

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА МОРСЬКА
АКАДЕМІЯ»

Науково-навчальний інститут автоматики та електромеханіки

Кафедра Електричної інженерії та електроніки

ДИПЛОМНА РОБОТА МАГІСТРА

на тему:

**на тему: «Інтелектуальна система управління прісним
контуром охолодження суднових дизелів»**

Виконав: студент 6 курсу
спеціальності 271 Морський та внутрішній водний транспорт

(шифр і назва спеціальності)

Олександр ЖАКОТА

(підпис, прізвище та ініціали)

допущений до захисту 22.12.2023

(дата малого захисту)

Завідуючий кафедрою Микола МУХА

(підпис, прізвище та ініціали)

Керівник Віктор ПЕТРУШИН

(підпис, прізвище та ініціали)

Нормоконтролер Ігор МАЛЯВІН

(підпис, прізвище та ініціали)

Рецензент Ірина ГВОЗДЕВА

(підпис, прізвище та ініціали)

Одеса 2023

Онлайн сервіс створення та перевірки кваліфікованого та удосконаленого електронного підпису

ПРОТОКОЛ

створення та перевірки кваліфікованого та удосконаленого електронного підпису

Дата та час: 13:56:23 15.12.2023

Файлу з підписом: ДИПЛОМ Жакота1.docx.p7s

Розмір файлу з підписом: 3.2 МБ

Відправлені файли:

Файлу без підпису: ДИПЛОМ Жакота1.docx

Розмір файлу без підпису: 3.2 МБ

Результат перевірки підпису: Підпис створено та перевірено успішно. Цілісність даних підтверджено

Підписувач: Жакота Олександр Вікторович

П.Б.: Жакота Олександр Вікторович

Країна: Україна

Ідентифікатор: 2758405014

Час підпису (підтверджено кваліфікованою позначкою часу для підпису від Надавача): 13:56:20

Метод виданий: "Дія". Кваліфікований надавач електронних довірчих послуг

Ідентифікатор: 382367105294AF970400000074E11F006EC8BE01

Тип особистого ключа: ЗНКІ криптомодуль ІІТ Гряда-301

Стандарт підпису: ДСТУ-4145

Метод підпису: Кваліфікований

Контейнер: Підпис та дані в CMS-файлі (CAvES)

Метод підпису: З повними даними ЦСК для перевірки (CAvES-X Long)

Метод підпису: Кваліфікований

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ»
Науково-навчальний інститут автоматики та електромеханіки

Кафедра Електричної інженерії та електроніки

Освітньо - кваліфікаційний рівень магістр

Спеціальність 271 Морський та внутрішній водний транспорт

Спеціалізація 271.03 Експлуатація суднового електрообладнання і засобів автоматики

Зав. кафедрою Затверджую
 „01” „11” 2023 р.

**ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ МАГІСТРА**

Жакота Олександр Вікторович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: **«Інтелектуальна система управління прісним контуром охолодження суднових дизелів»**

Керівник роботи Петрушин В.С., д.т.н., професор
 (прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по академії від „12” грудня 2023 року № 2004

2. Строк подання курсантом закінченої роботи 15.12.2023 р.

3. Вихідні дані до роботи: судно контейнеровоз місткістю 4000 TEU;
потужність суднового головного двигуна MANB&W 18975 кВт; контур охолодження суднового дизеля.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що підлягають розробці): аналіз умов експлуатації головного двигуна та систем охолодження; розробка математичної моделі системи охолодження; розробка нейромережевої системи прогнозу температури охолоджуючої води; імітаційне моделювання та дослідження ефективності інтелектуальної системи управління.

5. Перелік графічного матеріалу (з точними вказівками обов'язкових креслень).

Презентація зі слайдами які відображають актуальність роботи, мету, наукову новизну та етапи моделювання.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітки
1	ТЕХНІКО-ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ, ТА КОНСТРУКТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ СУДНА		
2	АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ САУ ТЕМПЕРАТУРИ СИСТЕМ СИСТЕМ ОХОЛОДЖЕННЯ ГОЛОВНОГО ДВИГУНА		
3	ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПРОЦЕСУ РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ОХОЛОДЖУВАЛЬНОЇ ВОДИ СГД		
4	РОЗРОБКА НЕЙРОМЕРЕЖНОЇ СИСТЕМИ ПРОГНОЗУВАННЯ ДИНАМІКИ ТЕМПЕРАТУРИ ОХОЛОДЖУВАЛЬНОЇ ВОДИ		
5	КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НЕРОМЕРЕЖЕВОЇ САУ ТЕМПЕРАТУРИ ВОДИНА ВИХОДІ СГД		

Курсант-дипломник

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Олександр ЖАКОТА

Керівник роботи

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Віктор ПЕТРУШИН

РЕФЕРАТ

У роботі було проведено дослідження процесів нейромережевого прогнозу та регулювання температури охолоджувальної води на виході з суднового головного двигуна марки MAN потужністю 18980 кВт.

Було запропоновано нейромережеву систему підтримки прийняття рішень оператора центрального поста управління для прогнозу динаміки температури води для охолодження суднового дизеля, в залежності від теплового навантаження.

Навчання та налаштування нейронної мережі проводилося за допомогою пакету Matlab програми Neural Network Toolbox. Архітектура нейронної мережі представлена моделлю, яка відтворюється за допомогою системи SIMULINK. Пакет програм доповнено бібліотекою Neural Network Toolbox Block Library, що містить блоки, необхідні формування моделі нейронної мережі.

Було розглянуто контрольовані параметри контуру системи охолодження та розроблено математичну модель об'єкта управління за допомогою методу Р. Калмана. Було зроблено моделювання нейромережевої системи керування триходовим клапаном електроприводу контуру охолодження під час імітації зовнішніх збурень. Інтелектуальна система управління показала свою ефективність, порівняно з традиційною САУ.

ГОЛОВНИЙ ДВИГУН, КОНТУР ОХОЛОДЖЕННЯ, НЕЙРОННА
МЕРЕЖА, УПРАВЛІННЯ ТЕМПЕРАТУРОЮ ОХОЛОДЖУВАЛЬНОЇ
ВОДИ

Abstract

In the work, a study of the processes of neural network forecasting and regulation of the temperature of the cooling water at the outlet of the ship's MAN main engine with a capacity of 18,980 kW was carried out.

A neural network decision-making support system for the operator of the central control post was proposed for forecasting the dynamics of the water temperature for cooling the ship's diesel, depending on the heat load.

Training and tuning of the neural network was carried out using the Matlab package of the Neural Network Toolbox program. The architecture of the neural network is represented by a model that is reproduced using the SIMULINK system. The program package is complemented by the Neural Network Toolbox Block Library, which contains the blocks necessary to form a neural network model.

The controlled parameters of the cooling system circuit were considered and a mathematical model of the control object was developed using the method of R. Kalman. Modeling of the neural network control system of the three-way valve of the electric drive of the cooling circuit during the simulation of external disturbances was done. The intelligent control system has shown its effectiveness, compared to the traditional self-propelled guns.

MAIN ENGINE, COOLING CIRCUIT, NEURAL NETWORK, COOLING
WATER TEMPERATURE CONTROL

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
1. ТЕХНІКО-ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ, ТА КОНСТРУКТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ СУДНА.	12
2.АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ САУ ТЕМПЕРАТУРИ СИСТЕМ СИСТЕМ ОХОЛОДЖЕННЯ ГОЛОВНОГО ДВИГУНА.....	15
3.ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПРОЦЕСУ РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ОХОЛОДЖУВАЛЬНОЇ ВОДИ СГД.....	25
4. РОЗРОБКА НЕЙРОМЕРЕЖНОЇ СИСТЕМИ ПРОГНОЗУВАННЯ ДИНАМІКИ ТЕМПЕРАТУРИ ОХОЛОДЖУВАЛЬНОЇ ВОДИ.....	41
5. КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НЕРОМЕРЕЖЕВОЇ САУ ТЕМПЕРАТУРИ ВОДИНА ВИХОДІ СГД.....	51
ВИСНОВКИ.....	68
Список використаної літератури.....	69

УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

ККД - коефіцієнт корисної дії,

СГД – судновий головний двигун,

САУ -система автоматичного управління,

СЕУ – суднова енергетична установка,

ШНМ –штучна нейронна мережа,

НК – нейромережевий контролер,

ФА – функція активації,

ЦПУ - центральний посту управління.

ВСТУП

Системи охолодження сучасних головних суднових двигунів внутрішнього згоряння (СГД) служать забезпечення максимально високих техніко - економічних показників експлуатації цих двигунів винятково на номінальних режимах роботи. Проте сучасна практика показує, що судові енергетичні установки експлуатуються тривалий час у часткових режимах навантажень [1]. У зв'язку з цим удосконалення управління системою охолодження головних СДВС є дуже актуальним завданням. У системах охолодження циліндрів СГД від температури охолоджувальної води в зарубіжному просторі значною мірою залежить температура стінки, яка, своєю чергою, впливає протікання робочого процесу в циліндрі, величину роботи тертя в циліндропоршневій групі та інтенсивність її зносу [2, 3]. Підвищення температури води, що охолоджує, до певних меж зменшує знос циліндропоршневої групи. Верхня межа температури визначається умовами безпечної роботи двигуна. У зв'язку із застосуванням сірчистого та високов'язкого сортів палива намічається тенденція до підвищення температурного режиму в системі охолодження циліндрів та форсунок у потужних малооборотних двигунів до 62–85 °С. Система регулювання температури охолоджувальної води головних суднових дизелів повинна підтримуватися постійної при різних навантаженнях і температурах забортної води, що висуває підвищені вимоги до якості процесів регулювання.

Огляд літературних джерел показавши, що останнім часом у системах автоматичного управління (САУ) суднових агрегатів стає перспективним впровадження інтелектуальних методів та алгоритмів [1-4]. Інтелектуальні САУ відрізняються від традиційних ПД – регуляторів та здатні до адаптації, роботи з нелінійностями та самонавчання своїх вагових коефіцієнтів при зміні характеристик об'єктів управління [4]. Впровадження нейромережевих систем прогнозування та адаптивного управління в САУ охолодження головних двигунів та дизель-генераторів дозволить суттєво

погіршити якість процесів управління та забезпечити високу надійність у роботі агрегатів СЕУ. На підставі вищевикладеного тему роботи можна *вважати актуальною*.

Метою роботи є розробка нейромережевої системи прогнозу та управління температурою охолоджувальної води та дослідження її ефективності за допомогою комп'ютерного моделювання та впливу робочих параметрів дизеля на показники якості перехідних процесів.

Завдання дослідження:

- провести огляд та порівняльний аналіз відомих рішень із літературних джерел, у яких наведені теоретичні питання, що спрямовані на вирішення задач підвищення ефективності САУ системи охолодження СГД.
- навести теоретичні відомості про технології створення нейромережевих САУ;
- вибрати архітектуру та навчити нейронну мережу на основі експериментальних даних
- розробити математичну модель об'єкта управління з допомогою методів ідентифікації.
- провести комп'ютерне моделювання запропонованих інтелектуальних систем управління та традиційних САУ та порівняти результати.

Об'єкт дослідження. Як об'єкт у роботі розглянуто прісний контур системи охолодження головного суднового двигуна.

Гіпотеза дослідження полягає у припущенні, що впровадження інтелектуальної нейромережевої системи управління температурним режимом може дозволити підвищити показники якості процесів управління та надійності обладнання СГД .

Предмет дослідження. Математичні, комп'ютерні моделі та алгоритми навчання нейромережі для системи управління температуриохолоджувальної води головного двигуна.

Методи дослідження. Під час виконання магістерської роботи використані: метод параметричної ідентифікації Р. Калмана; методи навчання нейронної мережі; імітаційне моделювання.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

- запропонована нейромережева система управління температурою охолоджувальної води на виході з суднового дизеля, система відрізняється покращеними показниками якості перехідних процесів порівняно з типовою.
- запропонована нейромережева модель прогнозування динаміки температури охолоджувальної води в залежності від завантаження головного двигуна
- розроблено математичну модель контуру охолодження головного двигуна марки MAN B&W потужністю 18975 кВт

Отримані результати можуть застосовуватися на морських судах у процесі експлуатації САУ температури охолоджувальної води, що доказує практичну цінність.

Особистий внесок здобувача. Створено комп'ютерну модель нейромережевої системи управління температурою води охолодження, яка заснована на алгоритмі зворотного розповсюдження помилки та дозволяє зменшити перерегулювання при впливі зовнішніх збурень.

Апробація результатів. Результати роботи було заочно розглянуто на десятій міжнародній науково-технічній конференції «СУДНОВА ЕЛЕКТРОІНЖЕНЕРІЯ, ЕЛЕКТРОНІКА І АВТОМАТИКА» (SEIEA-2023); м. Одеса – 2023. «ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ТЕМПЕРАТУРОЮ ОХОЛОДЖУЮЧОЇ ВОДИ СУДНОГО ДИЗЕЛЯ».

РОЗДІЛ 1. КОНСТРУКТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ СУДНА, ГОЛОВНОЇ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ, ДОПОМІЖНИХ МЕХАНІЗМІВ І СИСТЕМ.

1.1. Призначення та основні конструктивні особливості судна.



Рисунок 1. -Контейнеровоз« MOL».

1.1. Загальні характеристики:

Ім'я: MOL

Тип судна - загальний: Cargo

Тип судна - Детальніше: Container Ship

Статус: Активно

Прапор: Portugal [PT]

Валова місткість: 58307

Літній дедвейт: 73229 t

Довжина	285 м
Ширина	42 м
Дедвейт	29970 т
Кількість контейнерів	5400
Швидкість	9knot.

Район плавання необмежений

Тип головного двигуна двотактний дизель, реверсивний

Даний контейнеровоз відноситься до спеціалізованих суховантажних суден, з необмеженим районом плавання, та використовується для перевезення стандартних контейнерів (TEU) з різним вантажем. Як головний двигун використовується двигун внутрішнього згорання.

Головний двигун

Виробник	MANB&W
Тип	8L70MC
Потужність	18975 кВт
Число обертів	104 об/хв

Запаси палива:

Мазут	4500 т
Дизельного	360 т

Добові витрати палива:

На ходу	150 т
В порту	17 т

Параметри СЕС

Генератор

- Виробник HYUNDAI
- Тип HFJ7 71
- Потужність 2400 кВт (3000 кВА)

•	Частота	60 Гц
•	Напруга	440 В
•	Кількість	4

Аварійний ДГ

Виробник

Nishishiba

Тип

NTAKL

Потужність

150 кВт (188 кВА)

Число обертів

1700 об/хв.

Кількість

1

Утилізаційний котел

Виробник

Aalborg

Продуктивність

4500 кг/год

Підрулюючий пристрій

Виробник

Kawasaki Heavy Industries

Кількість

1

Тип

електричний

Потужність

1100 кВт

Клас автоматизації – А1

РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ САУ ТЕМПЕРАТУРИ СИСТЕМ ОХОЛОДЖЕННЯ ГОЛОВНОГО ДВИГУНА.

2.1. Принцип дії та склад системи охолодження СГД.

Система охолодження суднової енергетичної установки призначена для охолодження деталей головних та допоміжних двигунів, що нагріваються від теплоти згоряння палива (так звані «вогневі поверхні») з тим, щоб знизити їх температурну деформацію та підвищити міцність, а також для відведення теплоти від робочих середовищ (олії, палива, води та наддувного повітря). Крім того, за допомогою системи охолодження забезпечується відведення теплоти від інших різних механізмів, пристроїв, приладів, які розміщені в машинно-котельному відділенні.

Режим охолодження двигуна впливає на ефективність його роботи. З підвищенням температури води, що охолоджує, індикаторний ККД двигуна падає, що пояснюється зменшенням коефіцієнта наповнення, періоду затримки займання і швидкості наростання тиску. Разом з тим завдяки зниженню в'язкості олії зменшуються втрати на тертя (механічний ККД зростає) та знос деталей двигуна. У результаті зміни температури води від 50^о до 150^оС спостерігається незначне збільшення ефективного ККД дизеля[2].

Температурний рівень охолодження впливає на кількість та характер лако- та нагароутворення, випадання осаду та окислення олії. Зі зростанням температури прискорюється окислення олії, проте лакоутворення зменшується. Таким чином, підвищення температури води, що охолоджує, в двигуні супроводжується деяким поліпшенням його показників. Крім того, спостерігається сприятливий з точки зору утилізації теплоти перерозподіл потоків вторинних енергоресурсів: кількість теплоти, що відводиться газами, зростає, а охолоджувальною водою – зменшується.

Система охолодження складається з наступних основних елементів: насосів прісної та забортної води, фільтрів, розширювальних та стічних цистерн та цистерн для приготування присадок, охолоджувальної прісної води, підігрівачів прісної та забортної води, приймальних та відливних пристроїв, трубопроводів із запірною та регулювальною арматурою вимірювальних приладів. Охолоджувачі призначені для відведення у воду надмірної теплоти від охолоджувальних рідин та наддувного повітря. Розширювальна цистерна служить для компенсації змін об'єму води в системі внаслідок зміни її температури, для поповнення втрат води в системі через витоки та випаровування, а також видалення із системи повітря та водяної пари. Терморегулятори повинні автоматично підтримувати температуру води та охолоджуваних рідин у заданому діапазоні.

У цьому проекті застосовується триконтурна система охолодження із центральним охолоджувачем прісної води. Такий вибір обумовлений прагненням підвищити надійність всього обладнання, що охолоджується, де для відведення тепла використовується тільки прісна вода, що володіє меншою корозійною активністю. У зв'язку з тим, що в заданому проекті контейнеровоза фідерного укомплектована дизелем, що мають два контури охолодження (низькотемпературний і високотемпературний), то і контур прісної води складається з двох частин [2].

Згідно з технічною документацією на дизельфірми MANB&W для охолодження втулок циліндра з метою знизити теплові втрати з охолоджувальною водою використовується прісна вода з температурою на вході в зарубіжний простір 75°C та 85°C на виході з нього [2]. Для забезпечення цієї вимоги у контурі прісної води системи охолодження виділяється спеціальний високотемпературний контур, який має сполучення з низькотемпературним контуром прісної води через регулювальний клапан з термостатом. Щоб уникнути закипання води в зарубіжному просторі та охолоджуючих каналах кришки циліндрів, де

охладжуються вогневі поверхні, у контурі підтримується тиск не менше 0,25 МПа.

Стійка циркуляція прісної води досягається завдяки постійному відводу пароповітряної суміші з порожнин охолодження, забезпеченню повного заповнення водою циркуляційного контуру (періодичним поповненням води) та можливості зміни об'єму води через динамічність процесів охолодження під час експлуатації. Для цього в кожній системі послідовно з основним контуром циркуляції води (або паралельно йому) встановлюють дренажно-компенсаторний контур з цистерною розширювальної, пов'язаної з атмосферою. У цій цистерні відбувається виділення пароповітряної суміші із води. Вона служить для поповнення витоків води та є буферною ємністю при зміні об'єму води.

Відповідно до вимог Регістру, кожне машинне відділення повинно мати не менше двох кінгстонних ящиків циркуляційної або охолоджувальної води, що забезпечують прийом заборотної води в будь-яких умовах експлуатації. В даний час передбачають кінгстонно-розподільний канал, в який вода надходить з кінгстонних ящиків, а потім через клінкетні засувки - в систему охолодження. Відведення води за борт здійснюється через безповоротно-запірні клапани. Щоб уникнути попадання нагрітої води в приймальні отвори, відливні та приймальні отвори розносять по довжині судна, розташовуючи останні в ніс від відливних. Відливні забортні отвори розміщуються наднищі або на борту, як правило, не менше 300 мм нижче за ватерлінію найбільшого осадку.

На рис.2.1. зображена схема системи охолодження ГД, що складається з трьох контурів (два контури прісної води, що мають повідомлення, і контур заборотної води). Забортна вода надходить у систему охолодження через днищеві (поз.2) та бортові (поз.1) кінгстонні ящики. Потім забортна вода, пройшовши через кінгстонний клапан (поз.3) і фільтр грубої очистки (грязеві коробки) (поз.4), надходить у кінгстонний канал (поз.5), який забортна вода може надходити від іншого кінгстонного ящика.

З каналу Кінгстон очищена вода забирається насосом заборотної води (поз. 6) і подається в центральний охолоджувач прісної води (поз.7), де вона нагрівається і відводиться в відливний ящик (поз.8). У разі дуже низької температури заборотної води частина нагрітої заборотної води після центрального охолоджувача за допомогою терморегулятора повертається в ящик кінгстон, підтримуючи таким чином необхідну температуру заборотної води на вході центрального охолоджувача.

