

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

Науково-навчальний інститут автоматики та електромеханіки

Кафедра Електрообладнання і автоматики суден

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО ДИПЛОМНОЇ РОБОТИ МАГІСТРА

Удосконалення нечіткої системи адаптації регуляторів
суднового парового котла

Виконав: студент 6 курсу
спеціальності 271 Морський та внутрішній водний транспорт
(шифр і назва спеціальності)

Гончаров Ігор Віталійович
(підпис, прізвище та ініціали)

допущений до захисту 15.12.2023
(дата малого захисту)

Завідуючий кафедрою Гвоздева І.М.
(підпис, прізвище та ініціали)

Керівник В.Мир Михайленко В.С.
(підпис, прізвище та ініціали)

Нормоконтролер В.Бескип
(підпис, прізвище та ініціали)

Рецензент Муха М.П.
(підпис, прізвище та ініціали)

Одеса 2023

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

Кафедра Електрообладнання і автоматики суден

Освітньо - кваліфікаційний рівень магістр

Спеціальність 271 Морський та внутрішній водний транспорт

**Спеціалізація 271.03 Експлуатація суднового електрообладнання і засобів
автоматики**

Затверджую

Зав. кафедрою Гвоздєва І
„15” „12” 2023 р.

**ЗАВДАННЯ
ДО ДИПЛОМНОЇ РОБОТИ КУРСАНТА**

Гончаров Ігор Віталійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи **Удосконалення нечіткої системи адаптації регуляторів
суднового парового котла**

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

затверджені наказом по академії від „12” „чудн.с” 2023 року № 2003

2. Строк подання курсантом закінченої роботи 15.12.2023 р.

3. Вихідні дані до роботи: судно танкер водотоннажністю 148000 тон;
судновий допоміжний паровий котел Mitsubishi марки MAC парове
виробництво 60 тон/год, тису пари 1,5 МПа; суднова система моніторингу та
автоматизації K-Chief 600.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що підлягають
розробці) аналіз умов експлуатації суднових парових котлі, ; розробка
математичної моделі системи управління параметрами парового котла; розробка
нечіткої системи адаптації параметрів ПІ – регулятора; імітаційне моделювання
та дослідження ефективності нечіткої адаптивний САУ.

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

Презентація зі слайдами які відображають актуальність роботи, мету, наукову
новизну та етапи розробки нечіткої експертної системи адаптації ПІ -
регулятора.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітки
1	КОНСТРУКТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ СУДНА	1.11-5.11	регуляторів
2	РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛИ ОБЕКТА	5.12 – 18.11	
3	РОЗРОБКА НЕЧІТКОЇ СИСТЕМИ АДАПТАЦІЇ ПІ - РЕГУЛЯТОРА	18.11-5.12	
4	МОДЕЛЮВАННЯ АДАПТИВНОЇ НЕЧІТКОЇ САУ ТИСКУ ПАРИ	5.12 – 12.12	

ДИПЛОМНИК

(підпис)

Гончаров І.

(прізвище та ініціали)

роботи

(підпис)

Михайленко В.С.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Тема: «Удосконалення нечіткої системи адаптації регуляторів суднового парового котла»

Гіпотеза дослідження: впровадження методів нечіткого адаптивного управління може дозволити підвищити показники якості перехідних процесів параметрами суднових парових котлів.

Метою роботи є розробка нечіткої системи адаптації параметрі типових регуляторів у САУ суднових допоміжних парових котлів.

Завдання дослідження:

- провести огляд сучасних методів та алгоритмів систем адаптивного управління парових котлів.
- провести аналіз технологічних параметрів суднового парового котла та розробити математичну модель об'єкта управління.
- розробити нечітку систему адаптації параметрів ПІ – регуляторів у САУ суднових парових котлів.
- провести моделювання запропонованої нечіткої адаптивної САУ і оцінити її ефективність при зміні парової завантаження агрегатів СЕУ.

Об'єкт дослідження: система автоматичного управління параметрами суднового парового котла.

Предмет дослідження: математичні моделі, методи та алгоритми систем нечіткого адаптивного управління.

Методи дослідження: метод параметричної ідентифікації; табличний метод Копеловича для розрахунку оптимальних настроювальних параметрів ПІ та ПІД – регуляторів; метод розроблення систем нечіткого висновку І. Мамдані; імітаційне моделювання

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

- розроблено математичну модель контуру регулювання тиску пари суднового парового котла Mitsubishi марки МАС з паровою продуктивністю 60 тонн пари на годину. Модель відображає експериментальні дані з високим ступенем адекватності.
- розроблена нечітка адаптивна система яка дозволяє оцінити значення параметрів математичної моделі об'єкт управління і розрахувати оптимальні настроювальні значення параметрів ПІ-регулятора в локальній системі регулювання тиску пари суднового допоміжного котла.

Практична цінність. Отримані результати можуть застосовуватися в САУ тиску пари в основних та допоміжних суднових парових котлів на морських і річкових суднах.

Апробація результатів. Результати роботи було розглянуто на міжнародній науково-технічній конференції «СУДНОВА ЕЛЕКТРОІНЖЕНЕРІЯ, ЕЛЕКТРОНІКА І АВТОМАТИКА» (СЕІЕА-2023) НУ «ОМА» – 2023.

У доповіді на тему «ОГЛЯД МЕТОДІВ І ТЕХНОЛОГІЙ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ СУДЕН».

СУДНОВИЙ ДОПОМІЖНИЙ ПАРОВИЙ КОТЕЛ, МАТЕМАТИЧНА
МОДЕЛЬ, НЕЧІТКА СИСТЕМА АДАПТИВНОГО УПРАВЛІННЯ

ABSTRACT

Topic: "**Improvement of the fuzzy system of adaptation of regulators of ship steam boiler**"

Research hypothesis: the implementation of fuzzy adaptive control methods can improve the quality indicators of transient processes with parameters of ship steam boilers.

The purpose of the work is the development of a fuzzy system of adaptation to the parameters of typical regulators in ACS of ship auxiliary steam boilers.

Objectives of the study:

- review modern methods and algorithms of adaptive control systems of steam boilers.
- analyze the technological parameters of the ship's steam boiler and develop a mathematical model of the control object.
- to develop a vague system of adaptation of parameters of PI - regulators in ACS of ship's steam boilers.
- carry out modeling of the proposed fuzzy adaptive ACS and evaluate its effectiveness when changing the steam load of the ACS units.

The object of research: the system of automatic control of the parameters of a ship's steam boiler.

Research subject: mathematical models, methods and algorithms of fuzzy adaptive control systems.

Research methods: method of parametric identification; Kopelovich's tabular method for calculating the optimal setting parameters of PID - regulators; the method of developing fuzzy inference systems by I. Mamdani; simulation modeling

The scientific novelty of the obtained results is as follows:

- a mathematical model of the steam pressure regulation circuit of the ship's Mitsubishi steam boiler of the MAS brand with a steam productivity of 60 tons of steam per hour was developed. The model reflects experimental data with a high degree of adequacy.
- the developed fuzzy expert system allows to estimate the values of the parameters of the mathematical model of the control object and to calculate the optimal setting values of the PI-regulator parameters in the local steam pressure regulation system of the ship's auxiliary boiler.

Practical value. The obtained results can be used in steam pressure control systems in main and auxiliary ship steam boilers on sea and river vessels.

Approbation of the results. The results of the work were considered at the international scientific and technical conference "SHIP ELECTRICAL ENGINEERING, ELECTRONICS AND AUTOMATICS" (SEIEA-2023) NU "OMA" - 2023. In the report on the topic "OVERVIEW OF METHODS AND TECHNOLOGIES FOR IMPROVING THE ENERGY EFFICIENCY OF VESSEL OPERATION".

MARINE AUXILIARY STEAM BOILER, MATHEMATICAL MODEL, FUZZY
ADAPTIVE CONTROL SYSTEM

ЗМІСТ

Перелік скорочень.....	10
Вступ.....	11
1.ТЕХНІКО-ЕКСЛУАТАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ, ТА КОНСТРУКТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ СУДНА.	13
2. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛИ ОБ'ЄКТУ УПРАВЛІННЯ.....	16
3. РОЗРОБКА НЕЧІТКОЇ АДАПТИВНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТИСКОМ ПАРУ	39
4. МОДЕЛЮВАННЯ НЕЧІТКОЇ АДАПТИВНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТИСКОМ ПАРУ	55
ВИСНОВКИ.....	59
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	60

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ДПК - допоміжний паровий котел;

САУ - система автоматичного управління;

СЕУ – суднова енергетична установка;

СППР – система підтримки прийняття рішень;

НЕС – нечітка експертна система;

ЦПУ - центральний посту управління,

Вступ

Автоматизація суден - це процес, при якому функції управління судном та його обладнанням, що раніше виконувались людиною, передаються приладам та технічним пристроям. При автоматизації судових енергетичних установок підвищується надійність та економічність роботи обладнання, збільшується продуктивність та покращуються умови праці плавскладу, скорочується його чисельність [1].

Суднові парові котли є важливою частиною агрегатів СЕУ і від ефективності їх роботи залежить надійність роботи головного двигуна та допоміжних систем судна.

Висока експлуатаційна надійність та економічність роботи судового парового котла досягається за допомогою автоматичних систем управління, що забезпечують: підтримання заданих значень регульованих параметрів при різних навантаженнях; сигналізацію про граничні відхилення регульованих параметрів та захист котла (припинення горіння палива) при їх неприпустимих відхиленнях; полегшення праці обслуговуючого персоналу - звільнення від необхідності постійного контролю за роботою котельної установки та виключення впливу індивідуальних якостей вахтового персоналу; можливість дистанційного централізованого управління та контролю за працюючою установкою без несення постійної вахти.

У загальному випадку автоматичні системи забезпечують подачу палива і повітря в топку відповідно до витрати пари, підтримують задані значення тиску і температури пари (якщо котел виробляє перегріту пару), здійснюють подачу поживної води в кількості, що відповідає витраті.

В той же час, більшість технологічних процесів судового парового котла в силу специфіки його роботи на різних парових режимах і впливу неконтрольованих збурень такі, що точний математичний опис процесів отримати дуже важко. Важливим є і той факт, що навіть за такої типової ситуації, як впровадження нового або ремонту старого обладнання котла,

виникає необхідність коригування роботи елементів системи автоматичного управління та алгоритму роботи регулятора.

При цьому аналіз наукової літератури [2-5] показує, що основними методами синтезу складних систем подібного роду є методи адаптивного, нейро-нечіткого управління. При всій різноманітності методів синтезу САУ досі залишаються невирішеними широке коло наукових завдань у галузі розробки ефективних систем управління складними парогенеруючими установками. І одним із рішень проблеми підвищення ефективності САУ паровими котлами може бути використання досвіду та знань експертів з налагодження суднової автоматики. Досвід та знання експертів у галузі експлуатації суднових САУ можна реалізувати за допомогою методів нечіткої логіки, як показано у наукових публікаціях [6,7]

Таким чином, завдання розробки ефективних систем нечіткого адаптивного управління паровими котлами, є *актуальною та затребованою*.

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

У дипломній роботі розглядається електрообладнання та системи керування танкера водотонажністю 163000 тон.



Рисунок 1.1 - Танкер Bermuda

Таблиця 1.1 - Загальна характеристика судна

Довжина,м	274
Ширина,м	52
Водотонажність ,т	148000
Дедвейт, т	138143
Швидкість,вуз	7,5 вуз.

Таблиця 1.2. - Головний двигун

Виробник	HYUNDAI-B&W
Тип	6S80 MC
Потужність,кВт	17660
Число обертів, об/хв	92

Таблиця 1.3. - Параметри СДГ (СЕС)

Генератор	
Виготівник	HYUNDAI
Тип	HF
кількість	3
Потужність	1125 Квт
Частота	60 Гц
Напруга	450 В

Таблиця 1.4. Аварійний ДГ

Виробник	HYUNDAI
Тип	HFC
кількість	1
Потужність	150 Квт
Число обертів	1800 об/хв.
Напруга	450 В

Таблиця 1.5. Допоміжний котел

Виробник	Mitsubishi
Кількість	2
Тип	MAC
Робочий тиск	1,6 МПа
Паровиробництво	60000 т/год

Клас автоматизації судна – AUT 1

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛИ ОБ'ЄКТУ УПРАВЛІННЯ

2.1 Огляд сучасних методів адаптивного управління суднових технічних систем

Незважаючи на те, що багато методів автоматичного налаштування та адаптації ПД - регуляторів, що використовуються в даний час, були розроблені ще в 60-х роках [7], у промислових контролерах адаптивна техніка почала використовуватися тільки з середини 80-х.

Це з технічною складністю реалізації адаптивних алгоритмів на елементної базі, яка існувала до появи контролерів. З початком 90-х років минулого століття в суднових САУ починають експеримент з впровадження методів адаптивного управління, що використовують автоматичне налаштування параметрів регуляторів.

У таких системах повністю автоматичне налаштування може ініціюватися при настанні заздалегідь заданої умови, наприклад, при зміні навантаження, зміні зовнішніх впливів, зміні похибки регулювання, або безперервно в часі. Автоматичне налаштування, яке ініціюється без участі людини, називається адаптацією. У ряді публікацій термін "адаптація" трактують ширше як пристосування регулятора до реального об'єкта на стадії введення системи в експлуатацію [8].

Різновидом адаптації є розімкнене керування параметрами регулятора (таблична автонастройка) рис.2.1, коли заздалегідь знайдені параметри регулятора для різних умов роботи системи заносяться в таблицю, з якої вони витягуються при настанні умов, за якими ініціюється адаптація.

До останнього часу вважалося, що регулятори, налаштовані автоматичному режимі, частіше налаштовані гірше, ніж налаштовані ручному режимі. Пояснювалося це тим, що комп'ютер не може виконувати складні і погано формалізовані завдання краще за людину. Одако з недостатнім

розвитком методів теорії нечіткої логіки ситуація кардинально змінилася. Нечітка логіка дозволяє описувати знання та досвід експертів у галузі налагодження САУ та успішно застосовувати його на практиці у вигляді експертних систем.

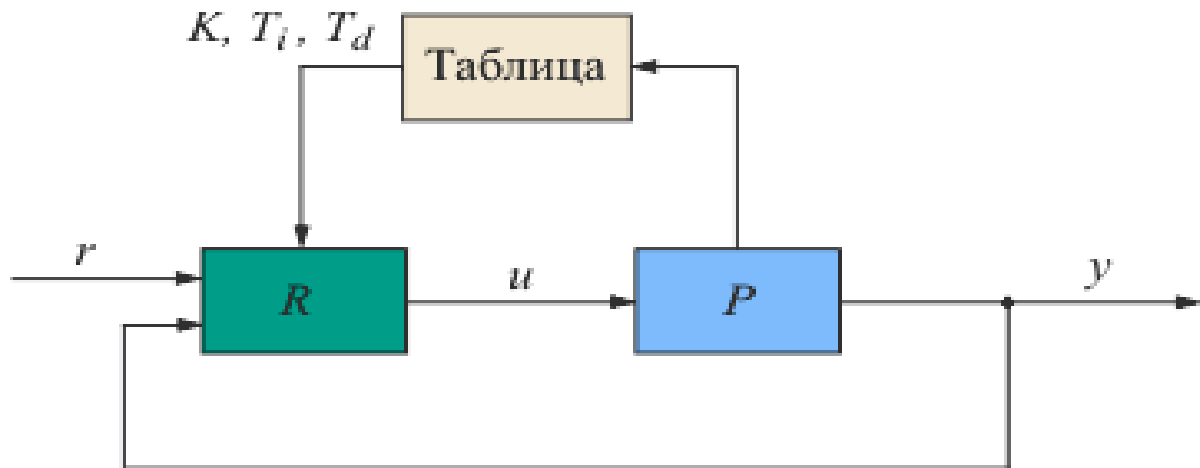


Рисунок 2.1 - Адаптивне управління табличним методом

Усі види автоматичного налаштування (рис.2.2) використовують три принципово важливі етапи: ідентифікація, розрахунок параметрів регулятора, налаштування [6,9]. Часто кінцевий етап включає етап підстроювання (заклучна оптимізація налаштування). Оптимізація налаштування необхідна у зв'язку з тим, що методи розрахунку параметрів регулятора за формулами є спрощеними, не враховують нелінійності об'єкта, зокрема, присутню нелінійність типу "обмеження", а ідентифікація параметрів об'єкта виконується з деякою похибкою.

Підстроювання регулятора може бути пошуковим (без ідентифікації об'єкта, шляхом пошуку оптимальних параметрів) та безпошуковим (з ідентифікацією). Пошукова ідентифікація базується зазвичай на правилах чи ітераційних алгоритмах

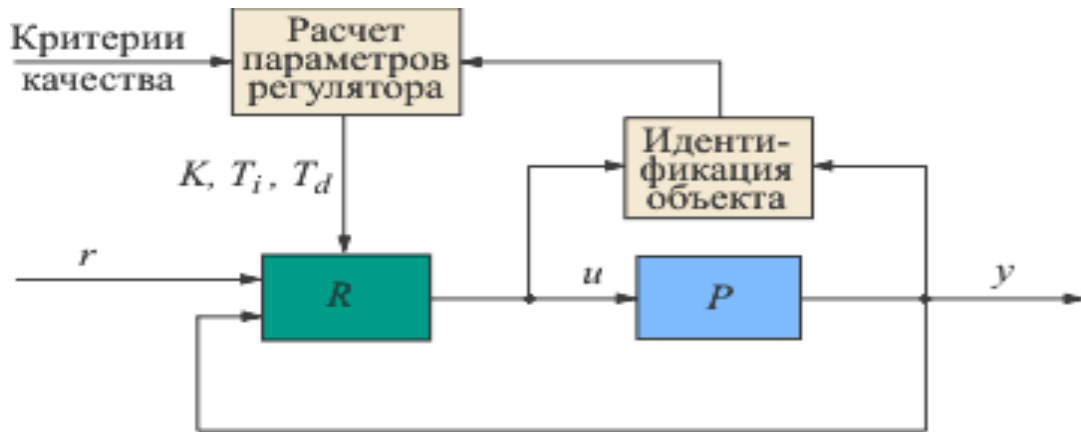


Рисунок 2.2 - Загальна структура адаптивної САУ

Найбільш простим методом адаптації ПІД-регулятора до властивостей об'єкта управління, що змінюються, є табличне управління коефіцієнтами регулятора. Воно може бути використане не тільки для адаптивного керування, але й для керування нелінійними об'єктами, нестационарними процесами, у разі потреби змінювати параметри залежно від деяких умов.

Знаючи заздалегідь можливі зміни режиму роботи системи (наприклад, можливі варіанти навантаження об'єкта), виконують ідентифікацію об'єкта для різних режимів і кожного з них знаходять параметри регулятора. Значення цих параметрів записують до таблиці. У процесі функціонування системи вимірюють величину, що характеризує режим роботи системи та залежно від її значень вибирають з таблиці величини коефіцієнтів ПІД-регулятора.

Описану систему можна як систему з двома контурами регулювання. Однак контур служить для адаптації. Другий для ідентифікації.

З цієї причини табличне управління характеризується високою швидкістю, відсутністю помилкового спрацювання або розбіжності алгоритмів адаптації.

Недоліком цього є великі витрати на попередню ідентифікацію, необхідну для складання таблиці.

Однак цю проблему частково можна вирішити застосуванням спеціальних програмних засобів для автоматичної ідентифікації та адаптації регулятора після виконання яких отримані параметри заносяться в таблицю.

У переважній більшості ПІД-регуляторів, захищених патентами [7], використовуються методи налаштування, що ґрунтуються на формулах, а не на правилах. Ще менше контролерів, які застосовують нейронні мережі та методи оптимізації. Однак частка патентів на контролери, які використовують правила, останніми роками помітно збільшилася, переважно за рахунок регуляторів з нечіткою логікою. Збільшилася частка патентів на регулятори з оптимізацією; вони використовують градієнтні методи, метод найменших квадратів, еволюційні алгоритми.

Foxboro була однією з перших компаній, що представили на ринок адаптивні ПІД-регулятори. Перший адаптивний регулятор Foxboro EXACT, випущений у жовтні 1984 р., був заснований на розпізнаванні образів; надалі було зроблено безліч модифікацій у алгоритмах його функціонування. Ці алгоритми лягли також основою побудови розподіленої системи управління Foxboro. Контролер EXACT включає три функціональні блоки: PIDA, FBTUNE і FFTUNE. PIDA є сучасним ПІД-контролером, FBTUNE служить для налаштування петльового посилення, попереднього налаштування та адаптації, FFTUNE виконує налаштування прямого зв'язку в регуляторі та табличного керування [11].

