього періоду часу роботи двигуна. Ця формула містить параметри  $k$  (коефіцієнт сталої

часу агрегату) і Т (стала часу електродвигуна, сек), які визначаються за формулами наступним чином:

$$k = 1 + \frac{GD_{\text{мех}}^2}{GD_{\text{дв}}^2} = 1 + \frac{J_{\text{мех}}}{J_{\text{дв}}};$$

$$T = \frac{GD_{\text{дв}}^2 n_{\text{ном}}^2 10^{-3}}{365 P_{\text{ном}}},$$

де

$$J = \frac{GD^2}{4};$$

$GD_{\text{дв/мех}}^2$  – маховий момент двигуна/механізму відповідно,  $\text{кг}\times\text{м}^2$ , J – динамічний момент інерції,  $\text{кг}\times\text{м}^2$ .

Більш детальний опис алгоритму розрахунку часу самозапуску наведено у нище і у додатковій літературі [24, 25].

Таблиця 3.1 - Значення надлишкових моментів Values of excess torque

S	$\alpha_1$ $t_1$	$\alpha_2$ $t_2$	...	$\alpha_n$ $t_n$
$S_1$	$M_{i\ 1.1}$	$M_{i\ 2.1}$	...	$M_{i\ n.1}$
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
$S_{13}$	$M_{i\ 1.13}$	$M_{i\ 2.13}$	...	$M_{i\ n.13}$

Розрахунок нагрівань при пуску проводиться після закінчення визначення всіх відрізків часу та аналогічній процедурі визначення часу самозапуску. Для розрахунку використовуються наступні дані:

- $T_{\text{с/к}}$  – базові нагрівання стержнів/кілець,  $\text{C}^\circ$ ;
- $\nu_1$  – швидкість наростання температури обмотки статора,  $\text{C}^\circ/\text{с}$ ;
- $P_{\text{с/к}}$  – відносні втрати у стержнях/кільцях, що відповідають вищезазначеному набору значень ковзань.

По аналогії з розрахунком часу пуску визначається нагрівання обмотки статора на основі формули:

$$\theta_1 = \alpha^2 v_1 k T \int_0^1 \frac{ds}{M_{i.c.p}(s)} .$$

Нагрів стержнів/кілець ротора обчислюється наступним чином:

$$\theta_{c/k} = \alpha^2 k T_{c/k} \int_0^1 \frac{P_{c/k.c.p}(s) ds}{M_{i.c.p}(s)} .$$

При розрахунку нагрівів при самозапуску виникає складність у частині визначення значень нагрівів обмотки статора, стержнів та короткозамкнутих кілець ротора при зависанні ротора асинхронного двигуна.

Відомо, що мінімальне значення надлишкового моменту  $M_{н/мін}$  - це та мінімальна різниця між значеннями обертового моменту електродвигуна  $M^*$  і моменту опору навантаження  $M_c$ , при якій відбудеться його гарантований пуск/дозапуск. При математичному моделюванні допускається припущення, що при меншому позитивному значенні надлишкового моменту відбудеться «зависання ротора», тобто обертання з постійною кутовою швидкістю відбувається доки напруга обмотки статора не підвищиться до значення, що забезпечує необхідний надлишковий момент і як наслідок, продовження розгону ротора. Реальна фізична картина розгону продовжиться при зниженні кутового прискорення. При негативному зайвому моменті кутове прискорення прийме відповідно негативне значення.

Для прикладу на рисунку 3.1 представлена графічна інтерпретація залежності надлишкового моменту функції ковзання  $M_c(s)$ . Область надлишкового моменту  $M_i$  отримана як функція різниці моменту, що обертає асинхронного двигуна і моменту опору навантаження згідно

$$M_i = M - M_c .$$

Наслідком «зависання ротора» є значне зростання температур струмопровідних частин через тривалий час роботи при ковзанні, якому

відповідає високе значення струму обмотки статора. В даному випадку, згідно [26]:

$$\theta_{1.зав} = \frac{j_1 I_i^* U_{\alpha \text{ ср}} k_t t_{зав}}{198 U_{\text{ном}}},$$

$$\theta_{\text{с/к.зав}} = P_{\text{с/к}i} \frac{\alpha_1^2 + \alpha_2^2}{2} \frac{P_{\text{ном}} t_{зав}}{C_{\text{с/к}} G_{\text{с/к}}}.$$

Тут  $t_p^o$  – розрахункова температура (залежить від класу ізоляції).

