

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

Кваліфікаційна наукова праця  
на правах рукопису

Михайленко Владислав Сергійович

УДК 629.5.063 - 047.37

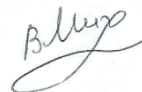
**ДИСЕРТАЦІЯ**

**КОНЦЕПЦІЯ РОЗРОБКИ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ СУДНОВИМИ  
ПАРОЕНЕРГЕТИЧНИМИ УСТАНОВКАМИ**

Спеціальність 05.05.03 - двигуни та енергетичні установки

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів других авторів мають посилання на відповідне джерело

 (В.С. Михайленко)

Науковий консультант:

Горб Сергій Іванович, д.т.н., професор

Одеса – 2020

## АНОТАЦІЯ

Михайленко В.С. Концепція розробки систем управління судновими пароенергетичними установками. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.05.03 – Двигуни та енергетичні установки. – Національний університет «Одеська морська академія», Одеса, 2020.

Дисертація представляє собою сукупність нових ідей, методів і результатів досліджень, які пов'язані з рішенням науково-технічної проблеми в області створення нової концепції розробки високоефективних систем автоматичного управління (САУ) судновими пароенергетичними установками (СПУ), які функціонують в усталених і перехідних режимах.

У **вступі** дисертаційної роботи обґрунтовано актуальність теми, визначено об'єкт та предмет дослідження, мету і задачі, приведено методи дослідження, вказано зв'язок роботи з науковими програмами і планами університету. Представлено наукові положення і результати, дано обґрунтування їх достовірності. Відображено повноту висвітлення наукових результатів в публікаціях і тезисах міжнародних та всеукраїнських конференціях.

В **першому** розділі розглянуто науково-прикладні питання, що пов'язані з проблемами розробки суднових САУ агрегатів СЕУ (суднових енергетичних установок) і експлуатації СПУ, актуальні напрямки в області модернізації САУ і адаптації агрегатів СПУ до умов експлуатації. На основі аналізу існуючих проблем, які пов'язані з розробкою САУ та експлуатацією СПУ, поставлено мету і задачі дисертаційного дослідження. Запропоновано наукову гіпотезу яка передбачає, що забезпечення ефективних екологічних і енергетичних показників суднових пароенергетичних установок може бути досягнуто шляхом

впровадження нової концепції розробки систем адаптивної оптимізації показників теплових процесів, що протікають в парогенеруючих установках.

В **другому розділі** проведено параметричну ідентифікацію підсистем СПУ. Розраховано коефіцієнти рівнянь динаміки параметрів СПУ при його роботі на трьох теплових режимах і визначено їх ступінь адекватності. Одержано нові диференційні рівняння локальних систем СПУ, які дозволяють оцінити вплив управляючих дій САУ на процеси виникнення хімічної та електрохімічної корозії в елементах СПУ. За допомогою натурних експериментів на діючих допоміжних СПУ Mitsubishi MB, аналогах СПУ – виробничих парових котлах марок ГМ і ДКВР та суднових емуляторах було визначено математичні моделі по каналам управління і збурення для головних, допоміжних, утилізаційних та комбінованих СПУ і оцінено точність отриманих моделей. Моделі можуть бути використані в подальших дослідженнях властивостей СПУ з метою поліпшення їх екологічних і економічних характеристик.

В **третьому розділі** проведено моделювання нелінійних систем СПУ. По результатам моделювання, що виконано в пакеті System Identification Toolbox, визначено широкий клас нелінійних моделей Вінера-Гамерштейна, які реалізують нейронну мережу, нелінійних ARMAX моделей та інших моделей, які дозволяють описати експериментальні процеси контрольованих параметрів СПУ з високим ступенем адекватності. Виявлено доцільність введення нелінійної моделі регулярних хвильових коливань у вигляді диференціального рівняння Ван дер Поля (осцилятор з нелінійним згасанням), як додатковою складовою каналу зовнішнього збурення для ефективного аналізу стійкості суднових САУ СПУ, що дозволяє знизити виникнення аварійних ситуацій на СПУ. Запропоновано і апробовано комбінований експертний критерій оцінки ефективності процесу наладки САУ параметрів СПУ і проведено дослідження методів адаптивного управління агрегатів СЕУ. Використання комбінованого

критерію сприяє зростанню надійної роботи СПУ в плані зниження коливань контрольованих параметрів, тобто підвищення надійності парогенеруючих елементів СПУ і адаптації СПУ до умов експлуатації.

В **четвертому розділі** визначено методи розробки систем нечіткого виведення, які дозволяють одержати оптимальні показники якості перехідних процесів систем управління параметрами СПУ та забезпечити підтримку заданого теплового режиму СПУ. Розроблено експертну систему адаптації параметрів типового регулятора, що діє на основі ідентифікації показників експлуатаційних процесів СПУ. Показано ефективність запропонованих методів і експертних систем, які реалізують теорію нечіткої логіки. Встановлено, що використання експертних систем забезпечує адаптацію СПУ до експлуатаційних умов і підтримку заданого теплового режиму СПУ без значних відхилень. Також підтримка заданого тиску пари за допомогою запропонованої системи сприяє зниженню аварійних ситуацій на 25 % і уповільнення зростання хімічної корозії в елементах СПУ, тобто в цілому підвищенню надійності СПУ. Розроблені методи складають основу нової концепції створення вискоелективних САУ СПУ.

В **п'ятому розділі** проведено розробку нейромережових систем ідентифікації і управління СПУ. Запропоновано універсальну адаптивну нейромережову систему управління процесом горіння рідкого палива в топках СПУ, яка дозволяє мінімізувати вміст шкідливих викидів в атмосферу. Апробовано методи розробки нейромережових систем моніторингу і оптимізації екологічних показників роботи СПУ та показано їх ефективність в порівнянні з традиційними САУ. Представлено і апробовано методику розробки, налаштування і експлуатації нейромережової САУ рециркуляції димових газів в топку СПУ, яка знижує вміст  $\text{NO}_x$  до 54 %. Розроблено нейромережову САУ оптимізації витрати палива за рахунок контролю присосів повітря в топку і газохід СПУ та корекції коефіцієнта надлишку повітря. САУ дозволяє збільшити



ККД брутто СПУ до 8 % в залежності від теплового навантаження і стану поверхні нагріву.

**Наукова новизна** полягає в одержанні теоретичних положень і наукових результатів, використання яких дозволяє вирішити актуальну науково-прикладну проблему забезпечення ефективних екологічних і енергетичних показників роботи суднових парогенеретичних установок широкого конструктивного класу.

В результаті проведеного дослідження та вирішення головної і допоміжних задач **вперше одержано наступні наукові результати.**

1. Запропоновано нову концепцію розробки систем управління СПУ, яка відрізняється комплексним використанням нових моделей, методів і методик на ключових етапах експлуатаційного циклу парогенеруючих установок, що дозволяє досягти ефективних екологічних і енергетичних показників роботи парогенераторів.

2. Запропоновано метод створення системи адаптивного управління процесом рециркуляції димових газів у систему подачі повітря до СПУ, що дозволяє знизити вміст  $\text{NO}_x$  до 54 % за допомогою контролю витрати повітря, палива та швидкості димових газів.

3. Розроблено метод створення САУ процесом оптимізації режиму горіння рідкого палива суднового парогенератора, яка оснащена додатковими каналами контролю кольору полум'я пальника і димових газів, а також разрядження повітря в топку, що дозволяє своєчасно коригувати коефіцієнт надлишку повітря, знизити присоси повітря та збільшити ККД брутто парогенератора на усталених режимах роботи до 8 %.

4. Запропоновано метод синтезу САУ з функцією прогнозування експлуатаційних параметрів парогенератора, яка сприяє покращенню показників якості процесів експлуатації на перехідному режимі роботи і забезпечує

підтримку заданого теплового режиму на всьому діапазоні паронавантаження.

5. Запропоновано метод синтезу двоканального регулятора тиску пари комбінованого парового котла, що дозволяє поліпшити показники часу виходу на задане теплове навантаження, забезпечує своєчасну адаптацію котла до умов експлуатації, відсутність значних коливань експлуатаційних параметрів та підвищує надійність роботи СПУ.

6. Запропоновано метод розробки експертної системи для отримання значень параметрів аналітичних моделей парогенераторів, що дозволяє досліджувати динамічні режими СПУ з метою поліпшення їх конструктивних і експлуатаційних характеристик.

7. Розроблено експертну систему ідентифікації параметрів математичних моделей підсистем управління судновими парогенераторами, використання якої дозволяє спростити і прискорити налагодження та адаптацію парогенеруючих установок, що сприяє зниженню аварійних ситуацій.

8. Отримані математичні моделі, які дозволяють розрахувати оптимальні параметри САУ СПУ, при навантаженні 25 -75 % та діагностувати технічний стан елементів СПУ.

#### **Удосконалено:**

1. Систему моніторингу вмісту димових газів суднового парогенератора, яка дозволяє знизити вміст  $\text{NO}_x$  до 25 % на усталених режимах роботи за рахунок корекції теплового навантаження, надлишку повітря і швидкості протікання димових газів у газоході.

2. Математичний опис фізико-хімічних процесів, які протікають в СПУ, з метою оцінки утворення корозії в конструктивних елементах парогенератора на найбільш поширених теплових режимах роботи.

### **Набули подальшого розвитку:**

- математичні моделі фізико-хімічних процесів, що протікають в СПУ;
- принцип параметричної ідентифікації на основі синтезу методів авторегресії змінного середнього (АРСС) і методу найменших квадратів, що дозволяє отримати моделі САУ параметрів СПУ з високим ступенем адекватності;
- блочно-орієнтована модель Вінера-Гаммерштейна для параметричної ідентифікації нелінійної характеристики, яка відображає взаємозв'язок впливу теплового навантаження СПУ і зовнішніх нелінійних хвильових коливань на процес по каналу збурення «витрата пару агрегатів СЕУ - тиск пару СПУ" з високим ступенем адекватності;
- блочно-орієнтована ARX модель для параметричної ідентифікації нелінійної характеристики змісту кисню у вихідних газах від теплового навантаження СПУ, що дозволяє відображати досліджуваний процес з високим ступенем адекватності.

В результаті проведеного дослідження **сформульовано наступні наукові положення.**

1. Підвищення ККД СПУ в умовах обмеження вмісту оксидів азоту забезпечується оптимізацією витрат повітря в системі горіння з одночасною оцінкою величини присосів повітря по газовому тракту котла при постійному контролі процесів розрядження і теплового навантаження.

2. Зниження вмісту оксиду азоту досягається адаптивним управлінням процесу рециркуляції димових газів у повітряпровод СПУ з урахуванням як характеристик процесу горіння палива, так і режимів теплового навантаження парогенератора.

3. Контроль за низькотемпературною, кисневою та міжкристалічною корозією в елементах СПУ досягається новими системами моніторингу, моделі

яких описують динамічні зміни концентрації розчинених речовин в котельній воді, швидкості протікання димових газів та інтенсивності пароутворення.

4. Забезпечення заданої якості експлуатаційних характеристик СПУ на перехідних режимах роботи досягається за рахунок застосування запропонованого комбінованого критерію ефективності, який враховує мінімум суми зваженого значення перерегулювання і зваженого значення часу регулювання по умові експертного пріоритету, що виражено в вигляді вагових коефіцієнтів.

5. Запас стійкості САУ СПУ в умовах інтенсивної хитавиці судна забезпечується моделлю хвильових коливань, яка визначає межу переходу системи управління в нестійкий режим роботи та загрозу виникнення аварійної ситуації.

6. Впровадження турбулізатора гвинтавого типу в конструкцію СПУ дозволяє знизити температуру димових газів, що з одночасною корекцією вмісту кисню дозволяє збільшити ККД до 6 % в залежності від теплового навантаження і стану поверхні нагріву.

**Практичне значення одержаних результатів.** Використання запропонованих наукових результатів і положень при розробці, наладці і експлуатації СПУ забезпечує оптимізацію експлуатаційних показників парогенераторів на сталих і динамічних режимах. Впровадження концепції сприяє зменшенню вмісту шкідливих викидів, на прикладі роботи промислового котла марки ГМ 50 та СПУ Mitsubishi MB 50 з системою рециркуляції димових газів, до 55 % в атмосферу в порівнянні з типовою САУ. Отримано зменшення витрати рідкого палива до 18 % за допомогою оптимізації коефіцієнта надлишку повітря, контролю присосів повітря у газохід і нового конструктивного елемента - турболизатора, при роботі на 50 % навантаження від номінальної.

Програмно реалізовані експертні системи для етапів ідентифікації і адаптації САУ параметрів СПУ, які можна використовувати в якості тренажерів,

дозволяють підвищити ефективність процесів наладки і знизити кількість помилкових дій операторів до 25 % на прикладі налагодження та адаптації промислових парогенераторів ГМ і ДКВР та СПУ марки КВВА 12/15.

Запропоновані моделі та алгоритми, а також комп'ютерні програми, що розроблені для їх реалізації, впроваджено в навчальний процес НУ «ОМА», в методику налаштування котельних установок в проектно-монтажних компаніях ТОВ «Південспецмонтаж», ТОВ «Енергетичні інвестори» і план модернізації САУ парогенераторів ПАО «ДТЕК Західенерго» Ладизинської ТЕС, методику проектування та наладки суднових систем управління ПРАТ «Дунайсудноремонт» м. Ізмаїл.

**Ключові слова:** суднова парогенеруюча установка, математична модель, система управління, ПІ-регулятор, тепловий режим, нечітка експертна система, нейромережевий регулятор.

Статті у наукових фахових виданнях України, що входять до переліку наукових фахових видань України, які рекомендовані МОН України для публікації результатів дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук:

1. Козак Ю.А. Регулирование основных параметров судовых объектов на основе нечеткой логики [Текст] / Ю.А. Козак, **В.С. Михайленко**, В.М. Вишневская // Автоматизация судовых технических средств: науч. -техн. сб. [Фахове видання України]. – 2006. – Вып. 11. – Одесса: ОНМА. – С. 86 – 92.

2. **Михайленко В.С.** Использование нечеткой адаптивной системы управления и компьютерного мониторинга сетью котельных установок [Текст] / В.С. Михайленко, В.В. Никольский // Автоматика. Автоматизация. Электрические комплексы и системы [Фахове видання України]. – 2007.– №2 (20).– С. 157 – 163.

3. **Михайленко В.С.** Адаптивная система нейро-нечёткого управления сложным объектом [Текст] / В.С. Михайленко, В.В. Никольский, В.Ф. Ложечников // Холодильная техника и технология [Фахове видання України]. – 2008. – № 1 (111). – С. 73 – 77. *Видання входить до МНБ –DOAJ, SCILIT, EBSCO, Science Index, Index Copernicus, Google Scholar, World Cat.*

4. **Михайленко В.С.** Нечеткая экспертная система диагностики судового оборудования [Текст] / В.С. Михайленко, Е.М. Оженко . // Автоматизация судовых технических средств: науч. -техн. сб. [Фахове видання України]. – 2008. – Вып. 14. – Одесса: ОНМА. – С. 36 – 41.

5. **Михайленко В.С.** Анализ нечеткой системы регулирования тепловым объектом [Текст] / В.С. Михайленко, Н.В. Даниченко // Научные труды [Фахове видання України]. – 2008. – Вып. 33. – Одесса: ОНАПТ. – С. 89 – 94. *Видання входить до МНБ, EBSCO, Science Index, Index Copernicus, Google Scholar.*

6. **Михайленко В.С.** Нечеткая система регулирования давления пара судовой котельной установки объектом [Текст] / В.С. Михайленко, Е.М. Оженко // Холодильная техника и технология [Фахове видання України]. – 2008. – № 5 (115). – С. 69 – 74. *Видання входить до МНБ –DOAJ, SCILIT, EBSCO, Science Index, Index Copernicus, Google Scholar, World Cat, BASE, Research Bib.*

7. **Михайленко В.С.** Сравнительный анализ комплексного и нечеткого регуляторов при управлении многомерным объектом [Текст] / В.С. Михайленко, В.Ф. Ложечников // Автоматика. Автоматизація. Електротехнічні комплекси та системи [Фахове видання України]. – 2008. – № 2 (23). – С. 130 – 135. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/aaeks\\_2008\\_2\\_23](http://nbuv.gov.ua/UJRN/aaeks_2008_2_23).

8. **Михайленко В.С.** Сравнительный анализ нечеткого и ПИД - регуляторов при управлении объектами третьего и четвертого порядка с колебательностью. [Текст] / В.С. Михайленко, В.Ф. Ложечников // Холодильная техника и технология [Фахове видання України]. – 2009. – № 1 (117). – С. 67 – 71. *Видання*

*входить до МНБ – DOAJ, SCILIT, EBSCO, Science Index, Index Copernicus, Google Scholar, World Cat, BASE, Research Bib.*

9. **Михайленко В.С.** Аналіз методів створення бази правил нечіткого контролера [Текст] / В.С. Михайленко // Холодильная техника и технология [Фахове видання України]. – 2009. – № 2 (118). – С. 77 – 82. **Видання входить до МНБ – DOAJ, SCILIT, EBSCO, Science Index, Index Copernicus, Google Scholar, World Cat, BASE, Research Bib.**

10. **Михайленко В.С.** Анализ методов разработки нечетких САУ для управления сложными взаимосвязанными объектами [Текст] / В.С. Михайленко, В.Ф. Ложечников // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы та системи [Фахове видання України]. – 2009. – № 1 (23). – С. 171 – 177.

11. **Михайленко В.С.** Метод настройки нечеткого адаптивного ПИД-контроллера [Текст] / В.С. Михайленко, В.Ф. Ложечников // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы та системи [Фахове видання України]. – 2009. – № 2 (24). – С. 131 – 138.

12. **Михайленко В.С.** Применение экспертных оценок при построении функций принадлежности [Текст] / В.С. Михайленко // Холодильная техника и технология [Фахове видання України]. – 2009. – № 5 (121). – С. 73 – 78. **Видання входить до МНБ – DOAJ, SCILIT, EBSCO, Science Index, Index Copernicus, Google Scholar, World Cat, BASE, Research Bib.**

13. **Михайленко В.С.** Нечеткие продукционные экспертные системы и их взаимодействие с сетями Петри [Текст] / В.С. Михайленко // Холодильная техника и технология [Фахове видання України]. – 2009. – № 6 (122). – С. 78 – 81. **Видання входить до МНБ – DOAJ, SCILIT, EBSCO, Science Index, Index Copernicus, Google Scholar, World Cat, BASE, Research Bib.**

14. **Михайленко В.С.** Сравнительный анализ методов дефаззификации в системах нечеткого управления [Текст] / В.С. Михайленко // Холодильная техника и технология [Фахове видання України]. – 2011. – № 3 (131). – С. 85 – 89.

**Видання входить до МНБ – DOAJ, SCILIT, EBSCO, Science Index, Index Copernicus, Google Scholar, World Cat, BASE, Research Bib.**

15. **Михайленко В.С.** Сравнительный анализ робастной и нечеткой САУ действующих в условиях неопределенности [Текст] / В.С. Михайленко, Р.Ю. Харченко // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету [Фахове видання України]. – 2011. – Вип. 24 (2). – С. 198 – 205. **Видання входить до МНБ –Ulrich's, Research Bib, Scientific Indexing Services, Google Scholar.**

16. **Михайленко В.С.** Использование нечеткого алгоритма Такаги – Сугено в адаптивных системах управления сложными объектами [Текст] / В.С. Михайленко, Р.Ю. Харченко // Искусственный интеллект. Научно – теоретический журнал [Фахове видання України]. – 2011. – №2 . – С. 53 – 59.

17. **Михайленко В.С.** Алгоритм настройки адаптивного нейро-нечеткого ПИ–контроллера управления [Текст] / В.С. Михайленко // Труды Одесского политехнического университета [Фахове видання України]. – 2011. – № 2 (36). – С. 149 – 155. **Видання входить до МНБ –Cite factor, CNKI Scholar, Cross Ref, DOAJ, EBSCO, ERIH PLUS, Gale Cen gage, Google Scholar, Index Copernicus, Universal Impact Factor, World Cat, Science Index.**

18. **Михайленко В.С.** Влияние методов фаззификации и дефаззификации на качество переходных процессов в системах нечеткого управления [Текст] / В.С. Михайленко, Р.Ю. Харченко // Электротехнические и компьютерные системы [Фахове видання України]. – 2011. – № 4 (80). – С. 199 – 204. **Видання входить до МНБ – Science Index, Index Copernicus, Ulrich's.**

19. **Михайленко В.С., Харченко Р.Ю.** Сравнительный анализ теории принятия решений в условиях неопределенности и нечеткой логики на примере настройки ПИ–контроллера [Текст] / В.С. Михайленко, Р.Ю. Харченко //АСУ и приборы автоматки [Фахове видання України]. – 2011. – № 154. – С. 76 – 83. **Видання входить до МНБ – CYBERLENINKA.**



20. **Михайленко В.С.** Анализ эффективности модального регулятора с наблюдателем при нахождении объекта в условиях неопределенности [Текст] / В.С. Михайленко // Автоматизация судовых технических средств: науч. -техн. сб. [Фахове видання України]. – 2011. – Вып. 17. – Одесса: ОНМА. – С. 73 – 80.

21. Михайленко В.С. Анализ эффективности командных блоков в системах автоматизированного управления [Текст] / В.С. Михайленко // Холодильная техника и технология [Фахове видання України]. – 2011. – № 6 (134). – С.77 – 82.

**Видання входить до МНБ –DOAJ, SCILIT, EBSCO, Science Index, Index Copernicus, Google Scholar, World Cat, BASE, Research Bib.**

22. **Михайленко В.С.** Застосування гібридних мереж в адаптивних системах управління теплоенергетичних об'єктів [Текст] / В.С. Михайленко, Р.Ю. Харченко // Наукові праці ВНТУ [Фахове видання України]. – 2012. – № 1. – С. 1 – 9. **Видання входить до МНБ– Science Index.**

23. **Михайленко В.С.** Адаптивная настройка нечеткого ПИ-контроллера по идентификации переходного процесса [Текст] / В.С. Михайленко, Р.Ю. Харченко // Труды Одесского политехнического университета [Фахове видання України]. – 2012. – № 1 (38). – С. 152 – 156. **Видання входить до МНБ – Cite factor, CNKI Scholar, Cross Ref, DOAJ, EBSCO, ERIHPLUS, Gale Cen gage, Google Scholar, Index Copernicus, Universal Impact Factor, Science Index.**

24. Харченко Р.Ю. Анализ адаптивных методов настройки нечетких и ПИ – регуляторов в сложных объектах управления [Текст] / Р.Ю. Харченко, **В.С. Михайленко** // Вестник НТУ«ХПИ» [Фахове видання України]. – 2012. – № 37. – С. 78 – 89.

25. **Михайленко В.С.** Синтез интеллектуальной системы автоматического управления процессом горения топлива в энергоблоках тепловых электростанций/ В.С. Михайленко, Р.Ю. Харченко [Текст] // Промышленная теплотехника [Фахове видання України]. – 2012. – № 5. – С. 45 – 52. **Видання входить до МНБ – Science Index.**

26. **Михайленко В.С.** Синтез нейро-мережевої системи автоматичного регулювання рівня води в барабані котла енергоблоку ТЕС [Текст] / В.С. Михайленко, Р.Ю. Харченко // Наукові вісти НТУУ «КПІ» [Фахове видання України]. – 2012. – № 5. – С. 45 – 51. *Видання входить до МНБ – World Cat, Google Scholar, Open AIRE, PIIHЦ, EBSCO.*

27. **Михайленко В.С.** Синтез адаптивного нечеткого контроллера с прогнозирующей нейро-нечеткой сетью [Текст] / В.С. Михайленко, Р.Ю. Харченко // Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки [Фахове видання України]. – 2012. – №3. – С. 30 – 37. *Видання входить до МНБ –Cross Ref, DOAJ, Index Copernicus.*

28. **Михайленко В.С.** Анализ традиционных методов адаптации систем автоматического управления и их усовершенствование с использованием нейронных сетей [Текст] / В.С. Михайленко, Р.Ю. Харченко // Радиоэлектронные и компьютерные системы [Фахове видання України]. – 2012. – № 4 (56). – С. 50 – 56. *Видання входить до МНБ – Index Copernicus, INSPECIDEAS Cite Factor; Academic Keys; Info base Index; Google Scholar.*

29. **Михайленко В.С.** Определение параметров математических моделей энергоблоков на основе аппарата гибридных сетей [Текст] / В.С. Михайленко., Р.Ю. Харченко // Информатика и математические методы в моделировании [Фахове видання України]. – 2012. – Т. 2, № 3 (56). – С. 286 – 292. *Видання входить до МНБ – Index Copernicus, PIIHЦ.*

30. **Mykhailenko V.S.** Analysis of methods for adaptation of industrial control systems of thermal processes [Текст] / V.S. Mykhailenko // Науковий вісник Національного гірничого університету [Фахове видання України]. – 2014. – № 4. – С. 58 – 65. *Видання входить до МНБ – Index Copernicus, Scopus.* URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvngu\\_2014\\_4\\_11](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvngu_2014_4_11).

31. **Михайленко В.С.** Идентификация тепловых объектов в системах адаптивного управления с помощью нейро-нечетких сетей [Текст] /

В.С. Михайленко., Р.А. Варбанец //Авиационно – космическая техника и технология [Фахове видання України]. Харьков: ХАИ, – 2015. – № 10 (127). – С. 136 – 144. **Видання входить до МНБ – Index Copernicus, Google Scholar, Science Index.**

32. **Михайленко В.С.** Интеллектуальная система управления процессом горения топлива в прямоточном парогенераторе энергоблока ТЭС [Текст] / В.С. Михайленко, Н.А. Князева, М.С. Солодовник // Холодильная техника и технология [Фахове видання України]. – 2015. – № 5 (51). – С. 80 – 87. **Видання входить до МНБ –DOAJ, SCILIT, EBSCO, Science Index, Index Copernicus, Google Scholar, World Cat, BASE, Research Bib.**

33. **Михайленко В.С.** Интеллектуализированные оценки надежности паросиловой установки большого судна [Текст] / В.С. Михайленко, А.Н. Харабет // Энергетика: економіка, технології, екологія [Фахове видання України]. – 2017. – № 3 – С. 103 – 107. **Видання входить до МНБ – Science Index, Google Scholar, Open Academic Journal Index (OAJI), World Cat, BASE, Polska Bibliografia Naukowa, Academic Journal Index, International Institute of Organized Research (I2OR), General Impact Factor.**

34. Климчук А.А. Усовершенствованная математическая модель динамики уровня жидкости в барабанном парогенераторе как объекте управления [Текст] / А.А. Климчук, В.Ф. Ложечников, **В.С. Михайленко**, Н.В. Ложечникова // Международный научно-технический журнал «Проблемы управления и информатики» [Фахове видання України]. – 2019. – № 3 – С. 54 – 64. **Видання входить до МНБ – SCOPUS, Science Index, Google Scholar.**

35. **Михайленко В.С.** Усовершенствование системы управления рециркуляцией дымовых газов судового вспомогательного котла [Текст] / В.С. Михайленко, В.Ф. Ложечников // Автоматизация судовых технических средств: науч. -техн. сб. [Фахове видання України]. – 2019. – Вып. 25. – Одесса: НУ «ОМА». – С. 53 – 62. **Видання входить до МНБ - Index Copernicus.**

*Зарубіжні наукові профільні видання:*

36. **Михайленко В.С.** Инновационный подход в модернизации систем управления энергоблоков ТЭС [Текст] / В.С. Михайленко // Промышленная энергетика. – 2014. – №7. – С. 38 – 42. **Видання входить до МНБ – РІНЦ.**

37. **Mikhailenko V.S.** Analysis of Traditional and Neuro Fuzzy Adaptive System of Controlling the Primary Steam Temperature in the Direct Flow Steam Generators in Thermal Power Stations / V.S. Mikhailenko, R.Yu. Kharchenko. // Automatic Control and Computer Sciences. – 2014. – Vol. 48, № 6. – P. 334 – 344. **Видання входить до МНБ – SCOPUS, INSPEC, Google Scholar, CNKI, DBLP, EBSCO Discovery Service, Emerging Sources Citation Index.**

38. **Михайленко В.С.** Исследование экспертного показателя качества переходных процессов в автоматизированных системах регулирования ТЭС [Текст] / В.С. Михайленко // Автоматизация. Современные технологии. – 2015. – №2. – С. 32 – 37. **Видання входить до МНБ – РІНЦ.**

39. **Mikhailenko Vladislav S., Solodovnik Mihail S.** Statement of the Synthesis Problem of the Intellectual System of Adaptive Management. / Vladislav S. Mikhailenko, Mihail S. Solodovnik // Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, Gil-Lafuente, Zopounidis Constantin (Eds.). – 2015 – Vol. 675 – 223 p. – P. 165 – 179. (Springer). **Видання входить до МНБ – Scopus.**

40. **Mikhailenko V.S.** Analysis of the Adaptive Neural Network Router / V.S. Mikhailenko, M.S. Solodovnik // Automatic Control and Computer Sciences. – 2016. – Vol. 50, No. 1. – P. 46 – 53. **Видання входить до МНБ – SCOPUS, INSPEC, Google Scholar, CNKI, DBLP, EBSCO Discovery Service, EI Compendex.**

*Апробація матеріалів дисертації*

*Міжнародні, всеукраїнські і регіональні конференції:*

41. **Михайленко В.С.** Гибридные нейронные сети в задачах принятия решений в условиях неопределенности [Текст] / В.С. Михайленко // Математическое моделирование и информационные технологии: материалы Всеукр. науч. -техн. конф. – Одесса: ОГАХ, 2009 – С. 73 – 74.

42. **Михайленко В.С.** Сравнительный анализ нечеткого и ПИД–регуляторов при управлении объектами третьего и четвертого порядка [Текст] / В.С. Михайленко // Настоящи изследвания – 2009: материалы V Международ. науч. - практ. конф. – София. Болгария, 2009 – С. 22 – 25.

43. **Михайленко В.С.** Комп'ютерні системи штучного інтелекту: навчальний посібник [Текст] / В.С. Михайленко. – Одеса: ОДАХ, 2009. – 73 с.

44. **Михайленко В.С.** Использование нечетких экспертных систем и сетей Петри для анализа аварийных ситуаций на транспортных средствах [Текст] / В.С. Михайленко //Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті MINTT-2010: матеріали II Міжнарод. наук-практ. конф.Том 1.– Херсон: ХДМА, 2010. – С. 81 – 84.

45. Тодорцев Ю.К. Метод настройки адаптивного ПИД–контроллера, действующего на основе гибридной сети [Текст] / Ю.К. Тодорцев, **В.С Михайленко**, В.Ф. Ложечников // Автоматика - 2010: материалы Международ. наук. -техн. конф. Том 1. – Харьков: ХПИ, 2010. – С. 294 – 296.

46. **Михайленко В.С.** Использование гибридного контролера в системах адаптивного управления [Текст] / В.С. Михайленко // Математичне моделювання та інформаційні технології:матеріали X Всеукр. науч. –техн. конф. – Одеса: ОДАХ, 2011. – С. 88 – 89.

47. **Михайленко В.С.** Исследование гибридной сети при идентификации объекта управления [Текст] / В.С. Михайленко // Компьютерные науки и

технологии: материалы II Международ. науч. – техн. конф.– Белгород, Россия: БНТУ, 2011. – С. 268 – 272.

48. **Михайленко В.С.** Роль интеллектуальных систем поддержки принятия решений в управлении сложными объектами [Текст] / В.С. Михайленко// Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте: материалы VI Международ. науч. -практ. конф. – Коломна, Россия: МГТУ им. Баумана, 2011. – С. 145 – 149.

49. **Михайленко В.С.** Нейро-нечеткое управление сложными объектами [Текст] / В.С. Михайленко, В.Ф. Ложечников // Автоматика - 2011: материалы XVIII Международ. науч. -техн. конф. – Львов, 2011. – С. 43 – 45.

50. **Михайленко В.С.** Сравнительный анализ методов анализа иерархий и нечеткой логики в системе поддержки принятия решений [Текст] / В.С. Михайленко // Информационные интеллектуальные системы: материалы XV Международ. науч. -техн. конф. – Харьков, ХПИ, 2011. – С. 297 – 298.

51. **Михайленко В.С.** Использование интеллектуальных систем поддержки принятия решений в автоматизации процессов управления судном [Текст] / В.С. Михайленко // Современные информационные и инновационные технологии на транспорте MINTT-2011: материалы III Международ. науч. – практ. конф. Том. 1. – Херсон: ХДМА, 2011. – С. 32 – 33.

52. **Михайленко В.С.** Методы дефаззификации в алгоритмах нечеткого вывода [Текст] / В.С. Михайленко // Информатика, информационные системы и технологии: материалы VIII Региональ. конф. молодых ученых. – Одесса: ОНУ, 2011 – С. 34 – 35.

53. **Михайленко В.С.** Нейро-нечеткие технологии в системах поддержки принятия решений [Текст] / В.С. Михайленко, Р.Ю. Харченко // Advanced Information Systems and Technologies, AIST 2012: материалы Международ. научно-практич. интернет конф. – Сумы, 2012. – С. 144 – 146.

54. **Михайленко В.С.** Синтез нечеткого контроллера с адаптивной нейро-нечеткой сетью [Текст] / В.С. Михайленко // Состояние, достижения и перспективы информационных систем и технологий: материалы XII Всеукр. науч.-техн. конф. молодых учених. – Одесса: ОГАХ, 2012 – С. 16 – 18.

55. **Михайленко В.С.** Анализ научных подходов в теории нейросетевых систем управления сложными объектами [Текст] / В.С. Михайленко, Р.Ю. Харченко // Прикладная математика, управление и информатика: сборник трудов Международ. молодежн. конф. Том 2. – Белгород, Россия, 2012 – С. 481 – 485.

56. **Михайленко В.С.** Адаптивная настройка нечеткого ПИ-контроллера по идентификации переходного процесса [Текст] / В.С. Михайленко, Р.Ю. Харченко // Автоматика – 2012: материалы XVIII Международ. науч.-техн. конф. Том 1. – Киев, 2012. – С. 117.

57. **Михайленко В.С.** Постановка задачи синтеза интеллектуальной системы адаптивного управления [Текст] / В.С. Михайленко // Автоматика - 2013: материалы XX Международ. науч.-техн. конф. – Николаев: НУК, 2013 – С. 328 – 329.

58. **Mikhailenko V.S.** Statement of the Synthesis problem of the intellectual system of adaptive management [Text] / V.S. Mikhailenko., M.S. Solodovnik // International Conference on Modeling and Simulation MS'13 Chania: Book of Abstracts – Chania, Crete, Greece, 7 – 8 November 2013. – P. 17 – 18.

59. **Михайленко В.С.** Решение задачи идентификации математической модели судового энергетического оборудования [Текст] / В.С. Михайленко // Современные информационные и инновационные технологии на транспорте «MINTT-2017»: материалы VIII, Международ. науч.-практ. конф. Том. 1. – Херсон: ХДМА, 2017. – С. 107 – 112.

60. **Михайленко В.С.** Пример реализации подачи природного газа на судовых вспомогательных котлах [Текст] / В.С. Михайленко // Транспортные технологии

(морской и речной флот): инфраструктура, судовождение, перевозки, автоматизация: материалы науч. -техн. конф. – Одесса: НУ «ОМА», 2018. – С. 167 – 168.

61. **Михайленко В.С.** Перспективы снижения содержания вредных выбросов от агрегатов СЭУ [Текст] / В.С. Михайленко // IX МНТК «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика (СЕЕА-2019)». - Одесса: НУ «ОМА», 2019. – С. 72 – 75.

**Публікації.** Результати дисертаційного дослідження викладено в 61 публікації, в тому числі: 35 статей в журналах і збірниках Переліку наукових фахових видань України; 5 статей видано в міжнародних журналах; публікації входять в зарубіжні наукометричні бази: Scopus (5 статей), РІНЦ, Index Copernicus, Google Scholar, INSPEC IDEAS і тощо; 19 – тези в збірниках праць міжнародних і всеукраїнських конференцій. Всі основні наукові результати, що виносяться на захист, опубліковано.

### Abstract

**Mikhailenko V.S.** The concept of control systems development for marine steam power plants. – Qualifying scientific work as manuscript. The dissertation for the doctor of technical science degree on the specialty 05.05.03 – Engines and power plants. – National University "Odessa Maritime Academy", Odessa, 2020.

The dissertation is a set of new ideas, methods and research results related to solving a scientific and technical problem in the field of a new concept of developing highly efficient automatic control systems (ACS) for ship steam power plants (SSPP), which operate in steady and transient modes.

The **introduction** of the dissertation substantiates the relevance of the topic, defines the object and subject of research, purpose and objectives, research methods,



the relationship of work with research programs and plans of the university. Scientific provisions and results are presented, the substantiation of their reliability is given. The completeness of the presentation of scientific results in publications and abstracts of international and national conferences is reflected.

The **first section** deals with scientific and applied issues related to the development and operation of ship ACS, current areas in the field of modernization and adaptation of ACS units SSPP. Based on the analysis of existing problems associated with the development and operation of ACS ship steam generating units (SGU), the purpose and objectives of the dissertation research. The purpose and tasks of research are put, the scientific hypothesis about urgency of use of intellectual methods and algorithms in processes of development, modernization and adaptation of ACS of water-tube SGU of wide constructive purpose is put forward.

In the **second section** the parametric identification of SGU subsystems is carried out. The coefficients of the equations of the dynamics of the SGU parameters during its operation at three thermal regimes are calculated and their degree of adequacy is determined. New differential equations of local SGU systems are obtained, which allow to estimate the influence of ACS control actions on the processes of chemical and electrochemical corrosion in SGU elements. By means of full-scale experiments on operating auxiliary SGU Mitsubishi MB, analogs of SGU - production steam boilers GM and DKVR and ship emulators, mathematical models were determined by control and perturbation channels for main, auxiliary, utilization and combined SGU, and the accuracy of the obtained models was evaluated.

In the **third section**, modeling of nonlinear SGU systems is performed. Based on the simulation results performed in the System Identification Toolbox, a wide class of nonlinear Wiener-Hammerstein models that implement a neural network, nonlinear ARMAX models and other models that allow to describe the experimental processes of controlled SGU parameters with a high degree of adequacy. The expediency of introducing a nonlinear model of regular wave oscillations in the form of the van der

Pol differential equation (oscillator with nonlinear attenuation) as an additional component of the external perturbation channel for effective analysis of the stability of ship ACS SGU by Rauss - Hurwitz method, which reduces the occurrence of emergencies. The combined expert criterion of an estimation of efficiency of process of adjustment of ACS of parameters of SGU is offered and tested and research of methods of adaptive management of units of SGU is carried out.

The **fourth section** identifies methods for developing fuzzy output systems, which allow to obtain optimal quality indicators of transients of control systems of SGU parameters and to provide support of the set thermal regime of SPU. An expert system of adaptation of setting parameters of a standard regulator has been developed, which operates on the basis of identification of indicators of operational processes of SGU. The efficiency of the proposed methods and expert systems that implement the theory of fuzzy logic is shown. It is noted that the use of expert systems ensures the adaptation of the SGU to the operating conditions and the maintenance of the specified thermal regime of the SGU without significant deviations.

In the **fifth section**, the development of neural network systems for identification and control of SGU. A universal adaptive neural network control system for the combustion of liquid fuel in SGU furnaces is proposed, which allows minimizing the content of harmful emissions into the atmosphere. Methods of development of neural network systems of monitoring and optimization of ecological indicators of SGU work are tested and their efficiency in comparison with traditional ACS is shown. The method of development, adjustment and operation of the neural network ACS of flue gas recirculation to the SGU furnace, which reduces the  $\text{NO}_x$  content to 54 %, is presented and tested. Developed neural network ACS optimization of fuel consumption by controlling air intakes in the furnace and flue SGU, correction of excess air, based on the steam load of the units SGU and turbulizer can increase the gross efficiency of SGU up to 8 % depending on heat load and heating surfaces.

**The scientific novelty** lies in obtaining theoretical positions, scientific and practical results, the use of which allows to solve the current scientific and applied problem of ensuring effective environmental and energy performance of the SGU of a wide design class.

**As a result of the research** and the solution of the main and auxiliary problems the following scientific results were obtained for the first time.

1. A new concept of development of SGU control systems is proposed, which differs in the complex use of new models, methods and techniques at key stages of the operating cycle of steam generating plants, which allows to achieve effective environmental and energy performance of steam generators.

2. A method of creating a system of adaptive control of the process of flue gas recirculation in the air supply system to the SGU, which reduces the NO<sub>x</sub> content to 54% by controlling the flow of air, fuel and flue gas velocity.

3. The method of creation of ACS by process of optimization of a mode of burning of liquid fuel of the ship steam generator which is equipped with additional channels of control of color of a flame of a burner and flue gases, and also discharge of air in fire chambers is developed. gross steam generator at steady-state operation up to 8 %.

4. The flue gas content monitoring system of the ship's steam generator has been improved, which allows to reduce the NO<sub>x</sub> content by up to 25 % at steady-state operating modes due to the correction of heat load, excess air and flue gas flow rate in the flue.

5. The method of ACS synthesis with the function of forecasting the operating parameters of the steam generator is proposed, which helps to improve the quality of operation processes in the transient mode and provides support for a given thermal regime over the entire range of steam load.

6. The method of synthesis of two-channel steam pressure regulator of the combined steam boiler is offered, which allows to improve the time of output to a

given heat load, provides timely adaptation of the boiler to operating conditions, no significant fluctuations in operating parameters and increases reliability of SGU.

7. The method of development of expert system for receiving values of parameters of analytical models of steam generators is offered, that allows to investigate dynamic modes of SPU for the purpose of improvement of their constructive and operational characteristics.

8. The expert system of identification of parameters of mathematical models of subsystems of management of ship steam generators is developed, use of which allows to simplify and accelerate adjustment and adaptation of steam generating installations that promotes reduction of emergency situations.

