

**УДК 681.5.01**

**УКПП**

**№ держреєстрації 0113 U 004134**

**Інв №**

Сумський державний університет  
40007, м.Суми, вул.Римського-Корсакова, 2;  
Тел/факс (0542) 33 41 08/(0542) 33 40 49

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Проректор з наукової роботи

д-р фіз.мат.наук, професор

\_\_\_\_\_ А.М. Черноус

**ЗВІТ**

**ПРО НАУКОВО-ДОСЛІДНУ РОБОТУ**

**БАГАТОВИМІРНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ  
ТЕХНІЧНИМИ І ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ОБ'ЄКТАМИ  
(остаточний)**

Начальник НДЧ

к.ф.-м.н., с.н.с.

\_\_\_\_\_

Д.І. Курбатов

Науковий керівник НДР

к.ф.-м.н., доцент

\_\_\_\_\_

С.В. Соколов

2018

Рукопис закінчено 22 лютого 2018 р.

Результат цієї роботи розглянуто науковою радою СумДУ,  
протокол від 22.02.2018 р. №6

**Список авторів**

Керівник НДР, к.ф.-м.н., доцент	_____ (підпис, дата)	С.В. Соколов (розділи 4, 5)
Виконавці: к.ф.-м.н., доцент	_____ (підпис, дата)	А.В. Павлов (вступ; розділ 1)
асистент	_____ (підпис, дата)	А.О. Панич (розділ 3; висновки )
студент гр. СУ-61 (ЕЛІТ)	_____ (підпис, дата)	О.С. Соколов (реферат; розділ 2)

## Реферат

Звіт про НДР 66 с., 1 ч., 24 рис., 4 джерела

### БАГАТОВИМІРНІ СИСТЕМИ, ТЕХНОЛОГІЧНІ ОБ'ЄКТИ, СИНТЕЗ, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ, ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ, СИСТЕМА КЕРУВАННЯ

Об'єкт дослідження – методи синтезу багатовимірних системи управління технічними і технологічними об'єктами.

Мета роботи – розробка методів синтезу багатовимірних систем управління технічними і технологічними об'єктами.

Методи дослідження – математичне моделювання з використанням теорії автоматичного управління багатовимірними системами та імітаційне моделювання в середовищі Matlab - Simulink з подальшим синтезом систем управління.

Дослідження, аналіз та синтез багатовимірних систем автоматичного управління технічними і технологічними об'єктами є одним з ключових напрямів розвитку сучасної теорії автоматичного управління. Основним засобом цієї роботи є метод змінних стану, в рамках якого можна проводити оцінку керованості та спостерігаємості відповідних об'єктів, без чого неможливо побудувати багатовимірні регулятори з оптимальним співвідношенням відповідних параметрів. Тому в рамках науково-дослідної роботи проводилася розробка та обґрунтування нових способів отримання первинної інформації, щодо керованості та спостерігаємості різноманітних багатовимірних об'єктів технічного та технологічного застосування.

## Зміст

Перелік скорочень, умовних познач, одиниць і термінів .....	6
ВСТУП .....	7
<b>1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ СИНТЕЗУ БАГАТОВИМІРНИХ СИСТЕМ .....</b>	<b>10</b>
1.1 Основні визначення теорії багатовимірних систем і методика їх опису .....	10
1.2 Змінні стану і рівняння лінійної багатовимірної динамічної системи або об'єкта управління .....	12
1.3 Матрична передавальна функція лінійної багатовимірної системи .....	15
1.4 Керованість та спостережуваність багатовимірних систем і об'єктів .....	17
<b>2 ДОСЛІДЖЕННЯ ТА СИНТЕЗ ВОДОПОСТАЧАННЯ КОТЕЛЬНОЇ.....</b>	<b>20</b>
2.1 Аналіз об'єкта керування та вибір методів дослідження багатовимірної системи .....	20
2.2 Коагуляція і освітлення води .....	24
2.3 Флокуляція .....	26
2.4 Фільтрація .....	28
<b>3 КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСАМИ .....</b>	<b>31</b>
3.1 Регулювання температури вихідної води .....	33
3.2 Керування процесами освітлення води.....	34
3.3 Керування процесами фільтрування води .....	36
<b>4 МАТЕМАТИЧНА Й ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ .....</b>	<b>38</b>
4.1 Ідентифікація параметрів математичної моделі об'єкту керування .....	38
4.2 Розрахунок параметрів моделі налаштування контуру стабілізації тиску ...	48
4.3 Моделювання насосного агрегату із стабілізацією тиску.....	51
<b>5 СИНТЕЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ВОДОПІДГОТОВКИ КОТЕЛЬНОЇ .....</b>	<b>61</b>

5.1 Побудова системи керування процесом водопідготовки котельної.....	61
5.2 Організація каналів зв'язку .....	63
Висновки .....	65
Перелік джерел посилання.....	66

## **Перелік скорочень, умовних познач, одиниць і термінів**

АРМ - автоматизоване робоче місце

АСУТП - – автоматизована система управління технологічним процесом

БД - база даних

ВПУ - водопідготовче устаткування

МК - мікроконтролер

МПФ - матрична передавальна функція

ПД – пропорційно – інтегрально - диференційний

ПЛК - програмований логічний контролер

ПЧ - перетворювач частотний

ТАУ –теорія автоматичного управління

ТЕС – теплова електрична станція

ТС – технологічна схема

ХВО – хімічна водоочистка

OSI – Open System Interconnection (взаємодія відкритих систем)

SCADA – Supervisory Control And Data Acquisition (диспетчерське управління збором даних)

## ВСТУП

На протязі двадцятого століття теорія автоматичного управління розвивалася, базуючись на трьох фундаментальних принципах побудови автоматичних систем. Це були принцип управління за відхиленням, принцип управління за збуренням і принцип комбінованого управління. Однак, починаючи з другої половини двадцятого століття, з появою кібернетики, починають інтенсивно розроблятися засоби, які ефективно використовують у своїй роботі властивість запам'ятовування інформації і здатні самостійно проводити досить трудомісткі для людини математичні обчислення. Так з'явилися перші, відносно ефективні, електронні обчислювальні машини, що стали технологічною базою для розробки і удосконалення більш потужних і більш продуктивних комп'ютерів і комп'ютерних систем. З появою комп'ютерів вченим і інженерам стало посильним вирішення таких задач:

- дослідження і аналіз складних нелінійних систем за допомогою обчислювальних методів;
- розробка і реалізація ефективних алгоритмів регулювання, що використовують принцип предикції при формуванні керуючих впливів;
- питання формалізації і дослідження лінійних систем з великою кількістю змінних (багатовимірні системи) за допомогою методу змінних стану.

Окремим класом задач, для яких рівень вирішення підвищився з появою комп'ютерів, стали завдання ідентифікації об'єктів. Вони вирішувалися без застосування чисельних методів, з використанням «ручних» обчислень, але не завжди з достатньою ефективністю і точністю.

Підсумовуючи викладене вище, можна сказати, що основними об'єктами вивчення і дослідження для сучасної теорії автоматичного управління стали нелінійні системи зі складними перехідними процесами і можливістю

самоорганізації їхніх внутрішніх параметрів, дискретні інформаційно-керуючі системи та багатовимірні лінійні системи з великою кількістю вихідних змінних. Окремим класом в сучасній теорії автоматичного управління йдуть завдання точної та ефективної ідентифікації об'єктів системної інженерії.

Основним інструментарієм сучасної теорії автоматичного управління є обчислювальні, аналітичні та чисельні методи, в основі більшої частини яких лежать базові (класичні) підходи до аналізу, синтезу та управління, відомі ще з класичної ТАУ, але які отримали новий розвиток з появою високопродуктивних комп'ютерів, а також зі спрощенням можливості застосування властивості запам'ятовуванні інформації [1].

Аналіз технологічних і функціональних задач системи водопідготовки котельних дозволив сформулювати вимоги до системи керування водопідготовкою котельної, а також побудувати канали керування процесом водопідготовки.

Для забезпечення якості очищення води були розглянуті фактори, що впливають на процеси очищення. Проведена ідентифікація параметрів математичної моделі об'єкту керування та моделювання процесів регулювання в середовищі MatLab Simulink дозволили налаштувати параметри ПІ регулятора, який забезпечує пере регулювання не більше 7%, стійкість до збурень 2%, час відновлення 0,7 с.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в розробленні методів синтезу системи автоматичного управління, яка поєднує в собі відповідні технологічні процеси і споруди для поліпшення якості води при застосуванні вибраних апаратних і програмних засобів типу SCADA– систем.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що за допомогою методів синтезу багатовимірних систем розроблена автоматизована система управління процесом водопідготовки, яка дасть змогу підвищити



ефективність водоочищення за рахунок впровадження відповідних регуляторів на стадіях процесу водоочищення, а також організації безаварійної роботи обладнання в результаті застосування вибраних апаратних і програмних засобів типу SCADA– систем. Також для синтезу багатовимірної системи на прикладі системи управління водопідготовки котельної використані методи програмно-технічного забезпечення автоматизованої ресурсозберігаючої роботи такої системи управління, досліджені фактори забезпечення якості очищення в середовищі Matlab - Simulink.

Наведені методи синтезу багатовимірних систем управління можуть застосовуватися як для технічних, так і для технологічних об'єктів. В даній роботі передбачається, що автоматизація процесу водопідготовки на базі розроблених алгоритмів роботи системи та сформованих каналів зв'язку дасть змогу підвищити ефективність водоочищення за рахунок впровадження відповідних регуляторів на інших стадіях процесу водоочищення, а також організації безаварійної роботи обладнання в результаті застосування вибраних апаратних і програмних засобів типу SCADA– систем.

# 1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ СИНТЕЗУ БАГАТОВИМІРНИХ СИСТЕМ

## 1.1 Основні визначення теорії багатовимірних систем і методика їх опису

Системи автоматичного управління, в яких одночасно можна здійснювати управління декількома величинами, називаються *багатовимірними*. Прикладом такої системи може бути паровий котел, в якому одночасно регулюванню підлягають температура, тиск пари та інші параметри. Якщо елементи багатовимірної системи є лінійними та їх характеристики описуються лінійними диференціальними рівняннями, то такі системи називаються *лінійними багатовимірними системами*. Багатовимірні системи можуть бути стаціонарними або нестаціонарними, в залежності від того, чи є функціями часу параметри відповідних систем.

Щоб зрозуміти загальну ідеологію формалізації багатовимірних систем, розглянемо багатовимірний об'єкт, зміна стану якого, що визначається системою вихідних змінних  $x_1, x_2 \dots x_n$  (змінні стану об'єкта), відбувається під дією ряду вхідних змінних  $u_1, u_2 \dots u_m$  і сімейства збурюючих впливів  $f_1, f_2 \dots f_k$  (див. рис. 1.1).

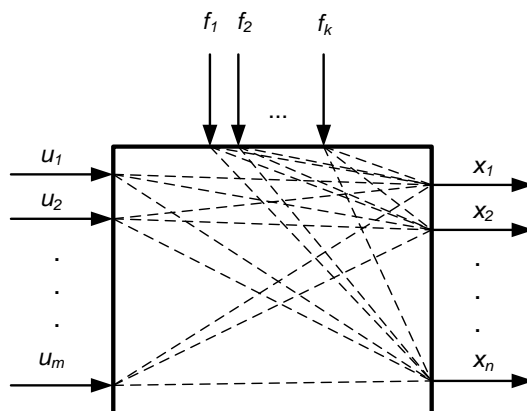


Рисунок 1.1 - Багатовимірний об'єкт і взаємозв'язки між його змінними

У цьому випадку рівняння стану багатовимірного об'єкта в операторній формі запису можна визначити наступним чином:

$$\begin{cases} P_{11}(p)x_1 + \dots + P_{1n}(p)x_n = Q_{11}(p)u_1 + \dots + Q_{1m}(p)u_m + C_{11}(p)f_1 + \dots + C_{1k}(p)f_k; \\ P_{21}(p)x_1 + \dots + P_{2n}(p)x_n = Q_{21}(p)u_1 + \dots + Q_{2m}(p)u_m + C_{21}(p)f_1 + \dots + C_{2k}(p)f_k; \\ \dots \\ P_{n1}(p)x_1 + \dots + P_{nn}(p)x_n = Q_{n1}(p)u_1 + \dots + Q_{nm}(p)u_m + C_{n1}(p)f_1 + \dots + C_{nk}(p)f_k. \end{cases}$$

або

$$\sum_{j=1}^n P_{ij}(p)x_j = \sum_{j=1}^m Q_{ij}(p)u_j + \sum_{j=1}^k C_{ij}(p)f_j, \quad (1.1)$$

де  $P_{ij}(p)$ ,  $Q_{ij}(p)$ ,  $C_{ij}(p)$  - лапласовські поліноми з постійними коефіцієнтами, що забезпечують взаємні зв'язки змінних об'єкта.

Математичне подання цього об'єкта можна зробити більш компактним, якщо перейти до матричної формі запису відповідної системи рівнянь:

$$P(p)X = Q(p)U + C(p)F, \quad (1.2)$$

де  $X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_n \end{bmatrix}$ ;  $U = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \dots \\ u_m \end{bmatrix}$ ;  $f = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \dots \\ f_k \end{bmatrix}$  - вектори змінних стану об'єкта, вхідних

сигналів об'єкта і збурюючих впливів на об'єкт;  $P(p)$ ,  $Q(p)$ ,  $C(p)$  - матриці поліномів зв'язків змінних об'єкта, при цьому



матриці зв'язків змінних будуть матрицями постійних коефіцієнтів без поліноміальних форм:

$$X' = AX + BU + F, \quad (1.4)$$

де  $X$  и  $X'$ - матриці-вектори розмірностями  $n \times 1$  з параметрами (координатами) лінійного багатовимірного об'єкта або динамічної системи (вектор параметрів або координат об'єкту або системи), а також з похідними відповідних параметрів;  $U$  - матриця-вектор розмірності  $m \times 1$  з керуючими впливами (вектор керуючих впливів);  $F$  - матриця-вектор розмірності  $n \times 1$  зі збурюючими впливами (вектор збурюючих впливів);  $A$  - матриця розмірності  $n \times n$ , складена з відповідних коефіцієнтів системи рівнянь і звана матрицею стану;  $B$  - матриця розмірності  $n \times m$ , складена з відповідних коефіцієнтів системи рівнянь і звана матрицею управління.

У контексті сказаного вище має сенс ввести визначення стану багатовимірної динамічної системи або об'єкта. *Стан багатовимірної динамічної системи або об'єкта* - це сукупність фізичних змінних  $x_1(t)$ ,  $x_2(t)$  ...  $x_n(t)$ , що характеризують поведінку системи або об'єкта в майбутньому за умови, що відомі її початковий стан та прикладені впливи.

Всі або тільки деякі параметри стану для використання в управлінні повинні або можуть бути виміряні приладами спеціальної вимірювальної системи. Саме тому для повноцінного опису лінійної багатовимірної динамічної системи або багатовимірного об'єкта, як об'єкта управління, рівняння стану (1.4) має бути доповнене рівнянням, що зв'язує змінні стану  $x_i(t)$  з вихідними змінними вимірювальної системи  $u_i(t)$ . Ці вихідні змінні в загальному випадку можна виразити, як лінійну комбінацію параметрів стану з деякими вагами.