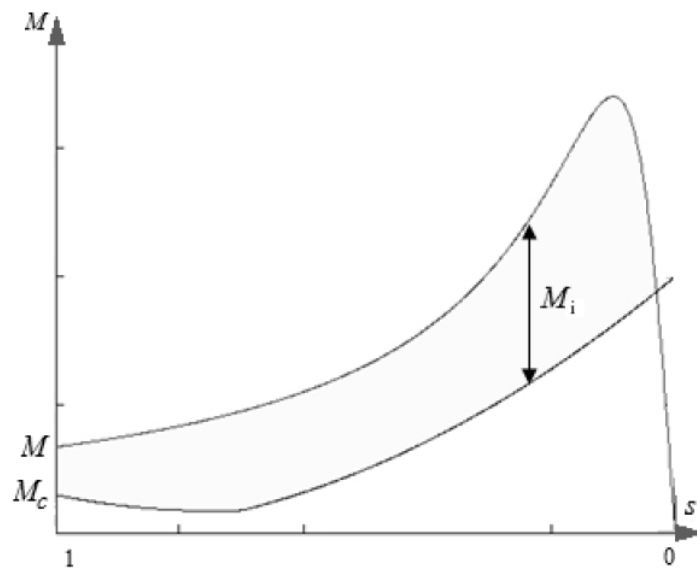


Рисунок 3.1 - Моментні характеристики двигуна та навантажувального механізму  $M$ , від ковзання  $s$ ,

Значення питомої теплоємності використовуваних для виготовлення струмопровідних частин асинхронних двигунів. Нагрів при розгоні від величини критичного ковзання до номінальної величини відповідає  $0,1 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

Принципи реалізації плавного пуску подібні до послідовності аналізу вибігу ротора, розглянутого вище. В даному випадку також забезпечується поступова зміна моменту обертання, що створюється в двигуні.

На відміну від частотно-струмового регулювання пуску та вибігу ротора двигуна з використанням частотного перетворювача, при яких регулюється частота, в даному випадку частота струму обмотки статора залишається постійною і відповідає частоті мережі.

На рисунку 3.2 представлена залежність фазної напруги у функції часу при використанні тиристорного пристрою плавного пуску, де за рахунок зміни величини (значення якої зазначено раніше) змінюється величина напруги на обмотці статора і, як наслідок, величина струму і моменту [27].

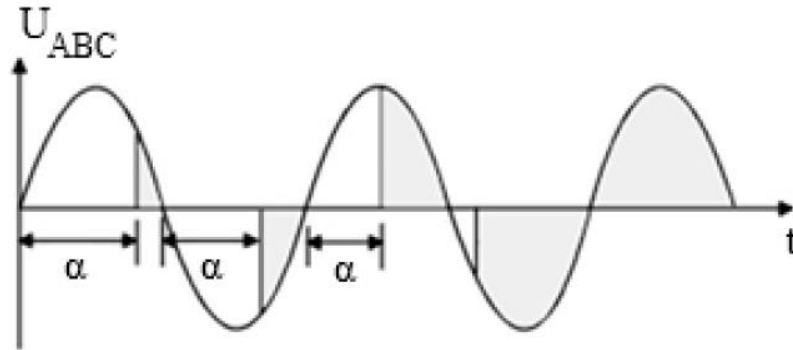


Рисунок 3.2 – Графік залежності фазної напруги від часу

Слід зазначити, що підхід до розрахунку, який використовується в роботі, є спрощеним, оскільки при проведенні електромагнітних розрахунків вважається, що замість "обрізаного" сигналу відбувається відповідне зменшення амплітуди напруги. Однак за рівності середньоквадратичних значень напруг амплітудні величини можуть суттєво відрізнятися.

Для знаходження мінімально допустимої вставки (величини мінімально можливого пускового струму) при пуску, а також підрахунку часу пуску та нагрівання обмотки статора, стержнів і короткого замикання кілець ротора при автоматизованому розрахунку в процесі використання програмного комплексу вводяться ті ж вхідні дані, що й раніше, з тією різницею що:

- виключаються вхідні величини  $U_n, j_1, C_{c/k}, G_{c/k}, t_p^0$ ;
- додатково вводиться величина номінального струму  $I_n$ .