9. The received mathematical models which allow to calculate optimum parameters of ACS of SGU, at loading of 25 -75 % and to diagnose a technical condition of elements of SGU.

10. Improved mathematical description of physicochemical processes occurring in the SPU, in order to assess the formation of corrosion in the structural elements of the steam generator at the most common thermal modes.

*Further developed:*

- mathematical models of physicochemical processes occurring in the SPU;
- the principle of parametric identification based on the synthesis of autoregression methods of variable mean (APCC) and the method of least squares, which allows to obtain models of ACS parameters of SGU with a high degree of adequacy;
- block-oriented Wiener-Hammerstein model for parametric identification of nonlinear characteristics, which reflects the relationship between the influence of SPU heat load and external nonlinear wave oscillations on the perturbation channel process "steam consumption - SGU steam pressure" with a high degree of adequacy;
- block-oriented ARX model for parametric identification of the nonlinear characteristic of the oxygen content in the exhaust gases from the thermal load of the SPU, which allows to reflect the studied process with a high degree of adequacy.

**As a result of the research the following scientific positions are formulated.**

1. Increasing the efficiency of SGU in terms of limiting the content of nitrogen oxides is provided by optimizing the flow of air in the combustion system with simultaneous assessment of the amount of air suction on the gas path of the boiler with constant control of discharge and heat load.

2. Reduction of nitric oxide content is achieved by adaptive control of the flue gas recirculation process in the SGU air duct, taking into account both the characteristics of the fuel combustion process and the heat load modes of the steam generator.

3. Control over low-temperature, oxygen and intergranular corrosion in SGU elements is achieved by new monitoring systems, the models of which describe the dynamic changes in the concentration of solutes in boiler water, the rate of flue gases and the intensity of vaporization.

4. Ensuring the specified quality operational characteristics of the SGU in transient modes of operation is achieved through the application of the proposed combined efficiency criterion, which takes into account the minimum amount of the weighted value of overregulation and the weighted value of the adjustment time under the expert priority, expressed as weights.

5. The stability margin of the ACS in the conditions of intense rocking of the vessel is provided by the model of wave oscillations, which determines the boundary of the transition of the control system to unstable mode of operation and the threat of an emergency.

6. The introduction of a screw-type turbulizer in the design of the SPU allows to reduce the flue gas temperature, which with the simultaneous correction of the oxygen content allows to increase the efficiency up to 6 % depending on the heat load and the condition of the heating surface.

**The practical significance of the obtained results.** The use of the proposed scientific results and provisions in the development, commissioning and operation of SGU provides optimization of the performance of steam generators at constant and

dynamic modes. The implementation of the concept helps to reduce the content of harmful emissions on the example of the water-tube steam industrial boiler GM 50 and water pipe auxiliary boiler Mitsubishi MB 50 with flue gas recirculation system up to 55% in the atmosphere and reduce liquid fuel consumption by 18% by optimizing the coefficient of air, control of air suction and turbocharger, at work on 50% of loading from nominal. Software-implemented expert systems for the stages of identification and adaptation of ACS parameters of SGU can increase the efficiency of adjustment processes and reduce the number of erroneous actions of operators according to preliminary data to 25% on the example of adjustment and adaptation of industrial steam generators GM and DKVR.

The proposed models and algorithms, as well as computer programs developed for their implementation, are implemented in the educational process of NU "OMA", in the method of setting up boiler plants in design and installation companies "Pivdenspetsmontazh", "Energy Investors" and modernization plan ACS of steam generators of "DTEK Zahidenergo" of Ladyzhyn thermal power plant, methods of design and adjustment of ship control systems of "Danube Ship Repair" in Izmail.

**Key words:** ship steam generating installation, control system, mathematical model, PI- controller, thermal regime, fuzzy control system, neural network regulator.

## ЗМІСТ

|                                                                                                                              |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ .....                                                                                              | 29  |
| ВСТУП .....                                                                                                                  | 30  |
| РОЗДІЛ 1. СТАН РОЗВИТКУ ТА ПРОБЛЕМИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ<br>СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ СПУ .....                                              | 45  |
| 1.1. Стадії розробки систем управління СПУ .....                                                                             | 45  |
| 1.2. Аналіз проблем і завдань, що виникають при проектуванні,<br>налагодженні та експлуатації САУ СПУ .....                  | 49  |
| 1.3. Аналіз інноваційних розробок в області суднових систем<br>управління агрегатами СЕУ .....                               | 66  |
| 1.4. Обґрунтування мети і постановка завдань дослідження .....                                                               | 71  |
| 1.5. Висновки до розділу .....                                                                                               | 73  |
| РОЗДІЛ 2. ІДЕНТИФІКАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ СУДНОВИХ<br>ПАРОГЕНЕРАТОРІВ .....                                                         | 75  |
| 2.1. Аналітичні моделі динамічних процесів СПУ .....                                                                         | 75  |
| 2.2. Аналітична модель системи регулювання температури перегрітої<br>пари .....                                              | 109 |
| 2.3. Розробка математичних моделей СПУ за допомогою<br>експериментально - статистичних методів .....                         | 115 |
| 2.4. Експериментальні і аналітичні моделі ДПК, УПК і КПК .....                                                               | 139 |
| 2.5. Висновки до розділу .....                                                                                               | 160 |
| РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ САУ СПУ .....                                                                                          | 162 |
| 3.1. Дослідження нелінійних характеристик об'єктів<br>управління СПУ .....                                                   | 162 |
| 3.2. Розробка експертного критерію оцінки якості експлуатаційних<br>процесів СПУ при проведенні налагоджувальних робіт ..... | 183 |

|                                                                                                                        |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.3. Дослідження ефективності адаптивних САУ в процесах зміни теплового режиму СПУ .....                               | 195 |
| 3.4. Висновки до розділу .....                                                                                         | 198 |
| РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА МЕТОДІВ СТВОРЕННЯ САУ СПУ, ЩО ДІЮТЬ НА ОСНОВІ ТЕОРІЇ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ .....                          | 200 |
| 4.1. САУ параметрами суднових комбінованих котлів .....                                                                | 200 |
| 4.2. Метод параметричної ідентифікації підсистем СПУ .....                                                             | 209 |
| 4.3. Експертна система адаптації параметрів регуляторів з ідентифікацією показників експлуатаційних процесів СПУ ..... | 228 |
| 4.4. Нечітка апроксимація значень коефіцієнтів диференційних рівнянь СПУ .....                                         | 238 |
| 4.5. Висновки до розділу .....                                                                                         | 243 |
| РОЗДІЛ 5. РОЗРОБКА НЕЙРОМЕРЕЖЕВИХ САУ СПУ .....                                                                        | 245 |
| 5.1. Методологія синтезу нейромережевих САУ СПУ .....                                                                  | 245 |
| 5.2. Оптимізація показників шкідливих викидів в димових газах СПУ за допомогою системи моніторингу .....               | 255 |
| 5.3. Система корекції коефіцієнта надлишку повітря для зниження вмісту $\text{NO}_x$ в димових газах СПУ .....         | 270 |
| 5.4. Рециркуляційний метод зниження вмісту $\text{NO}_x$ в димових газах СПУ .....                                     | 283 |
| 5.5. Система оптимізації процесом витрати палива СПУ .....                                                             | 296 |
| 5.6. Висновки до розділу .....                                                                                         | 327 |
| ВИСНОВКИ .....                                                                                                         | 329 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....                                                                                       | 332 |
| ДОДАТКИ .....                                                                                                          | 358 |



## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ДПК – допоміжний паровий котел;  
КПК – комбінований паровий котел;  
НЕС – нечітка експертна система;  
НЛК – нечіткий логічний контролер;  
НМ – штучна нейронна мережа;  
ННМ – нейронечітка мережа;  
НМК – нейромережевий контролер;  
НСАУ – нечітка система автоматичного управління;  
НМСАУ – нейромережева система автоматичного управління;  
ПГТУ – парогазотурбінна установка;  
ПІД – пропорційно – інтегрально – диференціальний;  
САУ – система автоматичного управління;  
СЕУ – суднова енергетична установка;  
СПУ – суднова пароенергетична установка;  
СПТУ – суднова паротурбінна установка;  
СППР – система підтримки прийняття рішень;  
ТЛП – таблиця лінгвістичних правил;  
УПК – утилізаційний паровий котел;  
SCADA – програма диспетчерського управління та збору інформації

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Суднові системи автоматичного управління є одними з найбільш важливих функціональних систем, від ефективності роботи яких залежить надійна робота обладнання судна, життя і здоров'я членів екіпажу, а також екологічні параметри які повинні відповідати вимогам положень Міжнародної конвенції по запобіганню забрудненню з суден [131].

Суднова пароенергетична установка (СПУ) є важливою складовою суднової енергетичної установки (СЕУ) і від ефективності її дії багато в чому залежать показники економічності і надійності значного ряду суднових систем. Оптимальне управління СПУ з позиції енергетичної ефективності, зниження шкідливих викидів у атмосферу, надійності тощо, багато в чому визначається закладеними в концепцію розробки САУ методологією, методами та моделями об'єктів управління.

В процесі проектування до систем управління, як правило, пред'являються різні, часом суперечливі вимоги, наприклад, у виборі критеріїв ефективності. Наявність протиріч породжує складності вже на початковому етапі проектування при визначенні найбільш значущих характеристик об'єкта. Суднові САУ СПУ в більшості налаштовані на оптимізацію тільки одного основного параметра, як правило, коефіцієнта корисної дії (ККД) для номінального режиму, відповідного енергоефективності. Однак, при такому підході відбувається значне збільшення показників вмісту шкідливих викидів в атмосферу та прискорення процесів утворення корозії на парогенеруючих елементах і тощо.

Ведомо, що проблема захисту повітряного басейну стоїть дуже гостро. Неорганічні і органічні сполуки, що входять до складу суднових енергетичних установках, надають комплексний шкідливий вплив на навколишнє середовище.

Токсичність  $\text{NO}_x$  перевищує токсичність більшості інших шкідливих компонентів, тому проблема зниження викидів оксидів азоту в атмосферу має важливе значення в справі охорони навколишнього середовища.

Боротьба з викидами  $\text{NO}_x$  ускладнюється тим, що їх максимальна поява відповідає режиму найбільш ефективного згоряння палива, тому методи скорочення викидів  $\text{NO}_x$  не повинні призводити до зниження інтенсивності робочих процесів агрегатів СЕУ. В даний час діє цілий ряд підходів щодо зменшення концентрації  $\text{NO}_x$  в димових газах обладнання СЕУ. Роботи більшості вчених спрямовані на зниження викидів оксидів азоту методами селективного каталітичного і некаталітичного відновлення оксидів азоту. Зазначені методи хоча і забезпечують високу ступінь очищення димових газів, але при цьому пов'язані зі значними фінансовими витратами і засновані на використанні небезпечних хімічних реагентів. Також за даними [173] скрубери встановлені на більш ніж на 1 % від загального числа судів, і галузеві аналітики пророкують, що на 2020 року їх число навряд чи перевищує 10 – 20 %. Тому проблема розробки і впровадження на суднах нових, економічно відносно недорогих та екологічно ефективних технологій очищення відпрацьованих газів СПУ від оксидів азоту і сірки, в тому числі за допомогою сучасних засобів автоматизації, в зв'язку зі строгими вимогами Додатка VI МАРПОЛ є актуальною.

Наступна проблема, що виникає при розробці САУ, пов'язана з вибором принципу дії контурів регулювання і оптимального методу розрахунку параметрів регуляторів. Незважаючи на те, що в даний час розроблено велику кількість методів розрахунку та оптимізації САУ, значна їх частина є тільки теоретичними, застосування їх на практиці викликає суттєві, а часом і непереборні труднощі. З одного боку складність методів оптимізації не дозволяє проектувальникам широко використовувати їх в спеціалізованих програмних

системах, а з іншого – їх значна математизація викликає труднощі у операторів і фахівців-наладчиків в процесі експлуатації і наладці судових САУ.

Відомо, що є значна кількість методик по наладці САУ промислових парогенеруючих установок [56, 63, 139], однак, методи оптимальної настройки класичних регуляторів можуть задовольнити потреби флоту лише частково. Умови експлуатації морського судна визначають специфічність об'єктів регулювання і істотно обмежують використання принципів та засобів автоматики, які призначено для стаціонарних умов. Ці протиріччя призводять до того, що значна частина чинних САУ СПУ працюють недостатньо ефективно.

Дослідження якості ефективності експлуатації САУ, що проведено зарубіжними компаніями Техноконт і Honeywell на 350 парогенеративних об'єктах в промисловій та транспортній галузі, показали, що з контурів регулювання, які знаходяться в експлуатації не менше 5 років, в середньому близько 63 % контурів працюють з неоптимальними настройками регуляторів. У 30 % неефективна організація схеми регулювання, 40 % систем управління мають значні перерегулювання [171]. Сукупність даних проблем несприятливо впливає на якість перехідних процесів, супроводжується перевитратами палива, погіршенням екологічних показників і зниженням показників надійності роботи обладнання.

Як свідчить практика, прийняті в експлуатацію на нових судах класу автоматизації А1 або після модернізації, САУ СПУ часто виявляються налаштованими не належним чином, що призводить до економічних втрат, забруднення навколишнього середовища, створення аварійних ситуацій і то що. [15, 19, 23].

Через недосконалість систем судової автоматизації безвахтене обслуговування СЕУ навіть на судах класу А1 застосовується рідко. На більшості судів встановлюється добова вахта в центральному посту управління і періодичні огляди в машинному відділенні. Однак, велика кількість

контрольованих параметрів СЕУ і наявність для них аварійно-попереджувальних сигналізацій викликає стомлюваність у вахтових фахівців, що в свою чергу підвищує ймовірність виникнення помилок і аварій, які викликані «людським фактором».

Разом з тим, сучасний досвід розробки і експлуатації систем управління пароенергетичними об'єктами транспортних засобів і промислових об'єктів показує, що важливою умовою підвищення їх ефективності є впровадження інтелектуальних технологій [231 – 236]. Спеціалісти суднобудівних корпорацій стверджують, що в найближчому майбутньому судном буде управляти штучний інтелект без участі людини [1, 13, 51].

В коло задач НМ буде входити постійний моніторинг усіх систем судна і своєчасне попередження і ліквідація поломок і несправностей. Нейрона мережа зможе розрахувати ймовірність морської аварії і розробити варіанти її запобігання. Розробники суднових САУ в своїх проектних рішеннях обґрунтовують в найближчому майбутньому появу нового класу автоматизації для «Інтелектуального судна» – AUT-0 [66, 74, 119, 120].

Однак, для ефективного використання в процесах розробки, наладки і експлуатації САУ СПУ інтелектуальних методів, необхідно оцінити їх ефективність, як для нових, так і для традиційних систем управління об'єктів СПУ з урахуванням їх динамічних характеристик і специфіки роботи.

Аналіз вищевказаних проблем, а також наукових праць вчених в області управління енергетичних об'єктів промислового і транспортного призначення: В.Л. Александрова [1], Ю.Арії [176], К.Астрома [178], С.І. Горба [22], В.А. Голікова [19], С.В. Головка [21], В.І. Гостєва [27], А.С. Ключєва [57], Ю.П. Кондратенка [61], А.П. Копеловича [63], І.Мамдани [207], С.А. Михайлова [81], Ю.І.Нічаєва [120], Р.А. Нєлєпіна [118], С.А. Подпоріна [133], В.Я. Ротача [141], Б.Солберга [219], А.Сугєно [222], В.Ф. Сиромятнікова [153], Т.Тагаки [222], Т.Янга [226] тощо, дозволяє прийти до висновку, що, не

вирішено і зберігає свою актуальність широке коло питань, які пов'язані з оптимізацією етапів проектування систем управління СПУ, оптимальною експлуатацією СПУ, ефективною наладкою суднових САУ, надійністю роботи САУ і агрегатів СЕУ і тощо.

Аналіз публікацій В.А. Арсірія [2], Б.Т. Бадагуєва [6], Г.Б. Варламова [224]; Н.І. Денисенка [34], М.Дзіда [189], О.В. Єфімова [43], Е.В. Корнілова [55], В.К.Лисенка [77], Д.Х. Мілтоне [80], Б. Г. Тимошевського [155], А. Шоме [220], О.В. Щедролосєва [216] та інших [68, 149, 150] показав, що питання економії паливних ресурсів і підвищення ККД парогенераторів, зниження вмісту шкідливих викидів в атмосферу, впливу корозії на суднові системи, використання альтернативного палива, вдосконалення математичних моделей пароенергетичних систем, оптимальної експлуатації СПУ, тощо залишаються актуальними в умовах посилювання нормативних показників  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$ , росту вартості енергоресурсів, конкуренції суднобудівних компаній за лідерство на ринку [173, 187, 192, 198].

Таким чином, аналіз вищевикладеного показує на актуальність рішення цілого ряду науково - прикладних задач, які в сукупності складають **наукову проблему**, забезпечення ефективних екологічних і енергетичних показників роботи та надійності суднових високоавтоматизованих пароенергетичних установок на усталених і перехідних режимах роботи за урахуванням міжнародних конвенцій та допомогою впровадження нової концепції розробки систем управління в основні етапи життєвого циклу СПУ.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Актуальність рішення проблеми в області розробки вискоефективних САУ СПУ визначається вимогами Додатка VI MARPOL 2016 року з розробці плану управління енергоефективності судна, прийнятого резолюцією Комітету по захисту морського середовища МЕРС.282(70) Міжнародної морської організації.

Робота виконувалася відповідно до положень Транспортної стратегії України на період до 2020 року (Наказ Президента України №5/2015 від 12 січня 2015 року); положень Транспортної стратегії України на період до 2030 року; а також у рамках наступних держбюджетних науково-дослідних робіт:

- «Підвищення ефективності, надійності і якості функціонування суднових енергетичних установок» державний реєстраційний номер № 0115U003582, що виконана в НУ «ОМА», автор розробив розділ «Аналіз методів ідентифікації і адаптації об'єктів регулювання СЕУ».
- «Методи і способи підвищення ефективності СЕУ» державний реєстраційний номер № 0117U005137, яка також виконана в НУ «ОМА», автор представив розділ «Аналіз інтелектуальних систем управління об'єктів СЕУ».

**Мета і задачі дослідження.** Мета – рішення наукової проблеми підвищення ККД і зниження вмісту оксидів азоту у вихідних газах СПУ за допомогою нової концепції розробки високоефективних САУ.

Для досягнення поставленої цілі необхідно вирішити наступні задачі.

#### **Головна задача.**

На підставі розроблених взаємопов'язаних моделей, методів та методології запропонувати нову концепцію створення суднових систем управління, яка дозволить забезпечити ефективні екологічні та експлуатаційні показники роботи СПУ на усталених і перехідних режимах.

Для виконання головної задачі необхідно вирішити наступні допоміжні задачі:

1. Провести аналіз проблем і протиріч, що виникають при розробці, наладці та експлуатації систем управління СПУ, які функціонують на усталених і перехідних режимах.
2. Провести ідентифікацію термодинамічних і гідродинамічних процесів, що протікають в СПУ та одержати нові аналітичні і експериментальні математичні моделі.

3. Розробити критерій оцінки якості процесів регулювання при проведенні пускових на налаштувальних робіт та подальшій експлуатації СПУ.

4. Обґрунтувати доцільність використання нечітких алгоритмів в процесах наладки систем управління суднових парогенераторів і створити метод розробки нечіткої експертної системи для САУ параметрами СПУ.

5. Розробити методологію адаптації САУ температури пари в СПУ, яка забезпечує досягнення заданих експлуатаційних параметрів роботи, в умовах впливу зовнішніх і внутрішніх збурень.

6. Розробити універсальну САУ процесу горіння рідкого палива в суднових водотрубних СПУ, яка забезпечить підтримку високого ККД та зниження шкідливих викидів у атмосферу .

7. Удосконалити методи і методики ідентифікації, адаптації і оптимізації параметрів регуляторів по заданим критеріям в САУ СПУ, провести аналіз ефективності запропонованих наукових положень.

**Об'єкт дослідження:** процеси розробки і експлуатації суднових парогенеретичних установок.

**Предмет дослідження:** математичні моделі, методи та методики розробки систем управління судновими водотрубними парогенеруючими установками.

**Методи дослідження.** В процесі вирішення поставлених задач застосовувалися методи: термодинаміки – для розробки рівнянь динаміки параметрів парогенераторів; теорії горіння Я.Б. Зельдовича – для аналізу процесів утворення оксидів азоту; теорії корозії та захисту металів - аналізу процесів корозії в елементах СПУ; системного аналізу – для визначення локальних і цільової функції САУ парогенератора і розрахунку вагових коефіцієнтів показників якості процесів управління; теорії автоматичного управління – для розрахунку параметрів і аналізу ефективності систем регулювання об'єктами парогенеруючої СЕУ; ідентифікації і адаптивного управління – для визначення математичних моделей об'єктів управління і



розрахунку параметрів адаптивних контролерів; теорії нечітких множин і нечіткої логіки – для розробки і дослідження нечітких контролерів; моделювання знань та досвіду експертів для розробки нечітких експертних систем; штучних нейронних і нейронечітких мереж – для створення нейромережевих систем управління процесами в парогенераторах СЕУ; імітаційного моделювання – для апробації і дослідження запропонованих моделей, методів і алгоритмів.

Експериментальні дослідження за визначенням математичних моделей парогенераторів проводились на барабанних водотрубних парових котлах ДКВР, НЛЗ, ГМ та тощо які є за своїми конструктивними і виробничими характеристиками аналоги суднових водотрубних парогенераторів фірм «Mitsubishi», «Ла-Монт», «Альфа Лаваль», «КАВ», «КВГ», віртуальних суднових тренажерах програмних емуляторах управління головними, утилізаційними і комбінованими водотрубними парогенераторами (Steam Engine Room Simulator; Kongsberg Simulator MC 90-V; Virtual Engine Room, Boiler Simulator). Методи розрахунку оптимальних параметрів ПД - контролерів аналізувались з використанням лабораторних стендів кафедри електрообладнання і автоматики суден (EOiAC) НУ «ОМА». В процесі постановки задач дослідження використовувались методи теорії планування експерименту.

**Наукова новизна** полягає в одержанні теоретичних положень, наукових та практичних результатів, використання яких дозволяє вирішити актуальну науково-прикладну проблему забезпечення ефективних екологічних і енергетичних показників роботи СПУ широкого конструктивного класу.

В результаті проведеного дослідження та вирішення головної і допоміжних задач **вперше отримано наступні наукові результати.**

1. Запропоновано нову концепцію розробки систем управління СПУ, яка відрізняється комплексним використанням нових моделей, методів і методик на

ключових етапах експлуатаційного циклу парогенеруючих установок, що дозволяє досягти ефективних екологічних і енергетичних показників роботи парогенераторів.

2. Запропоновано метод створення системи адаптивного управління процесом рециркуляції димових газів у систему подачі повітря до СПУ, що дозволяє знизити вміст  $\text{NO}_x$  до 54 % за допомогою контролю витрати повітря, палива та швидкості димових газів.

3. Розроблено метод створення САУ процесом оптимізації режиму горіння рідкого палива суднового парогенератора, яка оснащена додатковими каналами контролю кольору полум'я пальника і димових газів, а також разрядження повітря в топку, що дозволяє своєчасно коригувати коефіцієнт надлишку повітря, знизити присоси повітря та збільшити ККД бруто парогенератора на усталених режимах роботи до 8 %.

4. Запропоновано метод синтезу САУ з функцією прогнозування експлуатаційних параметрів парогенератора, яка сприяє покращенню показників якості процесів експлуатації на перехідному режимі роботи і забезпечує підтримку заданого теплового режиму на всьому діапазоні паронавантаження.

5. Запропоновано метод синтезу двоканального регулятора тиску пари комбінованого парового котла, що дозволяє поліпшити показники часу виходу на задане теплове навантаження, забезпечує своєчасну адаптацію котла до умов експлуатації, відсутність значних коливань експлуатаційних параметрів та підвищує надійність роботи СПУ.

6. Запропоновано метод розробки експертної системи для отримання значень параметрів аналітичних моделей парогенераторів, що дозволяє досліджувати динамічні режими СПУ з метою поліпшення їх конструктивних і експлуатаційних характеристик.

7. Розроблено експертну систему ідентифікації параметрів математичних моделей підсистем управління судновими парогенераторами, використання якої дозволяє спростити і прискорити налагодження та адаптацію парогенеруючих установок, що сприяє зниженню аварійних ситуацій.

8. Отримані математичні моделі, які дозволяють розрахувати оптимальні параметри САУ СПУ, при навантаженні 25 -75 % та діагностувати технічний стан елементів СПУ.

#### **Удосконалено:**

1. Систему моніторингу вмісту димових газів суднового парогенератора, яка дозволяє знизити вміст  $\text{NO}_x$ , до 25 % на ustalених режимах роботи за рахунок корекції теплового навантаження, надлишку повітря і швидкості протікання димових газів у газоході.

2. Математичний опис фізико-хімічних процесів, які протікають в СПУ, з метою оцінки утворення корозії в конструктивних елементах парогенератора на найбільш поширених теплових режимах роботи.

#### **Набули подальшого розвитку:**

- математичні моделі фізико-хімічних процесів, що протікають в СПУ;
- принцип параметричної ідентифікації на основі синтезу методів авторегресії змінного середнього (АРСС) і методу найменших квадратів, що дозволяє отримати моделі САУ параметрів СПУ з високим ступенем адекватності;
- блочно-орієнтована модель Вінера-Гаммерштейна для параметричної ідентифікації нелінійної характеристики, яка відображає взаємозв'язок впливу теплового навантаження СПУ і зовнішніх нелінійних хвильових коливань на процес по каналу збурення «витрата пару агрегатів СЕУ - тиск пару СПУ" з високим ступенем адекватності;
- блочно-орієнтована ARX модель для параметричної ідентифікації нелінійної характеристики змісту кисню у вихідних газах від теплового

навантаження СПУ, що дозволяє відображати досліджуваний процес з високим ступенем адекватності.

В результаті проведеного дослідження **сформульовано наступні наукові положення.**

1. Підвищення ККД СПУ в умовах обмеження вмісту оксидів азоту забезпечується оптимізацією витрат повітря в системі горіння з одночасною оцінкою величини присосів повітря по газовому тракту котла при постійному контролі процесів розрядження і теплового навантаження.

2. Зниження вмісту оксиду азоту досягається адаптивним управлінням процесу рециркуляції димових газів у повітряпровод СПУ з урахуванням як характеристик процесу горіння палива, так і режимів теплового навантаження парогенератора.

3. Контроль за низькотемпературною, кисневою та міжкристалічною корозією в елементах СПУ досягається новими системами моніторингу, моделі яких описують динамічні зміни концентрації розчинених речовин в котельній воді, швидкості протікання димових газів та інтенсивності пароутворення.

4. Забезпечення заданої якості експлуатаційних характеристик СПУ на перехідних режимах роботи досягається за рахунок застосування запропонованого комбінованого критерію ефективності, який враховує мінімум суми зваженого значення перерегулювання і зваженого значення часу регулювання по умові експертного пріоритету, що виражено в вигляді вагових коефіцієнтів.

5. Запас стійкості САУ СПУ в умовах інтенсивної хитавиці судна забезпечується моделлю хвильових коливань, яка визначає межу переходу системи управління в нестійкий режим роботи та загрозу виникнення аварійної ситуації.

6. Впровадження турбулізатора гвинтавого типу в конструкцію СПУ дозволяє знизити температуру димових газів, що з одночасною корекцією

вмісту кисню дозволяє збільшити ККД до 6 % в залежності від теплового навантаження і стану поверхні нагріву.

**Достовірність наукових положень** Обґрунтованість і достовірність наукових положень забезпечено:

- якісним і кількісним збігом експериментальних і аналітичних даних при аналізі статичних і динамічних режимів роботи суднових парогенераторів;
- натурними експериментами на парогенераторах типу ГМ і ДКВР;
- аналізом даних з системи моніторингу СПУ Mitsubishi MAC танкера «Minerva Roxanne»;
- даними експериментів, які були отримані на стенді мікропроцесорної техніки кафедри ЕО і АС НУ «ОМА» та віртуальних тренажерах - емуляторах: «Virtual Engine Room», «Steam Engine Room Simulator», «Kongsberg Norcontrol Simulator MC 90-V», «Boiler Simulator», що дозволяють створити математичні моделі головних, допоміжних, комбінованих і утилізаційних СПУ різної парової продуктивності.

**Практичне значення одержаних результатів.** Використання запропонованих наукових результатів і положень при розробці, наладці і експлуатації СПУ забезпечує оптимізацію експлуатаційних показників парогенераторів на сталих і динамічних режимах. Впровадження концепції сприяє зменшенню вмісту шкідливих викидів, на прикладі роботи промислового котла марки ГМ 50 та СПУ Mitsubishi MB 50 з системою рециркуляції димових газів, до 55 % в атмосферу в порівнянні з типовою САУ. Отримано зменшення витрати рідкого палива до 18 % за допомогою оптимізації коефіцієнта надлишку повітря, контролю присосів повітря у газохід і нового конструктивного елемента - турболизатора, при роботі на 50 % навантаження від номінальної.

Програмно реалізовані експертні системи для етапів ідентифікації і адаптації САУ параметрів СПУ, які можна використовувати в якості тренажерів, дозволяють підвищити ефективність процесів наладки і знизити кількість

помилкових дій операторів до 25 % на прикладі налагодження та адаптації промислових парогенераторів ГМ і ДКВР та СПУ марки КВВА 12/15.

Запропоновані моделі та алгоритми, а також комп'ютерні програми, що розроблені для їх реалізації, впроваджено в навчальний процес НУ «ОМА», в методику налаштування котельних установок в проектно-монтажних компаніях ТОВ «Південспецмонтаж», ТОВ «Енергетичні інвестори» і план модернізації САУ парогенераторів ПАО «ДТЕК Західенерго» Ладжинської ТЕС, методику проектування та наладки суднових систем управління ПРАТ «Дунайсудноремонт» м. Ізмаїл.

**Особистий внесок здобувача.** Всі основні наукові результати, що висвітлені у роботі та виносяться на захист, отримано автором особисто та викладено у його наукових працях. З наукових робіт, опублікованих у співавторстві, у дисертації використано тільки ті положення, які належать автору особисто.

В спільних роботах дисертанту належить: [1, 8, 11, 19] – постановка проблеми та задач дослідження, розробка математичних моделей; проведення комп'ютерного моделювання, розрахунок оптимальних параметрів типових регуляторів; аналіз отриманих результатів дослідження; [2–7, 10, 15] – аналіз проблеми, постановка задач дослідження, розробка математичних моделей; аналіз методів систем нечіткого виводу, розробка принципів оцінки ефективності баз знань нечітких регуляторів, проведення імітаційного моделювання, обробка та аналіз результатів; [16, 18, 19, 22 – 29, 31] – постановка проблеми, аналіз та розробка принципів синтезу нейромережових систем управління, розробка та розрахунок математичних моделей об'єктів управління; проведення експериментів; аналіз отриманих результатів; [32 – 34] – постановка задач дослідження, побудова та оптимізація нечітких експертних систем, вибір оптимальної структури системи управління і проведення навчання нейронечітких мереж; проведення експериментів; аналіз отриманих результатів;

[35, 37] – постановка задач дослідження, проведення етапу ідентифікації, розрахунок значень коефіцієнтів математичної моделі, моделювання системи управління; [39, 40, 45] – постановка мети дослідження, інформаційний пошук, розробка структурних схем систем управління, аналіз методів адаптації систем нейромережевого управління; проведення моделювання, аналіз отриманих результатів; [49] – постановка мети дослідження, моделювання САУ; [51, 53, 55, 56, 58] – постановка мети і задач дослідження, розробка математичних моделей; навчання нейромережевого регулятора, моделювання нейромережевих систем управління, обробка та аналіз отриманих результатів.

**Апробація результатів роботи.** Основні положення і результати роботи доповідалися і обговорювалися на міжнародних і всеукраїнських науково-практичних конференціях: 15-й, 17-19 – й МНК «Автоматика» (м. Одеса, 2008; м. Харків, 2010; м. Львів, 2011; м. Київ, 2012; м. Миколаїв, 2013); 5-й МНПК «Настоящи изследвания – 2009», (м. София, Болгария); 2 – 3-й МНПК «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті», (MINTT, м. Херсон, 2010 – 2011, 2017 р.р.); 2-й МНТК «Компьютерные науки и технологии», м. Белгород, 2011 р.); 6-й МНТК «Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте» м. Коломна, 2011 р.); 15-й МК «Інформаційні інтелектуальні системи» м. Харків, 2011 р.); 8-й дистанційній МНПК «Системи підтримки прийняття рішень. Теорія та практика» м. Київ, 2012 р.); МНПІК «Advanced Information Systems and Technologies, AIST» (м. Суми, 2012 р.); 9 - 12-й Всеукраїнської НПК «Математичне моделювання та інформаційні технології» (м. Одеса, 2009 – 2015 р.), МНК «Прикладная математика, управление и информатика» (м. Белгород, 2012 р.), 20-м міжнародному конгресі двигунобудівників (м. Коблево, 2015 р.); MINTT-2017, (м. Херсон, ХДМА); IX – X МНТК «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика, (м. Одеса, НУ «ОМА», 2019 - 2020 р.).

**Публікації.** Результати дисертаційного дослідження викладено в 61 публікації, в тому числі: 35 статей в журналах і збірниках Переліку наукових фахових видань України; 7 статей видано в міжнародних журналах; публікації входять в зарубіжні наукометричні бази: Scopus (5 статей), РИНЦ, Index Copernicus, Google Scholar і то що.; 19 – тези в збірниках праць міжнародних і всеукраїнських конференцій. Всі основні наукові результати, що виносяться на захист, опубліковано.

**Структура та обсяг дисертації:** Дисертація складається з анотацій, переліку умовних скорочень, вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг роботи становить 379 сторінок, де крім основного тексту 316 сторінок, містяться 33 таблиці і 184 рисунок. Список використаних джерел містить 236 найменувань.



## РОЗДІЛ 1. СТАН РОЗВИТКУ ТА ПРОБЛЕМИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ СПЕУ

### 1.1. Стадії розробки систем управління СПУ

Суднова парогенеретична установка - комплекс технічних засобів, призначених для отримання пара і використання його теплової енергії для забезпечення виробничої діяльності судна і створення нормальних умов населеності екіпажу [3]. СПУ незалежно від призначення судна і типу застосовуваного головного двигуна повинна безперервно виконувати функцію енергогенерування для постачання теплової енергії судових споживачів як в морі, так і на стоянці в порту. Практично всі судна обладнуються допоміжними парогенеруючими установками, що працюють на рідкому чи газоподібному паливі, утилізаційними котлами, що використовують енергію випускних газів головного двигуна, і комбінованими котлами. А значна кількість споживачів пара агрегатів СЕУ і допоміжних судових систем, дозволяє вважати, що на морських судах будуть і надалі використовуватися СПУ.

Найбільш важливими елементами, які визначають ефективність судового енергоблоку в цілому, є два об'єкти управління - парогенеруюча установка (котел) і парова турбіна (рис. 1.1). При цьому ключовим елементом, що забезпечує стабільну роботу СПТУ та інших парових споживачів судна, є суднова парогенеруюча установка.

Процес розробки судових САУ СПУ починається з визначення можливої економічної та виробничої ефективності від впровадження та експлуатації на судні протягом основних стадій життєвого циклу. Основні показники життєвого циклу судової системи управління парогенеруючими об'єктами СЕУ можна класифікувати як три ключові стадії або технології (рис. 1.2). Перші дві технології припадають на розробку, а третя охоплює етап пост-розробки САУ.

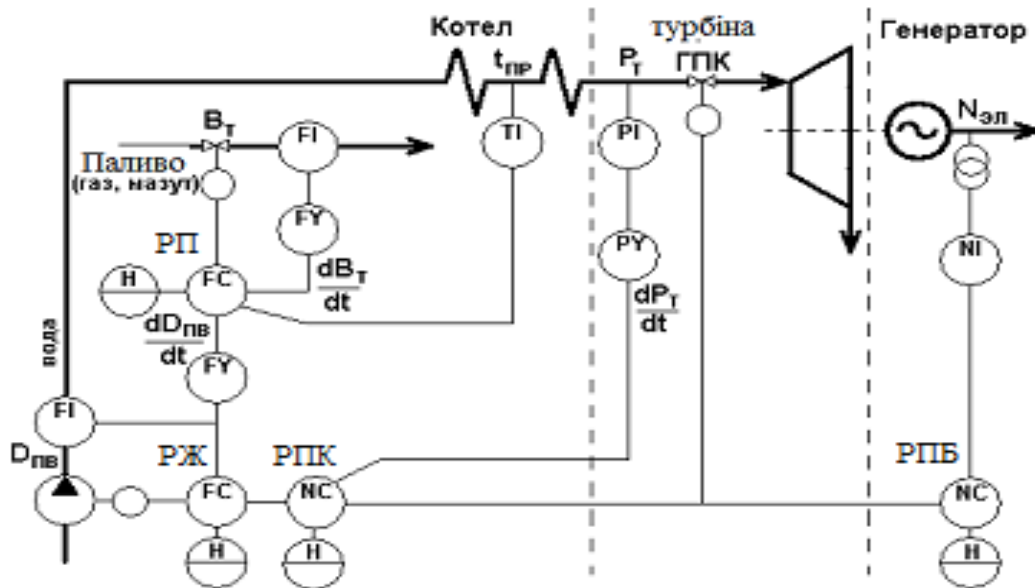


Рис.1.1. Схема управління суднового енергоблоку:

ГПК – головний паровой клапан; РПБ – регулятор потужності СПТУ; РПК – регулятор потужності котла; РЖ – регулятор живильної води; РП – регулятор палива котла; FC – регулятор витрати; Н – задатчик; NC – регулятор потужності; PY – диференціатор тиску пара;  $P_T$  – тиск пару;  $D_{пв}$  – витрата води; TI – приклад температури пару; FI – прилад витрати палива; NI – прилад потужності генератору; FY – диференціатор витрати палива

Технологія життєвого циклу САУ починається зі створення нової системи управління або модифікації вже наявної. Етапи концептуальної розробки включають в себе проведення аналізу факторів і параметрів, що визначають ефективність роботи САУ СПУ. При цьому здійснюється діалог між замовниками і розробниками, в якому визначається вибір ефективної концепції проектування суднової системи управління об'єктами СПУ, визначаються функціональні характеристики і вимоги, що пред'являються до САУ об'єктів СПУ, складається план подальших етапів проектування, моделювання, реалізації, тестування, настройки, впровадження, налагодження та експлуатації системи управління в реальних умовах роботи СПУ і подальшої реалізації на

судні [8, 18, 24, 25]. Створений проект повинен відповідати вимогам продуктивності, надійності, ремонтпридатності, економічності, безпеки і відповідати положенням Міжнародної конвенції з охорони людського життя на морі (СОЛАС), Міжнародної конвенції по запобіганню забруднення з суден (МАРПОЛ) [20, 34, 65, 128 – 131].

Слід зазначити, що методологія створення судової системи управління (рис.1.2), її стадії і етапи багато в чому схожі з методологією розробки промислових систем управління [17, 37, 56, 132].

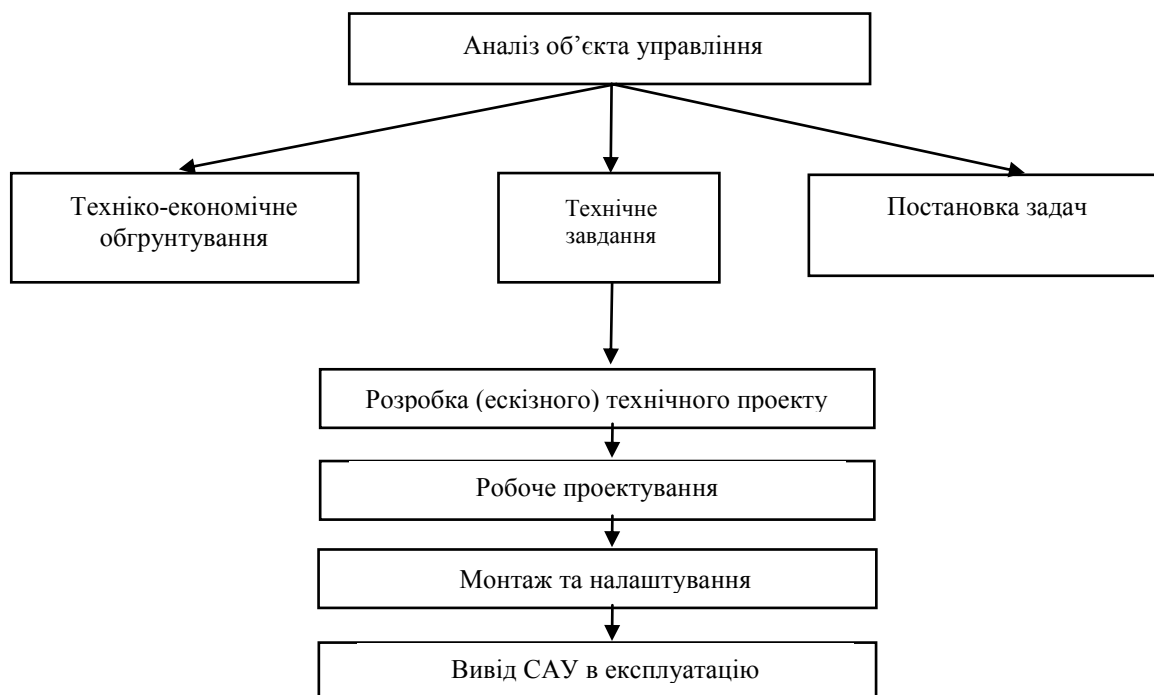


Рис. 1.2. Основні етапи методології розробці САУ СПУ

Разом з тим слід зазначити і ряд специфічних особливостей, які необхідно враховувати при їх розробці та подальшій експлуатації: – САУ пароенергетичними установками функціонують в складних експлуатаційних умовах при частому впливі несприятливих внутрішніх і зовнішніх чинників; так на парове навантаження впливають задана швидкість судна і режими СЕУ,

загрузка судна, течія і опір руху судна, навігаційна обстановка, погодні умови, в тому числі хвилювання моря:

- контури систем регулювання суднових парових котлів повинні володіти значною швидкодією з метою встановлення заданого парового навантаження. Згідно з нормативними вимогами [31, 128, 130] в перехідних режимах система автоматичного регулювання повинна забезпечувати підтримку регульованих величин з наступними відхиленнями – «... падіння тиску пару не повинно перевищувати 10 % номінального значення при зміні навантаження котла від мінімального до максимального за період не менше 60 с (без автонастроювання параметрів регулятора тиску пара) і за період не менше 150 с (з автонастроюванням параметрів регулятора). Тривалість перехідного режиму в САУ процесу горіння не повинна перевищувати 60 – 90 с, в залежності від парової продуктивності і призначення судового парового котла; автоматична система управління параметрами судового парогенератора повинна забезпечувати його ефективну роботу як в усталеному, так і в перехідному режимі в широкому діапазоні навантажень від 10 до 100 %, залежно від

- при розробці САУ СПУ пред'являються особливі вимоги до фахівців-розробників. До складу розробників повинен входити фахівець з досвідом експлуатації систем дистанційного управління СПУ, тому що згідно [129, с. 78] «... повинна бути забезпечена можливість дистанційного відключення топкових пристроїв і закриття заслінок утилізаційних котлів, що не допускають роботи». Система управління СПУ включає в свій склад ряд підсистем, які забезпечують функціонування системи управління в цілому.