У свою чергу прісна вода після охолодження в центральному охолоджувачі надходить на вхід циркуляційного насоса низькотемпературного контуру (НКТ) прісної води (поз.10), де отримавши необхідну енергію, йде паралельно включені охолоджувач масла ГД (поз. 11) і охолоджувач наддувного повітря (поз.12). Пройшовши через зазначені теплообмінні апарати підігріта прісна вода після злиття поділяється на два потоки. Один потік через дросельну шайбу (поз.13) проходить в вузол (поз. 14), де змішавшись з надлишками прісної води високотемпературного контуру (ВТК) повертається до центрального охолоджувача, замикаючи таким чином низькотемпературний контур. Для регулювання температури води низькотемпературного контуру частина її після усереднення за допомогою автоматичного клапана (поз.15) прямує в обхід центрального охолоджувача прісної води. Другий потік прісної води після злиття підходить до клапана терморегулятора температури прісної води високотемпературного контуру (поз.16), який дозує кількість води низькотемпературного контуру, що надходить на розведення нагрітої води ВТК. Після терморегулятора (поз.16) прісна вода високотемпературного контуру надходить до циркуляційних насосів ВТК (поз.17). Ці насоси, повідомляючи воді необхідну енергію, подають до головного двигуна (поз. 18) для охолодження циліндрів.

Нагріта вода з головного двигуна надходить у паровідвідний клапан (поз.19), встановлений з метою видалення із системи пар води та повітря, які утворюються в незначній кількості на вогневих поверхнях двигуна і можуть

накопичуватися в системі. Повітря і пара, що виділилися в цьому клапані, відводяться в розширювальну цистерну (поз.22) по трубопроводу (поз.24). Вийшовши з паровідвідного клапана, вода, розділившись на два паралельні потоки, йде частиною через упресувальну установку (поз.20) і частиною через дросельну шайбу (поз.21), яка створює необхідний перепад тиску для роботи опріснювальної установки. Зазначені паралельні потоки води, пройшовши дросельну шайбу та опріснювальну установку, зливаються і підходять до клапана терморегулятора температури прісної води високотемпературного контуру, який пропускає необхідну частину гарячої води на змішування з водою НТК, а надлишки спрямовуються в вузол [2].

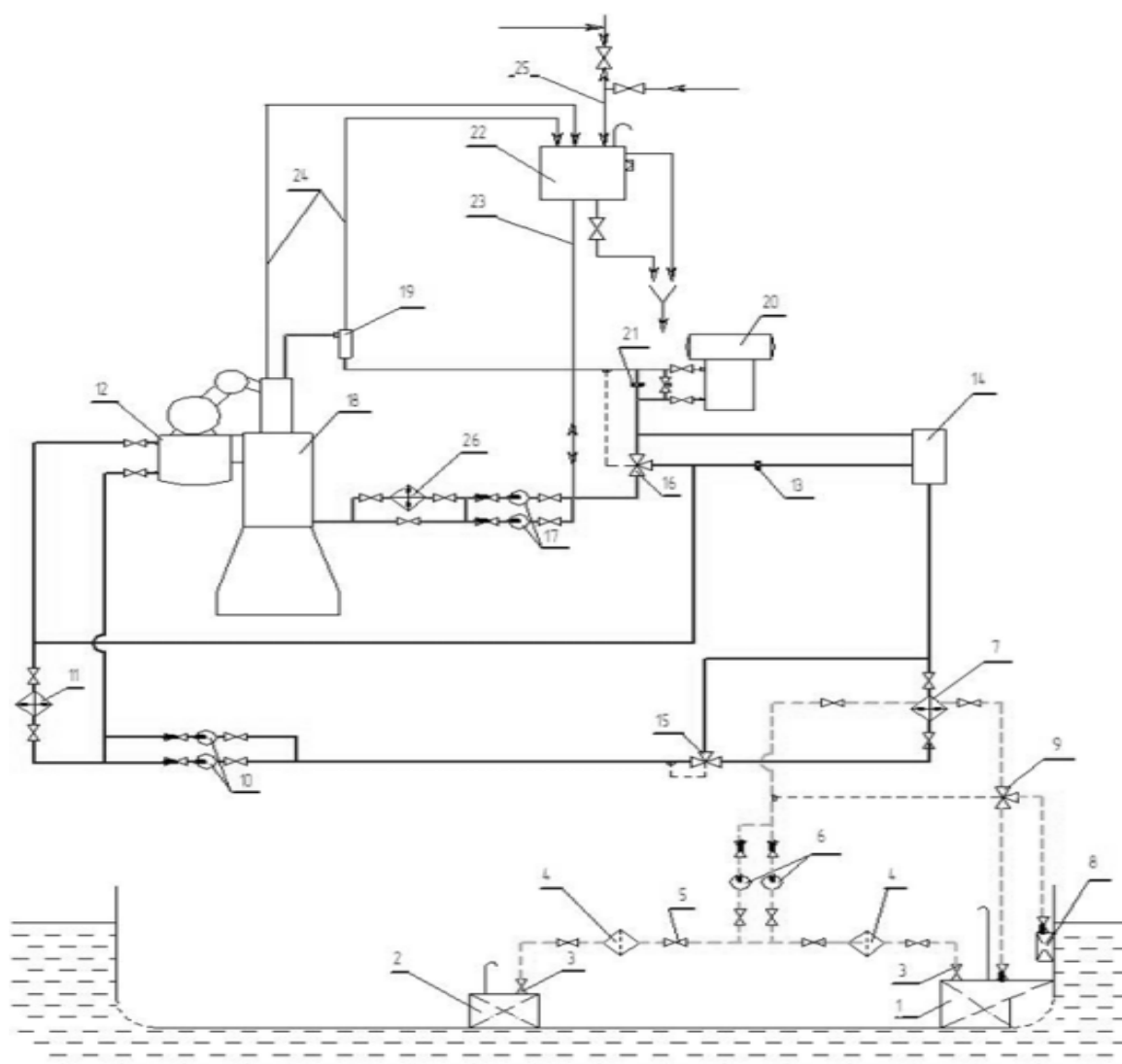


Рис. 2.1 - Схема системи охолодження СГД

Для компенсації об'єму води в замкнутому контурі прісної води при її нагріванні в період роботи двигуна та її охолодженні в період стоянки

встановлюється розширювальна цистерна (поз.22), яка за допомогою трубопроводу компенсаційної води (поз.23) підключається на вхід циркуляційного насоса ВТК, надійно забезпечуючи таким чином йому необхідний запас кавітації.

Крім того, за допомогою спеціального трубопроводу (поз.25) через розширювальну цистерну в систему вводиться додаткова вода, що компенсує витоки та випаровування, а також вводяться різні присадки. При прогріванні двигуна перед пуском у системі охолодження циліндрів використовується паровий підігрівач (поз.26).

2.2 Розробка принципової схеми системи керування електроприводом

Принципова схема управління приводом насосу системи охолодження приведена нижче (рис.2.2). Насос системи охолодження приводиться від асинхронного короткозамкненого двигуна потужністю 105 кВт, напругою 440 В при частоті 60 Гц. Пуск двигуна здійснюється шляхом перемикачів схеми з'єднання з «зірки» на «трикутник». Схема керування одержує живлення від понижувального трансформатора 440/220 В, також вона захищена від к.з. за допомогою запобіжників. Захист електродвигуна від к.з. здійснюється АВ, а від перевантаження - за допомогою теплових реле.

Дистанційне керування електродвигуном виконують з ходової рубки за допомогою кнопочних вимикачів S1 і S2, а також S3 і S4, встановлених в машинному відділенні. Обмотки електродвигуна з «зірки» на «трикутник» перемикаються автоматично. При включенні автомата Q1 на ГРЩ випрямляч U в ланцюзі управління отримує живлення через закриті контакти S4, S2, допоміжний контакт K5.3 і контакти електротеплових реле K6.1, K7.1. Струм випрямляча забезпечує спрацьовування двох реле часу K1 і K2. Натисканням кнопочового вимикача пуску S1 або S3 включають під

напругу котушку контактора КЗ, який спрацьовує і своїми головними контактами включає обмотки двигуна в «зірку», а допоміжними контактами забезпечує: КЗ.4-шунтування контактів пуску S1, S3; КЗ.2 - електроблокування контактора К4 (захист від одночасного включення); КЗ.3 - включення ланцюга котушки лінійного контактора К5. Спрацювання К5 забезпечує включення головними контактами К5.1 електродвигуна в роботу, допоміжними контактами: К5.2 - шунтування допоміжного контакту КЗ.3 і вимикання ланцюга живлення випрямляча; К5.4 - підготовку до роботи ланцюга котушки контактора К4; К5.5 - знеструмлення котушки реле К1. Реле К1 з витримкою часу своїм контактом до 1.1 вимикає струм випрямляча, який в свою чергу обезструмлює реле К2. Контакт К2.1 з витримкою часу розмикає ланцюг живлення котушки контактора КЗ. Його головні контакти КЗ.1 вимикають з'єднання обмоток двигуна «зіркою», одночасно допоміжний контакт КЗ.2 включає контактор К4, контактами якого К4.1 включають «трикутником» обмотки електродвигуна. Таким чином, електродвигун пожежного насоса при натисканні кнопки пуску розганяється з включенням обмоток на «зірку», а потім автоматично при досягненні частоти обертання, що дорівнює 50% номінального значення, перемикається на «трикутник».

Також схема передбачає запуск насоса за допомогою автотрансформатора. У схемі управління перебувати ЕОСР - електронне реле максимального струму - елемент захисту. Реле має наступні характеристики:

- Компактний дизайн на базі мікропроцесорного блоку управління.
- Обробка в реальному часі / висока точність.
- Широкий діапазон регулювання струму: від 0,5А до 60А (безумовно), використовуйте зовнішній ТТ більш 60А.

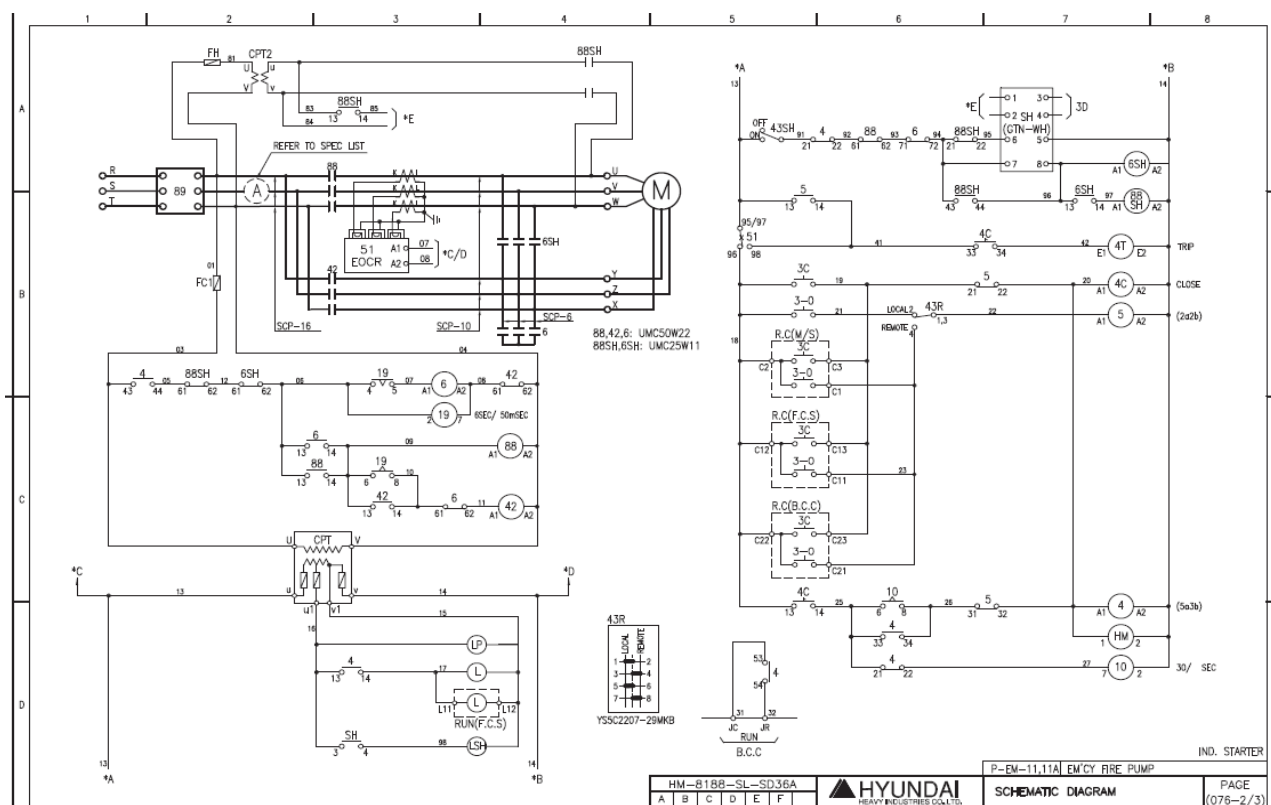


Рис. 2.2 – Принципова електрична схема управління електродвигуном насосу охолодження СГД

- Множинні функції захисту: від перевантаження по струму, від перевантаження по струму, втрати фази, зміна фази, дисбаланс фази, останов, заклинювання, ток землі.
- Пошук та усунення несправностей і відображення причини відключення.
- Тип скидання: ручний скидання, електричний скидання і автоматичне скидання.
- Можливі характеристики часу-струму: зворотний, певний, зворотний теплової.
- Тестова функція для внутрішнього релейного виходу.
- Можливі відмовостійкі і небезпечні режими роботи.
- Зв'язок: MODBUS RS485.
- Функція аналогового виходу $4 \sim 20$ мА.



Рис. 2.3 - EOCR (електронне реле максимального струму)

Щоб не допустити перегріву обмоток трансформатора при багаторазовому запуску, необхідно контролювати їх температуру за допомогою датчиків температури, вбудованих в обмотку. Пусковий автотрансформатор ELHAND, модель EA3R з датчиками температури.

Висновки у розділі

Встановлено, що найбільш прийнятною для дизелів, в даний час, вважається температура води на виході з двигуна, що дорівнює 80°C (двигуни Зульцер, Бурмейстер, Ман і т.д), при якій забезпечується нормальний режим охолодження. Підвищення рівня підтримки температури охолоджувальної води залежить від конструктивних особливостей двигуна, сорту масла і сорту палива.

Також система охолодження суднового дизельного двигуна призначена для охолодження деталей (циліндрових втулок, кришок, поршнів, випускних колекторів та ін.), забезпечуючи нормальні умови роботи. Для забезпечення заданого значення температури охолодження на виході із головного двигуна застосовуються САУ. Типові САУ температури води реалізують традиційний ПІ - закон управління. При цьому особливістю роботи САУ є те, що об'єкти управління працюють у несприятливих умовах високих температур, хвилових коливань, вібрацій тощо. САУ параметрів головного двигуна схильні до впливу значної кількості змінних факторів, врахувати які при проектуванні неможливо, що робить необхідним проведення коригування налаштувань регуляторів, отриманих на основі аналітичних моделей. Традиційні регулятори, як правило, не оснащені системами адаптації параметрів, що знижує якість процесів управління і призводить до позаштатних ситуацій.

Для удосконалення представлених САУ температури охолоджувальної води пропонується дооснащення їх додатковими алгоритмами, що діють на основі штучних нейронних мереж.

3. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПРОЦЕСУ РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ОХОЛОДЖУВАЛЬНОЇ ВОДИ СГД

3.1. Система охолодження суднового дизеля як об'єкт регулювання

Потужні суднові дизелі зазвичай обладнують автономними системами охолодження для циліндрів, кришок, поршнів та форсунок. У деяких випадках, як, наприклад, у допоміжних двигунів або головних двигунів середньої швидкості та невеликої потужності, одна система служить для охолодження групи вузлів двигуна в цілому. Кожна автономна система охолодження сприймається як об'єкт регулювання.

При замкнутій системі (рис. 3.1) через зарубіжний простір(2) насосом (1) прокачується прісна вода, що циркулює по внутрішньому замкнутому контуру. Для компенсації розширення рідини та видалення повітря із замкнутого контуру передбачена розширювальна цистерна (3). Процес відведення теплоти здійснюється послідовно через два теплообмінні пристрої: від газів через стінку циліндрової втулки до прісної води (перший теплообмінник) і від прісної води через теплообмінник (холодильник 4) до забортної води. Забортна вода прокачується через холодильник насосом (5) [3].

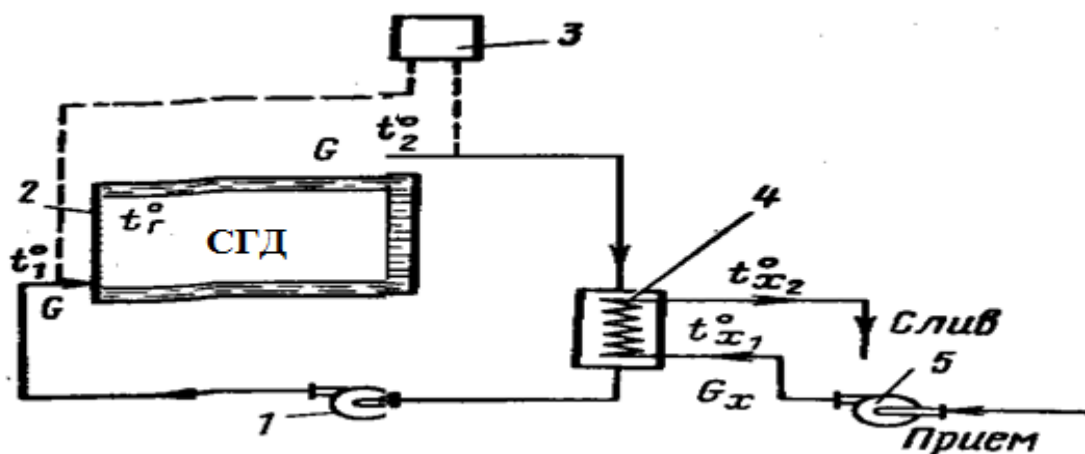


Рис. 3.1 - Теплова схема процесу охолодження

Температурний стан стінки визначається також температурою води на виході з двигуна t_2 , яка приймається як регульований параметр.

На стороні підведення об'єкта регулювання тепловий потік надходить від робочого тіла (газу) через циліндричну втулку до води, що циркулює в зарубіжному просторі. Кількість теплоти, що передається воді $Q_{\text{под}}$ в одиницю часу через стінку циліндрової втулки дорівнює [3]:

$$Q_{\text{под.}} = Q_{\text{дв.}} = k_{\text{дв.}} F_{\text{дв.}} \Delta t_{\text{ср}},$$

де: $k_{\text{дв.}}$ — коефіцієнт теплопередачі від газів до води, $\text{кВт}(\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C})$;

$F_{\text{дв.}}$ — площа теплообміну циліндрів двигуна, м^2 ;

$\Delta t_{\text{ср}}$ — середній температурний напір, $^\circ\text{C}$.

Зміни умов відведення теплоти шляхом регулювання температури води на вході в двигун t можуть бути реалізовані такими конструктивними способами: перепуском у внутрішньому контурі, дроселюванням, обведенням та перепуском у контурі заборотної води.

Спосіб перепуску у внутрішньому контурі (рис. 3.2) дає можливість у розімкнутій системі змінювати температуру води t , що надходить у двигун. При цьому через двигун прокачується постійна кількість води G . Це досягається шляхом змішування холодної води, що підводиться з гарячої, що виходить з двигуна, в приймальному патрубку насоса (у точці А).