Для значень ковзань наведено лінійку стандартних величин за аналогією з розрахунком самозапуску. Перед початком розрахунку необхідно вивести залежність статичного моменту опору механізму від ковзання  $M_c(s)$ .

Далі необхідно встановити умови пуску машини. Тут вводяться описані

вище величини  $\alpha$  і  $M_{i \min}$  з тією різницею, що для визначення  $\alpha$  величина  $U_{\Pi}$  буде не величиною напруги просідання, а величиною «обрізаної» напруги, що подається під час пуску. Подальший розрахунок автоматизовано.

### 3.3 Дослідження алгоритму роботи та математичне моделювання запусків асинхронного двигуна з використанням пристрою плавного пуску

В даному підрозділі наведено особливості алгоритму роботи програми. Програма створює масив із  $n$  значень величин відносного зниження напруги під час пуску, починаючи від введеної користувачем величини  $\alpha$  до величини  $\alpha = 1$  з дискретністю 0,01. Далі з огляду на квадратичну залежність між напругою та моментом, програма знаходить надлишкові моменти для кожного значення ковзання по всьому діапазоні  $\alpha \dots 1$  для кожного значення  $\alpha_i$ . Після завершення побудови двовимірному масиву значень проводиться перевірка величини надлишкового моменту при  $s = 1$  для введеної величини на виконання умови  $M_{i \alpha, s = 1} \geq M_{i \min}$ . Негативний результат такої перевірки означатиме, що користувач підібрав занадто низьке значення  $\alpha$ , недостатнє для створення необхідного надлишкового моменту і відповідно запуску двигуна, про що програмний комплекс одразу сповістить користувача.

При виконанні заданої умови програмний комплекс починає видаляти із побудованого раніше двовимірному масиву значень надлишкових моментів, зайві набори величин  $\alpha_i$  за наступним алгоритмом. Програмне середовище починає перевіряти виконання умови  $M_{i i, j+1} \geq M_{i \min}$ , де  $i$  – значення  $\alpha_i$ ,  $j$  – значення  $S_j$ . При першому виконанні цієї умови набір надлишкових моментів для поточного  $\alpha_i$  зберігається у масиві. У разі, коли значення надлишкового моменту для чергового ковзання виявиться нижче за величину  $M_{i \min}$ , відбувається перехід до наступного значення  $\alpha$ . Якщо після переходу умова  $M_{i i, j+1} \geq M_{i \min}$  не виконується, то відбувається перехід до

наступного значення  $\alpha$ , а набір надлишкових моментів для залишеного  $\alpha_i$  видаляється з масиву.

Після досягнення величини  $\alpha = 1$  розрахунок іде до номінального значення ковзання. У випадку, якщо в останньому наборі надлишкових моментів існує хоча б одне негативне значення, машина не вийде на номінальну швидкість, про що програма негайно повідомить.

У випадку, якщо на проміжному дискретному значенні  $\alpha$  всі величини надлишкових моментів, що залишилися, вище мінімальної, вважається, що машина запуститься вже на даній величині відносного зниження напруги.

Двовимірний масив, що сформувався, з  $m$  наборів значень надлишкових моментів зводиться до таблиці (таблиця 3.1). Також вираховується мінімальне значення  $\alpha$ , за якого фізично можливий запуск двигуна.

Подальший розрахунок часу запуску та величин нагрівань відбувається за принципом, описаним вище для самозапуску. Крім цього, виходячи з лінійної залежності струму та напруги, проводиться розрахунок величин кратності пускового струму для кожного значення ковзання:

$$I_{\text{ППП}}^* = \alpha I_{\text{прям. пуск}}^*$$

де  $I_{\text{ППП}}^*$  - відносне значення пускового струму з використанням ППП;

$I_{\text{прям. пуск}}^*$  - відносне значення пускового струму при прямому пуску.

Математичне моделювання плавного пуску, як зазначалося вище, здійснено на прикладі асинхронного двигуна 5АЗМВ-3150/6000У2,5 у поєднанні з пристроєм тиристорного регулювання напруги. Графічна інтерпретація моментів та струмів при прямому та плавному пусках показана на рисунку 3.3, 3.4.

Кількісна характеристика значень моментів та струмів наведена у таблиці 3.2. Характеристика навантажувального моменту має вигляд параболи із провалом. Пусковий навантажувальний момент становить 2 кН×м, номінальний – 10 кН×м.