До недоліків чинної методології проектування [124, 153] САУ СПУ можна віднести:

- пряму залежність ефективності роботи систем управління СПУ від використовуваних алгоритмів управління на стадії проектування, які не дозволяють враховувати складність і різноманіття можливих факторів, що

збурюють, які впливають на роботу СПУ;

- вплив на ефективність роботи СПУ методики процесу налагодження САУ і безпомилкових дій фахівців - наладчиків при ходових і швартових випробувань судна;

- залежність часу безвідмовної роботи агрегатів СПУ від термінів профілактичного обслуговування та ремонту, які не завжди відповідають необхідному в силу бажання компанії мінімізувати витрати на простій обладнання. Як правило, обслуговуючий персонал СПУ не має прав і повноважень на ремонт і оптимальну настройку сертифікованого обладнання засобів автоматики СПУ, які перебувають на гарантійному і після гарантійному обслуговуванні.

Таким чином, можна підсумувати, що і через зазначених вище обмежень, засоби автоматизації часто експлуатуються неефективно, що в свою чергу, як правило, призводить до зменшення надійності і довговічності роботи обладнання СПУ [15, 23, 34, 123], до перевитрати палива [50], підвищення рівня забруднення атмосфери тощо [14, 114].

## 1.2. Аналіз проблем і завдань, що виникають при проектуванні, налагодженні та експлуатації САУ СПУ

Відомо, що суднові парові котли як об'єкти управління відрізняються широким різноманіттям за своїми конструктивними характеристиками і режимними параметрами, працюють в мінливих умовах навігаційної обстановки і зміни режимів роботи. Навантаження суднових парових котлів має особливості для кожного з режимів роботи СЕУ (ходовий, маневровий, стоянковий з вантажними операціями, стоянковий, аварійний) і від призначення судна. Величини навантажень СПУ залежать від типу судна, потужності і типу

енергетичної установки, вомісткості, призначення і району плавання судна. Досвід експлуатації показує, що характер змін навантажень СПУ відноситься до категорії випадкових процесів [77, 80].

Парове навантаження СПУ в тривалих експлуатаційних режимах (стоянка с вантажними операціями, ходовий) знаходиться в межах 10 – 90 % від номінальної, а в режимах (швартування, аварійний режим, зйомка з якоря) може бути зменшене до 20 – 40 % від номінального. Також, на парове навантаження СПУ впливає характер протікаючих технологічних процесів на судне, інтенсивність роботи силової установки, швидкість судна, район плавання та пора року тощо

Відповідно, з урахуванням вищевикладеного, задача по розробці систем управління для парогенератору СЕУ як об'єкту управління є складною і трудомісткою.

Аналіз загального балансу споживання пару на суховантажному судні льодового плавання [3] наданий в табл. 1.1., дозволяють стверджувати, що пора року значно впливає на витрату пару на судні. Основними споживачами пару в зимовий період, при відсутності ПТУ, є теплообмінні апарати, спеціальні і господарсько-побутові споживачі, коефіцієнти одночасності роботи яких близькі 1,0. Таким чином, в зимовий період більша частина СПУ працює на максимальному паровому навантаженні.

Великий коефіцієнт завантаження притаманний також для КПК на судах з ПГТУ на ходовому режимі роботи. Також в схемах, де ДПК генерує пар більш високого тиску, ніж потрібно споживачеві, а між ДПК і споживачами встановлена турбіна, яка приводить в дію генератор і сепаратор пару. К.К.Д. паросилової установки досягає більш 80 %. Така комбінована паросилова установка ефективна на судах з великими споживачами пару на стоянках (рибопромислові бази, судна льодового плавання, пасажирські судна).

Конструкція СПУ залежить від споживачів теплової енергії пару (або іншого органічного теплоносія), тому що ці споживачі визначають поточну паропродуктивність і навантаження котельної установки. Склад споживачів пару (рис. 1.4), їх конструктивні особливості та техніко-економічні характеристики залежать від призначення і району плавання судна, типу і потужності головного двигуна і інших чинників [6].

Для підтримки режиму роботи СПУ, крім оптимального регулювання процесу горіння, велике значення мають система розподілу і регулювання параметрів пару. Підтримка робочого рівня води забезпечує надійність роботи котла і відповідну якість пару. При штормовій погоді рівень води зазвичай підтримують трохи вище нормального, щоб не оголити поверхню нагріву і не зірвати роботу опускних труб СПУ.

Таблиця 1.1

Загальний баланс споживання пару на суховантажному судні

| Пора року | Режим роботи                             | Витрата пару<br>кг/год | Відносне<br>споживання<br>пару, % |
|-----------|------------------------------------------|------------------------|-----------------------------------|
| Зима      | ходовий                                  | 8000                   | 100                               |
|           | стоянковий з<br>вантажними<br>операціями | 5200                   | 65                                |
| Літо      | ходовий                                  | 1500                   | 19                                |
|           | стоянковий з<br>вантажними<br>операціями | 600                    | 8                                 |

Слід зазначити, що при штормових погодних умовах і відповідно, високому рівні води в барабані, може статися закид води в пароперегрівач або турбіну.

По даним [199] СПТУ великої потужності, а отже і обслуговуючі їх СПУ (рис. 1.5) з високими показниками температури пару і тиску використовуються

на наступних судах (рис. 1.6). Можна відмітити, що використання таких параметрів висувають вимоги по підвищеній надійності і швидкодії САУ.

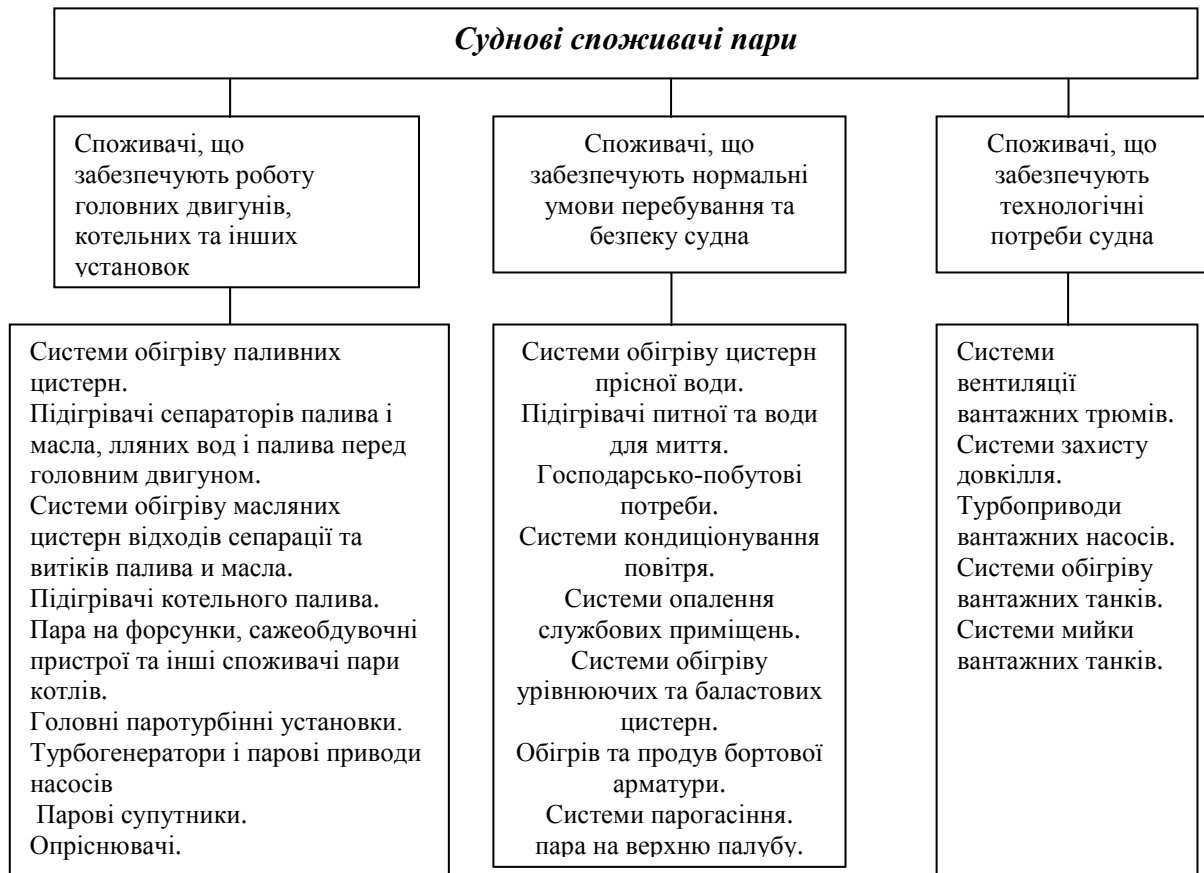


Рис. 1.3. Суднові споживачі пару СПУ

Нормативні вимоги до екологічних показників агрегатів СЕУ призводять до пошуку альтернативних і економічних джерел енергії, а саме до пошуку нових технологічних рішень, ефективність реалізації яких також залежить від САУ. Таким чином, впровадження суднових парових турбін з високою потужністю висуває нові вимоги до надійності, економічності, екологічності, а головне до маневреності роботи СПУ.



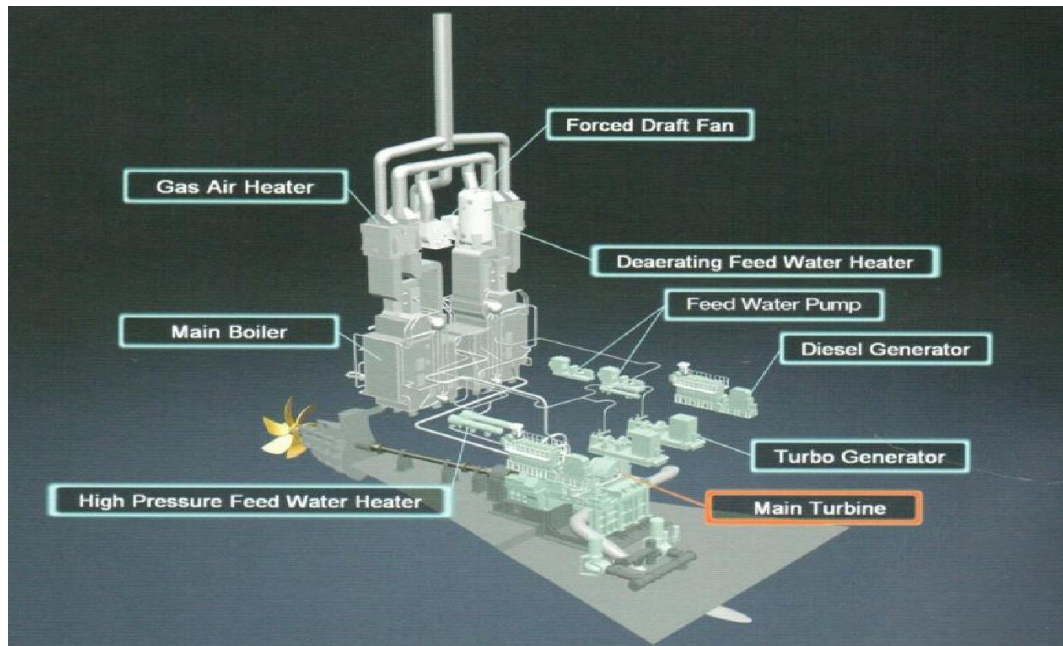


Рис. 1.5. Компонування 3D розташування суднової пароенергетичої установки, запропоноване компанією Kawasaki URA Marine Steam Turbine [201]

| Marine Steam Turbine Applications |             |              |                |
|-----------------------------------|-------------|--------------|----------------|
| Name                              | Type        | Size (LxBxD) | Power (kW)     |
| US Enterprise                     | War Ship    | 342x78x12    | 210,000        |
| Knock Nevis                       | Tanker      | 458x68x29    | 38,000         |
| Simaisma                          | Tanker      | 285x43x11x25 | 28,000         |
| Energy Frontier                   | Gas Carrier | 280x49x11x23 | 29,400         |
| Inigo Tapias                      | Tanker      | 284x43x11x25 | 28,000         |
| Disha                             | Gas Carrier | 277x43x11x26 | 26,500         |
| Excalibur                         | Gas Carrier | 268x43x12x26 | 26,500         |
| Excel                             | Gas Carrier | 260x43x12x26 | 26,500         |
| Radiance of the Seas              | Cruise Ship | 293x32x9     | 59,000 Combine |
| Brilliance of the Seas            | Cruise Ship | 293x32x9     | 59,000 Combine |

Рис. 1.6. Назва і характеристики суден з СПТУ високої потужності [199]

Аналіз [6, 15, 56] та експериментальних даних параметрів СПУ, отриманих на танкері «Minerva Roxanne», дозволяє зробити висновок, що СПУ як об'єкти управління характеризуються наявністю великої кількості факторів, що впливають на ефективність їх роботи. А значні по амплітуді і часу відхилення регульованих величин від заданого значення, не тільки погіршують економічні показники обладнання, а й підвищують ймовірність його пошкодження.

Так підвищення температури перегріву пари вище заданого значення може привести до пошкодження труб пароперегрівача. В цьому випадку ефективність роботи САУ температури пару впливає на довговічність роботи (строк служби) пароперегрівача і турбіни. Короткочасні, але значні відхилення, так звані «викиди» регульованої величини, також можуть привести до пошкодження основного обладнання. Наприклад, переживлення барабанного парового котла водою може стати причиною занедбаності води в паропроводі і пошкодження турбіни [57]. Отже, працездатність САУ тісно пов'язана з надійністю роботи основного устаткування СПУ.

Проблема захисту повітряного басейну стоїть дуже гостро. Неорганічні і органічні сполуки, що входять до складу відпрацьованих газів транспортних засобів, в тому числі і в суднових енергетичних установках, надають комплексний шкідливий вплив на навколишнє середовище. До найбільш небезпечних речовин можна віднести викиди оксидів азоту ( $\text{NO}_x$ ). Токсичність  $\text{NO}_x$  перевищує токсичність більшості інших шкідливих компонентів, тому проблема зниження викидів оксидів азоту в атмосферу має важливе значення в справі охорони навколишнього середовища [50]. Боротьба з викидами  $\text{NO}_x$  ускладнюється тим, що їх максимальна поява відповідає режиму найбільш ефективного згоряння палива, тому методи скорочення викидів  $\text{NO}_x$  не повинні призводити до зниження інтенсивності робочих процесів агрегатів СЕУ.

В даний час діє цілий ряд підходів щодо зменшення концентрації  $\text{NO}_x$  в димових газах обладнання СЕУ: первинні методи, які полягають в придушенні виникнення  $\text{NO}_x$  в топках котлів або камерах згоряння дизелів і вторинні методи зниження викидів  $\text{NO}_x$ , які полягають в обробці димових газів після СПУ [114]. Роботи більшості вчених спрямовані на зниження викидів оксидів азоту методами селективного каталітичного і некаталітичного відновлення оксидів азоту [167]. Зазначені методи хоча і забезпечують високу ступінь очищення димових газів, але при цьому пов'язані зі значними фінансовими витратами і

засновані на використанні небезпечних хімічних реагентів. Також за даними [50] скрубери встановлені на більш ніж на 1 % від загального числа судів, і галузеві аналітики пророкують, що до 2020 року їх число навряд чи перевищує 10 – 20 %. Тому проблема розробки і впровадження на суднах нових, економічно відносно недорогих та екологічно ефективних технологій очищення відпрацьованих газів СПУ від оксидів азоту і сірки, в тому числі за допомогою сучасних засобів автоматизації, в зв'язку зі строгими вимогами Додатка VI МАРПОЛ є актуальною.

Дослідженнями [149] встановлено, що зміст  $\text{SO}_3$  у вихідних газах знижується при спалюванні мазуту з малими надлишками повітря в топці. Особливо різке зниження вмісту  $\text{SO}_3$  і температури точки роси димових газів відбувається при спалюванні мазуту з надлишком повітря, близьким до стехіометричної (0,01 ... 0,015). Однак існуючі в даний час методи вимірювання і системи автоматизації, а також наявність присосів в котельній камері не дозволяють впровадити в експлуатацію такі низькі надлишки повітря. Більш реальним завданням є впровадження режиму спалювання мазуту з коефіцієнтом надлишку повітря на виході з топки 1,02 – 1,03. Досвід передових парових котельних установок показує, що перехід на роботу до зазначеного коефіцієнтом надлишку повітря в поєднанні з іншими антикорозійними заходами дозволив збільшити, наприклад, термін служби трубопроводів парогенератора в 2 рази [4].

Спалювання мазуту з малими надлишками повітря знижує шкідливі викиди оксидів азоту в атмосферу на 10 – 30 % і підвищує економічність роботи суднового парового котла. Однак робота з малими надлишками повітря вимагає досить високого рівня методів адаптації САУ процесу горіння, хорошого стану обладнання, наявності та справності приладів контролю і системи автоматики. Перехід на спалювання мазуту з малим коефіцієнтом надлишку повітря на виході з топки ( $\alpha = 1,03$ ) може бути здійснений тільки за умови виконання ряду вимог до обладнання, головним з яких є щільність топкової камери і надійність

датчиків контролю факела горілки і кольору димових газів. Підвищені присоси повітря, що не бере участі в горінні, не дозволяють забезпечити повне згорання мазуту при малих значеннях  $\alpha$ . А неефективна робота засобів контролю може привести до аварійної ситуації. Діапазон навантажень, при яких допускається робота з малими надлишками повітря за умовами повного вигорання палива, перевіряється спеціальними випробуваннями. Якщо випробування виявлять, що при зниженні навантаження СПУ нижче певного рівня режим роботи з малими значеннями  $\alpha$  призводить до хімічної і механічної неповноти згорання палива, необхідно при знижених навантаженнях переходити на роботу з більш високим надлишком повітря в топці, про що повинно бути зазначено в режимній карті суднового парогенератора.

Слід зазначити, що недотримання перелічених вище вимог при спалюванні мазуту з малими надлишками повітря може привести до збільшення втрат від хімічної і механічної неповноти згорання палива, відкладень на поверхні нагрівання сажі, яка може спалахнути і викликати значні пошкодження обладнання. Крім того, викид частинок сажі забруднює повітряний басейн [7, 126].

Частка вимушених зупинок через відмову поверхонь нагріву становить 37 – 45 % від загального числа відмов об'єктів СЕУ. Основна причина відмов полягає в вичерпанні запасу тривалої міцності металу. Перевищення розрахункової температури всього на 10 °С знижує довговічність металу в 1,7 – 2,5 рази. Більше 60 % пошкоджень зосереджені в пароперегрівальному тракті. Перегрів і коливання температури металу прискорюють мікроструктурні зміни, окислення, процеси повзучості і викликають розтріскування захисної оксидної плівки (окалини) [4, 48]. Підтримання заданого температурного режиму САУ СПУ є важливим фактором його безвідмовної роботи і довговічності металу водяних труб і труб пароперегрівачів.

Таким чином, аналіз вищевикладених факторів дозволяє зробити висновок, що показники економічності, надійності, безпеки, екологічності СПУ тісно пов'язані з ефективністю роботи локальних САУ параметрів СПУ. Згідно з правилами технічної експлуатації (ПТЕ) суднового електрообладнання і автоматики [128, с. 115]: «... Величина уставок спрацьовування і тимчасових затримок засобів автоматизації об'єктів повинна контролюватися механіками по завідуванням. При виявленні виходу контрольованих або регульованих параметрів, тимчасових затримок, уставок спрацьовування тощо за межі встановлених інструкціями або експлуатаційних значень необхідно в якомога коротший термін виконати настройку і регулювання засобів автоматизації, здійснювану старшим електромеханіком спільно з механіком по завідуванню або спеціалізованої берегової організацією на межі, узгоджені зі старшим механіком ...». При цьому рекомендована періодичність проведення режимно-налагоджувальних випробувань суднового котельного обладнання – 1 раз в 3 роки.

Відповідно до загальноприйнятої методики налагодження типових регуляторів і систем управління СПУ [142,153], процес налагодження САУ проводиться в два етапи. На першому етапі налагодження суднових регуляторів полягає в перевірці їх працездатності на експериментальному стенді на заводі-виробнику при відсутності об'єкта управління. У разі виявлення значних відхилень, коригуються параметри настройки регулятора САУ. На другому етапі, налагодження розробленої САУ виконується на судні в період швартових та ходових випробувань. На цьому етапі виконується серія активних експериментів на судновому парогенераторі з метою отримання кривих розгону і їх подальшої графічної обробки.

Так, згідно із зазначеною методикою САУ процесу горіння в топці СПУ повинна забезпечити підтримку оптимального співвідношення паливо-повітря на всіх статичних режимах, і бездомність роботи котла при маневруванні. Якщо

регулятор тиску повітря не оснащений адаптивним алгоритмом роботи, задатчик регулятора коригується залежно від режиму роботи парогенератора. Дослідними випробуваннями САУ систем горіння в топках СПУ встановлено, що  $\alpha$  виявляється на всіх режимах, як правило, вище оптимального [153], що вимагає проведення корекції настроюваних параметрів регулятора. Згідно з рекомендаціями методики налагодження САУ парогенераторів СЕУ, настройка регулятора тиску повітря в суднових умовах повинна проводитися періодично в зв'язку зі змінами в процесі експлуатації характеристик форсунки, сорту палива, температури повітря, опору газоходів тощо. Так, відповідно до рекомендацій з налагодження [153, с. 136]: «... якщо розпилюючі отвори форсунки котла розробились і витрата палива збільшується, то оператору слід підняти у всіх точках експериментальну криву розгону співвідношення «тиск повітря - кут повороту повітряної заслінки» ...». Або «якщо зовнішнє повітря холодне (в зимових умовах», то при витрачанні повітря в тих же обсягах його буде більше за вагою і коефіцієнт надлишку повітря збільшиться – в цьому випадку необхідно побудувати нову криву розгону і т.д».

Таким чином, можна прийти до висновку, що за відсутності адаптивних систем оптимізації параметрів типових регуляторів, ефективність роботи САУ об'єктами СПУ багато в чому визначається кваліфікацією і досвідом операторів агрегатів СЕУ. У тих випадках, коли оператори виявляються недостатньо компетентними або не мають часу на проведення налагоджувальних робіт, ефективність роботи парогенеруючих об'єктів СЕУ за критеріями витрати палива і вмістом шкідливих викидів в атмосферу неминуче виявляється не оптимальною.

При експлуатації великих і складних інтерактивних систем СЕУ помилка оператора може стати причиною виходу їх з ладу і виникнення великих аварій. За даними ІМО і Лондонського клубу взаємного страхування, аварії на судах через людські помилки складають не менше 70 - 75 %, при цьому значний

сегмент з цієї цифри є технічні причини, що викликані неналежним технічним обслуговуванням і експлуатацією агрегатів СЕУ в тому числі і СПУ [19].

Безпомилковість дій оператора залежить від багатьох факторів:

- дефіцит часу на прийняття рішень (частота здійснення помилок при обробці інформації є логарифмічною функцією швидкості надходження інформації);
- перевантаження інформацією (кількість помилок зростає при перевантаженні, зокрема, при збільшенні числа джерел інформації від засобів вимірювань об'єктів СЕУ);
- ступенем кваліфікації оператора СЕУ;
- схильність людини-оператора до «сенсорного голоду» (збільшення частоти помилок при тривалому виконанні монотонної роботи).

З урахуванням тенденції до підвищення рівня автоматизації на судах, що приводить до скорочення членів екіпажу судна, можна відзначити, що кількість інформаційного та психологічного навантаження на операторів буде збільшуватися, тобто рівень виникнення аварійних ситуацій на складних судових об'єктах, які пов'язані з «людським фактором», буде зростати.

Основними показниками надійності СПУ є безвідмовність, довговічність, ремонтпридатність, збереженість [34]. Надійність забезпечується на етапах проектування, виготовлення, експлуатації та ремонту. Помилки, допущені на будь-якому з них, призводять до матеріальних втрат, зростання трудовитрат і часу простою обладнання, а також зводять до максимуму витрати на всіх інших етапах. СПУ з високою потенційною надійністю можуть бути швидко приведені в повну непридатність, якщо не будуть дотримуватися режимів роботи, що задано проектом, і експлуатація здійснюватиметься малокваліфікованим персоналом.

У період нормальної експлуатації СПУ відмови, як правило, відбуваються в основному з вини експлуатаційного персоналу, внаслідок низької якості ремонту, через недоліки конструкції або неефективності засобів автоматики.

Заводські пошкодження та дефекти зустрічаються рідко. Конструктивні недоліки найбільш характерні для сталевих водогрійних котлів, що спалюють мазут, з розвиненими конвективними поверхнями нагріву. В інтервал часу, тривалість якого залежить від багатьох факторів, відбувається накопичення пошкоджень під дією фізико-хімічних процесів. При великих напрацюваннях часу експлуатації СПУ накопичення пошкоджень приймає зростаючий нелінійний характер [34]. З цього моменту закінчується період нормальної експлуатації і починається період старіння, що обумовлено зростанням ймовірності відмов елементів СПУ.

Можна виділити три основні групи причин, що викликають збурення і впливають на елементи СПУ. Це, перш за все, умови, задані характеристиками судна: потужність СПУ, режими роботи парових агрегатів СЕУ тощо Друга група обумовлена станом елементів СПУ і ступенем близькості конкретних експлуатаційних режимів до розрахункових, а також проведеними в морі операціями технічного обслуговування; станом корпусу СПУ, зношеністю механізмів, які забезпечують роботу СПУ і зміною (погіршенням) ефективності їх роботи, ушкодженнями, засміченням трубопроводів води і палива, несправністю сепараторів палива, що регулюючих клапанів, форсунок пальників тощо Третю групу складають зовнішні умови, які впливають на процеси корозії елементів СПУ: температура повітря в машинному відділенні, вологість, хвильові коливання тощо

Так в процесі роботи елементи парового котла піддаються впливу агресивних середовищ - води, пара і димових газів. Розрізняють корозію хімічну і електрохімічну.

Хімічна корозія, викликана паром або водою, руйнує метал рівномірно по всій поверхні. Швидкість такої корозії в сучасних судових котлах низька. Більш небезпечна місцева хімічна корозія, що викликається агресивними



хімічними сполуками, що містяться у відкладеннях золи (сірки, оксидів ванадію і т. п.) [15, 68].

Найбільш поширеною і небезпечною є електрохімічна корозія, що протікає у водних розчинах електролітів при виникненні електричного струму, який викликано різницею потенціалів між окремими ділянками металу, що відрізняються хімічної неоднорідністю, температурою або якістю обробки живильної води. Киснева корозія, як різновид електрохімічної, спостерігається в таких частинах СПУ як економайзерах, арматурі, поживних і опускних трубах, пароводяних колекторах і колекторних пристроях (щитах, трубах, пароохолоджувачах тощо). Особливо сильно схильні до кисневої корозії змійовиків другого контуру двоконтурних котлів, утилізаційних котлів та парових підігрівачів повітря. У ДПК вона нерідко досягає 0,5 - 1 мм / рік, хоча в середньому лежить в межах 0,05 - 0,2 мм / рік [15]. Небезпечним різновидом кисневої корозії є стояночна корозія, що протікає в період відключення СПУ. В силу специфіки роботи все СПУ (а допоміжні особливо) схильні до інтенсивної стояночної корозії.

Встановлено, що метал, що піддався корозії під час зупинок, при інших рівних умовах більш інтенсивно руйнується при роботі СПУ [123]. Основною причиною виникнення стояночної корозії є потрапляння кисню в воду, якщо котел заповнений, або в плівку вологи на поверхні металу, якщо котел осушений. Велику роль при цьому відіграють хлориди і NaOH, що містяться у воді, і водорозчинні відкладення солей. Найбільш наочним прикладом, який ілюструє вплив цих процесів на корозійні пошкодження, є руйнування змійовиків утилізаційних котлів з примусовою циркуляцією [34].

Також інтенсивність ерозійно-корозійного процесу залежить від якості котлової води і режимних факторів, які залежать від ефективності САУ. Наприклад, за даними [68], при розтині ізоляції СПУ після 12 років експлуатації

в нижній частині топки виявлено в кількох місцях стоншення стінок на 20-40 % від початкової товщини загальною площею виразок більше 500 мм<sup>2</sup>.

Неефективна робота САУ процесів паливopідготовки може привести до активізації подшлямової корозії, обробки живильної води і продувки до підвищення кисневої і лужної, відсутність належного контролю вмісту кисню у вихідних газах і температури димових газів в САУ горіння палива приводить до підвищення температури вихідних газів і газової корозії. Також, вплив режимних факторів роботи СПУ і погодних умов (значна качка судна) провокують утворення кавітаційної ерозії тощо У контурі управління температурою перегрітої пари значні коливання температури від заданого значення, що викликані перерегулюванням, можуть привести до активізації хімічної корозії в паропроводі тощо

Згідно [26, 48] до зовнішніх впливів відносять різні вимірювання витрати пару з СПУ або підведення до нього робочого середовища, що обумовлено режимами роботи агрегатів СЕУ. А ключовим збурюючим впливом для головного СПУ є зміна витрати пару на СПТУ. Якість перехідного режиму в САУ головного СПУ виявляється гіршою при ступінчастому впливі, що збурює, спостерігається при швидкому скиданні навантаження СПТУ з повного до нульового. Підвищують навантаження турбін поступово, щоб уникнути появи температурних деформацій в корпусах турбін, тому зовнішнє збурення СПУ при цьому є функцією часу, яку можна вважати лінійною. Дані особливості також притаманні в ДПК, які працюють на СПТУ або ПГТУ. Також в умовах качки судна, СПУ піддається зовнішньому періодичному впливу внаслідок вимушеного переміщення паровпускового регулюючого клапана і відповідної зміни витрати пару [151]. Основні канали збурень, що впливають на ефективну експлуатацію СПУ представлені в табл. 1.2.

Згідно з нормативними методиками розробки та налагодження САУ [140, 154], розрахунок настроюваних параметрів регуляторів САУ об'єктів СПУ при їх

проектуванні та налаштування заснований на тому, що постійні рівняння динаміки об'єктів, отримані для номінального режиму, задаються заздалегідь.

Таблиця 1.2

## Ключові канали збурення, що впливають на СПУ

| Збурення     | Опис                                                                           | Проблеми на СПУ                                                                                            |
|--------------|--------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. Зовнішнє  | Зміна парового навантаження агрегатів СЕУ                                      | Ріст процесу нестійкості САУ, ймовірність виникнення аварійної ситуації                                    |
| 2. Внутрішнє | Зміна виду і марки палива                                                      | Поява сірчаної корозії, що приводить до руйнування труб. Зниження економічних і екологічних показників САУ |
| 3. Зовнішнє  | Вплив хвильових коливань                                                       | Поява автоколивальних режимів, зниження показників якості САУ                                              |
| 4. Внутрішнє | Зниження витрат живильної води внаслідок протікань в пристроях управління      | Зниження рівня в барабані, виникнення аварійної ситуації                                                   |
| 5. Внутрішнє | Помилки операторів при роботі в режимі дистанційного управління                | Виникнення аварійних ситуацій                                                                              |
| 6. Внутрішнє | Неоптимальна настройка САУ                                                     | Зниження ККД СПУ, збільшення шкідливих викидів в атмосферу                                                 |
| 7. Внутрішнє | Відмова засобів виміру і контролю                                              | Аварійна зупинка СПУ                                                                                       |
| 8. Внутрішнє | Помилки при виконанні планових робіт по обслуговуванню і ремонту елементів СПУ | Зниження показників надійності і економічності СПУ                                                         |

Разом з тим, отримати оптимальні параметри настройки суднових САУ розрахунковим шляхом важко через складність об'єктів управління і відсутності повних даних для розрахунку, неможливості проведення натурних експериментів на суднових парогенераторах при проектуванні та подальшої експлуатації в складних умовах роботи.

Дані фактори призводять до того, що подальше налагодження і експлуатація САУ об'єктів СПУ здійснюється не оптимально або недостатньо ефективно. Разом з тим, за даними [19, 20, 34] більше 85 % аварій на транспорті відбувається з вини операторів ергономічних систем управління. Основними причинами появи цього фактору є управлінська неузгодженість, недолік оперативних знань і неготовність оператора до екстремального управління.

Отже, при проведенні пуско-налагоджувальних робіт на нових або модернізованих САУ СПУ, дистанційному управлінні СПУ тощо допускається значна ймовірність помилкових дій налагоджувального і обслуговуючого персоналу на судні, що може привести до подальшої неефективної роботи обладнання СПУ в плані зниження надійності роботи системи управління, неоптимальному режиму роботи, який супроводжується перевитратою палива, збільшенням шкідливих викидів в атмосферу або аварійної зупинкою котла тощо

Перелік основних проблем, що виникають при розробці [31,40,44], налагодження [56,82,86] і експлуатації СПУ [35, 55,145], а також аналізу досвіду [57, 62, 124, 214, 235] представлений в табл. 1.3.

Таблиця 1.3

Основні причинно-наслідкові зв'язки, що призводять до взаємопов'язаних проблем при розробці, налагодження та експлуатації САУ СПУ

| № | Причини                                                                                                                                                                              | Наслідки                                                                                                                                                                       | Проблеми                                                 |
|---|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| 1 | 2                                                                                                                                                                                    | 3                                                                                                                                                                              | 4                                                        |
| 1 | Неврахування в САУ СПУ режимів роботи парових споживачів СЕУ                                                                                                                         | Відхилення контрольованих параметрів від оптимальних показників                                                                                                                | Зниження економічних і екологічних показників            |
| 2 | Неможливість обліку випадкових збурень, що впливають на зміни навантаження роботи СПУ в широких діапазонах                                                                           | Відхилення вмісту $O_2$ у вихідних газах від оптимального значення призводить, навіть при незначному зниженні ККД СПУ, до перевитрати палива                                   | Неефективність роботи САУ горіння палива в топках котлів |
| 3 | Використання лінійних математичних моделей систем СПУ закладених в алгоритми управління на стадії проектування                                                                       | Значні відхилення контрольованих параметрів, які перебувають в передаварійному діапазоні від заданих; тривалість і коливання перехідних процесів – перерегулювання більше 45 % | Зниження показників надійності СПУ                       |
| 4 | Неврахування в САУ СПУ впливу каналів зовнішніх і внутрішніх збурень (наприклад, у зв'язку з переходом з розпалювального палива на основне; утворенню корозії на трубопроводах тощо) | Зміна хімічного складу палива (змішання мазуту різних марок при заповненні паливних цистерн). Зниження теплопровідності трубопроводів СПУ                                      | Перевитрата палива при експлуатації СПУ                  |

Продовження таблиці 1.3

| 1 | 2                                                                                                                            | 3                                                                                                                                                                                                                           | 4                                                                                                                                                                           |
|---|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 5 | Недоліки інтелектуальних програмних засобів в системах проектування, моніторингу, управління об'єктів СПУ                    | Неефективність діючих методик розробки та експлуатації систем управління СПУ; відсутність методів і алгоритмів в САУ СПУ з можливим прогнозом і попередженням відхилень контрольованих параметрів від заданих значень тощо) | Збільшення часу простою обладнання при пуско-налагоджувальних роботах; збільшення вартості пуско-налагоджувальних робіт і трудозатрат; збільшення вартості проектних рішень |
| 6 | Відсутність широкого впровадження експертних систем і СППР в умовах дистанційного управління і налагодження устаткування СПУ | Неоптимальні параметри настройки регуляторів САУ СПУ; тривалість процесу налагодження САУ                                                                                                                                   | Аварійна зупинка СПУ                                                                                                                                                        |

### 1.3. Аналіз інноваційних розробок в області суднових систем управління агрегатами СЕУ

Значний обсяг наукових робіт в області розробки [1, 5, 13, 51] і впровадження інтелектуальних систем управління складними судновими об'єктами [21, 49, 84, 113, 179], а також з впровадження автономних суден [66, 74, 119, 186 - 188, 211] дозволяє зробити висновок, що перспективним науковим напрямком є дослідження синтезу інтелектуальних методів ідентифікації і адаптації [197, 209, 211, 213, 219, 220] в суднові системи управління. За принципами роботи алгоритмів управління, а також з урахуванням сучасних наукових тенденцій в САУ в найближчій перспективі пропонується наступна класифікація діючих і перспективних суднових САУ (рис. 1.7).

Слід зазначити, що система управління судновим парогенератором передбачає участь судового персоналу. Так, згідно з Правилами технічної експлуатації судових допоміжних парових котлів [128], персонал, обслуговуючий СПУ, повинен вміти «регулювати горіння і живлення котла для встановлення найбільш економічного режиму, своєчасно визначати і усувати в роботі котельної установки неполадки, що порушують топкове горіння, живлення, подачу повітря або інші процеси». Таким чином, ефективність процесів управління СПУ в ряді випадків може бути залежати від досвіду і знань оператора, що працює в дистанційному режимі управління.

Судновому оператору необхідно оперативно орієнтуватися в обстановці і кваліфіковано приймати рішення щодо вибору керуючих впливів з урахуванням усіх обмежень. І для вирішення прикладного завдання допомоги оператору СПУ з метою зниження помилкових дій, ряд вчених [9, 61, 92-94, 99, 115] пропонують створення систем підтримки прийняття рішень. СППР також можуть бути ефективним інструментом при налагодженні судових САУ і ручному управлінні обладнанням СПУ [91, 100, 101, 120, 198].

При проектуванні експертної системи, як ключового елементу СППР, розробники [9, 30, 125] пропонують використовувати апарат теорії нечітких множин і нечіткої логіки, який був розроблений Л. Заде в 1965 році [229]. До гідності нечітких систем можна віднести їхню здатність працювати з якісною інформацією, перетворюючи і обробляючи її в числовій формі. При цьому, в нечітких системах управління в порівнянні з лінійними САУ існує набагато більше можливостей врахувати нелінійну динаміку об'єкта управління, наприклад за допомогою нелінійних функцій належності.

До іншого перспективному напрямку в області розробки судових САУ можна віднести розвиток методів адаптації регуляторів. За останні роки були розроблені десятки методів настройки ПІ і ПІД-регуляторів для САУ тепловими об'єктами. Нові напрацювання засновані, як правило, на удосконаленні вже

відомих методів ідентифікації і адаптації, наприклад, Циглера (Ziegler) і Нікольса (Nichols) [231], на основі якого проф. О. Сигеру запропонував метод настройки ПІ і ПІД-регуляторів з дискретним часом [148].

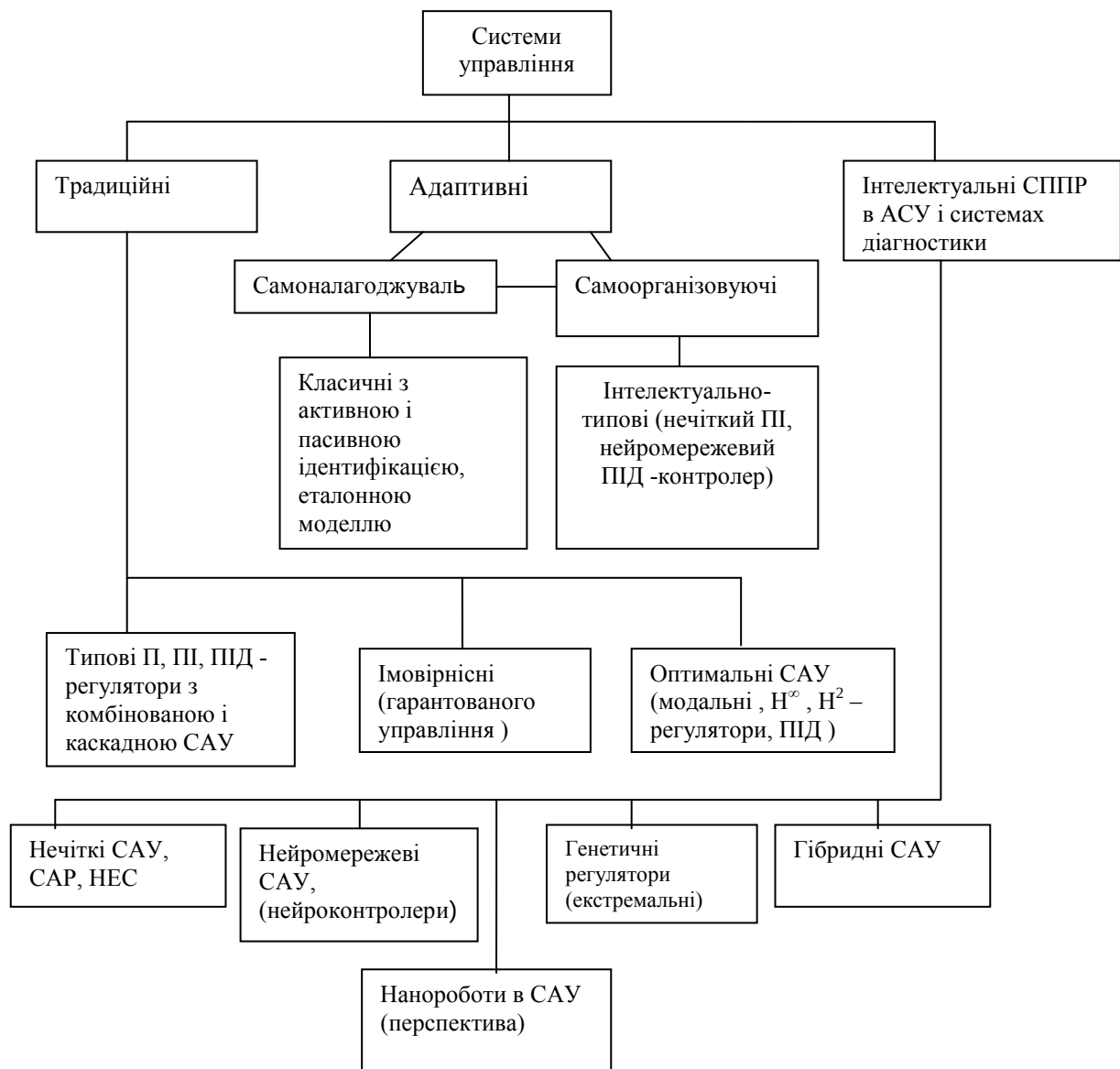


Рис. 1.7. Класифікація традиційних і перспективних суднових систем управління агрегатів СЕУ

У вітчизняній пароенергетиці успішно зарекомендували себе методи розробки і настройки САУ запропоновані проф. В.В. Солодовниковим [147],



А.П. Копеловічем [63], В.Я. Ротачем [139-142], А.С. Ключевим [56] та іншими вченими [33, 125, 134].