Зв'язок між ними можна виразити відповідною системою лінійних алгебраїчних рівнянь:

$$y_i = \sum_{j=1}^n c_{ij} x_j, \quad i = 1, 2 \dots p. \quad (1.5)$$

У векторно-матричній формі рівняння (1.5) можна записати в такий спосіб

$$Y = CX. \quad (1.6)$$

Матрицю-стовпець  $Y = | y_1 \ y_2 \ \dots \ y_p |^T$  називають вихідним вектором або вектором спостереження і, по суті, він являє собою набір лінійних комбінацій змінних стану об'єкта, які можуть бути виміряні, а матриця  $C$  розмірності  $p \times n$  називається матрицею виходу або матрицею спостереження.

Підсумовуючи сказане вище, можна резюмувати наступне: будь-який лінійний багатовимірний об'єкт в рамках методу змінних стану найзручніше описувати матрично-векторним рівнянням (1.4), яке містить в собі інформацію не тільки про його вихідні змінні  $x_i(t)$  (змінні стану), а й про можливі вхідні впливи. До вхідних впливів або сигналів багатовимірного об'єкта можна віднести: керуючий вплив  $u_i(t)$ ; зовнішні збурюючі впливи  $f_i(t)$ .

Однак описуваний об'єкт може бути об'єктом управління тільки після того, як інформація про його стан (про значення змінних стану об'єкта  $x_i(t)$ ) буде інтерпретована спеціальною вимірювальною системою в набір сигналів  $y_i(t)$ , придатний для формування на їх основі сімейства нових керуючих впливів  $u_i(t)$  (див. рис. 1.2) через спеціальний керуючий пристрій. Об'єктом управління може бути і багатовимірна система, однак вона повинна бути попередньо спрощена до рівня окремого багатовимірного об'єкта, в якому будуть забезпечуватися

перелічені вище взаємні відповідності всіх перерахованих вище змінних  $x_i(t), u_i(t), f_i(t), y_i(t)$ .

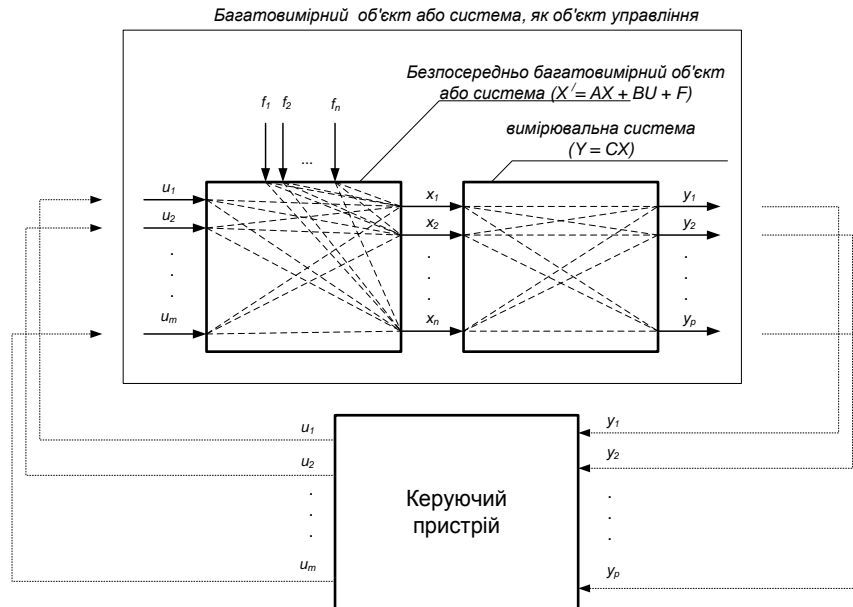


Рисунок 1.2 - Взаємозв'язки між змінними багатовимірною об'єкта управління

### 1.3 Матрична передавальна функція лінійної багатовимірної системи

В рамках класичної теорії автоматичного управління часте використання передавальної функції пов'язане з тим, що вона є найбільш компактною формою подання передавальних і динамічних властивостей динамічних об'єктів або систем. Підхід на основі передавальної функції до вирішення основних завдань теорії управління дозволяє виробляти більш глибоку систематизацію різних аналітичних аспектів, пов'язаних з описом або синтезом багатовимірних систем автоматичного управління. Прийемо за основу аналогічний підхід при роботі з багатовимірними динамічними системами або об'єктами, задавши форму

матричної передавальної функції, як матричного оператора перетворення вектора вхідних впливів у вектор вихідних сигналів.

Якщо розглянути багатовимірну систему або об'єкт з урахуванням перетворення його вхідних змінних в змінні стану, що підлягають подальшому перетворенню вимірювальною системою, то можна використовувати матрично-векторні вирази (1.4) і (1.6) для повного опису відповідних передавальних властивостей. Застосувавши до відповідних виразів перетворення Лапласа, можна записати відповідну систему рівнянь:

$$\begin{cases} pX(p) = AX(p) + X(0) + BU(p) + F(p); \\ Y(p) = CX(p). \end{cases} \quad (1.7)$$

Оскільки в теорії автоматичного управління системи прийнято розглядати при нульових початкових умовах, типових впливах в рамках окремих каналів управління відповідно до принципу суперпозиції, то система рівнянь (1.7) легко може бути приведена до наступної системи рівнянь:

$$\begin{cases} pX(p) = AX(p) + BU(p); \\ Y(p) = CX(p). \end{cases} \quad (1.8)$$

Розв'язуючи систему рівнянь (1.8), встановимо зв'язок між вектором виходу відповідної вимірювальної системи  $Y$  і вектором входу  $U$  багатовимірної системи або об'єкта (див. рис. 1.2), визначивши тим самим матричний оператор, що характеризує передавальні властивості майбутнього об'єкта управління по каналу керуючого впливу. В подальшому даний оператор матиме назву матричної передавальної функції (МПФ) багатовимірного об'єкта управління і визначатися, як добуток основної матриці-вектора вихідних сигналів і оберненої матриці-вектора вхідних впливів:



$$\begin{aligned}
 Y(p) &= C(pE - A)^{-1}BU(p) ; \\
 W(p) &= Y(p)U^{-1}(p) = C(pE - A)^{-1}B,
 \end{aligned}
 \tag{1.9}$$

де  $E$  – одинична матриця відповідної розмірності.

#### 1.4 Керованість та спостережуваність багатовимірних систем і об'єктів

Керувати станом системи або об'єкта  $X$  можна змінюючи вектор  $U$ , а спостерігати за її станом можна, спостерігаючи за вектором виходу вимірювальної системи  $Y$ . Надалі всі багатовимірні системи або багатовимірні об'єкти, які будемо формалізувати в рамках даної теорії, будемо називати узагальненим поняттям *система*, для лаконічності.

Система називається *керованою*, якщо вона може бути переведена з довільного початкового стану  $\vec{x}(t_0)$  в будь-який інший бажаний стан  $\vec{x}(t_1)$  за кінцевий інтервал часу  $T = t_1 - t_0$  шляхом прикладання кусочно-неперервного вхідного впливу  $\vec{u}(t)$ . Іншими словами: керованість системи означає, що вона має достатню кількість вхідних керуючих змінних  $u_i(t)$  для однозначного переходу в будь-який інший кінцево-визначений стан її вихідних змінних  $x_i(t)$ .

Оцінити, наскільки багатовимірна система може бути керованою, можливо по матриці керованості відповідної системи, заданої таким чином:

$$Q_y = |B \quad AB \quad \dots \quad A^{n-1}B|, \tag{1.10}$$

де  $n$  - порядок досліджуваної системи, яка підлягає керуванню.

Таким чином, система буде керованою, якщо ранг матриці управління системи відповідає її порядку, тобто якщо буде виконуватися така умова:

$$\text{rang } Q_y = n. \quad (1.11)$$

Керованість вимагає, щоб кожний стан системи був чутливий до дії її вхідних керуючих впливів. Інше поняття – *спостережуваність системи*, вимагає, щоб кожний стан системи впливав на кожен сигнал виходу відповідної вимірювальної системи. Тобто спостережуваність системи дає відповідь на питання: чи можна, оцінюючи показання виходу вимірювальної системи  $y_i(t)$  і знаючи значення керуючого входу системи  $u_i(t)$ , однозначно володіти відомостями про безпосередній стан системи  $x_i(t)$  в будь-який момент часу.

Систему називають *спостережуваною*, якщо за даними вимірювання або спостереження векторів  $\vec{u}(t)$  і  $\vec{y}(t)$  на кінцевому інтервалі часу  $t_0 \leq t \leq t_1$  можливо однозначно визначити початковий стан системи  $\vec{x}(t_0)$ . При цьому систему називають повністю спостережуваною, якщо спостережувані всі її стани в будь-який момент часу.

Таким чином, система спостережувана, якщо всі її стани можливо безпосередньо або опосередковано визначити за вихідним вектором вимірювальної системи з урахуванням керуючих впливів. Неспостережувана система не може бути ідентифікована в просторі станів, оскільки неможлива ідентифікація параметрів, що відносяться до неспостережуваних станів.

Оцінити, наскільки багатовимірною системою може бути спостережуваною, можливо за матрицею спостережуваності відповідної системи, яка задана в такий спосіб:

$$R = |C^T \quad A^T C^T \quad \dots \quad (A^T)^{n-1} C^T|, \quad (1.12)$$

де  $n$  - порядок багатовимірної системи, що підлягає спостереженню.

Система буде повністю спостережуваною, якщо ранг матриці спостереження системи відповідає її порядку, тобто якщо буде виконуватися така умова:

$$\text{rang } R = n. \quad (1.13)$$

Критерії керованості та спостережуваності відповідно до виразів (1.10) - (1.13) аналогічні, що дозволяє зробити висновки про їх дуальність і ввести поняття *багатовимірної системи, дуальної до досліджуваної*. Назвемо дві системи  $S$  і  $S^*$  дуальними одна до одної, якщо їх можна описати відповідно рівняннями:

$$S: \begin{cases} X' = AX + BU; \\ Y = CX; \end{cases} \quad (1.14)$$

$$S^*: \begin{cases} Z' = A^T Z + C^T U; \\ L = B^T Z. \end{cases} \quad (1.15)$$

З виразів (1.10) - (1.15) випливає, що якщо система  $S$  в якийсь момент часу спостережувана, то дуальна до неї система  $S^*$  буде спостережувана в цей момент часу і навпаки. Таким чином, спостережуваність однієї з систем можна перевірити аналізом керованості дуальної до неї системи [1].

## **2 ДОСЛІДЖЕННЯ ТА СИНТЕЗ ВОДОПОСТАЧАННЯ КОТЕЛЬНОЇ**

### **2.1 Аналіз об'єкта керування та вибір методів дослідження багатовимірної системи**

Використання методу синтезу багатовимірних систем управління технічними і технологічними об'єктами наведемо на прикладі синтезу котельні (технологічного об'єкту) в ТЕС.

Устаткування сучасних ТЕС експлуатується при високих теплових навантаженнях, що вимагає жорсткого обмеження товщини відкладень на поверхнях нагріву за умовами температурного режиму їх металу протягом робочої компанії. Такі відкладення утворюються з домішок, що надходять в цикли електростанцій, в тому числі і з додатковою водою, тому забезпечення високої якості водних теплоносіїв електростанції є найважливішим завданням. Використання водного теплоносія високої якості спрощує також рішення задач отримання чистого пара, мінімізації швидкостей корозії конструктивних матеріалів котлів, турбін і устаткування конденсатно - живильного тракту [2].

Для задоволення різноманітних вимог до якості води, споживаної при виробленні електричної і теплової енергії, виникає необхідність її спеціальної фізико-хімічної обробки. Підготовка води здійснюється в спеціальному підрозділі, яке називається «хімводоочищення» (ХВО). За ним закріплено завдання організації та контролю за водно-хімічним режимом всіх груп обладнання [3].

Хімічно підготовлена вода є вихідною сировиною, яке після належної обробки (очищення) використовується для наступних цілей:

- в якості вихідної речовини для отримання пара в котлах, парогенераторах, випарювачах, пароперетворювачах;
- для конденсації відпрацьованої в парових турбінах пара;

- для охолодження різних апаратів і агрегатів станції;
- в якості теплоносія в теплових мережах.

Одночасно з очищенням природної води на ТЕС необхідно вирішувати комплексно питання, пов'язані з утилізацією різними методами стічних вод, що утворюються при цьому. Таке рішення є мірою захисту від забруднення природних джерел питного та промислового водопостачання.

Живильна вода, що подається в котли, парогенератори або реактори для заміщення води, що випаровується в цих агрегатах, являє собою суміш турбінного і зворотного конденсату, додаткової води, а також конденсату регенеративних підігрівачів.

Поєднання відповідних технологічних процесів і споруд становить технологічну схему (ТС) поліпшення якості води. ТС, що використовуються в практиці водопідготовки, класифікуються наступним чином: реагентні і безреагентні; за ефектом освітлення; по числу технологічних процесів і числу ступенів кожного з них; напірні і безнапірні.

ТС розрізняються за розмірами водоочисних споруд і умов їх експлуатації. Процеси обробки води із застосуванням реагентів протікають інтенсивніше і значно ефективніше. Так, для осадження основної маси зважених речовин з використанням реагентів необхідно 24 год., а без реагентів - кілька діб. З використанням реагентів фільтрування здійснюється зі швидкістю 5-12 м<sup>3</sup>/ год. і більше, а без реагентів - 0,1-0,3 м<sup>3</sup>/ год.

Водоочисні споруди для обробки води із застосуванням реагентів значно менше за обсягом, компактніше і дешевше, але складніше в експлуатації, ніж споруди безреагентної схеми.

В результаті хімічної обробки природних вод, що здійснюється на водопідготовчому устаткуванні (ВПУ), можуть відбуватися такі основні зміни їх складу:

- 1) освітлення води;
- 2) пом'якшення води;
- 3) зниження лужності води;
- 4) зменшення вмісту солі води;
- 5) повне знесолення води;
- 6) дегазація води.

Схеми обробки води, необхідні для здійснення перерахованих змін її складу, можуть включати різні процеси, які зводяться до наступних трьох основних груп:

- 1) методи осадження;
- 2) механічне фільтрування води;
- 3) іонообмінне фільтрування води.

Застосування ТС ВПУ зазвичай передбачає комбінування різних методів обробки води [4].

На рис. 2.1 представлені можливі схеми комбінованих ВПУ шляхом застосування зазначених трьох категорій процесів обробки води. У цих схемах представлені тільки основні апарати, без допоміжного обладнання, а також не вказані фільтри другого і третього ступеня.

Іонообмінне фільтрування є обов'язковою кінцевою стадією обробки води при всіх можливих варіантах схем і здійснюється у вигляді:

Na - катіонування, H-Na- катіонування і H-OH - іонування води.

Освітлювач 2 передбачає два основні варіанти його використання:

1) освітлення води, коли в ньому здійснюються процеси коагуляції та відстоювання води і 2) пом'якшення води, коли крім коагуляції, в ньому проводиться вапнування, а також одночасно з вапнуванням магнезіальне знекремнювання води.