Якість налаштування контролюється за двома параметрами: перерегулювання та коефіцієнт загасання. У контролерах марки АВВ адаптація ґрунтується на частотній релейній ідентифікації. Перший адаптивний контролер називався ЕСА-40ТМ. Ця система також використовувала метод табличного керування параметрами регулятора. Згодом методи адаптації доповнились безперервною (у часі) адаптацією, а також методами діагностики.

Для ідентифікації використовується режим релейного регулювання. Для цього спочатку встановлюється бажане робоче значення вхідної змінної об'єкта, потім оператор натискає кнопку автоналаштування. Регулятор спочатку

вимірює рівень шуму, потім контур регулювання включається реле з гістерезисом, при цьому алгоритм ПІД - регулювання тимчасово відключається. Величина гістерези встановлюється автоматично, на основі виміряного рівня шуму на виході об'єкта. Чим менший виміряний рівень шуму, тим менше може бути амплітуда коливань у системі в режимі релейного регулювання. Амплітуда коливань автоматично налаштовується такої величини, щоб бути вищим за рівень шуму. Після отримання коливань з амплітудою і частотою експеримент переривається і за його результатами обчислюється частота коливань і коефіцієнт передачі об'єкта на цій частоті методом гармонійної лінеаризації

Адаптація в контролері UDC виконується за допомогою попередньої ідентифікації моделі, так і на основі правил. Ідентифікація виконується за відгуком на стрибок. Величину збільшення уставки щодо робочої точки задає користувач. Експеримент виконується в розімкнутому контурі. Величина затримки визначається час від початку експерименту досі, коли вихідна змінна досягне деякого малого, наперед заданого значення [6-10]

2.1.1. Аналіз програмних засобів автоматичного налаштування ПІД – регуляторів у суднових системах управління

Типова система для налаштування суднового ПІД-регулювальника складається з комп'ютера з програмним забезпеченням під Windows, комплекту модулів вводу-виводу та з'єднувальних кабелів. Об'єкт (паровий котел) включається в контур регулювання, система налаштовується бажаним способом, потім отримані коефіцієнти регулятора записуються в ПІД-контролер. Завдяки зручному інтерфейсу користувача, великої продуктивності комп'ютера і відсутності обмежень на алгоритми ідентифікації системи, вдається отримати параметри регулятора, близькі до оптимальних.

В даний час є близько півсотні комерційних продуктів для налаштування ПІД-регуляторів. У тому числі - Protuner фірми Techmation Inc.,

LabVIEW PID Control Toolset фірми National Instruments, Intelligent Tuner (Fisher-Rosemount), Profit PID (Honeywell) та інших [6].

Переважає більшість програм використовує модель першого порядку із затримкою для опису об'єкта регулювання. Зв'язок з обладнанням виконується за допомогою OPC сервера [6]

Protuner - це система налаштування ПІД-регуляторів фірми Techmation Inc. Система відображає графіки перехідного процесу, виконує перетворення експериментальних характеристик з часової області на частотну і обчислює параметри регулятора, використовуючи кілька різних методів налаштування. Перед початком роботи системи користувачеві пропонується меню для введення апріорної інформації про об'єкт регулювання [7]:

- о діапазон зміни вхідного та вихідного сигналів об'єкта;
- о тип процесу в об'єкті управління: інтегруючий чи ні;
- о бажані одиниці виміру;
- о структура контролера (ідеальна, послідовна чи паралельна);
- о частота дискретизації;
- о постійна часу фільтра у вимірювальному каналі.

Ідентифікація виконується за допомогою аналізу реакції на вхідний стрибок, у замкнутому або розімкнутому контурі, на вибір користувача. Рекомендується варіант у розімкнутому контурі. Після того, як користувач натискає кнопку "Старт", вхідний та вихідний сигнал відображаються на екрані комп'ютера.

Є деякі можливості попередньої обробки зібраних даних. До них відноситься видалення грубих помилок вимірів та викидів, пов'язаних з імпульсними перешкодами, а також цифрова фільтрація. Це дозволяє виконувати експерименти у реальних умовах індустриального оточення.

Після попередньої обробки даних Protuner виконує розрахунок частотної характеристики об'єкта, яка може відображатися у вигляді діаграми Бode, Найквіста або Нікольса [8,9].

Таким чином детальний огляд сучасних методів адаптивного управління та програм додатків фірмам виробників адаптивних контролерів показав, що останнім часом перспективним є застосування методів теорії нечіткої логіки, *що підтверджує перспективність обраної робочої гіпотези.*

2.2. Проведення імітаційного експерименту на програмному тренажері суднового парового котла

Для проведення комп'ютерного експерименту зі збору експериментальних даних про робочі параметри суднового парового котла використовувала програма тренажер SERS 0.3.6 із запуску та управління судновою паротурбінною установкою. Як об'єкт у програмі використовується танкер із дедвейтом 250000 тон.

Номінальні показники агрегатів СЕУ:

- Потужність парових турбін – 28 МВт
- Вихідний тиск пари – 1,6 мПа
- Температура пари – 500 °С
- Парова продуктивність котла – 60 тон/год.
- Тис пари у конденсаторе – 5 кПа
- Кількісно регенеративних нагрівачів - 5.

Загальний вигляд мнемосхеми суднової паротурбінної установки показано на рис.. 2.3.

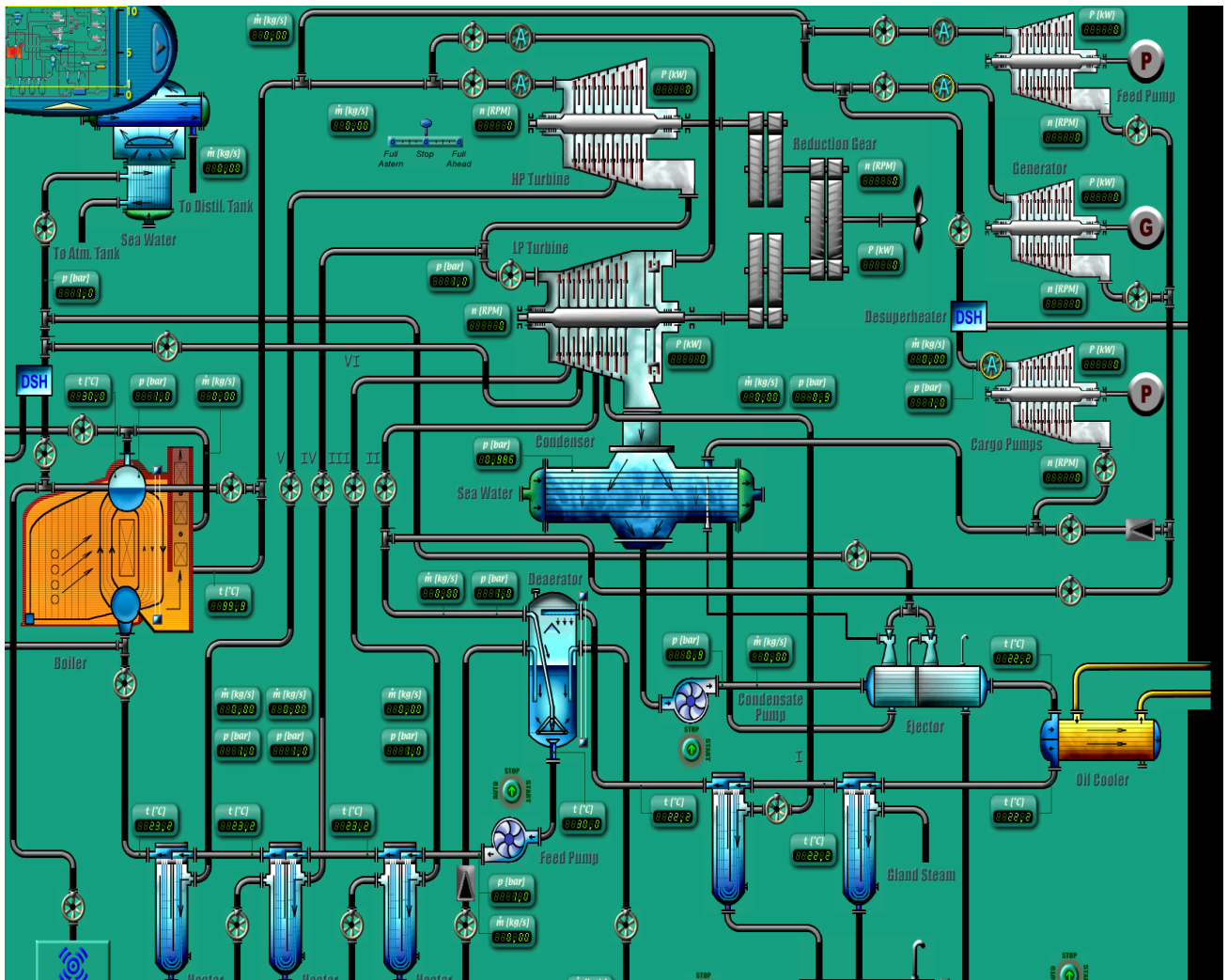


Рисунок 2.3 - Мнемосхема процесу управління паровим котлом та паровими турбінами гребного гвинта та вантажними насосами

Етапи проведення імітаційного експерименту із запуску парового котла та турбін:

Було проведено такі дії:

- Увімкніть насоси подачі води та перекачайте котел до рівня 1/3 л у рідкому склі, а потім увімкніть режим «AUTO».
- Злийте пару пароперегрівача з клапана допоміжного котла в положення «AUTO».
- Увімкніть СТАРТ у положення «Стисне повітря», а потім увімкнуть паливний насос.
- Увімкніть пальники № 1, 2 на паровому котлі.
- Увімкніть «ПУСК» підігрівача котла.

Запуск суднових агрегатів здійснювався за допомогою меню центрального поста керування танкера (рис.2.4)

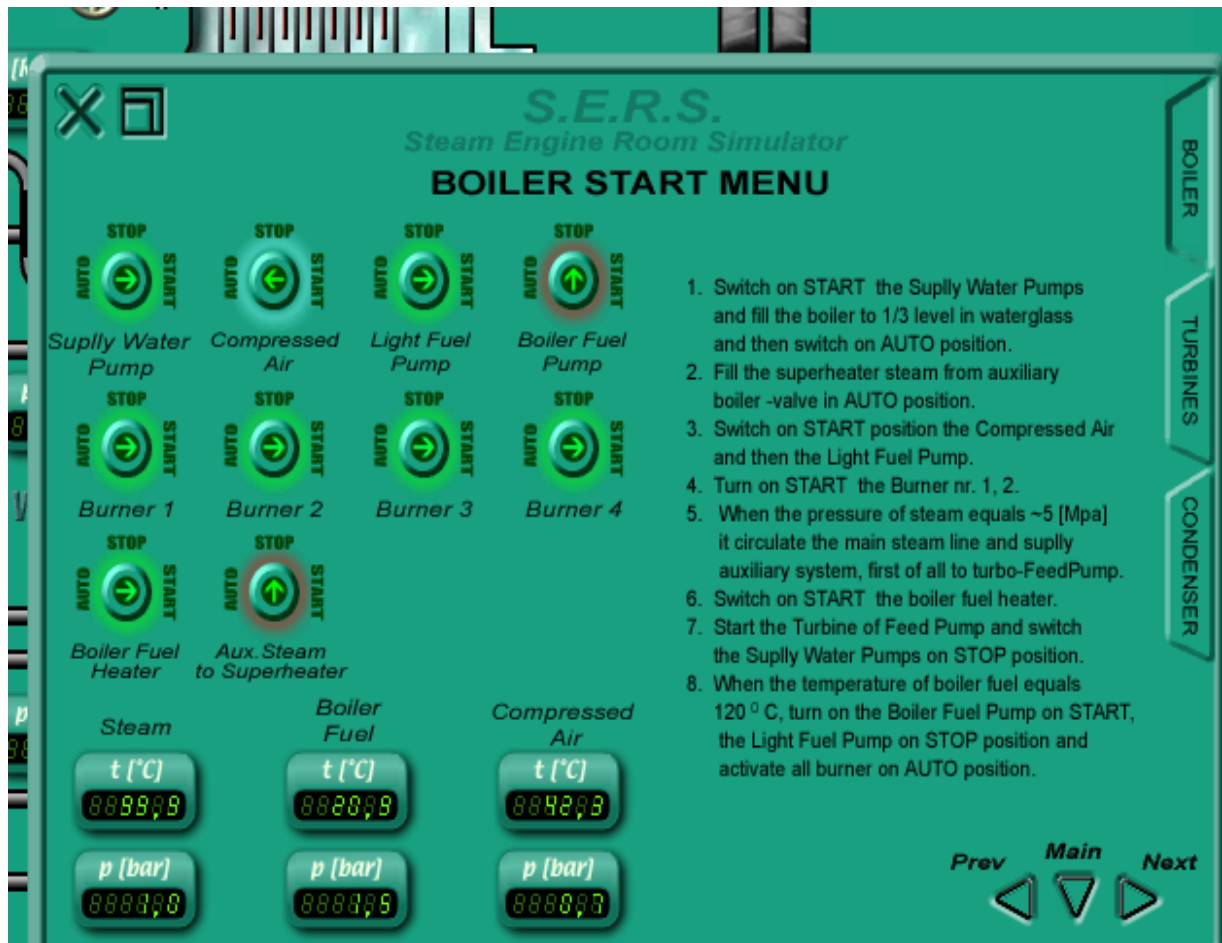


Рисунок 2.4 – Мнемосхема щита управління ДПК

- Коли температура палива в котлі дорівнюватиме 120°C , увімкніть паливний насос котла у положення «START», паливний насос легкого палива у положення «STOP» та активуйте пальник у положення «AUTO».

Мнемосхема паливної системи управління ДПК за допомогою якої проводився основний експеримент з регулювання тиску пари за допомогою зміни падачі палива на пальник показана на рис. 2.5.

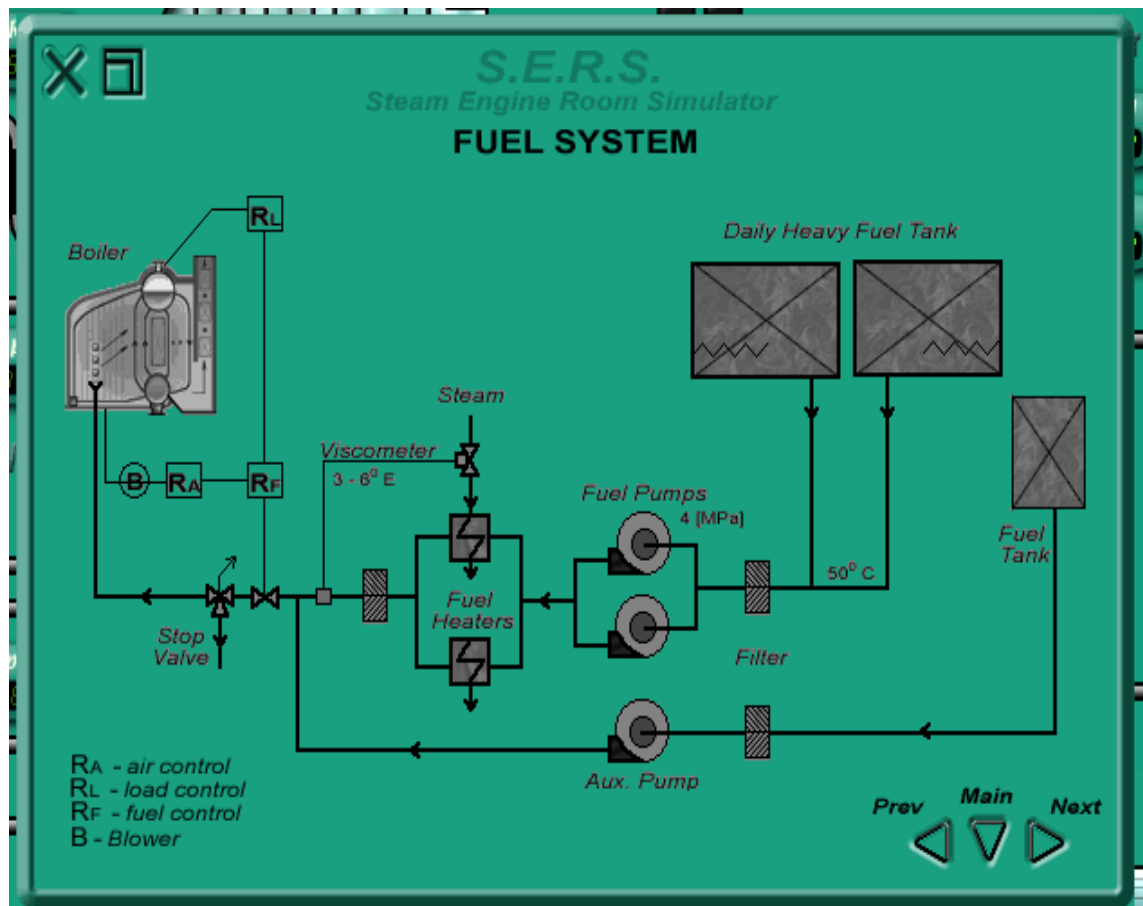


Рисунок 2.5 – Паливна система управління ДПК

Мнемосхема з контрольованими параметрами ДПК показана на рис. 2.6.