В роботах [43, 91, 96 – 98, 103, 144, 185] пропонуються продукційні моделі знань у вигляді правил щодо адаптації параметрів ПІД-регуляторів в процесі налагодження парогенеруючих САУ.

В теперішній час розробки ведуться в області створення систем управління судновими об'єктами, що реалізують принципи теорії нечіткої логіки та гібридних мереж і поєднують нейронний і нечіткий підхід з генетичними методами настройки параметрів САУ [79, 81, 83, 176]. Серед світових виробників суднових комп'ютерних САУ і АСУ можна виділити наступні провідні корпорації: ABB, Kongsberg, Side Marine, Marine and Industry, Siemens, НВО «Аврора» та ін., які застосовують інтегровані комп'ютерні додатки: (ISaGRAF, InControl, Paradym, TraceMode, Genesis і т.д) для побудови інтелектуальних систем управління усіма судновими системами [51 – 53], що вказує ефективність зазначеного напрямку. Разом з тим слід зазначити, що, незважаючи на розвиток інтелектуального наукового напрямку в концепціях проектування суднових САУ, все ще залишаються актуальними завдання в області розробки [5, 27, 64, 172] і адаптації нечітких регуляторів або контролерів [73, 104, 107, 215], які дозволяють підвищити ефективність САУ СПУ.

Через недоліки традиційних суднових САУ, для підвищення їх ефективності при роботі в специфічних умовах, стає актуальним використання симбіозу традиційних і нових інтелектуальних технологій на основі апарату нейронних мереж або нейро-нечітких мереж, які успішно зарекомендували себе при роботі з нелінійними системами [81, 97, 106 -109, 213, 230].

Слід зазначити, що принцип роботи інтелектуальних суднових систем управління визначається всіма компаніями як секрет виробника "know-how", а відкриті дані про більшість з них представляють собою лише рекламні проспекти. Можна відзначити, що в умовах швидкого розвитку інноваційних

технологій і значною «жорсткої» конкуренції між суднобудівними компаніями за лідерство на перспективному ринку найближчого майбутнього – автономних роботизованих суден, в судових системах управління все ширше пропонується до використовуватися апарат штучних нейронних мереж.

Основні механізми роботи ряду нейромережевих методів нейроуправління і відмінні риси їх реалізації представлені в [12, 36, 42, 146, 148, 169].

З розвитком інноваційних інтелектуальних технологій, можна відзначити ряд публікацій, що аналізують ефективність використання нейромережевих систем управління в процесах регулювання температури перегрітого пару і рівня води в СПУ [102, 106, 202, 209, 210].

Аналіз умов експлуатації СПУ [3, 34, 123], а також досліджень [1, 49, 105, 196, 202] дозволяє прийти до висновку, що архітектура систем інтелектуального управління об'єктами СПУ для їх ефективного функціонування має низку наступних відмітних властивостей від традиційних САУ:

- здатністю до навчання і самонавчання;
- гнучкістю і живучістю;
- зрозумілим алгоритмом управління і «дружнім до користувача» людино-машинним інтерфейсом;
- здатністю до включення нових компонентів (модернізації), що забезпечують найкращі рішення в умовах обмежень, що накладаються технічними засобами і процесами, без участі людини;
- здатністю до самотестування і функціонувати автоматично резервних елементів при відмовах;
- здатністю до видачі оптимальних рекомендацій, особі що приймає рішення, в умовах обмеженості часу;
- здатністю по оптимізації нелінійних систем;
- безпекою для людини.

Таким чином, висувається *гіпотеза* – забезпечення ефективних екологічних і енергетичних показників роботи суднових пароенергетичних установок може бути досягнуто за допомогою використання нової концепції розробки високоефективних САУ.

#### 1.4. Обґрунтування мети і постановка завдань дослідження

В роботі відомого вченого в галузі теорії управління нелінійними системами проф. І.І Кринецького [60, с. 184], присвяченій основам наукового дослідження, стверджувалося «... для того, щоб визначити тему і напрям наукових досліджень, необхідно використовувати наукові прогнози - передбачення ...». Дана рекомендація по вибору наукового напрямку підтверджується доцільністю використання апарату теорії штучного інтелекту для вирішення науково-прикладних задач в області розробки і ефективної експлуатації САУ СПУ.

Слід зазначити, що сукупність зазначених проблем і протиріч в області розробки, налагодження та експлуатації САУ СПУ (див. табл. 1.2); посилюють вимоги щодо вмісту шкідливих викидів; наявність вимог в плані енергоефективності судна; зростання рівня конкуренції між суднобудівними компаніями в області проектування суден з інтелектуальними системами тощо висувають нові актуальні прикладні задачі, рішення яких можливо шляхом створення нової концепції розробки САУ об'єктів СПУ.

**Мета і задачі дослідження.** *Мета* – рішення наукової проблеми забезпечення ефективних екологічних і енергетичних показників роботи суднових високоавтоматизованих пароенергетичних установок (СПУ) на усталених і перехідних режимах роботи за урахуванням міжнародних конвенцій

за допомогою впровадження нової концепції розробки систем управління в основні етапи життєвого циклу судових парогенеруючих установок.

Для досягнення поставленої цілі необхідно вирішити наступні задачі:

### **Головна задача**

1. На основі розроблених взаємопов'язаних моделей, методів та методології запропонувати нову концепцію створення судових систем управління, яка дозволить забезпечити ефективні екологічні і енергетичні показники роботи СПУ на усталених і перехідних режимах та підвищити надійність елементів СПУ.

Для виконання головної задачі необхідно вирішити наступні *допоміжні задачі*:

2. Провести аналіз проблем і протиріч, що виникають при розробці САУ СПУ і експлуатації СПУ, функціонуючих в сталих і перехідних режимах.

3. Провести ідентифікацію термодинамічних і гідродинамічних процесів, що протікають в СПУ і одержати нові аналітичні та експериментальні математичні моделі для дослідження методів підвищення ефективності використання паливних ресурсів і зниження вмісту шкідливих викидів в атмосферу.

4. Розробити експертний критерій оцінки якості процесів регулювання параметрів СПУ при проведенні пусконаладжувальних робіт і експлуатації СПУ для забезпечення зниження помилкових дій оператора та підтримання заданих експлуатаційних характеристик.

5. Обґрунтувати доцільність використання нечітких методів та алгоритмів в процесах наладки і адаптації САУ і створити метод розробки нечіткої експертної системи для адаптації СПУ до умов експлуатації.

6. Розробити методологію адаптації САУ температури перегріву пару в СПУ, яка забезпечує досягнення заданих критеріїв, в умовах впливу зовнішніх і внутрішніх збурень, що підвищить показники надійності роботи елементів СПУ

і забезпечує підтримання заданого теплового режиму СПУ на всьому діапазоні парової навантаження агрегатів СЕУ.

7. Створити методи розробки САУ процесу горіння рідкого палива в СПУ, які забезпечують зниження шкідливих викидів в атмосферу і підтримку високого ККД на ustalених режимах роботи СПУ.

8. Удосконалити проектні методи і методики ідентифікації, адаптації і оптимізації параметрів регуляторів по заданим критеріям в САУ, які забезпечують підтримку теплового режиму СПУ в умовах впливу збурень і адаптацію СПУ до умов експлуатації. Провести аналіз ефективності запропонованих наукових результатів і положень.

Структурна схема технологічної карти наукового дослідження, яка включає об'єкт і предмет дослідження, а також мету і основні завдання представлена в додатку В.

### 1.5. Висновки до розділу

1. Встановлено, що в даний час ефективна експлуатація СПУ залежить від обраних проектних рішень в області систем управління, реалізація яких часто визначається методами і методиками, що не враховують нових досягнень в області теорії штучного інтелекту, що призводить до зниження економічних і екологічних показників роботи СПУ, зниження надійності СПУ, що викликано помилками операторів і збільшення витрат на процеси експлуатації СПУ.

Таким чином, виникає проблема створення нової концепції, яка дозволяє розробляти високоефективні САУ які забезпечують підтримку енергетичних і екологічних показників роботи СПУ.

3. Виявлено та систематизовано три основні групи причин, що викликають збурення і впливають на елементи СПУ:

- задані характеристиками судна: проведені в морі операції технічного обслуговування СПУ; потужність СПУ; режими роботи парових агрегатів СЕУ і тощо;

- стан елементів СПУ: стан корпусу СПУ, зношеність механізмів, які забезпечують роботу СПУ і зміна (погіршення) ефективності їх роботи, ушкодження, засмічення трубопроводів води і палива, несправність сепараторів палива, регулюючих клапанів, форсунок пальників і тощо;

- зовнішні умови, які впливають на процеси корозії елементів СПУ: температура повітря в машинному відділенні, вологість, хвильові коливання, і тощо;

4. Встановлено, що неефективна робота САУ процесів: підготовки паливо може привести до активізації підшламової корозії; обробки живильної води і продувки до підвищення кисневої і лужної. Відсутність належного контролю вмісту кисню у вихідних газах і температури димових газів в САУ горіння палива призводить до підвищення температури вихідних газів і газової корозії, що знижує ККД парогенеруючої установки.

5. Встановлено, що вплив режимних факторів роботи СПУ і погодних умов (значна хитавиця судна) провокують утворення кавітаційної ерозії і тощо. У контурі управління температурою перегрітої пари значні коливання температури від заданого значення, які викликані перерегулюванням, можуть привести до активізації хімічної корозії в паропроводі, тобто зниження надійності СПУ.

## РОЗДІЛ 2. ІДЕНТИФІКАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ СУДНОВИХ ПАРОГЕНЕРАТОРІВ

### 2.1. Аналітичні моделі динамічних процесів СПУ

Під ідентифікацією динамічних об'єктів розуміють процедуру визначення структури і параметрів їх моделей, які при однаковому входному сигналі об'єкта і моделі забезпечують близькість виходу моделі до виходу об'єкта (адекватність) за встановленим критерієм якості [79].

Важливою умовою процесу ідентифікації є принцип суперпозиції [123], який дозволяє об'єднати всі діючі збурення в одне загальне  $N(t)$  і прикласти його до виходу моделі. При розгляді завдань ідентифікації всі збурення або перешкоди прийнято вважати статично незалежними [168].

Мета ідентифікації полягає в тому, що на підставі спостережень за входним  $u(t)$  і вихідним  $y(t)$  сигналами на певному інтервалі часу визначити вид оператора  $\Psi$ , що зв'язує входний і теоретичний вихідний сигнали:

$$y(t) = \Psi[u(t)] + N(t).$$

Відзначимо, що в зв'язку зі специфічними умовами роботи СПУ, впливом неконтрольованих зовнішніх збурень, зміною режимів навантаження СЕУ, конструктивною різноманітністю СПУ, наявністю нелінійних властивостей тощо, для отримання адекватних математичних моделей підсистем СПУ використовувалося безліч варіантів завдань параметричної ідентифікації, класифікація яких показана на рис. 2.1.

Як відомо, судновий парогенератор - багатовимірний об'єкт управління зі складною динамічною структурою [150]. У його акумуляторах (металевих частинах котла і економайзера, водяному об'ємі колекторів і труб, парових обсягах під дзеркалом випаровування і над ним, пароперегрівачі тощо) здійснюються складні фізичні процеси (рис 2.2). Тиск пару відхиляється від заданого значення у всіх випадках небалансу між кількостями споживаного пара

$D_{\Pi}$  і генерується в екранних трубах. Небаланс усувається за допомогою регулювання тепловиділення в топці, головним чином зміною подачі палива.

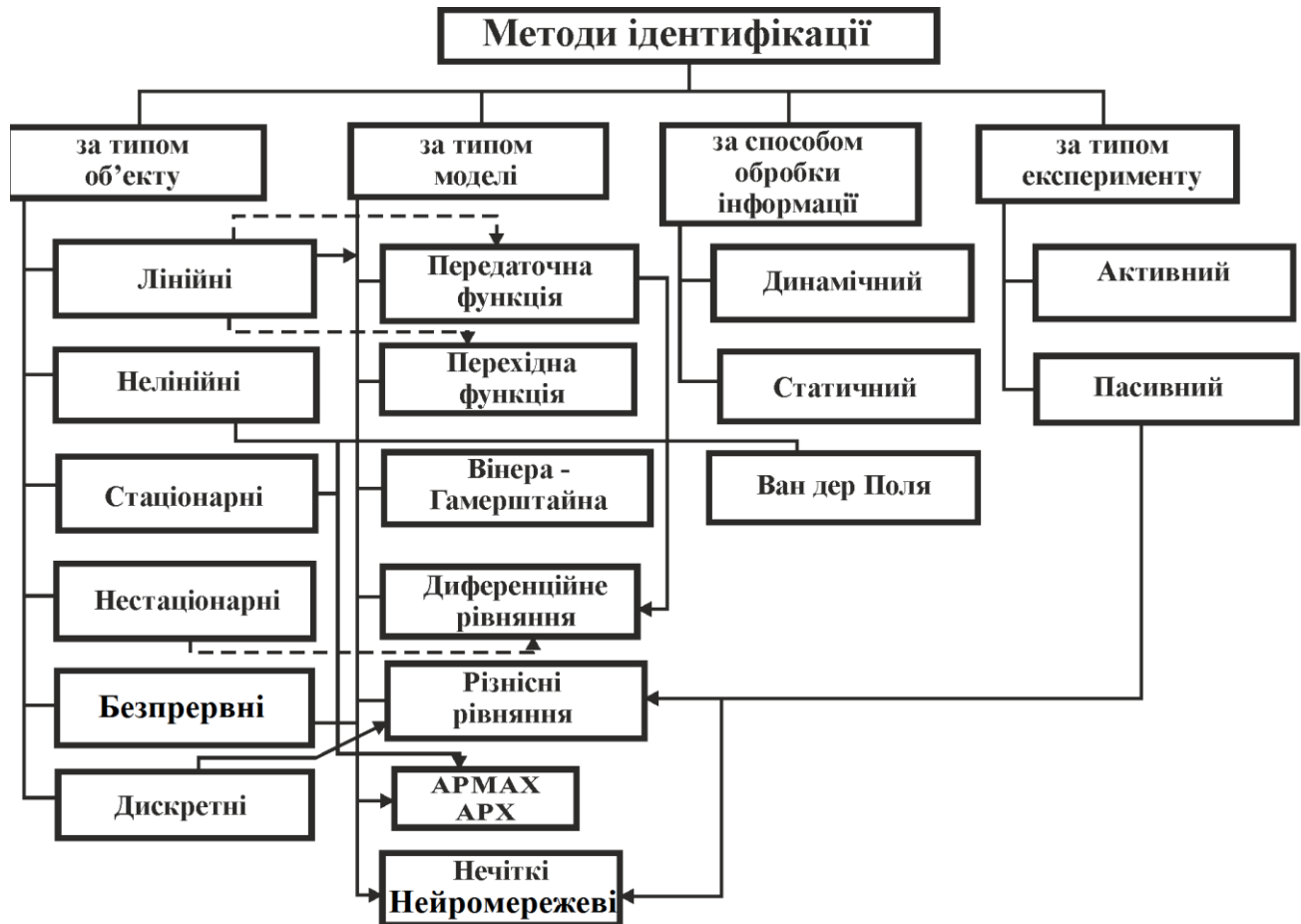


Рис. 2.1. Класифікація методів, які використовуються в процесах ідентифікації підсистем СПУ

Окрім названих, слід підтримувати в межах допустимих значень наступні параметри: рівень води в барабані  $H_6$  (регулюється зміною подачі живильної води  $D_{п.в.}$ ); розрідження у верхній частині топки  $S_T$  (регулюється зміною продуктивності димососів); оптимальний надлишок повітря  $\alpha$  за пароперегрівом (регулюється зміною продуктивності вентиляторів, що нагнітають повітря в топку); вміст солі котельної води (регулюється зміною витрати води, що випускається в сепаратор безперервної продувки  $D_{пр}$ ). СПУ по каналу «паливо-



витрата і тиск пару» є системою спрямованої дії. Однак вихідні регульовані величини деяких ділянок служать одночасно вхідними по відношенню до інших.

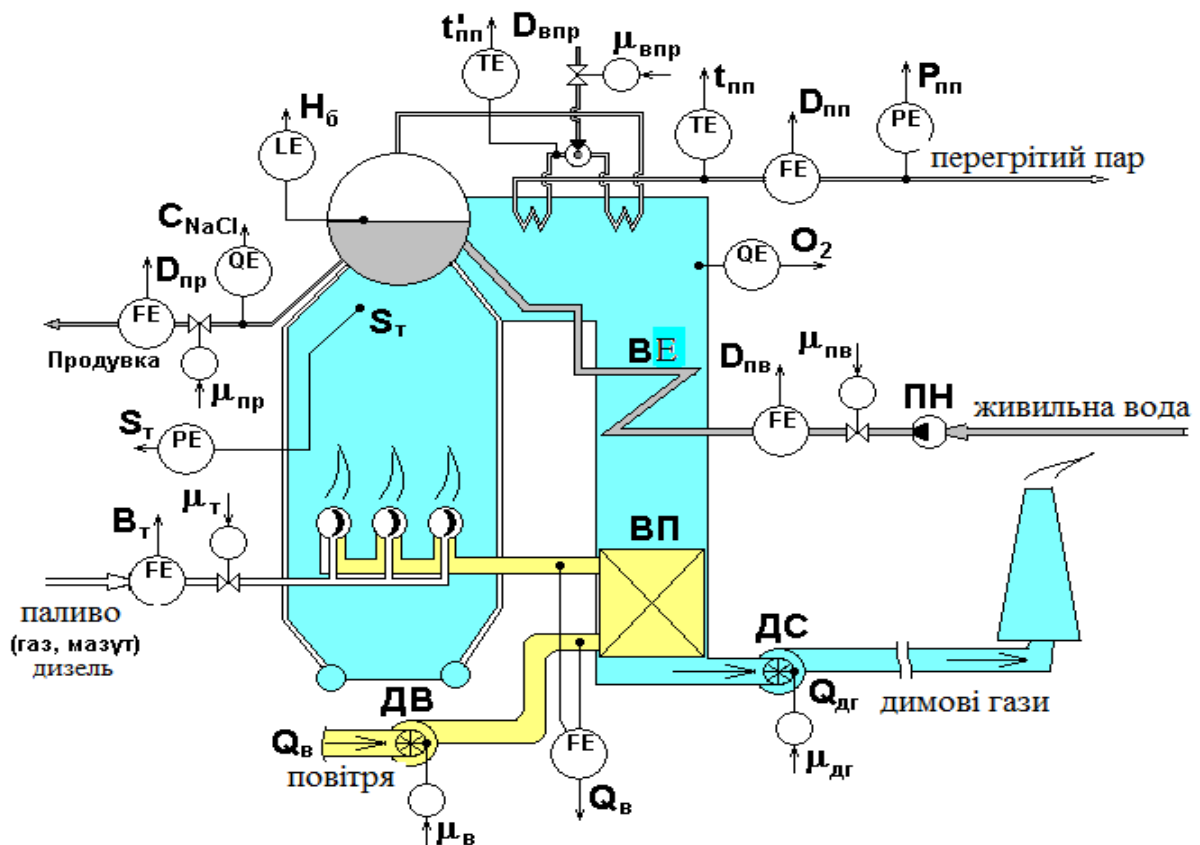


Рис. 2.2. Функціональна схема допоміжного водотрубного СПУ з примусовою циркуляцією марки Mitsubishi MB з паровою продуктивністю 120 т/г і працюючого на СПТУ:  $TE$  – датчик температури;  $PE$  – датчик тиску;  $QE$  – аналізатор;  $LE$  – датчик рівня;  $FE$  – датчик витрати;  $ДС$  – димосос;  $ВП$  – повітрепідігрівач;  $ВЕ$  – водяний економайзер;  $ДВ$  – вдувний вентилятор;  $ПН$  – живильна вода;  $\mu_i$  – управляючі дії;  $D_{пп}$  – витрата перегрітого пару;  $D_{пв}$  – витрата живильної води;  $D_{пр}$  – витрата води на продувку;  $B_T$  – витрата палива;  $H_6$  – рівень води в барабані;  $Q_i$  – кількість тепла;  $P_{пп}$  – тиск пару;  $S_T$  – розрядження;  $O_2$  – вміст кисню;  $C_{NaCl}$  – вміст солі

Наприклад, витрата перегрітої пари  $D_{пп}$ , будучи вихідною величиною по відношенню до витрати палива  $B_T$ , служить одночасно вхідним впливом по

відношенню до температури і тиску перегрітого пару; тиск пару в барабані  $P_6$ , будучи вихідною величиною по відношенню до витрати палива  $B_T$ , служить одночасно одним з вхідних впливів ділянки регулювання рівня води в барабані  $H_6$ . Таким чином, СПУ як об'єкт управління представляє собою складну динамічну систему з взаємопов'язаними вхідними і вихідними величинами, запропонована схема взаємозв'язків представлена на рис. 2.3. Виражена спрямованість ділянок регулювання по основним каналам регулюючих впливів, таким як витрата живильної води  $D_{ПВ}$  – рівень  $H_6$ ; витрата води на вприскування  $D_{ВПР}$  – температура перегріву пару  $T_{пп}$ ; витрата палива  $B_T$  – тиск пару  $P_{пп}$  і ін. дозволяє здійснити стабілізацію регульованих величин за допомогою незалежних одноконтурних систем, пов'язаних лише через загальний об'єкт управління (СПУ). При цьому регулюючий вплив тієї чи іншої ділянки (суцільні лінії на рис. 2.3) служить основним способом стабілізації регульованої величини, а інші впливи вважаються по відношенню до цієї ділянки внутрішніми і зовнішніми збуреннями.

Для вирішення поставлених наукових завдань пов'язаних з розробкою САУ і оптимальної налаштуванням типових лінійних регуляторів використовувалися рівняння динаміки СПУ як одноємкостного об'єкта якій акумулює теплоту.

Статичний режим роботи СПУ характеризується рівнянням теплового балансу [132]:

$$Q_{0пс} + Q_{0пв} - Q_{0п} = 0,$$

де  $Q_{0пс}$ ,  $Q_{0пв}$ ,  $Q_{0п}$  – кількість теплоти підведених в паровій тракт відповідно продуктами згоряння палива, живильною водою і відведеної з парою (кДж).

Динамічний режим СПУ характеризується залежностями зміни тиску пара в часі від зміни  $Q_{0пс}$ ,  $Q_{0пв}$ ,  $Q_{0п}$ . Тиск пара залишається постійним за умови дотримання теплового і матеріального балансів.

Небаланс в підводі і відвід теплоти при перехідному режимі за час  $dt$  компенсується за рахунок зміни кількості теплоти  $Q_{ак}$ , акумульованої в

пароводяної суміші, води, парі, а також в металевих частинах СПУ. Таким чином, рівняння динаміки має наступний вигляд:

$$(Q_{nc} + Q_{nv} - Q_n)dt = dQ_{ak}.$$

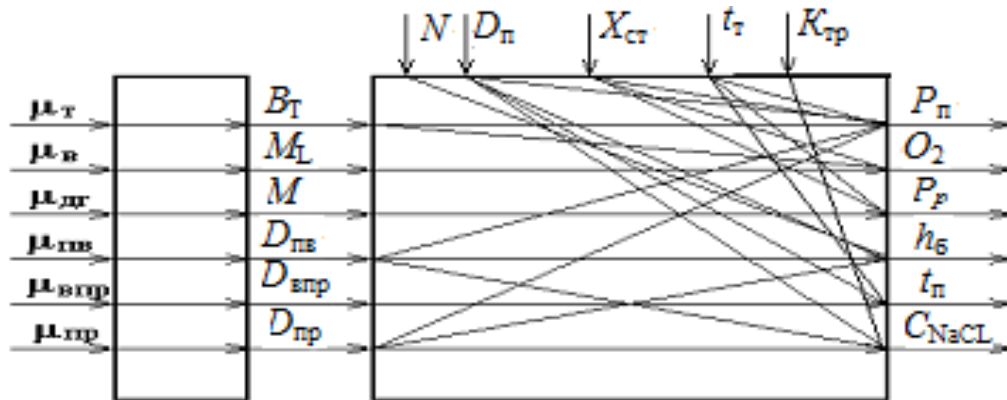


Рис. 2.3. Структурна схема взаємозв'язку параметрів барабанного водотрубного суднового парогенератору (етап структурної ідентифікації):  $D_{п}$  – витрата пари;  $t_{т}$  – температура палива;  $P_{p}$  – розрідження;  $P_{п}$  – тиск пари;  $h_{б}$  – рівень в барабані;  $t_{п}$  – температура пари;  $C_{NaCL}$  – вміст солі у воді;  $D_{пв}$  – витрата живильної води;  $M_L$  – витрата повітря;  $D_{впр}$  – витрата води на паровий перегрівач;  $D_{пр}$  – витрата води на продувку;  $M$  – витрата димових газів (дг);  $B_T$  – витрата палива;  $\mu_i$  – управляючі дії від регуляторів по відповідним каналам регулювання;  $O_2$  – вміст кисню;  $K_{тр}$  – корозія в трубах;  $N$  – зовнішні випадкові збурення (температура навколишнього середовища, хвильові коливання тощо);

$X_{ст}$  – хімічний склад палива

З урахуванням важливості підтримки постійного тиску пара при різних теплових режимах СПУ проводиться аналіз рівняння динаміки. Закон зміни тиску в парогенеруючій поверхні СПУ при нестационарному (динамічному режимі) визначається за допомогою рішення рівняння що виражають

матеріальний і енергетично баланс, і рівняння стану. Рівняння матеріального балансу має вигляд [132]:

$$D_{n\sigma} - D_n = \frac{d}{dt}(V_\sigma \rho_\sigma - V_n \rho_n),$$

де  $\rho_{пв}$  – щільність води,  $\rho_{п}$  – щільність пара (кг / м<sup>3</sup>),  $V_\sigma$  – водяний об'єм,  $V_n$  – паровий обсяг (м<sup>3</sup>).

Рівняння енергії встановлює, що різниця між припливом і стоком тепла йде на зміну теплової енергії, укладеної в обсягах пара, води і металу:

$$D_{n\sigma} i_{n\sigma} - D_n i_n + Q = \frac{d}{dt}(V_\sigma \rho_\sigma i_{n\sigma} + V_n \rho_n i_n + G_m C_m t_\sigma),$$

де  $i_{пв}$  – ентальпія живильної води;  $i_{п}$  – ентальпія пара (кДж/кг);  $Q$  – кількість теплоти сприйманого поверхнею нагріву СПУ (кДж);  $G_m$  – маса металу поверхню на якій випаровується пар (кг);  $C_m$  – питома теплоємність металу (кДж/кг К);  $t_\sigma$  – температура киплячої води (°C).

Щільність сухого насиченої пари і киплячої живильної води залежить від тиску пари, тому рівняння стану представлено як ряд співвідношень виду:

$$\rho_{n\sigma} = \rho_{n\sigma}(P);$$

$$\rho_n = \rho_n(P);$$

$$i_{n\sigma} = i_{n\sigma}(P);$$

$$i_n = i_n(P);$$

$$t_\sigma = t_\sigma(P).$$

Представлені вище рівняння є нелінійними. Після їх лінеаризації і припущень про рівність температури металу і киплячої води, отримано наступне рівняння динаміки СПУ по тиску пари [153]:

$$T \frac{d\sigma}{dt} + K_c \sigma = \mu_m - \varphi,$$

де  $T$  – час розгону СПУ;  $K_c$  – коефіцієнт самовирівнювання СПУ по тиску пари;  $\sigma = \Delta P / P_n$ ;  $\mu_m = \Delta Q_m / Q_{m.M}$ ;  $\varphi = \Delta Q_n / Q_{n.M}$  – відносні зміни відповідно тиску пара,

теплоти палива, що спалюється, теплоти відведеної з СПУ з парою (тут  $Q_{т.м.}$ ,  $Q_{нм}$  – прийняті базові значення змінних при максимальному навантаженні СПУ).

Згідно [118] динаміка котла як об'єкта регулювання тиску пара з більшою точністю може бути описана рівняннями двох послідовно з'єднаних ланок: ланки першого порядку і ланки з «чистим» запізненням.

Час розгону  $T_p$  або постійна часу  $T$  сучасних суднових парових котлів становить [35]:

- головних 250 – 400 сек;
- допоміжних середнього тиску 100 – 200 сек;
- комбінованих СПУ 50 – 100 сек.

Коефіцієнт самовирівнювання  $\beta$  відносно малий; так, для суднових котлів  $\beta = 0,3 – 0,8$ .

Значення часу запізнювання  $\tau$  для головних і допоміжних суднових парогенераторів може досягати декілька десятків секунд в залежності від теплової потужності, конструктивних властивостей, режимів роботи [81].

Як типовий об'єкт дослідження за критеріями паропродуктивності і конструкції, обраний судновий допоміжний двохбарабанний парогенератор середньої потужності фірми Mitsubishi типу МАС-В50, продуктивністю 50 тон пару на годину, робочим тиском пару 1.57 МПа (16 кгс / см<sup>2</sup>), температурою пару 280 °С і ККД 82,5 % (рис. 2.4). Даним типом котлів обладнані багато суден танкерного флоту [203 – 205].

Так як більшу частину часу СПУ функціонує в стаціонарному режимі роботи на навантаженні, яке приблизно дорівнює 50 % від номінального з дотриманням принципу суперпозиції, а також з огляду поширеності в САУ об'єктів СЕУ, лінійних ПД-регуляторів (до 85 % від усіх алгоритмів), вводилося допущення про можливість опису найбільш ймовірних режимів роботи СПУ за допомогою лінійних математичних моделей, тобто вводилися спрощуючі допущення. Нелінійності, що входять в рівняння динаміки параметрів СПУ, відносяться до

класу лінеарізуємих за умови дотримання сталості теплового навантаження, що дає можливість застосувати метод малих відхилень, який забезпечує прийнятну точність при визначенні динамічних характеристик.

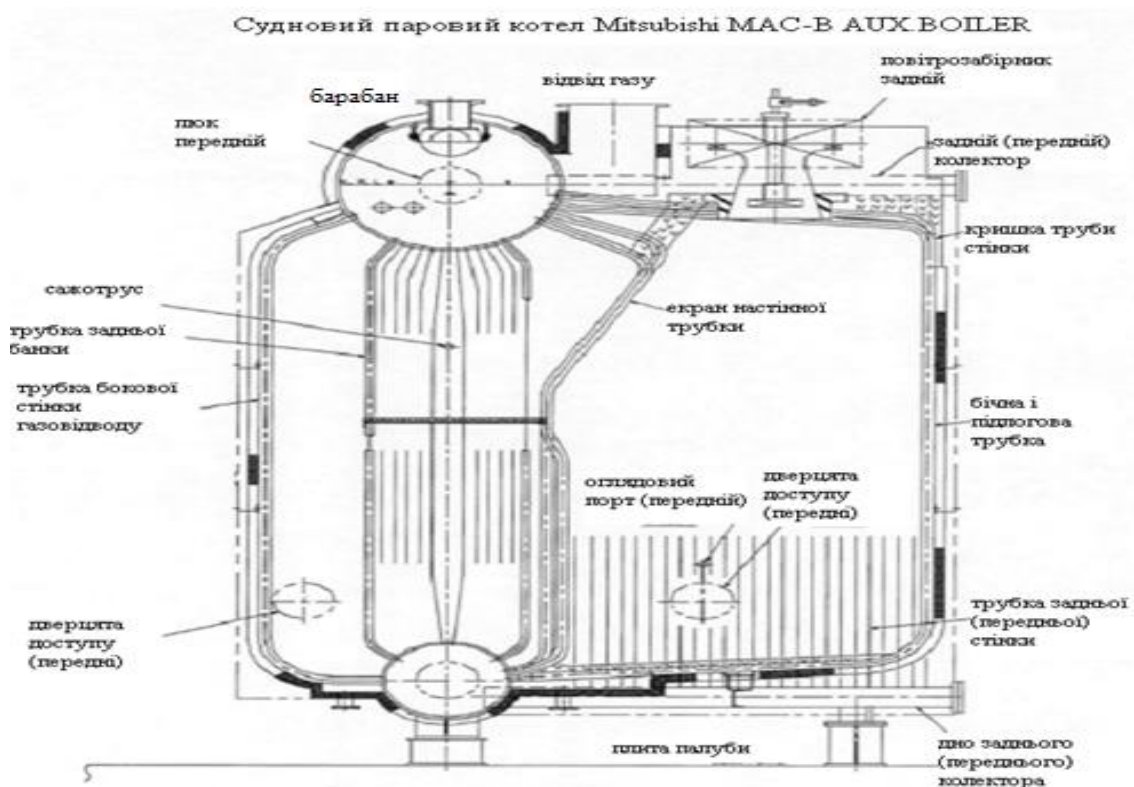


Рис. 2.4. Конструктивний вигляд допоміжної СПУ Mitsubishi типу MAC-B 50

На думку ряду вчених [54, 56, 67, 150] нелінійні моделі підсистем СПУ доцільно замінити спектром моделей, лінеаризованих щодо кількох найбільш частих режимів функціонування. Для проведення лінеаризації застосовується параметрична схема каналів управління і збурення в САУ СПУ (рис. 2.5).

Вхідними управляючими діями у математичних моделях підсистем СПУ як об'єктів управління для локальних для локальних систем регулювання (рис. 2.5) є: зміни витрати палива  $\Delta B_f$ , положення направляючих апаратів надувного вентилятора  $\Delta \phi_L$  і 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  $\Delta C_{O_2}$ , розрідження в топці  $\Delta P_p$ , рівня води в барабані котла  $\Delta h_o$ , тиску пару в паровій магістралі  $\Delta P_M$  або витрата пару  $\Delta D_n$ , вмісту солі в барабані котла  $\Delta Ca$ , расхода димовых газов  $\Delta M$ , расхода воздуха  $\Delta M_L$ , расхода питательной воды  $\Delta D_{пв}$  [150]. Основними збурючими діями являються зміни витрат  $\Delta \varphi_n$  і тиску пару в паропроводі  $\Delta P$ , зумовлене зміною споживання пару агрегатами СПУ.

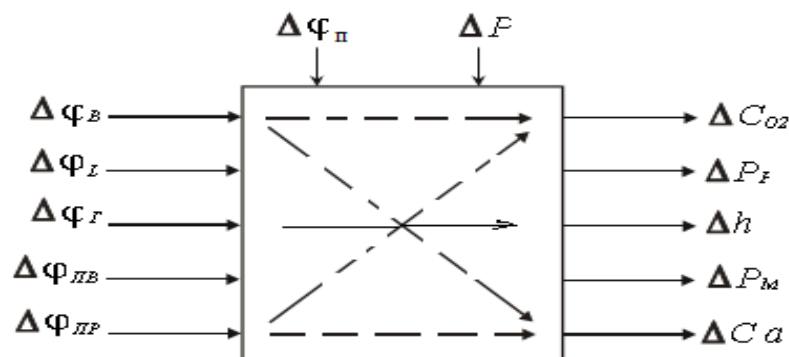


Рис. 2.5. Параметрична схема СПУ

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

Наступним структурним елементом математичної моделі котла є газоповітряний тракт, який складається з газоходу і повітропроводу. Регульованими параметрами для цієї ділянки є розрідження димових газів у верхній частині топкової камери і надлишок повітря, що характеризує економічність процесу горіння.

При виведенні диференціальних рівнянь газоходу і повітропроводу, як ділянок регулювання розрідження в топці, були прийняті наступні допущення: газохід після димососа і повітропровід після вдувного вентилятора дуже короткий і що

зворотна реакція тиску в топці на витрату мазуту і повітря на вході дуже мала; акумулююча ємність топки і газоходів зосереджена в одному обсязі, а дроселююча здатність газоходів і поверхонь нагріву зосереджена в одній точці. Регулювання здійснюється шляхом зміни положення направляючого апарату димососа і вдувного вентилятора. З урахуванням перерахованих припущень регульовані ділянки можуть бути замінені спрощеною системою, що складається з ємності, дроселя і димососа (вдувного вентилятора).

Регульованою величиною є відхилення тиску в топці від заданого значення; вхідний величиною (регулюючим впливом) - зміна положення направляючого апарату димососа. В якості зовнішнього збурення приймемо зміну витрати газів на притоці. Таким чином, диференціальні рівняння в припущеннях з урахуванням лінеаризації в навколишніх точках досліджуваного теплового режиму СПУ мають такий вигляд [132]:

$$T_1^{21} \frac{d\Delta P_p}{dt} + \Delta P_p = k_1^{21} \Delta \varphi_r + k_2^{21} \Delta M, \quad (2.1)$$

$$T_1^{21} = (a_L^r - a_p^r) \frac{m_r}{\bar{P}_r} \alpha; \quad k_1^{21} = -b_p^r; \quad k_2^{21} = a_L^r - a_p^r,$$

де  $m_r$  – маса димових газів в газоході котла в стаціонарному режимі роботи, кг;  $\bar{P}_r$  – тиск димових газів в верхній частині топкової камери, Па;  $a_p^r, a_L^r, b_p^r$  – визначаються графічно по витратним характеристикам газоходу і димососу;  $k_i^n$  и  $T_i^n$  – коефіцієнти, приймаючі постійне значення в заданому режимі функціонування котла ( $n$  – відповідає номеру диференціального рівняння,  $i$  – порядковий номер коефіцієнта);  $\alpha$  – коефіцієнт (для мазуту  $\sim 0.65$ ),  $M$  – витрата димових газів, кг/с.

Вихідні дані для розрахунку коефіцієнтів диференціальних рівнянь визначені по напірним характеристикам відцентрового димососа одностороннього всмоктування DN-12,5 і гідравлічної характеристиці газоходу



мазутного водотрубного барабанного котла ГМ 50 (аналог судових допоміжних котлів середньої потужності типу МАС 50) представлені в [72,156].

Таким чином, після підстановки розрахованих коефіцієнтів в рівняння (2.1) визначено рівняння виду:

$$1,93 \frac{d\Delta P_p}{dt} + \Delta P_p(t) = -15,7 \Delta \varphi_r(t) + 21,7 \Delta M(t).$$

Після виконання перетворення Лапласа [138] (2.2) одержані передатні функції по каналам управління  $W(s)_{\mu-p}$  (зміна положення направляючого апарату – зміна тиску димових газів) збурення  $W(s)_{M-p}$  (зміна витрати вихідних газів – зміна рециркуляційного тиску в газоході):

$$W(s)_{\mu-p} = \frac{-15,7}{(1,93s+1)}; \quad W(s)_{M-p} = \frac{21,7}{(1,93s+1)}.$$

Тримірна модель направляючого апарату димососу з указаною зміною кута положення  $\Delta \varphi_r$  представлена на рис. 2.6.

Після виконання розрахунків для двох найбільш часто працюючих режимів СПУ (50 % и 25 % від номінального теплового навантаження) одержані наступні значення коефіцієнтів диференційного рівняння. Вибрані навантаження пов'язана з ходовим і маневреним режимом судна, а також вантажними операціями під час стоянки.