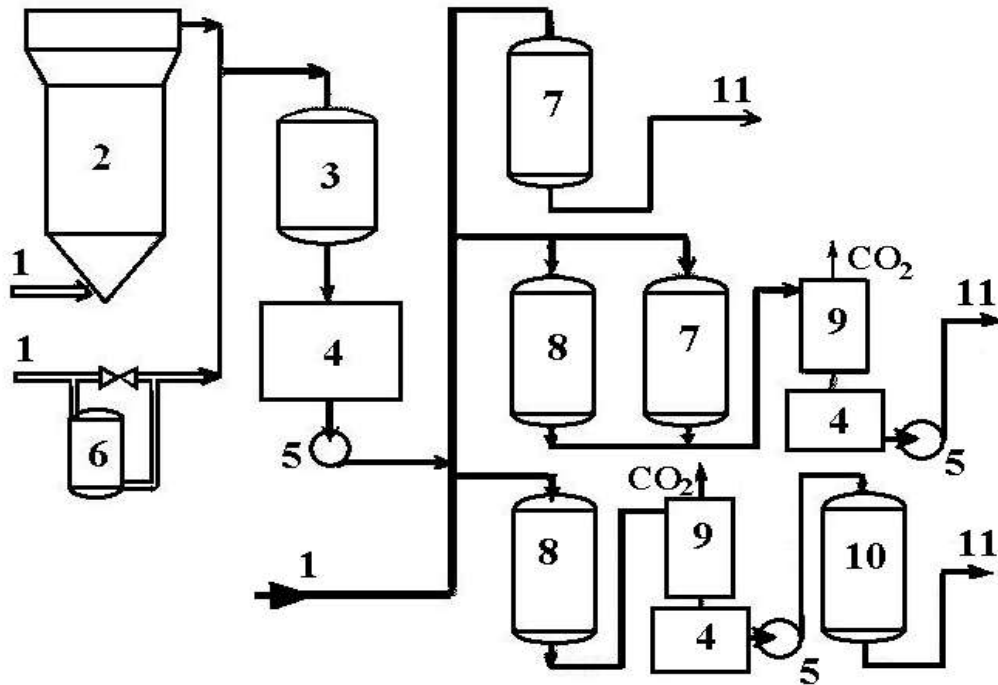


Рисунок 2.1 – Схема водопідготовчих установок:

1 – сира вода; 2 – освітлювач; 3 – механічний фільтр; 4 – проміжний бак; 5 – насос; 6 – дозатор коагулянту; 7 – Na – катіонітний фільтр; 8 – H – катіонітний фільтр; 9 – декарбонізатор; 10 – OH – аніонітний фільтр; 11 – оброблена вода

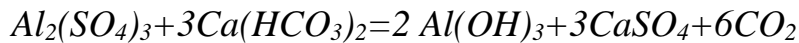
Вибір методу обробки води, складання загальної схеми технологічного процесу при застосуванні різних методів, визначення вимог, що пред'являються до якості її, істотно залежать від складу вод, надходять, типу електростанції, параметрів її, застосовуваного основного обладнання (парових котлів, турбін), системи теплофікації та гарячого водопостачання. При застосуванні термічних методів обробки води економічність їх залежить також від того, як включена знесолювальна установка в схему станції, а також від характеристик і параметрів обладнання.

Сучасні ТС водопідготовки розробляються на основі поетапної очищення, що дає можливість підвищити ефективність кожного етапу.

## 2.2 Коагуляція і освітлення води

Для звільнення води від грубодисперсних і колоїдних домішок застосовують коагуляцію. В якості реагентів для коагуляції (коагулянтів) використовують сірчаноокислий алюміній (глинозем), сірчаноокисле залізо (залізний купорос), хлорне залізо і сірчаноокисле оксидне залізо.

При додаванні до води сірчаноокислого алюмінію відбувається його гідроліз з утворенням важкорозчинних гідроксидів алюмінію, які сприяють злипанню колоїдних частинок, і появи в об'ємі води пластівчастої великої за розмірами зависі. Присутність у воді, що надходить, бікарбонатів, призводить до реакції, яку в загальному вигляді можна виразити рівнянням:



Залишковий вміст бікарбонатів в коагульованій воді бажано мати близько 0,5, але не менше 0,3 мг-екв/л.

Як видно з наведеної реакції, в воді після коагуляції зростає концентрація сульфатів, відповідно зменшується лужність (приблизно на величину дози коагулянту) і збільшується концентрація вуглекислоти.

Проведення процесу коагуляції сірчано – кислим алюмінієм ефективно при значеннях рН середовища 5,5–7,5.

Залізний купорос ( $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ ) застосовується при коагуляції, що суміщається з вапнуванням.

Коагуляцію води проводять в спеціальних апаратах освітлювачах, функціонально - технологічна схема якої приведена на рис. 2.2.

Оскільки процес коагуляції залежить від цілого ряду чинників, для кожного типу води необхідно проводити пробну коагуляцію для визначення оптимальних умов проведення процесу. При налагодженні для всіх гідрохімічних режимів



водойми (паводок, зима і ін.) встановлюються оптимальні дози реагенту, рН, температури середовища та ін.

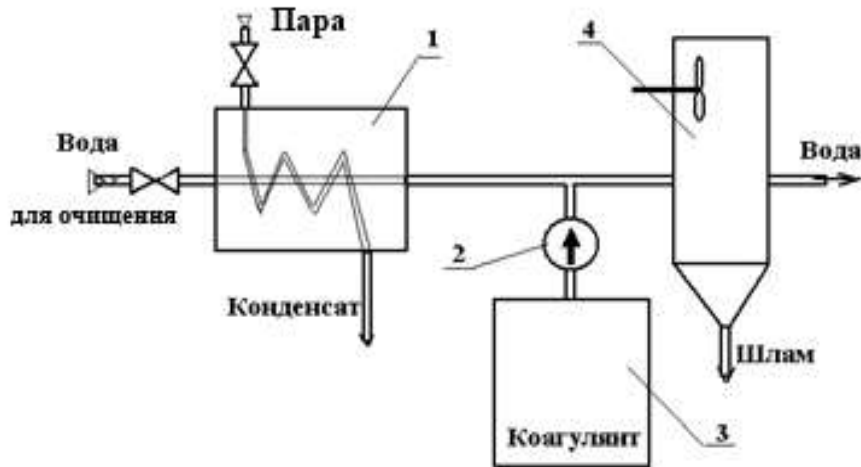


Рисунок 2.2 – Схема підігріву і освітлення води, що надходить:

1 - підігрівач, 2 - насос, 3 - ємність с коагулянт, 4 - освітлювач

При коагуляції води в освітлювачі, крім оптимального значення температури  $25\text{--}30^{\circ}\text{C}$ , має суворо дотримуватися її сталість (допустимі коливання  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  в годину). Мінливість температури порушує зважений шар осаду, що веде до підвищення каламутності освітленої води. Щоб виключити порушення в роботі освітлювача, в ТС водопідготовки використовують підігрів води.

Дотримання оптимальних умов коагуляції має забезпечувати достатню зниження окислюваності води і її освітлення. Орієнтовно дозу сірчанокислового алюмінію приймають рівною  $0,12\text{ мг} - \text{екв. на } 1\text{ мг } \text{O}_2\text{ окислюваності}$ , що видаляється. Зазвичай доза коагулянту укладається в межах  $0,5\text{--}1,2\text{ мг екв/л}$ :

менша - для вод, що містять зависі до  $100\text{ мг / л}$  при невеликій окислюваності води що підлягає очищенню; велика – для вод із перманганатною

окислюваністю 15 мг/л  $O_2$  і вище, а також в період паводку і для вод, що погано коагулюються.

Погана коагульованість характерна для вод, забруднених промисловими або побутовими стоками. Тоді дозу коагулянту підвищують до 1.5 мг екв/л.

### **2.3 Флокуляція**

Друга фаза коагуляції - ортокінетична, на відміну від першої, протікає значно довше (до 60 хв і більше) і полягає в склеюванні і формуванні великих щільних пластівців. Це формування забезпечується створенням оптимальних умов для подальшого збільшення первинних агрегатів шляхом перемішування оброблюваної води в спеціальних камерах утворення пластівців, в результаті якого відбувається контактування первинних дрібних агрегатів. На цей процес істотний вплив роблять умови перемішування. З одного боку, інтенсивність перемішування повинна забезпечувати максимально можливе контактування окремих агрегатів між собою, а з іншого - вона не повинна викликати руйнування пластівців, що утворюються.

На розміри пластівців, що утворюються в процесі повільного перемішування оброблюваної води також впливає його тривалість, сольовий склад води, природа домішок (колоїдні або дисперговані) і сили адгезії, які утримують частинки домішок зв'язками між собою. Укрупнення пластівців, що утворюються в процесі гідролізу коагулянту, відбувається поступово протягом деякого часу, який може змінюватись в межах 6 – 30 хв і більше.

У механічних камерах утворення пластівців (флокуляторах) для завершення процесу коагулювання її домішок механічними пропелерними або лопатевими мішалками здійснюється плавне перемішування води. Флокулятори зазвичай вбудовують в горизонтальні відстійники. При реагентному пом'якшенні

вони розраховуються на час перебування в них води 30 – 60 хв. Швидкість обертання мішалок приймають 0,3 – 0,55 м/с, в залежності від якості вихідної води.

Дозування флокулянтів, наприклад поліакриламід (ПАА), збільшує ефект освітлення води і продуктивність коагуляційної установки. Зазвичай доза ПАА складає 0,1 – 1 мг/л оброблюваної води, причому меншій дозі відповідає менша каламутність води. Поліакриламід дозують в оброблювану воду у вигляді сильно розбавлених розчинів концентрами 0,1%, забезпечуючи при цьому добре перемішування розчину з оброблюваною водою (рис. 2.3).

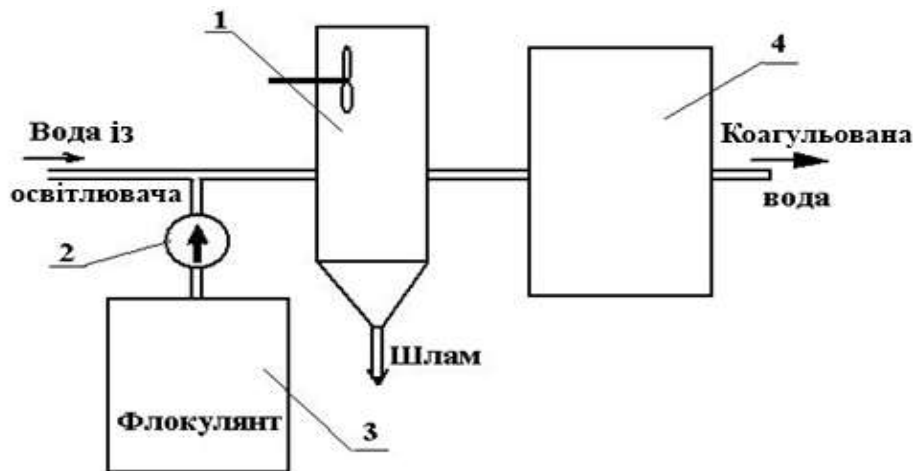


Рисунок 2.3 – Схема флокуляції і освітлення вихідної води:

1 – освітлювач, 2 – насос, 3 – ємність с флокулянт, 4 – резервуар з коагульованою водою

Перевагами флокулятора, в порівнянні з камерами гідравлічного типу є невеликі втрати тиску, конструктивна простота, оптимізація процесу утворення пластівців адекватно якості оброблюваної води.

До числа недоліків флокуляторів слід віднести додаткові витрати електроенергії, необхідність використання деталей, до матеріалів яких пред'являються високі вимоги, що здорожує спорудження в цілому.

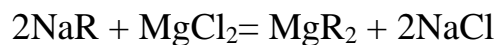
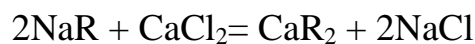
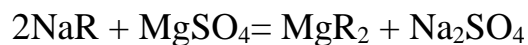
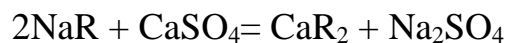
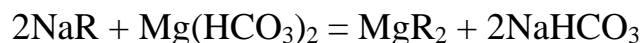
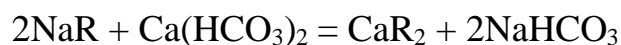
## 2.4 Фільтрація

У більшості ТС водопідготовки завершальним процесом є фільтрування, в ході якого з води витягають не тільки дисперсії, але і колоїди. Суть методу полягає в фільтруванні оброблюваної води, яка містить домішки, через фільтруючий матеріал. Цей матеріал проникний для рідини і непроникний для твердих частинок. При цьому процес супроводжується значними витратами енергії. Однак, допускати великих втрат напору в техніці водоочищення можна лише при обробці невеликих кількостей води. Це визначає місце фільтрувальних споруд в ТС, тобто в більшості випадків фільтрування є завершальним етапом обробки води і проводиться після її попереднього освітлення у відстійниках, флотатора або освітлювачах.

В результаті електролітичної дисоціації молекули, що знаходяться у водному розчині, розпадаються на позитивно і негативно заряджені іони - катіони і аніони.

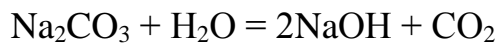
При Na – катіонуванні, розчинені у воді солі кальцію (Ca) і магнію (Mg) при фільтрації через катіонітовий матеріал (NaR) обмінюють катіони  $\text{Ca}^{2+}$  і  $\text{Mg}^{2+}$  на катіони  $\text{Na}^+$ . У підсумку виходять тільки натрієві солі – які володіють великим ступенем розчинності.

Зміна сольового складу води відбувається за такими формулами:



**R** – умовно показана складна формула катіонітового матеріалу.

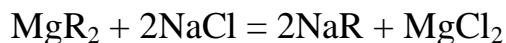
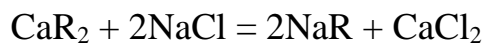
В подальшому в воді відбувається розкладання бікарбонатів натрію:



Катіонітовим матеріалом, що заповнює фільтр, є сульфоугля.

Ємність катіонітового матеріалу є межа його обмінній здібності, після чого витрачені катіони необхідно відновлювати регенерацією.

Регенерація катіонітового матеріалу проводиться 6 ÷ 8% розчином кухонної солі, що пропускається через нього, в результаті регенерації дію сульфоугля відновлюється. Реакції йдуть по рівняннях:



Концентровані розчини хлоридів кальцію і магнію, а також надлишок солоного розчину викидаються в дренаж. Характерною особливістю Na - катіонування є відсутність солей, що випадають в осадок. Тому не дивлячись на те що жорсткість другого ступеня доводять до 0,02 мг-екв/кг, лужність пом'якшеної води залишається рівною карбонатній жорсткості вихідної води.

Їдкий натрій (NaOH), що утворюється при розкладанні NaHCO<sub>3</sub> дає спінювання води і може викликати корозію металу котла, а вуглекислота, що залишається в конденсаті, - корозію конденсатопроводів. Але, оскільки відносна лужність виходить менше 20%, то вона не потребує нейтралізації.

Корпус фільтра розрахований на робочий тиск 4 – 6 атм. У нижній його частині розташовано дренажний пристрій для рівномірного розподілу води, проходить по перерізу фільтру. Дренажний пристрій закріплено в бетонній подушці і складається з колектора і системи труб.

ТС фільтрування показана на рис.2.4.