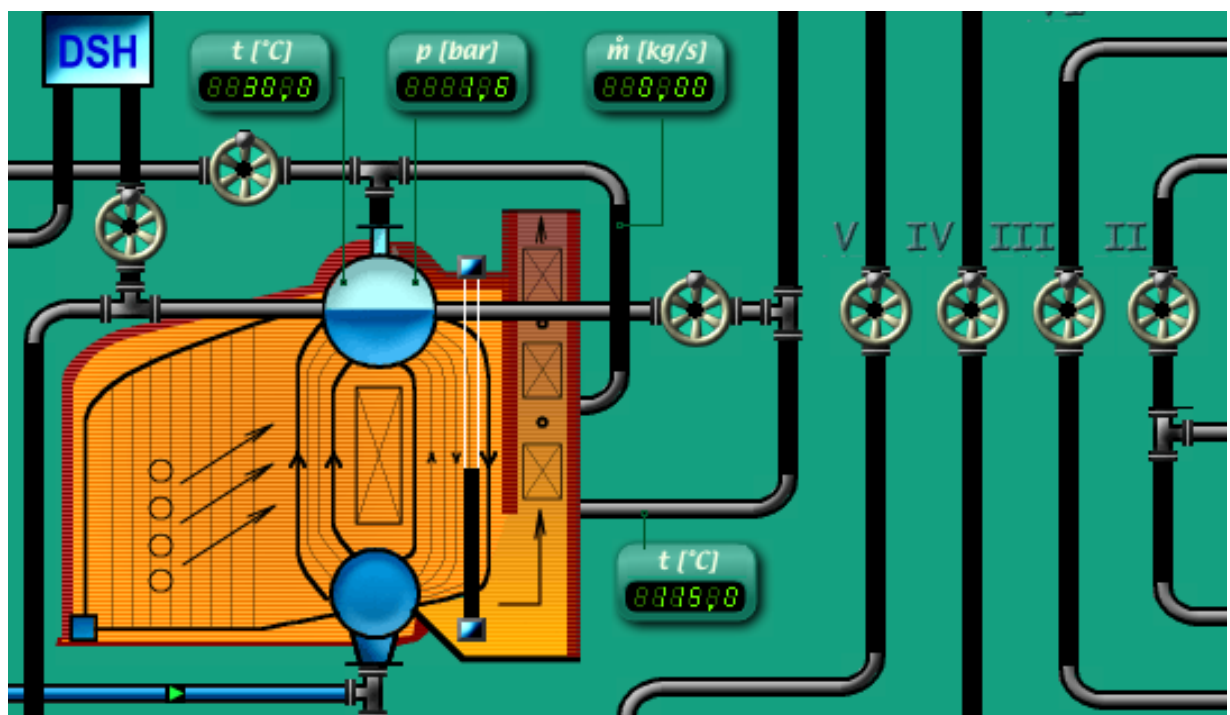


Рисунок 2.6. - Процес запуску парового котла встановленого на танкеру

Після запуску топка котла забарвиться червоним кольором (рис.2.7)

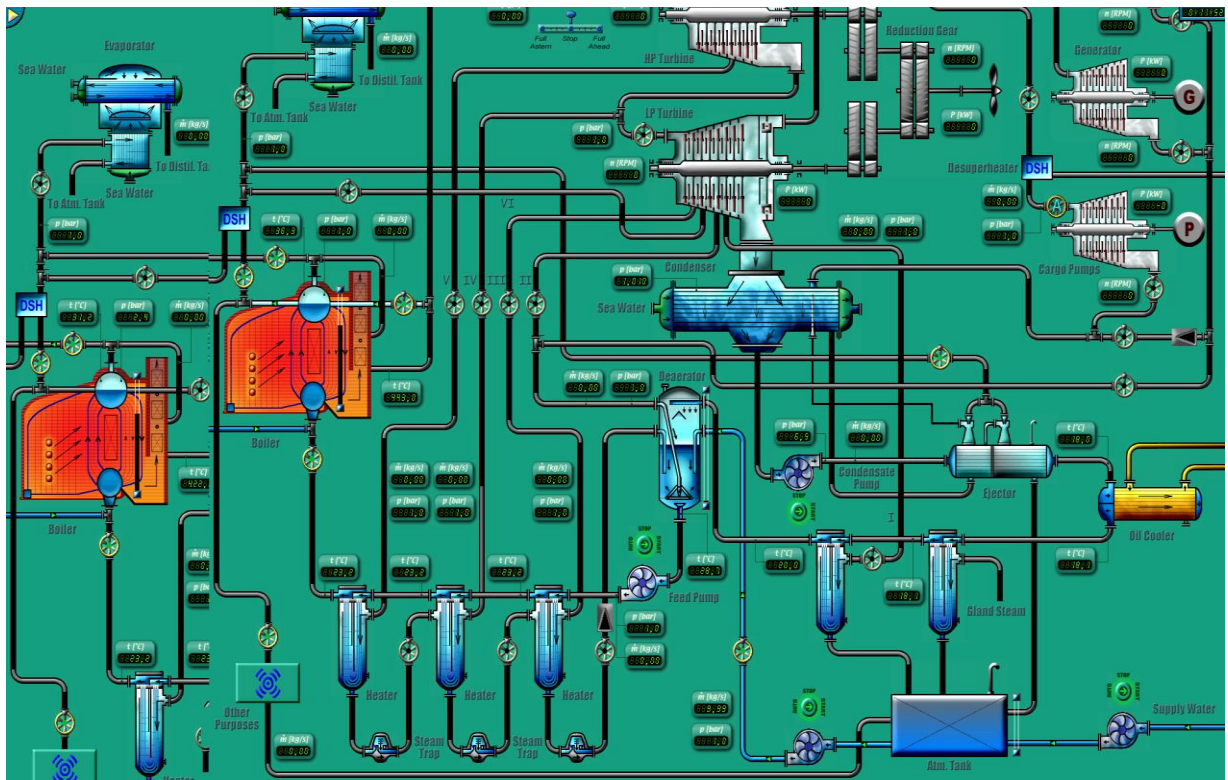


Рисунок 2.7 - Робота системи горіння парових котлів

Було здійснено запуск турбогенератора, насоса з турбонаддувом, а потім турбіни високого та низького тиску. Було проведено такі дії:

1. Перевірте рівень масла в баку та увімкніть основний мастильний насос № 1 під час запуску та № 2 у положенні «AUTO». Тиск масла в системі має дорівнювати 0,5 МПа. Якщо температура олії перевищує 60 °С, то відкрийте клапани на масляному радіаторі.
2. Подайте пару на відкритий клапан турбіни.
3. Запустіть конденсатну систему.
4. Повільно відкрийте головний маневрений клапан у перших турбінах пари на 30-50%-ному рівні обертання ротора турбіни. Відкрийте кран на турбінах.
5. Якщо температура корпусу турбін дорівнює 90°C, це означає, що вони готові до нормальної роботи. Процесу запуску насоса конденсатора пара і гребного винта показані на рис. 2.8 -2.9.

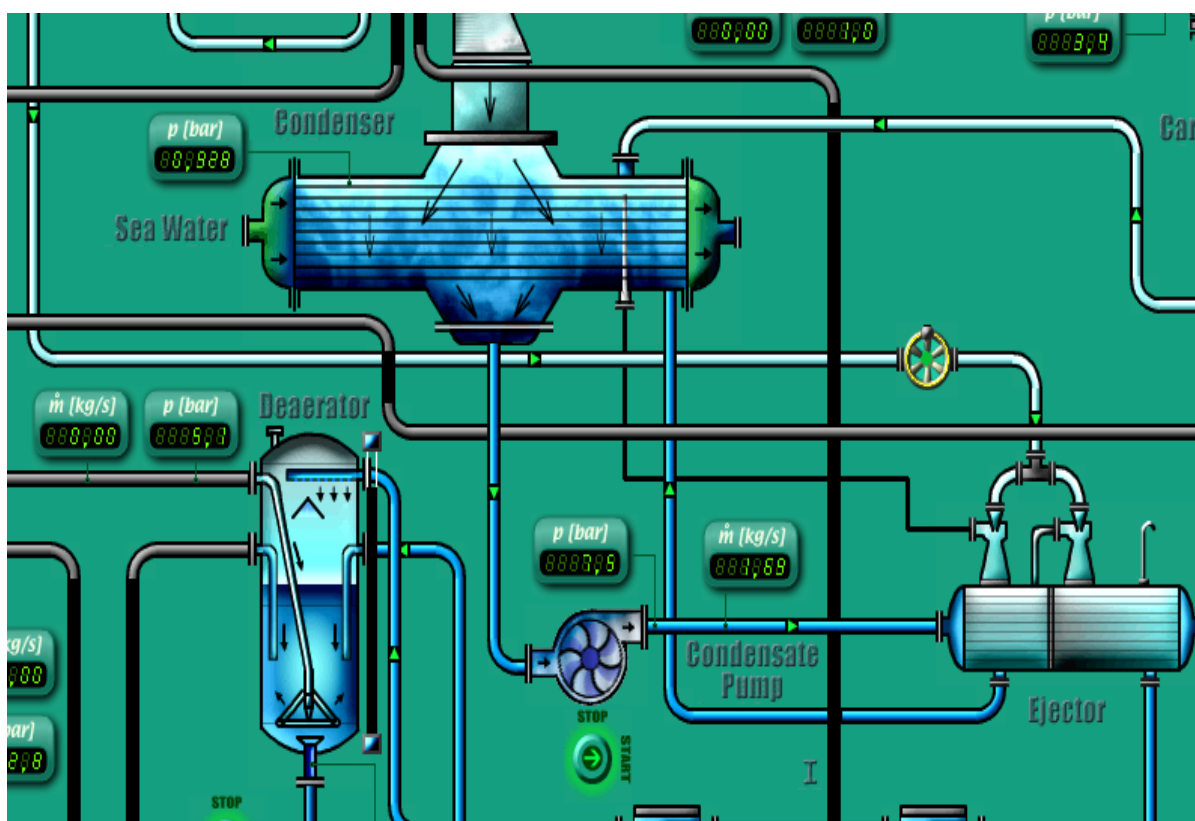


Рисунок 2.8 - Запуск насоса конденсатора пари

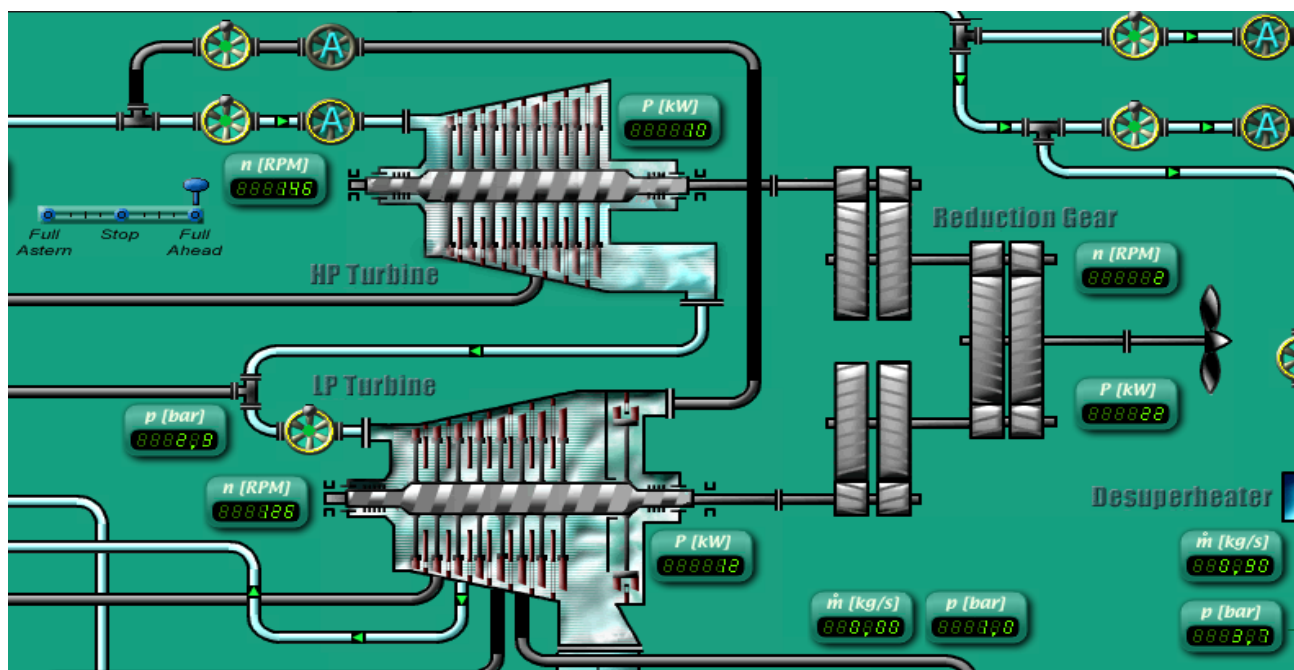


Рисунок 2.9 - Запуск паровых турбин та гребного винта

С помощью данных на мнемосхеме была получена кривая разгона по каналу «давление пара P – положение топливного клапана B » (рис. 2.10)

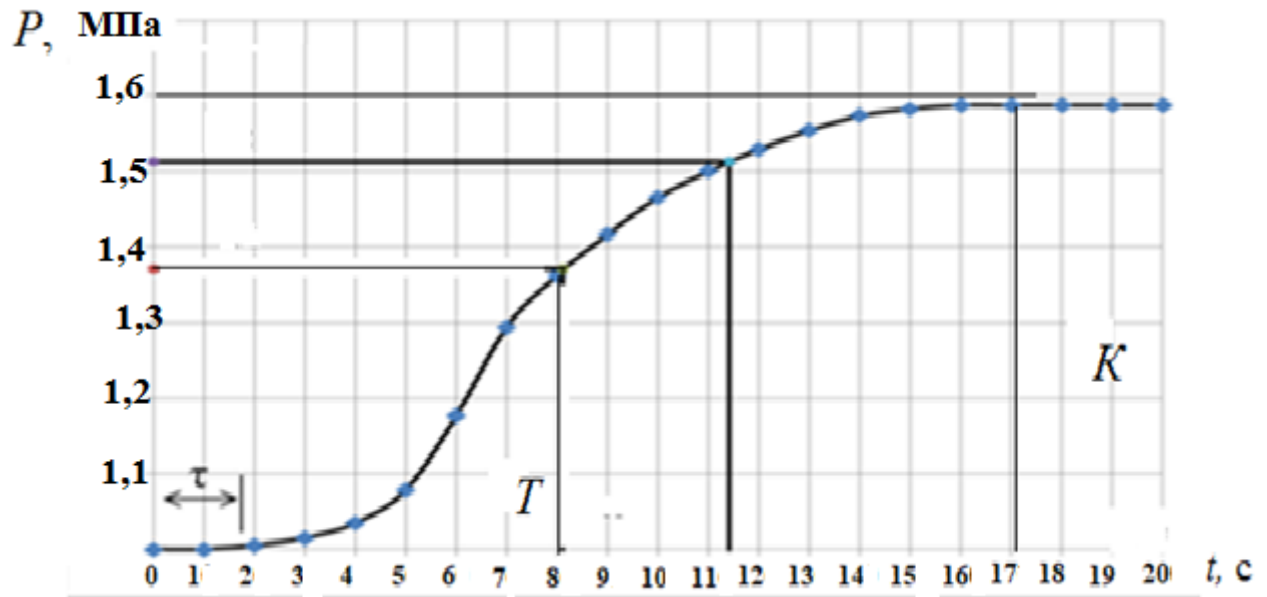


Рисунок 2.10 - Усереднена крива розгону по тиску пару при збуренні витратою палива (B_T), при паровому навантаженні ДПК 95 %

По кривий розгону рис. 2.10 розрухована математична модель СДК по каналу управління за допомогою графічного методу обробки кривий розгону. Запізнювання визначено візуально по кривій: $\tau = 20$ с; Положення клапана палива 50 % ходу (см. рис 2.5.).

$$K_{об} = \Delta P / \Delta B_T = (1,6)/(10 \% \text{ ходу РО}) = 0,16 \text{ МПа} / \text{кг/ч}; \quad T = (11,5 - 2) = 9,5 \text{ сек};$$

$$W(s) = \frac{0,16}{9,5s + 1} e^{-20s}. \quad (2.1)$$

Передатну функцію (2.1) можна представити в виді диференційного рівняння:

$$9,5 \frac{dP(t)}{dt} + P(t) = 0,16 B_T(t - 2).$$

2.3 Розробка математичної моделі контуру управління за допомогою методів параметричної ідентифікації у програмі System Identification Toolbox

Функциональная схема судового парового котла с указанием на ней контролируемых приборов и регуляторов показана на рис. 2.11.

Вхідними управляючими діями математичної моделі ДПК як об'єкту управління (див. рис. 2.12) являються: зміни витрати палива ΔB_t , положення направляючих апаратів надувного вентилятора $\Delta \phi_L$ и димососу $\Delta \phi_r$, витрата живильної $\Delta D_{пв}$ і продувної води $\Delta D_{пр}$. Контролюємими вихідними параметрами являються: зміни концентрації кисню в димових газах ΔC_{O_2} , розрідження в топці ΔP_p , рівня води в барабані котла Δh_o , тиску пару в паровій магістралі ΔP_m або витрата пару ΔD_n (в залежності від режиму роботи котла), вмісту солі в барабані котла ΔCa [15]. Основними збурючими діями являються зміни витрат $\Delta \phi_n$ і тиску пару в паропроводі ΔP , зумовлене зміною теплового навантаження споживання пару агрегатами СЭУ.

При розрахунку багатомірної і типової систем автоматичного регулювання і моделюванні їх роботи масові витрати палива ΔB_t , живильної $\Delta D_{пв}$ и продувної $\Delta D_{пр}$ води будуть виражені через положення відповідних регулюючих клапанів $\Delta \phi_B$, $\Delta \phi_{пв}$ и $\Delta \phi_{пр}$.

Для більш детальної обробки експериментальних даних та вибору найліпшого типу моделі та її порядку використовувала спеціалізована програма System Identification Toolbox пакету MatLab [19].

System Identification Toolbox – надає можливості для побудови математичних моделей динамічних систем за вимірними даними входу та виходу реальної системи.

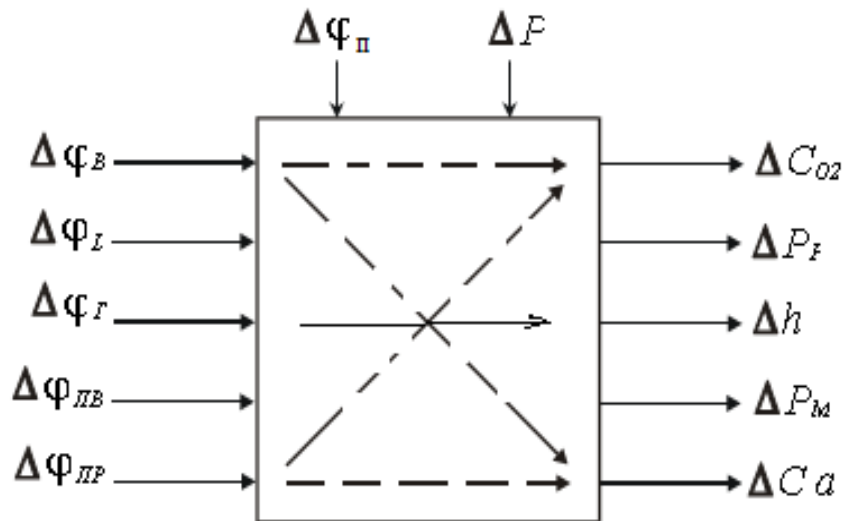


Рис. 2.12. Параметрична схема СДК

System Identification Toolbox надає функції MATLAB, блоки Simulink та інтерактивні інструменти для створення та використання моделей динамічних систем. Можна використовувати дані входу, виходу в часовій та частотній області для ідентифікації безперервних та дискретних передавальних функцій, моделей процесів та моделей у просторі станів.

За допомогою System Identification Toolbox можна використовувати такі методи ідентифікації [19]:

- максимальної правдоподібності,
- мінімізації помилки прогнозу (PEM - prediction-error minimization),
- системної ідентифікації підмножини та
- інші способи ідентифікації.

Для нелінійної системної динаміки можна оцінювати моделі Хаммерстайна-Вінера (Hammerstein-Weiner) та нелінійні моделі ARX (AutoRegresive model with eXternal input (АвтоРегресійна модель із зовнішнім входом)) з вейвлетною мережею, моделі з деревоподібним поділом та моделі з неліною.

За допомогою System Identification Toolbox можна виконувати ідентифікацію системи як чорну скриньку для оцінки параметрів певної

користувачем моделі. Можна використовувати ідентифіковану модель для передбачення відгуку системи та симуляції в Simulink.

System Identification Toolbox також дозволяє користувачеві моделювати дані тимчасової послідовності та виконувати прогнозування тимчасової послідовності.

System Identification Toolbox дозволяє користувачеві створювати моделі за вимірними даними на вході та виході. З його допомогою можна [19]:

- аналізувати та обробляти дані;
- визначати відповідну структуру, порядок моделі та виконувати оцінку параметрів моделі;
- перевіряти достовірність отриманої моделі.

Можна використовувати ідентифіковані лінійні моделі для аналізу та проектування системи керування за допомогою Control System Toolbox. Можна додавати розпізнані моделі до Simulink за допомогою блоків, що надаються комплектом інструментів. Можна також використовувати ідентифіковані моделі для передбачення.

Ключові особливості середовища розробки математичної моделі [19]:

- Можливість ідентифікації передавальних функцій, моделей процесів та моделей у просторі станів за даними відгуку у частотній та часовій області
- Можливість використання для оцінки авторегресійної моделі (ARX, ARMAX), моделі Бокса-Дженкінса (Бокса-Дженкінса) та Output-Error (Вихід-помилка) моделі з використанням технік ідентифікації типів: максимальна ймовірність, мінімізація передбаченої помилки (PEM - prediction-error) minimization), підпросторова система
- Моделювання тимчасової послідовності (AR, ARMA, ARIMA) та прогнозування
- Ідентифікація нелінійних ARX моделей та моделей Хаммерстайна-Вінера з нелінійностями на вході та виході, такими як насиченість та мертва зона
- Ідентифікація лінійних та нелінійних систем як чорних ящиків для оцінки моделей, заданих користувачем

- Оцінка затримок, видалення тренду, фільтрація, повторна дискретизація та відновлення даних, що відсутні
- Блоки для використання ідентифікованих моделей у Simulink

Під час роботи у програмі було виконано такі етапи (рис. 2.13 -2.18) :

На певному етапі було здійснено введення експериментальних даних та побудовано графіки експериментальних залежностей (рис.2.13 – 2.15).

Завдання параметричної ідентифікації зводиться до пошуку таких значень параметрів моделі, які забезпечують найбільшу близькість значень на виході, розрахованих за моделлю та отриманих в експерименті, при однаковому значенні вхідних даних.

Як критерій оцінки моделі або її точності використовується середньоквадратичне відхилення.