Таблиця 2.1

Розрахункові коефіцієнти рівняння (2.1) для трьох теплових режимів СПУ

| Коефіцієнти<br>рівняння | 25 %  | 50 %  | 75 %  |
|-------------------------|-------|-------|-------|
| $T_1^{21}$              | 1,9   | 5,8   | 7,6   |
| $k_1^{21}$              | -15,7 | -23,4 | -56,2 |
| $k_2^{21}$              | 21,7  | 34,3  | 42,8  |

Таким чином, одержана система диференційних рівнянь для трьох режимів роботи СПУ:

$$1,93 \frac{d\Delta P_p}{dt} + \Delta P_p(t) = -15,7\Delta\varphi_r(t) + 21,7\Delta M(t);$$

$$5,8 \frac{d\Delta P_p}{dt} + \Delta P_p(t) = -23,4\Delta\varphi_r(t) + 34,3\Delta M(t);$$

$$7,6 \frac{d\Delta P_p}{dt} + \Delta P_p(t) = -56,2\Delta\varphi_r(t) + 42,8\Delta M(t).$$

Графічне рішення наведених вище рівнянь показано на рис. 2.7 – 2.8. Загальне рішення системи диференціальних рівнянь, отримане за допомогою програми, складеної в математичному пакеті MatLab [38] представлено нижче:

$$P_p(t) = \left( C_1 + \frac{(-15700 \varphi_r + 21700M + 30301)}{1000} \right) e^{-100M/193}.$$

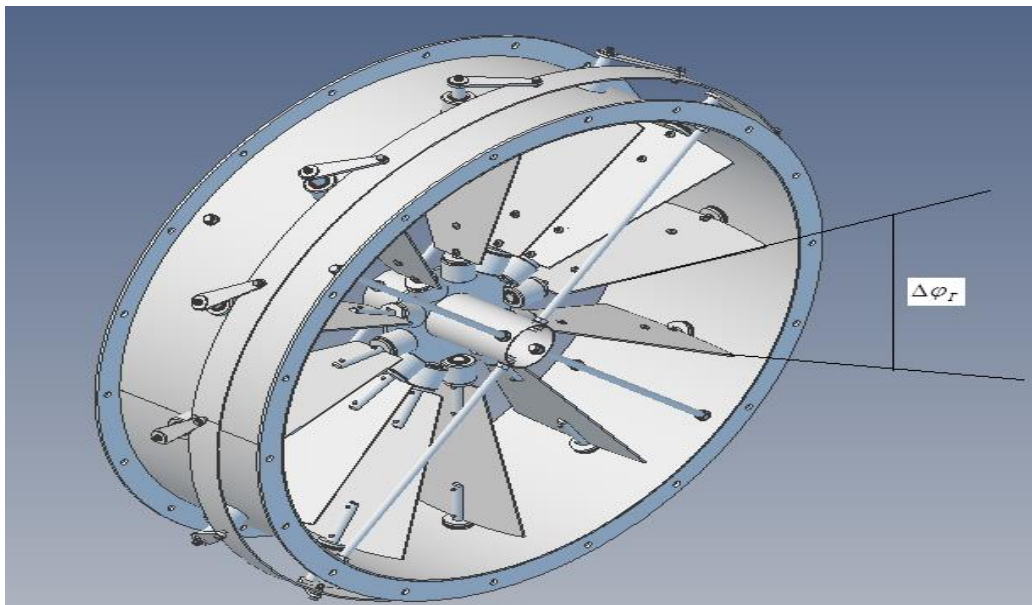


Рис. 2.6. Тривимірна модель направляючого апарата

Втрата тепла з вихідними газами  $q_2$  являється самою великою з всіх теплових втрат в судових парогенераторах. Для СПУ вона коливається в межах від 5 до 23 % і більше [72]. Величина  $q_2$  залежить від ентальпії вихідних газів, яка визначається по формулі:

$$I_{yx} = V_{\Gamma} \cdot C_{\Gamma} \cdot V_{yx},$$

де  $V_{\Gamma}$  – об'єм вихідних газів,  $\text{м}^3$ ;  $C_{\Gamma}$  – об'ємна ізобарна теплоємність продуктів горіння,  $\text{кДж}/(\text{м}^3\text{К})$ ;  $V_{yx}$  – швидкість вихідних газів,  $\text{м/с}$ .

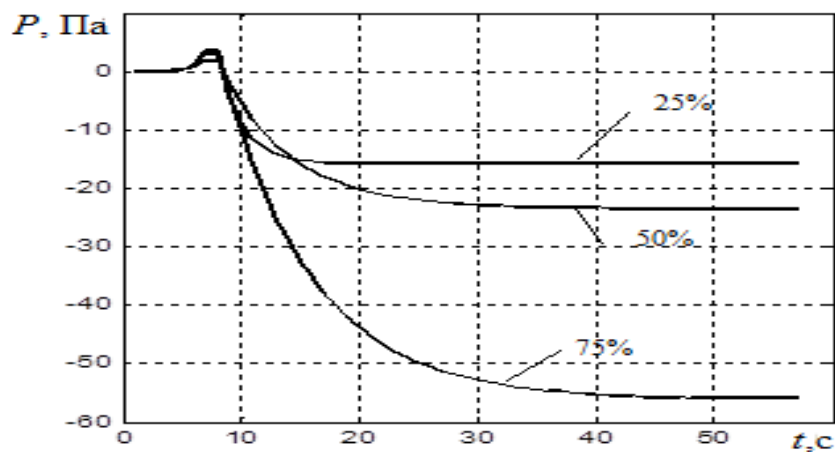


Рис. 2.7. Зміни тиску димових газів для трьох режимів роботи СПУ при роботі направляючого апарату

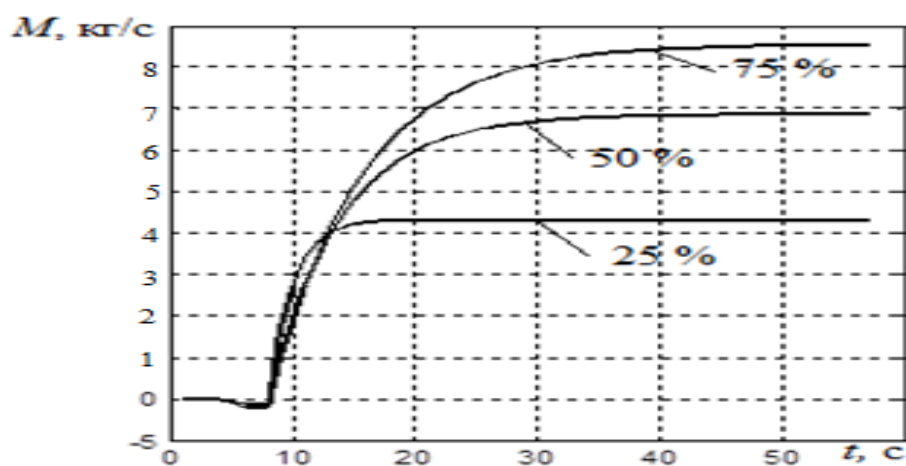


Рис. 2.8. Зміни витрати димових газів при трьох режимах роботи СПУ

При контролі  $V_{yx}$  необхідно враховувати, що температура стінки хвостових поверхонь нагріву  $t_{ст}$  СПУ, повинна бути вище точки роси  $t_p$ , при якій суміш водяних парів сірчаної кислоти, яка знаходиться в продуктах згорання, конденсується. При виникненні умов, коли  $t_{ст} < t_p$ , суміш парів починає конденсуватися на поверхнях нагріву і під дією сірчаної кислоти починає відбуватися інтенсивне руйнування металів труб, тобто виникнення процесу низькотемпературної корозії. В продуктах згорання сірчаністих мазутів завжди присутні пари води і з'єднання сірки, які утворюють при з'єднанні один з одним сірчану кислоту. При обмиванні газами відносно холодних хвостових поверхонь нагріву пари сірчаної кислоти конденсується на них і викликають корозію металу [68].

Таким чином, з урахуванням впливу швидкості вихідних  $v_{yx}$  (димових) газів на процеси виникнення низькотемпературної корозії  $\Delta N_k^T$  пропонується доповнити рівняння (2.1) параметром, що характеризує корозійний процес:

$$T_1^{21} \frac{d\Delta P_p}{dt} + \Delta P_p = k_1^{21} \Delta \varphi_r + k_2^{21} \Delta M + k_4^{21} \Delta N_k^T;$$

$$k_4^{21} = t_s + 2 \cdot 10^3 \sqrt[3]{\frac{\Delta \varphi_r}{Q_n^p}},$$

де  $t_s$  – температура насичення водяних парів, відповідна їх парціальному тиску в продуктах згорання, °C;  $\Delta \varphi_r$  – положення направляючого апарату димососа, % по якій визначається швидкість димових газів;  $Q_n^p$  – нижча теплота згорання робочої маси палива, кДж/кг. Для режиму навантаження 75 %, одержали:

$$k_4^{21} = 201 + 2000 \cdot \sqrt[3]{\frac{70}{1400}} = 941,$$

після підстановки розрахованих коефіцієнтів рівняння (2.1) одержано:

$$7,6 \frac{dP_p}{dt} + P_p(t) = -56,2 \varphi_r(t) + 42,8 M(t) + 941 \Delta N_k^T(t).$$

Аналогічним чином можна одержати значення коефіцієнта  $k_4^{21}$  і для других навантажувальних режимів роботи СПУ.

Динамічні властивості повітроводу, що визначають залежність між зміною подачі повітря в топку котла і положенням направляючого апарату вдувного вентилятора  $\Delta\varphi_B$ , описуються рівнянням виду [132]:

$$T_2^{22} \frac{d^2 \Delta M_L}{dt^2} + T_1^{22} \frac{d \Delta M_L}{dt} + \Delta M_L = k_1^{22} \frac{d \Delta \varphi_B}{dt} + k_2^{22} \Delta \varphi_B; \quad (2.2)$$

$$T_2^{22} = \frac{-a_p^B (a_L^B)^2}{a_L^B - a_p^B} \left( \frac{m_B}{\bar{P}_B} \alpha \right)^2; \quad T_1^{22} = \frac{-2a_p^B a_L^B + (a_L^B)^2}{a_L^B - a_p^B} \left( \frac{m_B}{\bar{P}_B} \alpha \right); \quad k_1^{22} = \frac{b_p^B a_L^B}{a_L^B - a_p^B} \left( \frac{m_B}{\bar{P}_B} \alpha \right); \quad k_2^{22} = \frac{b_p^B}{a_L^B - a_p^B},$$

де  $m_B$  – маса димових газів в повітроводі котла в стаціонарному режимі роботи, кг;  $\bar{P}_B$  – середнє значення тиску повітря в повітроводі, Па;  $a_p^B, a_L^B, b_p^B$  – визначаються графічно по витратним характеристикам повітроводу і вдувного вентилятора;  $M_L$  – витрата повітря, м<sup>3</sup>/год.

Таблиця 2.2

Розрахункові коефіцієнти рівняння (2.2)

| Коефіцієнти<br>рівняння    | 25 % | 50 % | 75 % |
|----------------------------|------|------|------|
| $T_2^{22}, c$              | 3,9  | 6,8  | 9,3  |
| $T_1^{22}, c$              | 4,2  | 9,1  | 16,1 |
| $k_1^{22}, \text{кг/ \%}$  | 2,3  | 4,5  | 7,4  |
| $k_2^{22}, \text{кг/с \%}$ | 8,1  | 26,1 | 28,3 |

Система диференційних рівнянь, що описують динамічні властивості повітроводу при трьох режимах роботи СПУ має вигляд:

$$3,9 \frac{d^2 \Delta M_L}{dt^2} + 4,2 \frac{d \Delta M_L}{dt} + \Delta M_L = 2,3 \frac{d \Delta \varphi_B}{dt} + 8,1 \Delta \varphi_B;$$

$$6,8 \frac{d^2 \Delta M_L}{dt^2} + 9,1 \frac{d \Delta M_L}{dt} + \Delta M_L = 4,5 \frac{d \Delta \varphi_B}{dt} + 26,1 \Delta \varphi_B;$$

$$9,3 \frac{d^2 \Delta M_L}{dt^2} + 16,1 \frac{d \Delta M_L}{dt} + \Delta M_L = 7,4 \frac{d \Delta \varphi_B}{dt} + 28,3 \Delta \varphi_B.$$

З метою подальшого моделювання САУ об'єктів СПУ с ПІ і ПІД-регуляторами, кожне з рівнянь системи представлено в виді:

$$W(s)_{M_L-\varphi} = \frac{2,3s + 8,1}{(3,9s^2 + 4,2s + 1)};$$

$$W(s)_{M_L-\varphi} = \frac{4,5s + 26,1}{(6,8s^2 + 9,1s + 1)};$$

$$W(s)_{M_L-\varphi} = \frac{7,4s + 28,3}{(9,3s^2 + 16,1s + 1)}.$$

Коефіцієнт надлишку повітря  $\alpha$ , який не можна безпосередньо виміряти, може бути визначений за вмістом кисню в димових газах практично незалежно від складу палива. Коефіцієнт надлишку повітря визначається витратою повітря  $M_L$  витратою палива  $B_T$ . Однак на практиці  $\Delta C_{O_2}$  не вдається виміряти в точці, розташованій безпосередньо за зоною закінчення процесу горіння. У більшості випадків точка відбору проби знаходиться в конвективній частині котла. При цьому гази спочатку перемішуються в зоні горіння, потім транспортуються через радіаційні поверхні і потім додатково перемішуються в зоні конвективних поверхонь нагріву. Глибоке перемішування відбувається в димососі (особливо в димососах відцентрового типу). Ця підсистема (об'єкт) СПУ може бути апроксимована рівнянням [132]:

$$T_2^{23} \frac{d^2 \Delta C_{O_2}}{dt^2} + T_1^{23} \frac{d \Delta C_{O_2}}{dt} + \Delta C_{O_2} = k_2^{23} \Delta M_L(t - \tau) + k_4^{23} \Delta B_T(t - \tau), \quad (2.3)$$

де  $\tau$  – час транспортного запізнення; (приймається рівним величині інерційності самого газоаналізатора, для газоаналізатора марки Testo,  $\tau = 30$  с):

$$T_2^{23} = T_B^2; \quad T_1^{23} = 2T_B; \quad T_B = \frac{\bar{T}_B}{3}; \quad k_2^{23} = \frac{21}{\bar{M}_L \bar{\alpha}}; \quad k_4^{23} = -\frac{21}{\bar{B}_T \bar{\alpha}},$$

де  $\bar{B}_T$  – номінальна витрата палива, кг/с;  $\bar{\alpha}$  – коефіцієнт надлишку повітря;  $\bar{T}_B$  – середній час проходження димових газів від топки до місця заміру, с.

Вихідні дані для СПУ МАС 35 [205]:

$$\overline{B}_T^{75\%} = 0,54, \text{ кг/с}; \overline{M}_L^{75\%} = 11,8, \text{ кг/с}; \overline{\alpha}^{50\%} = 1,2; \overline{T}_B = 12, \text{ с}; T_B = \frac{12}{3} = 4, \text{ с},$$

тоді  $k_2^{23} = \frac{21}{11,8 \cdot 1,2} = 1,48, \text{ \%} \cdot \text{с/кг}; k_4^{23} = -\frac{21}{0,52 \cdot 1,2} = -33,9, \text{ \%} \cdot \text{с/кг}.$

Для режиму 50 % від номінального:  $\overline{B}_T^{50\%} = 0,35, \text{ кг/с}; \overline{M}_L^{50\%} = 5,8, \text{ кг/с}; \overline{\alpha}^{50\%} = 1,2;$

$$k_2^{23} = \frac{21}{5,8 \cdot 1,2} = 3, \text{ \%} \cdot \text{с/кг}; k_4^{23} = -\frac{21}{0,35 \cdot 1,2} = -50, \text{ \%} \cdot \text{с/кг}$$

Для режиму 25 % від номінального:  $\overline{B}_T^{25\%} = 0,18, \text{ кг/с}; \overline{M}_L^{25\%} = 3,3, \text{ кг/с}; \overline{\alpha}^{25\%} = 1,3;$

тоді

$$k_2^{23} = \frac{21}{3,3 \cdot 1,2} = 5,3, \text{ \%} \cdot \text{с/кг}; k_4^{23} = -\frac{21}{0,18 \cdot 1,3} = -91,3, \text{ \%} \cdot \text{с/кг}.$$

Таблиця 2.3

Розрахункові коефіцієнти рівняння (2.3)

| Коефіцієнти<br>рівняння     | 25 %  | 50 % | 75 %  |
|-----------------------------|-------|------|-------|
| $T_2^{23}, \text{ с}$       | 64    | 36   | 25    |
| $T_1^{23}, \text{ с}$       | 8     | 6    | 5     |
| $k_2^{23}, \text{ кг/ \%}$  | 5,3   | 3    | 1,5   |
| $k_4^{23}, \text{ кг/с \%}$ | -91,3 | -50  | -33,9 |

Після підстановки значень (див. табл. 2.3) в (2.3) одержано:

$$64 \frac{d^2 \Delta C_{O_2}}{dt^2} + 8 \frac{d \Delta C_{O_2}}{dt} + \Delta C_{O_2} = 5,3 \Delta M_L (t - 30) - 91,3 \Delta B_T (t - 30);$$

$$36 \frac{d^2 \Delta C_{O_2}}{dt^2} + 6 \frac{d \Delta C_{O_2}}{dt} + \Delta C_{O_2} = 3 \Delta M_L (t - 30) - 50 \Delta B_T (t - 30);$$

$$25 \frac{d^2 \Delta C_{O_2}}{dt^2} + 5 \frac{d \Delta C_{O_2}}{dt} + \Delta C_{O_2} = 1,5 \Delta M_L (t - 30) - 33,9 \Delta B_T (t - 30).$$

Рішення даної системи при нульових початкових умовах відображено на рис. 2.9 – 2.10.

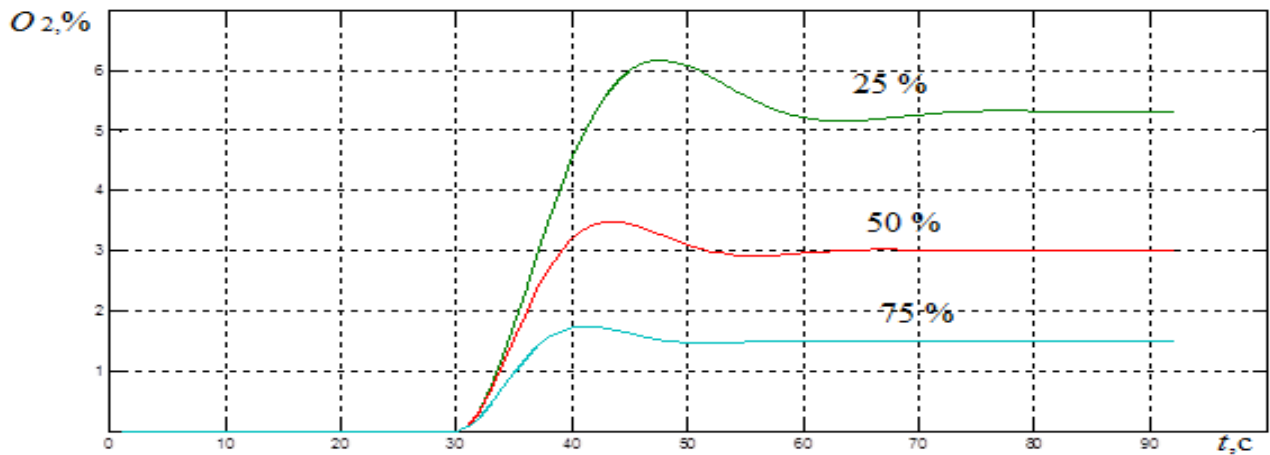


Рис. 2.9. Перехідні характеристики по каналу «зміна витрати повітря – зміна вмісту  $O_2$ »

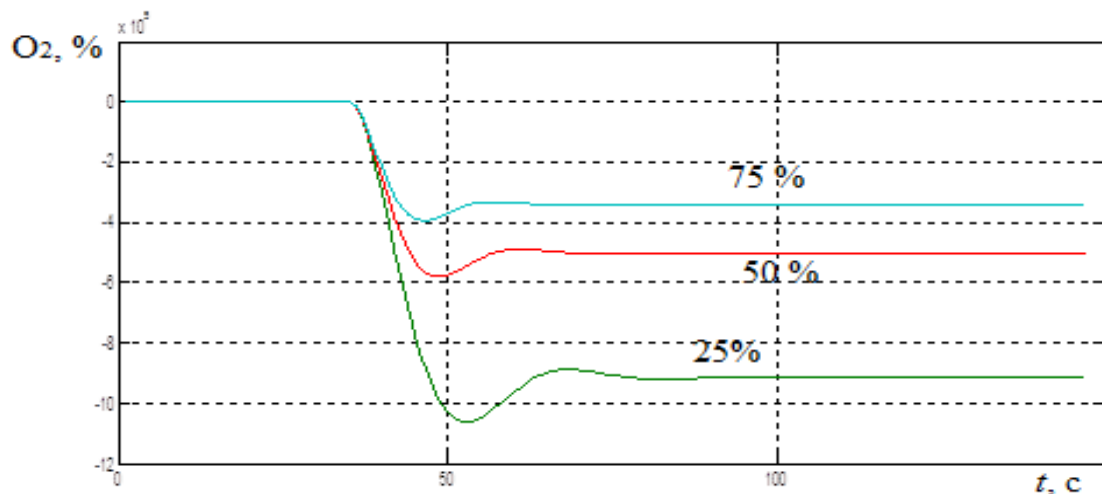


Рис. 2.10. Перехідні характеристики по каналу «зміна витрати палива – зміна вмісту  $O_2$ »

Слід зазначити, що з боку продуктів згоряння палива може спостерігатися газова корозія, яка вражає випарні, перегрівальні і економайзерні поверхні нагрівання і обшивки кожуху СПУ. Газова корозія – хімічний процес окислення металів при високих температурах у відсутності рідкої води, коли конденсація води на поверхні неможлива. Газу, які можуть викликати корозію: водяна пара



(H<sub>2</sub>O), кисень, діоксид сірки, вуглець, оксиди азоту тощо [4]. В результаті газової корозії на поверхні металу СПУ можуть утворитися оксиди, сульфіді і інші сольові відкладення.

Також, розглядаючи процес горіння рідкого палива можна вказати, що до чинників, що впливають і на швидкість протікання низькотемпературної корозії, можна віднести умови протікання реакції горіння в топці. Так при підвищенні коефіцієнта надлишку повітря збільшується процентний вміст сірчаного ангідриду (при  $\alpha = 1,15$  окислюється 3,6 % сірки, який міститься в паливі; при  $\alpha = 1,7$  окислюється біля 7 % сірки). При коефіцієнтах надлишку повітря  $\alpha = 1,03 - 1,04$  сірчаний ангідрид практично не утворюється [68].

Таким чином, контроль процентного вмісту кисню в вихідних газах може дозволити оптимізувати не тільки процес горіння палива по показнику  $\alpha$ , але і уповільнити процес утворення низькотемпературної  $N_k^T$  і газової  $G_k^T$  корозій. З урахуванням запропонованих додаткових аналізованих параметрів рівняння (2.3) представляється в удосконаленому вигляді:

$$T_2^{23} \frac{d^2 \Delta C_{O_2}}{dt^2} + T_1^{23} \frac{d \Delta C_{O_2}}{dt} + \Delta C_{O_2} = k_2^{23} \Delta M_L (t - \tau) + k_4^{23} \Delta B_T (t - \tau) + k_6^{23} \Delta N_k^T + k_8^{23} \Delta G_k^T.$$

Значення коефіцієнтів  $k_6^{23} = f(\alpha)$ ;  $k_8^{23} = f(O_2; H_2O; NO_2; CO_2)$  визначаються експериментально. Розрахунок процесу швидкості освіти низькотемпературної корозії в залежності від змісту O<sub>2</sub> і теплової завантаження СПУ представлений в додатку К.

Таким чином, на основі представлених характеристик (2.3) можна визначити динамічну залежність вмісту кисню у вихідних газах СПУ від режимних факторів (навантаження) по каналах зміни витрати повітря і палива в зоні горіння палива.

Барабан, як об'єкт регулювання рівня, представляє систему ємностей, що складається з власне барабана, випускної трубної системи і екранної трубної системи (підйомні труби). Ємності заповнені двофазним середовищем (вода і

насичений пар). Зміна рівня в таких системах відбувається під впливом двох факторів: через небаланс між притоком живильної води і стоком (відбором пари) і, через спінювання суміші бульбашками пару при збільшенні теплової потужності і при падінні тиску в робочому пароводяному просторі.

До системи здійснюється приплив маси і енергії з потоком живильної води  $\Delta G_{\text{ПВ}}$  (регулююча дія) і приплив енергії від газів до стінок екранних труб  $\Delta Q_T$ , фєстону  $\Delta Q_\phi$  и котельному пучку  $\Delta Q_{\text{КП}}$  (збурюючі дії).

До основної збурюючої дії слід віднести витік маси і енергії з потоком, що відводиться з барабану насиченого пару  $\Delta D_{\text{П}}$ , а також зміни величини безперервної продувки  $\Delta D_{\text{ПП}}$ .

При виведенні наступних рівнянь були прийняті наступні допущення: температура води в опускних трубах близька до температури насичення, хоча пароутворення в них відсутнє; при подачі в барабан киплячій живильної води (економайзер киплячого типу) витрата пара в живильній воді дуже малий в порівнянні з витратою пара, що виділяється в екранах і барабані; потоки маси і енергії з продувкою дуже малі в порівнянні з іншими потоками; температура металевих поверхонь барабану і труб в динаміці і статиці дорівнює температурі насичення [132].

Динамічні залежності для рівня води  $\Delta h$  і тиску пару в барабані котла  $\Delta P_{\text{б}}$  можна представити на основі аналізу [67, 220] в виді системи двох рівнянь:

$$T_2^{24} \frac{d^2 \Delta h}{dt^2} + T_1^{24} \frac{d \Delta h}{dt} = k_1^{24} \frac{d \Delta D_{\text{ПВ}}}{dt} + k_2^{24} \Delta D_{\text{ПВ}} + k_3^{24} \frac{d \Delta D_{\text{П}}}{dt} + k_4^{24} \Delta D_{\text{П}} + k_5^{24} \frac{d \Delta t_{\text{ПВ}}}{dt} + k_6^{24} \Delta t_{\text{ПВ}} + k_7^{24} (\Delta Q_T + \Delta Q_\phi + \Delta Q_{\text{КП}}) \frac{t}{dt} + k_8^{24} (\Delta Q_T + \Delta Q_\phi + \Delta Q_{\text{КП}}) + k_9^{24} \frac{d \Delta G_{\text{ПП}}}{dt} + k_{10}^{24} \Delta G_{\text{ПП}}; \quad (2.4)$$

$$T_1^{25} \frac{d \Delta P_{\text{б}}}{dt} = k_2^{25} \Delta D_{\text{ПВ}} + k_4^{25} \Delta D_{\text{П}} + k_6^{25} \Delta t_{\text{ПВ}} + k_8^{25} (\Delta Q_T + \Delta Q_\phi + Q_{\text{КП}}) + k_{10}^{25} \Delta G_{\text{ПП}}. \quad (2.5)$$

де

$$\begin{aligned}
T_2^{24} &= a_6 b_7 (a_1 a_4 - a_2 a_3); \quad T_1^{24} = \left( \frac{1}{b_4} - b_8 \right) (a_1 a_4 - a_2 a_3); \quad k_1^{24} = a_5 b_7 (a_4 b_1 - a_2); \\
b_3 &= \bar{i}''; \quad b_6 = \left( \frac{\partial V_{DK}}{\partial P} \right)_0; \quad k_2^{24} = a_1 - a_3 b_1 + a_4 b_1 b_6 - a_2 b_6; \\
k_3^{24} &= b_7 (a_1 a_4 - a_2 a_3 - a_5 a_4 b_3 + a_2 a_5); \quad k_4^{24} = a_3 b_3 - a_4 b_3 b_6 - a_1 + a_2 b_6; \quad k_5^{24} = a_4 a_5 b_7 b_2; \\
k_6^{24} &= b_2 (a_4 b_6 - a_3); \quad k_7^{24} = a_4 a_5 b_7; \quad k_8^{24} = a_4 b_6 - a_3; \quad k_9^{24} = a_5 b_7 (a_4 b_1 - a_2); \\
k_{10}^{24} &= a_1 - a_3 b_1 + a_4 b_1 b_6 - a_2 b_6; \quad T_1^{25} = 1; \quad k_2^{25} = \frac{a_2 - a_4 b_1}{a_2 a_3 - a_4 a_1}; \quad k_4^{25} = \frac{a_4 b_3 - a_2}{a_2 a_3 - a_4 a_1}; \\
k_6^{25} &= -\frac{a_4 b_2}{a_2 a_3 - a_4 a_1}; \quad k_8^{25} = -\frac{a_4}{a_2 a_3 - a_4 a_1}; \quad k_{10}^{25} = \frac{a_2 - a_4 b_1}{a_2 a_3 - a_4 a_1}; \quad a_2 = \bar{\rho}' \bar{i}' - \bar{\rho}'' \bar{i}''; \\
b_7 &= \left( \frac{\partial V_{DK}}{\partial G_{Dh}} \right)_0; \quad a_1 = \bar{V} \left[ \frac{d(\rho'' i'')}{dP} \right]_0 + \bar{V}_w \left[ \frac{d(\rho' i' - \rho'' i'')}{dP} \right]_0 + c_m m_m \left( \frac{d\theta'}{dP} \right)_0; \quad b_1 = \bar{i}_{IB}; \\
b_2 &= \bar{G}_{IB} \left( \frac{\partial i_{IB}}{\partial \theta_{IB}} \right)_0; \quad b_8 = \left( \frac{\partial V_{DK}}{\partial h} \right)_0; \quad a_3 = \bar{V} \left[ \frac{d(\rho'')}{dP} \right]_0 + \bar{V}_w \left[ \frac{d(\rho' - \rho'')}{dP} \right]_0; \quad a_4 = \bar{\rho}' - \bar{\rho}''; \\
a_5 &= \bar{V}_{DB} \left( \frac{d\rho''}{dP} \right)_0; \quad a_6 = F \bar{\rho}''; \quad b_4 = b_5 = \frac{1}{F},
\end{aligned}$$

де  $\bar{V}$  – сумарний об'єм барабану, опускних і екранних труб, м<sup>3</sup>;  $\bar{V}_w$  – сумарний об'єм води в барабані, опускних і екранних трубах, м<sup>3</sup>;  $c_m$  – теплоємність металу труб і барабану при температурі насичення, Дж/(кг К);  $m_m$  – маса металу труб і барабану, кг;  $\bar{\rho}'$ ,  $\bar{\rho}''$  – щільності води при температурі насичення і насиченого пару, кг/м<sup>3</sup>;  $\bar{i}'$ ,  $\bar{i}''$  – ентальпія води при температурі насичення і насиченого пару, Дж/кг;  $\bar{P}$  – тиск пару в барабані, Па;  $\bar{\theta}'$  – температура насичення, К;  $\bar{i}_{IB}$  – ентальпія живильної води, Дж/кг;  $\bar{\theta}_{IB}$  – температура живильної води, К;  $\bar{V}_{DB}$  – об'єм насиченого пару в барабані над дзеркалом випаровування, м<sup>3</sup>;  $F$  – площа дзеркала випаровування, м<sup>2</sup>;  $\bar{V}_{DK}$  – об'єм парових каналів в пароводяній суміші, м<sup>3</sup>;  $\bar{h}$  – рівень води в барабані, м.

Повний розрахунок коефіцієнтів системи диференціальних рівнянь (2.4), (2.5) проводився за допомогою програми, складеної в додатку Excel. Слідусь відмітити, що близькість розрахункових коефіцієнтів для різних режимів роботи СПУ, яка обумовлена стабілізацією температури живильної води і рівня води в барабані.

Таблиця 2.4

Розрахункові коефіцієнти рівняння (2.4) для трьох режимів теплового навантаження

| Коефіцієнти   | 75 %   | 50 %   | 25 %   |
|---------------|--------|--------|--------|
| $T_1^{24}$    | 13100  | 13100  | 13100  |
| $T_2^{24}$    | 9180   | 9180   | 9180   |
| $k_1^{24}$    | -0,87  | -0,87  | -0,87  |
| $k_2^{24}$    | 1,90   | 1,90   | 1,90   |
| $k_3^{24}$    | 151,00 | 149,00 | 147,00 |
| $k_4^{24}$    | -3,94  | -3,91  | -3,90  |
| $k_5^{24}$    | 0,13   | 0,10   | 0,06   |
| $k_6^{24}$    | 0,05   | 0,03   | 0,02   |
| $k_7^{24}$    | 0,02   | 0,01   | 0,01   |
| $k_8^{24}$    | 0,08   | 0,07   | 0,05   |
| $k_9^{24}$    | 0,04   | 0,03   | 0,01   |
| $k_{10}^{24}$ | 2,27   | 2,26   | 2,22   |

З причини великої кількості схожих розрахункових коефіцієнтів рівняння (2.4) записано тільки для одного режиму (75 %) навантаження:

$$9180 \frac{d^2 \Delta h}{dt^2} + 13100 \frac{d \Delta h}{dt} = -0,87 \frac{d \Delta D_{\text{ПВ}}}{dt} + 1,9 \Delta D_{\text{ПВ}} + 151 \frac{d \Delta D_{\text{П}}}{dt} - 3,94 \Delta D_{\text{П}} + 0,13 \frac{d \Delta t_{\text{ПВ}}}{dt} +$$

$$+ 0,05 \Delta t_{\text{ПВ}} + 0,02(\Delta Q_T + \Delta Q_\phi + \Delta Q_{\text{КП}}) \frac{t}{dt} + 0,08(\Delta Q_T + \Delta Q_\phi + \Delta Q_{\text{КП}}) + 0,04 \frac{d \Delta G_{\text{ПР}}}{dt} + 2,27 \Delta G_{\text{ПР}}.$$

Після підстановки значень (див. табл. 2.5) в (2.5) одержали систему лінійних диференціальних рівнянь, які описують динамічні якості теплофізичних і гідравлічних параметрів в барабані СПУ:

$$3,1 \frac{d \Delta P_6}{dt} = -181 \Delta D_{\text{ПВ}} - 872 \Delta D_{\text{П}} + 27,4 \Delta t_{\text{ПВ}} + 0,44(\Delta Q_T + \Delta Q_\phi + Q_{\text{КП}}) + 7,64 \Delta G_{\text{ПР}};$$

$$1,9 \frac{d \Delta P_6}{dt} = -151 \Delta D_{\text{ПВ}} - 472 \Delta D_{\text{П}} + 26,8 \Delta t_{\text{ПВ}} + 0,4(\Delta Q_T + \Delta Q_\phi + Q_{\text{КП}}) + 2,27 \Delta G_{\text{ПР}};$$

$$1,1 \frac{d \Delta P_6}{dt} = -101 \Delta D_{\text{ПВ}} - 272 \Delta D_{\text{П}} + 25,9 \Delta t_{\text{ПВ}} + 0,38(\Delta Q_T + \Delta Q_\phi + Q_{\text{КП}}) + 1,64 \Delta G_{\text{ПР}}.$$

Таблиця 2.5

Розрахункові коефіцієнти рівняння (2.5)

| Коефіцієнти   | 75 %    | 50 %    | 25 %    |
|---------------|---------|---------|---------|
| $T_1^{25}$    | 3,10    | 1,90    | 1,10    |
| $k_2^{25}$    | -181,00 | -151,00 | -101,00 |
| $k_4^{25}$    | -872,00 | -472,00 | -272,00 |
| $k_6^{25}$    | 27,40   | 26,80   | 25,90   |
| $k_8^{25}$    | 0,44    | 0,40    | 0,38    |
| $k_{10}^{24}$ | 7,64    | 2,27    | 1,64    |

В процесі пароутворення в котлі підвищується концентрація солей і других розчинених з'єднань. Високі концентрації солей приводять до піноутворення і забруднення обладнання, а значить, до виникнення різних виробничих проблем. Ця концентрація повинна ретельно контролюватися і регулюватися шляхом

продувки котла – випуску певної кількості води з котла і зливу її в дренаж. Підтримка невикористовуваних низьких концентрацій і занадто часті продувки котла збільшують витрату палива і витрати на хімоводопідготовку. Системи автоматичного контролю концентрації розчинених речовин в котельній воді шляхом замірів електричної провідності води, пропорційне загальним солевмістом. Гранична концентрація солей в котельній воді визначається хімічним складом солей, тиском і конструкцією котла. Так, наприклад, для котла певного типу граничний сумарний вміст солі або вміст кремнієвої кислоти є заданою величиною. Як засіб, що підтримує вміст солі в процесі експлуатації в заданих межах, використовується продування.

В реальних умовах сигнал про зміну вмісту солі котельної води проходить через вимірювальний перетворювач - солемір, що володіє інерційністю. По цьому диференціальне рівняння, що описує зміну середньої концентрації в системі СПУ, доповнюється моделлю солеміра, яка описана ланкою транспортного запізнювання.

Тоді диференціальне рівняння приймає вид [133]:

$$T_1^{26} \frac{d\Delta Ca}{dt} + \Delta Ca = k_2^{26} \Delta G_{PB}(t - \tau) + k_4^{26} \Delta D(t - \tau), \quad (2.6)$$

де  $\tau$  – час транспортного запізнювання, характеризує інерційність датчика провідності (солеміра) СР 10,  $\tau = 5$  с [29];  $D$  – витрата насиченого пару, кг/с:

$$T_1^{26} = \frac{m_w}{G_{PP}}; \quad k_2^{26} = \frac{\bar{c}_{PB} - \bar{c}_{KB}}{\bar{G}_{PP}}; \quad k_4^{26} = \frac{\bar{c}_{KB}}{\bar{G}_{PP}},$$

де  $m_w$  – маса води в барабані, опускних і екранних трубах, кг. Для СПУ Mitsubishi МАС при 75 % навантаженні,  $m_w = 3400$  кг;  $\bar{G}_{PP}$  – витрата продувальної води, кг/с; згідно паспортним даним СПУ (20,6 кг/с) [190];  $\bar{c}_{PB}$ ,  $\bar{c}_{KB}$  – вміст солі живильної і котлової води відповідно, мг/кг; по паспортним характеристикам аналізованого СПУ (1500 мг/кг і 3000 мг/кг відповідно) [203]. Після підстановки значень визначено коефіцієнти:

$$T_1^{26} = \frac{m_w}{G_{пп}} = 165, \text{ с}; \quad k_2^{26} = \frac{\bar{c}_{пв} - \bar{c}_{кв}}{\bar{G}_{пп}} = -72,8, \text{ мг}; \quad k_4^{26} = \frac{\bar{c}_{кв}}{\bar{G}_{пп}} = 145,6, \text{ мг}.$$

Також слідус відмітити, що кристалізація солі на поверхнях нагріву труб приводить до їх відкладенню і як наслідок - активізація процесу виникнення корозії. Відомо, що високотемпературна корозія і знос поверхонь нагріву судових парових котлів призводять до щорічних витрат металу на відновлення і ремонт, забруднення поверхонь нагріву солевими та іншими відкладеннями – до зниження їх теплової ефективності і, отже, зниження ККД СПУ [68, 152]. З урахуванням даного процесу, рівняння динаміки (2.6) вмісту солі у воді барабана СПУ (визначається за допомогою водневого показника рН) запропоновано доповнити параметром корозійного зносу  $\Delta S$  (міжкристалічної корозії), викликаній результатами впливу металу з висококонцентрованим соляним розчином (лугом):

$$T_1^{26} \frac{d\Delta pH}{dt} + \Delta pH = k_2^{26} \Delta G_{пв}(t - \tau) + k_4^{26} \Delta D(t - \tau) + k_6^{26} \Delta S;$$

$$k_6^{26} = A \cdot \rho_m^{-1} \cdot \tau^n; \quad k_6^{26} = 0,78 \cdot 10^{-3}, \quad \text{кг} \cdot \text{ч} / \text{м}^3,$$

де  $A$  - коефіцієнт пропорційності, залежний від температури живильної води (2);  $\rho_m$  – щільність металу труб,  $\text{кг}/\text{м}^3$ , ( $7830 \text{ кг}/\text{м}^3$ );  $\tau$  – час, год;  $n$  – показник степеня (параболи) окислення металу, при дифузійному режимі  $n = 0,5$  [132].

Аналогічно розраховані значення всіх коефіцієнтів для двох других режимів роботи (табл. 2.6)

Після підстановки розрахованих коефіцієнтів в (2.6) одержано:

$$213,6 \frac{d\Delta pH}{dt} + \Delta pH = -104,1 \Delta G_{пв}(t - 5) + 189,9 \Delta D(t - 5) + 0,78 \cdot 10^{-3} \Delta S;$$

$$199,3 \frac{d\Delta pH}{dt} + \Delta pH = -92,2 \Delta G_{пв}(t - 5) + 167,7 \Delta D(t - 5) + 0,43 \cdot 10^{-3} \Delta S;$$

$$165 \frac{d\Delta pH}{dt} + \Delta pH = -72,8 \Delta G_{пв}(t - 5) + 145,6 \Delta D(t - 5) + 0,25 \cdot 10^{-3} \Delta S.$$

Таблиця 2.6

## Розрахункові коефіцієнти рівняння (2.6)

| Коефіцієнти<br>рівняння     | 25 %                 | 50 %                 | 75 %                 |
|-----------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| $T_1^{26}, \text{с}$        | 213,6                | 199,3                | 165                  |
| $k_2^{26}, \text{мг}$       | -104,1               | -92,2                | -72,8                |
| $k_4^{26}, \text{мг}$       | 189,9                | 167,7                | 145,6                |
| $k_6^{26}, \text{кг г/м}^3$ | $0,25 \cdot 10^{-3}$ | $0,43 \cdot 10^{-3}$ | $0,78 \cdot 10^{-3}$ |

Перехідні характеристики системи рівнянь по каналу «зміна вмісту солі в живильній воді – зміна міжкристалітної корозії» на трьох режимах роботи СПУ представлені на рис. 2.11.