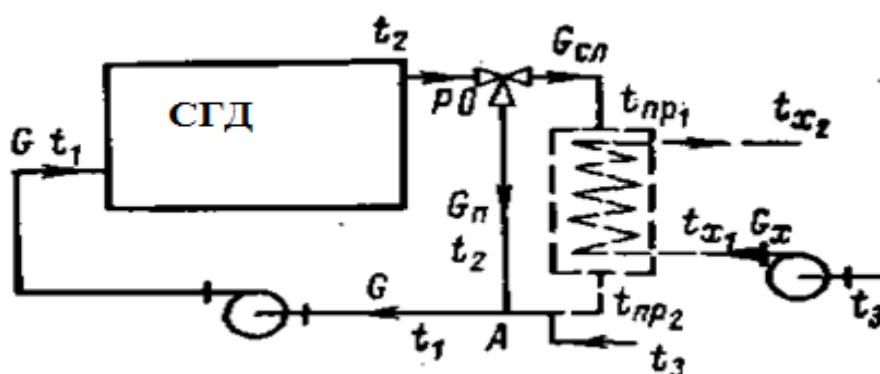


Рис.3.2 – Схема перепуску прісного контуру

Регулюючий орган розподіляє потік води, що виходить з двигуна, на два, направляючи (перепускаючи) одну частину його в контур циркуляції, а другу G_{cl} за борт. Умови матеріального та теплового балансу при цьому визначаються виразами:

$$G = G_n + G_{cl}; Gt_1 = Gnt_2 + G_{cl}(t_2 - t_1)$$

де t_2 — температура води на виході з двигуна, °С.

При замкнутій системі охолоджена вода внутрішнього контуру G_{cl} не зливається за борт, а прямує до холодильника зовнішнього контуру. З холодильника вона забирається насосом. Для змішування в точку А надходить вода з температурою tnp_2 із холодильника (рис.3.2). На відведення теплоти впливатимуть властивості холодильника і процес теплопередачі в ньому, так як вони визначають температуру tnp_2 .

Залежність між перепадом температури води на двигуні t_2-t_1 і перепадом температури прісної води на холодильнику tnp_1-tnp_2 або t_2-tnp_2 отримаємо з рівняння теплового балансу:

$$t_2-tnp_2 = G / G_{cl}(t_2-t_1)$$

Система охолодження суднового двигуна, переважно електродвигуна містить внутрішній контур прісної води, зовнішній контур заборотної води, датчик температури суднового двигуна і електронний блок управління. Внутрішній контур містить трубопровід прісної води, циркуляційний насос прісної води та розширювальний бак. Зовнішній контур містить з'єднані послідовно приймальні та зливні трубопроводи, циркуляційний насос заборотної води та теплообмінник. Датчик температури двигуна з'єднаний з електронним блоком керування та через нього додатково з'єднаний з циркуляційним насосом заборотної води. Теплообмінник виконаний водоводяним, що є ємністю з можливістю прокачування через неї заборотної води, всередині якої проходить частина трубопроводу прісної води. Досягається підвищення ефективної потужності та забезпечується надійна робота двигуна протягом тривалого часу.

3.23Бір експериментальних даних температури охолоджувальної води прісного контуру СГД за допомогою програми – тренажера машинного відділення Engine Room Simulator

Тренажер машинного відділення (Engine Room Simulator) сформовано з урахуванням програми типового курсу IMO Model Course 2.07 Engine-Room Simulator. Віртуальне машинне відділення – безкоштовна студентська версія (VER_FREE) це заснований на ПК повноцінний симулятор машинного відділення розроблений максимально наближенням до вимог STCW та ISM коду. Це означає, що всі важливі системи машинного відділення судна були розроблені та занесені у тренажер. VER_FREE має всі необхідні консолі, лампи, перемикачі, ключі, аналогові пристрої та цифрові сигнали. Мімічні схеми всіх агрегатів СЕУ об'єднані у програмі емуляторі на панелі управління.

Панель управління системи охолодження СГД включає всі вимірювальні пристрої та кнопки, які необхідні для дистанційного контролю та управління оператором ЦПУ температурою прісної води та морської води в системах охолодження. Ця панель використовується для проведення експерименту по збору даних.

На панелі керування процесом охолодження СГД (рис. 3.3) представлені:

- позиційний вимикач для попереднього нагрівача прісної води.
- прилад, що показує рівень води в гравітаційному баку прісної води.
- прилад, що показують температуру прісної води перед СГД (позиція 2 рис.3.3.).
- прилад, що показує темппературупрісної води після СГД (позиція 1 рис.3.3.).

- прилад, що показують температурний режим морської води і тиск перед охолодженням.

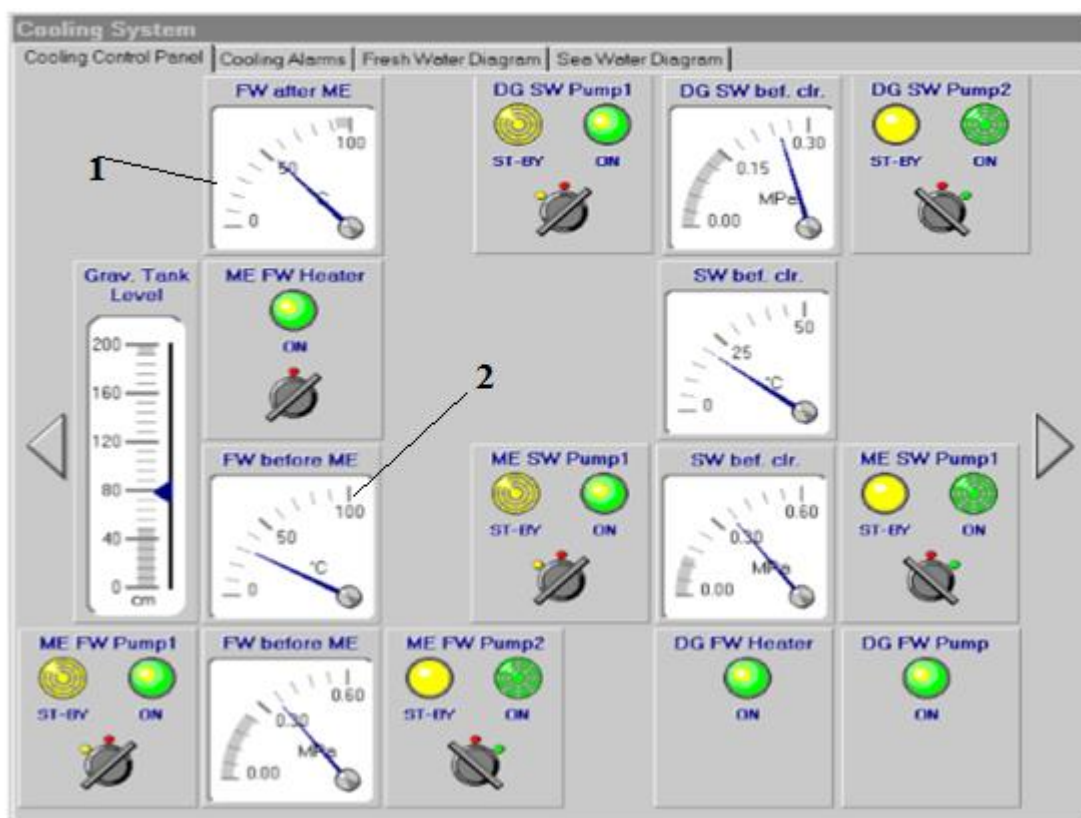


Рис. 3.3 - Мнемосхема панели управління процесом охолодження СГД

Сигналізація пульту системи охолодження включає всі оповіщення відносно підсистем для прісної та морської води (рис.3.4) . Задача цього вікна перегляд цих оповіщень. Панель сигналізації системи охолодження включає всі сигнали тривоги, пов'язані з FW (прісна вода ПВ) і SW (морська або забортна вода ЗВ) підсистемах.

Це вікно містить у собі наступні сигнальні індикатори:

- Тиск прісної води (ПВ) до СГД низький
- Температура ПВ до СГД висока
- Температура ПВ після СГД висока
- Тиск ПВ після циркуляційного насоса низький(1,2)
- Низький рівень ПВ гравітаційного танку

- Високий рівень ПВ гравітаційного танку
- Низький вхідний тиск ЗВ (забортової води)
- Тиск ЗВ після циркуляційного насоса низький(1,2)



Рис. 3.4. - Панель сигналізації системи охолодження СГД

Вертуальний експеримент із зняття показань параметрів регулювання також проводився за допомогою панелі керування (рис.3.5.)

Мнемосхема технологічного процесу регулювання прісної води СГД (рис.3.5). Вікно прісної води ця панель включає в себе мнемосхему FW з активним управлінням, індикаторами стану, обраними датчиками. Огляд системи FW є основним завданням цього вікна. Активні меню програми дозволяють легко управляти іншими взаємодіючими системами.

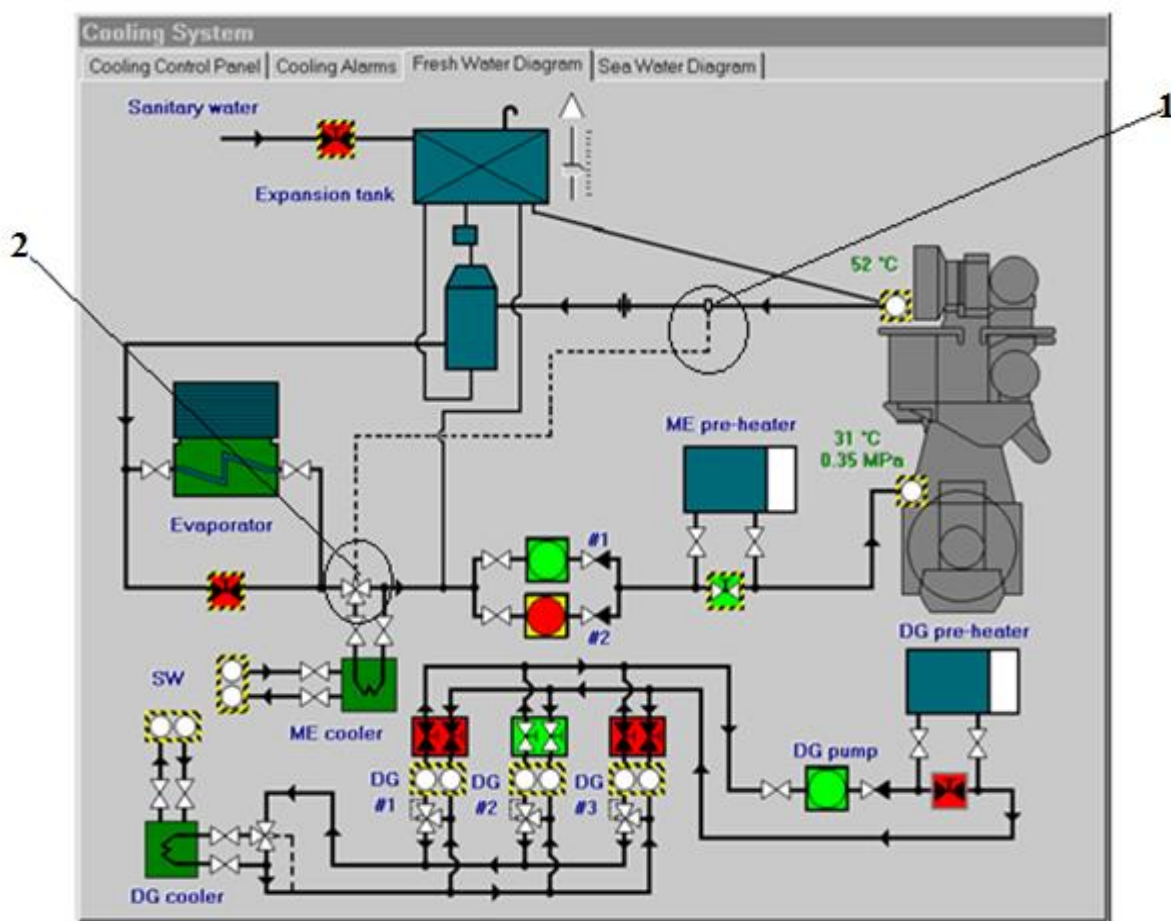


Рис. 3.5 – Мнемосхема управління температурой води пресного контура СГД

Цей кнопочний елемент керування та індикатори:

- Індикатор стану циркуляційного насоса ME/FW (#1, #2).
- МО / FW підігрівач перепускного клапана.

На рис. 3.5. позиція 1 – датчик температури води на виході СГД, позиція 2 – треходовий клапан для регулювання методом обвода пресної води.

Мнемосхема морської води (SW)

Схема включає в себе мнемосхему SW з

активним управлінням, індикаторами стану і

гарячими точками. SW потік огляду контролює основним завданням цього вікна (рис. 3.6). SW входить в систему за рахунок високих і низьких кінгстонів на протилежних сторонах корабля. Низьке всмоктування використовується у відкритому морі, де він, швидше за все, як іраніше занурення в якості суднових валків і вісмол. Високе розрідження може бути використано в гавані, особливо

коли вода дрібна, рециркуляція забезпечує температуру води передохолоджувачами.

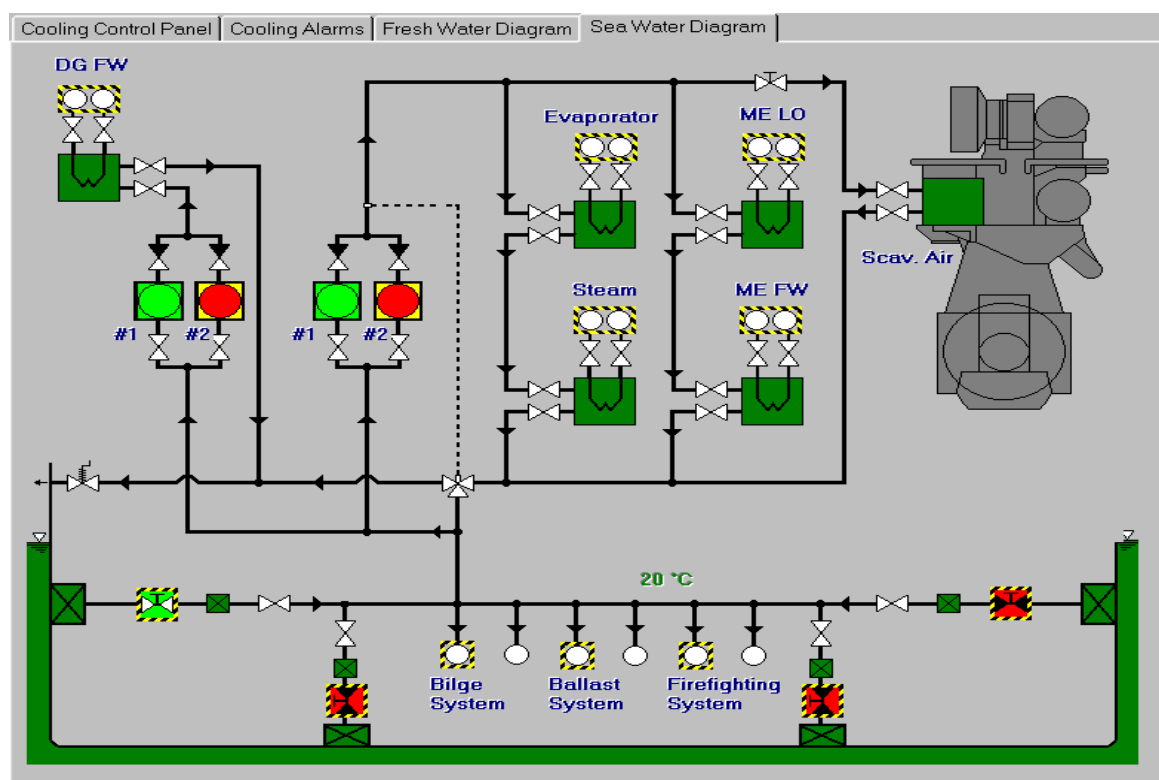


Рис. 3.6 - Мнемосхема управління температурой води забортного контура СГД

Це вікно містить у собі наступні активні елементи керування та індикатори стану:

- ⇒ Положення клапанів кінгстону (з обох сторін) (на схемі червоним коляром).
- ⇒ Індикатор стану циркуляційного насоса ДГ SW (#1, #2).
- ⇒ Індикатор стану циркуляційного насоса СГД SW (#1, #2).
- ⇒ Датчик, який показує температуру SW (20 °C).

Система терморегулювання головних суднових дизелів повинна підтримувати постійну (в межах заданої нерівномірності) температуру охолоджуючої води до 65-80 ° C при різних навантаженнях і температурах забортної води. Сняття даних по температурі води производилось також с помощью панели управления (рис.3.7)

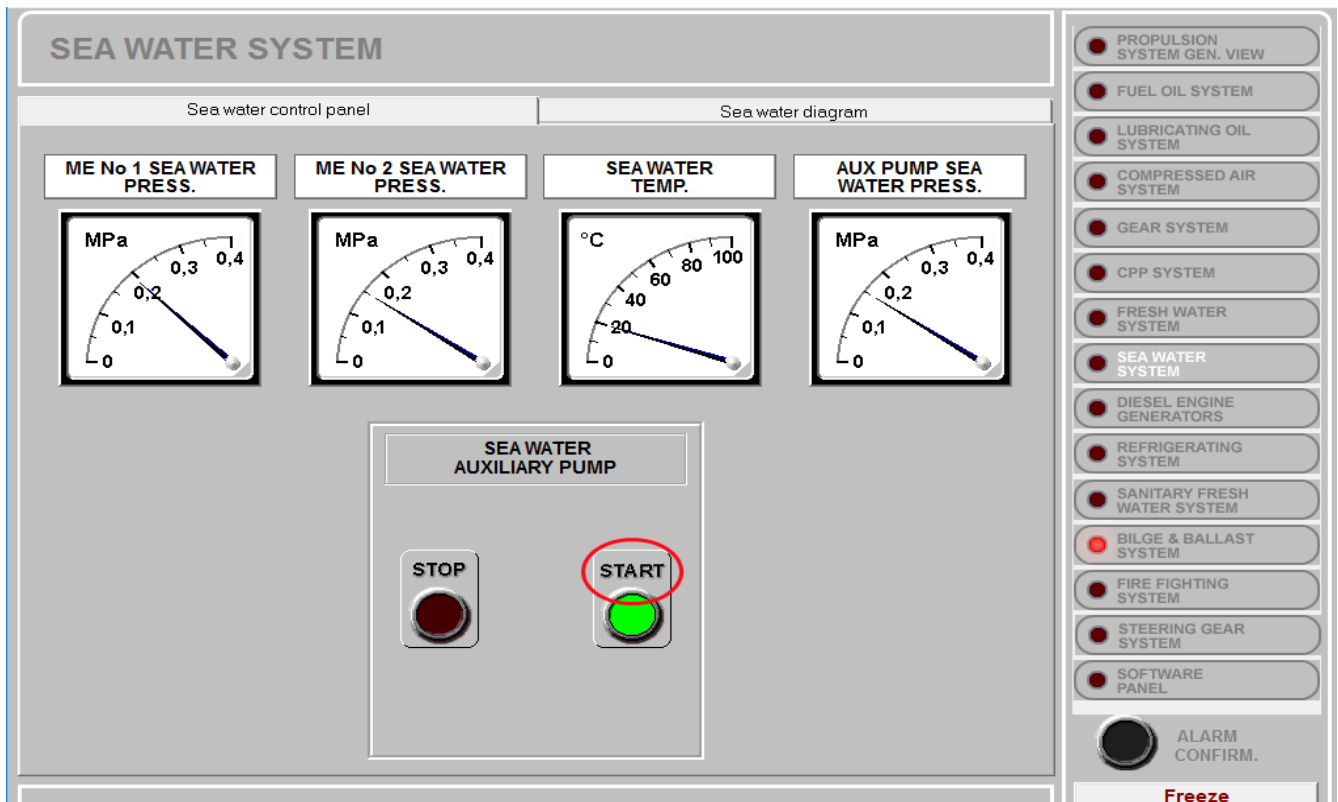


Рис. 3.7. - Панель управління обладнанням системі охолодження СГД

Експериментальні дані отримані у процесі спостереження на мнемосхемах (рис.3.3. – 3.7.), програми – тренажера емулятора машинного відділення, задинамікою температури води за часом за номінального навантаження СГД (75 %) представлені таблиці. (табл.3.1)

Таблиця 3.1 - Експериментальні дані температури охолоджувальної води на виході СГД

t, c,	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\Theta, ^\circ C,$	12	38,7	54,9	64,8	70,7	74,3	76,6	77,9	78,7	80

3.3.Разработка математической модели объекта управления

Для розробки автоматизованої системи регулювання (АСР) температурним режимом необхідно знання математичної моделі об'єкта управління. І одним із порівняно сучасних методів динамічної ідентифікації [4], заснованих на результатах спостереження за змінами значень контрольованих параметрів об'єкта управління на певному інтервалі часу є метод Калмана [5]. **Постановка задачі.** Розглянемо завдання ідентифікації з прикладу знаходження математичної моделі об'єкта судновий енергетичної установки СЕУ (головного двигуна) для каналу виміру «температура охолоджуючої води» [6]. На рис. 3.8 представлена схема регулювання температури охолоджувальної води $t_2 = T_{вих}$, що діє найбільш поширеним способом перепуску.