Складається висновок про потрібну мінімальну величину кратності пускового струму двигуна для внесеної користувачем величини відносного зниження напруги при пуску  $\alpha$ , час пуску та нагрівання: пуск двигуна можливий при живленні від ППП при налаштуванні не менше  $4,95 I_H$  (значення струму при пуску  $I_H = 1718$  А, максимально допустимий час пуску має бути не більше 25 с). Нагрів обмотки статора становитиме  $21,7$  °С, нагрівання стержнів –  $139$  °С, кілець –  $53,0$  °С.

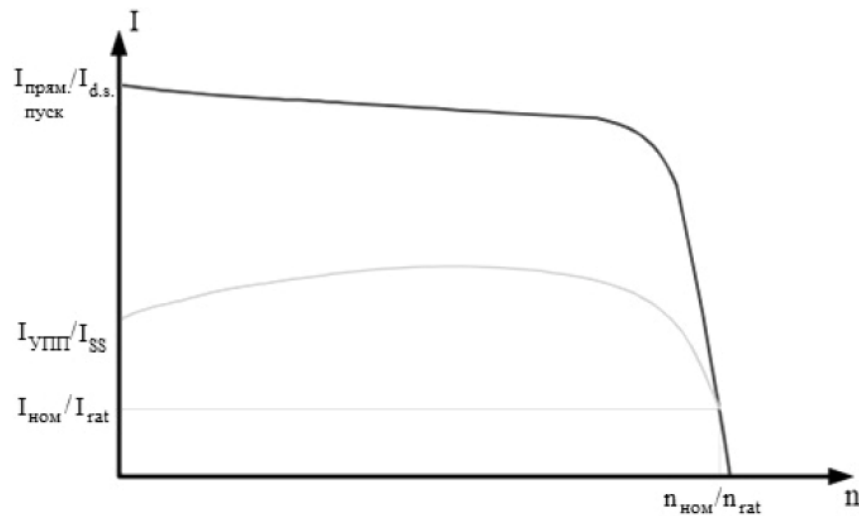


Рисунок 3.3 – Графік залежності відносної величини струму  $I$ , від частоти обертання  $n$ , об./мін

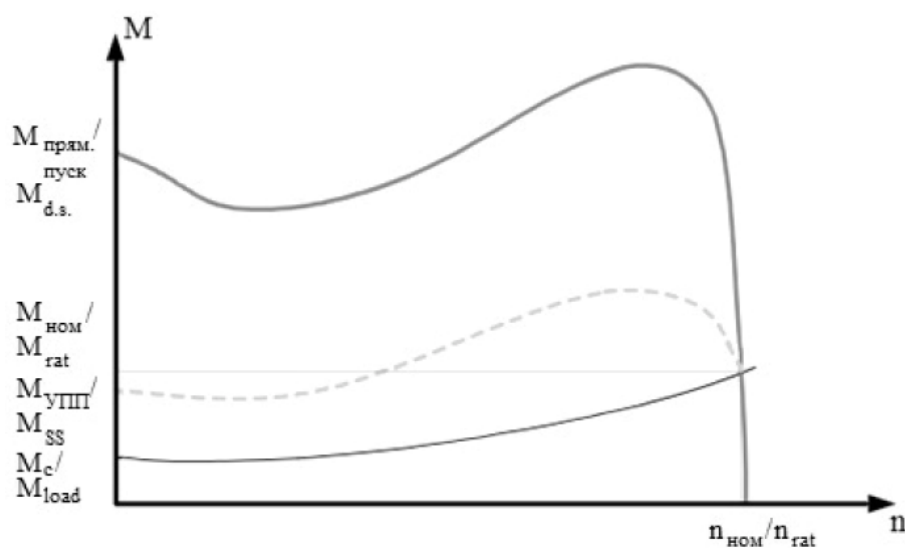


Рисунок 3.4 - Графік залежності відносної величини моменту  $M$ , від частоти обертання  $n$ , об./мін