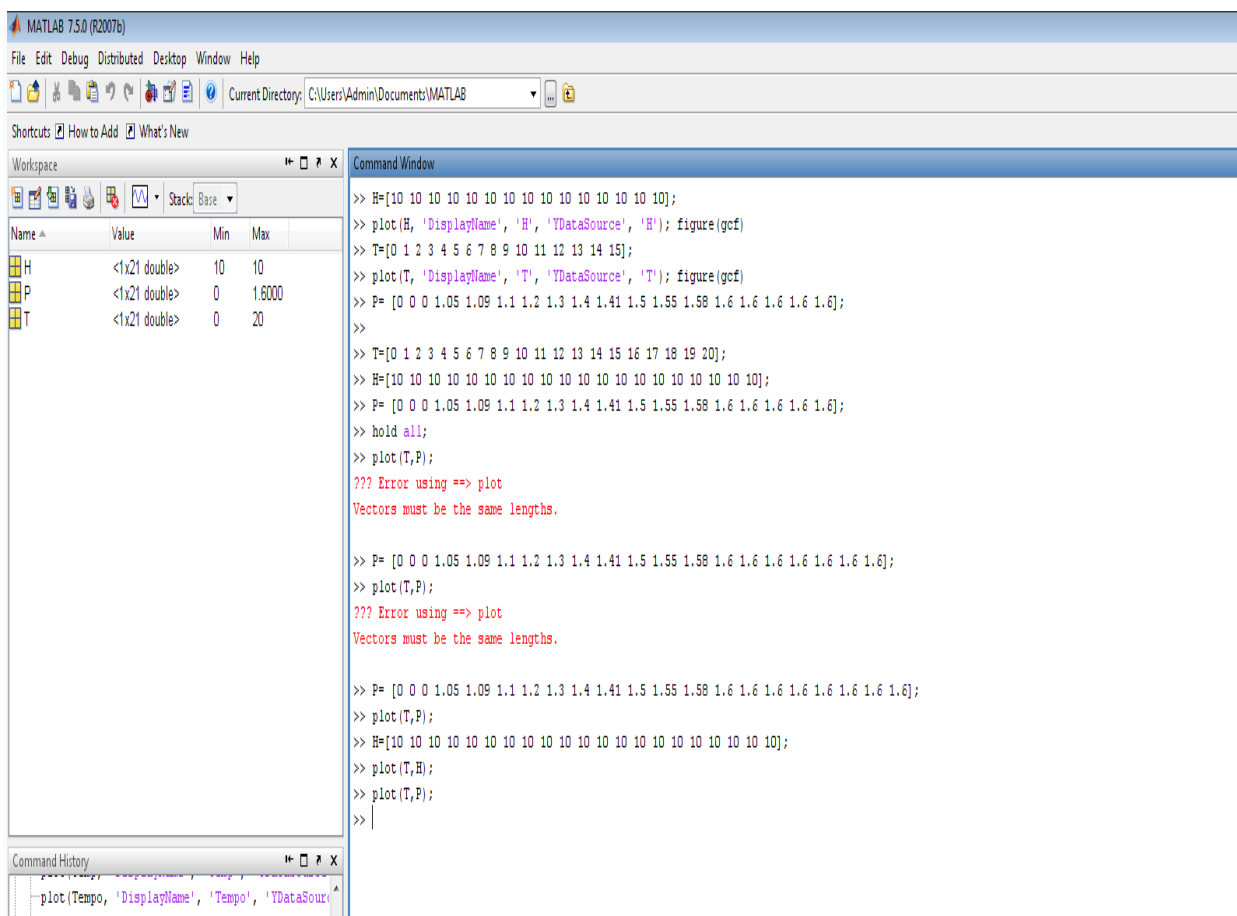


Рисунок 2.13 – Програма для введення вихідних даних за допомогою командної рядки (година, тиск, положення паливного клапана)

Експериментальна крива розгону показано на рис. 2.14.

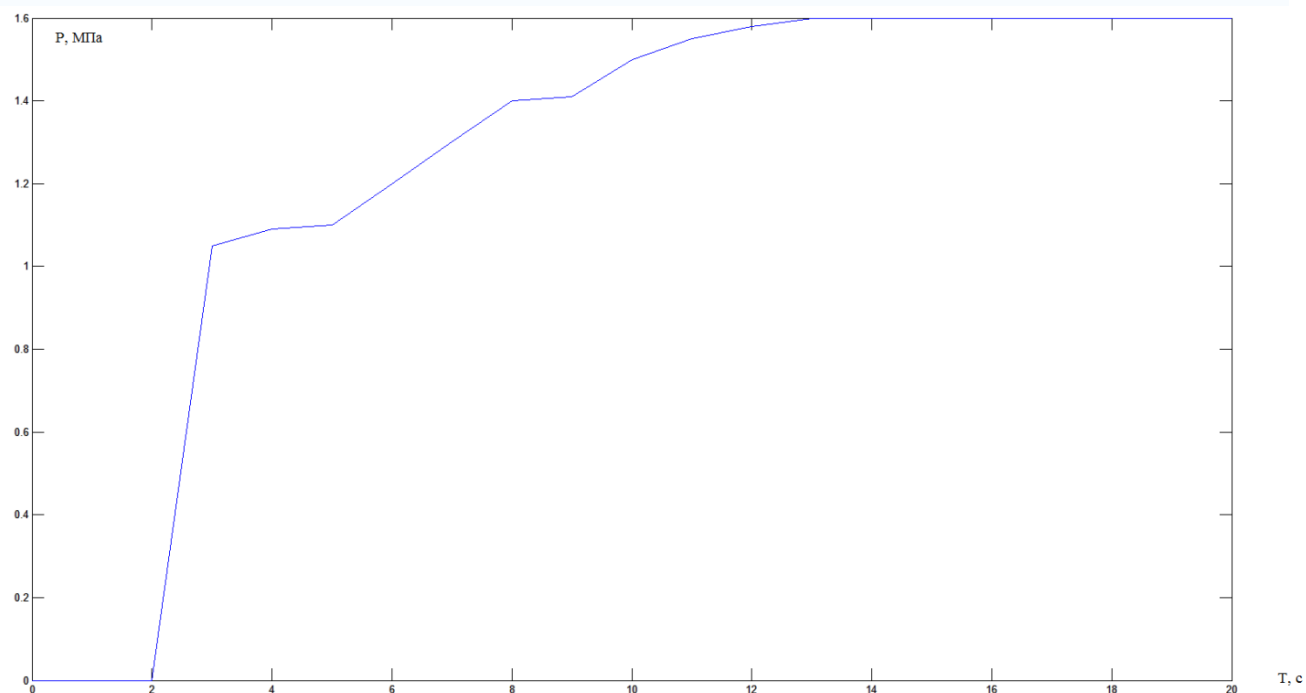


Рисунок 2.14 – Експериментальна крива розгону тиску пари суднового парового котла Mitsubishi MAC 60 при номінальному паровому навантаженні

Графічна залежність положення паливного клапана представлена на рис.2.15.

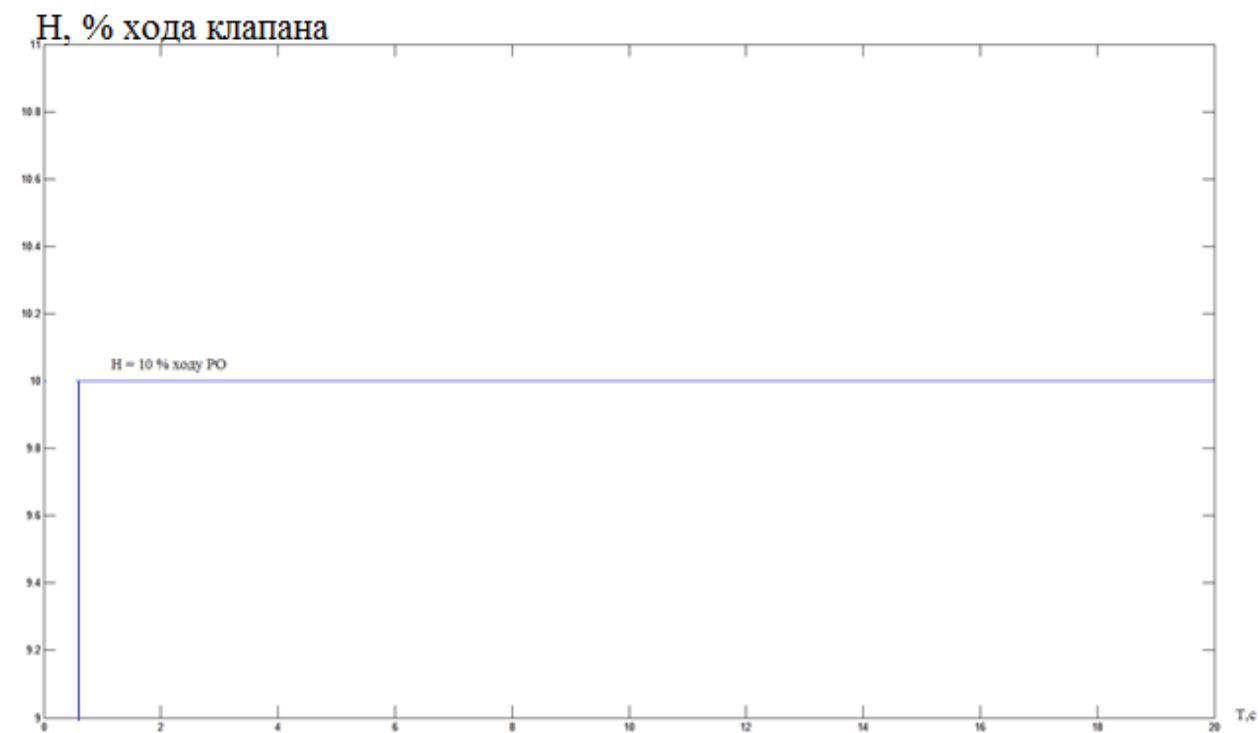


Рисунок 2.15 – Графік положення регулюючого органу (клапану)

Процес завантаження експериментальних даних представлений на рис. 2.16.

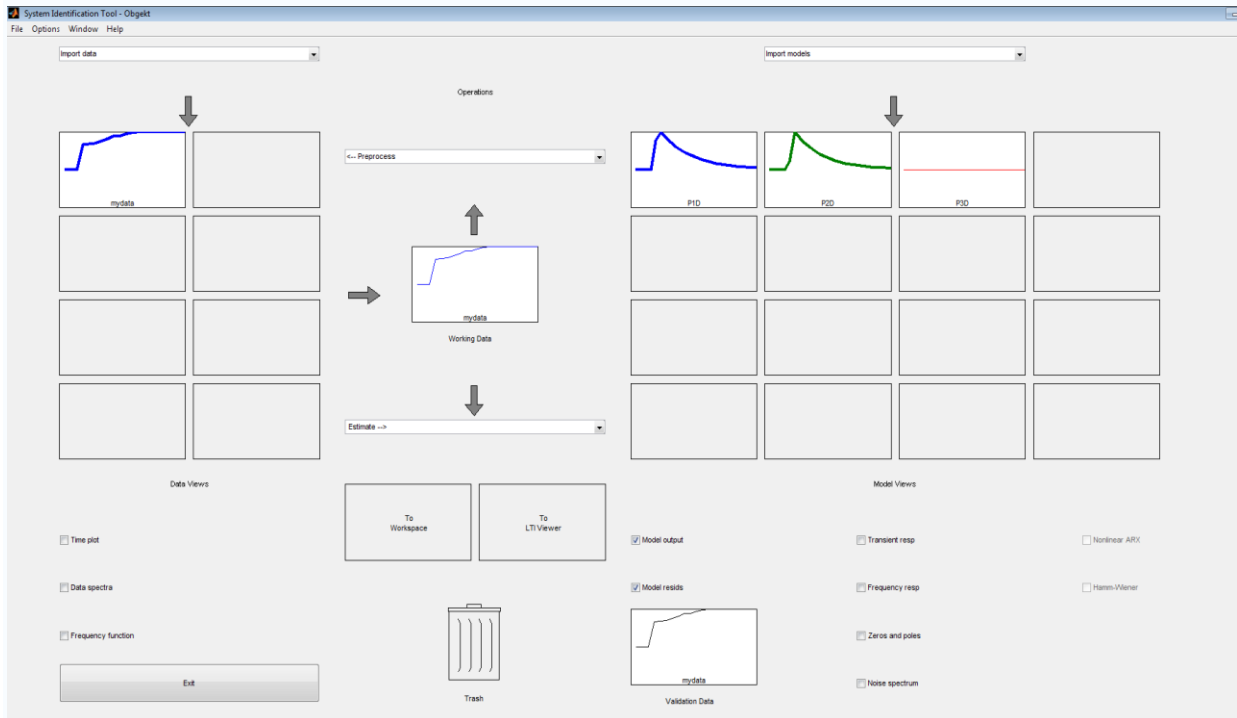


Рисунок 2.16 - Процес завантаження експериментальних даних у програму параметричної ідентифікації

Процеси розрахунку значень параметрів моделі першого порядку та порівняльні характеристики експериментальних та модельних даних показані на рис. 2.17 –2.18.

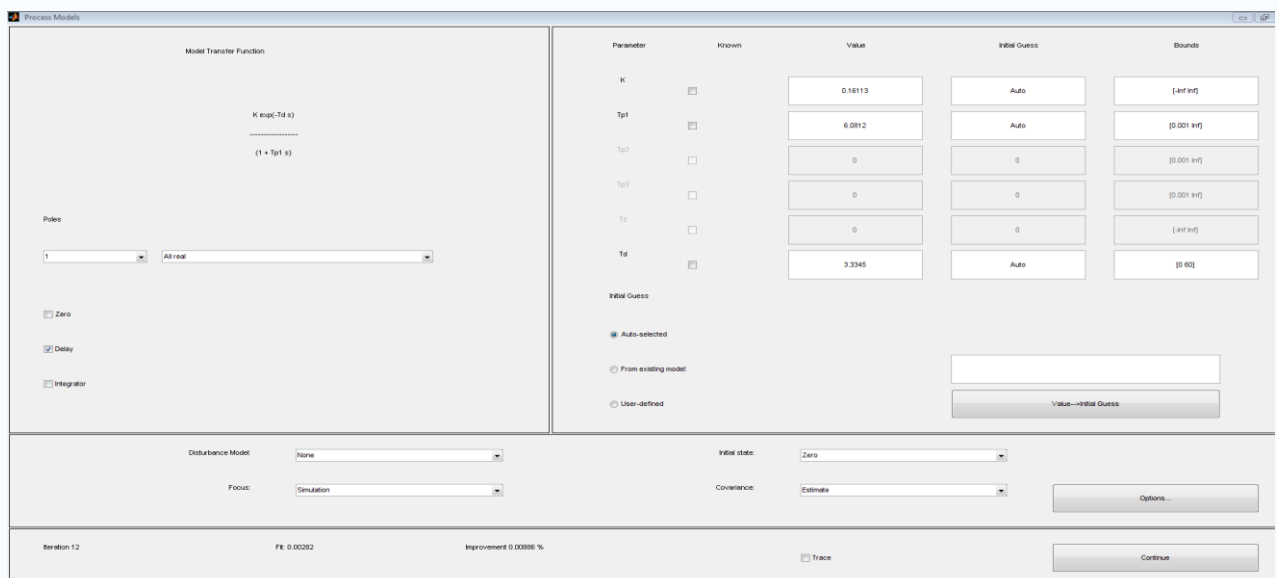


Рисунок 2.17 - Процес розрахунку параметрів моделі (передавальної функції першого порядку із запізненням)

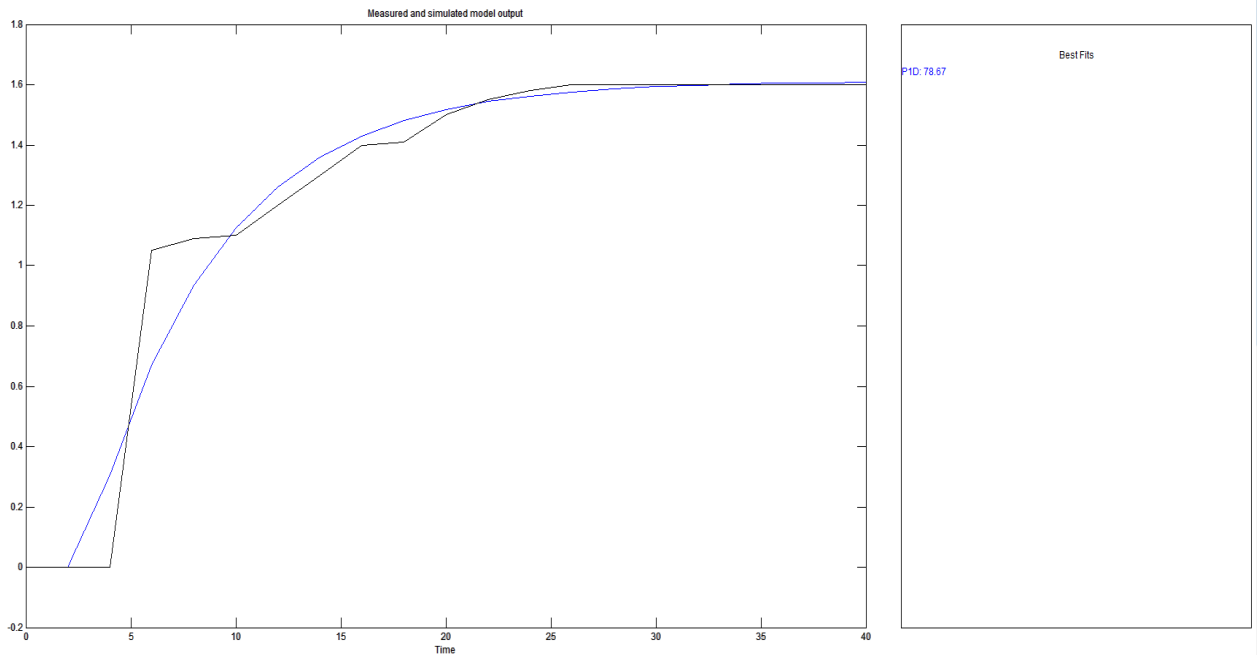


Рисунок 2.18 - Порівняльний аналіз даних експерименту і моделі (ступінь адекватності моделі = 78 %, тобто.точність моделі 78 %)

Значення математичної моделі (передавальної функції інерційної ланки першого порядку зі ланкою запізнення) показано на рис. 2.19

```

Process model with transfer function
      K
G(s) = ----- * exp(-Td*s)
      1+Tp1*s
with  K = 0.16113
      Tp1 = 6.0812
      Td = 3.3345
Estimated using PEM from data set mydata
Loss function 0.0150315 and FPE 0.020042
  
```

Рисунок 2.19 - Розраховані значення математичної моделі

Просмор значень авторегресії та середнього квадратичного відхилення можна побачити за допомогою їхньої візуалізації (рис.2.20)

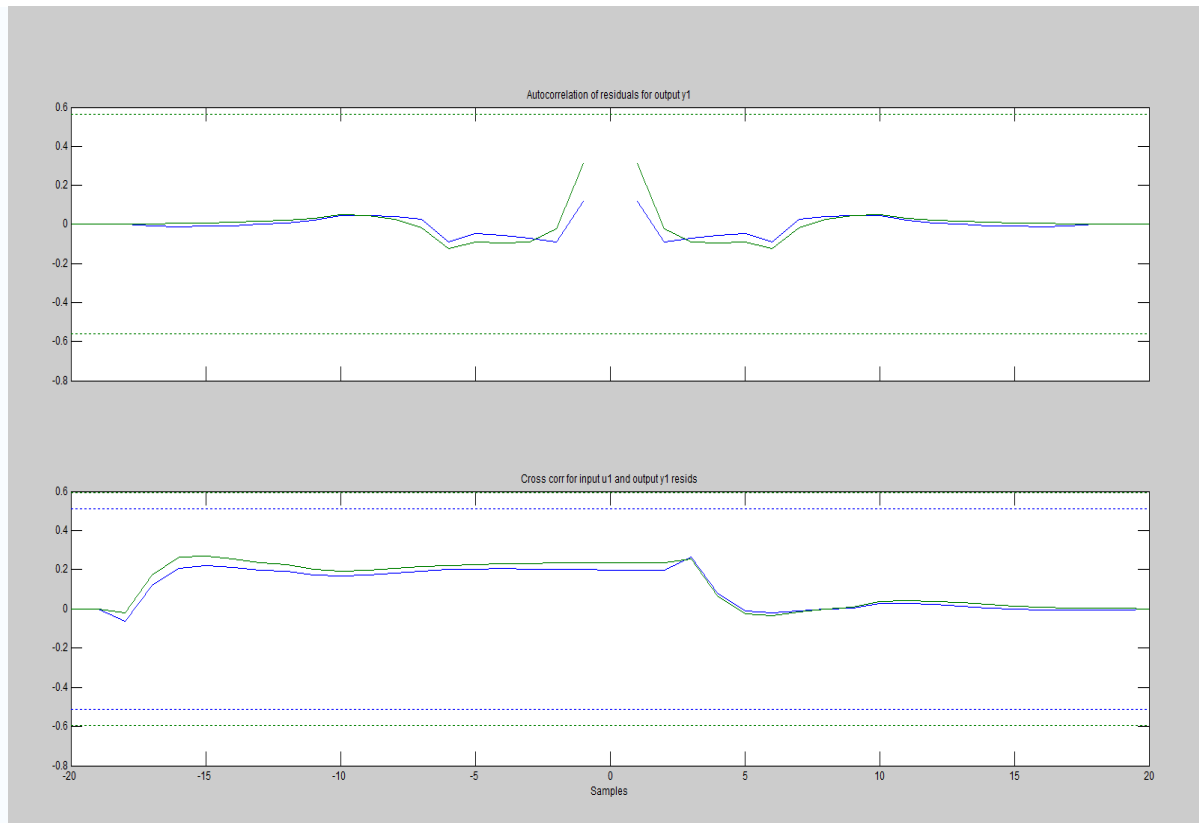


Рисунок 2.20 – Квадратичні відхилення модельних даних від експериментальних

Для аналізу можливості підвищити ступінь точності моделі проводився другий експеримент на вибір порядку моделі. Розрахункові дані показано на рис. 2.21.