Результати дослідження. Наведемо аналітичний опис представленої системи [2].

Кількість відведеної теплоти визначається формулою теплового балансу [3]:

$$q_{отв} = c_v G_v g (T_{вих} - T_x), \quad (3.1)$$

де c_v – питома теплоємність води, G_v – витрата прісної води через зарубіжний простір, g – положення регулюючого органу (РО) (триходового клапана), T_x – температура води після охолоджувача (t_1). Кількість підведеної теплоти виражається функцією температури газів та регульованої температури на виході з двигуна:

$$q_{под} = f(T_g; T_{вих}). \quad (3.2)$$

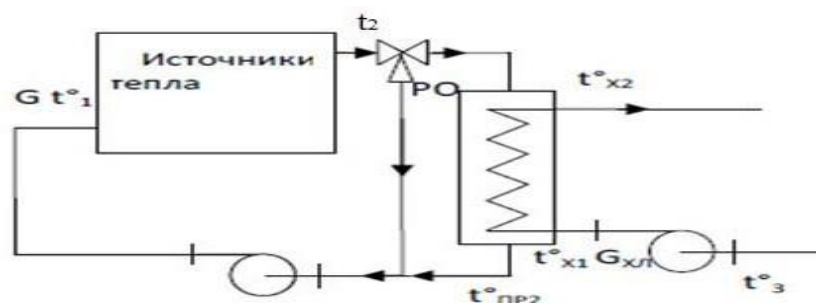


Рис.3.8. – Схема регулювання температури охолоджувальної води перепуском

Відповідно до виразу (3.1)

$$q_{отв} = f(g; T_{вих}; T_x). \quad (3.3)$$

Після розкладання залежностей (3.1), (3.2) до ряду Тейлора і використання його лінійних членів підставимо лінеаризовані вирази для $q_{отв}$ $q_{под}$ у формулу 3.3 виражаючи нестабільний (динамічний) стан системи (порушення статичної рівноваги між кількістю підведеної

$$c_{п} = dT_{вих}/dt = q_{под} - q_{отв}, \quad (3.4)$$

где $c_{п}$ – наведена теплоємність системи охолодження. З урахуванням умов статичної рівноваги отримуємо рівняння динаміки системи охолодження двигуна:

$$c_{п} \frac{dT_{вих}}{dt} + \left[\left(\frac{\partial q_{отв}}{\partial T_{вих}} \right)_0 - \left(\frac{\partial q_{под}}{\partial T_{вих}} \right)_0 \right] \Delta T_{вих} = \left(\frac{\partial q_{под}}{\partial T_{газ}} \right)_0 \Delta T_{газ} - \left(\frac{\partial q_{отв}}{\partial g} \right)_0 \Delta g - \left(\frac{\partial q_{отв}}{\partial T_x} \right)_0 \Delta T_x. \quad (3.5)$$

Рівняння (3.4) розділимо на фактор стійкості температурного режиму охолодження дизеля (3.5):

$$F_{\epsilon} = \frac{\partial q_{отв}}{\partial T_{вих}} - \frac{\partial q_{под}}{\partial T_{вих}} \quad (3.6)$$

і введемо відносні координати $y_T = \Delta T_x / T_{хо}$; $y_0 = \Delta T_{вих} / T_{вих0}$; $y_g = \Delta T_g / T_{го}$; $x = \Delta g / g_0$. Після введення постійної часу T , коефіцієнтів посилення по досліджуваних каналах K_g , K_g , K_x отримаємо рівняння динаміки системи охолодження двигуна (інерційна ланка):

$$p^{(T+1)} y_0 = K_z y_z - K_g x_g - K_x y_m. \quad (3.7)$$

Для аналізу температурного режиму суднового двигуна (СГД) фіксувалося наростання температури води, що охолоджує, при додатку номінального навантаження. Результати вимірювань наведено у таблиці 3.1. Потрібно визначити постійну часу нагрівання двигуна та отримати математичну модель процесу для системи регулювання температури охолоджувальної води на виході з СГД (АСР t_2).

Активний експеримент заснований на завданні об'єкта спеціально сформованих керуючих або впливів, що обурюють. По реакції об'єкта ці впливи встановлюються і оцінюються його динамічні властивості. Зазвичай вивчається реакція на стрибкоподібні, гармонійні чи імпульсні впливи. Отримані перехідні або частотні характеристики дозволяють визначити, наприклад, для лінійної системи передавальні коефіцієнти, постійні часу окремих ланок і динамічні властивості об'єкта в цілому.

Не всім систем може бути поставлений активний експеримент. Іноді він може бути неприйнятним через дорожнечу спеціального додаткового обладнання, високу вартість його монтажу, нерідко його реалізація неможлива за умовами техніки безпеки. У цих випадках застосовується пасивний експеримент, Сутність його полягає у фіксації значення вхідних та вихідних змінних у нормальних експлуатаційних динамічних режимах.

Одним із порівняно нескладних сучасних методів динамічної ідентифікації, що базуються на результатах пасивного експерименту, є метод Р. Калмана. Сутність його полягає в наступному [14]:

- в процесі експлуатації через суворо фіксовані інтервали часу записують значення вхідних та вихідних параметрів;
- вибирають найпростіший вид аналітичної моделі, записаної у вигляді різницевого рівняння того чи іншого порядку;
- за результатами експерименту та прийнятого типу моделі методом мінімуму суми квадратів відхилень визначають коефіцієнти різницевого рівняння;
- вирішують різницеве рівняння та порівнюють отримані динамічні характеристики з експериментом;
- при великих відхиленнях задаються різницеvim рівнянням вищого порядку та повторюють розрахунок.

Зіставлення викладеної вище методики динамічної ідентифікації з порядком виконання статичної ідентифікації свідчить про їхню аналогію. Відмінність

полягає лише в моделях: модель у статичі описується алгебраїчним рівнянням, динамічна модель - різницеvim.

Для диференціального лінійного рівняння з k -го порядку аналогом буде різницеve рівняння виду:

$$y_n = A_0 y_{n-1} + A_1 y_{n-2} + \dots + A_{k-1} y_{n-k} + B_0 x_{n-1} + B_1 x_{n-2} + \dots + B_{k-1} x_{n-k},$$

де n - номер точки експерименту; A, B - коефіцієнти різницевого рівняння. Воно може бути прийняте як вихідна модель при динамічній ідентифікації.

Оскільки порядок об'єкта, що ідентифікується, зазвичай невідомий, слід починати з найбільш простої моделі, а саме — різницевого рівняння першого порядку виду

$$y_n = A_0 y_{n-1} + B_0 x_{n-1}.$$

Якщо модель виявиться недостатньо адекватною, слід взяти як модель різницеve рівняння другого порядку $y_n = A_0 y_{n-1} + A_1 y_{n-2} + B_0 x_{n-1} + B_1 x_{n-2}$.

Далі, використовуючи методику мінімізації суми квадратів відхилень, тобто. функціоналу виду

$$F = \min \sum_{i=1}^n (y_{xi} - y_{pi})^2,$$

Отримуємо систему рівнянь

$$\frac{\partial F}{\partial A_0} = 0; \quad \frac{\partial F}{\partial A_1} = 0; \quad \frac{\partial F}{\partial B_0} = 0; \quad \frac{\partial F}{\partial B_1} = 0.$$

изякіх можна определить коэффициенти A_0, A_1, B_0, B_1 , які відповідають критерію оптимальності.

Розв'язання задачі ідентифікації об'єкта управління (контроль прісної води СГД по каналу положення клапана – температура води на вихіді СГД)

Для аналізу температурного режиму дизеля фіксувалося наростання температури при додатку номінального навантаження (75 %). Результати вимірювань наведено у таблиці 3.2. Потрібно визначити постійну часу нагріву T СГД та передатну функцію об'єкта управління W .

Табл.3.2. - Експериментальні та розрахункові дані

t, с	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\Theta, ^\circ C$	12	38,7	54,9	64,8	70,7	74,3	76,6	77,9	78,7	80
$\Theta_{\text{модели}}, ^\circ C$	—	—	54,91	—	70,70	—	—	—	78,6	—

З даних експерименту видно, що температура змінилася від $\Theta_{\text{нач}} = 12^\circ C$ до $\Theta_{\text{уст}} = 80^\circ C$. Для ідентифікації використовуємо різницеве рівняння першого порядку

$$\Theta_n = A_0 \Theta_{n-1} + B_0 \Theta_{\text{уст}}$$

Для спрощення розрахунків приймемо інтервал часу вимірювань вимірів $\Delta t = 2\tau$

Для мінімізації суми квадратів відхилень запишемо

$$\text{функціонал } F = \min \sum_1^m (\Theta_{\text{ен}} - \Theta_n)^2 = \min \sum_1^m (\Theta_n - A_0 \Theta_{n-1} - B_0 \Theta_{\text{уст}})^2.$$

Прирівняємо нулю приватні похідні від

$$\text{функціоналу: } \frac{\partial F}{\partial A_0} = \sum_1^m 2(\Theta_n - A_0 \Theta_{n-1} - B_0 \Theta_{\text{уст}}) \Theta_{n-1} = 0;$$

$$\frac{\partial F}{\partial B_0} = \sum_1^m (\Theta_n - A_0 \Theta_{n-1} - B_0 \Theta_{\text{уст}}) \Theta_{\text{уст}} = 0$$

З урахування того, що

$$\sum_1^m \Theta_{\text{уст}} = m \Theta_{\text{уст}} \text{ и } \Theta_{\text{уст}} \neq 0,$$

отримаємо систему канонічних рівнянь:

$$A_0 = \sum_1^m \Theta_{n-1} + B_0 m \Theta_{\text{уст}} \Theta_{\text{уст}} = \sum_1^m \Theta_n;$$

$$A_0 = \sum_1^m \Theta_{n-1}^2 + B_0 \Theta_{\text{уст}} \sum_1^m \Theta_{n-1} = \sum_1^m \Theta_n \Theta_{n-1}.$$

Звідки:

$$A_0 = \frac{m \sum_1^m \Theta_n \Theta_{n-1} - \sum_1^m \Theta_{n-1} \sum_1^m \Theta_n}{m \sum_1^m \Theta_{n-1}^2 - \left(\sum_1^m \Theta_{n-1} \right)^2};$$

$$B_0 = \frac{\sum_1^m \Theta_n \sum_1^m \Theta_{n-1}^2 - \sum_1^m \Theta_{n-1} \sum_1^m \Theta_n \Theta_{n-1}}{\Theta_{уст} \left(m \sum_1^m \Theta_{n-1}^2 - \left(\sum_1^m \Theta_{n-1} \right)^2 \right)},$$

де m – кількість експериментальних точок.

Так як інтервал часу прийнято рівним 2 хв, то з отриманих експериментально даних при $m=4$ вибираємо точки (табл.3.4):

Табл.3.4 - розрахункові дані

t, хв	0	2	4	6	8
$\Theta_n, ^\circ C$	—	54,9	70,7	76,6	78,7
$\Theta_{n-1}, ^\circ C$	12	54,9	70,7	76,6	—

Тоді

$$\sum_1^4 \Theta_n = 282; \quad \sum_1^4 \Theta_{n-1} = 215; \quad \sum_1^4 \Theta_{n-1}^2 = 14\,139;$$

$$\sum_1^4 \Theta_n \Theta_{n-1} = 16\,110$$

Підставляючи отримані значення у вирази для A_0 и B_0 , отримуємо $A_0=0.368$; $B_0=0.632$, и разностне рівняння при $\Theta_{уст} = 80^\circ C$ має вид

$$\Theta_n = 0,368\Theta_{n-1} + 50,5$$

Для перевірки адекватності моделі за отриманим виразом розраховано значення Θ при тех же інтервалах часу (табл. 3.2).

Порівнюючи розрахункові дані з даними експерименту, переконуємось у хорошій адекватності моделі об'єкту. Це дозволяє зробити висновок про можливість опису об'єкта диференціальним рівнянням першого порядку виду

$$T \frac{d\Theta}{dt} + \Theta = \Theta_{уст}.$$

Рішенням якого є

$$\Theta = \Theta_{уст} (1 - e^{-t/T}) + \Theta_{нач} e^{-t/T},$$

де полагає $\Theta = \Theta_n$, $\Theta_{нач} = \Theta_{n-1}$ и $t = n \Delta t$, при $n = t$ отримаємо

$$A_0 = e^{\Delta t/T},$$

откуда

$$T = -\Delta t / \ln A_0 = -2 / \ln 0,368 = 2/0,9997 = 2 \text{ с}.$$

Постійне нагрівання дорівнює $T = 2$ с, та диференціальне рівняння має

$$\text{вигляд } 2 \frac{d\Theta}{dt} + \Theta = 80.$$

Передатна функція об'єкта управління з урахуванням перетворення Лапласа має

вигляд:

$$W(s) = K / (T(s) + 1) = 80 / 2(s) + 1$$

При навантаженні 75 % від номінальної, додане положення клапана = 40 % ходу/С, таким чином коефіцієнт посилення об'єкта $K = 80/40 = 2$. Запізнення приймається рівним 0,5 хвилин, виходячи з досвіду спостереження на процесом управління.

Висновки до розділу 3

- за допомогою літературних джерел був описаний процес математичного моделювання процесу охолодження СГД;
- за допомогою суднового тренажера були проведені експерименти по спостереженню за динамікою температури води на виході із СГД та отримані експериментальні дані;
- за допомогою методу ідентифікації Р. Калмана та експериментальних даних була отримана математична модель об'єкта управління. Модель показала високу ступінь адекватності показникам робочого процесу і може бути використана при розрахунку параметрів ПІ – регулятора в САУ процесу охолодження СГД.

4. РОЗРОБКА НЕЙРОМЕРЕЖНОЇ СИСТЕМИ ПРОГНОЗУВАННЯ ДИНАМІКИ ТЕМПЕРАТУРИ ОХОЛОДЖУВАЛЬНОЇ ВОДИ

4.1. Теоретичні підходи в галузі нейромережових технологій

Штучний нейрон імітує у першому наближенні властивості біологічного нейрона. На вхід штучного нейрона надходить кілька сигналів, кожен із яких є виходом іншого нейрона. Кожен вхід множиться на відповідну вагу, аналогічну синаптичній силі, і всі твори підсумовуються, визначаючи рівень активації нейрона.

На рис. 4.1 представлена модель, що реалізує цю ідею. Хоча мережеві парадигми дуже різноманітні, в основі багатьох їх лежить ця конфігурація. Тут безліч вхідних сигналів, позначених $x_1, x_2, \dots, x_n$, надходить на штучний нейрон. Ці вхідні сигнали, що сукупно позначаються вектором X , відповідають сигналам, які надходять у синапси біологічного нейрона [8].

Кожен сигнал множиться на відповідний «вага» $w_1, w_2, \dots, w_n$, і надходить на сумирний блок, позначений Σ . Кожна вага відповідає силі одного біологічного синаптичного зв'язку. (Багато ваг у сукупності позначається вектором W .) Підсумовуючий блок, відповідний тілу біологічного елемента, складає алгебраїчно зважені входи, створюючи вихід, який позначимо як S . У векторних позначеннях це можна записати так:

$$S = XW$$

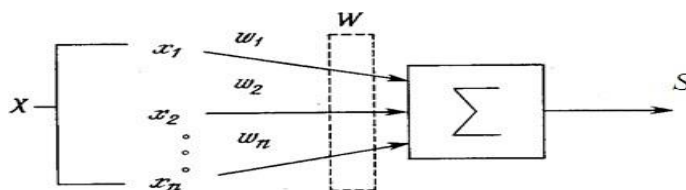


Рис. 4.1. - Штучний нейрон

Отриманий сигнал S перетворюється на активаційну функцію нейрона, яка формує вихідний сигнал Y . Від виду активаційної функції залежить набір функціональних можливостей нейромережі, а також способи її навчання.

Математичний нейрон, як та її біологічний прототип, існує у двох станах. Якщо зважена сума вхідних сигналів S не досягає деякої порогової величини,

то математичний нейрон не збуджений і вихідний сигнал дорівнює нулю. Якщо ж вхідні сигнали досить інтенсивні та його сума досягає порога чутливості, то нейрон перетворюється на збуджений стан і його виході утворюється сигнал $Y = 1$ [9]..



Рис. 4.2 – Структура штучного нейрона

Активаційна функція може бути звичайною лінійною функцією $Y = k(S)$, де k – постійна (рис. 4.3) або граничною функцією виду:

$$Y = 1, \text{ якщо } S \geq P,$$

$$Y = 0 \text{ у інших випадках,}$$

где P – деяка постійна гранична величина (рис. 4.3).

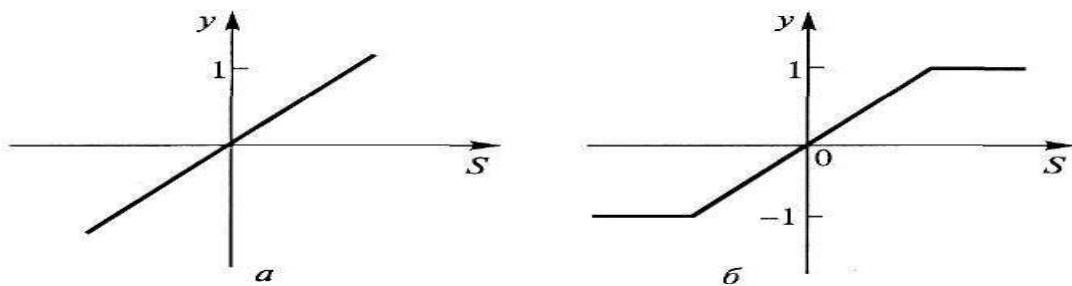


Рис. 4.3. - Лінійні функції активації:

а) - з необмеженою; б) - з обмеженою областю зміни

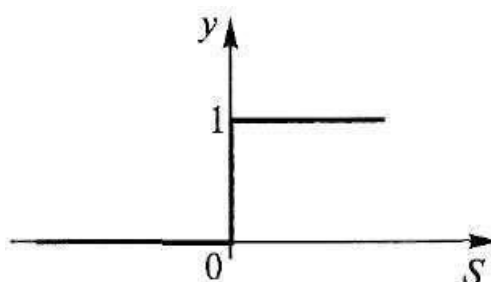


Рис. 4.4. - Порогова функція активації (функція Хевісайду)

Для того, щоб більш точно змодельювати нелінійну передатну характеристику біологічного нейрона, як активаційна функція нейрона часто використовується логістична або «сигмоїдальна» (S-подібна) функція, показана на рис. 4.5. Така функція представляє нейронні мережі набагато більші можливості.

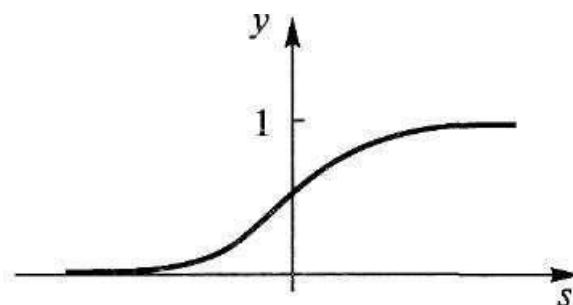


Рис. 4.5. - Сигмоїдальна логістична функція

Ця функція була запропонована до застосування Уїдроу та Хоффом, математично вона виражається як $F(x) = 1/(1 + \exp(-x))$. Тоді:

$$Y = \frac{1}{1 + \exp(-S)}.$$

З введенням такої безперервної нелінійної функції активації коло завдань, що вирішуються, значно розширилося. Мережа навчається, щоб деякої безлічі входів давати бажане безліч виходів. Кожна така вхідна (або вихідна) множина розглядається як вектор. Навчання здійснюється шляхом послідовного пред'явлення вхідних векторів з одночасним підстроюванням ваг відповідно до певної процедури. У процесі навчання ваги мережі поступово стають такими, щоб кожен вектор вхідний виробляв вихідний вектор. На рис. 4.6 позначено процес навчання нейронної мережі[10].