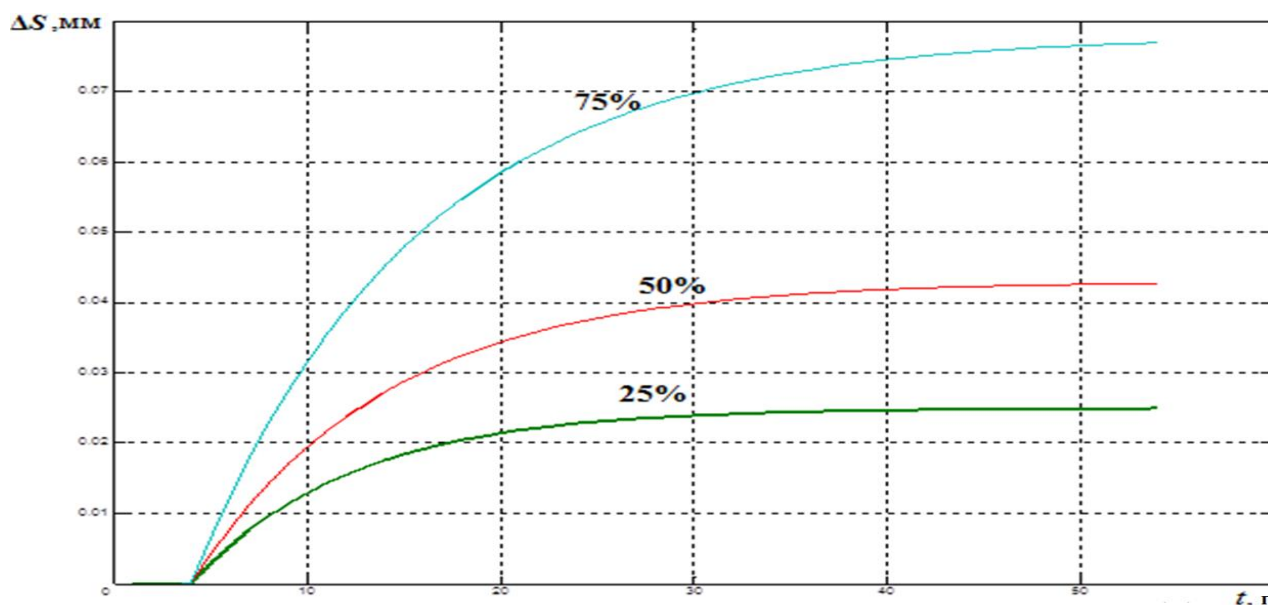


Рис. 2.11. Перехідні характеристики процесу виникнення міжкристалітної корозії при трьох режимах роботи СПУ

Графічні залежності демонструють збільшення процесу виникнення корозійного зносу в залежності від зростання теплового навантаження СПУ.



Киснева корозія - є найбільш небезпечним видом корозії на трубах і поверхнях нагріву СПУ. Характерною особливістю кисневої корозії є утворення місцевих точкових вогнищ корозії, що доходять до глибоких язвин і наскрізних дірок. Найбільш схильні до кисневої корозії вхідні ділянки економайзерів, колектори і опускні труби циркуляційних контурів. При експлуатації суднових котлів киснева корозія спостерігається в основному на вхідних ділянках економайзера, а при вмісті кисню більше 0,3 мг/кг вона з'являється на решті частини економайзера, в барабані котла і в опускних трубах [68].

На внутрішній поверхні барабана утворюються горбки - іржа коричневого кольору, під якою зазвичай є шар оксидів заліза чорного кольору. При очищенні металевою щіткою місць корозії виявляється язвина, яка, якщо не вжити заходів, може збільшитися аж до утворення свищів.

Найбільша кількість язвин розташовуються в паровому просторі барабанів котла, в місцях зі змінним рівнем води, під коробками сепараційних пристроїв та ін. Виходячи з важливості контролю даного параметра і значного його впливу на кисневу корозію  $K_k^{O_2}$  в барабані СПУ пропонується його використання в рівняння (2.6).

Таким чином, можна буде проаналізувати вплив ряду параметрів (витрати живильної води, витрата пара тощо) на процеси утворення кисневої корозії в барабані СПУ:

$$T_1^{26} \frac{d\Delta O_2}{dt} + \Delta O_2 = k_2^{26} \Delta G_{ПВ}(t - \tau) + k_4^{26} \Delta D(t - \tau) + k_8^{26} \Delta K_k^{O_2},$$

де  $k_8^{26} = f(O_2; t_{ПВ})$  – коефіцієнт, що визначає динаміку процесу кисневої корозії по концентрації  $O_2$  в живильній воді, розраховується на основі експериментальних залежностей [132].

Відомо, що час, який витрачається на діагностику і відновлення працездатного стану, безпосередньо залежить від пристосованості котла до проведення діагностичних і ремонтних операцій, тобто його

ремонтпригодність. Залежно від конструкції котла, виду палива, параметрів робочого середовища, напрацювання часу, марки сталі, режимів роботи обсяги діагностики, номенклатура засобів вимірювань і методика оцінки стану змінюються. Специфіка умов роботи СПУ призводить до зносу, різного за характером і за тяжкістю ураження деталей і вузлів, причому і те й інше змінюється зі збільшенням напрацювання і числа пусків котлів. Технічна діагностика СПУ стану виконується двома методами.

У першому - проводиться візуальний огляд фахівцями, які знають його вузли і деталі (елементи), що можуть бути найбільш ушкодженими, а також правила технічної експлуатації зазначеного обладнання. Другий метод заснований на використанні спеціальних приладів. До недоліків методу візуального контролю слід віднести ряд істотних факторів. Так не можна отримати відомості про дефекти, які розташовані в недоступних місцях, неможливо оцінити пошкодженість металу і зварних з'єднань по перетину, дізнатися його засміченість неметалевими включеннями, отримати відомості про структуру, хімічний склад і фізичні властивості тощо. Візуальним оглядом виявляються тільки великі дефекти, при цьому в ряді випадків відразу необхідно оперативно приймати рішення про можливість подальшої експлуатації.

Разом з тим, використання спеціалізованих засобів технічної діагностики елементів СПУ в процесі експлуатації не завжди представляється можливим в силу безперервності технологічного процесу і відсутності на судні необхідного обладнання. Також, для використання засобів діагностики необхідно залучення додаткового висококваліфікованого персоналу, що пов'язано зі збільшенням трудовитрат на експлуатацію СПУ. У зв'язку з зазначеним можна зробити висновок, що використання отриманих математичних моделей дозволяє оцінити процеси появи різних видів корозії в елементах СПУ, що може бути ефективним доповненням до заходів по оцінці технічного стану або альтернативою в разі виходу з ладу технічних засобів діагностики.

Узагальнюючи вищевикладене результати можна отримати нове **наукове положення** - оцінку зростання появи міжкристалічної, низькотемпературної, кисневої та хімічної корозії в елементах СПУ можна здійснити за допомогою моделей САУ, в системі моніторинга, які описують процеси концентрації розчинених речовин в котельній воді, швидкості протікання димових газів і пароутворення.

При роботі котла на загальну парову магістраль істотним є не тиск вологого пару  $\Delta P_B$  всередині пароводяного тракту, а тиск перегрітого пару  $\Delta P_M$  в паропроводі. Вхідними параметрами для моделі частки паропроводу являються тиск на вході  $\Delta P_B$  і виході  $\Delta P$  з паропроводу, ступінь відкриття регулюючого клапану  $\Delta \varphi_D$  і температура перегрітого пару  $\Delta t_{III}$  [132].

Для підсистеми СПУ диференціальні рівняння мають такий вигляд:

$$T_1^{27} \frac{\Delta P_M}{dt} + \Delta P_M = k_2^{27} \Delta P_B + k_4^{27} \Delta P + k_6^{27} \Delta \varphi_D + k_8^{27} \frac{d\Delta t_{III}}{dt} + k_{10}^{27} \Delta t_{III}, \quad (2.7)$$

де  $T_1^{27} = T_t \frac{K}{\bar{\rho}} \frac{\partial \rho}{\partial P}$ ;  $T_t = \frac{2m_{II}}{G_D}$ ;  $k_2^{27} = \frac{K}{\delta P_1}$ ;  $k_4^{27} = \frac{K}{\delta P_2}$ ;  $k_6^{27} = \frac{K}{\bar{\xi}_{KL}}$ ;  $k_8^{27} = -k_8^{27} T_t$ ;  $k_{10}^{27} = -\frac{K}{\bar{\rho}} \frac{\partial \rho}{\partial t}$ ;

$$K = \frac{1}{\frac{\partial P}{\partial P_1 \partial P_2} + \frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial \rho}{\partial P}}; \quad T' = \frac{T_1^{27}}{k_2^{27}}; \quad T'_t = T' - \mu T_t; \quad \mu = \frac{1 - k_2^{27}}{k_2^{27}},$$

де  $\bar{\rho}$  – щільність пару в паропроводі, кг/м<sup>3</sup>;  $m_{II}$  – маса пару в паропроводі, кг;  $\bar{P}$ ,  $\bar{P}_1$ ,  $\bar{P}_2$  – тиск пару в паропроводі, перед ним і за регулюючим органом, Па;  $\bar{t}$  – температура пару в паропроводі, К;  $\bar{\xi}_{KL}$  – приведений коефіцієнт гідравлічного спротиву клапана.

Розраховані значення коефіцієнтів рівняння (2.7) представлені в табл. 2.7

Таблиця 2.7

## Розрахункові коефіцієнти рівняння (2.7)

| Коефіцієнти<br>рівняння | 75 %    | 50 %    | 25 %    |
|-------------------------|---------|---------|---------|
| $T_1^{27}$              | 0,40    | 0,60    | 0,80    |
| $k_2^{27}$              | 0,30    | 0,34    | 0,37    |
| $k_4^{27}$              | 0,64    | 0,65    | 0,68    |
| $k_6^{27}$              | 18,90   | 10,60   | 4,70    |
| $k_8^{27}$              | -168,00 | -278,00 | -337,00 |
| $k_{10}^{27}$           | 196,00  | 199,00  | 201,00  |

Після підстановки розрахованих коефіцієнтів в (2.7) визначена система:

$$0,4 \frac{\Delta P_M}{dt} + \Delta P_M = 0,31 \Delta P_B + 0,64 \Delta P + 18,9 \Delta \varphi_D - 168 \frac{d\Delta t_{III}}{dt} + 196 \Delta t_{III};$$

$$0,6 \frac{\Delta P_M}{dt} + \Delta P_M = 0,34 \Delta P_B + 0,65 \Delta P + 10,6 \Delta \varphi_D - 278 \frac{d\Delta t_{III}}{dt} + 199 \Delta t_{III};$$

$$0,8 \frac{\Delta P_M}{dt} + \Delta P_M = 0,37 \Delta P_B + 0,68 \Delta P + 4,7 \Delta \varphi_D - 337 \frac{d\Delta t_{III}}{dt} + 201 \Delta t_{III}.$$

Іншим вихідним параметром, зміни якого в перехідному процесі необхідно знайти, є витрата пара в паропроводі. Диференційні рівняння, які описують вплив тиску пару на вході і виході магістралі, ступеня відкриття регулюючого органу і температури перегрітої пари на витрату пари в паропроводі можуть бути записані з урахуванням [132] наступним чином:

(2.8)

$$T_1^{28} \frac{d\Delta D_n}{dt} + \Delta D_n = k_2^{28} \Delta P_B + k_3^{28} \frac{d\Delta P}{dt} + k_4^{28} \Delta P + k_5^{28} \frac{d\Delta \varphi_D}{dt} + k_6^{28} \Delta \varphi_D + k_7^{28} \frac{d\Delta t_{III}}{dt} + k_8^{28} \Delta t_{III};$$

$$T_1^{28} = T_1^{27}; k_2^{28} = \mu \sigma k_2^{27}; k_3^{28} = -\sigma k_4^{27} T'; k_4^{28} = -\sigma k_4^{27}; k_5^{28} = -\sigma k_6^{27} T'; k_6^{28} = -\sigma k_6^{27};$$

$$k_7^{28} = \sigma k_8^{27} T'_t; k_8^{28} = \sigma k_8^{27}; \sigma = \frac{\bar{G}_D}{2\delta P_1},$$

де  $\bar{G}_D$  – витрата пару з барабану з урахуванням навантаження, кг/с;

Розраховані значення коефіцієнтів рівняння (2.8) представлені в табл. 2.8. Після підстановки розрахованих коефіцієнтів в (2.8) визначена система лінійних диференційних рівнянь:

$$0,4 \frac{d\Delta D_n}{dt} + \Delta D_n = 0,2\Delta P_B + 0,64 \frac{d\Delta P}{dt} - 0,27\Delta P - 0,67 \frac{d\Delta \varphi_D}{dt} - 0,56\Delta \varphi_D - 0,9k_{28} \frac{d\Delta t_{III}}{dt} - 0,7\Delta t_{III};$$

$$0,8 \frac{d\Delta D_n}{dt} + \Delta D_n = 1,2\Delta P_B + 0,68 \frac{d\Delta P}{dt} - 1,71\Delta P - 0,83 \frac{d\Delta \varphi_D}{dt} - 0,91\Delta \varphi_D - 0,13 \frac{d\Delta t_{III}}{dt} - 1,2\Delta t_{III}.$$

Таким чином, математична модель СПУ, яка характеризує динамічні властивості основних регульованих параметрів, і лінеаризована в межах одного режиму функціонування, описується системою диференціальних рівнянь восьмого порядку (2.1) – (2.8). Дане припущення є достатньою умовою для детального аналізу ефективності САУ СПУ.

Наведені співвідношення дозволяють отримати чисельні значення коефіцієнтів диференційних рівнянь, що описують динамічні властивості всіх технологічних ділянок котла в діапазоні 25 ... 75 % його теплового навантаження. Отримана система диференційних рівнянь може бути доповнена моделями первинних перетворювачів для кожного контролюваного параметра, які враховують динамічні властивості вимірювального перетворювача, а також імпульсних ліній.

Динаміка вимірювальних каналів за рівнем води в барабані, розрідженню димових газів, солевмістом котельної води, витраті і тиску пари може бути описана інерційною ланкою першого порядку з транспортним запізненням, яке присутнє в парогенеруючих установках. Постійні часу датчиків беруться з їх паспортних характеристик, час транспортного запізнювання може бути визначено експериментальним шляхом

Таблиця 2.8

## Розрахункові коефіцієнти рівняння (2.8)

| Коефіцієнти<br>рівняння | 75 %  | 50 %  | 25 %  |
|-------------------------|-------|-------|-------|
| $T_1^{27}$              | 0,40  | 0,60  | 0,80  |
| $k_2^{27}$              | 0,20  | 0,90  | 1,20  |
| $k_3^{27}$              | 0,64  | 0,65  | 0,68  |
| $k_4^{27}$              | -0,27 | -0,86 | -1,71 |
| $k_5^{27}$              | -0,67 | -0,72 | -0,83 |
| $k_6^{27}$              | -0,56 | -0,64 | -0,91 |
| $k_7^{27}$              | -0,90 | -0,11 | -0,13 |
| $k_8^{27}$              | -0,70 | -0,90 | -1,20 |

Розрахована система рівнянь з метою визначення ступеня адекватності моделі реальному об'єкту, промодельована за допомогою пакету прикладних програм Matlab. Результати моделювання (рис. 2.12 – 2.15) для 75 % теплового навантаження СПУ (величина збурення витратою палива прийнята рівною 0,04 кг/с (10 % від встановленої витрати), допустимо узгоджується (похибка не більше 10 %) з результатами експериментальних досліджень [156], проведених на Одеській ТЕЦ, оснащений водотрубними котлами середньої потужності типу ГМ-50, паровою продуктивністю 50 т/год і робочим розподілом 1,5 МПа, що відповідає розгляд утому СПУ Mitsubishi MAC-B 50.

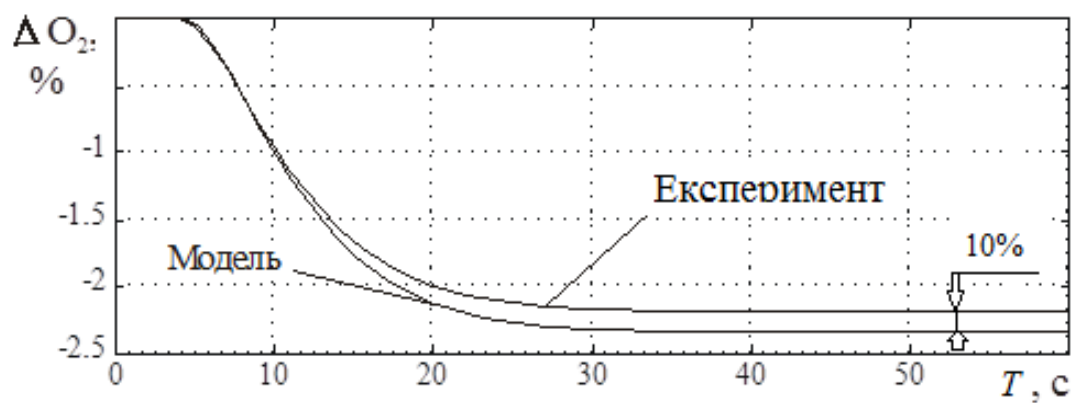


Рис. 2.12. Зміни концентрації кисню в вихідних газах

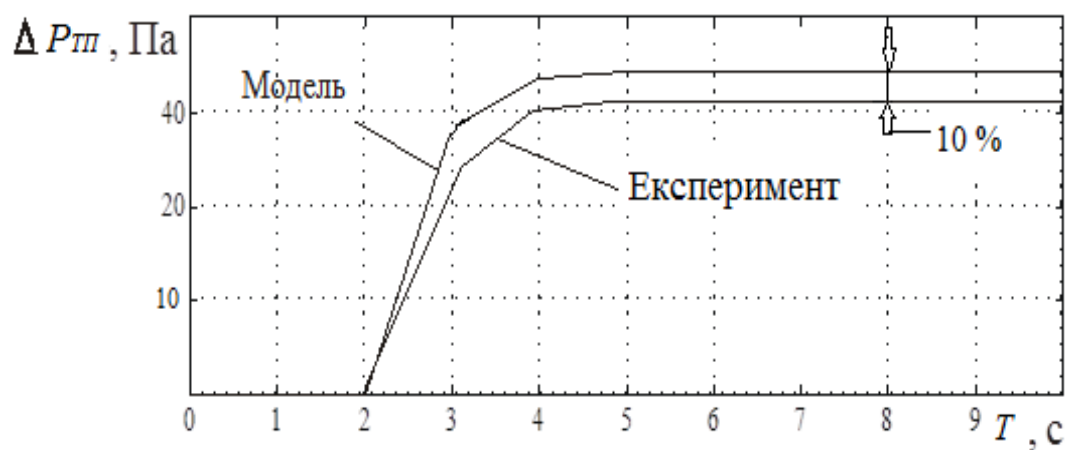


Рис. 2.13. Зміни розрідження в топочній камері

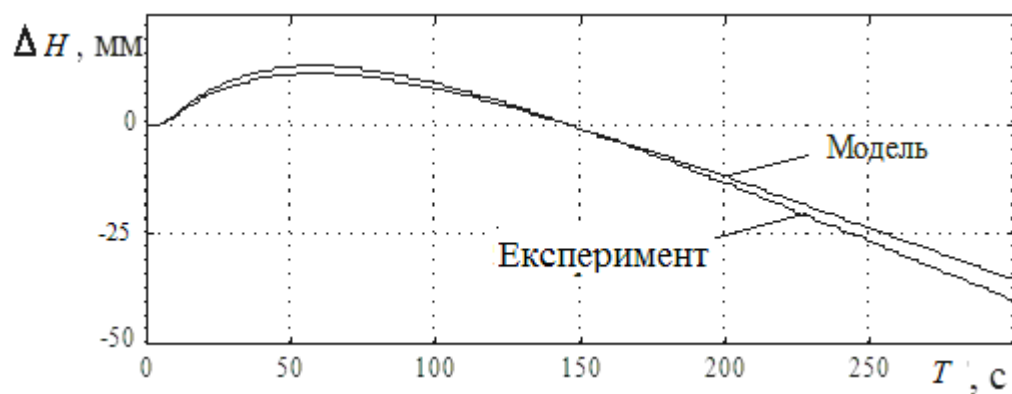


Рис. 2.14. Зміни рівня води в барабані котла

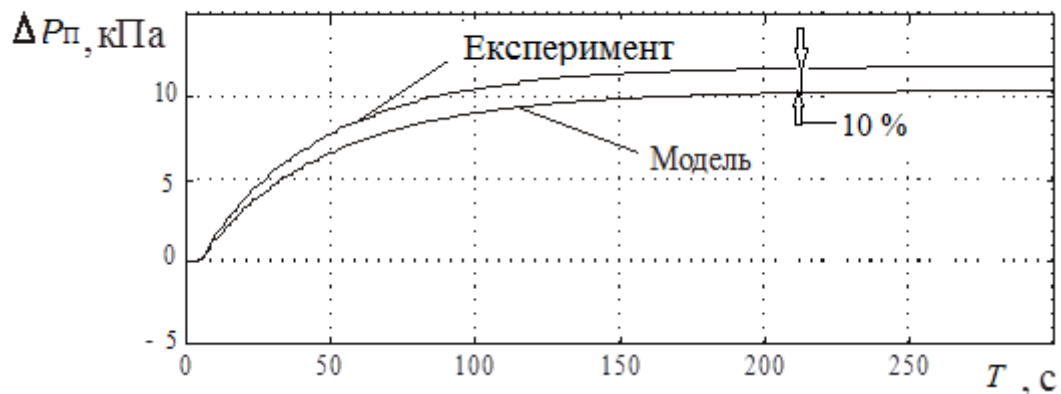


Рис. 2.15. Зміни тиску перегрітого пару в паропроводі

## 2.2. Аналітична модель системи регулювання температури перегрітої пари

Оскільки температура перегрітої пари, що надходить в СПТУ, є ключовим параметром, що впливає на її ККД [233, 235,236], була складена математична модель каналу регулювання температури перегрітої пари СПУ Mitsubishi MAC 180 (рис. 2.16) за допомогою аналітичного методу ідентифікації [168].

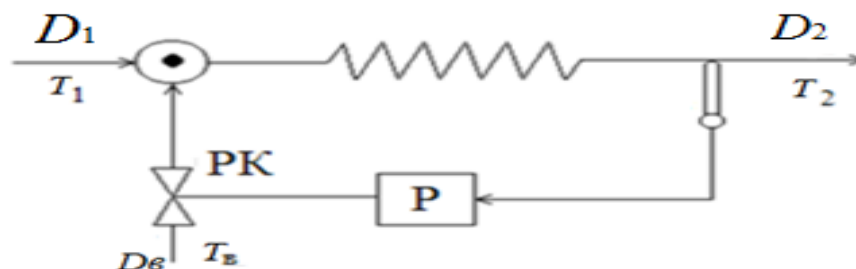


Рис. 2.16. Схема САУ температури перегрітої пари СПУ Mitsubishi MAC 180: P – ПІ – регулятор;  $T_1$ – термоелектричний термометр; PK – регулюючий клапан;  $D_1$  – витрата пару, поступаючого в парохолоджувач з температурою  $T_1$ ;  $D_в$  – кількість води, що впорскується з температурою  $T_в$ ;  $D_2$  – витрата перегрітого пару, поступаючого в турбину;  $T_2$  – температура перегрітого пару



Значення параметрів СПУ приймаються для номінального режиму. Виходячи з діапазонів значень величин паспортних даних головного суднового водотрубний парогенератору Mitsubishi MAC 180 [205], регламентними значеннями при номінального навантаження є значення:

- для витрати пару –  $D^{п0} = 150$  т/год ( 42 кг/с);
- для температури охолоджуючої води (конденсату) –  $t_{в0} = 25$  °С;
- для температури пару на вході при тиску  $P = 2$  МПа, –  $t_{10} = 350$  °С;
- для температури пару на виході –  $t_{20} = 320$  °С;
- для температури навколишнього середовища (машинного відділення) –  $t_{oc,0} = 45$  °С.

Введемо в розгляд наступні величини, що беруть участь в процесі передачі тепла від гарячого носія – пару до холодного носія – охолоджуючої води:

- витрата пару на вході –  $D_1$ , кг/с;
- температура пару на вході –  $t_1$ , °С;
- витрата пару на виході –  $D^2$ , кг/с, ( $D^2 = D^1$ );
- температура пару на виході –  $t_2$ , °С;
- витрата охолоджуючої води –  $D_в$ , кг/с;
- витрата тепла в апараті на охолодження пару –  $Q_п$ , кДж/с;
- витрата тепла в апараті на нагрів стальних труб –  $Q_т$ , кДж/с;
- витрата тепла, що вноситься в апарат водою –  $Q_в$ , кДж/с;
- витрата тепла, що вноситься в апарат паром –  $Q_1$ , кДж/с;
- витрата тепла, що виноситься з апарату паром –  $Q_2$ , кДж/с;
- витрата тепла, що передається апаратом в атмосферу –  $Q_{пот}$ , кДж/с;
- питома теплоємність пару –  $c_п$ , (кДж/кгК).

За умовами протікання усталеного процесу можна допустити, що такі параметри пару, як обсяг  $V$  в апараті, щільність  $\rho_n$  і теплоємність  $c_n$  залишаються постійними. Для складання математичної моделі додатково приймемо такі

припущення:  $t_6 = \text{const}$  і  $t_1 = \text{const}$ . В результаті розгляду технологічного процесу в апараті, умов його протікання і зроблених припущень змінним величинам в процесі розумно зробити наступні призначення:

- керована величина  $t_2$ , цей параметр істотно впливає на витрати енергії в подальших операціях у судновій паровій турбіні;
- обурюються величина  $D_n$ , так як кількість (витрата пара) визначає продуктивність СЕУ;
- керуюча величина  $D_v$ .

Складемо рівняння енергетичного (теплового) балансу для приходу-витрати тепла (в кДж/с) в апараті (пароперегрівачі) при його функціонуванні в сталому режимі:

$$Q_n = Q_1 - Q_6 - Q_m - Q_2 - Q_{\text{пот}}, \quad (2.9)$$

де величини, що входять в рівняння, були вказані вище при їх включенні до переліку розглянутих, а знаки доданків відповідають приходу тепла в апарат (+) і його витраті (-).

З виникненням збурюючого впливу за час  $t$  всі інші величини, що входять в рівняння статички (усталеного режиму), отримають свої відхилення, а рівняння динаміки запишеться у вигляді:

$$\frac{dQ_n}{dt} = \left( \frac{dQ_1}{dt} - \frac{dQ_6}{dt} - \frac{dQ_m}{dt} - \frac{dQ_2}{dt} - \frac{dq_{\text{ном}}}{dt} \right).$$

Кожен з параметрів (диференціалів) рівняння подається окремо, починаючи з теплоти, що постійно знаходиться в апараті. Прийнято допущення при аналізі процесу вважати:  $t_n = 0,5(t_1 + t_2)$ , з урахуванням допущення про те, що  $t_1 = \text{const}$ ,  $Q^n = Q_n(t_2)$ :

$$\frac{dQ_n}{dt} = 0,5V \cdot \rho_n \cdot c_n \cdot \frac{dt_2}{dt},$$

по закону Ньютона-Ріхмана [136]:

$$Q^m = \alpha \cdot F^m \cdot (t^B - t^{CT}),$$

так як  $t_b = \text{const}$  и  $t_1 = \text{const}$ , а  $t_{ct} = 0,5(t_1 + t_2)$ , то  $Q_T = Q_T(t_2)$ , тоді

$$\frac{dQ_m}{dt} = -0,5 \cdot \alpha \cdot F_m \cdot \frac{dt_2}{dt},$$

переходимо до оцінки теплоти, що виходе з апарату

$$Q^B = i^B \cdot D^B,$$

значення  $i^B$  при різних тисках табульовані. Потому  $Q_B = Q_B(D_B)$  і

$$\frac{dQ_B}{dt} = i_B \cdot \frac{D_B}{dt},$$

$$Q_1 = c_n \cdot D_n \cdot t_1,$$

з урахуванням допущень  $c_n = \text{const}$  и  $t_1 = \text{const}$ ,  $Q_1 = Q_1(D_n)$ , тоді:

$$\frac{dQ_1}{dt} = c_n \cdot t_{10} \cdot \frac{D_n}{dt},$$

також з апарату виходять:

$$Q_2 = c_n \cdot D_n \cdot (t_2 - t_1),$$

з урахуванням допущень  $Q_2 = Q_2(D_n, t_2)$ , тоді:

$$\frac{dQ_2}{dt} = c_n \cdot (t_{20} - t_{10}) \cdot \frac{D_n}{dt} + c_n \cdot D_{n0} \cdot \frac{dt_2}{dt},$$

якщо під втратами розуміти теплоту, що віддається паром через стінку корпусу апарату, то за законом Фур'є [136]:

$$Q_{\text{пот}} = (\lambda_{\text{ст.к}} / \delta_{\text{ст.к}}) \cdot F_{\text{ст.к}} \cdot (t_k - t_{o.c}),$$

де  $\lambda$ ,  $\delta$  и  $F$  – коефіцієнт теплопровідності, товщина і площа внутрішньої поверхні стінки корпусу апарату, а  $t_{o.c}$  – температура навколишнього середовища.

Оскільки всі вхідні в формулу величини є або константами, або фіксовані конструкцією апарату ( $\delta_{\text{ст.к}}$ ,  $F_{\text{ст.к}}$ ) і умовами експлуатації ( $t_{o.c}$ ),  $Q_{\text{пот}}$  не залежить від величин, що включені в розгляд. Це означає, що

$$\frac{dq_{\text{ном}}}{dt} = 0.$$

Вхідні в рівняння (2.9) параметри визначені і представлені вище. Після підстановки їх в рівняння (2.9) і виконання перетворення:

$$0,5V \cdot \rho_n c_n \cdot \frac{dt_2}{dt} = (i_e \frac{dD_e}{dt} - c_n \cdot t_{10} \cdot \frac{dD_n}{dt} - 0,5\alpha \cdot F_T \cdot \frac{dt_2}{dt} - c_n \cdot (t_{20} - t_{10}) \cdot \frac{dD_n}{dt} - c_n \cdot D_{n0} \frac{dt_2}{dt}) \cdot \quad (2.10)$$

Після групування доданків щодо розглянутих змінних ( $t_2$ ,  $D_n$ ,  $D_b$ ), перенесення виразу, що містить керовану змінну, в ліву частину, рівняння (2.3) представлено в наступному вигляді:

$$0,5V \cdot \rho_n c_n \cdot \frac{dt_2}{dt} + (c_n \cdot D_{n0} - 0,5\alpha \cdot F_T) \cdot \frac{dt_2}{dt} = i_e \frac{dD_e}{dt} - c_n \cdot (2t_{20} - t_{10}) \cdot \frac{dD_n}{dt} \cdot \quad (2.11)$$

Введемо позначення:

$$0,5 V \cdot \rho_{ncn} / (c_n D_{n0} - 0,5\alpha \cdot F_T) = T; \quad (2.12)$$

$$(i_e D_b) / (c_n D_{n0} - 0,5\alpha \cdot F_T) = K_1; \quad (2.13)$$

$$c_n (2 t_{20} - t_{10}) / (c_n D_{n0} - 0,5\alpha \cdot F_T) = K_2, \quad (2.14)$$

після підстановки (2.12 – 2.14) в (2.11) рівняння динаміки (2.11) прийме вид:

$$T_2 \frac{dt_2}{dt} + t_2 = K_1 \frac{dD_e}{dt} - K_2 \frac{dD_n}{dt}. \quad (2.15)$$

Задача зводиться до визначення чисельних значень постійної часу  $T$  і коефіцієнтів  $K_1$  і  $K_2$  з ціллю подальшого отримання передатних функцій і проведення аналізу САУ з лінійними регуляторами в програмному додатку MatLab.

Для перевірки проведених розрахунків була визначена розмірність  $T$ :

$$[T] = [(m^3 \cdot kg \cdot Дж/м^3 \cdot кг) / (КДж \cdot кг/кг \cdot ^\circ K \cdot c) - (вт \cdot м^2 / м^2 \cdot ^\circ K)] = [c], \text{ так як } Джс = Вт.$$

Для визначення значення  $T$  окрім табличних значень  $\rho_n$  і  $c_n$ , регламентного значення витрати води  $D_{b0}$ , необхідно вичислити по конструктивним параметрам загальну площу  $F_T$  контакту пару з трубою і об'єм пару в трубі, а також коефіцієнт теплопередачі  $\alpha$  при передачі тепла пару на стінки труби пароперегрівача. При розрахунку  $F^T$  закруглення труб змінимо прямими частками будемо вважати довжину труби  $L = 15$  м,  $d^{нар} = 0,2$  м, тоді  $F^T = \pi \cdot d^{нар} \cdot L$ :

$$F_T = 3,14 \cdot 0,2 \cdot 15 = 9,42 \text{ м}^2.$$

Для вирахування  $\alpha$  скористаємося [136],  $\alpha = 19,79$  кДж/(м<sup>2</sup> · °К).

Внутрішній об'єм труби:  $V = 0,47$  м<sup>3</sup>, щільність перегрітого пару при тиску  $P = 2$  МПа рівна  $\rho_p = 7,925$  кг/м<sup>3</sup>, теплоємність  $c_p = 2,24$  кДж/кгс.

Значення постійної часу по (2.12) складе:

$$T = 0,47 \cdot 7,92 \cdot 2,24 / 2(2,24 \cdot 42 - 0,5 \cdot 19,79 \cdot 9,42) = 8,42 / 1,66 = 5,07 \text{ с.}$$

При визначенні значення коефіцієнта  $K_1$  необхідно враховувати питому ентальпію охолоджуючої води, яка дорівнює  $i_b = 83,91$  кДж/кг [136].

По формулам (2.13) і (2.14) визначені коефіцієнти:

$$K_1 = (83,9 \cdot 10) / (1,66) = 505,4;$$

$$K_2 = 2,24 \cdot (2 \cdot 320 - 350) / (1,66) = 391,3,$$

рівняння динаміки (2.15) набуває остаточного вигляду:

$$5,07 \frac{dt_2}{dt} + t_2 = 505,4 \frac{dD_e}{dt} - 391,3 \frac{dD_n}{dt}. \quad (2.16)$$

Для подальшого дослідження лінійної САУ температури пару в програмному забезпеченні MatLab (Simulink) [38] до обох частин рівняння (2.16) застосовувалося перетворення Лапласа [138]. З урахуванням роботи СПУ в номінальному режимі, ступінь відкриття регулюючого органу складає 100 %, тоді  $K_1 = 5,05$ ;  $K_2 = -3,91$ .

Передатні функції САУ температури перегрітого пару СПУ Mitsubishi MAC 180 по каналам управління  $W_1(s)$  і збурення  $W_2(s)$  мають наступний вигляд:

$$W_1(s) = \frac{5,05}{5,07s + 1}; \quad (2.17)$$

$$W_2(s) = \frac{-3,91}{5,07s + 1}. \quad (2.18)$$

Таким чином, на основі аналітичного підходу було отримано рівняння динаміки процесу регулювання температури перегрітого пару в судовому пароперегрівачі. Як показали досліди експлуатації та розрахунки [54, 57], якісне регулювання температури пару можливо, якщо відношення постійної часу  $T$  до

запізнювання  $\tau$  перебувати в діапазоні:  $\tau/T \leq (0,27 \div 0,36)$ .

Отримана аналітична модель може бути використана для настройки типових лінійних ПІ або ПІД-регуляторів САУ температури перегрітого пару СПУ серії Mitsubishi MAC.

Високотемпературна (ванадієва) корозія вражає поверхні нагрівання пароперегрівачів, розташовані в зоні високих температур газів  $t_{\text{дг}}$ . При спалюванні палива відбувається утворення окислів ванадію. При цьому при нестачі кисню утворюється триокис ванадію, а при його надлишку – п'ятиокис ванадію. П'ятиокис ванадію, що виділяється при спалюванні мазутів, налипає на поверхні нагрівання, що мають високу температуру, і викликає активне руйнування металу. Досліди показали, що навіть такі змісту ванадію, як 0,005 % за ваговим складом можуть викликати небезпечну корозію [4].

Ванадієвій корозії можна запобігти зниженням допустимої температури металу елементів котла і організацією горіння з мінімальними коефіцієнтами надлишку повітря  $\alpha = 1,03 - 1,04$ . З урахуванням даного процесу і прямого впливу температури перегрітого пару на температуру металу  $t_m$  пароперегрівача, рівняння (2.15) пропонується доповнити новим параметром  $T_k^t$ , що характеризує процес високотемпературної корозії:

$$T_2 \frac{dt_2}{dt} + t_2 = K_1 \frac{dD_a}{dt} - K_2 \frac{dD_n}{dt} + K_3 \frac{dT_k^t}{dt},$$

де  $K_3 = f(t_{\text{дг}}, O_2, t_m)$ , визначається за експериментальними залежностями.

Додавання нового параметра може дозволити провести додаткові дослідження по впливу температури перегрітого пару на процес ванадієвої корозії

### 2.3. Розробка математичних моделей СПУ за допомогою експериментально - статистичних методів

Одним з найбільш поширених методів динамічної ідентифікації парогенеруючих і інших теплових систем, заснованих на результатах пасивного експерименту, є метод Р. Калмана [200].

Згідно з методом Р. Калмана [200], для ідентифікації параметрів СПУ використовується різницеве рівняння першого порядку:

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

Для спрощення розрахунків прийемо інтервал часу вимірів даних  $\Delta t = 10$  хв.

Для мінімізації суми квадратів відхилень запишемо функціонал, що визначає адекватність аналітичного рівняння (моделі) виду:

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

Прирівняємо нулю приватні похідні від функціоналу:

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

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

І з урахуванням того, що

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

одержимо систему канонічних рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} A_0 &= \sum_1^m \Theta_{n-1} + B_0 m \Theta_{уст} \Theta_{уст} = \sum_1^m \Theta_n \\ A_0 &= \sum_1^m \Theta_{n-1}^2 + B_0 \Theta_{уст} \sum_1^m \Theta_{n-1} = \sum_1^m \Theta_n \Theta_{n-1} \end{aligned} \right\}$$

звідки

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

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

де  $m$  – число експериментальних точок (вимірювань).

Представлений метод реалізований для динамічної ідентифікації на прикладі температури перегрітого пару на виході з допоміжних парогенеруючих установок Mitsubishi MB 220 [205]. Перехідний режим процесу експлуатації, викликаний глибокою зміною парового навантаження СПУ, перехідні характеристики, отримані за допомогою суднової комп'ютерної системи моніторингу, показані на рис. 2.8. Часовий інтервал спостереження за температурою: з 6.25 годин до 7.15 годин.

Результати спостережень при паровому навантаженні СПУ, яке дорівнює 1,1 від номінального, наведені в табл. 2.9. За допомогою експериментальної залежності, отриманої на танкері «SEA TRIUMPH» дедвейтом 350 тис тон, з СПУ високої паропродуктивності Mitsubishi MB 220, що працює на СПТУ, визначено математичну модель по процесу 1 (див. процес 1 рис. 2.17).



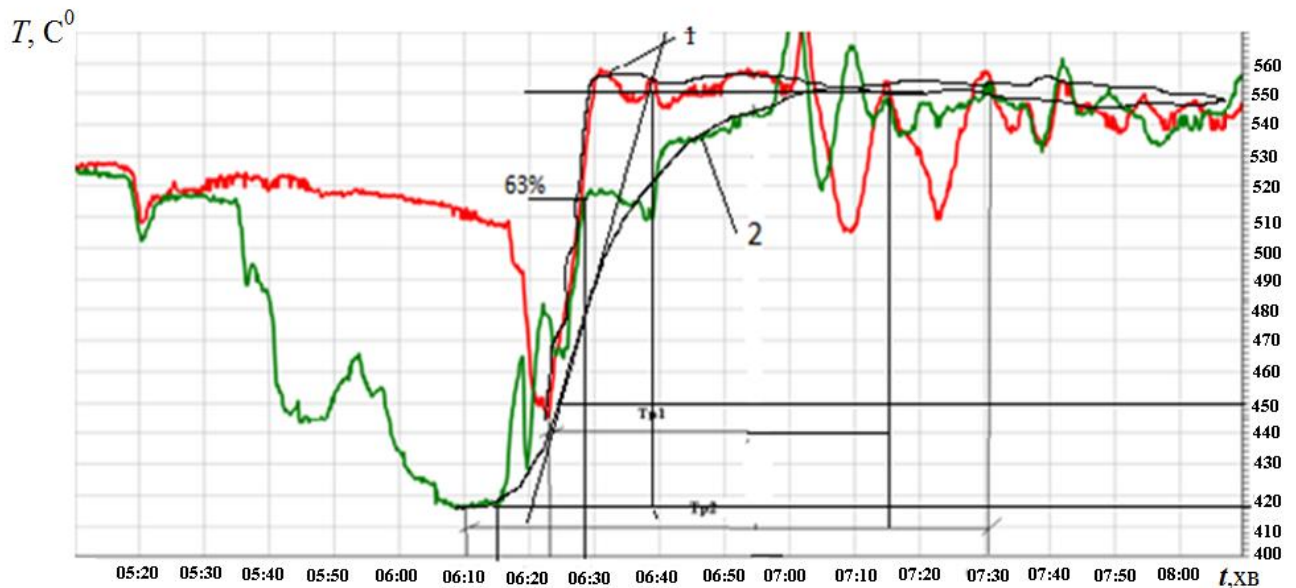


Рис. 2.17. Перехідні процеси температури перегрітої пари СПУ Mitsubishi MB паропродуктивністю 220 т/год: 1 – процес СПУ при зміні навантаження ( $P^N$ ) с 0,8 до 1,1  $P^N_{\text{ном}}$ ; 2 – перехідний режим СПУ при зміні навантаження с 0,6 до 1,1  $P^N_{\text{ном}}$ ;  $T_p$  – час регулювання процесів

Паспортні характеристики використовуваних засобів вимірювання вказані в [49]. Клас точності зазначених приладів знаходиться в діапазоні 1,5 – 2, з межею основної похибки ( $\pm 1,5 - 2\%$ ), засоби вимірювання пройшли перевірку відповідно до вимог [130]. Вся вимірювальна інформація в режимі реального часу надходить в систему моніторингу, реалізовану в SCADA-системі. Подальша статистична обробка експериментальних даних на основі методів теорії планування експерименту [60], реалізованого в програмному забезпеченні додатки MatLab [39] дозволяє отримати математичні моделі з високим ступенем адекватності, виходячи з інформації представлені розробниками програми System identification toolbox [39].