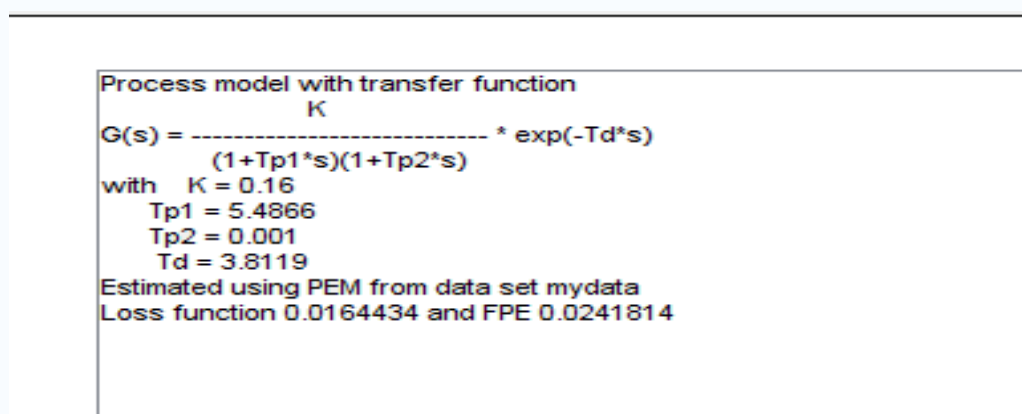


Рисунок. 2.21 - Розрахункові значення передавальної функції інерційної ланки другого порядку з ланкою запізнення

Порівняльний аналіз показника адекватності (точність моделі) за двома моделями та експериментом показаний на рис. 2.22.

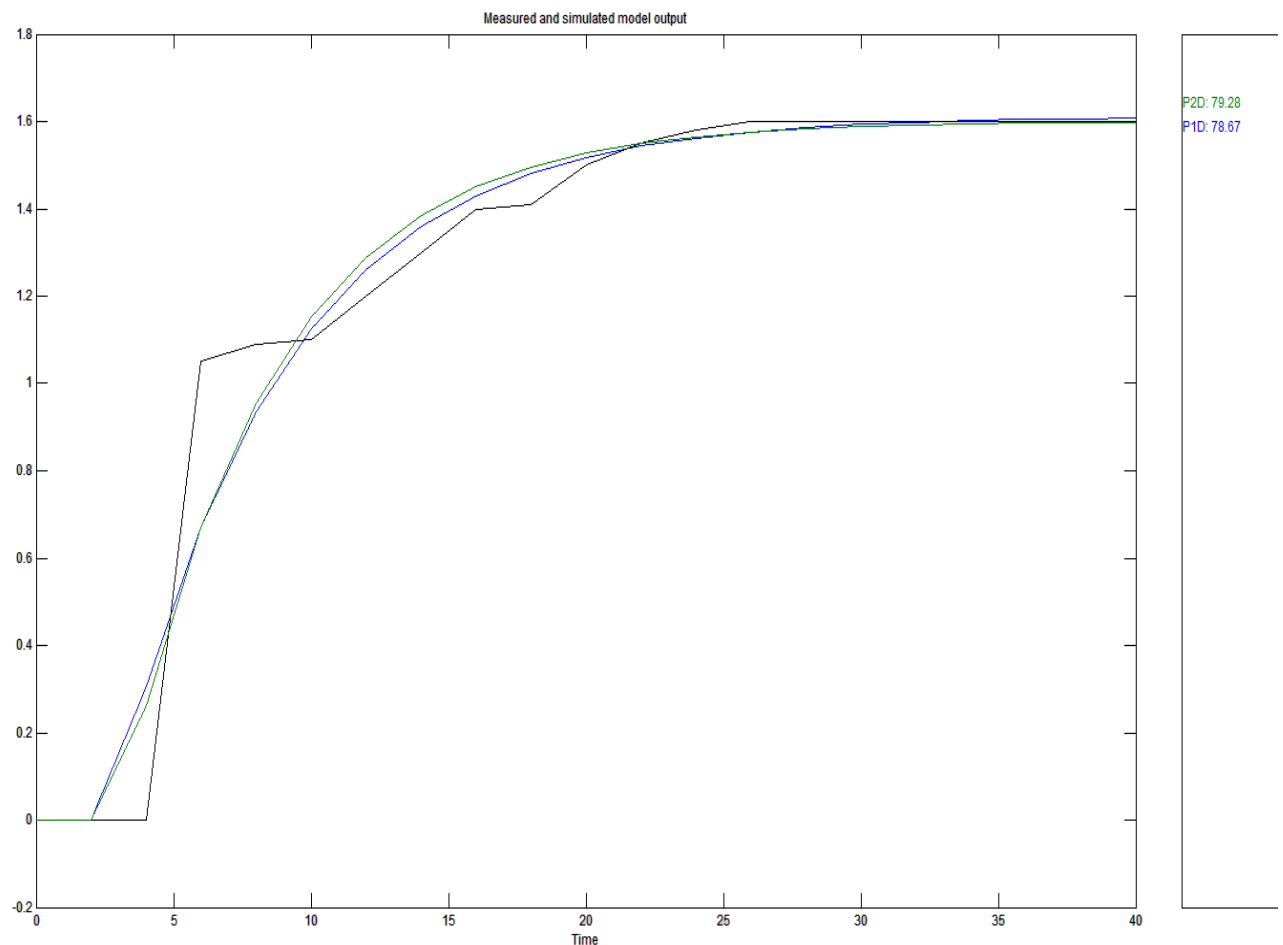


Рисунок 2.22 – Графічні залежності, що відображають експериментальні дані за допомогою запропонованих математичних моделей. (Ступінь адекватності моделі другого порядку 80%.)

Модель третього порядку виявилася із значенням точності 70%, тобто гірше. Таким чином, на підставі порівняльного аналізу було обрано математичну модель другого порядку у вигляді інерційної ланки зі ланкою запізнення. Модель добре відображає експеримент і може бути використана для подальших розрахунків параметрів ПП – регуляторів у САУ тиску пари судових котлів.

РОЗДЕЛ 3. РОЗРОБКА НЕЧІТКОЇ АДАПТИВНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТИСКОМ ПАРУ

3.1. Вибір структури та алгоритму нечіткої системи адаптації параметрів ПІ-регулятора

Передумовою розробки теорії нечітких множин є принцип несумісності, згідно з яким складність системи та точність, з якою її можна описати традиційними математичними методами, по суті суперечать один одному. Методи нечіткої логіки дозволяють будувати логіко-лінгвістичні моделі, що відображають загальну смислову постановку задачі, використовуючи якісні уявлення, що відповідають «людським» способам міркувань та прийняття рішень. Ефективність застосування апарату нечіткої логіки базується на ряді теорем, аналогічних теорем про повноту для нейронних мереж, сенс яких зводиться до того, що система на основі алгоритму нечіткого виведення при виконанні певних, не дуже жорстких умов є універсальним апроксиматором. Основна перевага систем з нечіткою логікою - це здатність використовувати умови та методи вирішення завдань, описані мовою, близькою до природного. Однак класичним системам з нечіткою логікою, властивим певне передумова так,: набір нечітких правил, вид і параметри функцій приналежності, що описують вхідні та вихідні змінні системи, а також вид алгоритму нечіткого висновку вибираються суб'єктивно експертом-людиною. І від досвіду, знань і кваліфікації залежить ефективна робота нечіткої системи управління або адаптації САУ [11].

Нечітка логіка — набір нестрогих правил, у яких досягнення поставленої мети можуть використовуватися радикальні ідеї, інтуїтивні здогади, і навіть досвід фахівців, накопичений у відповідній галузі. Нечіткої логіки властива відсутність суворих стандартів. Найчастіше вона застосовується в експертних системах, нейронних мережах та системах штучного інтелекту. Замість традиційних значень «Істина» і «Брехня» в нечіткій логіці використовується

ширший діапазон значень, серед яких Істина, Брехня, Можливо, Іноді, Не пам'ятаю (Як би Так, Чому б і Ні, Ще не вирішив...). Нечітка логіка просто незамінна в тих випадках, коли на поставлене запитання немає чіткої відповіді (так чи ні; 0 або 1) або наперед невідомі всі можливі ситуації. Наприклад, у нечіткій логіці висловлювання виду « X є велике число» інтерпретується як має неточне значення, яке характеризується деяким нечітким безліччю. «Штучний інтелект та нейронні мережі – це спроба змоделювати на комп'ютері поведінку людини. Оскільки люди рідко бачать навколишній світ лише у чорно-білому кольорі, виникає у використанні нечіткої логіки» [12].

Методи адаптивного налаштування регуляторів, викладені у другому розділі, не є оптимальними при сильних обуреннях на об'єкти управління і можуть бути покращені за допомогою подальшого підстроювання коефіцієнтів ПД - регулятора. Підстроювання настроювальних параметрів може бути виконано оператором на підставі правил або автоматично, за допомогою блоку нечіткої логіки (рис. 3.1). Блок нечіткої логіки (фаззі-блок) використовує базу правил підстроювання та методи нечіткого виведення. Фаззі-підстроювання дозволяє зменшити перерегулювання, знизити час встановлення та підвищити робастність ПД-регулятора. Процес автоналаштування регулятора за допомогою блоку нечіткої логіки починається з пошуку початкових наближень коефіцієнтів регулятора. Це робиться шляхом Зиглера-Никольса, з періоду своїх коливань у замкнутої системі і петлевого посилення. Далі формулюється критеріальна функція, необхідна пошуку оптимальних значень параметрів налаштування методами оптимізації. Під час налаштування регулятора використовують кілька кроків [13].

Спочатку вибирають діапазони вхідних та вихідних сигналів блоку автоналаштування, форму функцій належності шуканих параметрів, правила нечіткого виведення, механізм логічного виведення, метод дефазифікації та діапазони масштабних множників, необхідних для перерахування чітких змінних у нечіткі. Параметри моделі вибираються з урахуванням даних спостережень за перехідними процесами. Потім за допомогою програми

ідентифікації розраховуються значення передавальної функції (див. розрахунок другого розділу).

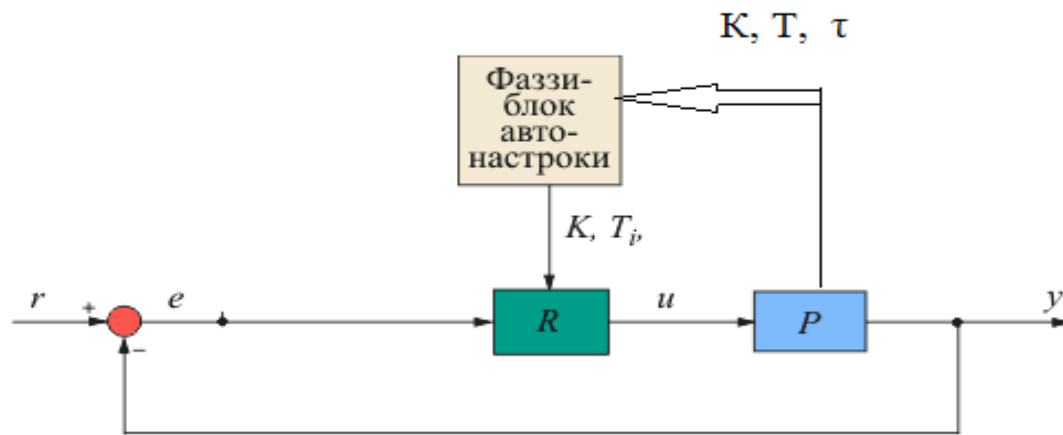


Рисунок 3.1 - Структура ПІ-регулятора з блоком автоналаштування на основі нечіткої логіки

Пошук параметрів регулятора виконується методами оптимізації. Для цього вибирається цільова функція як інтеграл від суми квадратів помилки регулювання та часу встановлення. У критерій мінімізації іноді додають швидкість наростання вихідної змінної об'єкта.

В якості параметрів, що потрібно знайти, вибирають положення максимумів функцій приналежності і масштабні коефіцієнти на вході і виході фаззи-блока. До завдання оптимізації додають обмеження діапазон змін інтервалів функцій приналежності. Одним з найпоширеніших є алгоритм І. Мамдани. Він був запропонований в 1975 р. англійським математиком І. Мамдани (Ebrahim Mamdani) [14]. По своїй суті цей алгоритм відбиває розглянуті вище етапи (рис. 3.2.) і може бути представлений у такий спосіб:

Правило 1: Якщо $x_0 \in A_1$ І $v_0 \in B_1$ ТО $z_0 \in Z_1$,

Правило 2: Якщо $x_0 \in A_2$ І $v_0 \in B_2$ ТО $z_0 \in Z_2$,

де x_0 , v_0 – вхідні змінні, z_0 – вихідна змінна (керуючий вплив), A_1 , A_2 , B_1 , B_2 , Z_1 , Z_2 – нечіткі безлічі з П – образними функціями належності. У графічному виді (рис.8.7) етап №1 полягає у визначенні значень функцій належності першої

частини умов правил 1 й 2. Етап №2 - знаходження значень функцій належності другої частини умов правил 1 й 2 (етапи фаззифікації). Етап №3 - агрегування з нечіткої кон'юнкцією й $\min$ - активізація (заштриховані області). Етап №4 - акумуляція двох висновків і дефаззифікація методом центра ваги.

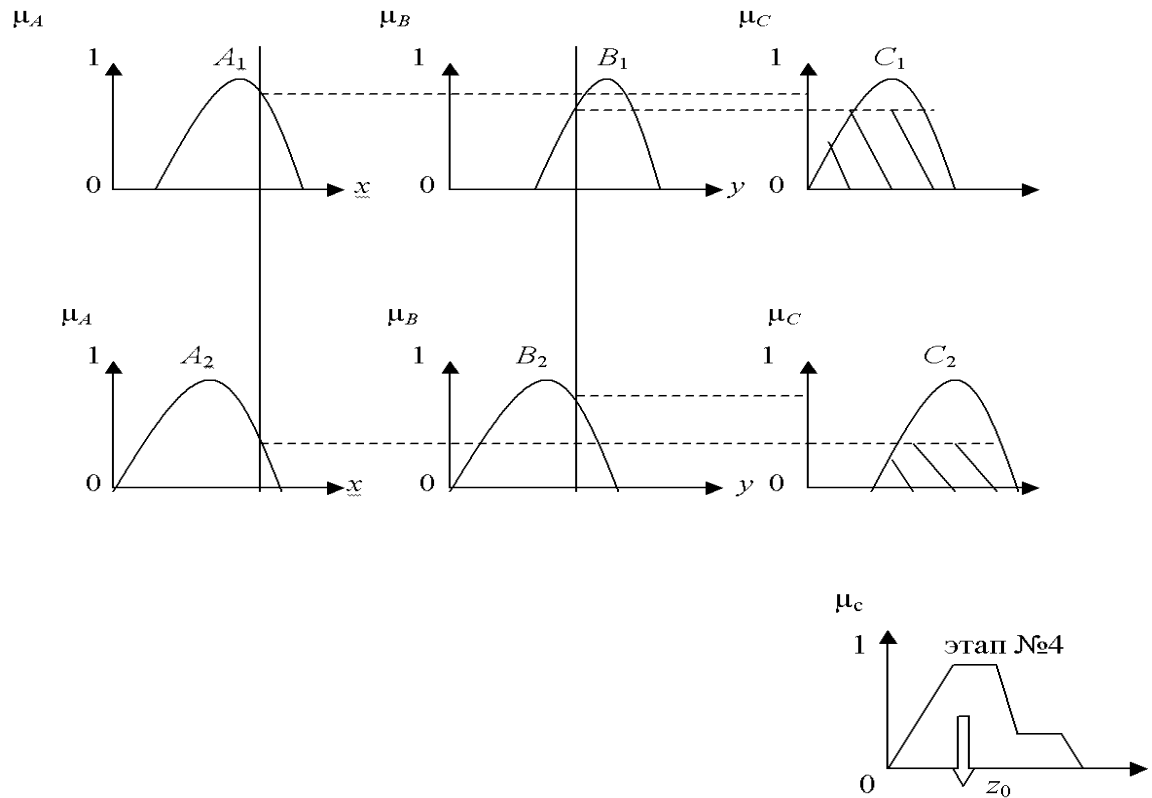


Рисунок 3.2 - Ілюстрація алгоритму І. Мамдани

Отже, використання теорії нечітких множин є перспективним напрямком для рішення поставлених завдань. Однак різноманіття різного виду функцій належності, методів дефаззифікації різні значення, що дають, чіткого керування, алгоритмів нечіткого висновку й т.д. роблять рішення поставлених завдань складним науковим процесом, при якому велике значення мають результати експериментальних даних, отриманих при апробації нечітких моделей. Розробці нечітких моделей керування буде присвячений наступний підрозділ.

Побудова нечіткої моделі ґрунтується на формальному поданні характеристик досліджуваної системи в термінах лінгвістичних змінних.

Оскільки, крім нечіткого алгоритму, основними засобами опису керування є вхідні й вихідні змінні, те саме вони представляються як лінгвістичні змінні при формуванні бази правил у системах нечіткого виводу.

У цьому випадку нечітка система керування, представлена на рис. 2.17 будується з урахуванням реалізації всіх правил нечіткої логіки, а сам процес знаходження керуючого впливу реалізується на основі алгоритмів нечіткого висновку [15]

3.2 Розробка нечіткої адаптивної системи у програмі Fuzzy Logic Toolbox

Розрахунок параметрів за формулами не може дати оптимального настроювання регулятора, оскільки аналітично отримані результати ґрунтуються на сильно спрощених моделях об'єкта. Зокрема, у них не враховується завжди присутня нелінійність типу "обмеження" для впливу, що управляє. Крім того, моделі використовують параметри, що ідентифіковані з деякою похибкою. Тому після розрахунку параметрів регулятора бажано зробити його підстроювання. Підстроювання можна виконати на основі правил, які використовуються для ручного налаштування. Ці правила отримані з досвіду, теоретичного аналізу та чисельних експериментів. Вони зводяться до наступного [16]:

- о збільшення пропорційного коефіцієнта збільшує швидкодію та знижує запас стійкості;
- о зі зменшенням інтегральної складової помилка регулювання з часом зменшується швидше;
- о зменшення постійної інтегрування зменшує запас стійкості;
- о збільшення диференціальної складової збільшує запас стійкості та швидкодію.

Перелічені правила застосовуються також для регуляторів, які використовують методи експертних систем та нечіткої логіки.

Ручне налаштування за допомогою правил зручно виконувати за допомогою інтерактивного програмного забезпечення на комп'ютері, тимчасово включеному в контур керування. Для оцінки реакції системи зміну уставки, зовнішні впливу чи шуми вимірів подають штучні впливу і спостерігають реакцію них. Після налаштування значення коефіцієнтів регулятора записують у пам'ять ПД-контролера, а комп'ютер видаляють.