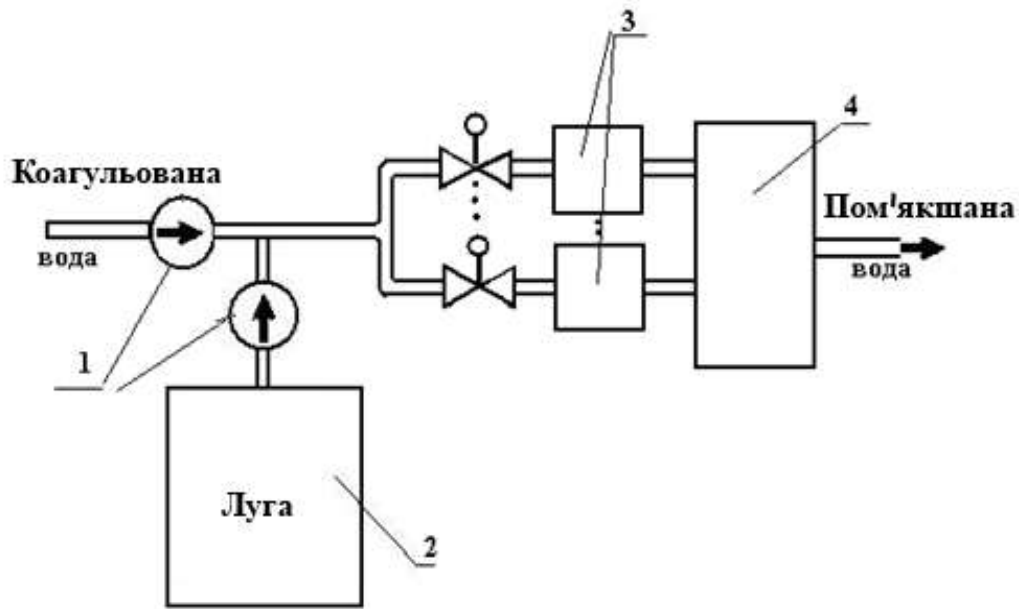


Рисунок 2.4 – Схема фільтрації води:

1 – насос, 2 – ємність з лугою, 3 – фільтри, 4 – резервуар із пом'якшеною водою

Якість обробки води фільтруванням залежить від часу захисної дії завантаження і часу, протягом якого досягається гранична втрата напору. Співвідношення між тривалістю захисної дії завантаження і часу, протягом якого досягається гранична втрата напору, можуть бути різні. Тому основне завдання організації фільтруючих завантажень полягає в тому, щоб, виходячи з заданого співвідношення, розрахувати швидкість фільтрації, що забезпечує достатню технічну надійність і економічність роботи фільтрів. Такий оптимальний режим роботи фільтрувального апарату, може бути реалізований на основі адаптивного керування.

### 3 КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСАМИ

Сучасна багаторівнева багатовимірна система управління передбачає використання *на нижньому* рівні керування програмованих логічних контролерів (ПЛК), що реалізують функції збору і обробки інформації в безпосередній близькості від об'єкта керування. На *верхньому* рівні ведеться аналіз роботи обладнання і приймаються рішення щодо підвищення ефективності його роботи.

АСУ ХВО є дворівневою (рис. 3.1). Нижній рівень керування (рівень ПЛК) реалізує завдання локальної автоматики: технологічних захистів і блокувань, регулювань, вимірювання параметрів, передачі їх на верхній рівень управління. Верхній рівень (або рівень АРМ оператора) вирішує завдання збору, відображення і зберігання даних, функціонально-групового та дистанційного керування, розрахункові завдання обчислення питомих і інтегральних параметрів роботи ХВО.

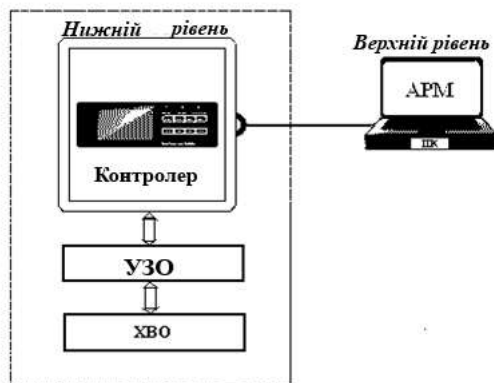


Рисунок 3.1 – Структурна схема АСУ ХВО

АСУТП ХВО реалізує наступні функції:

- вимірювання технологічних параметрів;
- технологічних захистів і блокувань;

- підтримки технологічних параметрів в заданих межах;
- автоматичного і дистанційного керування технологічним обладнанням;
- обліку енергоресурсів;
- зниження витрат на ремонт обладнання за рахунок своєчасного виявлення та вжиття заходів щодо усунення несправностей, а також планування заходів по попередженню відмов обладнання;

- скорочення чергового і обслуговуючого персоналу;
- підвищення точності, достовірності і оперативності отримання інформації про стан установки ХВО, витраті води, хімреагентів і електроенергії для прийняття правильних управлінських рішень, в тому числі, в аварійних ситуаціях;

- надання інформації про стан обладнання черговому персоналу установки ХВО в зручному для сприйняття вигляді (технологічні мнемосхеми з індикацією значень технологічних параметрів і їх відхилень);

- реєстрації контрольованих параметрів і подій, автоматичного архівування їх в базі даних, надання інформації з бази даних у вигляді трендів, таблиць, діаграм;

- розрахунку загальних і питомих показників роботи установки ХВО за даними приладів обліку електроенергії, води, хімреагентів;

- формування змінних, добових і місячних звітів про роботу установки ХВО.

- розрахунку техніко-економічних показників роботи ХВО.

Крім загальних перерахованих функцій, АСУ ХВО вирішує приватні задачі:

- автоматична реєстрації кількості обробленої води на протиточних натрій-катіонітових фільтрах;
- виробленні ресурсу фільтру і включенню в роботу резерву;



- сигналізації (світлової, звукової) при
- зниженні тиску:
- на трубопроводі нагнітання насосів вихідної води,
- перед регулятором вихідної води,
- на трубопроводі нагнітання насосів коагульованої води,
- на трубопроводі нагнітання насосів пом'якшеної води;
- підвищенні (зниженні) рівня рідини в технологічних баках.

В АСУ ХВО входять шафи автоматичного керування функціональних вузлів (фільтрів, дозаторів хімреагентів, насосних станцій), шафа живлення і комунікацій, автоматизовані робочі місця (АРМ) і сервер баз даних (БД) і додатків.

Управління установкою здійснюється з АРМ оператора, надійність якого підвищується шляхом «гарячого» резервування. Для обслуговування, проведення регламентних робіт і налаштування системи призначений АРМ обслуговування АСУ ХВО.

Важливим етапом розробки будь-якої системи керування є дослідження контурів керування системи. Об'єкт керування - ХВО характеризується поєднанням контурів регулювання і програмного управління. Розглянемо канали отримання інформації та керуючі сигнали, які утворюють контури керування об'єктом.

### **3.1 Регулювання температури вихідної води**

В системі ХВО вихідна вода підігривається, щоб забезпечити необхідний режим коагуляції води в освітлювачі. При цьому, крім забезпечення оптимального значення температури 25-30° С, мінімізуються її коливання  $\pm 1^{\circ}$  С в годину.

Функціональна схема регулювання по цьому каналу зображена на рис. 3.2.

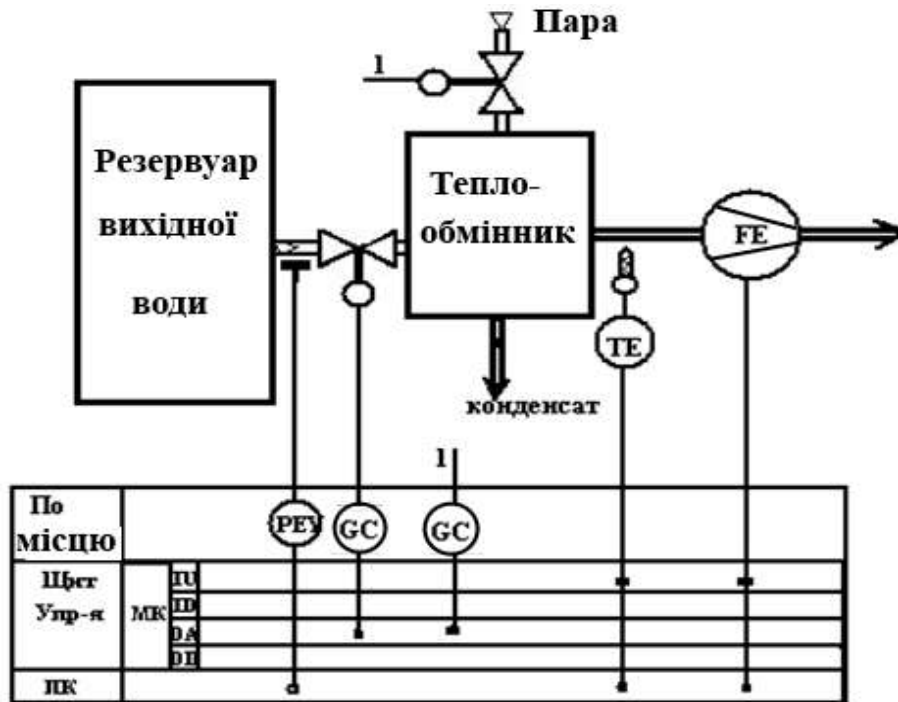


Рисунок 3.2 – Функціональна схема регулювання температури

Підігрів води здійснюється паром, причому температура вихідної води, яка вимірюється датчиком температури, буде залежати від кількості пари, що надходить на обігрів і витрату води. Необхідні значення температур отримують за рахунок регулювання положення вентиля води та пари.

Контур цифрового регулювання замикається через мікроконтролер (ПЛК). При цьому інформація про тиск і витрату води видається на верхній рівень.

### 3.2 Керування процесами освітлення води

Для якісної обробки води має підтримуватися постійний витрата на освітлювачі. При цьому витрата води, що надходить на фільтри змінюється залежно від споживання живильної води.

Контур керування процесами освітлення утворюється датчиками рН, датчиками рівня коагульованої води, коагулянта і флокулянта. На основі аналізу сигналів датчиків з виходу МК на двигунах дозувальних насосів видаються керуючі сигнали клапанів на трубопровід.

Система керування, змінюючи величину подачі води на блок освітлювачів, повинна підтримувати рівень в очищувачах на заданому рівні, забезпечуючи матеріальний баланс між витратою сирової та освітленої води.

Автоматизація видалення зважених і колоїдних речовин з води обмежується пропорційним дозуванням коагулянта, для чого використовуються два вимірювачі рН, витратомір, а також вимірювачі рівня коагулянта, флокулянта та коагульованої води (рис. 3.3).

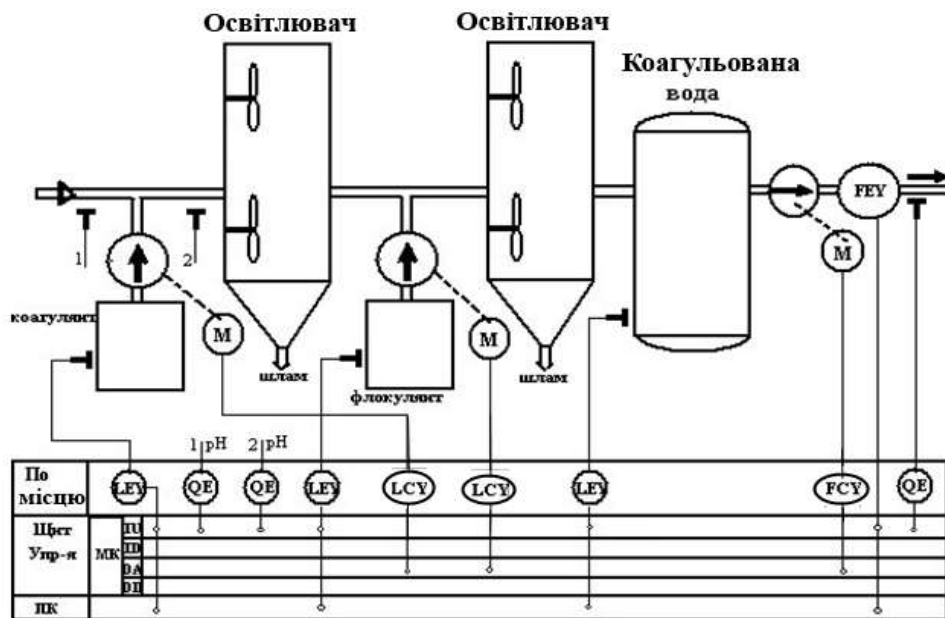


Рисунок 3.3 – Функціональна схема керування процесами освітлення води

Відхилення рівня води від номінального значення може викликатися наступними чинниками:

- зміна витрати (навантаження);
- зміна кількості живильної води.

Система автоматичного керування дозуванням коагулянта та флокулянта побудована за принципом стабілізації дози реагенту, оцінюється за значенням рН.

Відхилення від заданої дози компенсується зменшенням або збільшенням подачі реагенту.

Основними ланками систем є дозувальні насоси та циркуляційні механізми освітлювачів, а також цифрові регулятори, побудовані на базі ПЛК.

Взаємопов'язане регулювання здійснюється на основі вимірювання витрат вихідної та коагульованої води.

### **3.3 Керування процесами фільтрування води**

Складність автоматизації механічних та іонообмінних фільтрів полягає в тому, що немає явно вираженого керуючого впливу, який, наприклад, є реагентом в освітлювачі. Окрім цього і механічний і іонообмінний фільтри час від часу необхідно відключити на промивку або регенерацію.

Основна задача регулювання швидкості фільтрації – обмежити надто велику швидкістю фільтрації та витяганню з фільтра піску, що може виходити після його промивки, коли ще не сформована плівка в верхніх шарах завантаження.

Різні системи для автоматичного керування процесом регенерації (промивки) фільтрів виконують п'ять основних операцій:

- відключення фільтра від загальної магістралі (0,5-1 хв.);
- включення промивних насосів або напірного резервуара, а також вентиляцій для попереднього, водоповітряного зрихлення завантаження (3- 5 хв.);

- відключення повітрядувок і закриття засувки промивної води (5- 10 хв.); спуск першого фільтрату (3- 5 хв.) і включення фільтра в робочий цикл (2 хв.). В залежності від виду привода замків, що керують операціями фільтрації, використовують електричні або гідравлічні канали керування.

Автоматизація підлужування води після коагуляції здійснюється за допомогою рН- метрів, давача рівня лужних і дозувальних насосів (рис. 3.4).

Окрім задач керування процесами фільтрації, на систему покладені такі завдання:

- програмного керування послідовністю і тривалістю операцій;
- визначення моменту виснаження кожного з іонообмінних фільтрів і переключення його в режим регенерації;
- переключення потоку оброблюваної води на відрегенований фільтр; управління процесом регенерації шляхом підтримання постійності концентрації регенераційного розчину та відключення його при досягненні необхідної ступеня регенерації;
- керування процесом відмивання фільтрів від регенераційного розчину шляхом відключення подачі відмивної води після закінчення процесу відмивки.