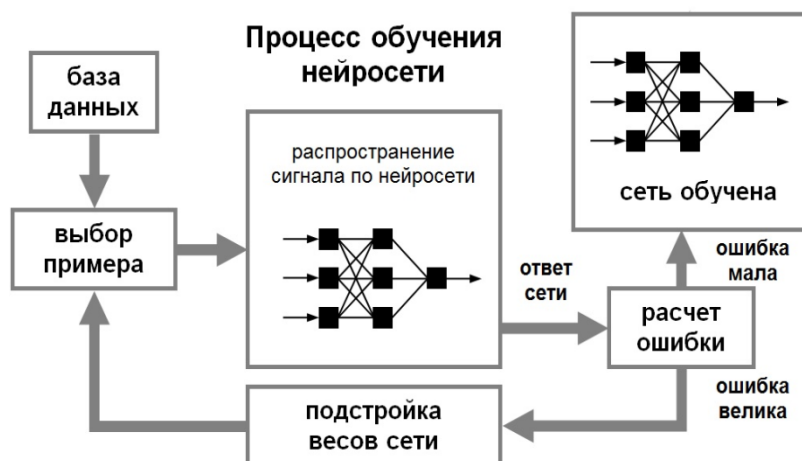


Рис. 4.6. - Процес навчання ШНМ

Характерною властивістю ШНМ є її здатність до навчання, що полягає у виробленні правильної реакції на подані їй різні входні сигнали. Існують такі можливості навчання ШНМ:

- зміна конфігурації мережі шляхом утворення нових або виключення деяких існуючих зв'язків між нейронами;
 - зміна елементів матриці зв'язку (ваг);
 - зміна характеристик нейронів (виду й параметрів активаційної функції й т. д.).
- Найбільшого поширення сьогодні отримав підхід, при якому структура мережі задається апіорно, а мережа навчається шляхом настроювання матриці зв'язків (вагових коефіцієнтів) W . Від того, наскільки вдало побудована ця матриця, залежить ефективність даної мережі. У цьому випадку навчання полягає у зміні за певною процедурою елементів матриці W при послідовному поданні мережі деяких векторів, що навчають [11].

У зв'язку з цим штучний нейрон може бути представлений у такий спосіб (рис. 4.7).



Рис. 4.7.— модель навчання штучного
нейрона:

W - вагі, $f(a)$ – функція активації

У процесі навчання ваги стають такими, що під час надходження вхідних сигналів мережа виробляє відповідні необхідні вихідні сигнали. Розрізняють навчання з учителем і без учителя. Перший тип навчання припускає, що є «учитель», що задає пари, які навчають — для кожного вхідного вектора, що навчає, необхідний вихід мережі. Для кожного вхідного вектора, що навчає, обчислюється вихід мережі, порівнюється з відповідно необхідним, визначається помилка виходу, на основі якої й коректуються ваги. Пари, що навчають, подаються мережі послідовно й ваги уточнюються доти, поки помилка за такими парами не досягне необхідного рівня. Більшість сучасних алгоритмів навчання виросло із правила Гібба [11]. Наприкінці 40-х років ХХ ст. років Д. О. Гібб теоретично встановив, що асоціативна пам'ять у біологічних системах викликається процесами, що змінюють зв'язки між нервовими клітинами. Відповідно до установленого їм правила, що називається «правилом Гібба», при одночасній активації (порушенні) двох нейронів синаптична сила (вага їхнього зв'язку) зростає. Таким чином, часто використовувані зв'язки в мережі підсилюються, що пояснює феномен звички й навчання повторенням.

$$w = \gamma x_i y_j,$$

де x_i — вихід i -го вхідного нейрона; y_j — вихід j -го нейрона; γ — коефіцієнт, що впливає на швидкість навчання.

4.2. Інтерфейс програми та розробка нейронної мережі прогнозу динаміки температури охолоджувальної води

Інтерфейс програми NNTool спеціалізованого математичного пакету MatLab (online) допускає роботу одношаровими та двошаровими нейронними мережами [15].

Виклик GUI-інтерфейсу NNTool можливий або командою **nntool** з командного рядка, або з вікна запуску програм Launch Pad за допомогою опції NNTool із розділу Neural Network Toolbox. Після виклику на екрані терміналу з'являється вікно Network/Data Manager (Керування мережею/даними) (рис. 4.8).

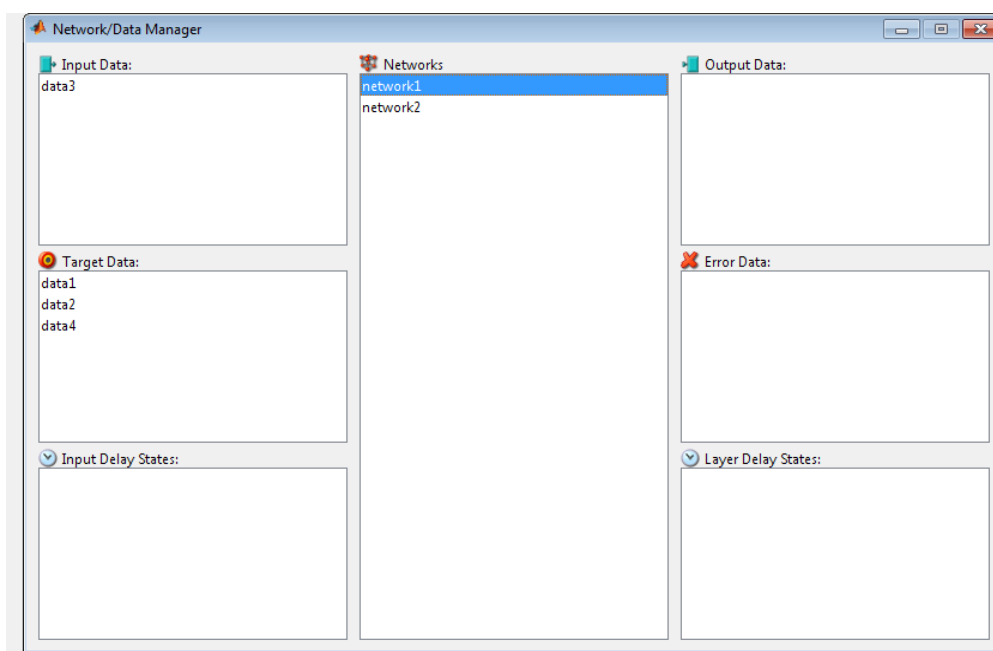


Рис. 4.8 – Інтерфейс робочого вікна

- Щоб створити нейронну мережу, необхідно виконати такі операції: Сформувати послідовності входів и целей (кнопка), либо загрузить их из рабочей области системы MATLAB или из файла (кнопка Import).

Вікно New. Це вікно показано на рис. 4.9 і включає 2 області редагування тексту для запису імені даних (область Name) і введення самих даних (область Value), а також 6 кнопок для вказівки типу даних, що вводяться.

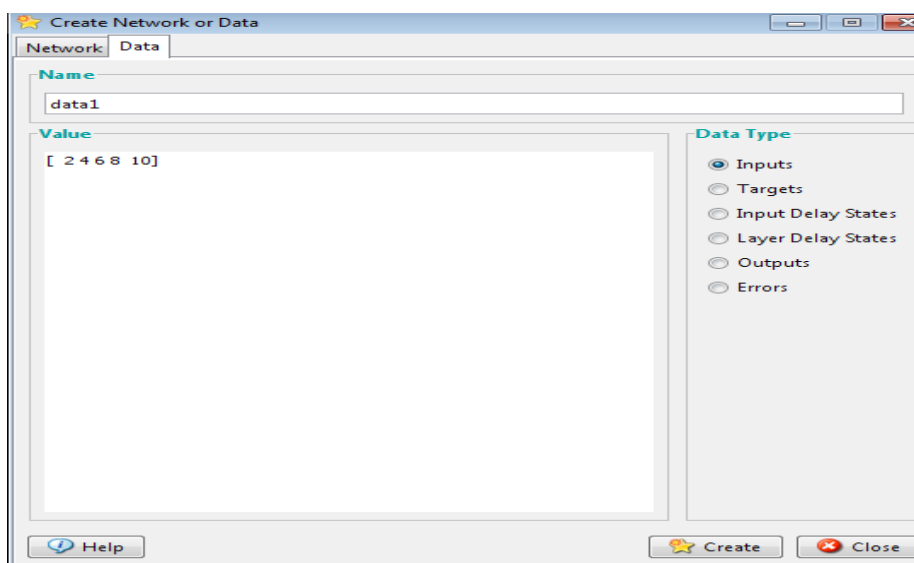


Рис. 4.9 – Вікно області редагування ШНМ

Розрізняють такі типи даних:

Inputs (Входи) – послідовність значень входів;

Targets (Цілі) – послідовність значень мети;

Input Delay States (Стани ЛЗ входу) – початкові умови лінії затримки на вході;

Layer Delay States (Стани ЛЗ шару) – початкові умови лінії затримки у шарі;

Outputs (Виходи) – послідовність значень виходу мережі;

Errors (Помилки) – різниця значень цілей та виходів.

Нами були задані послідовності входу (час спостереження за процесом змінення температури води та цілі – температура охолоджуючої води на вихід СГД), тобто типи даних Inputs і Targets.

Вікно Create New Network. Це вікно показано на рис. 4.10 і включає поля для завдання параметрів мережі, що створюється. Залежно від типу мережі кількість полів та їх назви змінюються [16].

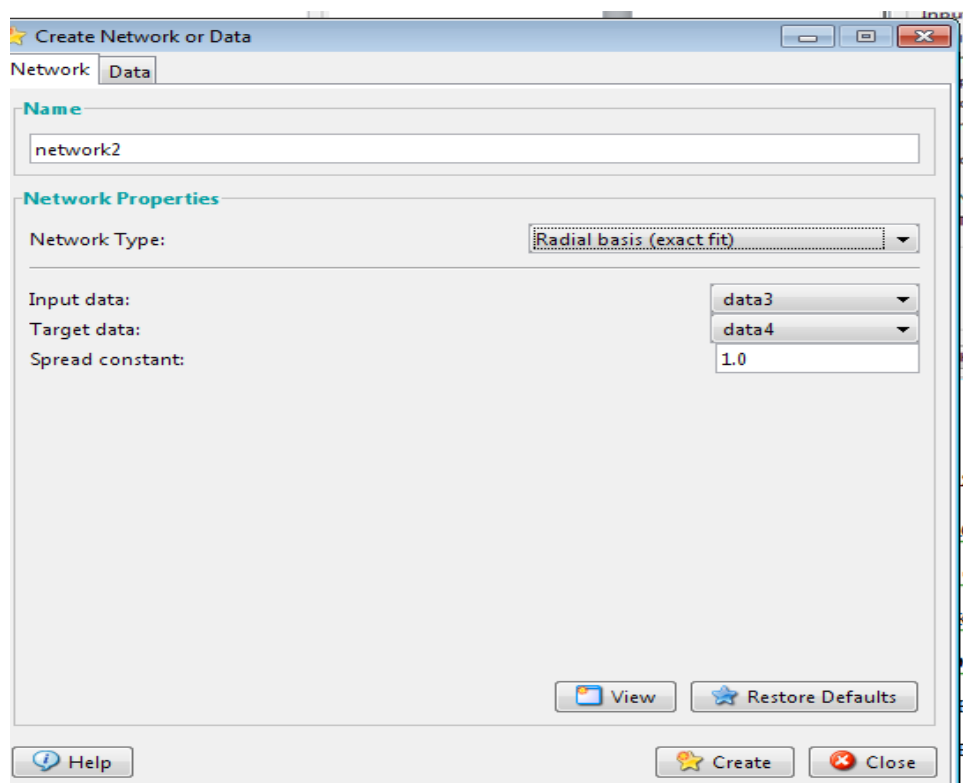


Рис. 4.10 - Вибір радіально базисну нейромережі

Звернемося до опису полів.

- **NetworkName** (Ім'я мережі) – стандартне ім'я мережі, яке присвоюється GUI-інтерфейсом NNTool; у процесі створення нових мереж порядковий номер змінюватиметься автоматично.
 - **NetworkType** (Тип мережі) – список мереж, доступних для роботи з інтерфейсом NNTool. Інтерфейс NNTool дозволяє створювати нейронні мережі лише з одним або двома шарами.
 - **Inputranges** (Діапазони входу) – допустимі межі входів, які або призначаються користувачем, або визначаються автоматично на ім'я вхідної послідовності, що вибирається зі списку **GetfromInp**.
 - **Trainingfunction** (Функція навчання) – перелік навчальних функцій.
 - **Adaptionlearningfunction** (Функції налаштування режиму адаптації) – список функцій налаштувань.
 - **Performancefunction** (Функція якості навчання) – перелік функцій оцінки якості навчання.
 - **Numberoflayers** (Кількість шарів) – кількість шарів нейронної мережі.
- Properties for** (Властивості) – список шарів: Layer 1 (Шар 1), Layer 2 (Шар 2).

Number of neurons (Кількість нейронів) – кількість нейронів у шарі.

Transfer function (Функція активації) – функція активації шару.

В даному випадку нами обрано змінну `network1`, яка належить до класу `network object` та описує нейронну мережу. Після того, як ця змінна експортована в робочу область, можна, наприклад, побудувати модель нейронної мережі в системі Simulink за допомогою оператора Gensim. Діалогова панель Network та її архітектура показана на рис. 1.19.

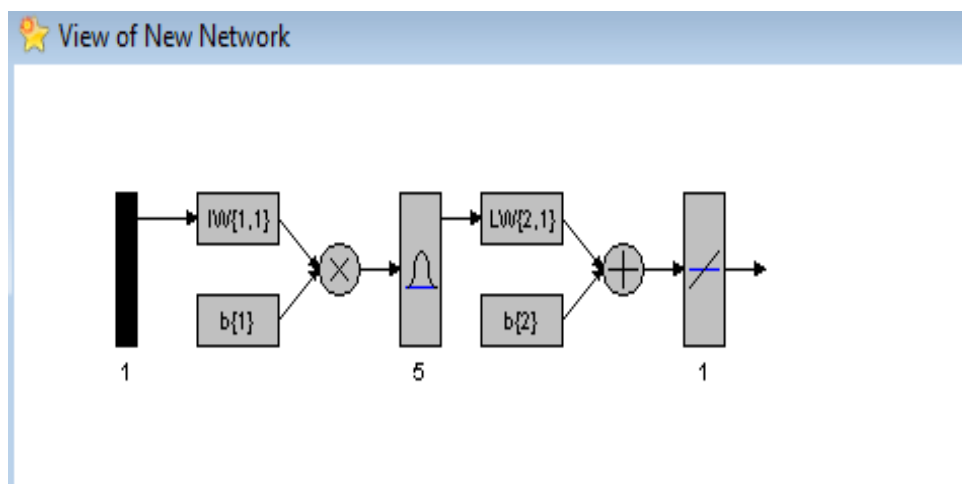


Рис. 4.11- Архітектура ШНМ

Вона відкривається лише у тому випадку, коли у вікні Network/DataManager виділено створена мережа і стають активними кнопки View, Initialize, Simulate, Train, Adapt. Панель має 6 закладок (рис.4.12):

View (Переглянути) – структура мережі;

Initialize (Ініціалізація) – завдання початкових ваг та зміщень;

Simulate (Моделювання) – моделювання мережі;

Train (Навчання) – навчання мережі;

Adapt (Адаптація) – адаптація та налаштування параметрів мережі;

Weights (Вага) – перегляд встановлених ваг.

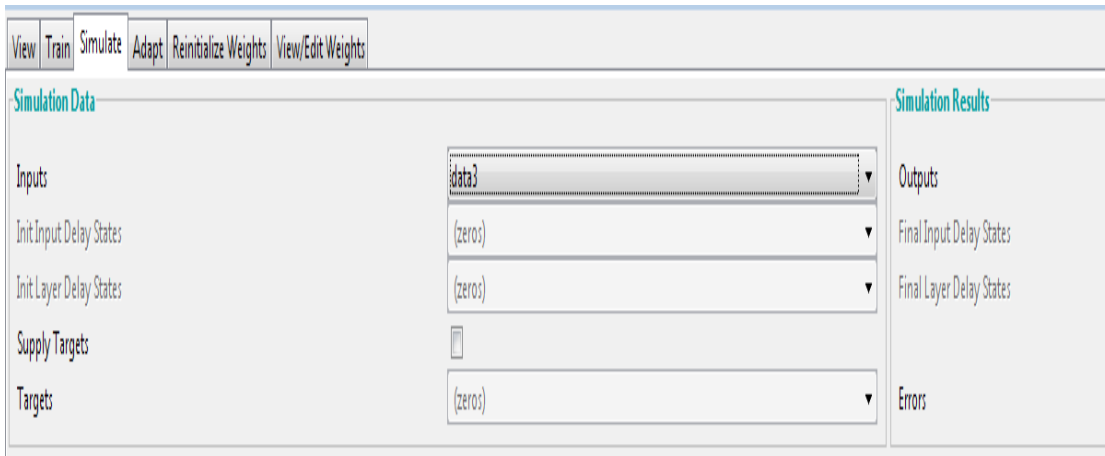


Рис. 4.12 – Закладки для навчання ШНМ

Потім виконується навчання мережі, для чого вибирається закладка Train та відкривається діалогова панель, показана на рис.4.13.

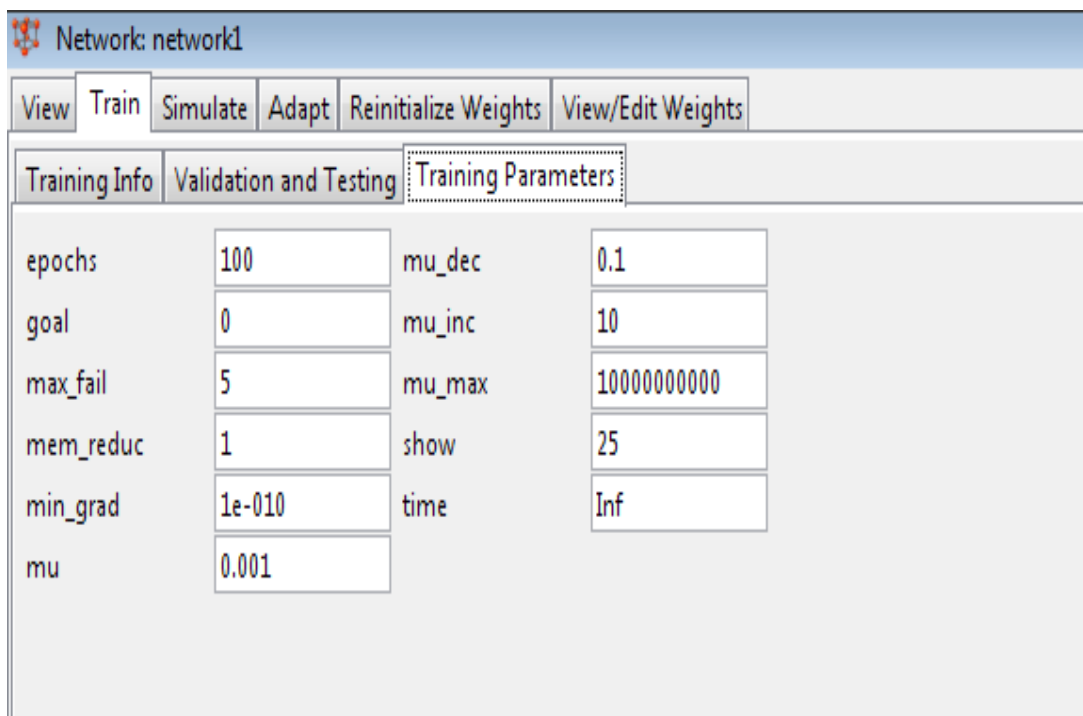


Рис. 4.13 – Параметри ШНМ

Використовуючи ці закладки, можна встановити імена послідовностей входу та мети, а також параметрів процедури навчання (рис.4.14).

Тепер можна розпочати навчання мережі (кнопка Train Network).