Зазначимо, що застосування правил можливе лише після попереднього налаштування регулятора за формулами. Спроби налаштування регулятора без початкового наближеного розрахунку коефіцієнтів можуть бути безуспішними. При розробці НЕС розрахунку оптимальних параметрів ПІ-регулятора тиску пару використовувався додаток Fuzzy Logic Toolbox (FTL) пакету Matlab [19].

Fuzzy Logic Toolbox – це пакет розширення MATLAB, що містить інструменти проектування систем нечіткої логіки. Пакет дозволять створювати експертні системи на основі нечіткої логіки, проводити кластеризацію нечіткими алгоритмами, а також проектувати нечіткі нейромережі. Пакет включає графічний інтерфейс для інтерактивного покрокового проектування нечітких систем, функції командного рядка для розробки програм, а також спеціальні блоки для побудови систем нечіткої логіки Simulink. Всі функції пакета написані відкритою мовою MATLAB, що дозволяє контролювати виконання алгоритмів, змінювати вихідний код, а також створювати власні функції та процедури. Ключові особливості програми:

- Графічний інтерфейс для інтерактивного покрокового проектування нечітких систем
- Функції для створення експертних систем на основі нечіткої логіки
- Підтримка логіки І, АБО і НЕ в правилах, що настроюються.
- Стандартні типи експертних систем нечіткої логіки (Mamdani, Sugeno)
- Функції для нейроадаптивної та нечіткої кластеризації з навчанням

- Увімкнення нечітких систем у моделі SimulinkГенерація С-кода и независимых приложений, реализующих системы нечеткой логики

Редактор систем нечіткого виводу FIS (або просто редактор FIS) є основним засобом, який використовується для створення або редагування систем нечіткого виводу у графічному режимі. Редактор FIS може бути відкритий за допомогою введення функції `fuzzy` або `fuzzy(FISfile)` у командному рядку. Ця функція надає користувачеві можливість задавати та редагувати на високому рівні властивості системи нечіткого виводу, такі, як число вхідних та вихідних змінних, тип системи нечіткого виводу, метод дефазифікації, що використовується і т.д.

Кількість і тип функцій належності були визначені виходячи з правил ручної настройки експертом. На рис. 3.3 представлені функції належності вхідних параметрів у блок адаптації. Детальний процес створення нечіткої експертної системи для блоку адаптації САУ в додатку FLT, що визначає оптимальні параметри настройки ПІ -регулятора в представлені на рис. 3.5-3.9.

На рис. 3.4. показаний вибір вхідних та вихідних параметрів нечіткого блоку адаптації ПІ – регулятора

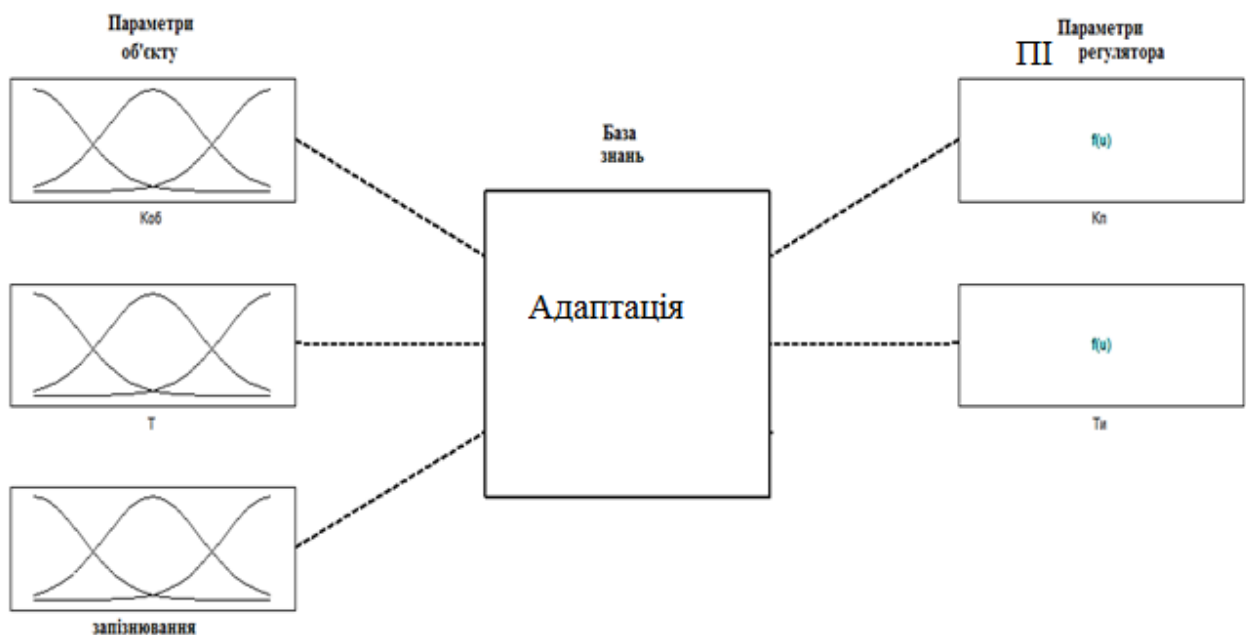


Рисунок 3.3 – Структура нечіткого адаптивного пристрою

На першому етапі ми визначали значення входів і виходів системи.

Входи:

К-коефіцієнт посилення (0.5-1.5)

Т-постійна часу (3-10) з

Тау- запізнення (0.1-0.8)

Виходи:

Кр-коефіцієнт пропорційності (0 -10)

Tu-постійна інтегрування (0,5 - 15).

Діапазони метрів моделі отримані в ході моделювання на тренажері парового котла, а настроєчих параметрів ПІ-регулятора в ході моделювання САУ в програмі Симулінк.

Процес підключення входів та виходів до бази правил у програмі Fuzzy Logic Toolbox показаний на рис. 3.4.

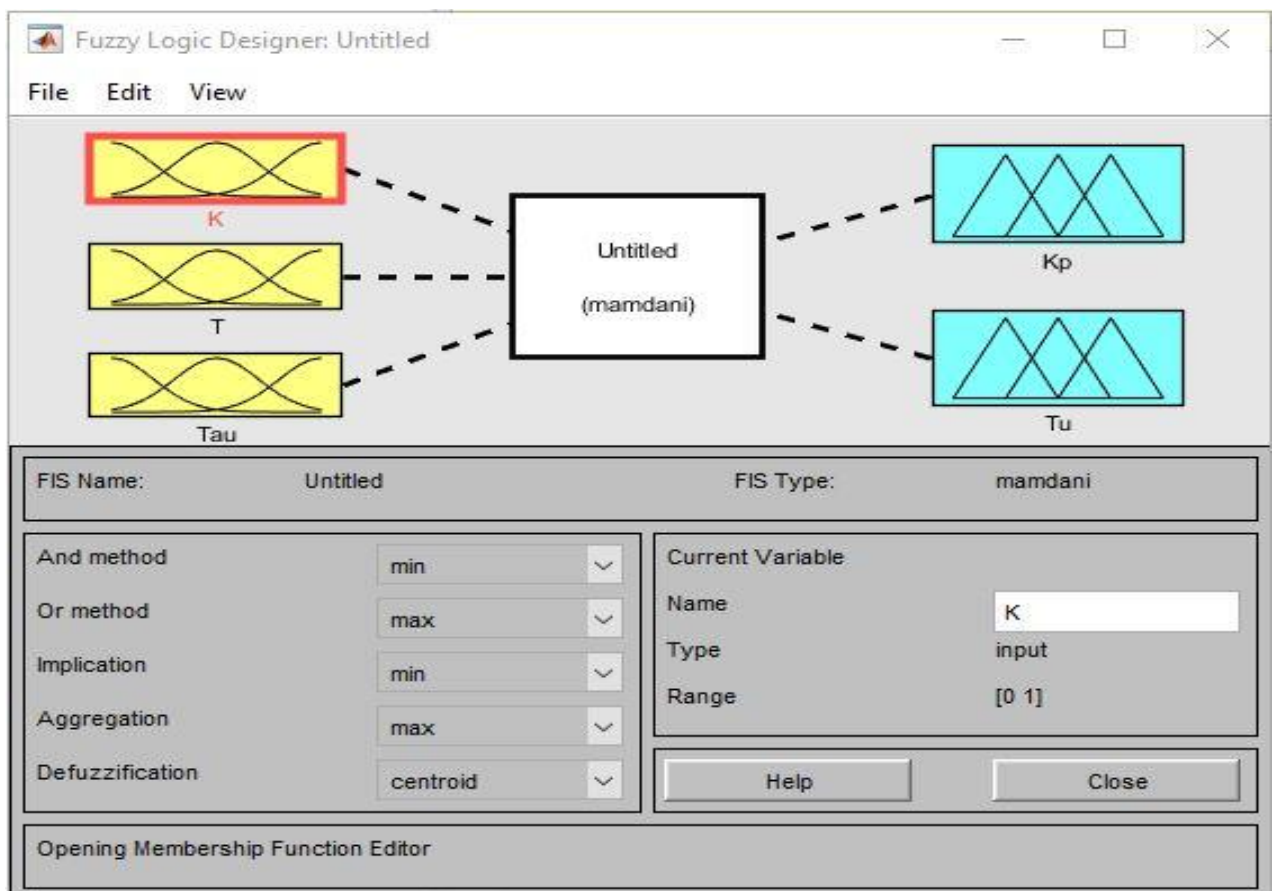


Рисунок 3.4 – Інтерфейс програми з розробки нечіткого блоку адаптації ПІ – регулятора

Далі проводиться етап фазифікації даних (рис. 3.5 – 3.9) У полі Range та Display Range встановимо діапазон зміни та відображення змінних і задаємо функції приналежності типу trimf для кожної змінної.

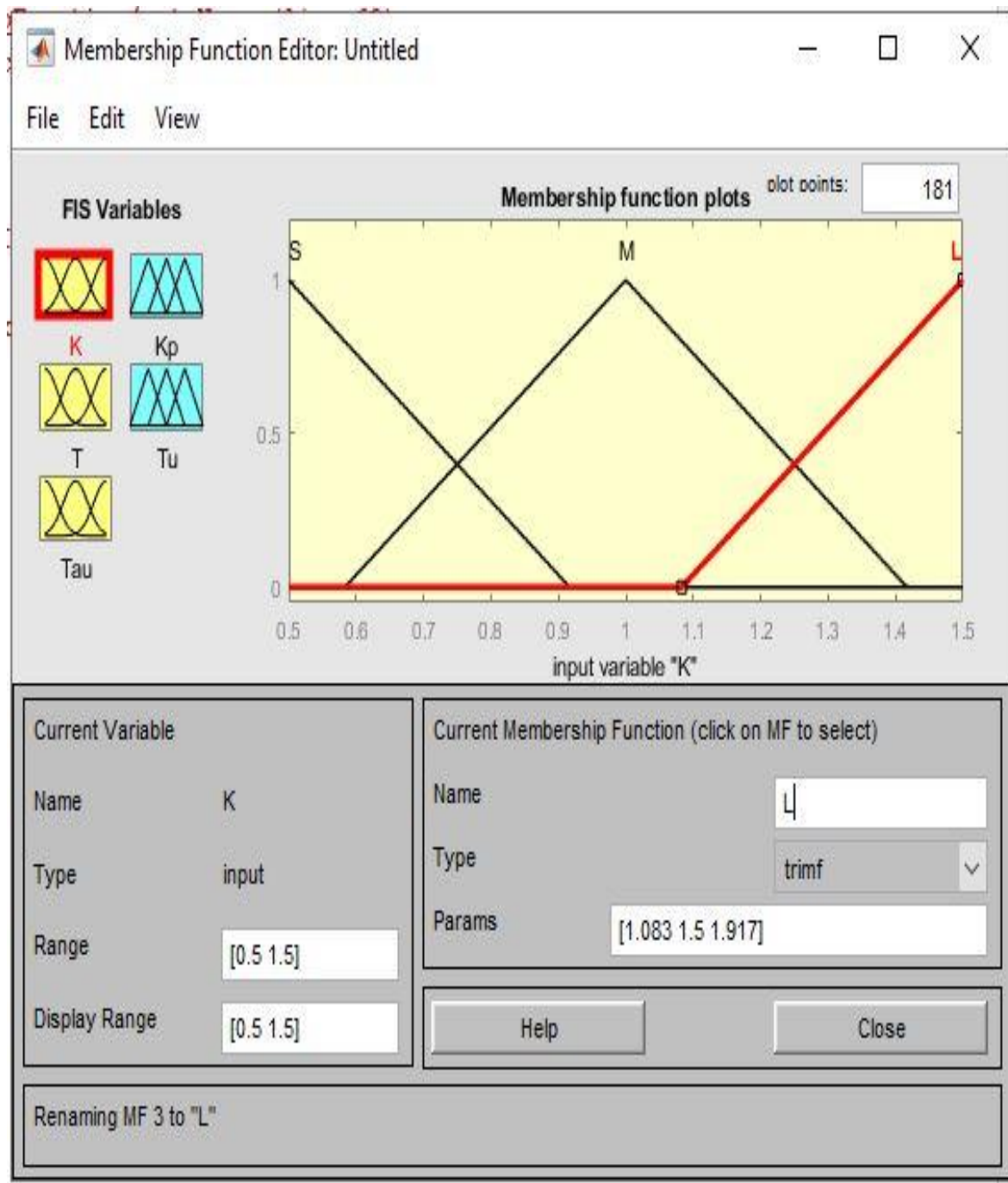


Рисунок 3.5 - Редактор функцій пналежності коефіцієнта посилення об'єкта К

На рис. 3.5. №1 - Z – образна (S), №2 – трикутна (M), №3 - S – образна функції належності (L). Перша функція описує терм “низька”, друга “середня”, третя - “висока” значення вхідного параметра.

Перша із цих функцій у загальному випадку може бути задана аналітично наступним вираженням []:

$$\mu_1(x, a, b) = \begin{cases} 1, & x \leq a \\ \frac{b-x}{b-a}, & a < x < b \\ 0, & b \leq x \end{cases}, \quad (3.1)$$

де a, b – числові параметри, що приймають дійсні значення й упорядковані відношенням: $a < b$. Для терм – множина «низька» й універсума $X = [0,5 \ 0,9]$ значення параметрів відповідно рівні $a = 0,5, b = 0,9$.

Аналітичне вираження «трикутної» функції належності записується в наступному виді:

$$\mu_2(x, a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x < b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & c < x \end{cases}. \quad (3.2)$$

Для трикутної функції належності терм – «середня», значення з універсума, що перебуває в інтервалі від 0,6, до 1,4, для $a = 0,6; b = 1; c = 1,4$.

Третя S – образна функція належності задається наступним вираженням:

$$\mu_3(x, a) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x < b \\ 1, & b \leq x \end{cases}. \quad (3.3)$$

Значення параметрів, відповідно, також рівні, $a = 1,1, b = 1,5$.

У випадку, представленою на рис 3.5, використався прямий метод визначення функції належності, коли експерт задає значення $\mu(x)$ для кожної підмножини. Як правило, прямі методи завдання $\mu(x)$ використовуються при вимірі фізичних величин.