Для сигналу виведення на промивку використовуються показники лічильника витратоміра FQY на відводячому трубопроводі кожного фільтра, граничне положення регулятора швидкості.

Закінчення промивання фільтра може здійснюватись по сигналу мутноміра, який встановлено на загальному трубопроводі, що відводить промивну воду від групи фільтрів. Повна автоматизація керування фільтрами здійснюється за допомогою мікропроцесорних програмованих пристроїв. Програма керування формується з ПК верхнього рівня.

## 4 МАТЕМАТИЧНА Й ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ

Із аналізу каналів керування системи ХВО витікає, що основними агрегатами системи є насоси, що дозують освітлювачі, які забезпечують якість очищення води за рахунок підтримки заданих витрат компонентів очищення.

Тому в якості об'єкту досліджень вибирається математична модель масопереносу рідини із ємності в ємність насосним агрегатом. Керування масопереносом, як витікає із аналізу розглянутих схем автоматизації, здійснюється зміною продуктивності насосу і/або зміною положення регулюючого клапана.

Щоб реалізувати завдання керування, в системі передбачено контролювання рівня рідини в баках, тиску та напору на вході насоса, а також витрати рідини.

Метою моделювання є відтворення поведінки досліджуваної системи в часі, в залежності від:

- керуючих впливів;
- зовнішніх збурень;
- зміни параметрів об'єкта, а також аналізу якісних та кількісних властивостей системи керування, оптимізації її параметрів.

Результати моделювання використовуються для прогнозування поведінки системи в залежності від різних впливів на об'єкт.

### 4.1 Ідентифікація параметрів математичної моделі об'єкту керування

Структурна схема технологічної операції, наприклад, масопереносу води від резервуару коагульованої води крізь фільтри до резервуару пом'якшеної води представлена на рис. 4.1.

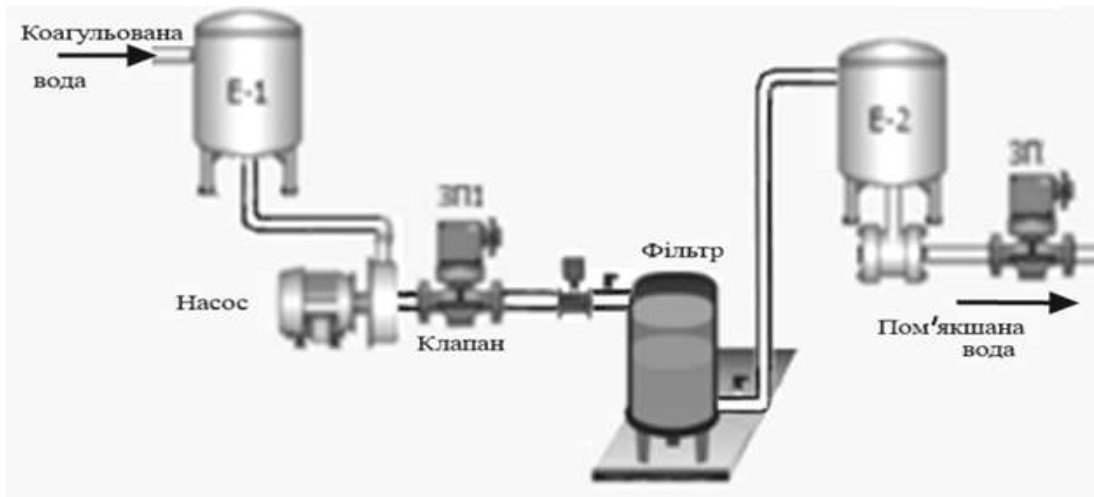


Рисунок 4.1 – Структурна схема масопереносу води

Технологічне обладнання, що входить до складу досліджуваної технологічної операції:

- дві ємності з рідиною E-1, E-2, обладнані давачами рівня;
- насос для перекачування рідини;
- клапан, для регулювання витрат;
- трубопроводи між ємностями.

Система керування повинна забезпечити:

- керування роботою насоса (включення/виключення);
- керування положенням клапана;
- керування продуктивністю насоса;
- контроль витрат рідини;
- контроль тиску на вході і напір насоса.

Рівняння ємності (циліндрична ємність)

$$\frac{dh_1}{dt} = \frac{-q}{S_1}$$

$$\frac{dh_2}{dt} = \frac{q}{S_2}, \quad (4.1)$$

де  $h_1$  і  $h_2$  – рівень в ємності;  $S_1$  і  $S_2$  - площа перерізу ємності;  $q$  – витрати рідини.

Із цих рівнянь видно, що синхронізація рівнів в ємностях здійснюється відповідно до законів керування витратами рідини.

Структурну схему насосного агрегату умовно можна представити у вигляді електромеханічної і механічної частин. До електромеханічної частини відноситься приводний електродвигун, а до механічної – насос. Такий розподіл обумовлено тим, що процес регулювання параметрами потоку ускладнений невідповідністю характеристик відцентрових насосів і трубопроводів. Для збільшення подачі (витрат) води по трубопроводу напір насосу необхідно збільшувати, однак характеристики відцентрових насосів такі, що при збільшенні витрат напір зменшується. Якщо ж зменшити подачу води, то тиск збільшується. Тому в періоди зменшення витрат води система працює з надмірним напором і його доводиться гасити на засувках і дроселюючих пристроях.

Невідповідність згаданих характеристик можна усунути різними способами. Та найбільшого поширення набула система регулювання частоти обертання насосів засобами регульованого електроприводу через його високу енергоефективність. Частота обертання насосів регулюється відповідно до водоспоживання. При зменшенні частоти обертання зменшується подача і створюваний напір (тиск).

При збільшенні частоти обертання напір (тиск) збільшується одночасно із збільшенням подачі.

Для регулювання витратами води та тиску використовується керування числом обертів вала електроприводу із використанням частотних перетворювачів (ПЧ). Такі ПЧ забезпечують ефективні витрати електроенергії, не погіршуючи динаміку і точність регулювання.



Окрім характеристик насосу і електроприводу на процес масопереносу рідини впливають параметри трубопроводу, оскільки вони впливають на витрати рідини.

Статичною характеристикою мережі (трубопроводу) називається залежність між витратою рідини  $Q$  через трубопровід і напором  $H$ , який потрібно для забезпечення цих витрат. Характеристика описується рівнянням:

$$H_c = H_{ст} - R * Q^2_{ном}, \quad (4.2)$$

де:  $H_{ст}$  – статична складова напору;  $R$  – гідравлічний опір насосу і трубопроводу, не є постійною величиною.

При максимальному споживанні з трубопроводу базовий опір трубопроводу воді, що протікає, розраховується по формулі:

$$R_б = H_{ном} / Q^2_{ном} \quad (4.3)$$

Статичною (напірною) характеристикою насоса називається залежність напору  $H$  від подачі насоса  $Q$  при постійній частоті обертання  $n$  робочого колеса:

$$H = H_0 \left( \frac{n}{n_{ном}} \right)^2 - CQ^2, \quad (4.4)$$

де:  $H_0 = H_{ном} + CQ_{ном}^2$  – напір, відповідний нульовій подачі;

$C$  – коефіцієнт, який визначається як

$$C = H_1 - H_{ном} / Q^2_{ном} - Q^2_1 \quad (4.5)$$

де  $H_1$  – певне значення напору, що відповідає подачі  $Q_1$ .

Наявність співвідношень (4.3) – (4.5), дає змогу побудувати поєднані статистичні характеристики насоса і трубопроводу (рис. 4.2).

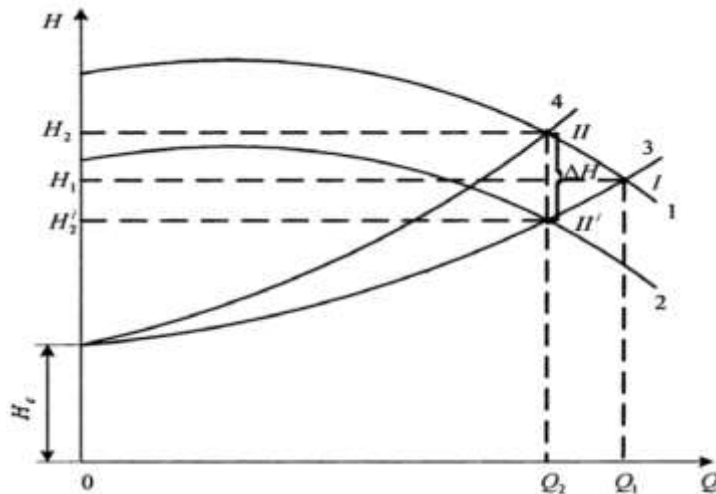


Рисунок 4.2 – Робочі характеристики відцентрованого насоса:

1 – напірна характеристика при номінальній частоті обертання; 2 – напірна характеристика при зменшенні частоти обертання; 3 – характеристика трубопроводу при повному відкритті засувки; 4 – характеристика трубопроводу при зменшенні ступеня відкриття засувки

Головним завданням керування фільтрацією води є утримання різниці тисків на фільтрах установки, тому для стабілізації напору в системі доцільно використовувати схему, приведену на рис. 4.3.

Процес регулювання здійснюється наступним чином. В деякий момент часу насос працює з кутовою швидкістю  $\omega_1$ , подачею  $Q_1$  і напором  $H_1$  (рис. 4.4). Цьому режиму відповідають втрати напору  $h_{дин1}$ . Тоді напір в визначальній точці А трубопроводу дорівнює  $H_{A1} = H_1 - h_{дин1}$ .

Будемо вважати, що цей напір на початку процесу відповідає заданому значенню напору в точці  $H_{зад}$ .

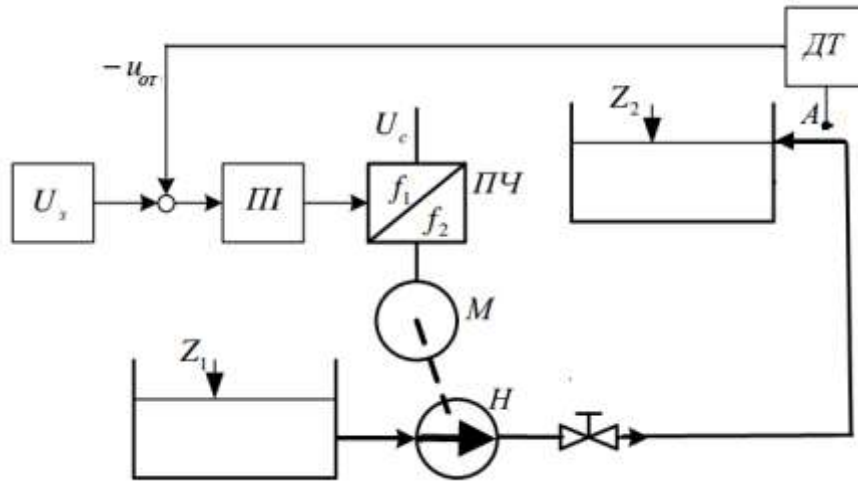


Рисунок 4.3 – Схема стабілізації напору в системі:

Н – насос; М – електродвигун; ПЧ – перетворювач частоти; ПІ – регулятор;  
ДТ – давач тиску

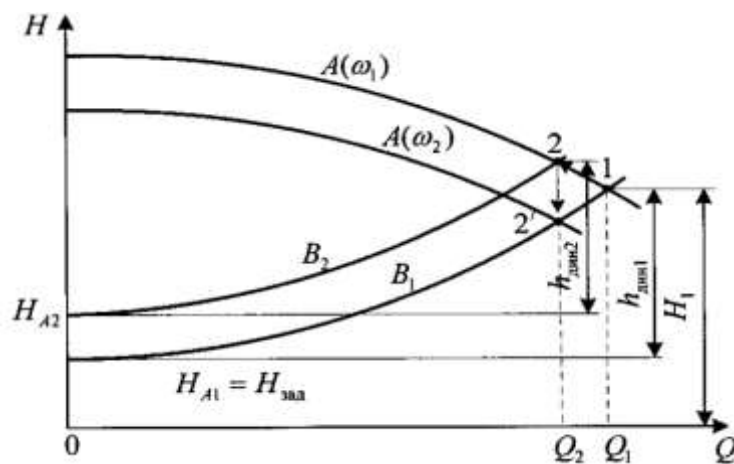


Рисунок 4.4 – Процес стабілізації напору в визначальній точці А:

$A(\omega_1)$ ,  $A(\omega_2)$  – характеристики насоса при  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ , відповідно;  $B_1$ ,  $B_2$  – характеристики трубопроводу в різні моменти часу

Якщо в наступний момент часу споживання води  $Q_1$  зменшилось, то відповідно зростає натиск  $H_2$  і знижуються втрати напору  $h_{дин2}$ . Внаслідок змін, що відбулися в режимі роботи системи напір в точці А стає рівним  $H_{A2} = H_2 - h_{дин2}$

Як видно з рис. 4.4,  $H_{A2}$  більше заданого значення напору  $H_{зад} = H_{A1}$ .

Сигнал давача тиску, встановленого в точці А, порівнюється із заданим рівнем, сигнал неузгодження надходить в систему керування частотно регульованого електроприводу. В результаті кутова швидкість насоса почне зменшуватися до тих пір, поки напір в визначальній точці А не прийме заданого значення  $H_{зад} = H_{A1}$ .

При зміні кутової швидкості напірна характеристика займе положення, відповідне кутовій швидкості  $\omega_2$ , а на трубопроводі встановиться нове значення напору  $H_2$ . Таким чином, робоча точка насоса на графіку послідовно займає положення 1, потім 2 і, нарешті 2' (рис. 4.4).

Для обчислення подачі, напору, ККД, потужності, статичного моменту насоса і електроенергії, споживаної насосним агрегатом, використовуються залежності:

- залежність подачі насоса від кутової швидкості насоса

$$Q = Q_{ном} \sqrt{\frac{H_0 \left(\frac{\omega}{\omega_{ном}}\right)^2 - ((Z_2 - Z_1) + H_{св})}{H_0 - ((Z_2 - Z_1) + H_{св})}} \quad (4.6)$$

де  $Q_{ном}$  номінальна (паспортна) подача насоса;  $H_0$  – значення напору при нульовій подачі, визначається по напірній характеристиці, а при відсутності такої характеристики приймається для насосів перекачування рідин, що містять домішки,

$$H_0 = 1,45 H_{ном};$$

$\omega$  – поточне значення кутової швидкості насоса;

$(Z_2 - Z_1)$  – різниця відміток від місця установки датчика тиску до нижнього рівня рідини (рис. 4.3);  $H_{св}$  - вільний напір;

- залежність напору насоса від кутової швидкості насоса визначається за формулою

$$H = ((Z_2 - Z_1) + H_{св}) + (H_{ном} - (Z_2 - Z_1) - H_{св}) * \frac{H_0 (\frac{\omega}{\omega_{ном}})^2 - (Z_2 - Z_1 + H_{св})}{H_0 - (Z_2 - Z_1 + H_{св})} \quad (4.7)$$

обчислення суми напорів  $(Z_2 - Z_1) + H_{св}$ , відповідно до характеристики трубопроводу, проводиться за формулою

$$(Z_2 - Z_1) + H_{св} = \frac{H - H_{ном} (\frac{Q_{витр}}{Q_{ном}})^2}{1 - (\frac{Q_{витр}}{Q_{ном}})^2} \quad (4.8)$$

де  $H$  – напір, що створюється насосом;  $Q_{витр}$  – витрати рідини в системі.