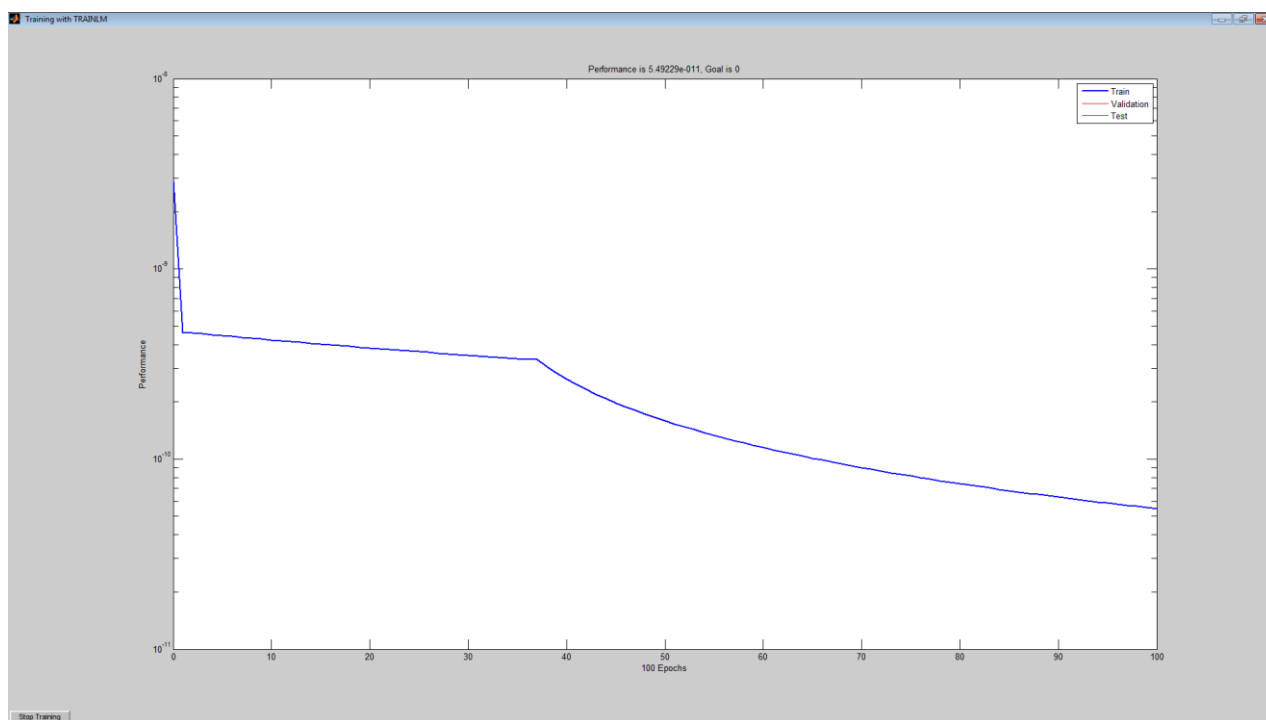


Рис. 4.14 – Процес навчання ШНМ

Якість навчання мережі з прямою передачею сигналу на обраній навчальній послідовності пояснюється рис. 4.14. Майже нульова точність досягається за 13 циклів навчання. Відповідні ваги та зміщення можна побачити, якщо вибрати закладку Weights (рис. 4.15).

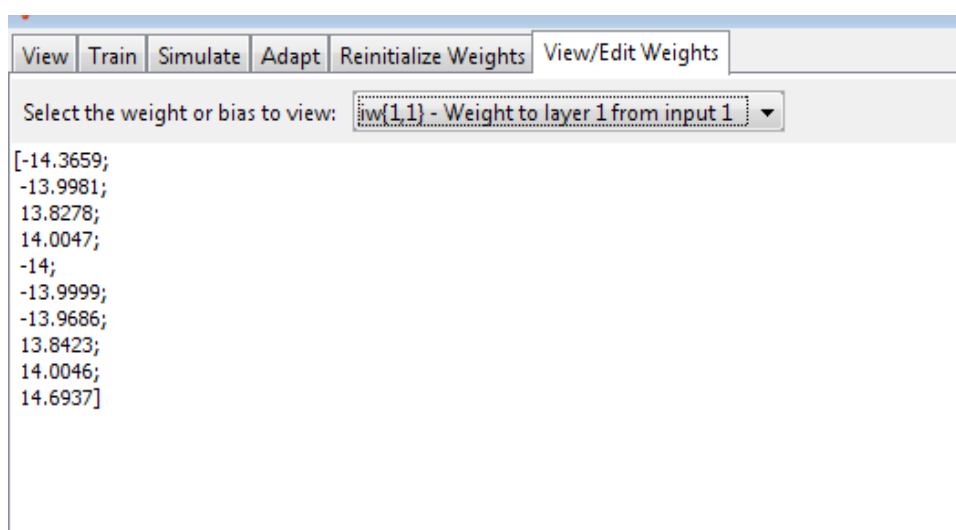


Рис. 4.15 - Значення вагів ШНМ

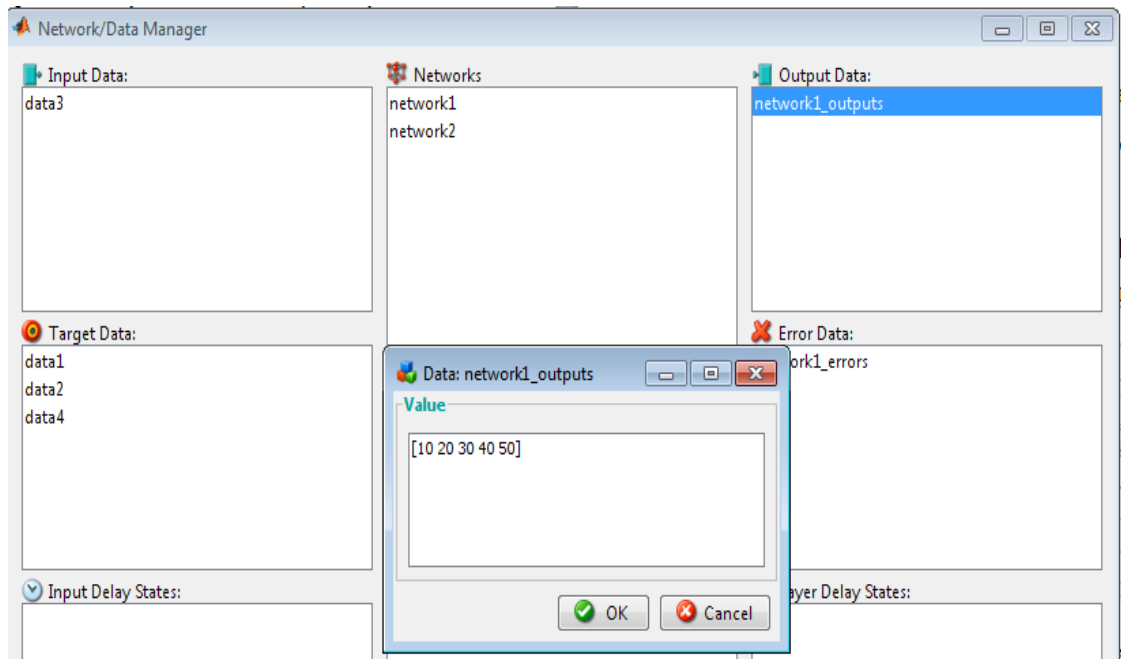


Рис. 4.16 - Перевірка роботи ШНМ (вихідні значення температури)

Для моделювання у Симулінк пишемо код:

`gensim(network2,-1)` –виклик у програмі Матлаб (рис. 4.17)

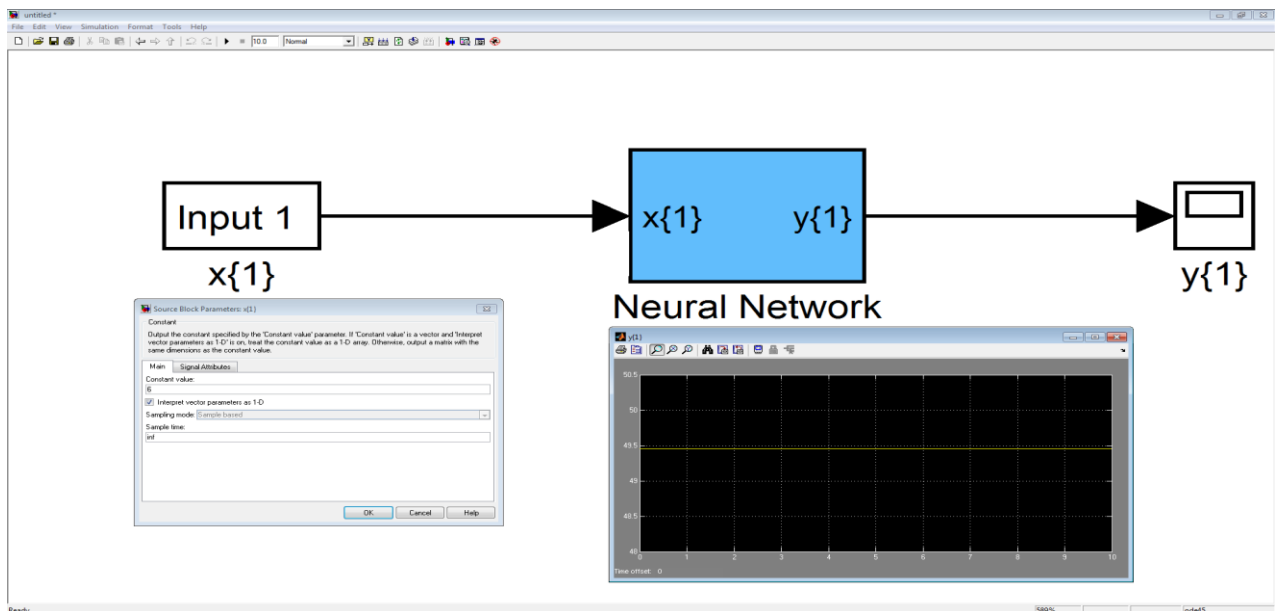


Рис.4.17 - Структура ШНМ з візуалізацією вхідних та вихідних параметрів

Нейронна мережа радіальних базисних функцій містить у найпростішій формі три шари: звичайний вхідний шар, що виконує розподіл даних зразка для першого шару ваг; шар прихованих нейронів із радіально симетричною активаційною функцією, вихідний шар (рис. 4.18) [17].

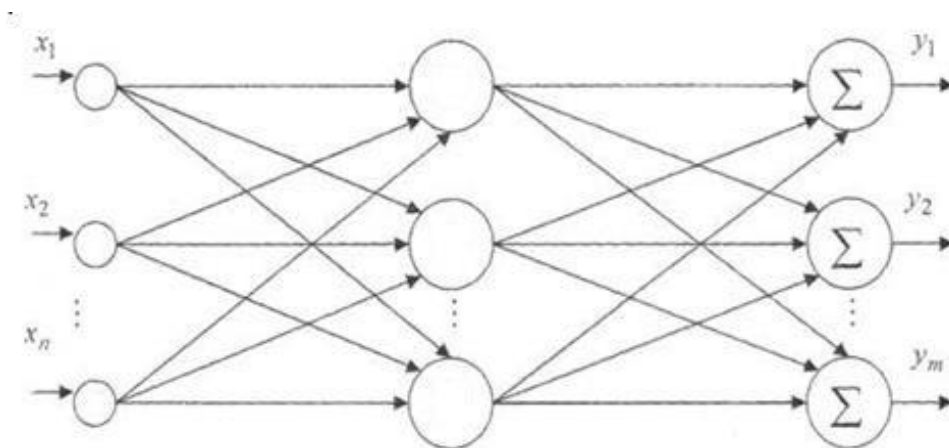


Рис. 4.18 - Нейронна мережа з радіальними базовими функціями (РБФ)

Нейронні мережі, побудовані на РБФ, мають ряд переваг перед розглянутими багатшаровими мережами прямого розповсюдження. По-перше, вони моделюють довільну нелінійну функцію за допомогою всього одного проміжного шару, тим самим позбавляючи розробника необхідності вирішувати питання про кількість шарів. По-друге, параметри лінійної комбінації у вихідному шарі можна повністю оптимізувати за допомогою відомих методів лінійної оптимізації, які працюють швидко і не мають труднощів з локальними мінімумами.

Програма візуалізації роботи ШН та функція прогнозу температури води у залежності від режиму роботи СГД показана на рис. 4.19

```
net = newrb(t,T,e,sp);
NEWRB, neurons = 0, SSE = 3441.56
X = 1 : 0.01 : 10;
Y = sim(net, X);
hold on;
plot(X, Y); = график
```

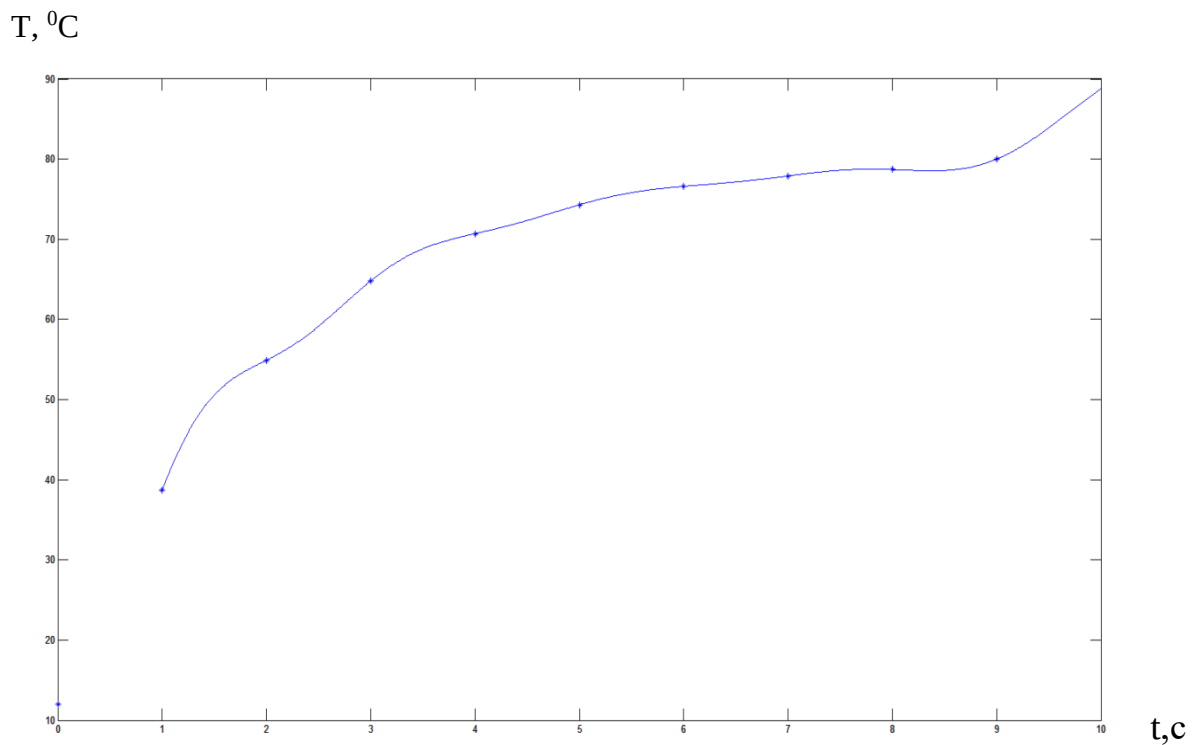


Рис.4.19 - Функція прогнозу значень температури води на виході СГД

Для отримання результату з імітації часу настання аварійної ситуації (вихід значення температури за допустимий діапазон) при несправній роботі регулятора або насоса написаний програмний код:

```
plot(P, T, 'o', P, y1, 'x', P, y2, '+');
t=[0 1 2 3 4 5 6 7 8 9];
T=[12 38.7 54.9 64.8 70.7 74.3 76.6 77.9 78.7 80];
net = newlind(t,T);
Y = sim(net,t)
Y = 34.3327 40.6721 47.0115 53.3509 59.6903 66.0297 72.3691 78.7085 85.0479
91.3873
```

Таким чином, при несправній автоматичній або обладнання системі охолодження СГД на дев'ятій секунді спрацює попереджувальна сигналізація і оператор ЦПУ матиме час для виправлення процесу регулювання до настання тривоги (рис.4.20).

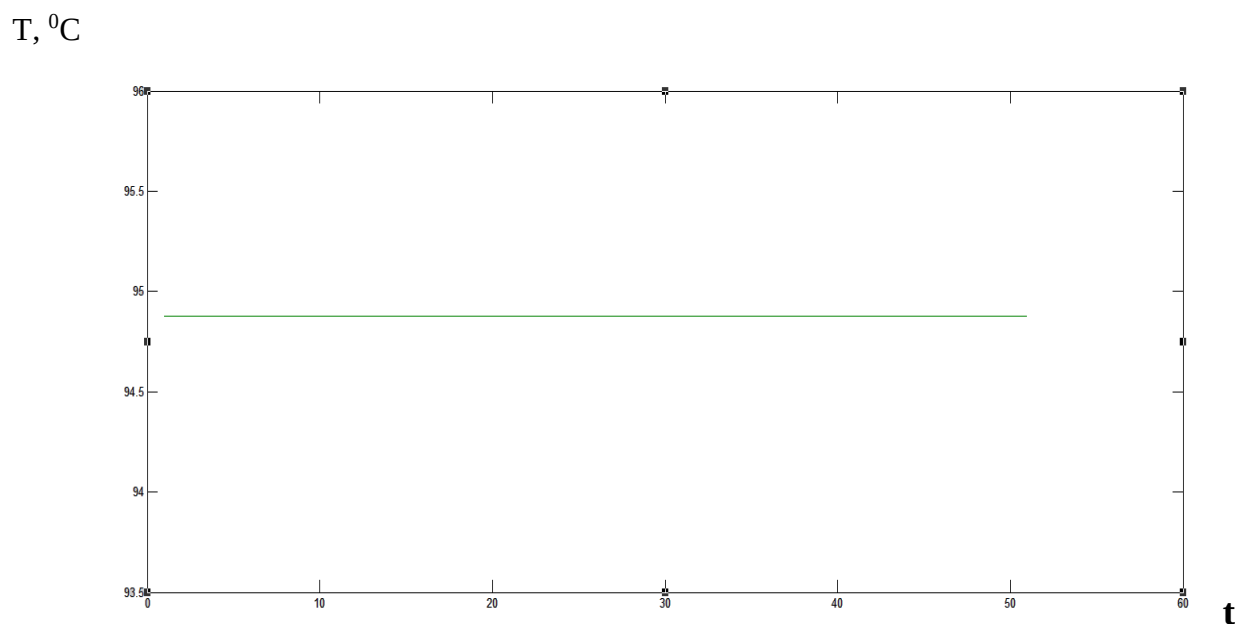


Рис. 4.20 - Імітація настання аварії

Виводи по розділу

У ході роботи було обрано архітектуру ШНМ, підібрано функції активації та проведено навчання ШНМ на можливість прогнозування динаміки температури охолоджувальної води на виході із СГД. Встановлено, що радіально-базова архітектура забезпечуватиме мінімальну помилку процесу навчання та видає гарний прогноз настання аварійної ситуації (перевищення температури вище заданої) за різних режимів роботи СГД.

5 КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НЕРОМЕРЕЖЕВОЇ САУ ТЕМПЕРАТУРИ ВОДИ НА ВИХОДІ СГД

5.1 Ідентифікація об'єкта керування за допомогою нейронної мережі

Методи навчання нейромережевих регуляторів, при яких мінімізується відхилення поточного виходу об'єкту від вхідного впливу, не завжди добре справляються в завданням регулювання. По-перше, якщо перехідний процес триває довше, ніж один такт, то НМ, прагнучи мінімізувати неузгодженість, може видати великий керуючий вплив, що призведе до перерегулювання. По-друге, в таких НМСАУ завжди існує запізнювання через зворотній зв'язок, що погіршує якість регулювання [16]. У зв'язку з цим, пропонується метод прогнозуючого модельного нейроуправління, який мінімізує функціонал вартості інтегральної помилки, прогнозованою на кілька тактів вперед [15].

Синтез нейромережевої системи управління проводився за допомогою пакета прикладних програм Neural Network Toolbox системи MATLAB [117]. Для вирішення поставленого завдання ефективним рішенням представляється нейромережевий регулятор NN Predictive Controller [17]. Нейромережевий регулятор використовує модель нелінійного керованого об'єкта (СГД) у вигляді нейронної мережі для того, щоб передбачати його майбутню поведінку. Крім того, регулятор обчислює сигнал управління, який оптимізує поведінку об'єкта (регульованого параметра температури води СГД) на заданому інтервалі часу. Отже, проектування нейроконтролера складається з двох етапів: етап ідентифікації керованого об'єкта і етапу синтезу закону управління. На етапі ідентифікації розробляється модель об'єкта у вигляді нейронної мережі, яка на етапі синтезу використовується для навчання нейромережевого регулятора.

Етап ідентифікації об'єкта управління САУ температурі на основі оптимізованого ПІ-регулятора за допомогою моделювання показано на рис.5.1. Для навчання ШНМ проведено моделювання з налаштування ПІ-регулятора методом Зіглера-Нікольса. Перехідний процес показаний на рис. 5.2.