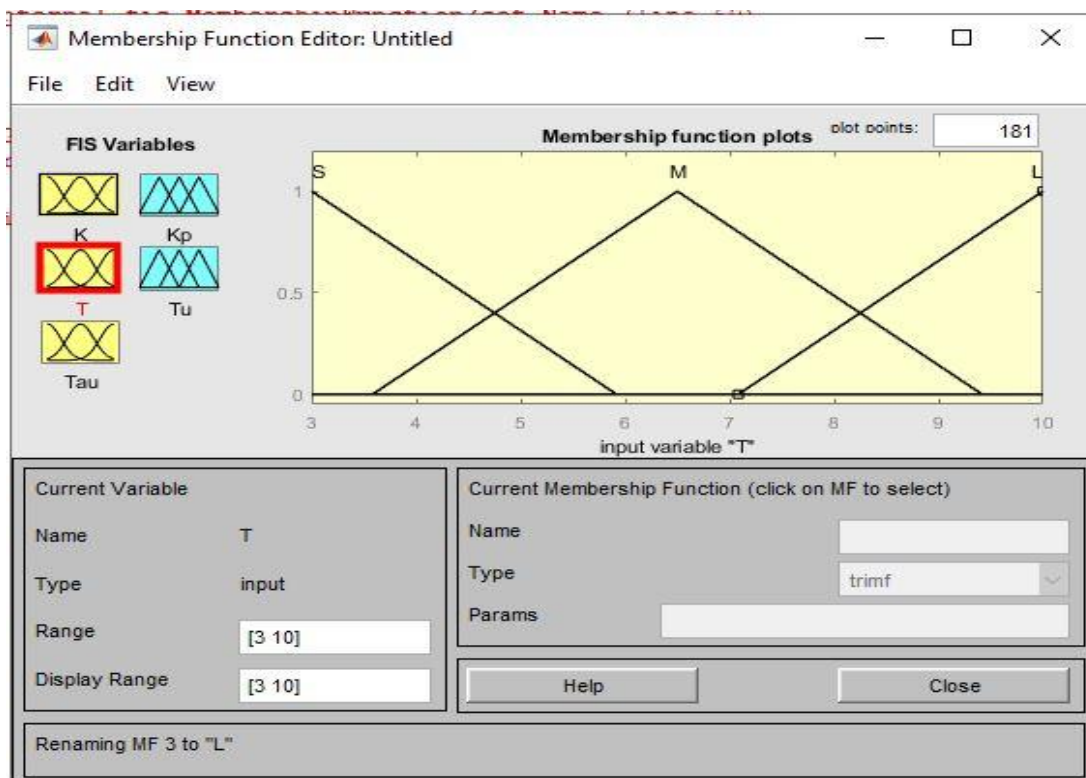


Рисунок 3.6 - Редактор функции для постоянного času T

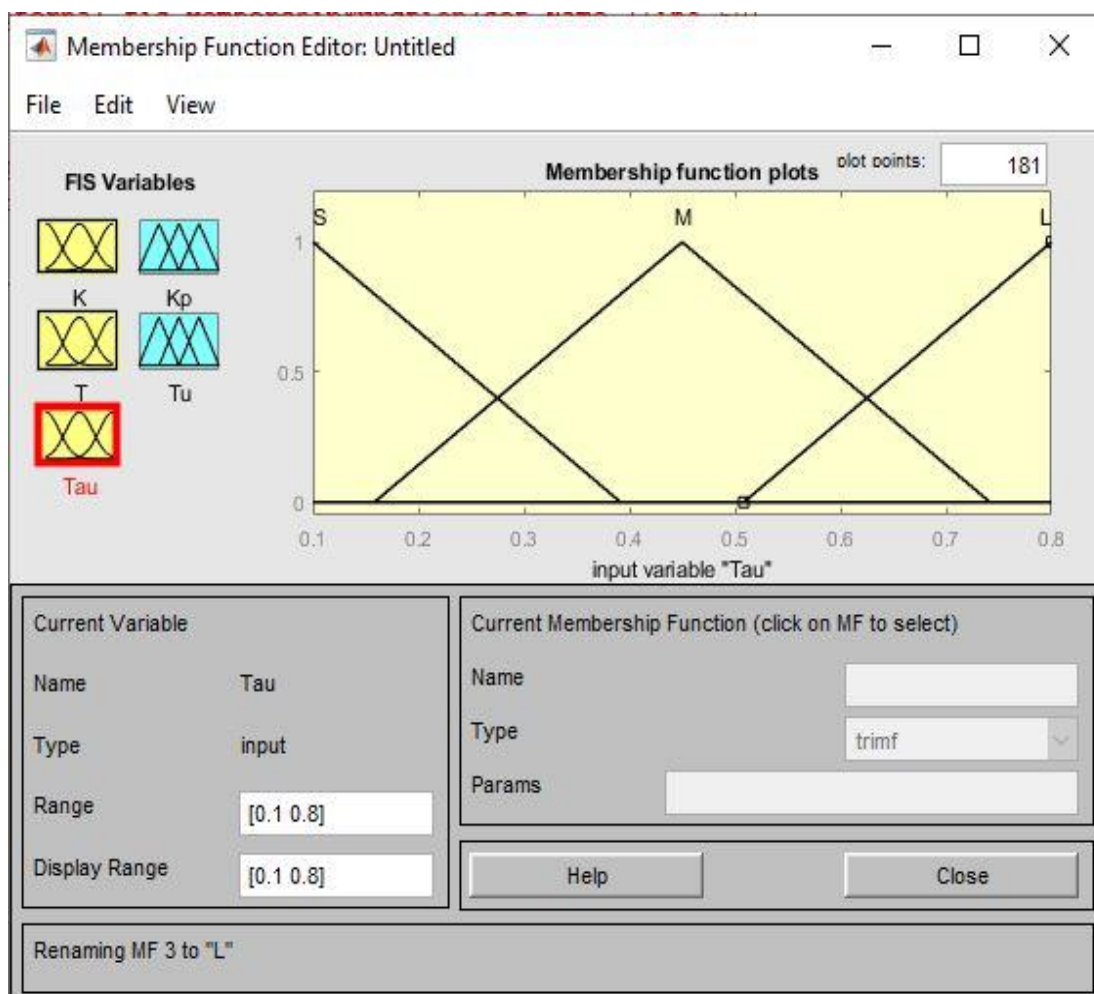


Рисунок 3.7 - Редактор функції для запізнення

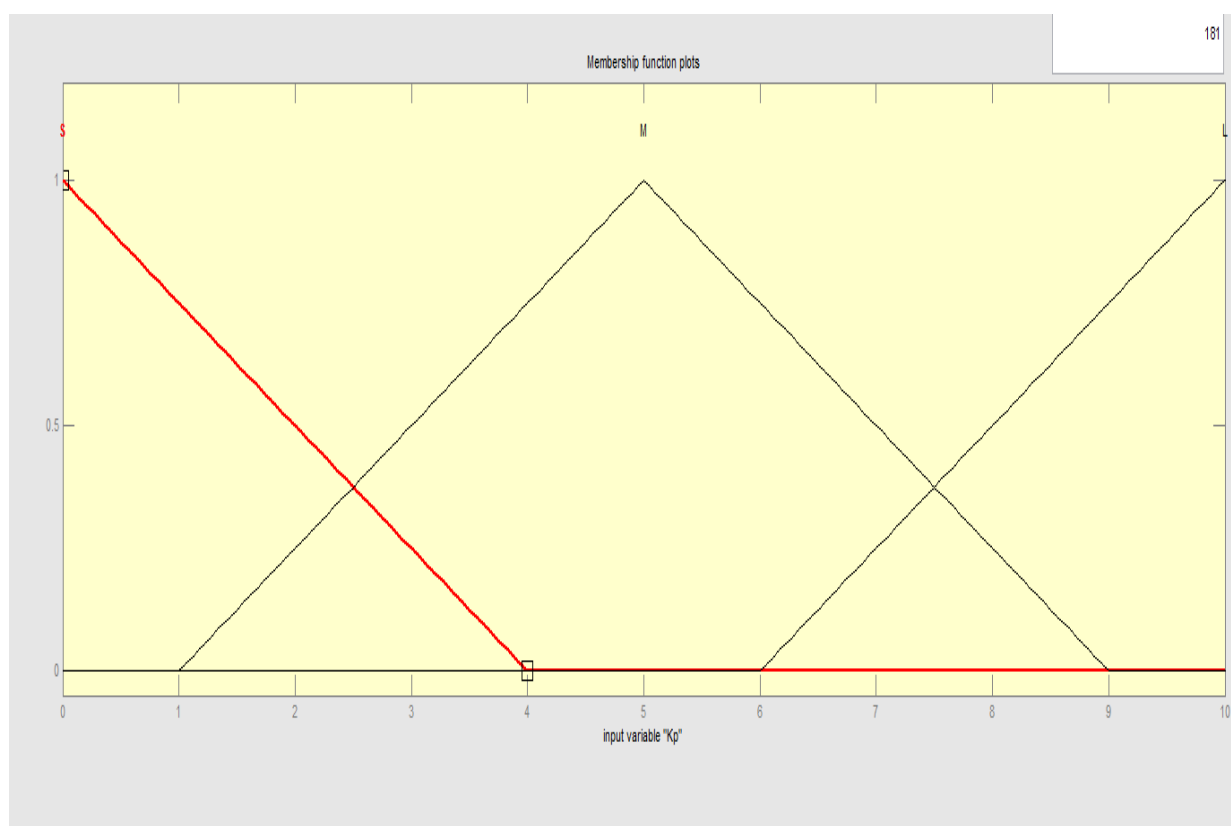


Рисунок 3.8 - Функції належності K_p – коефіцієнта пропорційності ПД – регулятора

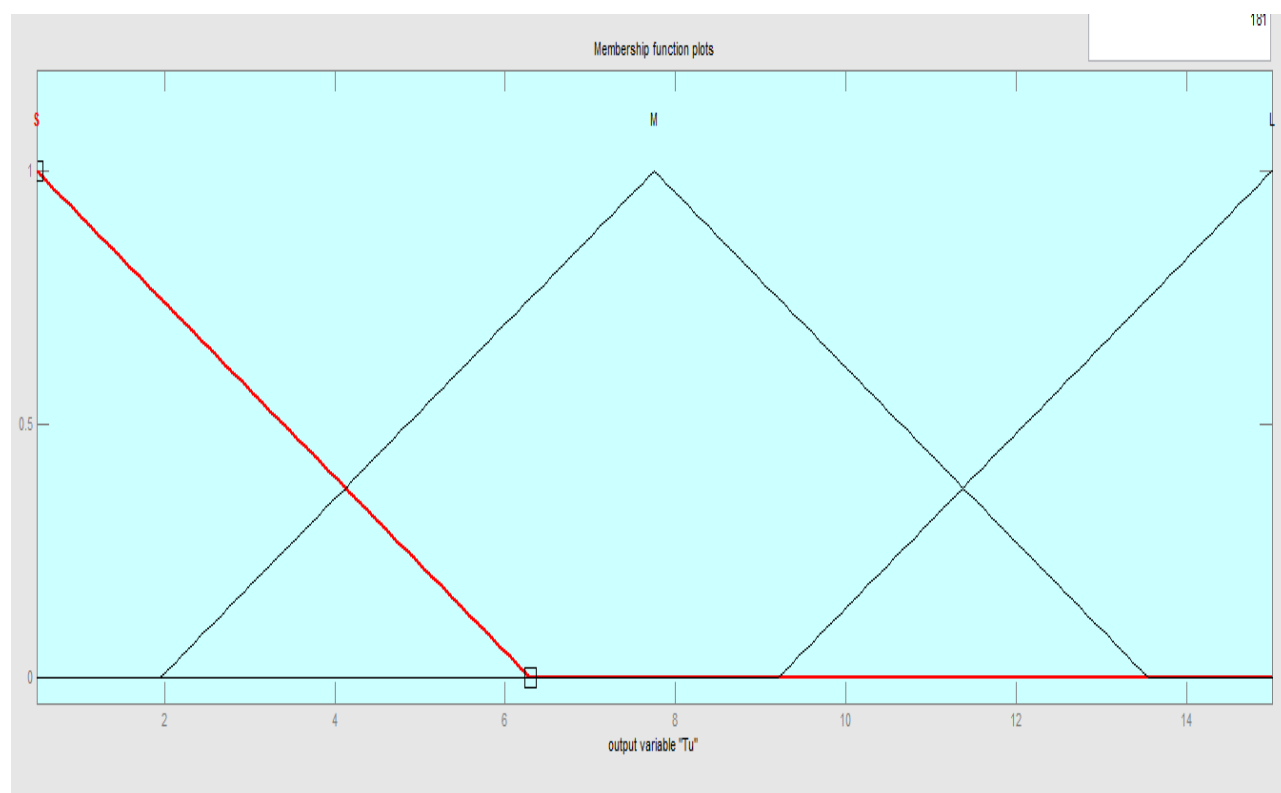


Рисунок 3.9 - Функції належності T_i – постійної інтеграції ІІ – регулятора

Нечіткий висновок займає центральне місце в нечіткій логіці й системах нечіткого керування. Процес нечіткого висновока являє собою деяку процедуру або алгоритм одержання нечітких висновків на основі нечітких умов або передумов.

Системи нечіткого висновоку призначені для перетворення значень вхідних змінних процесу керування у вихідні змінні на основі використання нечітких правил продукцій. Для цього системи нечіткого висновоку повинні містити базу правил нечітких продукцій і реалізовувати нечіткий висновок висновків на основі посилок або умов, представлених у формі нечітких лінгвістичних висловлень.

Основними етапами системи нечіткого виводу (рис. 3.10) є [15]:

- формування бази правил систем нечіткого виводу,
- фазифікація вхідних змінних,
- агрегування підумов у правилах нечітких продукції,
- активізація або композиція умов у нечітких правилах продукції,
- акумулювання висновків нечітких правил продукції.

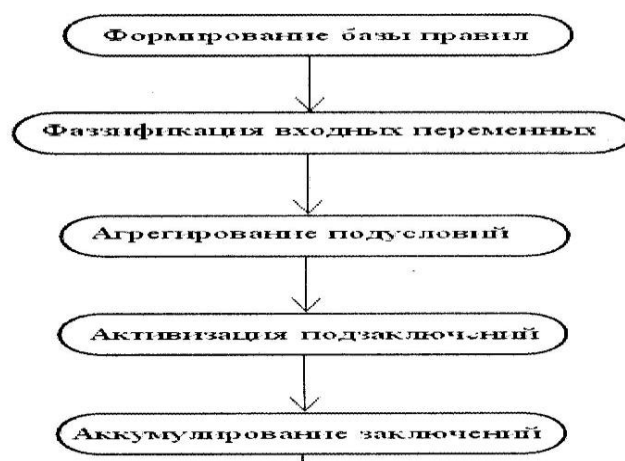


Рисунок 3.10 - Діаграма процесу нечіткого виводу []

Редактор правил системы нечеткого вывода, как следует из его названия, предназначен для задания и редактирования отдельных правил системы нечеткого вывода в графическом режиме. Редактор правил может быть открыт

с помощью ввода функции ruleedit ('FISfile') или ruleedit(fisname) в командной строке, либо с помощью главного меню редактора FIS (командой меню Edit -> Rules... или нажатием клавиш +). Эта функция, записанная в формате ruleedit('FISfile'), вызывает редактор правил, который позволяет пользователю в графическом режиме анализировать и модифицировать правила продукций системы нечеткого вывода FIS, сохраненной во внешнем файле с именем FISfile.fis. Функция позволяет также выполнять грамматический анализ правил, которые используются в некоторой системе нечеткого вывода FIS. Чтобы использовать данный редактор для создания правил, необходимо предварительно определить все входные и выходные переменные, для чего можно воспользоваться редактором системы нечеткого вывода FIS и редактором функций принадлежности. Задать правила можно с помощью выбора соответствующих значений термов входных и выходных переменных.

3. Наступним етапом ми задаємо правила, що відображають досвід ручного налаштування виконаний експертом (всього 9 правил) рис.3.11.

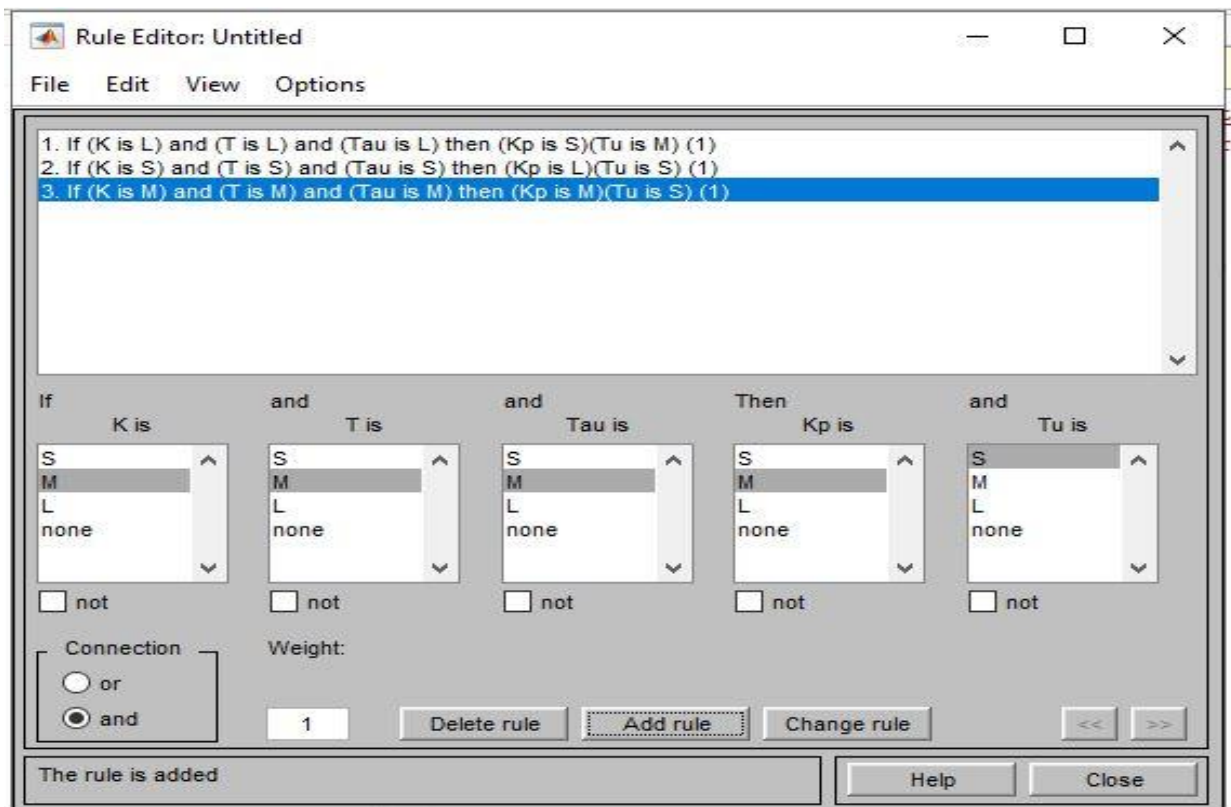


Рисунок 3.11 – Редактор основы правил (фрагмент введения правил).

Вікна перегляду адаптивних настроювальних параметрів ПІ – регулятора при імітації процесу збільшення парового навантаження на котел від 35 до 95 % від номінальної показано на рис. 3.12 – 3.14.

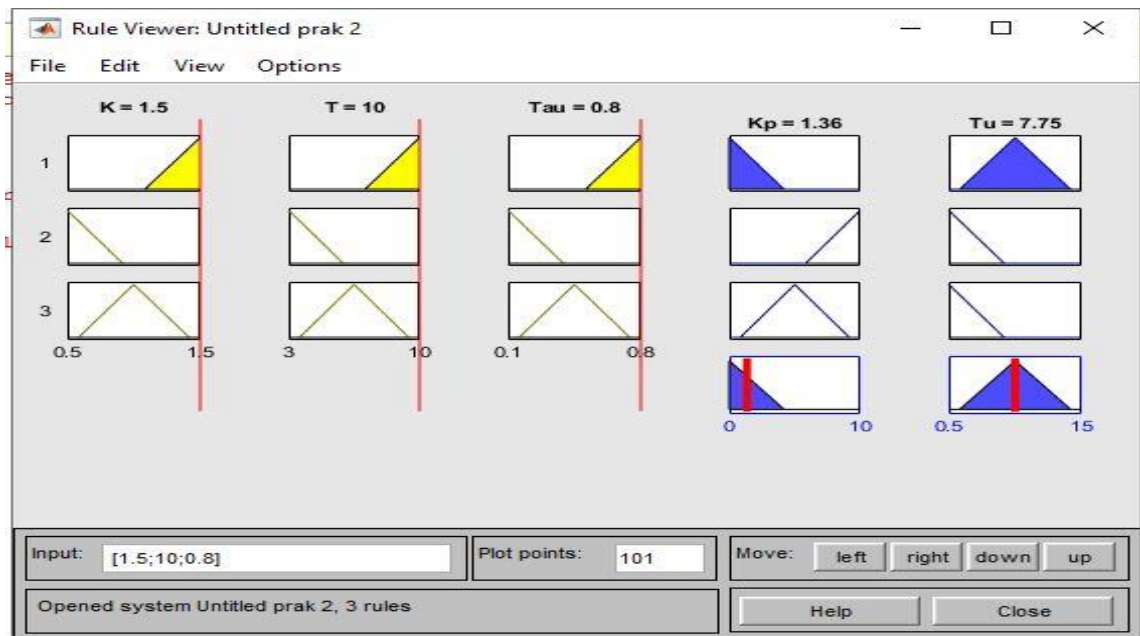


Рисунок 3.12 – Вікно перегляду адаптивних параметрів ПІ – регулятора при імітації процесу збільшення парового навантаження на котел до 110 % від номінальної

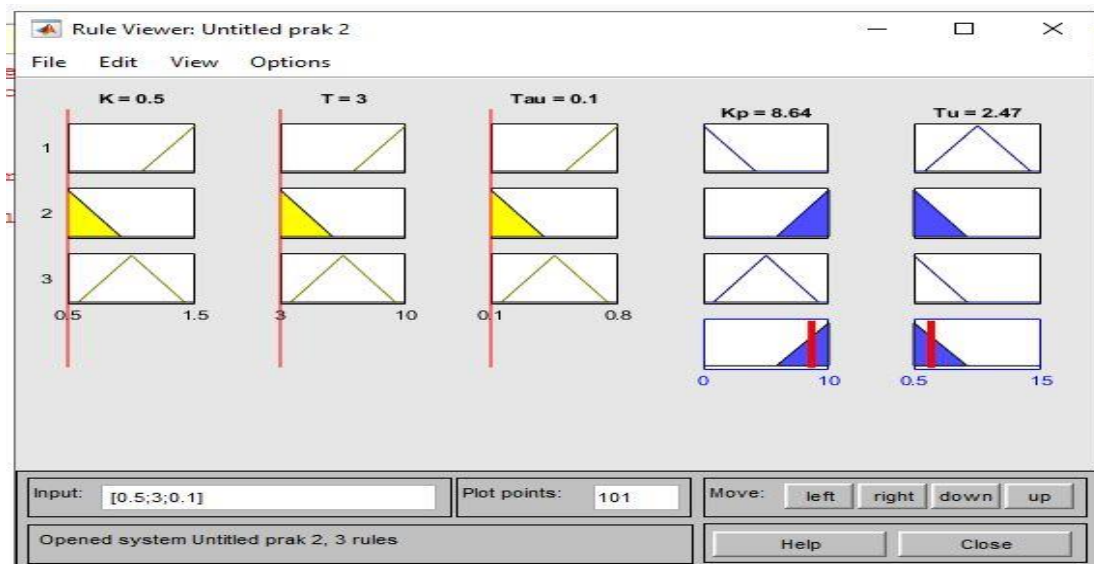


Рисунок 3.13 – Вікно перегляду адаптивних настроювальних параметрів ПІ – регулятора при імітації процесу зменшення парового навантаження на котел до 35 % від номінального

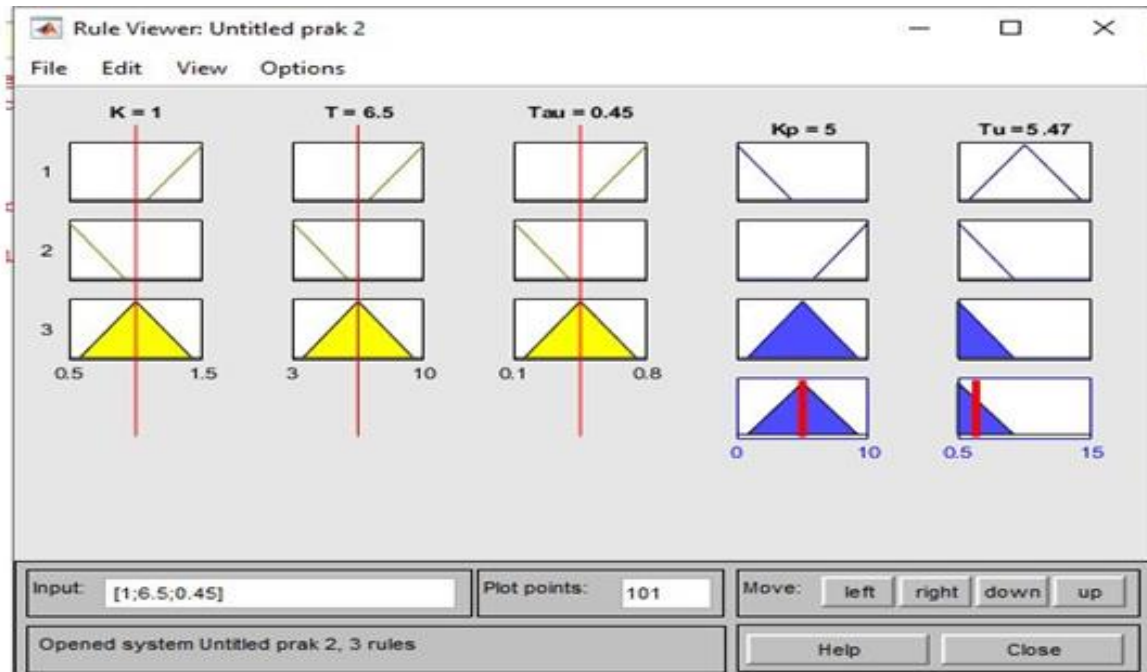


Рисунок 3.14 – Вікно перегляду адаптивних настроювальних параметрів ПІ – регулятора під час імітації процесу роботи на паровому навантаженні 50 % від номінального

Результат роботи НЕС оптимізації параметрів ПІ-регулятора пов'язаних з динамічними значеннями математичних моделей (передатних функцій) об'єктів СПУ для трьох найбільш затребуваних режимів навантаження показаний в табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Значення параметрів регулятора які рекомендовані нечітким адаптивним блоком

Параметри моделі				Оптимальні параметри регулятора	
навантаження СДК	K , МПа/% хода РО	T , хв	τ , хв	K_p	T_i
35 %	0,5	5,30	0,1	8,64	2,47
50 %	1	6,5	0,45	5	5,47
110 %	1,5	10,0	0,8	1,36	7,75

РОЗДІЛ 4. МОДЕЛЮВАННЯ НЕЧІТКОЇ АДАПТИВНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТИСКОМ ПАРИ

4.1 Імітаційне моделювання САУ пара

Для перевірки ефективності запропонованої нечіткої адаптивної САУ, виконано моделювання в додатку Simulink (MatLab) [19]. Проведене емпіричне тестування націлене на перевірку точності бази знань за допомогою запуску нечіткої системи на пробному наборі даних. Для забезпечення гарантії повної точності тестування доводиться бути вичерпним і кожен можливий сигнал на вході повинен бути перевірений НЕС і апробований на модельній САУ тиску пари.