Для аналізу режимів перекачування воду дуже важливим параметром насоса є його механічна характеристика, тобто залежність моменту статичного опору від кутової швидкості робочого колеса. Вид механічної характеристики визначає енергетичні показники насоса (втрати і ККД).

Момент статичного опору насоса, описується виразом

$$M_c = N/\omega, \quad \text{або}$$

$$M_{н.с} = \frac{\rho \cdot Q \cdot H \cdot 10^3}{102 \cdot \omega \cdot \eta_n}, \text{ Нм.} \quad (4.9)$$

Потужність, що споживається насосом, визначається виразом

$$N = \frac{\rho \cdot Q \cdot H}{102 \cdot \eta_n}, \quad (4.10)$$

де  $\rho$  – щільність рідини ;  $Q$  – секундна подача насоса;  $H$  – напір насоса, м (метрів водяного стовпа) ;  $\eta_n$  – ККД насоса.

Одноконтурна система стабілізації тиску будується відповідно до функціональної схеми, зображеній на рис. 4.3. В ній структурна схема насоса представляється набором функціональних блоків, що реалізують співвідношення по напору, подачі, і моменту статичного опору.

Структурна схема насосного агрегату, який стабілізує тиск в гідросистемі з допомогою частотно – регулюючого пристрою, представлена на рис. 4.5.

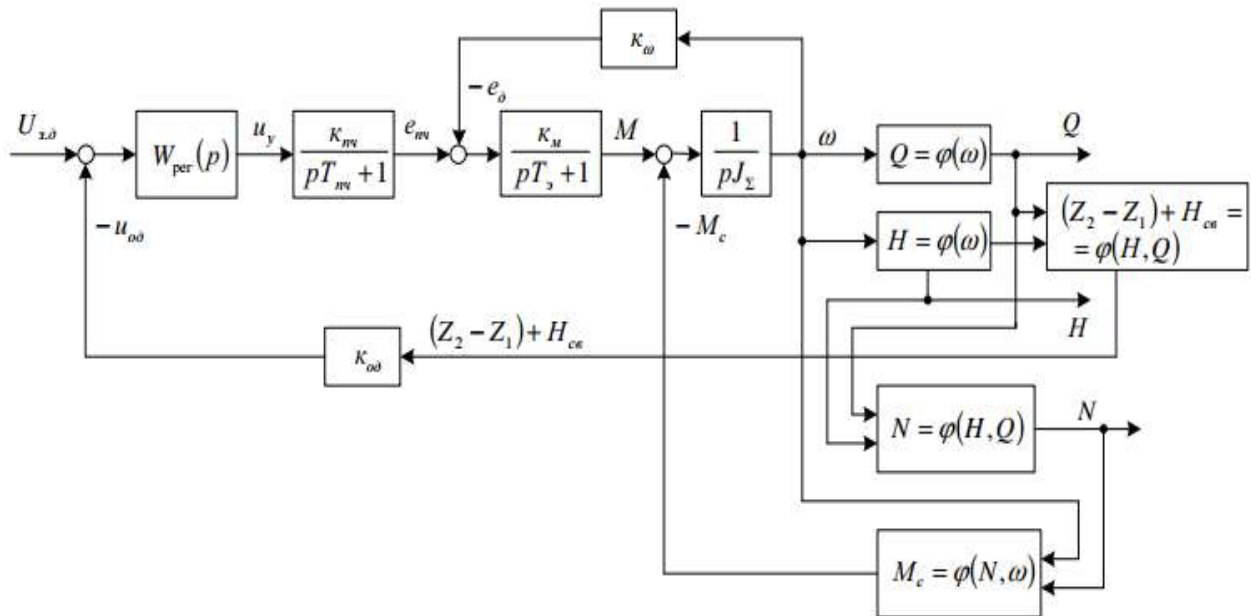


Рисунок 4.5 – Структурна схема моделювання насосного агрегату

Передатна функція перетворювача частоти в структурній схемі Параметри структурної схеми для моделювання частотно – регульованого електропривода

розраховуються на основі параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна при частотному керуванні.

а) представлена аперіодичною ланкою першого порядку

$$W_{ПЧ}(p) = \frac{K_{ПЧ}}{T_{ПЧ} p + 1}, \quad (4.11)$$

б) параметри якого визначаються по наступним залежностям:

Електромагнітна стала часу перетворювача частоти приймається в межах

$$T_{ПЧ} = (0,003 - 0,005) \text{ с};$$

статичний коефіцієнт передавання перетворювача частоти:

$$K_{ПЧ} = E_{ПЧ} / U_{у\text{ ном}},$$

де  $E_{ПЧ} = 1,2 U_{ном}$ .

Передатна функція ланки внутрішнього зворотного зв'язку по ЕРС двигуна в структурній схемі представлена безінерційною ланкою  $K_{\omega}$ .

Передатна функція ланки моменту двигуна в структурній схемі відображується аперіодичною першого порядку

$$W_M(p) = \frac{K_M}{T_E p + 1} \quad (4.12)$$

для якого коефіцієнт передачі ланки моменту

$$K_M = \frac{M_{ном}}{K_{\omega} (\omega_{1ном} - \omega_{ном})}, \quad (4.13)$$

де  $M_{ном}$  – номінальний момент двигуна;  $\omega_{ном}$  – номінальна кутова швидкість валу двигуна; електромагнітна стала часу частотно - регульованого електропривода

$$T_E = L_E / R_E,$$

де  $L_E$  – еквівалентна індуктивність частотно - регульованого електропривода;

$R_E$  – еквівалентний активний опір регульованого електропривода.

Передатна функція ланки швидкості в структурній схемі представлена інтегруючою ланкою

$$W_{ш}(p) = 1 / J_{\Sigma} * p, \quad (4.14)$$

де  $J_{\Sigma}$  – момент інерції насосного агрегату.

Момент інерції насосного агрегату складається із суми моментів інерції двигуна і насоса. Момент інерції двигуна знаходиться по паспортним даним двигуна, а момент інерції насоса можна прийняти у розмірі 20 % від моменту інерції двигуна, тоді  $J_{\Sigma} = 1,2 J_{дв}$ .

## **4.2 Розрахунок параметрів моделі налаштування контуру стабілізації тиску**

Блоки моделі насосної установки, що входять до схеми на рис. 4.5, являють собою функціональні залежності (4.6) подачі  $Q = \varphi(\omega)$ ; напору  $H = \varphi(\omega)$  залежності (4.7); моменту статичного опору  $M_c = \varphi(N, \omega)$  – (4.9) та потужності  $N = \varphi(Q, H)$  – (4.10) від кутової швидкості насоса.

Ці залежності є нелінійними тому їх аналіз і синтез можливий тільки засобами імітаційного моделювання. Завдання спрощується внаслідок того, що дослідження енергетичних процесів в насосному агрегаті необхідно проводити в сталих (стаціонарних) режимах, які є окремим випадком динамічних процесів.



Внаслідок вирішення енергетичної задачі при стаціонарних умовах, блоки моделі виконують функції алгебраїчного обчислювача, результати обчислення якого використовуються для аналізу електромеханічних і енергетичних процесів в насосній установці.

Наслідком такого підходу при імітаційному моделюванні є використання в одноконтурній системі стабілізації тиску або рівня можливостей застосування простого ПІ-регулятора, замість ПІД-регулятора. Застосування алгебраїчних обчислювачів обумовлює виключення другої гідравлічної сталої часу, яку необхідно компенсувати.

Синтез одноконтурної системи стабілізації тиску виконуємо в наступній послідовності:

1. Для максимальної витрати рідини визначається необхідна кутова швидкість насоса  $\omega$  відповідно до формули

$$\omega = \omega_{ном} \sqrt{\frac{H_c}{H_0} + \left(1 - \frac{H_c}{H_0}\right) * \left(\frac{Q}{Q_{ном}}\right)^2} \quad (4.15)$$

2. Визначається напір насоса  $H$  при знайденому значенні кутової швидкості відповідно до (4.8).

$$H = H_c + (H_{ном} - H_c) * \frac{H_0 \left(\frac{\omega}{\omega_{ном}}\right)^2 - H_c}{(H_0 - H_c)} \quad (4.16)$$

3. Визначається максимальна сума напорів  $(Z_2 - Z_1) + H_{св}$  за формулою (4.8) для забезпечення максимальної витрати рідини.

4. При визначенні коефіцієнту зворотного зв'язку по тиску (напору) керуються такими міркуваннями. Сигнал керування зменшується вдвічі, в

порівнянні з номінальним значенням, для можливості створення значення тиску, що стабілізується, як вище, так і нижче щодо необхідної *оптимальної* настройки. На практиці це забезпечує більш гнучке налаштування системи автоматичної стабілізації.

З урахуванням цього:

$$k_{OT} = \frac{U_{уном} / 2}{(Z_2 - Z_1) + H_{свmax}} \quad (4.17)$$

5. Обчислюється коефіцієнт передачі насоса по тиску (напору)

$$K_{нас} = H_{ном} / \omega_{ном} \quad (4.18)$$

6. Передатна функція ПІ– регулятора має вигляд

$$W_{PI}(p) = \frac{(T_E p + 1)}{T_p p}, \quad (4.19)$$

де  $T_E$  – електромагнітна стала часу частотно – регульованого електропривода;

$T_p$  – стала часу ПІ –регулятора.

7. Визначається стала часу ПІ – регулятора

$$T_p = (2T_{пч} K_{пч} K_M K_{нас} K_{от}) / J_{\Sigma}$$

8. Для завдання параметрів ПІ–регулятора в сучасних перетворювачах частоти використовується PID–контролер. При цьому розраховуються його складові:

– коефіцієнт передачі пропорційної частини:

$$P=T_E/T_P \quad (20)$$

– коефіцієнт передачі інтегральної частини:

$$I=1/T_P \quad (21)$$

– коефіцієнт передачі диференційної частини:  $D=0$ .

### 4.3 Моделювання насосного агрегату із стабілізацією тиску

Виходячи із структурної схеми моделювання насосного агрегату (рис. 4.5), складається функціональна схема з використанням програмного продукту MatLab в середовищі Simulink.

Для обчислення подачі, напору, ККД, потужності, статичного моменту насоса і електроенергії, споживаної насосним агрегатом, використовуються залежності, отримані для побудованої моделі агрегату зі стабілізацією напору. При цьому модель будується таким чином, щоб забезпечити завдання різних вихідних даних для можливості моделювання різних насосів з різною висотою підйому рідини. Для візуалізації результатів моделювання параметри обчислюються у відповідних підсистемах моделі (блоки Subsystem).

Функціональна схема моделі насосного агрегату з чисельними значеннями для насоса IR4A і частотно – регульованим електроприводом із приводним електродвигуном типу 4АН225М4У3 та перетворювачем частоти типу ATV61HD75N4 фірми «Шнайдер Електрик» приведена на рис. 4.6.

Модель насосного агрегату складається з моделі частотно регульованого електропривода і моделі насоса. Модель електроприводу містить: вхідний пристрій завдання по тиску (Constant1); суматор сигналів завдання по тиску і

негативного зворотного зв'язку по тиску; пропорційно інтегрально-диференційний (ПІД) регулятор (PID Controller), у якого використовуються пропорційна і інтегральна частини для реалізації пропорційно-інтегрального (ПІ) регулятора; модель перетворювача частоти, реалізований на аперіодичному ланці першого порядку (Transfer Fcn); суматор ЕРС перетворювача частоти і негативною внутрішньої зворотного зв'язку по ЕРС двигуна; передавальна функція ланки моменту, реалізована на аперіодичному ланці першого порядку (Transfer Fcn1); суматор електромагнітного моменту двигуна і негативного моменту статичного опору, створюваного насосом; ланка швидкості двигуна, реалізоване за допомогою інтегратора (Integrator) і підсилювача (Gain1); внутрішній зворотний зв'язок по ЕРС двигуна реалізована з використанням підсилювача (Gain).

Вихідна координата моделі частотно-регульованого електроприводу - кутова швидкість, реєструється за допомогою дисплея (Display) і осцилографа (Scope6).

Модель насоса представлена трьома підсистемами (Subsystem, Subsystem1 і Subsystem2). Вхідні (вихідні) параметри насоса реалізовані на дев'яти джерелах постійного впливу (Constant). Відображення чисельних значень величин, обчислених в моделі, здійснюється за допомогою блоків Display, а динаміку зміни координат за допомогою осцилографів Scope:

- подача насоса, м<sup>3</sup> / год - Display1 і Scope1;
- напір насоса, м - Display2 і Scope2;
- стабілізується натиск, м - Display3 і Scope3;
- споживана потужність насоса, кВт - Display4 і Scope4;
- момент статичного опору насоса, Нм - Display5 і Scope5.

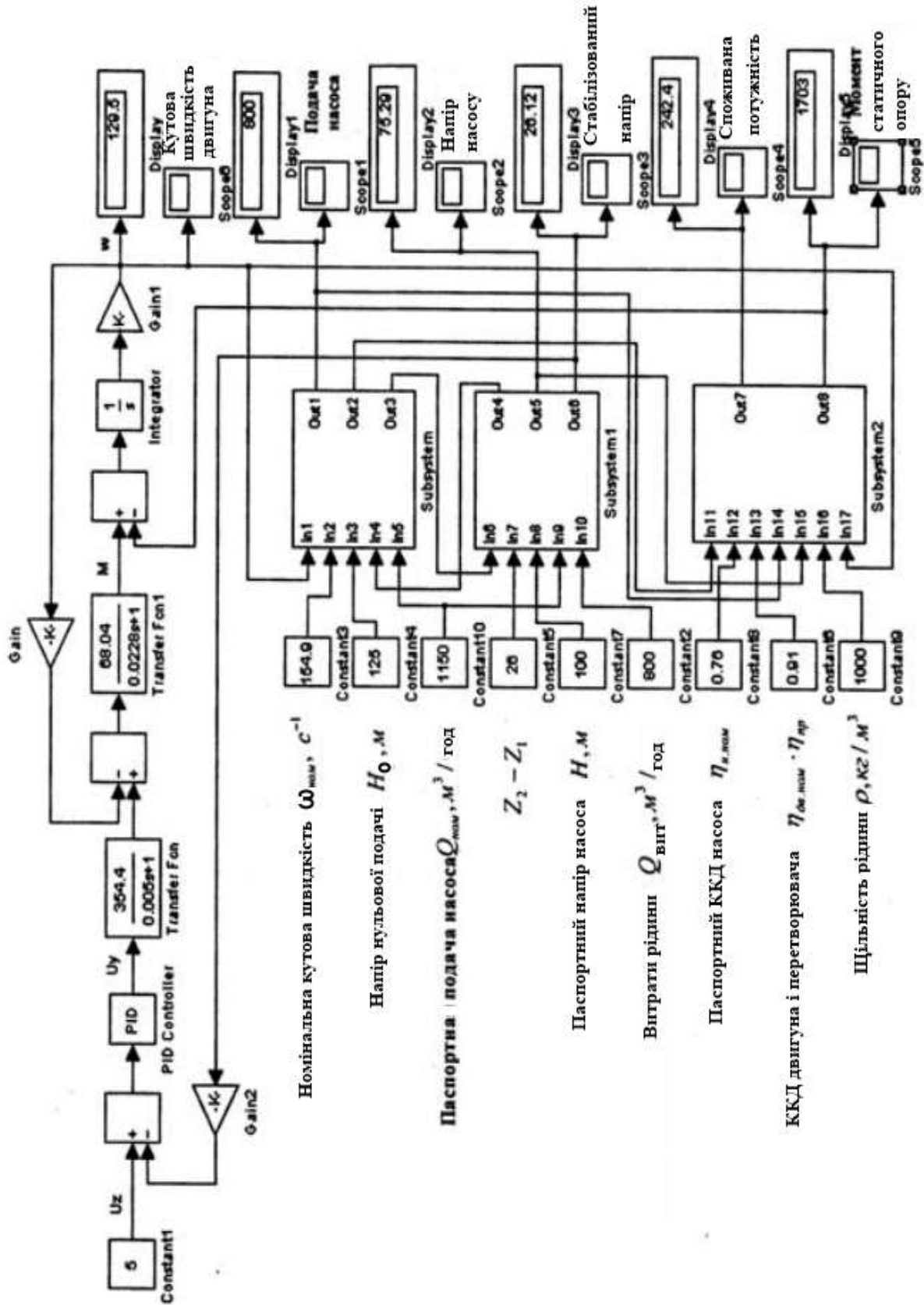


Рисунок 4.6 – Функціональна схема моделі насосного агрегату

За допомогою підсистеми Subsystem реалізована залежність подачі насоса від кутової швидкості насоса за формулою (4.6), її схема представлена на рис. 4.7.