Таблиця 3.2 – Результати розрахунку

P, кВт			3150		
U, В			6000		
n, об/мін			3000		
I <sub>1</sub> , А			347		
S	I <sub>прям.пуск</sub>	α	I <sub>ППП</sub>	M <sub>прям.пуск</sub>	M <sub>ППП</sub>
1,00	7,06	0,68	4,80	0,80	0,37
0,90	7,00	0,68	4,76	0,80	0,37
0,80	6,90	0,68	4,69	0,80	0,37
0,70	6,80	0,68	4,62	0,82	0,38
0,60	6,75	0,68	4,59	0,84	0,39
0,50	6,65	0,70	4,66	0,87	0,43
0,40	6,56	0,74	4,85	0,95	0,52
0,30	6,50	0,76	4,94	1,10	0,64
0,20	6,15	0,76	4,67	1,30	0,75
0,15	5,85	0,76	4,45	1,45	0,84
0,10	5,50	0,76	4,18	1,60	0,92
0,05	4,75	0,76	3,61	2,00	1,16
S <sub>кр</sub> =0,02	4,10	0,76	3,12	2,40	1,39

На базі алгоритму розрахунку часу самозапуску та нагрівань при ньому розроблена модифікація алгоритму розрахунку струмів при плавному пуску за рахунок зміни напруги з використанням тиристорного пристрою для заданого навантаження. У модифікації відображені особливості електромагнітного розрахунку при постійній частоті струму обмотки статора. У той же час показано універсальність алгоритму розрахунку.

Алгоритм обробки масиву значень пускових струмів та моментів при плавному пуску для заданого навантаження автоматизований та зведений у програмний комплекс, що забезпечує зменшення трудомісткості та часу розрахунку. Одночасно з цим, враховуючи особливості мови програмного середовища, кінцевий користувач ситуативно має можливість віддаленого доступу до розробленого програмного продукту.

## ВИСНОВКИ

У ході виконання кваліфікаційної роботи на тему «Автоматизація промислової установки зворотного осмосу для очистки води» було розроблено та обґрунтовано комплексне рішення з автоматизації технологічного процесу, що дозволяє підвищити ефективність, надійність та економічну доцільність роботи системи водопідготовки. Проведене дослідження показало, що впровадження сучасної системи автоматизації на базі програмованого логічного контролера та SCADA-системи забезпечує цілий ряд переваг у порівнянні з традиційними методами керування.

Головним результатом роботи є розроблена структура АСУ ТП, яка інтегрує всі компоненти установки зворотного осмосу в єдиний керований комплекс. Запропонована архітектура передбачає чітку ієрархію рівнів керування – від польового обладнання до корпоративних систем, що забезпечує гнучкість, масштабованість та зручність експлуатації. Особливу увагу приділено вибору вимірювальних приладів та виконавчих механізмів, обґрунтованому технологічними вимогами та умовами експлуатації. Специфіка процесу зворотного осмосу, яка вимагає високої точності підтримки параметрів, зумовила необхідність застосування точних сенсорів тиску, витрати та якості води, а також насосів з частотним регулюванням для плавного керування продуктивністю.

Розроблений алгоритм функціонування системи реалізує принцип багаторівневої безпеки, що дозволяє запобігати аварійним ситуаціям та захищати дороге обладнання, зокрема мембранні модулі. Алгоритм передбачає автоматичне виконання всіх технологічних операцій – від пуску та виходу на режим до проведення промивок (CIP) та аварійного відключення. Важливим результатом є реалізація адаптивних PID-регуляторів, які забезпечують стійкість роботи установки при змінах якості вхідної води та температури.

Економічне обґрунтування проекту підтверджує його високу ефективність. Розрахунки показують, що основним джерелом економії є зниження енергоспоживання насосів високого тиску за рахунок частотного регулювання (до 25%), скорочення витрат на реагенти завдяки точному дозуванню (15-30%) та значне продовження ресурсу мембран (20-40%) шляхом попередження критичних ситуацій та оптимізації режимів промивки. Це дозволяє компенсувати капітальні витрати на автоматизацію впродовж 2-3 років, а в подальшому забезпечує значне зниження собівартості очищеної води.

Хоча запропонована в роботі система автоматизації є цілісним і завершеним рішенням, існують перспективні напрями для її подальшого вдосконалення. Наступним етапом може стати впровадження елементів штучного інтелекту для прогнозування забруднення мембран на основі аналізу текучих параметрів та даних. Машинне навчання дозволило б не лише реагувати на вже наявні відхилення, але й прогнозувати їх появу, переходячи від профілактичного до предиктивного обслуговування.

Іншим важливим напрямком є глибша інтеграція з системами «розумного» підприємства (Smart Enterprise). Розширення функціоналу MES-рівня дозволило б оптимізувати роботу установки не лише з технологічної, але й з економічної точки зору, враховуючи вартість електроенергії в різний час доби, графіки навантаження виробництва та інші фактори.