Таблиця 2.9

Експериментальні дані температури перегрітої пари СПУ Mitsubishi MB 220

|                          |      |      |       |      |      |       |       |      |      |      |
|--------------------------|------|------|-------|------|------|-------|-------|------|------|------|
| $t$ , год                | 6,25 | 6,30 | 6,35  | 6,40 | 6,45 | 6,50  | 6,55  | 7,00 | 7,05 | 7,10 |
| $Y$ , °C                 | 445  | 500  | 540   | 542  | 545  | 548   | 550   | 552  | 555  | 555  |
| $Y_{\text{моделі}}$ , °C | —    | —    | 542,5 | —    | —    | 548,5 | 549,7 | —    | —    | —    |

Дані спостереження показують, що температура перегрітої пари змінилася від  $Y_{\text{нач}} = 445$  °C до  $Y_{\text{уст}} = 555$  °C. Для ідентифікації аналізованого процесу використовується різницеве рівняння першого порядку:

$$Y_n = A_0 Y_{n-1} + B_0 Y_{\text{уст}}. \quad (2.19)$$

Для спрощення розрахунків приймемо інтервал часу замірів  $\Delta t = 10$  хвилин. Для мінімізації суми квадратів відхилень використовується функціонал:

$$F = \min \sum_1^m (Y_{\text{expn}} - Y_n)^2 = \min \sum_1^m (Y_n - A_0 Y_{n-1} - B_0 Y_{\text{уст}})^2;$$

$$A_0 = \frac{m \sum_1^m Y_n Y_{n-1} - \sum_1^m Y_{n-1} \sum_1^m Y_n}{m \sum_1^m Y_{n-1}^2 - (\sum_1^m Y_{n-1})^2}; \quad B_0 = \frac{\sum_1^m Y_n \sum_1^m Y_{n-1}^2 - \sum_1^m Y_{n-1} \sum_1^m Y_n Y_{n-1}}{Y_{\text{уст}} (m \sum_1^m Y_{n-1}^2 - (\sum_1^m Y_{n-1})^2)}, \quad (2.20)$$

де  $m$ - число експериментальних точок. Інтервал часу прийнятий рівним 10 хвилин і з отриманих експериментальних даних (табл. 2.9) при  $m = 4$  вибираємо точки  $[0; 10; 20; 30; 40]$ . Тоді:

$$\sum_1^4 Y_n = 2190; \quad \sum_1^4 Y_{n-1} = 2080; \quad \sum_1^4 Y_{n-1}^2 = 1094675; \quad \sum_1^4 Y_n Y_{n-1} = 1139600.$$

Підставляючи одержані значення в (2.12), одержимо  $A_0=0.061$ ,  $B_0=0.93$  і різницеве рівняння при  $Y_{\text{уст}} = 555$  °C приймає вид згідно (2.19):

$$Y_n = 0,061 Y_{n-1} + 516,15. \quad (2.21)$$

Для перевірки адекватності математичної моделі за отриманим висловом, в рівняння (2.21) підставляються експериментальні значення з табл. 2.9 при прийнятих інтервалах часу. Порівняльний аналіз експериментальних значень  $Y$ , і

значень, отриманих за результатами розрахунку математичної моделі  $Y$  моделі (2.21) при часу вимірів (6.35; 6.50; 6.55) демонструє допустиму адекватність моделі об'єкту (див. табл. 2.9). Різницеве рівняння (2.21) можна представити диференціальним рівнянням першого порядку виду:

$$T \frac{dY}{dt} + Y = Y_{уст}, \quad (2.22)$$

рішенням якого являється:  $Y = Y_{уст} (1 - e^{-t/T}) + Y_{нач} e^{-t/T}$ , де, установивши  $Y = Y_n$ ,  $Y_{нач} = Y_{n-1}$  і  $t = n\Delta t$ , при  $n=1$  одержимо  $A_0 = e^{-\Delta t/T}$ , виходячи з цього постійна часу  $T = -\Delta t / \ln A_0 = -10 / \ln(0,061) = 3.58$  хв. Таким чином диференціальне рівняння (2.22) має вид:

$$3.58 \frac{dY}{dt} + Y = 555. \quad (2.23)$$

Рівняння (2.23) може бути представлено після перетворення Лапласа [139] і врахування ступеня відкриття регулюючого органу на 100 % ходу, у вигляді інерційної ланки першого порядку виду:

$$W(s) = \frac{5,55}{3,58s + 1}. \quad (2.24)$$

Отримана експериментальним шляхом передавальна функція по каналу управління відповідає типу передавальної функції (див. рис. 2.17), отриманої аналітичним шляхом, що підтверджує її адекватність робочого режиму СПУ.

Графо-аналітична обробка [138] температурних процесів САУ (див. рис. 2.15) показала наступні результати: з урахуванням впливу збурення (ступінь відкриття клапана на впорскування охолоджуючої води), визначається коефіцієнт посилення  $K$  об'єкту по каналу регулювання при роботі СПУ в динамічному режимі т.є. збільшенні парового навантаження СПУ МВ на 30 %. За графіком 1 (див. рис. 2.15),  $\Delta Y = 555 - 450 = 105$  °C, збурення клапаном  $\Delta N = 20$  %. Тоді  $K = 5,25$  (°C /% УП), де УП – свідчення показчика положення клапана. Обробка кривої розгону з урахуванням, що постійна часу дорівнює

часу досягнення вихідною величиною 63,2 % від загального її відхилення:  $T = 6.28 - 6.25 = 3$  хв. Дозволяє отримати передавальну функцію такого вигляду:

$$W(s) = \frac{5,25}{3s + 1}. \quad (2.25)$$

Можна відзначити, що використані методи дозволяють отримати математичні моделі широкого класу парогенеруючих і теплових об'єктів СЕУ.

Порівняльний аналіз значень передатних функцій, розрахованих за допомогою методу Р. Калмана і графо-аналітичного методів (2.24) і (2.25), демонструє допустиму розбіжність значень, що вказує на адекватність отриманих моделей об'єкту управління і можливість їх подальшого використання для моделювання САУ параметрів об'єктів СПУ.

Слід зазначити, що при зміні парового навантаження СПУ (вихід параметрів на заданий режим), відбувається відповідна зміна як значень параметрів передавальної функції так і її порядку.

Розглянемо роботу СПУ при збільшенні навантаження на 50 % від заданого, показаної на процесі 2 (див. рис. 2.15). Згідно методу Стрейца [122] порядок об'єкта визначається формулою:  $n = T_a / \tau = (6,40 - 6,20) / (6,15 - 6,10) = 4$ . За таблицями методу Стрейца [122] для об'єктів третього порядку  $n = T_a / \tau = 4,59$ , таким чином, порядок об'єкта дорівнює 3, тому що розраховане значення 3 відрізняється від табличного 4, то об'єкт має чисте запізнення  $\tau_0$ . Також по таблиці визначаються постійна часу  $T$ , для  $n = 3$  ( $T_a / T = 3,7$ ) звідси  $T = 5,4$  хв, ємнісне запізнення  $\tau_e = 4,4$ , чисте  $\tau_0 = \tau - \tau_e = 0,6$  с. З процесу 2 (див. рис. 2.8), який демонструє збільшення парового навантаження СПУ МВ на 50 % очевидно, що  $\Delta Y = 550 - 420 = 130$  °С, збурення клапаном  $\Delta N = 15$  %, тоді коефіцієнт посилення  $K = 8,66$ . Передатна функція по каналу управління після переходу на новий рівень парового навантаження СПУ (збільшення паропродуктивності на 50 % від діючої):

$$W(s) = \frac{8,66e^{-0,6s}}{(5,4s+1)^3}. \quad (2.26)$$

Передатну функцію (2.26) після зворотного перетворення Лапласа можна представити в виді:

$$157,5 \frac{d^3 y}{dt^3} + 87,5 \frac{d^2 y}{dt^2} + 16,2 \frac{dy}{dt} + y = 8,66x(t - 0,6)$$

де  $y$  – температура пари;  $x$  – кількість охолоджувача в пароперегрівачі СПУ Mitsubishi MB 220.

Як видно з порівняння значень параметрів моделей (2.25) і (2.26) зміна парового навантаження СПУ істотно впливає на значення і порядок передатних функцій по каналах управління і збурення. Таким чином, для отримання більш точних математичних моделей процесів СПУ з метою подальшого досягнення оптимальних перехідних процесів в САУ параметрів СПУ необхідне проведення активних експериментальних досліджень підсистем СПУ.

Також, аналітичний метод Р. Калмана [200] був реалізований програмно в додатку Excel (рис. 2.18) для одержання передатної функції СПУ Mitsubishi MB 220 по каналу «витрата палива – тиск пари» при наборі парового навантаження від 0 до 70 % від номінальної і підтримки тиску пари 4,8 МПа. Порівняльна перевірка експериментальних і аналітичних значень (див. рис. 2.16) підтвердила адекватність одержаної математичної моделі (2.21).

Програма, що реалізує метод Р. Калмана (див. рис. 2.18), розраховувала значення передатної функції СПУ MB 220 по каналу «витрата палива – тиск пари»:

$$W(s) = \frac{0,44}{5,54s+1}. \quad (2.27)$$

|                                           |   |                    |      |             |                   |        |      |        |      |         |                        |                        |          |          |         |     |
|-------------------------------------------|---|--------------------|------|-------------|-------------------|--------|------|--------|------|---------|------------------------|------------------------|----------|----------|---------|-----|
| СУММ    X    ✓    fx    =0,44/(5,54*S +1) |   |                    |      |             |                   |        |      |        |      |         |                        |                        |          |          |         |     |
| B                                         | C | D                  | E    | F           | G                 | H      | I    | J      | K    | L       | M                      | N                      | O        | P        | Q       | R   |
| Метод КАЛМАНА                             |   |                    |      |             |                   |        |      |        |      |         |                        |                        | Проверка |          | Мет     |     |
| Начальные условия                         |   |                    |      |             |                   |        |      |        |      |         | Расчетная часть        |                        | Q(n)9=   | 4,507244 | Начальн |     |
| t                                         | 0 | 1                  | 2    | 3           | 4                 | 5      | 6    | 7      | 8    | 9       | A(0)                   | 0,697038067            | Q(n)8=   | 4,395718 | X       | X^2 |
| P, Мпа                                    | 0 | 0,44               | 1,88 | 2,28        | 2,6               | 2,88   | 3,1  | 4,22   | 4,38 | 4,8     | B(0)теор.              | 0,302961933            | Q(n)7=   | 3,615035 | 1       | 1   |
|                                           |   | Заданные параметры |      |             | Начальные условия |        |      |        |      | Sum     | B(0)мат.               | 0,347731847            | Q(n)6=   | 3,461687 | 2       | 4   |
|                                           |   | τ=0,4              |      | t           | 0                 | 2      | 4    | 6      | 8    | 0       | T=                     | 5,54146707             | Q(n)5=   | 3,266516 | 3       | 9   |
|                                           |   | m= 4               |      | Q(n)        | 0                 | 1,88   | 2,6  | 3,1    | 4,38 | 11,96   | K=                     | 0,438                  | Q(n)4=   | 3,043464 | 4       | 16  |
|                                           |   | Δt= 2              |      | Q(n-1)      | 0                 | 1,88   | 2,6  | 3,1    | 0    | 7,58    | K(p)=                  | 2,846644043            | Q(n)3=   | 2,764649 | 5       | 25  |
|                                           |   | Δn= 10             |      | Q(n-1)^2    | 0                 | 3,5344 | 6,76 | 9,61   | 0    | 19,9044 | T(u)=                  | 3,324880242            | Q(n)2=   | 1,760914 | 6       | 36  |
|                                           |   |                    |      | Q(n)*Q(n-1) | 0                 | 4,888  | 8,06 | 13,578 | 0    | 26,526  | W(s)=                  | K / (T(S)+1)           | Q(n)1=   | 1,454217 | 7       | 49  |
|                                           |   |                    |      |             |                   |        |      |        |      |         | Q(n)=                  | A(0)*Q(n1)+B(0)*Q(yct) |          |          | 8       | 64  |
|                                           |   |                    |      |             |                   |        |      |        |      |         |                        |                        |          | 9        | 81      |     |
|                                           |   |                    |      |             |                   |        |      |        |      |         | W(s)= 0,44/(5,54*S +1) |                        |          | 10       | 100     |     |
|                                           |   |                    |      |             |                   |        |      |        |      |         |                        |                        |          | 55       | 385     |     |

Рис. 2.18. Програмна реалізація аналітичного методу Р. Калмана для знаходження параметрів передатної функції об'єкту СПУ Mitsubishi MBF 220 по каналу «витрата палива – тиск пари»

Функцію (2.27) після зворотного перетворення Лапласа [138] можна представити у вигляді диференціального рівняння:

$$5,54 \frac{dP(t)}{dt} + P(t) = 0,44G(t)(t - 0,4)$$

де  $P$  – тиск пари;  $G$  – витрата палива.

Активний експеримент заснований на завданні об'єкту спеціально сформованих тестових дій. За реакцією об'єкта на ці впливи встановлюються і оцінюються його динамічні властивості. Експерименти були проведені на парових СПУ, які є аналогами за своїми конструктивними та виробничим характеристикам водотрубним, головним і допоміжним СПУ: для отримання математичних моделей використовувалися водотрубні барабанні парові котли з природною і штучною циркуляції марок: ДКВР 20-13 (Е-20,0-1, 4ГМ-1); ТП 8; НЛЗ 110; ДЕ 25 ГМ. Моделі даних парогенераторів можуть в першому

наближенні бути аналогічні моделям СПУ марок: Mitsubishi 110; Ле Монт 25; Альфа Лаваль 8; КВГ 80 тощо [69, 77, 157, 177, 181, 205]. Також, для підтвердження порядку моделі і типу ланки передаточної функції були використані при проведенні віртуального активного експерименту, суднові комп'ютерні програмні симулятори і тренажери зі SCADA системою, що дозволяє імітувати дії операторів при управлінні об'єктами головних і допоміжних СПУ і отримувати перехідні характеристики контрольованих параметрів. Використовувалися симулятори роботи СПУ наступних розробників: Steam Engine Room Simulator; Kongsberg Simulator; Virtual Engine Room [71].

Згідно з дослідженнями [3, 6] середнє найбільш ймовірне навантаження суднового допоміжного парового котла прийнято 57 % від номінального. Загальний час річного напрацювання для кожного котла прийнято 1500 год.

Для цих експлуатаційних умов встановлена відносна тривалість 100 % навантаження котлів (в частках) – 0,1; тривалість 75 % навантаження – 0,2; тривалість 50 % навантаження – 0,6; тривалість 30 % навантаження – 0,05 і тривалість 10 % навантаження – 0,05. З урахуванням даних рекомендацій для СПУ, при проведенні натурних експериментів парове навантаження котлів змінилося в діапазоні 0,3 – 0,8 від номінального.

Під час проведення натурних експериментів на парогенераторі ДКВР 10 – 13 ГМ (аналог допоміжного СПУ марки КВА 12/15) з метою визначення динаміки тиску пари на виході з парового котла були зняті криві розгону по різних каналах, причому по кожному каналу були зняті 5 кривих розгону, результати вимірювань на кожній точці осереднювалися. Характеристики похибки використовуваних під час експерименту приладів встановлених на котлі в знаходяться в діапазоні від 1,5 до 2,5 % в залежності від класу точності.

В результаті експерименту отримано статистичний ряд парних однофакторних  $(x_i, y_i)$  вимірювань. Оцінка теоретичних даних на адекватність,

тобто, відповідності теоретичної моделі (кривої) експериментальними даними проводилася за допомогою методики довірчих інтервалів [60]. Визначення критерію адекватності Фішера  $K_{\text{фе}}$ , заснованого на відношенні дисперсії адекватності  $D_a$  і середньої дисперсії всього експерименту  $D_{\text{ср}}$ :  $K_{\text{фе}} = D_a / D_{\text{ср}} = 0,15$  і порівняння його з теоретичним (табличним)  $K_{\text{фт}} = 3,75$  тому  $K_{\text{фе}} < K_{\text{фт}}$  [60] дозволяють стверджувати, що математична модель з довірчою ймовірністю 85 % добре описує досліджуваний процес. Розрахунок проводився в програмі додатки Excel (рис. 2.19). На рис. 2.19 параметр  $x$  позначає час (хв), а  $y$  – тиск, бар.

|    | A                                   | B        | C      | D       | E     | F        | G          | H           | I          | J        |
|----|-------------------------------------|----------|--------|---------|-------|----------|------------|-------------|------------|----------|
| 1  | x                                   | y        | x^2    | y^2     | x*y   | y(x)     | (yi-yср)^2 | (yi-y(x))^2 | (xi-xср)^2 | yi-yx :y |
| 2  | 1                                   | 2,5      | 1      | 6,25    | 2,5   | 0,339528 | 83,7225    | 4,667639    | 8,7616     | 0,864189 |
| 3  | 2                                   | 3,5      | 4      | 12,25   | 7     | 4,160633 | 66,4225    | 0,436437    | 3,8416     | 0,188752 |
| 4  | 3                                   | 5        | 9      | 25      | 15    | 7,981739 | 44,2225    | 8,890767    | 0,9216     | 0,596348 |
| 5  | 4                                   | 6,5      | 16     | 42,25   | 26    | 11,80284 | 26,5225    | 28,12016    | 0,0016     | 0,815822 |
| 6  | 5                                   | 9        | 25     | 81      | 45    | 15,62395 | 7,0225     | 43,87671    | 1,0816     | 0,735994 |
| 7  | 6                                   | 15       | 36     | 225     | 90    | 19,44505 | 11,2225    | 19,75851    | 4,1616     | 0,296337 |
| 8  | 6,2                                 | 20       | 38,44  | 400     | 124   | 20,20928 | 69,7225    | 0,043796    | 5,0176     | 0,010464 |
| 9  | 6,2                                 | 25       | 38,44  | 625     | 155   | 20,20928 | 178,2225   | 22,95104    | 5,0176     | 0,191629 |
| 10 | 6,2                                 | 30       | 38,44  | 900     | 186   | 20,20928 | 336,7225   | 95,85828    | 5,0176     | 0,326357 |
| 11 | 0                                   | 0        | 0      | 0       | 0     | -3,48158 | 135,7225   | 12,12138    | 15,6816    | #ДЕЛ/0!  |
| 12 | 39,6                                | 116,5    | 206,32 | 2316,75 | 650,5 | 116,5    | 959,525    | 236,7247    | 49,504     | #ДЕЛ/0!  |
| 13 | 3,96                                | 11,65    | 20,632 | 231,675 | 65,05 | 11,65    | 95,9525    | 23,67247    | 4,9504     | #ДЕЛ/0!  |
| 14 | Параметры уравнения регрессии       |          |        |         |       |          |            |             |            |          |
| 15 | b                                   | 3,821105 |        |         |       |          |            |             |            |          |
| 16 | a                                   | -3,48158 |        |         |       |          |            |             |            |          |
| 17 | Оценка качества уравнения регрессии |          |        |         |       |          |            |             |            |          |
| 18 | Ошибка а                            | #ДЕЛ/0!  |        |         |       |          |            |             |            |          |
| 19 | R2                                  | 0,75329  |        |         |       |          |            |             |            |          |
| 20 | Количество                          | 1        |        |         |       |          |            |             |            |          |
| 21 | Степеней                            | 8        |        |         |       |          |            |             |            |          |
| 22 | F                                   | 24,4267  |        |         |       |          |            |             |            |          |
| 23 | Fкр                                 | 5,317655 |        |         |       |          |            |             |            |          |
| 24 | t-статисти                          | 2,306004 |        |         |       |          |            |             |            |          |
| 25 | n                                   | 10       |        |         |       |          |            |             |            |          |
| 26 | S^2                                 | 29,59059 |        |         |       |          |            |             |            |          |
| 27 | S                                   | 5,439723 |        |         |       |          |            |             |            |          |
| 28 | S_a0                                | 0,773137 |        |         |       |          |            |             |            |          |
| 29 | S_a1                                | 3,51178  |        |         |       |          |            |             |            |          |
| 30 | t_a0                                | 4,942337 |        |         |       |          |            |             |            |          |
| 31 | t_a1                                | 0,9914   |        |         |       |          |            |             |            |          |
| 32 |                                     |          |        |         |       |          |            |             |            |          |

Рис. 2.19. Обробка результатів експеримента і оцінка адекватності теоретичного представлення в додатку Excel

У сталому режимі при паровій продуктивності 0,3 від номінальної і постійному тиску пари на виході парового котла змінилося становище регулюючого органу  $\Delta\phi$  на подачі палива (мазуту) на 10 %, що призвело до його підвищення на 0,07 кг/с або 4,2 кг/хв. Після усереднення значень тиску за результатами п'яти експериментів були отримані дані представлені в вигляді усередненої кривої розгону (рис. 2.20)



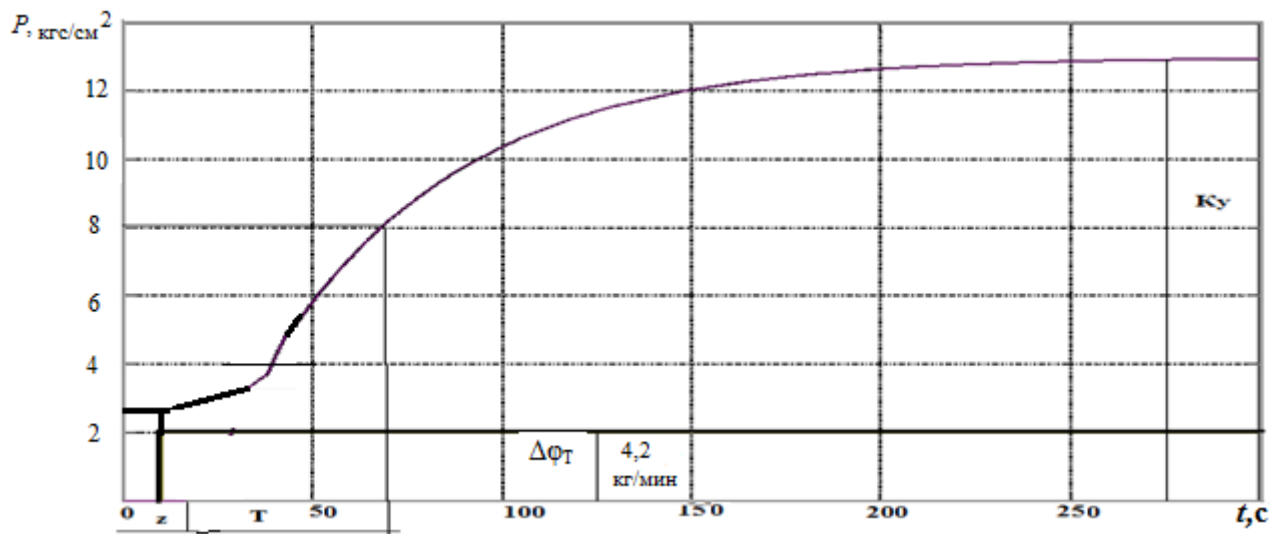


Рис. 2.20. Крива розгону тиску пару в водотрубному паровому котлі ДКВР 10 – 13 при наборі навантаження до номінального при запуску з «гарячого резерву»

Застосування методу графо-аналітичної обробки кривої розгону [138], (див. рис. 2.18) дозволило отримати наступні параметри передавальних функцій інерційної ланки і ланки запізнювання:

$$W(s) = \frac{1,3}{85s + 1} e^{-12s}. \quad (2.28)$$

Диференціальне рівняння (2.28) має вигляд:

$$85 \frac{dP(t)}{dt} + P(t) = 1,3G(t)(t - 12), \quad (2.29)$$

де  $P$  – тиск пару;  $G$  – зміна витрати палива.

Рішення неоднорідного диференціального рівняння першого порядку (2.29) за умови ( $y = P$ ;  $x = G$ ) має наступний вигляд:

$$y(x) = \left( C_1 + \frac{13e^{\frac{x}{5}}}{20} (tx - 5t - 2x + 10) \right) e^{-\frac{x}{5}}.$$

Для визначення адекватності отриманої математичної моделі (2.28) об'єкту управління СПУ використовуються методи параметричної ідентифікації [122]. У загальному випадку, аналітичний вираз перехідної характеристики, відповідної

передатної функції, визначається на основі зворотного перетворення Лапласа за допомогою таблиць перетворень [138]. Для типової інерційної ланки, без урахування ланки запізнювання, цей вислів має вигляд:

$$h(t) = L^{-1} \{h(s)\} = L^{-1} \left\{ W(s) \cdot \frac{1}{s} \right\} = K \left( 1 - e^{-\frac{t}{T}} \right). \quad (2.30)$$

В рамках обраної структури об'єкта підлягаючими визначенню параметрами є коефіцієнт передачі і постійна часу об'єкта, що утворюють в додатку MatLab [39] вектор параметрів  $q = [K \quad T]^T$ .

За допомогою графічних методів для інерційного об'єкта першого порядку по виду перехідної кривої визначаються початкові наближення для параметрів моделі  $q_0 = [K(0) \quad T(0)]^T$ :

$$K(0) \approx h(t) \Big|_{t \rightarrow \infty} \approx 13;$$

$$T = h(t) \Big|_{t \rightarrow \infty} = K \left( 1 - e^{-\frac{1}{T}} \right) \approx 0,63K; \quad T(0) \approx 0,63 \cdot K(0) \approx 8,2.$$

Відповідно, вектор початкових наближень шуканих параметрів матиме вигляд  $q_0 = [6,5 \quad 4,5]^T$ . Перехідну функцію  $h(t)$  будемо розглядати як функцію, параметрично залежну від коефіцієнтів  $K$ ,  $T$  і від часу  $t$ .

З огляду на модельну запис перехідної характеристики (2.30) у вигляді  $y_m(t) = h(t)$ , напишемо підлягаючий мінімізації функціонал сумарної квадратичної нев'язки експериментальних даних  $Y_j, j = \overline{1, N}$  і розрахованих значень по (2.30) для тих же моментів часу  $t_{out_j}, j = \overline{1, N}$ :

$$J(K, T) = \sum_{j=1}^N \left[ Y_j - K \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t_{out_j}}{T}} \right) \right]^2. \quad (2.31)$$

Для знаходження значень параметрів перехідної характеристики мінімізується одержаний критерій якості (2.24), що параметрично залежний від шуканих коефіцієнтів

$$\min_{K,T} J(K,T) = \min_{K,T} \sum_{j=1}^N \left[ Y_j - K \cdot \left( 1 - e^{-\frac{tout_j}{T}} \right) \right]^2.$$

Для спрощення розрахунків транспортне запізнення не враховується. Проведена процедура мінімізації функціоналу (2.31) в пакеті MatLab за допомогою функції `fminsearch`. Ця функція визначає локальний мінімум скалярної функції декількох змінних, починаючи з деякої початкової точки. Це завдання відноситься до нелінійної оптимізації, що без обмежень реалізує симплекс-метод Нелдера-Міда [39]. Мінімізація розглянутого функціоналу ідентифікації (2.31) проводиться за допомогою наступних команд в пакеті MatLab:

$$f_0 = @(q) \text{sum}(Y - q(1) * (1 - \exp(-\text{tout}/q(2)))).^2;$$

$$[q, fval] = \text{fminsearch}(f_0, [13, 82]).$$

Результатом виконання будуть значення вектору параметрів:  $q = 12,7$  и  $85$  і цільової функції:  $fval = 4,7879\text{e}-018$ .

Програма в Matlab розраховує коефіцієнти в чисельнику і знаменнику передатної функції моделі. В результаті параметричної ідентифікації визначена наступна передатна функція моделі:

$$W(s) = \frac{12,7}{85s + 1} e^{-12s}. \quad (2.32)$$

Порівняльний аналіз кривих розгону передатних функцій, отриманих на основі обробки експериментальних даних (2.28) і розрахунку програмою параметричної ідентифікації в додатку MatLab (2.32), виконаний в підпрограмі Simulink (рис. 2.21).

З рис. 2.21 видно, що криві розгону (теоретична і експериментальна) демонструють допустимий збіг, таким чином, отримана теоретична модель (2.28) адекватно описує досліджуваний процес управління.

Розгінні характеристики (криві розгону) також вказують на те, що зміна тиску пари починається з деяким запізненням  $\tau$ , що характеризує вплив інерційності топки на динамічні властивості котла, що підтверджує правильність аналітичних моделей, що описують динаміку даного об'єкта.

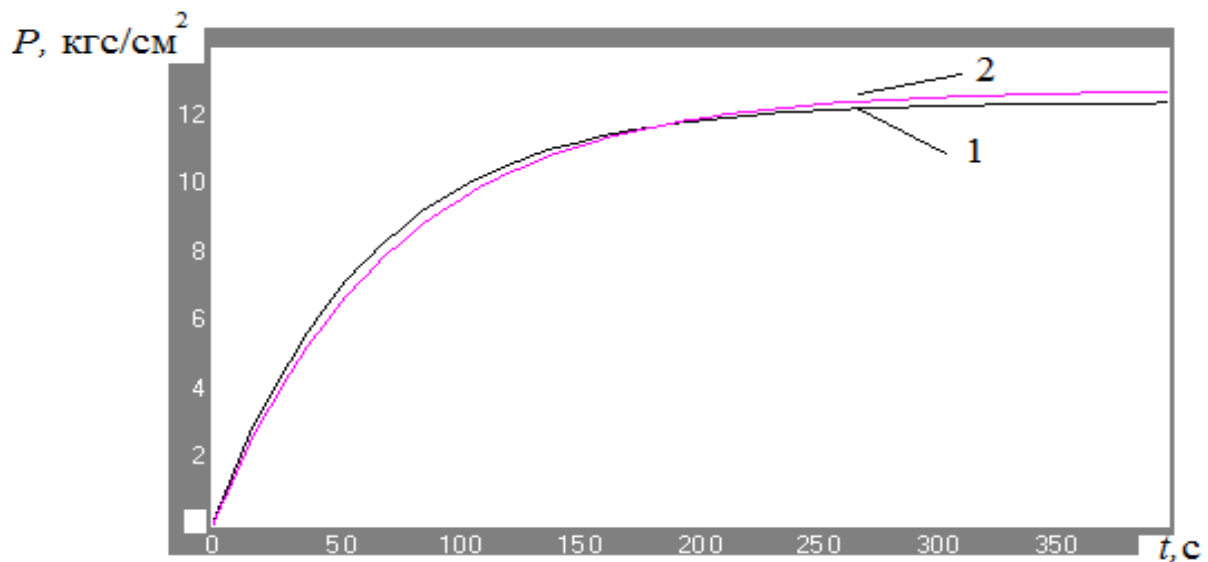


Рис. 2.21. Процес верифікації моделі – «криві розгону» об'єкту парового котла ДКВР – 10 – 13 ГМ по каналу управління (витрата палива – тиск пари) при запуску з «гарячого стану»: 1 – модель; 2 – об'єкт при досягненні заданого теплового навантаження

Для обслуговуваного компанією ВАТ «Южспецмонтаж», водотрубного барабанного котла ДКВР 35 (аналог допоміжного СПУ Ла-Монт 35, КАВ 35 / 25-1) з середньою продуктивністю пару (35 т/год і тиском 4 МПа, що є, за своїми конструктивними характеристиками аналогом допоміжного СПУ марки КВГ40 був досліджений основний об'єкт: канал тиску пару на виході котла.

Для побудови математичної моделі об'єкта СПУ зняті розгінні криві по тиску пару по каналах: управління (подача палива в топку) і збурення (витрата пару).

Експериментальні характеристики зміни витрати палива по каналу управління: витрата палива (мазут) в топку котла  $Q_T$  (кг/год) - тиск пару на виході котла  $P$  (кПа) представлені на рис. 2.22 – 2.23.

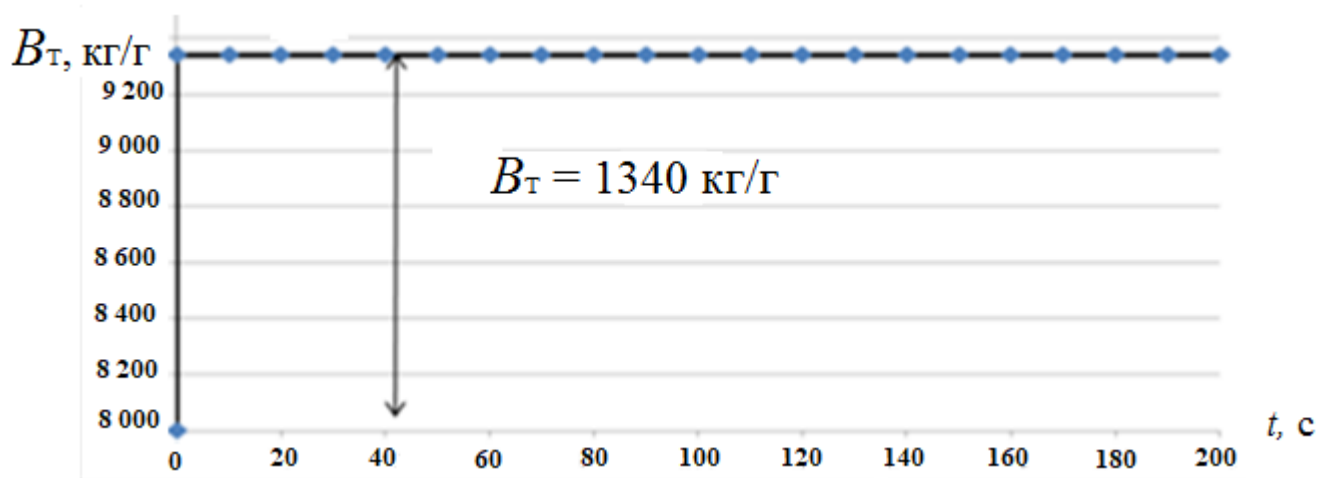


Рис. 2.22. Зміна витрати палива (мазута) на горілки котла ДКВР 35

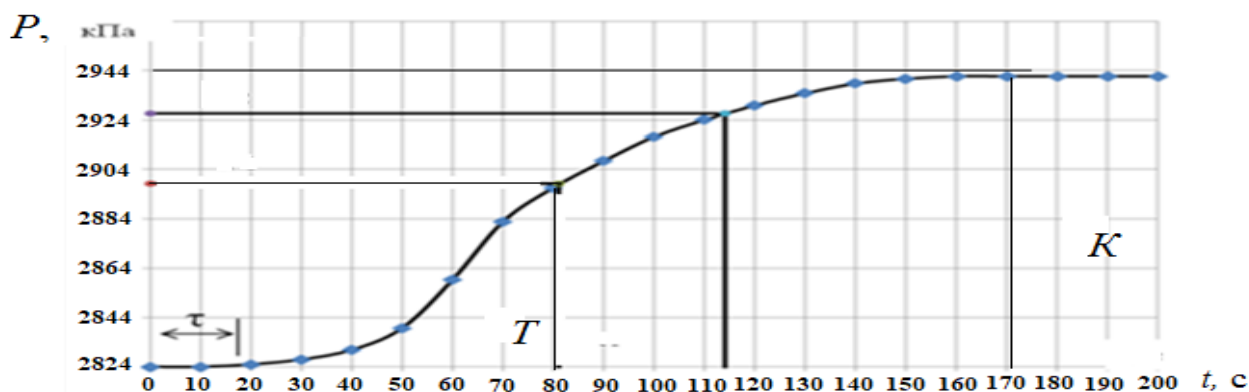


Рис. 2.23. Усереднена крива розгону по тиску пару при збуренню витратою палива

По графікам, які представлені на рис. 2.22 – 2.23 побудовані математичні моделі підсистем СПУ по каналам управління і збурення.

Запізнювання визначено візуально по кривій:  $\tau = 6 \text{ с}$ ;

$$K_{об} = \Delta P / \Delta B_{\tau} = (2944-2824)/(9340-8000) = 0,088 \text{ кПа} / \text{кг/ч}; T = 60 \text{ С};$$

$$W(s) = \frac{0,088}{60s+1} e^{-20s}. \quad (2.33)$$

Передатну функцію (2.33) можна представити в виді диференційного рівняння:

$$60 \frac{dP(t)}{dt} + P(t) = 0,088 B_{\tau}(t - 20).$$

Перехідна функція представленого рівняння має наступний вигляд:

$$h(t) = 0,088 \left( 1 - e^{-\frac{t}{60}} \right) 1(t).$$

Визначимо динамічні характеристики об'єкта управління по каналу збурення: «витрата пари  $Q_{\text{п}}$  (т / год) - тиск пари на виході котла  $P$  (кПа)».

Для зняття розгінної характеристики парового котла було виміряно тиск пари при зміні споживання пари турбіною з 35 до 25 т/год (рис. 2.24 – 2.25)  $D_{\text{п}}$ , т/год.

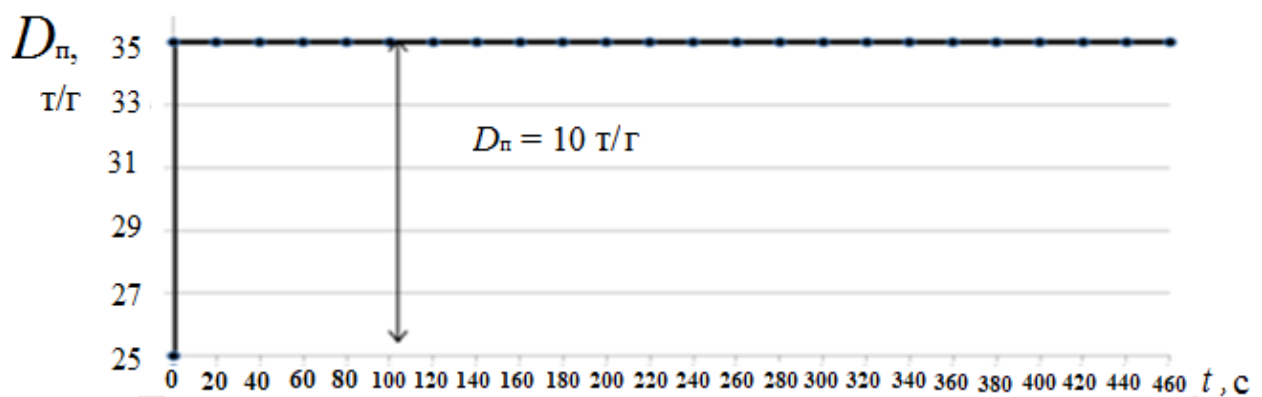


Рис. 2.24. Зміна витрати пари

Для визначення передатної функції об'єкту по каналу збурення необхідно обчислити коефіцієнт передачі об'єкту ( $K$ ), постійну часу об'єкту ( $T$ ) і запізнювання в об'єкті ( $\tau$ ). Запізнювання визначається візуально по кривій розгону (рис. 2.23):  $\tau = 60$ , коефіцієнт посилення:  $K = - \Delta P / \Delta D_{\text{п}} = (3138,23 - 3089,09)/(10) = - 4,9$ .