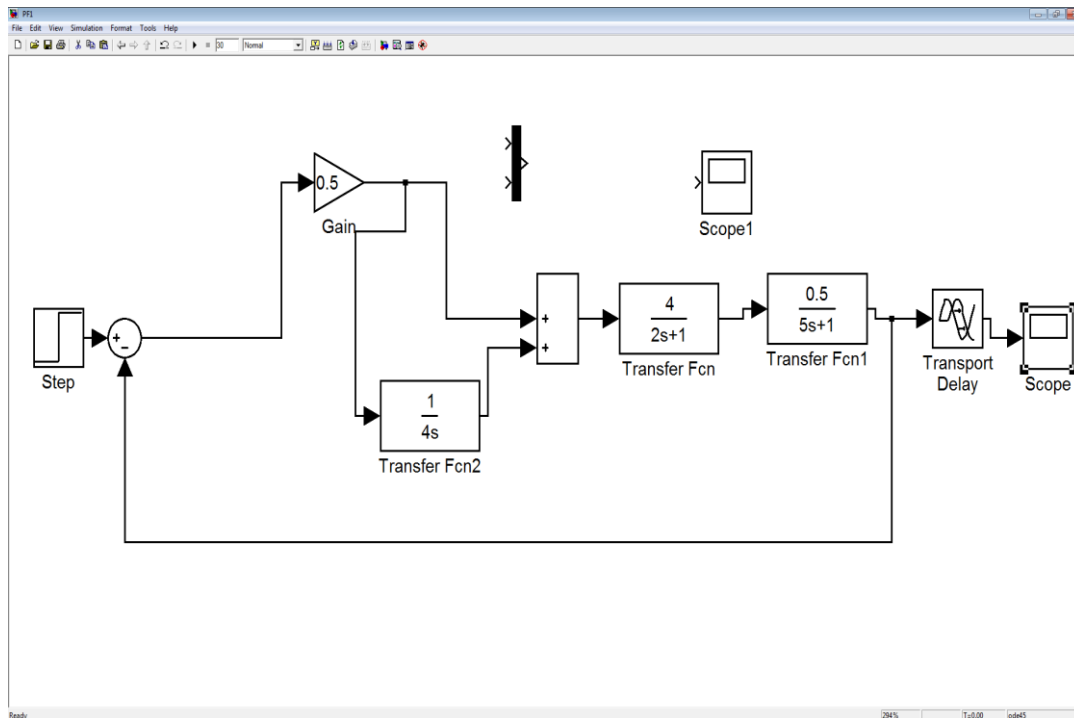


Рис. 5.1 - Модель САУ температури води

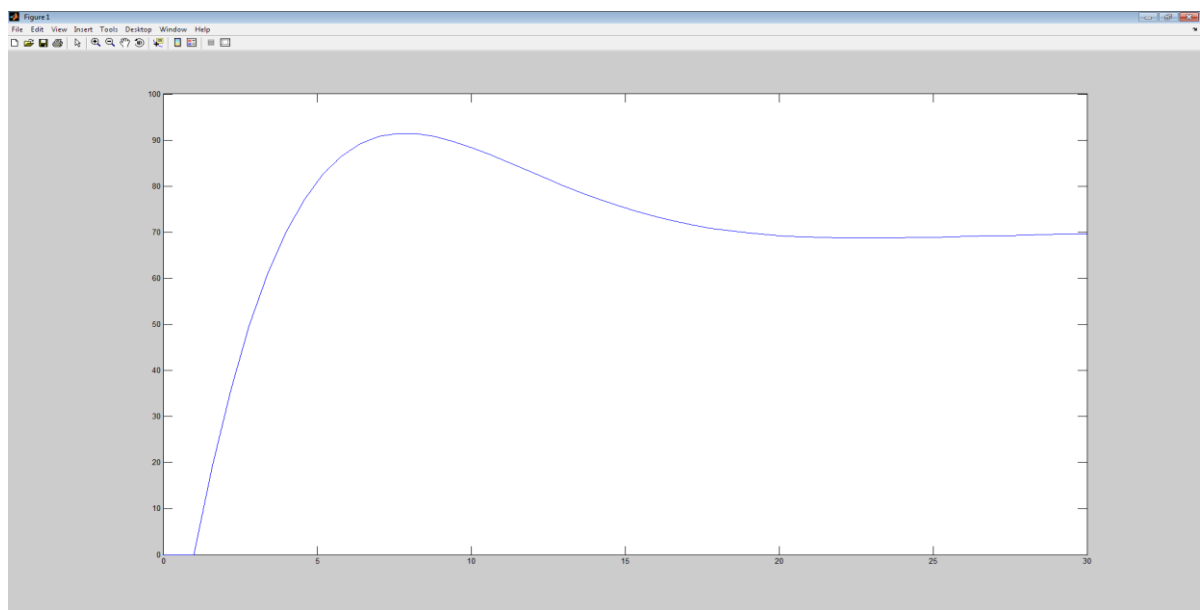


Рис. 5.2 - Перехідний процес температури води на виході СГД

Для навчання ШНМ написано програму, код якої показано нижче:


```

P = [0 0.5 5 8 10 15 20 25 30];
T = [0 0 75 90 85 78 70 70 70];
net = newgrnn(P,T,0.01);
Y = sim(a,[0 0.5 5 8 10 ])
Y = sim(net,[0 0.5 5 8 10 ])
gensim(net,-1)
plot(P, T, 'o');
net = newff([0 9], [20 2], {'tansig' 'purelin'},'trainlm');
yl = sim (net, P);
plot(P, T, 'o', P, yl, 'x') ;
net = newff([0 9], [50 1], {'tansig' 'purelin'},'trainlm');
yl = sim (net, P);
plot(P, T, 'o', P, yl, 'x') ;
net = newff([0 9], [500 1], {'tansig' 'purelin'},'trainlm');
yl = sim (net, P);
plot(P, T, 'o', P, yl, 'x') ;
net = newff([0 9], [5000 1], {'tansig' 'purelin'},'trainlm');
yl = sim (net, P);
plot(P, T, 'o', P, yl, 'x') ;
net = newff([0 9], [10000 1], {'tansig' 'purelin'},'trainlm');
yl = sim (net, P);
plot(P, T, 'o', P, yl, 'x') ;
net = newff([0 9], [7000 1], {'tansig' 'purelin'},'trainlm');
yl = sim (net, P);
plot(P, T, 'o', P, yl, 'x') ;
net.trainParam.epochs = 50;
net.trainParam.goal = 0.01;
net = train(net, P, T) ;
net.trainParam.epochs = 500;
net.trainParam.goal = 0.1;

```

```

net = train(net, P, T);
net.trainParam.epochs = 100;
net.trainParam.goal = 1;
net = train(net, P, T);
y2 = sim(net, P);
plot(P, T, 'o', P, y1, 'x', P, y2, '+');
net.trainParam.epochs = 5000;
net.trainParam.goal = 0.01;
y2 = sim(net, P);
net = train(net, P, T);
plot(P, T, 'o', P, y1, 'x', P, y2, '+'); вивод графіків
gensim(net,-1) – збереження блоку в Матлабі та його візуалізація

```

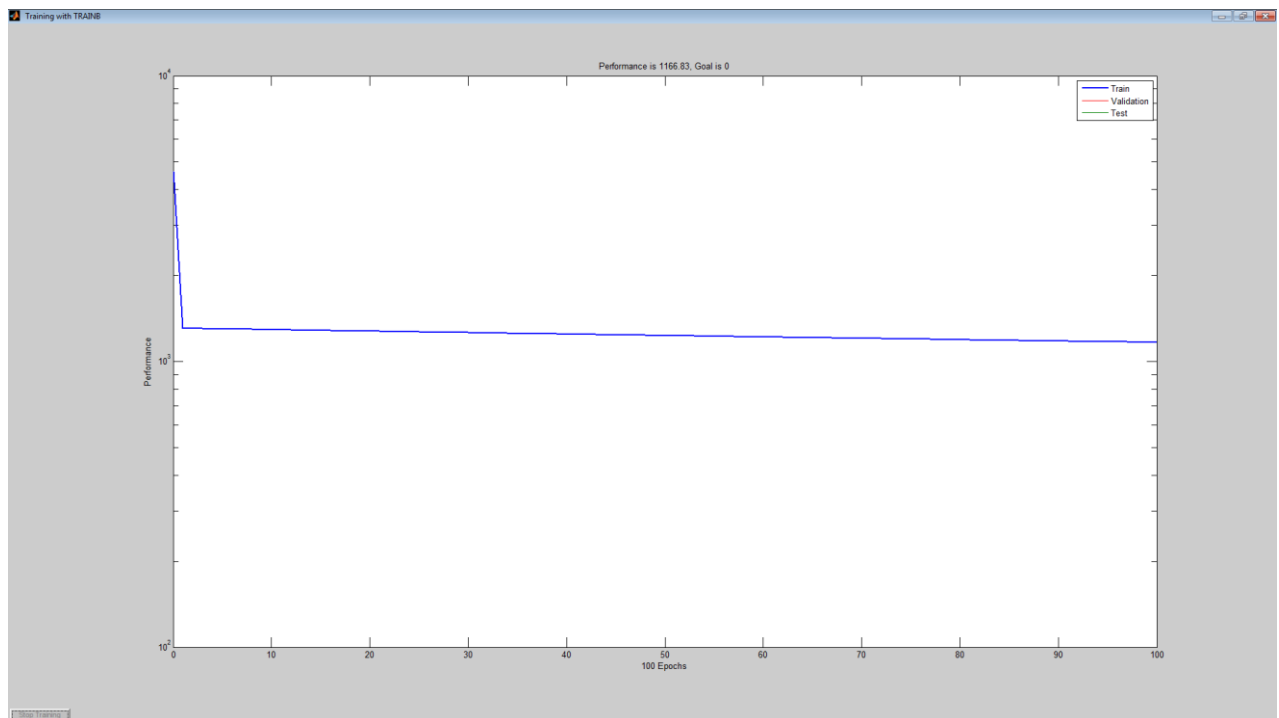


Рис. 5.3 - Процес навчання ШНМ

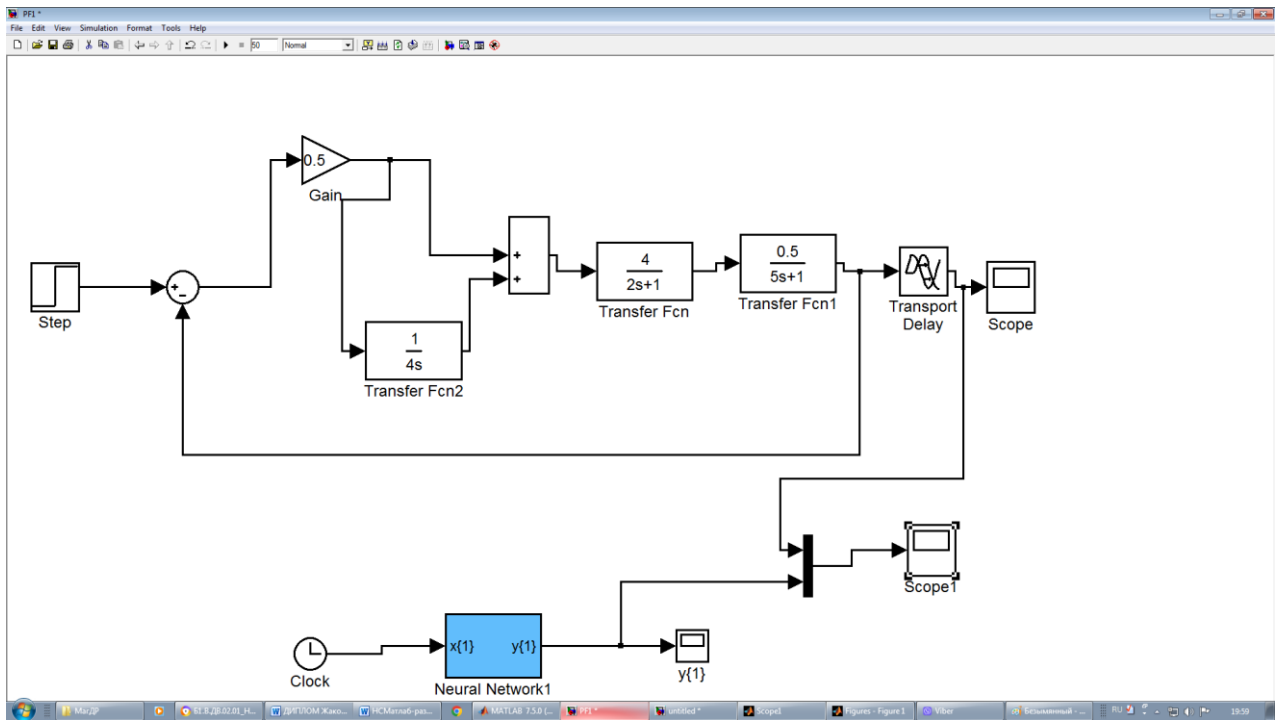


Рис. 5.4 - Процес моделювання ШНМ щодо ідентифікації параметрів САУ температури з ПІ-регулятором

Основні етапи навчання ШНМ та її архітектура показані на рис. 5.5 – 5.7.

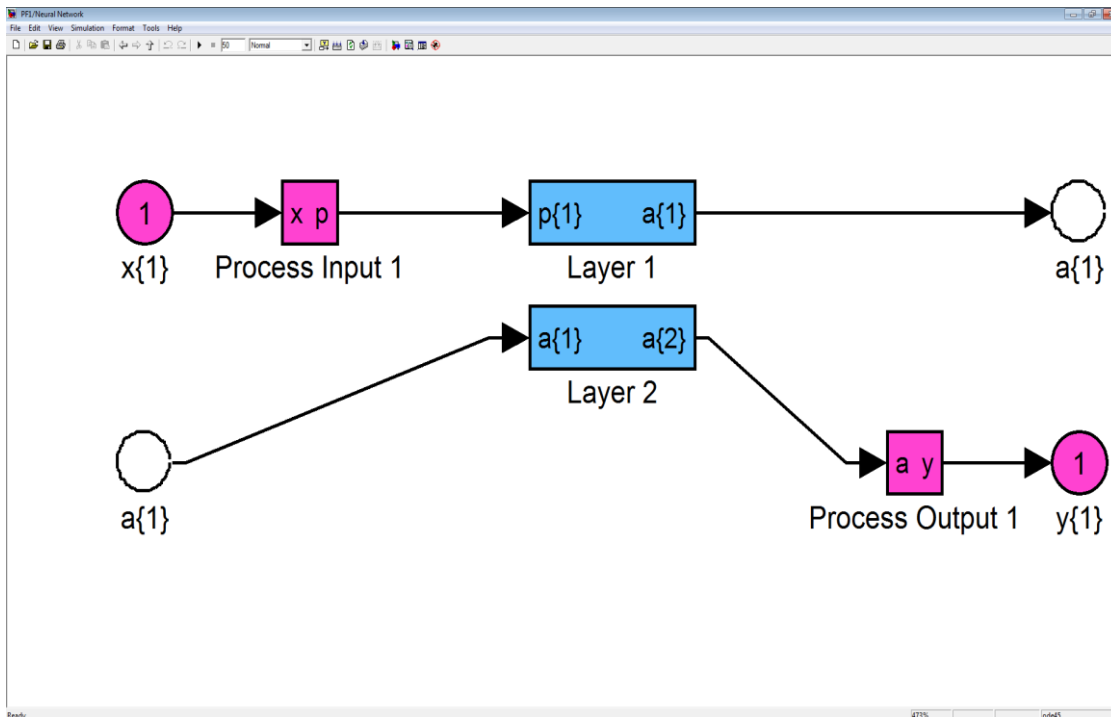


Рис. 5.5 - Вид двох слоїв ШНМ

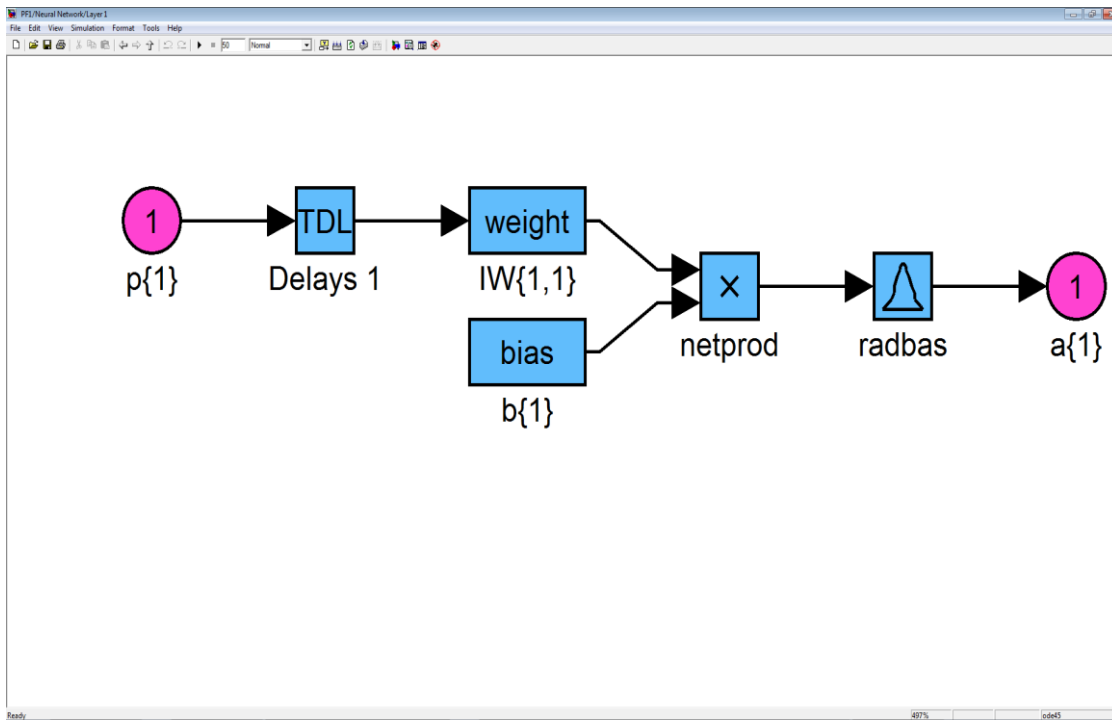


Рис. 5.6. - Структура нейрона з ваговим коефіцієнтом та функцією активації

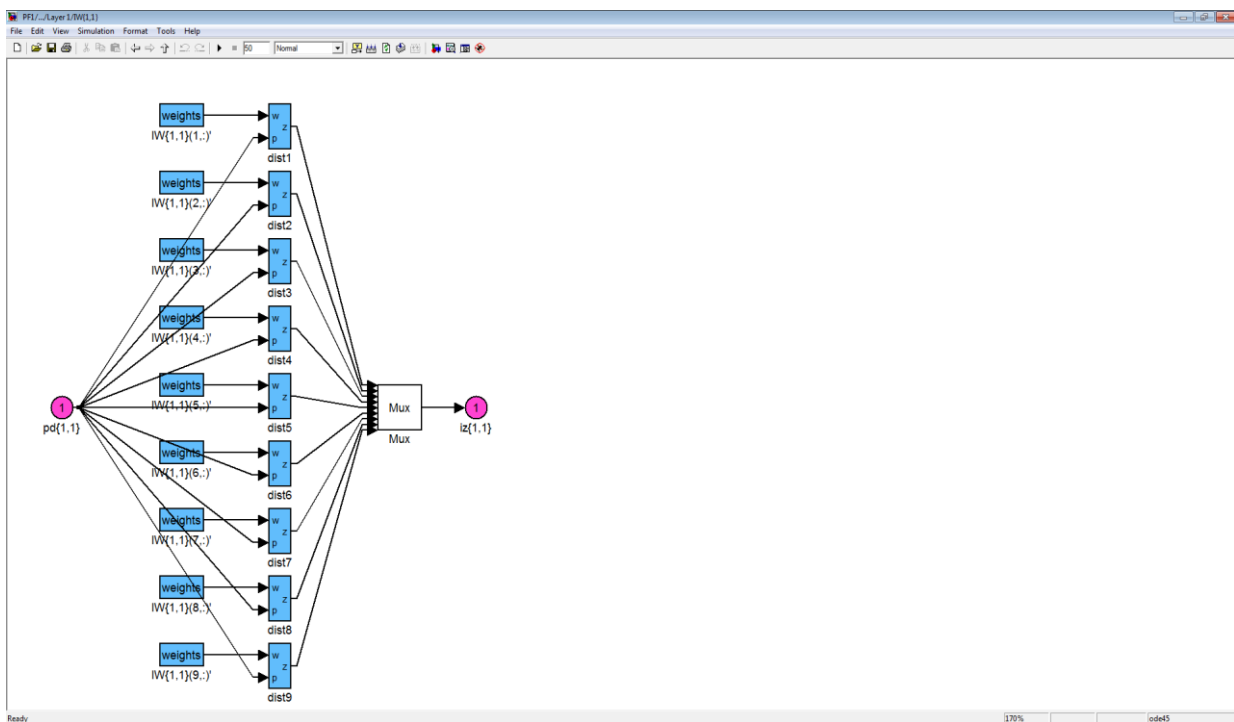


Рис. 5.7 - Структура ШНМ з ваговими коефіцієнтами

Перехідні процеси САУ на виході ПП – регулятора та ШНМ, отримані за результатом моделювання, показані на рис 5.7.