Також перспективним є розвиток системи моніторингу в реальному часі з використанням бездротових сенсорних мереж та технологій IoT. Це дозволить зменшити витрати на монтаж та обслуговування кабельних мереж, підвищити гнучкість системи та розширити можливості збору даних для аналітики.

Впровадження технології цифрових двійників (Digital Twin) дозволяє створити віртуальну копію установки, що дасть змогу проводити моделювання різних сценаріїв роботи, оптимізувати алгоритми керування без втручання в реальний процес та ефективніше готувати персонал.

У висновку варто зазначити, що розроблена в дипломній роботі система автоматизації промислової установки зворотного осмосу є сучасним, технологічно досконалим та економічно ефективним рішенням, яке відповідає індустріальним вимогам. Її впровадження дозволить забезпечити стабільну якість очищеної води, мінімізувати операційні витрати та екологічний вплив, а також створить основу для подальшої модернізації та інтеграції в єдиний інформаційний простір підприємства. Проведена робота підтверджує, що автоматизація є ключовим фактором підвищення конкурентоспроможності сучасних промислових підприємств у сфері водопідготовки.

Реалізований метод оптимізації розрахунків нагрівань асинхронних двигунів з використанням пристрою плавного пуску, що дозволяє автоматизувати процес керування виконавчими механізмами промислової установки водопідготовки. Модифікації алгоритму розрахунку струмів, моментів та нагрівання при плавних запусках двигунів оптимізує роботу насоса високого тиску для створення і підтримки оптимального тиску води на вході мембранних модулів, що підвищить їх ресурс.

Проведений аналіз технологічного процесу очистки води, як об'єкта керування та виявлення недоліків існуючих інформаційних, функціональних алгоритмів та інформаційно-вимірювальних пристроїв, що застосовуються при функціонуванні обладнання зворотного осмосу у промислових установка очистки води. Визначено основні контрольовані параметри технологічного процесу водопідготовки.

Обґрунтовано розробку математичної моделі розрахунку часу і нагріву пускових модулів при самозапусках, що показує реальну картину готовності і фізичного стану контрольно-пускових пристроїв, що у свою чергу дало можливість оперативного моніторингу ряду інформативних параметрів з локалізацією за часом та місцем: напруги, струму, опору обмоток, активної потужності, витрат електроенергії.

Запропоноване рішення автоматизації промислової установки зворотного осмосу забезпечує надійну, безперебійну та якісну роботу в процесі водопідготовки під виробничі потреби, що дає можливість контролювати енергозатрати водоочисної установки.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Устаткування мембранної та холодильної техніки. Дослідження очищення води на установці зворотнього осмосу [Текст] : метод, вказівки до проведення науково-дослідної роботи для студ. спец. 8.090220 «Обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів» / Уклад. С.В.Сидоренко. - К.: НТУУ «КПІ», 2010. – 13 с.
2. Vrouwenvelder H. Biofouling of spiral wound membrane systems. PhD thesis Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, 2009.
3. Запольський А.К. Фізико-хімічні основи технології очищення стічних вод /А.К. Запольський, Н.А. Мішкова-Кліменко, І.М. Астрелін. – К.: Лібра, 2000. – 552 с.
4. Baker R. W. Membrane technology and applications. – 2nd ed. – Chichester: John Wiley & Sons, 2004. – 2004.
5. Korniyenko Y., Guliienko S., Lialka M. Mathematical simulation of fouled modules regeneration // Ukrainian Food Journal. – 2015. – Volume 4 – P. 481–493.
6. Korniyenko Y. Mathematical model of dissolving inorganic fouling in spiral wound membrane module / Korniyenko Y. , Guliienko S. // The Advanced Science Journal. – 2014. – issue 4. – p. 47-50.
7. Корнієнко Я.М. Оцінка ефективності відновлення властивостей рулонованих мембранних модулів з використанням гідродинамічної кавітації / Корнієнко Я.М., Гулієнко С.В // Наукові парці ОНАХТ. – 2012. – Випуск 41. - Т.1 - с. 142-147
8. Snitinskiy, V. V., Antonyak, G. L., Bagday, T. V., Bubis, O. J., & Panas, N. J. (2014). Current state of ecological problems of water resources of Ukraine. Science and Technology Journal: Journal of Agrobiolology and Ecology (Ukraine), 4 (1), 9-16.