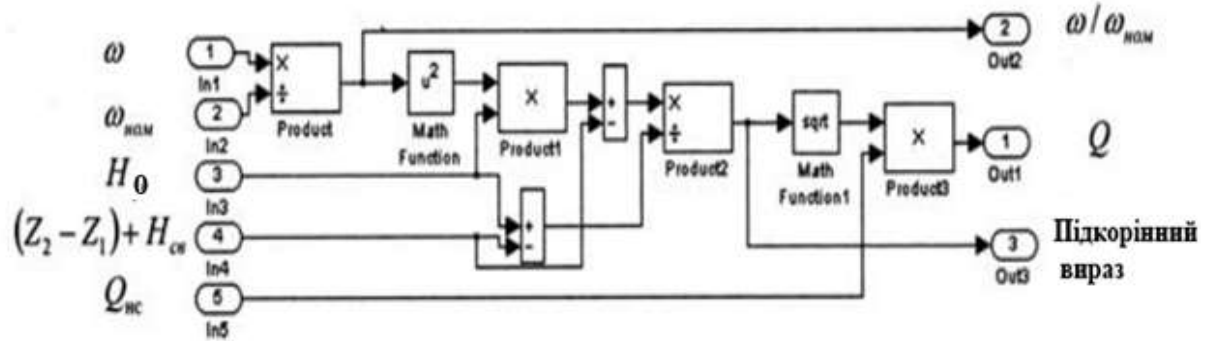


Рисунок 4.7 – Функціональна схема моделі по формулі (4.6) (Subsystem)

На схемі набору блоків підсистеми Subsystem:

- вхід 1 (In 1) - подається кутова швидкість  $\omega$  з виходу моделі електроприводу;
- вхід 2 (In 2) - задається номінальна кутова швидкість  $\omega_{ном}$  електродвигуна;
- вхід 3 (In 3) - задається напір  $H_0$  при нульовій подачі;
- вхід 4 (In 4) - задається обчислена величина від Out 4 у вигляді суми вільного напору і різниці відміток між місцем установки давача тиску і насоса  $(Z_2 - Z_1) + H_{св}$ ;
- вхід 5 (In 5) - задається паспортна (номінальна) величина подачі насоса  $Q_{ном}$ ;
- вихід 1 (Out 1) - розрахункова величина подачі насоса  $Q$ ;
- вихід 2 (Out 2) - обчислене відносне значення кутової швидкості двигуна  $\omega/\omega_{ном}$ , використовується в подальших розрахунках за допомогою моделі;
- вихід 3 (Out 3) - обчислене підкорінний вираз у формулі (4.6), використовується в подальших розрахунках за допомогою моделі.

За допомогою підсистеми Subsystem 1 реалізовані залежності напору насоса від кутової швидкості насоса і вільного напору від витрати рідини.

Обчислення напору насоса в залежності від кутової швидкості насоса здійснюється за формулою (4.7), а вільного напору  $H_{св}$ , відповідно до характеристики трубопроводу і витрати рідини, за формулою (4.8).

Підсистема Subsystem1 реалізації залежностей (4.7) і (4.8) представлена на рис. 4.8.

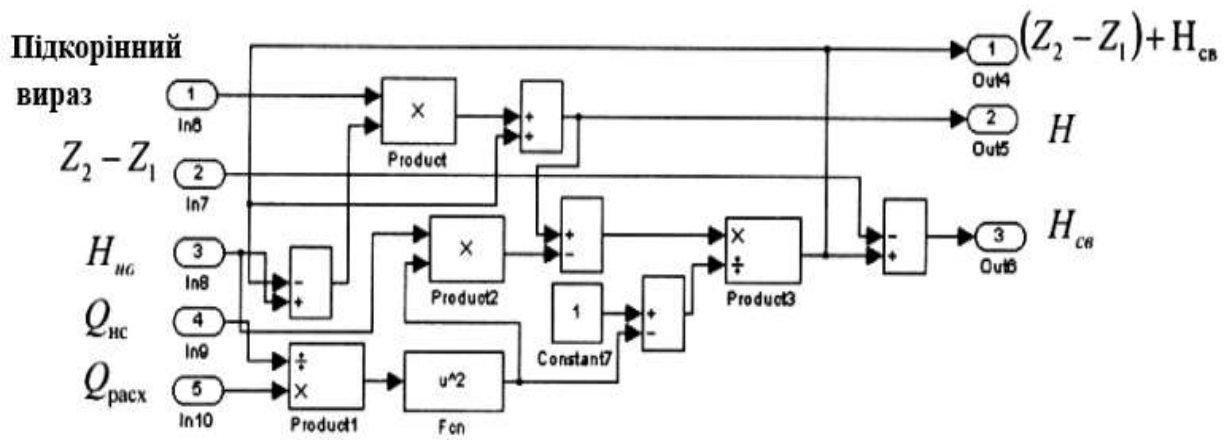


Рисунок 4.8 – Функціональна схема моделі по формулам (4.7) і (4.8) (Subsystem 1)

На схемі набору блоків підсистеми Subsystem1:

- вхід 1 (In 6) – подається обчислене підкорінний вираз формули (4.6) з виходу Out 3;
- вхід 2 (In 7) – задається різниця геодезичних відміток між місцем установки датчика тиску і насоса;
- вхід 3 (In 8) – задається паспортний (номінальний) натиск насоса  $H_{ном}$ ;
- вхід 4 (In 9) – задається паспортна (номінальна) подача насоса  $Q_{ном}$  ;
- вхід 5 (In 10) – задаються витрати рідини в гідросистемі  $Q_{вирт}$ ;

- вихід 1 (Out 4) – обчислена величина суми вільного напору и різниці відміток між місцем установки давача тиску і насоса  $(Z_2 - Z_1) + H_{св}$ ;
- вихід 2 (Out 5) – обчислена величина напору насоса  $H$ ;
- вихід 3 (Out 6) – обчислена величина вільного напору  $H_{св}$  ;

За допомогою підсистеми *Subsystem 2* реалізовані залежності ККД, активної потужності насоса, споживаної потужності насосних агрегатом і статичного моменту опору насоса від кутової швидкості.

Обчислення, статичного моменту опору насоса за формулою (4.9), активної потужності насоса за формулою (4.10), обчислення споживаної потужності насосним агрегатом здійснюється шляхом ділення активної потужності насоса на добуток ККД двигуна і перетворювача.

Підсистема *Subsystem2* залежностей (4.9), (4.10) і споживаної потужності представлена на рис. 4.9.

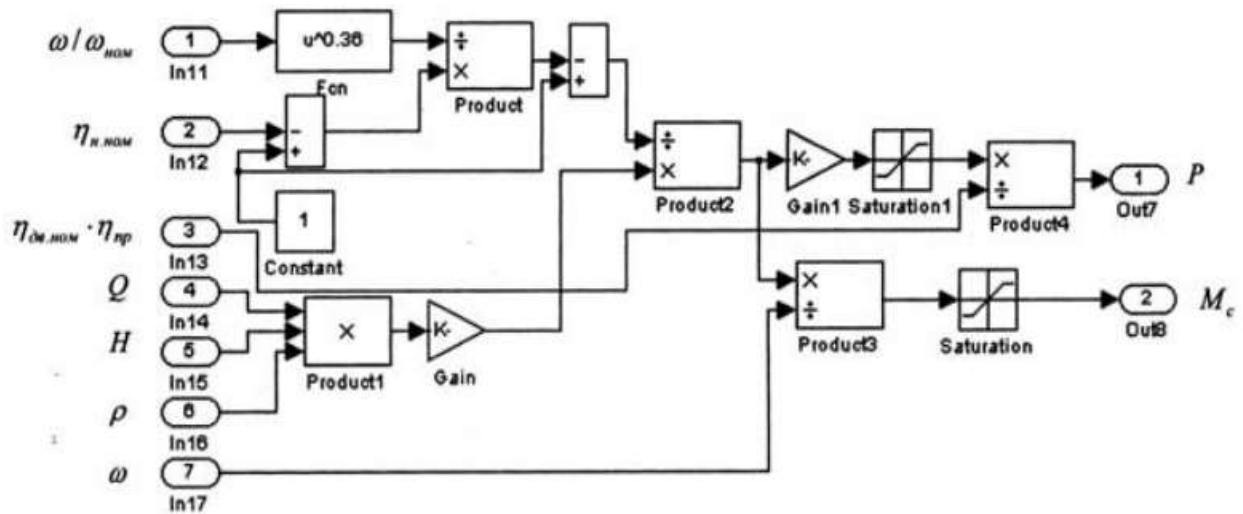


Рисунок 4.9 – Функціональна схема моделі по формулам (4.9) і (4.10) (*Subsystem 2*) і споживаної потужності



На схемі підсистеми Subsystem2:

- вхід 1 (In 11) – подається обчислена відносна кутова швидкість з виходу Out 2;
- вхід 2 (In 12) – задається паспортний (номінальний) ККД насоса  $\eta_{н\text{ ном}}$ ;
- вхід 3 (In 13) – задається добуток ККД двигуна і перетворювача  $\eta = \eta_{дв\text{ ном}} \cdot \eta_{пр}$ ;
- вхід 4 (In 14) – подається обчислена подача насоса  $Q$  з виходу Out 1;
- вхід 5 (In 15) – подається обчислений напір насоса  $H_c$  виходу Out 5;
- вхід 6 (In 16) – задається щільність рідини  $\rho$  ;
- вхід 7 (In 17) – подається кутова швидкість  $\omega$  з виходу моделі електропривода;
- вихід 1 (Out 7) – обчислена величина спожитої активної потужності  $P$ ;
- вихід 2 (Out 8) – обчислена величина моменту статичного опору насоса  $M_c$  .

Для налаштувань параметрів у підсистемі Subsystem 2 необхідно врахувати обмеження моменту статичного опору Saturation, виходячи із паспортних даних насоса та двигуна, що використовуються в досліджуваній моделі, а нижнє значення дорівнює нулю.

З допомогою моделі досліджуються режими, пов'язані з регулюванням насосної установки, енергоспоживанням і т. п.

Слід відмітити, що в реальних умовах роботи пуск насосної установки, зміни тиску в гідросистемі не відбувається стрибкоподібно, а досить плавно і тривало. Для дослідження роботи установки в критичних режимах роботи, і перевірки налаштувань *PII* – регулятора необхідно відстежити наступні ситуації:

Пуск стрибком на холостому ході;

Накид навантаження;

Плавний пуск від задавача інтенсивності і накид навантаження.

Оскільки параметри гідросистеми залежать від конкретної конфігурації і зазвичай забезпечують плавне зростання, то моделювання зі стрибкоподібними змінами параметрів є найбільш важким.

Графік зміни тиску, при реакції на вхідний стрибок на виході регулятора тиску зображено на рис. 4.10.

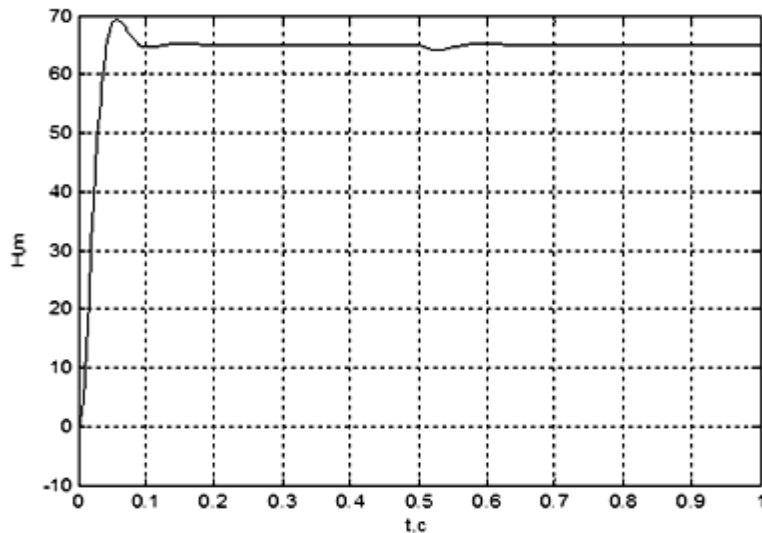


Рисунок 4.10 – Графік зміни тиску

Пуск двигуна на холостому ході здійснюється при  $t=0$ , а накид навантаження при  $t=0,5$ с.

Графіки зміни тиску, при реакції на плавне зростання сигналу завдання і накиді навантаження на виході регулятора тиску приведені на рис. 4.11.

На рис. 4.12 показані зміни швидкості, в результаті стрибка сигналу завдання та накиді навантаження.

В цей же час зміни моменту відбуваються відповідно до графіку, приведеному на рис. 4.13.