Таким чином, навчена ШНМ добре відображає показники перехідного процесу, швидше і точніше досягає заданого параметра на відміну від типової САУ. Можна

зробити висновок, що ШНМ може повторювати та екстраполювати значення температури води в САУ в залежності від режиму роботи СГД.

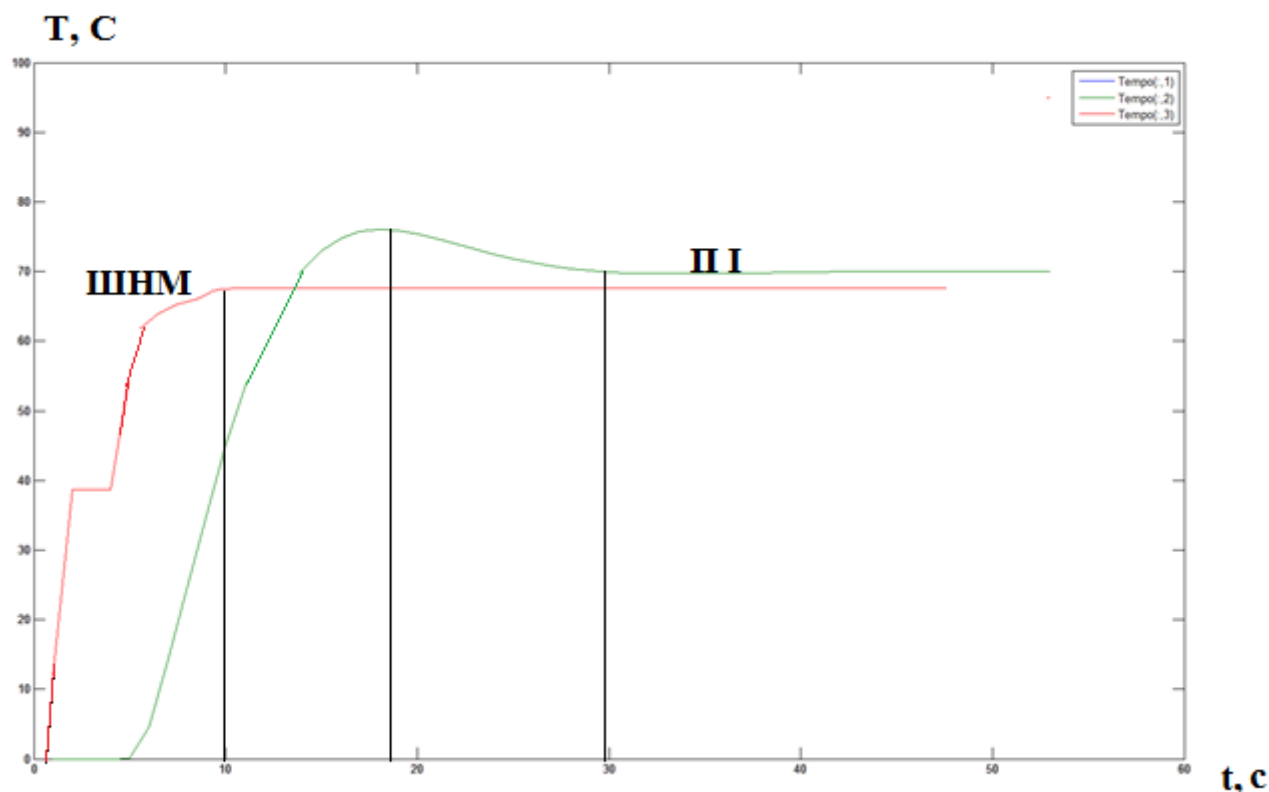


Рис. 5.7 – Перехідні процеси навченої ШНМ та САУ з типовим регулятором

5.2. Моделювання нейромережевої САУ температурою охолоджувальної води СГД

Для прогнозування майбутньої поведінки регульованих параметрів СГД і обчислення помилок регулювання, використовується прямий нейроемулятор, навчений за допомогою алгоритму зворотного поширення помилки [17] на прикладі адаптованого для конкретного режиму СГД, ПІ-регулятора. Відмінність запропонованого методу від типового методу навчання НМ [15] полягає у відсутності нейроконтролера, що навчається. Замість нього використовується оптимізаційний модуль, що працює в режимі реального часу. На k -му такті оптимізаційний модуль отримує бажану траєкторію $y(k + t, j)$ на кілька тактів вперед. Після цього, модуль, реалізуючий алгоритм оптимізації НМ, подає на

прямий нейроемулятор керуючі впливи $u(k + t, j)$ з метою прогнозу поведінки об'єкта і вибору найкращої стратегії управління.

Можна відзначити, що, так як СГД є інерційним об'єктом, і зміна теплових режимів його роботи відбувається зі значним запізненням, то метод може бути успішно апробований в суднових САУ температурою води на виході СГД.

З урахуванням простоти, зручності і наявності бібліотеки елементів НМ, для навчання НМК в САУ були використані вбудовані в електронну бібліотеку спеціалізовані програмні редактори. Програмна модель НМСАУ оптимізації температури води і інтерфейс настройки нейрорегулятора представлені на рис. 5.8.– 5.9.

Процес синтезу нейроконтролера був проведений за допомогою програмного модуля NN Prediction Controller на рис. 5.8. Основні параметри настройки НМК (див. рис. 5.9), значення яких підібрані виходячи з рекомендацій [17], вказані нижче:

- ControlHorizon (Nu) - верхня межа підсумовування при оцінці потужності управління;
- ControlWeightingFactor (ρ) – коефіцієнт ваги для складової потужності управління $\rho = 0,05$;
- Search parameter – параметр одновимірного пошуку, що задає поріг зменшення показника якості $\alpha = 0,001$; Minimization Routine - вибір процедури одновимірного пошуку; Iteration Per Sample Time - число ітерацій на один такт дискретності.

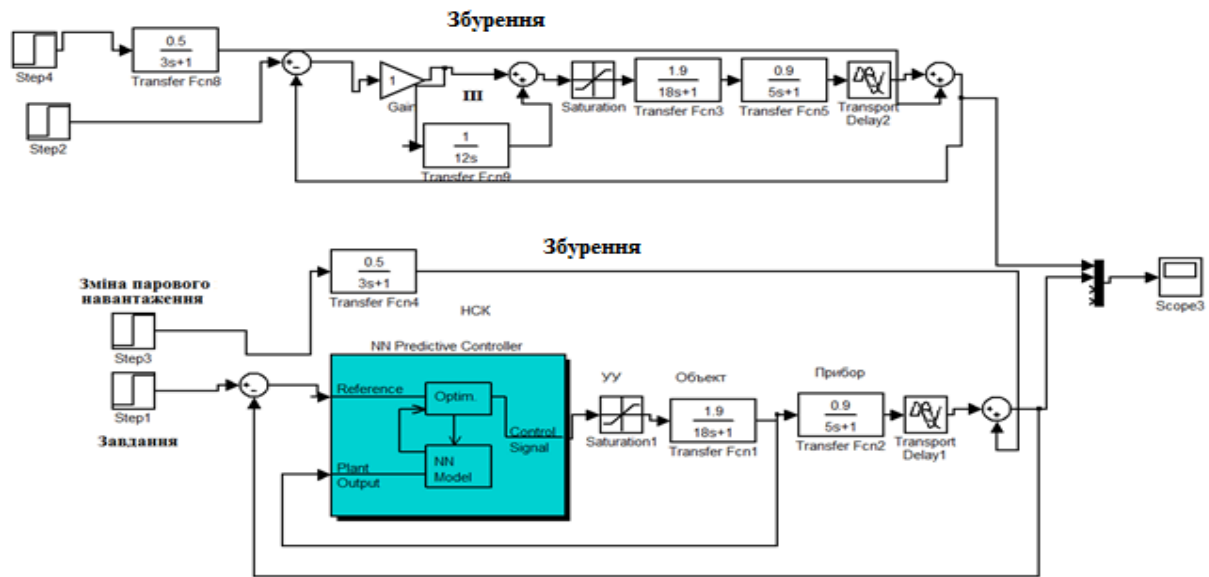


Рис. 5.8. - Моделювання САУ с ПІ – регулятором і НМСАУ

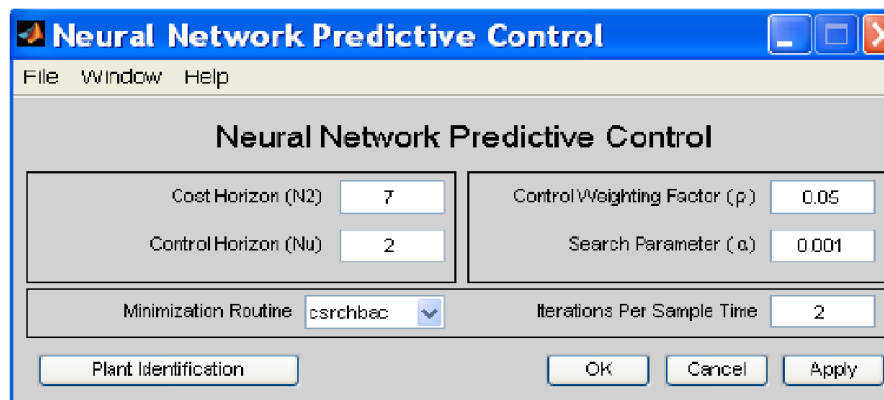


Рис. 5.9. - Інтерфейс настройки НМК

Використовуваної в моделі НМСАУ, управління з прогнозом будується на принципі віддаляючогося горизонту, згідно з яким нейромережева модель керованого процесу передбачає реакцію об'єкта управління на певному інтервалі часу в майбутньому. Передбачення використовується програмою оптимізації для обчислення керуючого сигналу, який мінімізує критерій якості управління [17]:

$$J = \sum_{j=N_1}^{N_2} (y_r(t+j) - y_m(t+j))^2 + \rho \sum_{j=1}^{N_u} (u'(t+j-1) - u'(t+j-2))^2,$$

де константи N_1 , N_2 і N_u задають межі, всередині яких вираховується помилка стеження і потужність управляючого сигналу. Змінна u' описує пробний управляючий сигнал; y_r і y_m – бажана і реальна реакції моделі. Величина ρ визначає внесок потужності (швидкості) управління.

Залежно від режиму роботи СГД запропонована нейромережева САУ автоматично вибирає оптимальне значення команди управління на відміну від традиційної, що підтримує значення коефіцієнту без змін на віх режимах роботи СПУ.

Апробація запропонованої НМСАУ оптимізації процесу охолодження проводилася також на двох інших режимах роботи СГД. Аналіз показників якості перехідних процесів (рис. 5.10) продемонстрував їх відповідність очікуваним значенням (час регулювання у НМ САУ = 23 с, відхилення дорівнює нулю, у САУ з ПІ – регулятором час регулювання = 40 с, відхиленням = 5 °С).

Експерименти підтвердили, що для нейромережева САУ працює гораздо краще за САУ з ПІ – регулятором при зміні навантаження на СГД.

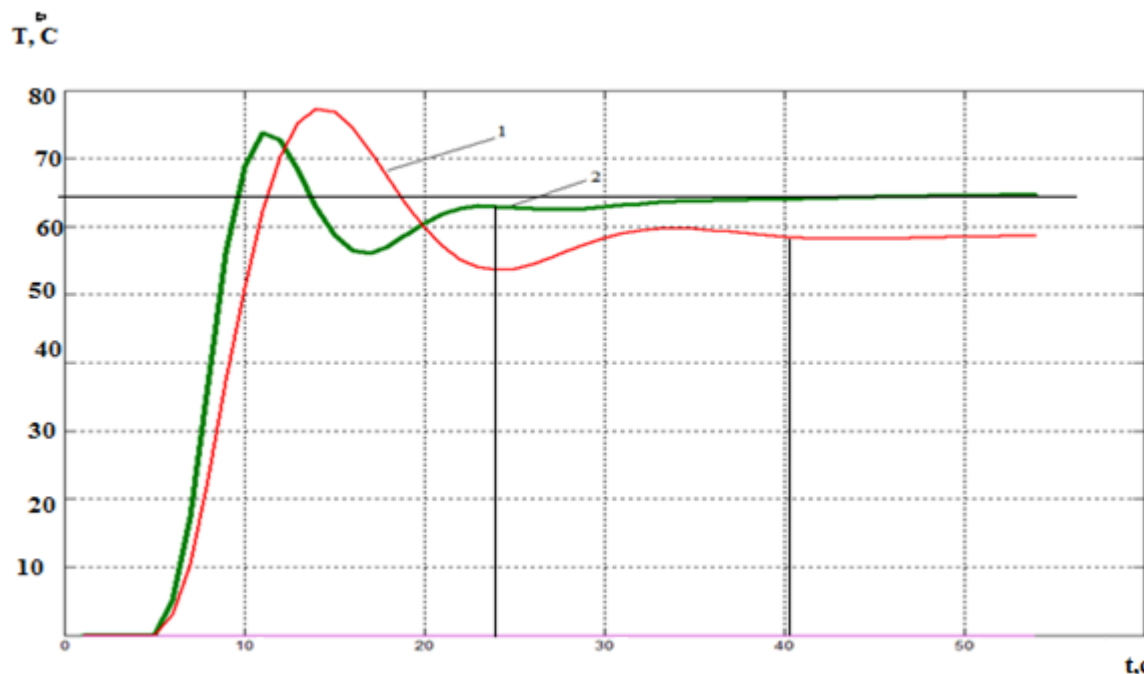


Рис. 5.10. - Процеси нейромережевої системи оптимізації α в залежності від теплового режиму СПУ: № 1 – режим теплового навантаження СГД 95%підтримуваний НМК; № 2 - навантаження СГД 95 % САУ з ПІ-регулятором.

Задание = 65 °С

Висновки до розділу

1. У результаті проведення комп'ютерного моделювання було досліджено процес нейромережевої ідентифікації об'єкта керування. Для навчання ШНМ проведено моделювання з налаштування ПІ-регулятора у САУ методом Зіглера-Нікольса.
2. ШНМ добре відображає показники перехідного процесу, швидше і точніше досягає заданого параметра на відміну від типової САУ. Можна зробити висновок, що ШНМ може повторювати та екстраполювати значення температури води в САУ в залежності від режиму роботи СГД.
3. Апробація запропонованої НМСАУ оптимізації процесу охолодження проводилася на поширених режимах роботи СГД. Аналіз показників якості перехідних процесів САУ продемонстрував їх відповідність очікуваним значенням (час регулювання у НМ САУ = 23 с, відхилення дорівнює нулю, у САУ з ПІ – регулятором час регулювання = 40 с, відхиленням = 5 °С). Таким чином інтелектуальна САУ працює досить ефективна і не вимагає адаптації своїх параметрів на відміну від традиційної САУ.

4.

Висновки

Інтелектуальні САУ відрізняються від традиційних ПД – регуляторів та здатні до адаптації, роботи з нелінійностями та самонавчання своїх вагових коефіцієнтів при зміні характеристик об'єктів управління. Впровадження нейромережевих систем прогнозування та адаптивного управління в САУ охолодження головних двигунів та дизель-генераторів дозволить суттєво погіршити якість процесів управління та забезпечити високу надійність у роботі агрегатів СЕУ. Інтелектуальні САУ які працюють на основі технологій нейронних мереж добре відображають показники перехідного процесу, швидше і точніше досягають заданого параметра на відміну від типової САУ. Можна зробити висновок, що ШНМ може повторювати та екстраполювати значення температури води в САУ в залежності від режиму роботи СГД. Що сприяє підвищенню якості керування та надійності роботи агрегатів СГД.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

- запропонована нейромережева система управління температурою охолоджувальної води на виході з суднового дизеля, система відрізняється покращеними показниками якості перехідних процесів порівняно з типовою.
- запропонована нейромережева модель прогнозування динаміки температури охолоджувальної води в залежності від завантаження головного двигуна
- розроблено математичну модель контуру охолодження головного двигуна марки MAN B&W потужністю 18975 кВт

Отримані результати можуть застосовуватися на морських судах у процесі експлуатації САУ температури охолоджувальної води, що доказує практичну цінність роботи.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Heat Exchanger and Marine Cooling Systems // <https://www.marine-power.net>
2. Шостак В.П. Системи суднових дизельних установок. Навчальний посібник – Миколаїв:НУК, 2021 - 128 с.
3. Porteiro, J.; Collazo, J.; Patiño, D.; Míguez, J.L. Diesel engine condition monitoring using a multi-net neural network system with nonintrusive sensors. Appl. Ther. Eng. 2011, 31, 4097–4105.
4. Steklov, A.S. Neuro-fuzzy model for diagnosing the technical condition of a synchronous generator / A.S. Steklov, D.S. Podkovyrin // Chief power engineer. 2015. No. 11–12. pp. 34–42.
5. <https://www.kongsberg.com/maritime>
6. https://www.researchgate.net/publication/233644748_Fuzzy_logicbased_expert_system_for_diesel_engine_oil_analysis_diagnosis
7. Ho H. F. Adaptive PID controller for nonlinear system with tracking performance / H. F. Ho, Y. K. Wong, A. B. Rad // Physics and Control. – 2013.
8. Ho S. J. Optimizing fuzzy neural networks for tuning PID controllers using an orthogonal simulated annealing algorithm OSA / S. J. Ho, L. S. Shu, S. Y. Ho // IEEE Transactions on Fuzzy Systems, vol. 14, Issue 3, June 2016. – P. 421 – 434.
9. Jokioinen E. Remote and Autonomous Ships – The next steps / E. Jokioinen, J. Poikonen, M. Hyvonen, A. Kolu, [etc.]. – London: AAWA Position Paper, Rolls-Royce, 2017. – 88 p.
10. Lee K. Y, L. Y. Ma, C. J. Boo, W.-H. Jung, and S.-Ho Kim. Inverse dynamic neuro-controller for superheater steam temperature control of a large-scale ultra supercritical (USC) boiler unit. // Proc. of the IFAC Symposium on Power Plants and Power Systems Control, in Tampere, Finland, July 5 – 8. – 2019.
11. Yang P. Neural networks internal model control for water level of boiler drum in power station / P. Yang, D. G. Peng, Y. H. Yang, Z. P. Wang // Proceedings

- of 2017 International Conference on Machine Learning and Cybernetics, vol. 5, 26 – 29 Aug. 2017. – P. 3300 – 3303.
12. Zhang Y. Neural network-based PID predictive control for nonlinear time-delay systems / Y. Zhang, Z. Q. Chen, P. Yang, Z. Z. Yuan // Proceedings of International Conference on Machine Learning and Cybernetics, vol. 2, 26 – 29 Aug. – 2017. – P. 1014 – 1018.
 13. Ziegler J.C. Optimum settings for automatic controllers / J.C. Ziegler, N.B. Nichols // ASME. Transactions, 1942. – Vol. 64. – № 8. – P. 101 – 108.
 14. Дьяконов В., Круглов В. MATLAB. Анализ, идентификация и моделирование систем. Специальный справочник /В. Дьяконов, В. Круглов. – С. Пб.: Питер, 2001. – 448 с.
 15. Train neural network. <https://ch.mathworks.com/help/deeplearning/>
 16. Introduction To Neural Networks With Matlab 6.0, 1St Edn Paperback – July 1, 2017. <https://ch.mathworks.com/>
 17. Neural Network Toolbox User's Guide © COPYRIGHT 1992 - 2004 by The MathWorks, Inc.