9. Lototska, O. V., Kondratyuk, V. A., & Panichev, V. O. (2018). Hygienic problems of water supply in Ternopil region. *Environment and health (Ukraine)*, 1(85), 36-40.
10. Кравченко М.В. Метод зворотного осмосу при підготовці води різного призначення: доцільність та шкідливість / М.В.Кравченко // ENVIRONMENT PROTECTION – 2020 : матеріали міжнар. наук.-практ. онлайн конф., присвяченої Всесвітньому дню охорони довкілля, Київ, 5 червня, 2020 року / Київ. нац. ун-т буд-ва і архіт. ; редкол.: П. М. Куліков [та ін.]. - Київ : КНУБА, 2020.
11. Трегуб В.Г. Проектування систем автоматизації: навч. посіб. / Київ : Видавництво «Ліра-К», 2017. 344 с.
12. Трегуб В.Г. Автоматизація об'єктів періодичної дії: підручник. / Київ : Видавництво «Ліра-К», 2019. 136 с.
13. Ельперін І.В., Пупена О.М., Сідлецький В.М., Швед М.М. Автоматизація виробничих процесів: підручник. Київ : Видавництво «Ліра-К», 2015. 378 с.
14. Муратов. В.Г. Метрологія, технологічні вимірювання та прилади: навч. посіб. вид. 3-е Одеса : ОНТУ, 2023. 390 с.
15. Трегуб В.Г. Проектування систем автоматизації: навч. посіб. / Київ : Видавництво «Ліра-К», 2017. 344 с.
16. Трегуб В.Г. Автоматизація об'єктів періодичної дії: підручник. / Київ : Видавництво «Ліра-К», 2019. 136 с.
17. Ельперін І.В., Пупена О.М., Сідлецький В.М., Швед М.М. Автоматизація виробничих процесів: підручник. Київ : Видавництво «Ліра-К», 2015. 378 с.
18. А.І.Панкратов Системи керування електроприводами- Видання 2: Навч. Посібник 2018 р.
19. Мартиненко І.І. та інші. Автоматизація технологічних процесів сільськогосподарського виробництва. -К. : Урожай, 1995.
20. Автоматизація виробничих процесів: Підручник. / І.В Ельперін, О.М. Пупена, В.М. Сідлецький, С.М. Швед. — К. Видавництво Ліра-К, 2015 — 300с.

21. Корчемний М.О., Потапенко М.В. Теоретичні основи автоматики: навч. посібник / М.О. Корчемний, П.Б. Клендий, М.В. Потапенко. – Тернопіль: Навчальна книга – Богдан, 2012. - 304р.
22. Стенцель Й.І., Поркуян О.В. Автоматизація технологічних процесів хімічних виробництв. Підручник. – Луганськ: Вид-во Східноукр. нац. унту, 2010. – 302 с. 10. Валюх О. А., Максимів В. М. Елементи теорії автоматичного керування. – Львів, «Афіша», 2002. – 122 с.
23. Головка В.М.. Теоретичні основи автоматики (курс лекцій). Навч. посібник. – Ніжин: НАУ. 2004. – 104 с. 2. Головка Д.Б.. Автоматика і автоматизація технологічних процесів. –К.: Либідь, 2007. – 232 с.
24. Ладанюк А.П., Трегуб В.Г., Ельперін І.В., Цюцюра В.Д. Автоматизація технологічних процесів і виробництв харчової промисловості: Підручник. – К: Аграрна освіта, 2001. – 224с.
25. Пальчевський Б.О. Автоматизація технологічних процесів. – Львів: Світ, 2007 – 392с. 5. Проць Я.І., Савків В.Б., Шкодзінський О.К., Ляшук О.Л. Автоматизація виробничих процесів. Навчальний посібник для технічних спеціальностей вищих навчальних закладів. - Тернопіль: ТНТУ ім. І.Пулюя, 2011. - 344с.
26. М.М.Дранчук «Проектування систем автоматизації технологічних процесів в нафтовій та газовій промисловості» Навчальний посібник, - Івано-Франківськ, 2003.-941с.
27. М.С. Пушкар Проектування систем автоматизації: навч. посібник / М.С. Пушкар, С.М. Проценко – Д.: Національний гірничий університет, 2013. – 268 с.