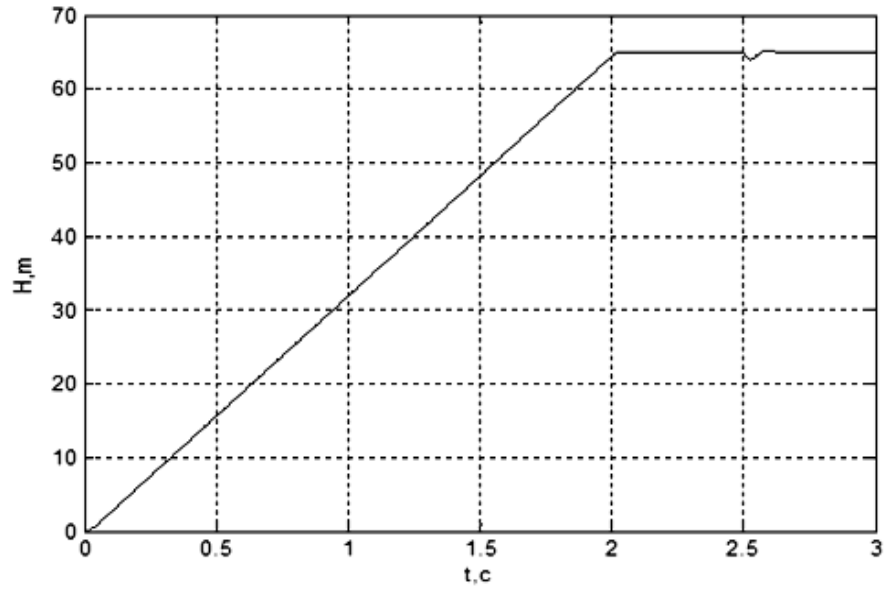


Рисунок 4.11 – Графік зміни тиску при плавному зростанні сигналу завдання

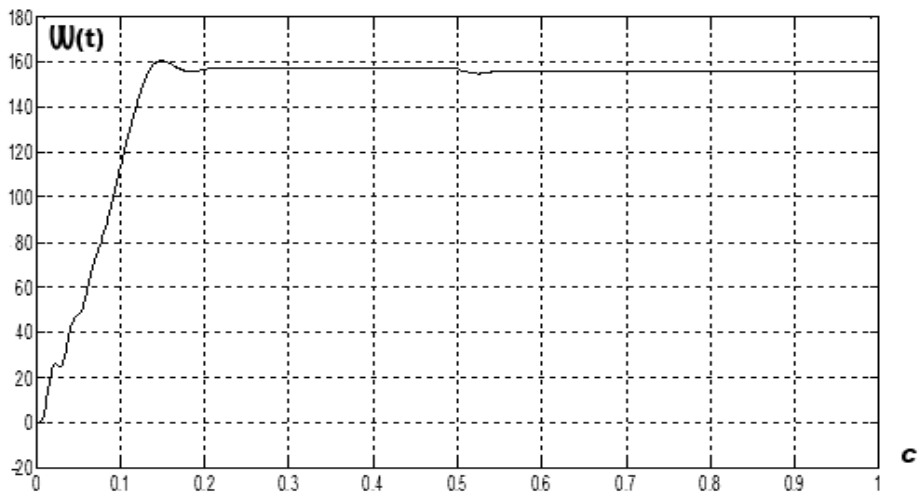


Рисунок 4.12 – Осцилограма зміни швидкості при плавному зростанні сигналу завдання і накиді навантаження

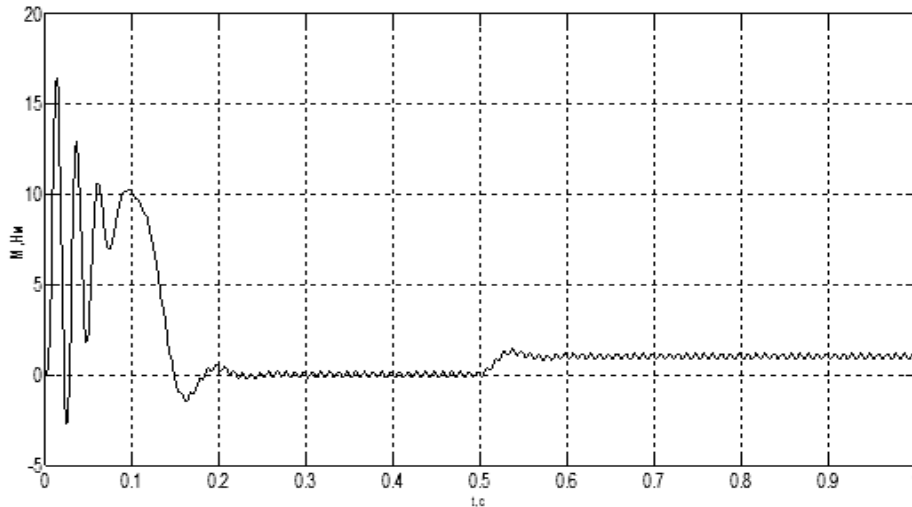


Рисунок 4.13 – Графік перехідного процесу зміни моменту

Із наведених осцилограм скористайтесь даними для розрахунку параметрів, що характеризують якість процесу регулювання:

Перерегулювання:

$$\sigma = (N_{\max} - N_{\text{уст}}) / N_{\text{уст}} = (69 - 65) / 65 = 6,1 \%$$

Динамічне падіння тиску при накиді навантаження:

$$\Delta N \% = \Delta N / N_{\text{уст}} = (65 - 64) / 65 = 1,5\%$$

Час відновлення тиску:  $t = 0,7 \text{ с}$ .

Завдяки оптимально підібраним параметрам регулятора вдалося покращити якість регулювання тиску в гідросистемі фільтрації, тим самим поліпшити якість очищення води.

## **5 СИНТЕЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ВОДОПІДГОТОВКИ КОТЕЛЬНОЇ**

### **5.1 Побудова системи керування процесом водопідготовки котельної**

Технічне забезпечення системи керування ХВО розробляється на підставі функціональної схеми автоматизації Система керування будується як дворівнева, при цьому на верхньому рівні, розташованому в приміщенні АСУТП розташовується комп'ютер HP Compaq 4000 Pro SFF, зв'язаний за допомогою лінії Ethernet з програмованим логічним контролером (ПЛК) «ОВЕН» ПЛК 63.

За допомогою перетворювача інтерфейсів «ОВЕН» АС3-М верхній рівень зв'язаний з нижнім рівнем системи керування, де крім МК «ОВЕН» ПЛК 63 розташовані модулі вводу аналогових і виведення дискретних сигналів.

Аналогові вихідні сигнали з виходу МК «ОВЕН» ПЛК 63 через відповідні ЧП з'єднані з виконавчими механізмами, що встановлюються за місцем розташування технологічного обладнання.

Функціонування системи керування ХВО здійснюється відповідно до розроблених алгоритмів, на основі яких реалізується програмне забезпечення, розміщене в пам'яті «ОВЕН» ПЛК 63.

Зв'язок датчиків і виконавчих механізмів із засобами обробки і керування здійснюється через інтерфейсні адаптери комутаційні роз'єми.

На базі SCADA - системи вирішуються завдання відображення стану технологічного обладнання у вигляді мнемосхем, ведення режимної карти, оперативних архівів, журналів переключень та аварій. На рис. 5.1 в якості прикладу приведено екран керування системою первинного дозування коагулянта, а на рис. 5.2 - мнемосхема блока фільтрів.

Для керування підсистемами з АРМ використовується 3 екрани, переключення на любий з них здійснюється оператором шляхом вибору відповідних графічних об'єктів (кнопок) на дисплеї маніпулятором «миша».

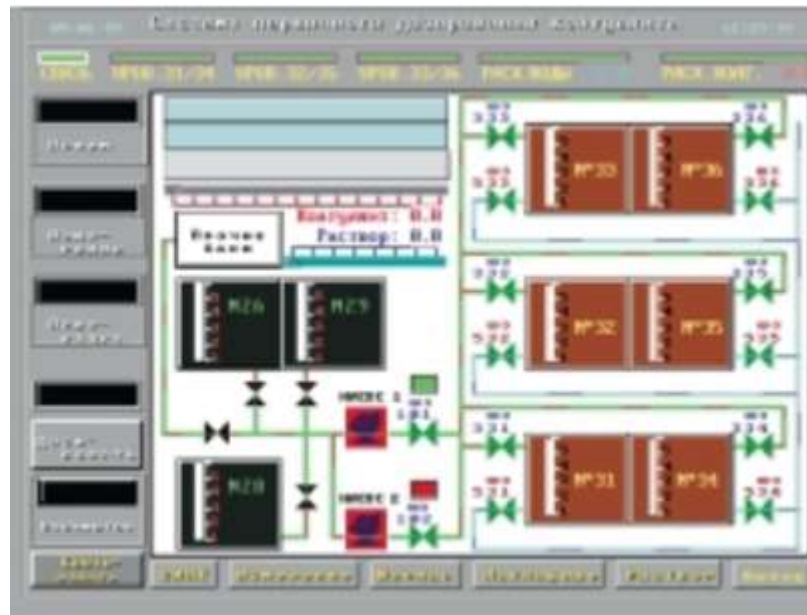


Рисунок 5.1 – Екран керування системою первинного дозування коагулянта

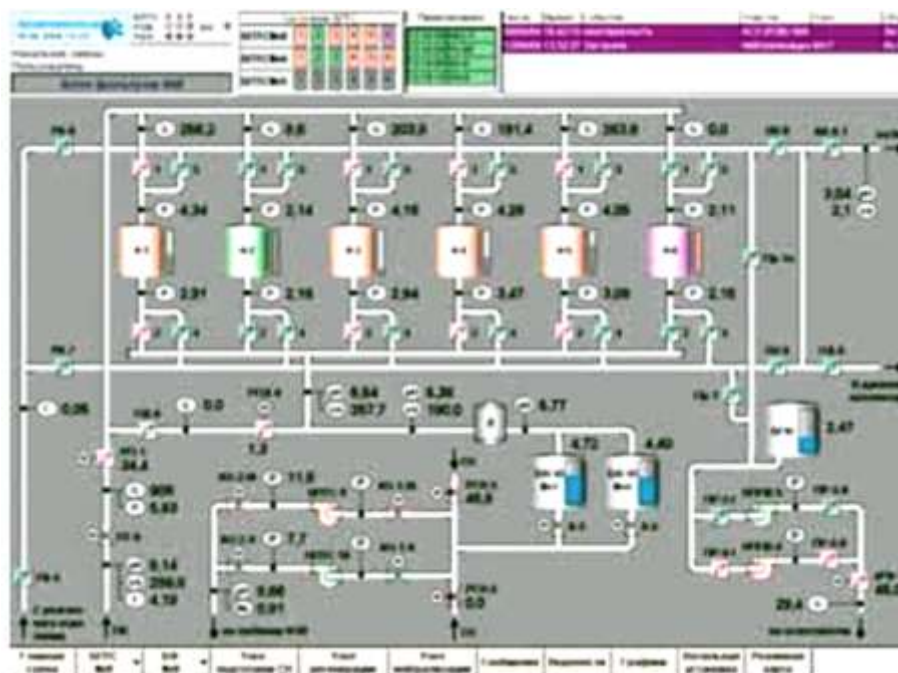


Рисунок 5.2 – Мнемосхема блока фільтрів

Для відображення стану функціональних вузлів систем і характеристик значень вимірюваних аналогових параметрів (нормальне, аварійне і т. і.) використовується анімація і зміна кольору елементів на дисплеї оператора. На екранах системи відкриті засувки відображаються зеленим кольором, закриті – червоним. Невизначений стан засувки відображається зміною кольору з червоного на зелений з періодом в 1 секунду.

## **5.2 Організація каналів зв'язку**

Канали зв'язку в АСУ ТП зв'язують нижній рівень керування (рівень ПЛК) з верхнім рівнем - АРМ оператора. Переважна більшість периферійних пристроїв має типові інтерфейси. До таких інтерфейсів відноситься RS-232C, який використовується для невеликих відстаней.

Для організації взаємодії пристрою обробки даних з інтерфейсним блоком можуть бути використані засоби апаратної підтримки, обладнані інтерфейсним виходом на Ethernet, що базується на стандарті RS-485. У стандарті RS485 для передачі і прийому даних часто використовується єдина кручена пара проводів.

Процедури спільного використання лінії передачі вимагають застосування певного методу керування напрямком потоку даних. Найбільш широко поширеним методом є використання сигналів RTS (Request To Send) і CTS (Clear To Send).

Електричні і часові характеристики інтерфейсу RS-485 - 32 приймача/передавача при багатоточковій конфігурації мережі (на одному сегменті максимальна довжина лінії в межах одного сегмента мережі 1200 м).

Тільки один передавач активний.

Максимальна кількість вузлів в мережі - 250, з урахуванням магістральних підсилювачів.

Характеристика «швидкість обміну / довжина лінії зв'язку» (залежність експоненціальна):

- 62,5 Кбіт / с 1200 м (одна кручена пара);
- 375 Кбіт / с 300 м (одна кручена пара);
- 500 Кбіт / с;
- 1000 Кбіт / с;
- 2400 Кбіт / с 100 м (дві кручених пари);
- 10000 Кбіт / с 10 м.

Однак одночасний обмін даними вже з 15 контролерами по шині RS-485 викликає неприйнятні для користувача затримки в роботі системи. Прискорити цей процес технічними хитрощами практично неможливо у зв'язку з «ідеологією» організації шини RS-485. Всі пристрої, підключені до цієї шини, опитуються послідовно, одне за іншим. Якщо врахувати маленькі швидкості передачі даних шини RS-485, то легко зробити висновок, що велику систему контролю і керування, що використовує складні методи ідентифікації на шині RS485, побудувати практично неможливо.

Вирішення цієї задачі було знайдено, замінивши протокол передачі даних на стандарти Ethernet, які визначають дротяні з'єднання і електричні сигнали на фізичному рівні, формат пакетів і протоколи керування доступом до середовища - на канальному рівні моделі OSI. Ethernet в основному описується стандартами IEEE групи 802.3.



## Висновки

В результаті аналізу з використанням методів синтезу багатовимірних систем управління побудована структура АСУ водопідготовки і розроблена функціональна схема автоматизації об'єкту. Забезпечення вирішення завдань, що ставляться перед системою керування, здійснюється на базі вибраних засобів контролю, регулюючих органів, виконавчих механізмів та мікропроцесорних засобів.

Була побудована структура АСУ водопідготовки і розроблена функціональна схема автоматизації об'єкту. Забезпечення вирішення завдань, що ставляться перед системою керування, здійснюється на базі вибраних засобів контролю, регулюючих органів, виконавчих механізмів та мікропроцесорних засобів.

Для забезпечення якості очищення води розглянуті фактори, що впливають процеси очищення. Проведена ідентифікація параметрів математичної моделі об'єкту керування та моделювання процесів регулювання в середовищі MatLab Simulink дозволили налаштувати параметри ПІ регулятора, який забезпечує пере регулювання не більше 7%, стійкість до збурень 2%, час відновлення 0,7с.

Передбачається, що автоматизація процесу водопідготовки на базі розроблених алгоритмів роботи системи та сформованих каналів зв'язку дасть змогу підвищити ефективність водоочищення за рахунок впровадження відповідних регуляторів на інших стадіях процесу водоочищення, а також організації безаварійної роботи обладнання в результаті застосування вибраних апаратних і програмних засобів типу SCADA– систем.

Наведені методи синтезу багатовимірних систем управління можуть застосовуватися як для технічних, так і для технологічних об'єктів.

### Перелік джерел посилання

1. Багатовимірні системи автоматичного управління : конспект лекцій / укладачі: А.В. Павлов, О.Ю. Журавльов, Г.А. Олексієнко – Суми : Сумський державний університет, 2018. – 65 с.
2. Копылов А.С., Лавыгин В.М., Очков В.Ф. Водоподготовка в энергетике: Учебное пособие для вузов. – М. –Издательство МЭИ. –2003.
3. Елизаров Д.П. Теплоэнергетические установки электростанций: Учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. – Энергоиздат. –1982.
4. Лифшиц О.В. Справочник по водоподготовке котельных установок. –М. – «Энергия» . –1976. –287с.