Щоб отримати установки для типового ПІ-регулятора були розраховані значення K_p і T_i табличним методом Копеловича [] для САУ теплоенергетических процессов (таб.4.1). Для адаптивного ПІ – регулятора використовувались данные нечеткого адаптера (см. табл. 3.1).

Программная модель САУ давления пара с имитацией канала возмущения (изменения задания по паровой загрузке т.е. ее увеличение и уменьшение) показаны на рис. 4.1. Імітація перехідного режиму роботи суднового парового котла – зниження і зростання парової продуктивності також виконувалася в програмі Simulink [19], перехідні процеси нечіткої і традиційної адаптивних САУ представлена на рис. 4. 2. - 4.3.

Таблица 4.1.

Формулы для определения оптимальных настроек по Копеловичу

Закон регулирования	Апериодический переходной процесс	Процесс с 20 %-ным перерегулированием	Минимальный интегральный критерий качества $\min \int x^2 dt$
И	$K_{p1} = \frac{1}{4,5 K_{об} T_{об}}$	$K_{p1} = \frac{1}{1,7 K_{об} T_{об}}$	$K_{p1} = \frac{1}{4,5 K_{об} T_{об}}$
П	$K_p = \frac{0,3 T_{об}}{K_{об} \tau_{об}}$	$K_p = \frac{0,7 T_{об}}{K_{об} \tau_{об}}$	$K_p = \frac{0,9 T_{об}}{K_{об} \tau_{об}}$
ПИ	$K_p = \frac{0,6 T_{об}}{K_{об} \tau_{об}};$ $T_{и} = 0,6 T_{об}$	$K_p = \frac{0,7 T_{об}}{K_{об} \tau_{об}};$ $T_{и} = 0,7 T_{об}$	$K_p = \frac{T_{об}}{K_{об} \tau_{об}};$ $T_{и} = T_{об}$
ПИД	$K_p = \frac{0,95 T_{об}}{K_{об} \tau_{об}};$ $T_{и} = 2,4 \tau_{об};$ $T_{д} = 0,4 \tau_{об}$	$K_p = \frac{1,2 T_{об}}{K_{об} \tau_{об}};$ $T_{и} = 2,0 \tau_{об};$ $T_{д} = 0,4 \tau_{об}$	$K_p = \frac{1,4 T_{об}}{K_{об} \tau_{об}};$ $T_{и} = 1,3 \tau_{об};$ $T_{д} = 0,5 \tau_{об}$

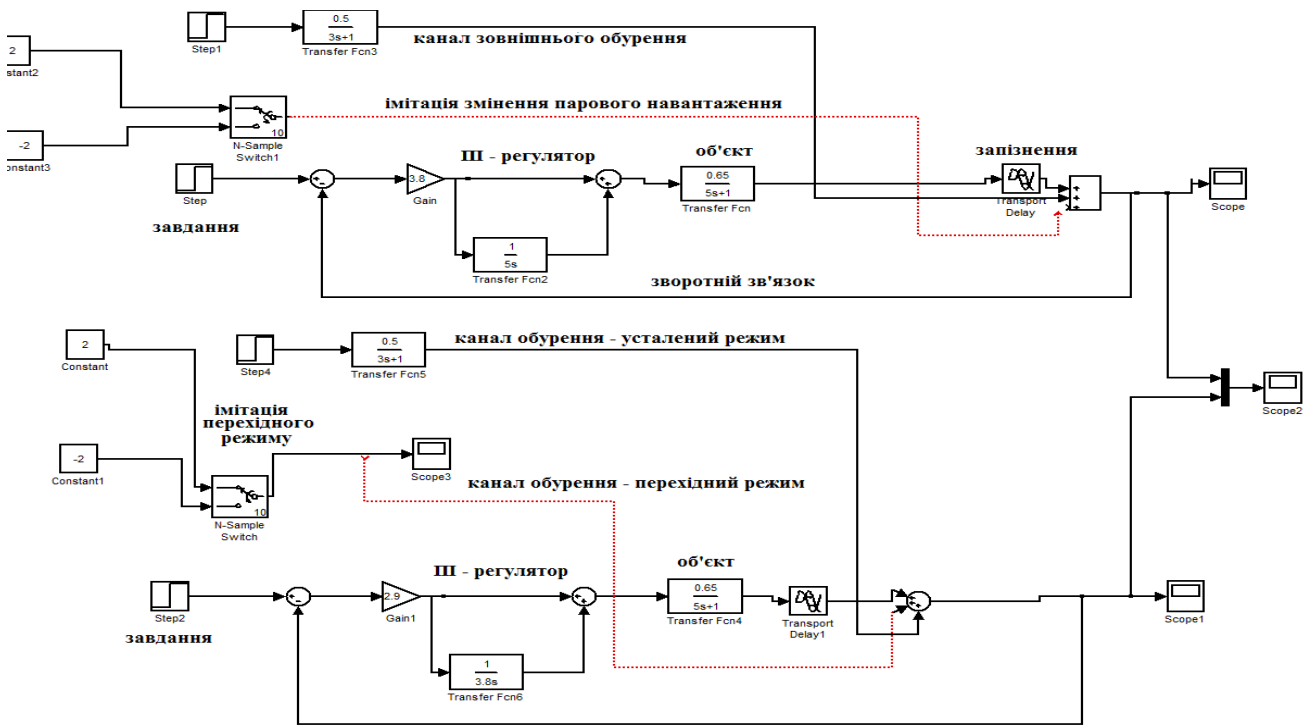


Рисунок 4.1 - Імітаційна модель САУ тиску пари в ДПК

Порівняльний аналіз показників якості перехідних процесів САУ тиску пари (див. рис. 4.34 – 4.35) із зоною нечутливості $\Delta = 0,5 \%$, демонструє, що

використання нечіткої експертної системи, що реалізує алгоритм Мамдані [14], в процесах налагодження та експлуатації САУ тиску пари дозволяє зменшити час регулювання T_p більш ніж в два рази в порівнянні з традиційною системою регулювання.

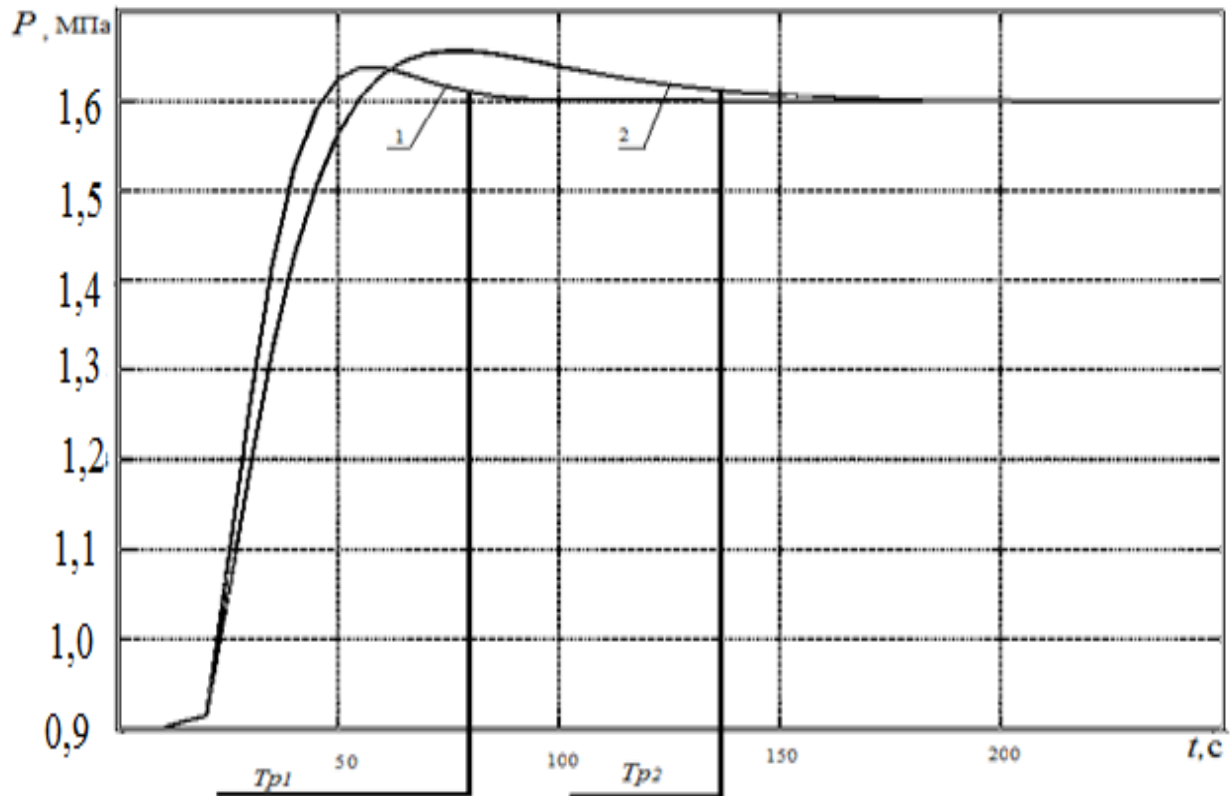


Рисунок 4.2 - Перехідні процеси САУ тиску пари ДПК: отримані за допомогою: 1 - методу нечітких адаптивних налаштувань; 2 – табличного (Копеловича), при виході на номінальний тепловий режим; T_p – час регулювання

Моделювання типової та адаптивної САУ тиску пари на інших парових режимах роботи ДПК представлено на рис. 4.3.

Перехідний процес типового ПІ – регулятора виражений значним закиданням, а у нечіткого адаптивного він аперіодичний та повністю задовольняє встановленим вимогам до судових ДПК.

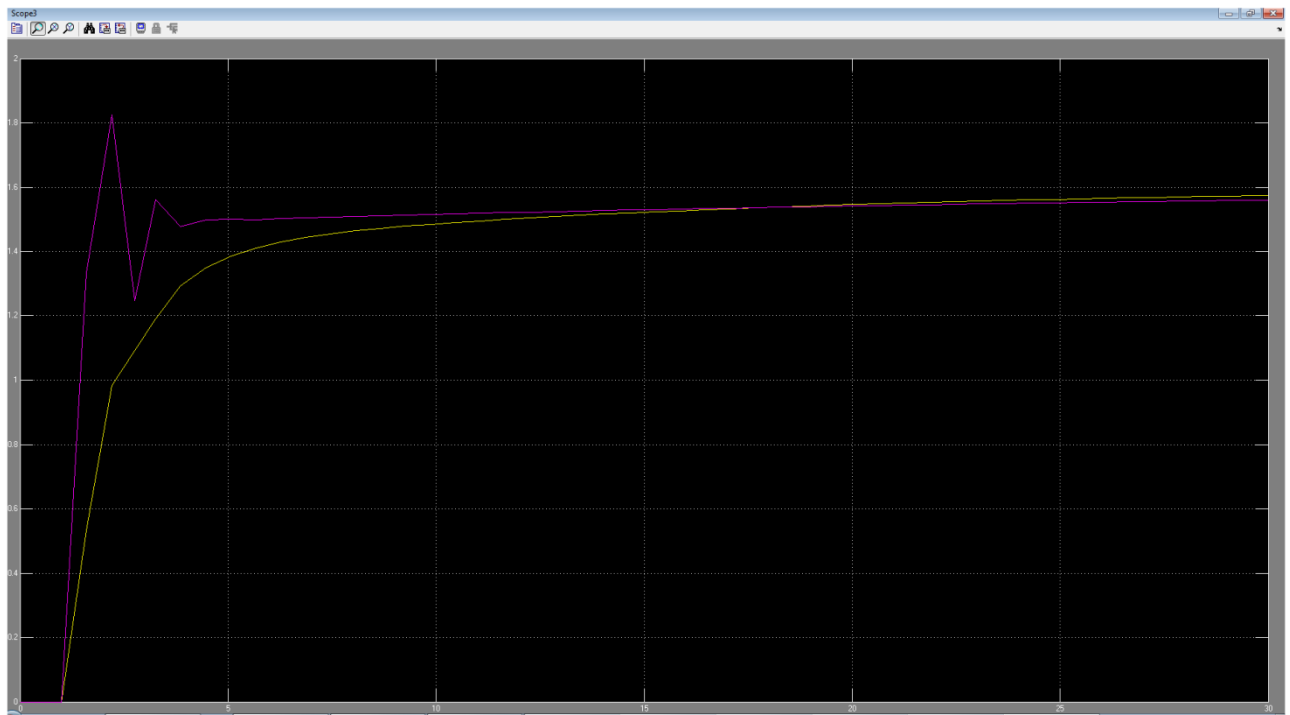


Рисунок 4.3 – Перехідні процеси типової (червоний) та нечіткої (жовтий колір) адаптивної САУ тиску пари при різкому збільшенні парового завантаження на 20 % від номінальної

Можна відзначити, що використання запропонованого універсального методу нечіткої адаптації суднових САУ тиску пари може бути успішно застосовується також для автоналагодження типових ПД і ПД –регуляторів.

Таким чином, комбінований синтез традиційного і нечіткого наукових методів при розробці, налагодженні і експлуатації суднових систем управління дозволяє спростити і прискорити процес налагодження та адаптації систем регулювання параметрів суднових парогенеруючих об'єктів широкого конструктивного класу, що працюють в динамічних режимах в умовах впливу зовнішніх і внутрішніх збурень.

Висновки

Більшість технологічних процесів суднового парового котла в силу специфіки його роботи на різних парових режимах і впливу неконтрольованих збурень такі, що точний математичний опис процесів отримати дуже важко. Важливим є і той факт, що навіть за такої типової ситуації, як впровадження нового або ремонту старого обладнання котла, виникає необхідність коригування роботи елементів системи автоматичного управління та алгоритму роботи ПІ - регулятора.

Встановлено, що успішним рішенням технічної проблеми підвищення ефективності САУ паровими котлами може бути використання досвіду та знань експертів з налагодження суднової автоматики. Проведенные експерименты по апробации позволили нам *подтвердить научную гипотезу* о том, что впровадження методів нечіткого адаптивного управління може дозволити підвищити показники якості перехідних процесів параметрами судових парових котлів.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

- розроблено математичну модель контуру регулювання тиску пари суднового парового котла Mitsubishi марки МАС з паровою продуктивністю 60 тонн пари на годину. Модель відображає експериментальні дані з високим ступенем адекватності.
- розроблена нечітка експертна система дозволяє оцінити значення параметрів математичної моделі об'єкт управління і розрахувати відпимальні настроювальні значення параметрів ПІ-регулятора в локальній системі регулювання тиску пари суднового допоміжного котла.

Отримані результати можуть застосовуватися в САУ тиску пари в основних та допоміжних судових парових котлів на морських і річкових судах.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Marine Boiler and Steam Turbine Generator. URL: https://www.mhimme.com/auxiliary_boilers.html.
2. 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.
3. Голіков В.А. Способи підвищення надійності операторів суднових енергетичних установок/В.А. Голіков, В.І. Капустін // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. Вип. 25. - Одеса: ОНМА, 2010. - С. 49 - 55.
4. Solberg. B. Control properties of bottom fired marine boilers. / B. Solberg, M. Karstensen, P. Andersen // In T. Gundersen, editor, ECOS 2015 Conference, volume 2, Trondhjem. – 2015 – Norway. – P. 669 – 678.
5. Solberg B. Advanced water level control in a one pass smoke tube marine boiler. / B.Solberg , P. Andersen, J. Stoustrup. // Technical report, Department of Electronic Systems, Aalborg University. – 2017. – Aalborg, Denmark. – P. 1123 – 1198.
6. Mykhailenko V.S. Analysis of methods for adaptation of industrial control systems of thermal processes / V. S. Mykhailenko // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2014. – № 4. – С. 58 – 65. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvngu_2014_4_11.
7. Abe N. Smith predictor control and internal model control / N. Abe, K. Yamanaka // A tutorial SICE 2003 Annual Conference. – vol. 2, 4 – 6 Aug. – 2003. – P. 1383 – 1387.
8. Agüero J. C. Virtual closed loop identification: a subspace approach / J. C. Agüero, G. C. Goodwin // 43rd IEEE Conference on Decision and Control. – 2004. – CDC, Vol. 1. – 14 – 17 Dec. – P. 364 – 369.

9. Arya Y. AGC of restructured multi-area multi-source hydrothermal power systems incorporating energy storage units via optimal fractional-order fuzzy PID controller / Y. Arya // Neural Computing and Applications. – 2019. – № 31 (3). – P. 851 – 872.
10. <https://www.kongsberg.com/maritime>
11. https://www.researchgate.net/publication/233644748_Fuzzy_logicbased_expert_system_for_diesel_engine_oil_analysis_diagnosis
12. Zadeh L. A. Fuzzy sets / L. A. Zadeh // Information and Control. – 1965, №8. – P. 338 – 353.
13. Леоненков А.Ю. Нечітке моделювання серед Matlab і fuzzyTech / А.Ю. Леоненків. - Харків.: БХВ, 2003. - 720 с.
14. Mamdani E. H. Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant / E. H. Mamdani // Proc. Inst. Elect. Eng. Contr. Sci., vol. 121, 1974. – P. 1585 – 1588.
15. Mamdani E. H. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller / E. H. Mamdani, S. Assilian // Int. J. Man-Mach. Stud., vol. 7, 1975.
16. Sugeno M. On stability of fuzzy systems expressed by fuzzy rules with singleton consequents / M. Sugeno // IEEE Trans. Fuzzy Systems. – 1997. – № 7. – P. 201 – 224.
17. Takagi T. Fuzzy identification of system and its applications to modeling and control / T. Takagi, M. Sugeno // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, vol. 15, no. 1, 1985. – P. 166 – 132.
- 18 Solberg B. Hybrid model predictive control applied to switching control of burner load for a compact marine boiler design / B. Solberg, P. Andersen, J. M. Maciejowski, J. Stoustrup // In D. D. Cho, editor, 17th IFAC World Congress, 2018. – Seoul, Korea. – P. 10626 – 10633.
- 19 <https://www.mathworks.com/products/sysid.html>
- 20 Shome Anabik, S. Denis Ashok. Fuzzy Logic Approach for Boiler Temperature & Water Level Control. // International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 3, Issue 6, June 2020. – P. 1 – 6