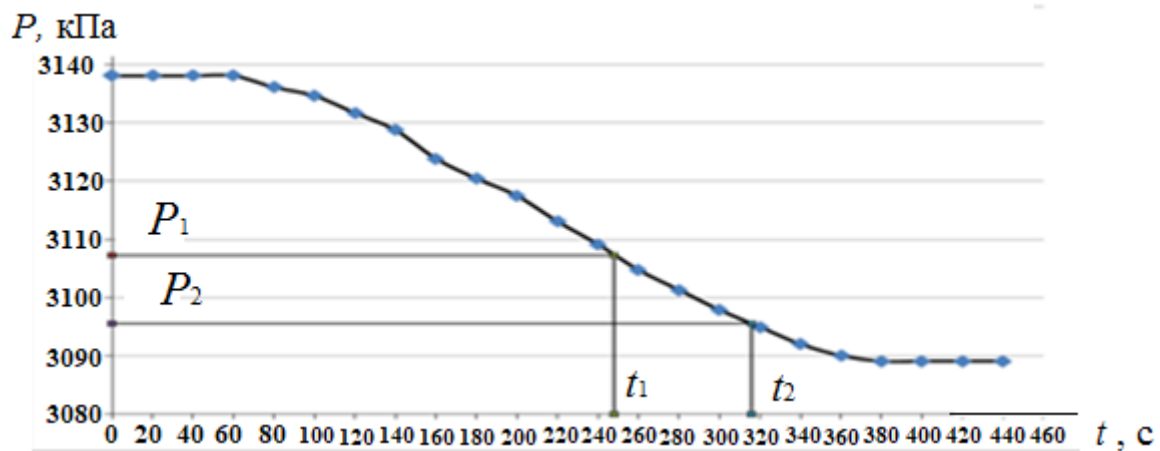


Рис. 2.25. Крива розгону тиску пари при зміні витрати пари в котлі ДКВР 35

Для знаходження постійної часу  $T$  використовуються припущення значення  $P_1$  і  $P_2$ , по кривій розгону визначаються  $t_1$  і  $t_2$  і обчислюється  $T$ :

$$P_1 = \Delta D_{\pi} * K * 0.63 + P_0 = 10 * 4,9 * 0,63 + 3138,2 = 3107,3 \text{ кПа.}$$

По рис. 2.16 визначаємо  $t_1 = 248 \text{ с}$ ,  $t_2 = 316 \text{ с}$ :

$$P_2 = \Delta D_{\pi} * K * 0.87 + P_0 = 4,9 * 10 * 0,87 + 3138,2 = 3095,6 \text{ кПа;}$$

$$T = (t_1 + t_2 - 2\tau) / 3 = (248 + 316 - 2*60) / 3 = 148 \text{ с.}$$

Після підстановки розрахованих значень параметрів передатної функції по каналу збурення «витрата пари – тиск пари»:

$$W_{oo}(s) = \frac{-4,9e^{-60s} \text{ кПа}}{148s + 1 \text{ м/ч}}, \quad (2.34)$$

де  $s$  – оператор Лапласа, після зворотного перетворення (2.34) одержуємо:

$$148 \frac{dP(t)}{dt} + P(t) = -4,9Qn(t - 60). \quad (2.35)$$

Рішення диференціального рівняння (2.35), що дозволяє визначити адекватність отриманої передатної функції, має такий вигляд:

$$h(t) = -4,9 * \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t-60}{148}\right) \right].$$

Також, в процесі визначення математичної моделі каналу управління «витрата палива - тиск пару» допоміжного водотрубного суднового котла з робочим тиском 2.4 МПа і паровою продуктивністю 40 т / год марки Alborg, за експериментальними даними для найбільш частого режиму роботи [177], використовувався аналітичний метод Р. Калмана [200], алгоритм розрахунку якого був реалізований в програмі Excel (рис. 2.26).

|                                     |                   |                    |      |             |                   |     |        |      |       |      |        |                        |                        |          |          |         |     |
|-------------------------------------|-------------------|--------------------|------|-------------|-------------------|-----|--------|------|-------|------|--------|------------------------|------------------------|----------|----------|---------|-----|
| СУММ    X ✓ fx    =0,23/(6,05*S +1) |                   |                    |      |             |                   |     |        |      |       |      |        |                        |                        |          |          |         |     |
|                                     | B                 | C                  | D    | E           | F                 | G   | H      | I    | J     | K    | L      | M                      | N                      | O        | P        | Q       | R   |
| 1                                   | Метод КАЛМАНА     |                    |      |             |                   |     |        |      |       |      |        |                        |                        | Проверка |          | Мет     |     |
| 2                                   | Начальные условия |                    |      |             |                   |     |        |      |       |      |        | Расчетная часть        |                        | Q(n)9=   | 2,385627 | Начальн |     |
| 3                                   |                   | 0                  | 1    | 2           | 3                 | 4   | 5      | 6    | 7     | 8    | 9      | A(0)                   | 0,718633764            | Q(n)8=   | 2,270646 | X       | X^2 |
| 4                                   | МПа               | 0                  | 0,44 | 0,88        | 1,28              | 1,6 | 1,88   | 2,1  | 2,22  | 2,38 | 2,4    | B(0)теор.              | 0,281366236            | Q(n)7=   | 2,18441  | 1       | 1   |
| 5                                   |                   | Заданные параметры |      |             | Начальные условия |     |        |      |       |      | Sum    | B(0)мат.               | 0,382151808            | Q(n)6=   | 2,02631  | 2       | 4   |
| 6                                   |                   | τ= 0,5             |      | t           |                   | 0   | 2      | 4    | 6     | 8    | 0      | T=                     | 6,053206114            | Q(n)5=   | 1,825093 | 3       | 9   |
| 7                                   |                   | m= 4               |      | Q(n)        |                   | 0   | 0,88   | 1,6  | 2,1   | 2,38 | 6,96   | K=                     | 0,238                  | Q(n)4=   | 1,59513  | 4       | 16  |
| 8                                   |                   | Δt= 2              |      | Q(n-1)      |                   | 0   | 0,88   | 1,6  | 2,1   | 0    | 4,58   | K(p)=                  | 4,578055044            | Q(n)3=   | 1,307677 | 5       | 25  |
| 9                                   |                   | Δn= 10             |      | Q(n-1)^2    |                   | 0   | 0,7744 | 2,56 | 4,41  | 0    | 7,7444 | T(u)=                  | 3,631923668            | Q(n)2=   | 0,991478 | 6       | 36  |
| 10                                  |                   |                    |      | Q(n)*Q(n-1) |                   | 0   | 1,408  | 3,36 | 4,998 | 0    | 9,766  | W(s)=                  | K / (T(S)+1)           | Q(n)1=   | 0,675279 | 7       | 49  |
| 11                                  |                   |                    |      |             |                   |     |        |      |       |      |        | Q(n)=                  | A(0)*Q(n1)+B(0)*Q(yct) |          |          | 8       | 64  |
| 12                                  |                   |                    |      |             |                   |     |        |      |       |      |        |                        |                        |          |          | 9       | 81  |
| 13                                  |                   |                    |      |             |                   |     |        |      |       |      |        | W(s)= 0,23/(6,05*S +1) |                        |          |          | 10      | 100 |
| 14                                  |                   |                    |      |             |                   |     |        |      |       |      |        |                        |                        |          |          | 55      | 385 |
| 15                                  |                   |                    |      |             |                   |     |        |      |       |      |        |                        |                        |          |          |         |     |
| 16                                  |                   |                    |      |             |                   |     |        |      |       |      |        |                        |                        |          |          |         |     |
| 17                                  |                   |                    |      |             |                   |     |        |      |       |      |        |                        |                        |          |          |         |     |

Рис. 2.26. Програма розрахунку параметрів моделі водотрубного допоміжного СПУ Aalborg за допомогою метода Р. Калмана

Згідно розрахункам (див. рис. 2.26), модель об'єкту СПУ Alborg по каналу витрата палива – тиск пару представлена:

$$6,05 \frac{dP(t)}{dt} + P(t) = 0,23Qm(t - 0,5).$$

Перехідна функція диференційного рівняння має наступний вигляд:

$$h(t) = 0,23 * \left[ 1 - \exp \left( - \frac{t - 0,5}{6,05} \right) \right].$$



Перевірка моделі на адекватність показала допустиму погрішність теоретичних значень. Таким чином, одержані моделі можуть бути використані в процесі аналізу ефективності роботи нових методів розробки і настройки САУ суднових допоміжних парогенераторів.

В результаті обробки розгінних характеристик парового водотрубного барабанного котлоагрегату ДКВР 8 були одержані передатні функції по каналам управління і збурення.

Для одержання математичних моделей об'єктів СПУ по каналам «вміст  $O_2$  – витрата палива», «вміст  $O_2$  – зміна витрати повітря» була проведена серія активних експериментів на паровому котлі ДКВР 8 (рис. 2.27 – 2.28).

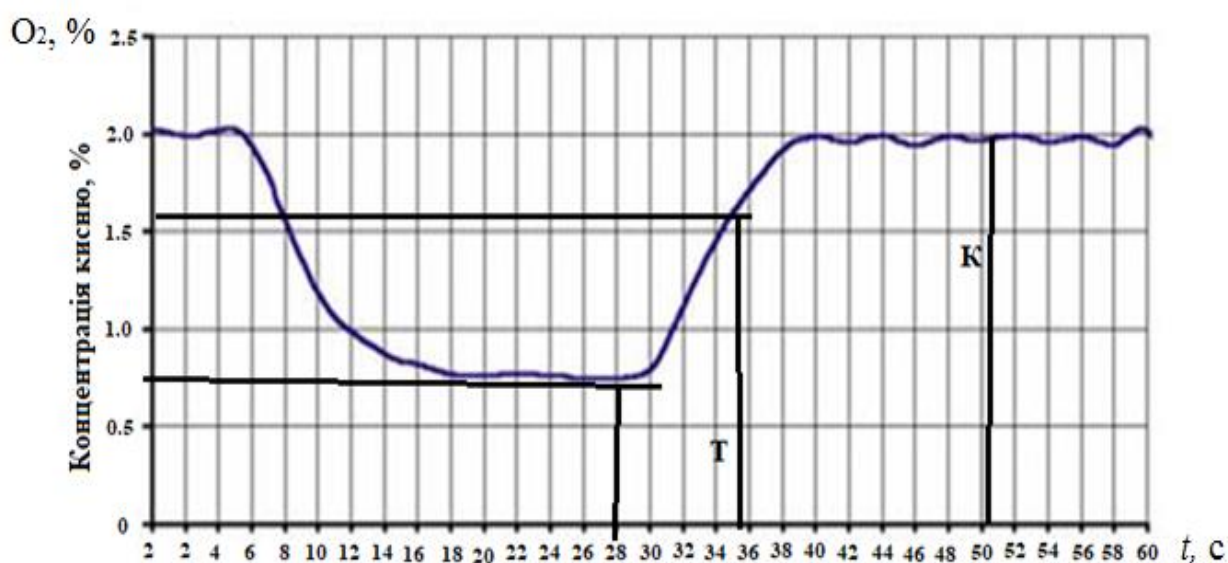


Рис. 2.27. Процес зміни вмісту  $O_2$  в димових газах парового котла ДКВР 8 при стрибкоподібній змінні витрати мазуту ( $\Delta N = 7$  кг/с)



Рис. 2.28. Експериментальна розгінна крива вмісту  $O_2$  в димових газах парового котла ДКВР 8 (парове навантаження 0,5 від номінального) при стрибкоподібній змінні витрати повітря ( $\Delta N = 10 \text{ м}^3/\text{с}$ )

Графоаналітичний метод [122] обробки кривих розгону (див. рис. 2.27 – 2.28) дозволив одержати наступні передатні функції об'єктів по каналам досліджень:

$$W(s) = \frac{3,58}{(7s + 1)} e^{-2s} \quad \text{– канал «витрата палива - вміст } O_2 \text{ »};$$

$$W(s) = \frac{0,1}{14s + 1} e^{-4s} \quad \text{– канал «витрата повітря – вміст } O_2 \text{ »}.$$

Для повноти охопту різного типу суднових парогенераторів були проведені експерименти на паровому барабанному котлі НЗЛ (аналог СПУ Mitsubishi і КВГ), (рис. 2.29 – 2.32). В ході експериментів були одержані зміни основних технологічних параметрів котельної установки НЗЛ-110, зняті за допомогою SCADA – системи. Паровий котел НЗЛ-110 вертикально-водотрубний, двобарабанный з штучною циркуляцією.

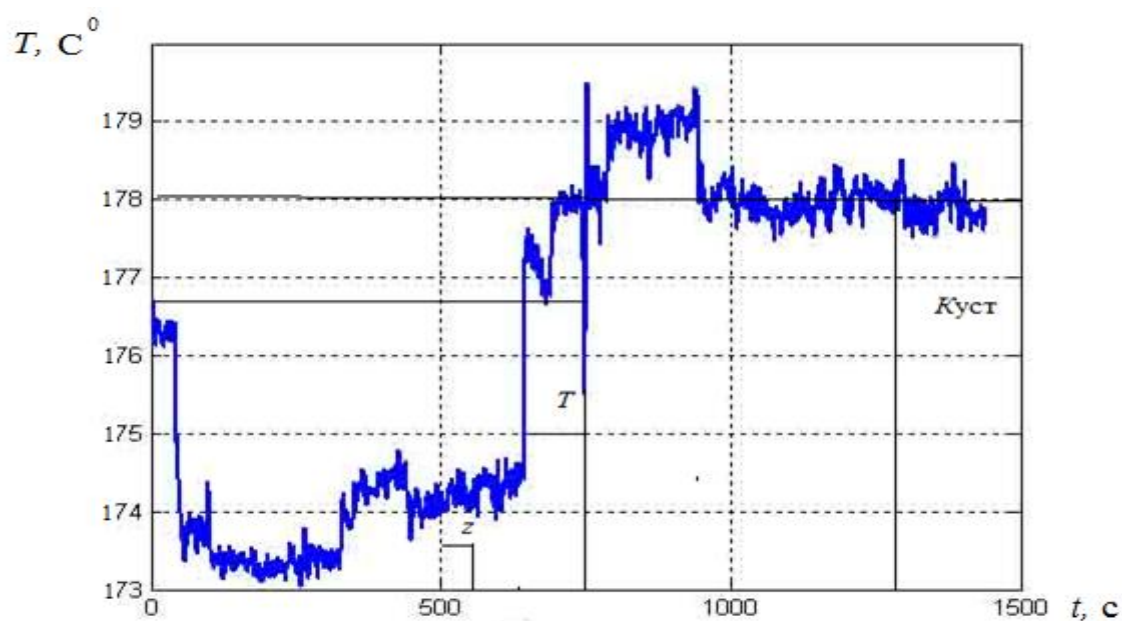


Рис. 2.29. Експериментальна характеристика зміни температури топкових газів  
за КОТЛОМ

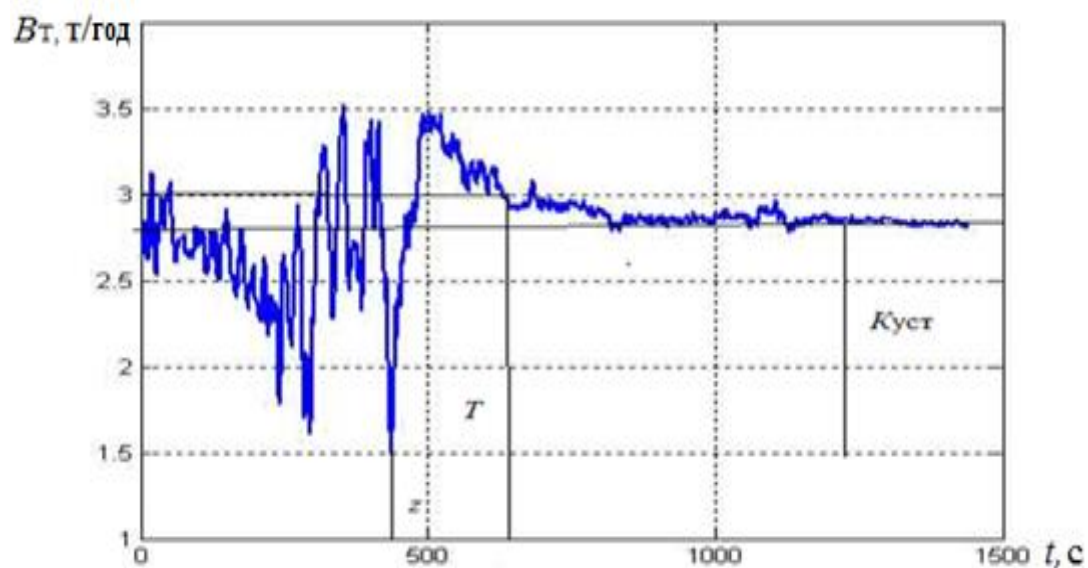


Рис. 2.30. Експериментальна характеристика зміни витрати палива

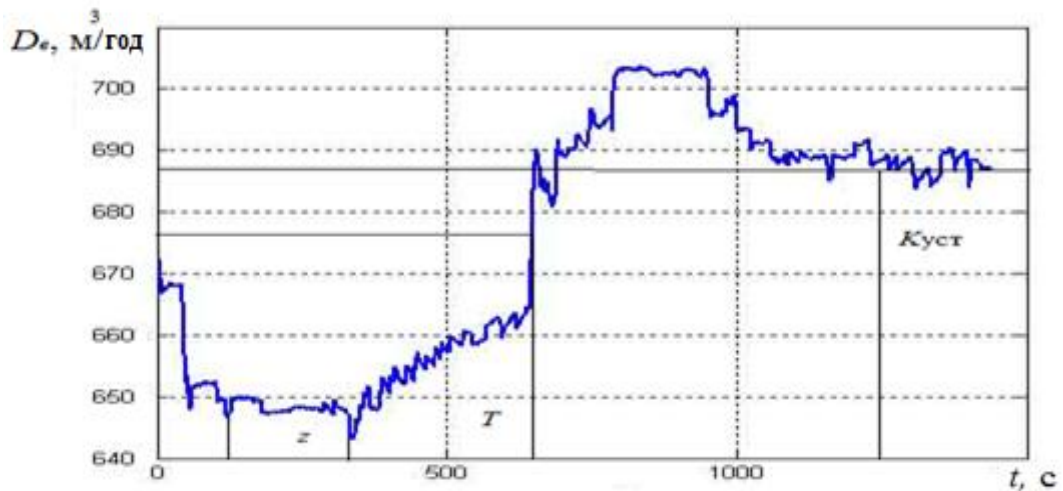


Рис. 2.31. Експериментальна характеристика зміни витрати повітря:  
 $K_{уст}$  – коефіцієнт сталого значення;  $T$  – постійна часу;  $z$  – запізнювання

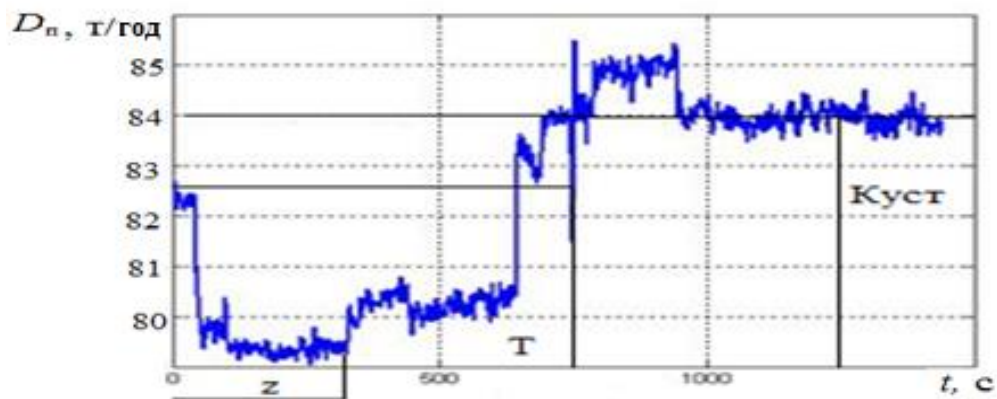


Рис. 2.32. Експериментальна характеристика зміни витрати пару на потреби технологічного процесу

На основі проведеної обробки представлених експериментальних кривих розгону (рис. 2.30 – 2.31) були одержані передатні функції об'єктів САУ парогенератора по каналам управління і збурення:

$$w(s) = \frac{10}{40s + 1} e^{-5s} \text{ – канал «витрата палива – вміст } O_2\text{»};$$

$$w(s) = \frac{1000}{400 + 1} e^{-15s} \text{ – канал «витрата повітря – вміст } O_2\text{»}.$$

Отримані в ході експериментів передатні функції об'єктів - аналогів об'єктів СПУ по різних каналах використовуються в ході подальшого імітаційного моделювання для перевірки ефективності запропонованих методів і алгоритмів роботи САУ СПУ в програмі MatLab [39]. Також для визначення ступеня адекватності отриманих математичних моделей промислових парових котлів - моделям СПУ були проведені віртуальні експерименти в спеціалізованих програмах-емуляторах суднових СПУ: Boiler Simulator, Steam Engine Room Simulator (рис. 2.35 – 2.36) [71]. Для отримання кривих розгону параметрів СПУ, в програмі в дистанційному режимі наносилися збурення у вигляді відкриття клапанів по каналам: зміни витрати пару, зміни витрати палива, зміни витрати води, зміни витрати пару.

Обробка одержаних у віртуальному середовищі експериментальних кривих розгону виконувалася також за представленою вище графоаналітичної методикою [138]. На мнемосхемі (див. рис. 2.35) показані значення основних параметрів, що контролюються, допоміжного СПУ KAV 1.6 / 7 і утилізаційного СПУ: тиск на запобіжному клапані (7,5); верхній рівень води в барабані (30); нормальний рівень (30); нижній рівень (25); аварійний рівень (20); тиск палива на пальниках (5,6); аварійне значення тиску пару (7,7); верхня температура вихідних газів (340) тощо емулятор дозволяє проводити експлуатацію СПУ на різних експлуатаційних режимах і відслідковувати показання за допомогою віртуальних приладів і графічних трендів (рис. 2.36).

У програмі реалізовані математичні моделі суднового парового котла марки KAV, даний СПУ вертикальний, двох колекторний з водяним змійовиком економайзером і одноходовим рухом газів. Котел укомплектовано пароперегрівачем, що забезпечує перегрів пару до 515 °С.



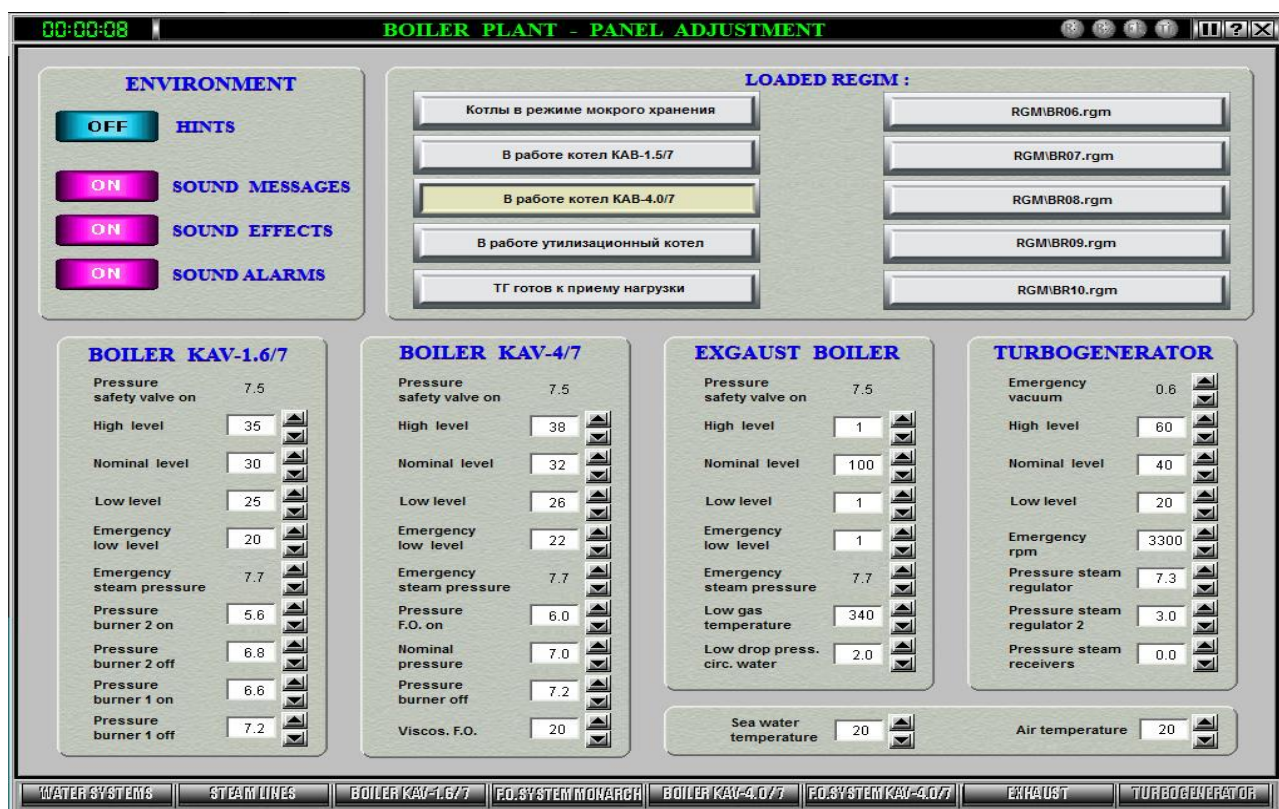


Рис. 2.35. Мнемосхема для задавання параметрів водотрубних допоміжних парових котлів марки КАВ и утилізаційного СПУ

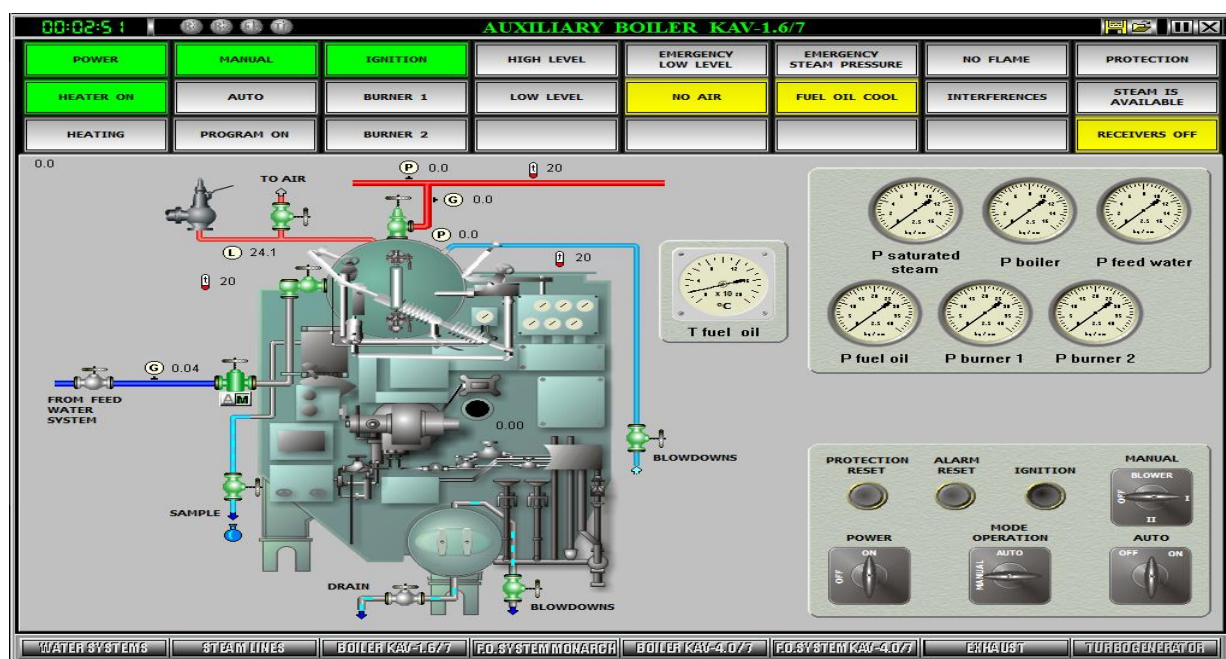


Рис. 2.36 Мнемосхема для дистанційного управління водотрубним СПУ КАВ 1.6/7 в програмі Boiler Simulator

Пар котла використовується для забезпечення роботи головної енергетичної установки (підігрів масла і палива, обігрів кінгстонів заборотної води тощо), а також для побутових потреб команди судна. Паливом для котла може служити мазут, дизельне і моторне паливо. Ряд судових котлів різної потужності серії КАВ (рис. 2.35) представлений моделями КАВ 1,6/7, КАВ 2,5/7, КАВ 4/7, КАВ 6,3 / 7 та ін. Перша цифра в маркуванні вказує на кількість виробленого пару, друга - на рівень тиску пару в котлоагрегаті. Модель КАВ широко використовується на судах риболовецької промисловості, зокрема, паровий водотрубний котел КАВ 4/7, встановлений на великих автономних траулерах морозильного типу (БАТМ) типу «Пулковський Меридіан», проект тисячі двісті вісімдесят вісім «Чорноморського ССЗ», рефрижераторах-постачальника типу Бухта –Російська, проектів 13476, 13476М «СБЗ ім. 61-го комунара» та багатьох інших [69]. На рис. 2.36 представлена мнемосхема СПУ КАВ 1,6 / 7, що дозволяє управляти котлом в автоматичному або дистанційному режимах, орієнтуючись на показання віртуальних приладів, фіксує значення тиску пару, води, палива, повітря, а також температурні значення контрольованих параметрів і рівень води в барабані. У разі відсутності полум'я на пальнику котла або виходу контрольованого параметра за допустимі значення на мнемосхемі спрацьовує світлова та звукова сигналізація.

#### 2.4. Експериментальні і аналітичні моделі ДПК, УПК і КПК

Відомо, що комбіновані і утилізаційні парові котли призначені для постачання пару різним споживачам суден з дизельними і газотурбінними головними двигунами. На великотоннажних танкерах КПК, як і ДПК, мають відносно велику паропродуктивність (до 80 т/год) при тиску пару 1,2 – 3 МПа, використовуюваного зазвичай для забезпечення роботи вантажних турбонасосів,

турбогенераторів і підігріву вантажу в танках. Тому САУ таких КПК вирішують ті ж завдання і побудовані за тими ж принципами, що і системи головних паросилових установок. Паропроодуктивність ДПК і КПК суховантажних і пасажирських суден зазвичай становить 0,5 – 25 т/год при тиску насиченого пару 0,3 – 1,4 МПа, який використовується для господарсько-побутових потреб, підігріву палива і масла і роботи турбогенераторів [3].

Однак, схеми САУ ДПК і КПК малої паропроодуктивності повинні бути принципово іншими, ніж у головних парових котлів і ДПК з високою паровою продуктивністю, внаслідок особливих вимог до них, що визначаються умовами експлуатації цих СПУ. Комбіновані котли як і допоміжні котли малої потужності повинні бути укомплектовані системою управління (автоматичного регулювання, аварійного захисту і сигналізації), яка повинна забезпечувати [35, 118]: автоматизований розпал з холодного стану підготовленого до дії котла; регулювання процесів живлення і горіння палива в діапазоні навантажень від 0 до 100 % при безвахтовому обслуговуванні; виведення котла з дії в будь-який момент часу; стійку паралельну роботу декількох ДПК на загальний паропровід, а також їх паралельну роботу з КПК або КПК; контроль основних параметрів котла; контроль справності ланцюгів захисту та сигналізації на діючому і непрацюючому котлі; стійке підтримання параметрів з допустимими відхиленнями; автоматичне включення резервного живильного насоса при зниженні напору основного насоса.

Математичний опис КПК можна отримати шляхом розгляду об'єкта у вигляді взаємодіючих елементів із зосередженими параметрами (рис. 2.37). На рис. 2.30 з сепаратора 1 циркуляційним насосом 4 вода подається в змішувачі 3, в економайзерний ділянці яких підігрівається до температури кипіння за рахунок теплоти відпрацьованих газів двигуна, а потім надходить в випарний ділянку, проходячи через який, перетворюється на пару.

При виведенні рівнянь сепаратора прийняті допущення:



- температура пару в усіх точках парового об'єму дорівнює температурі насичення  $t_n$ , відповідає тиску пари  $P$  в котлі;
- температура всієї маси води  $t_c$  в сепараторі однакова.

Математичну модель об'єкта управління можна представити системою наступних рівнянь [126]:

теплого балансу рідини:

$$c_B G(1-x)\Theta'' + c_B G_{\Pi} \Theta_c - c_B G_{\Pi} \Theta_c = \frac{d}{dt}(c_B G_{\Pi} \Theta_c), \quad (2.20)$$

масового балансу рідини:

$$(1-x)G + G_B - G_{\Pi} = \frac{d}{dt}(V_B \rho_c'), \quad (2.36)$$

масового балансу парового об'єму:

$$xG - G_H = \frac{d}{dt}(V_{\Pi} \rho_c''). \quad (2.37)$$

Для УПК марки КУП - 1300 прийняті наступні номінальні характеристики (витрата пару  $G_H$  - 16500 кг/год = 4583 кг / с,  $\theta_B$  - температура живильної води 50 °С, питома теплоємність  $z = 4182$  Дж/ (кг • °С), маса води в сепараторі  $G_c$  – 4600 кг, відносна паровмісткість  $x = 0,95$ ). Після підстановки представлених значень параметрів в рівняння (2.36), а також значень параметрів, отриманих за паспортними даними котла [69] і проведених розрахунків, отримано наступне рівняння динаміки:

$$489 \frac{d\Theta_c}{dt} + 230c(t) = 1700''(t) + 2500_B(t). \quad (2.38)$$

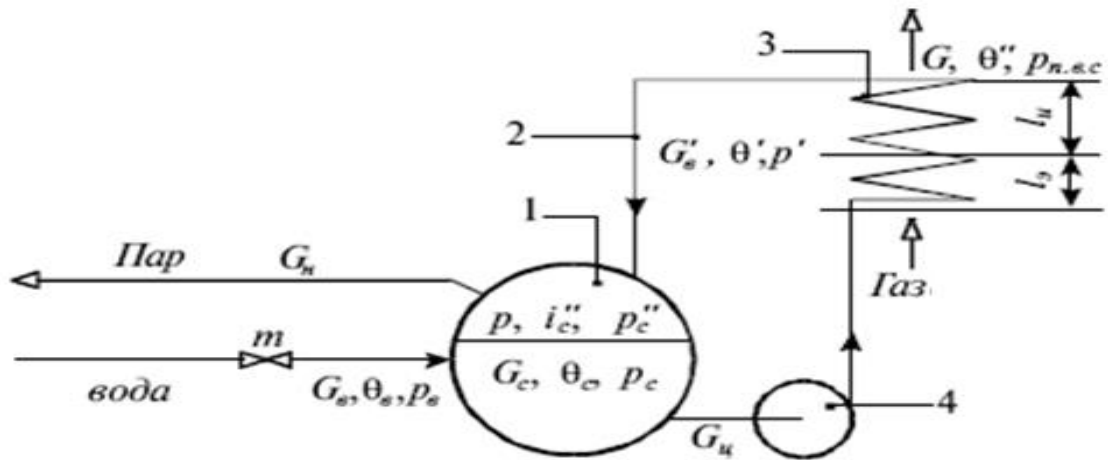


Рис. 2.37. Параметрична схема УПК з примусовою циркуляцією:

1 – сепаратор пару; 2 – паропровід; 3 – змійовики поверхні нагріву;  $c_b$  – питома теплоємність води;  $G, G_b, G_n, G_u, G_c$  – відповідно кількості пароводяної суміші і живильної води, яка підводиться до сепаратора, витрата з сепаратора пару і циркуляційної води, кількість води в сепараторі;  $x$  – відносний вміст пароводяної суміші на вході в сепаратор пару;  $\theta'', \theta_b, \theta_c$  – температури пароводяної суміші і живильної води, що підводиться в сепаратор, води в сепараторі;  $V_b, V_n$  – водяний і паровий об'єми сепаратора;  $\rho_c', \rho_c''$  – щільності води і сухого насиченого пару в сепараторі

Після ряду перетворень над (2.38) отримуємо передатні функції по каналам управління й збурювання для САУ температури води в сепараторі КК:

$$W_{z-u}(s) = \frac{1,7}{4,89s + 2,3}; \quad W_{N-u}(s) = \frac{2,5}{4,89s + 2,3}.$$

Отримані моделі УПК можна використовувати для подальшого дослідження динаміки при різних збурюючих впливах і методах регулювання тиску пару в сепараторі. Так, наприклад, при зміні парового навантаження УПК або режиму роботи головного двигуна змінюються значення параметра  $G_b$  рівняннях (2.36 – 2.37) тощо

Для отримання експериментальних математичних моделей об'єктів суднових УПК і КПК по різних каналах і перевірки їх адекватності за допомогою представлених в [6, 31, 40, 58, 59, 86] аналітичних моделей, були використані судові програми емулятори (рис. 2.38), які дозволяють імітувати роботу віртуальних СПУ на різних режимах при дистанційному управлінні [71].

На мнемосхемі (див. рис. 2.38) показані канали подачі палива і живильної води в допоміжний СПУ, а також води і вихідних газів в УПК. За допомогою панелей, що знаходяться на мнемосхемі, оператор може здійснювати управління обладнанням СПУ і контролювати значення параметрів допоміжного і утилізаційного СПУ.

На підставі проведених імітаційних експериментів на тренажерах-емуляторах з дистанційного управління утилізаційними і комбінованими СПУ (див. рис. 2.38 – 2.39) були отримані наступні експериментальні залежності (рис. 2.40 – 2.41) при зниженні витрати пару з 10 до 4 т/год.

Аналіз експериментальних графіків (див. рис. 2.40 – 2.41) демонструє зміну значень параметрів об'єктів СПУ ( $K$ ,  $T$ ) в широкому діапазоні в залежності від впливу парового навантаження і каналів внутрішніх збурень.

Для знаходження експериментальних математичних моделей і підтвердження їх адекватності (значень параметрів і виду передавальних функцій по каналах управління й збурювання) застосовувалися експериментальні дані показників допоміжного, утилізаційного і комбінованого СПУ марки Mitsubishi MAC, встановлених на нафтовому танкері «Minerva Roxanne» дедвейтом 105000 тон.

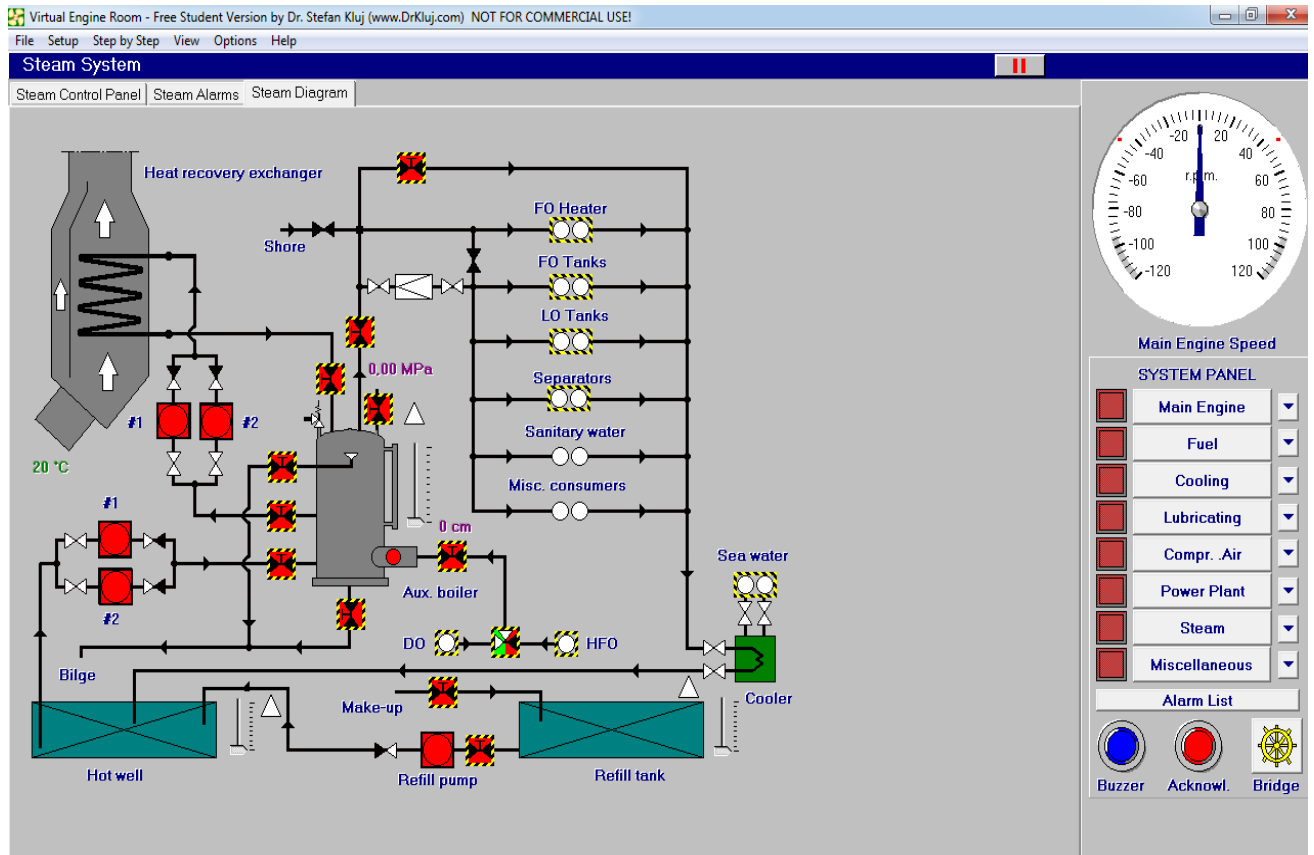


Рис. 2.38. Мнемосхема для управління утилізаційним і допоміжним СПУ в програмі – «судновий емулятор Engine Room»

Дані отримані за спостереженнями судновий SCADA системи ACONIS-2000E (рис. 2.42). Експериментальні перехідні характеристики утилізаційного і комбінованого СПУ представлені на рис. 2.43 – 2.44. За допомогою графічного методу обробки кривих розгону (рис. 2.43 – 2.44), були визначені значення параметрів математичних моделей об'єктів СПУ.

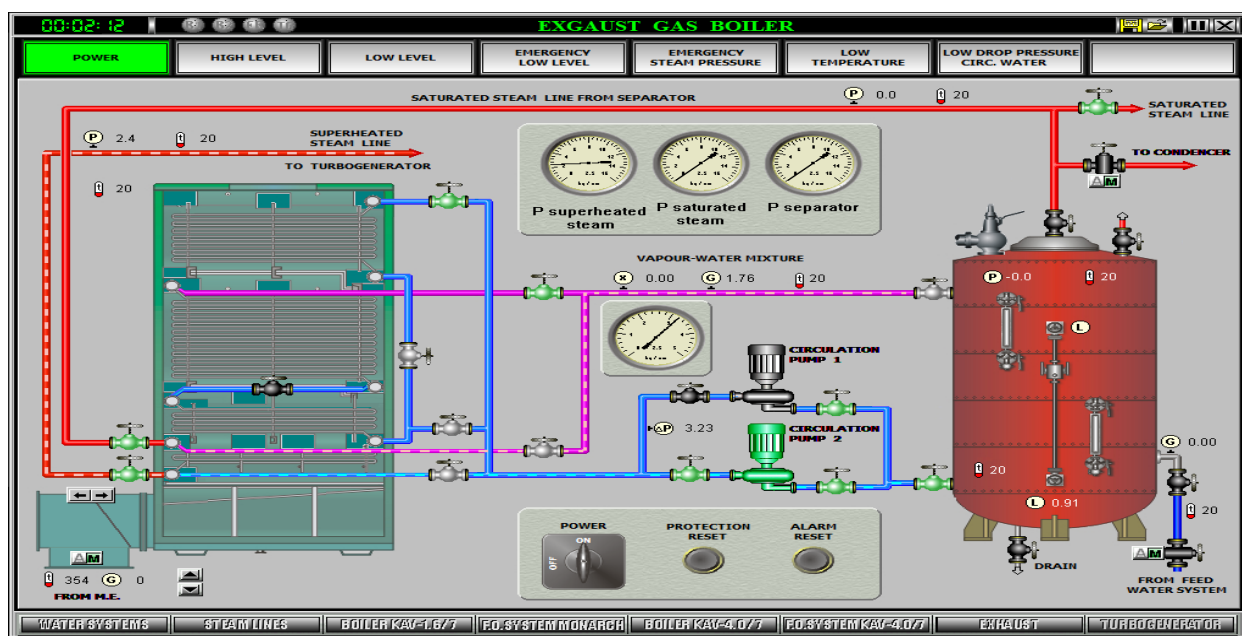


Рис. 2.39. Мнемосхема для дистанційного управління утилізаційним СПУ – вертикально - водотрубний котел з примусовою циркуляцією «КУП - 1300 з тиском пару 0,7 МПа» і сепаратором пару в судновому емуляторі «Boiler Simulator»

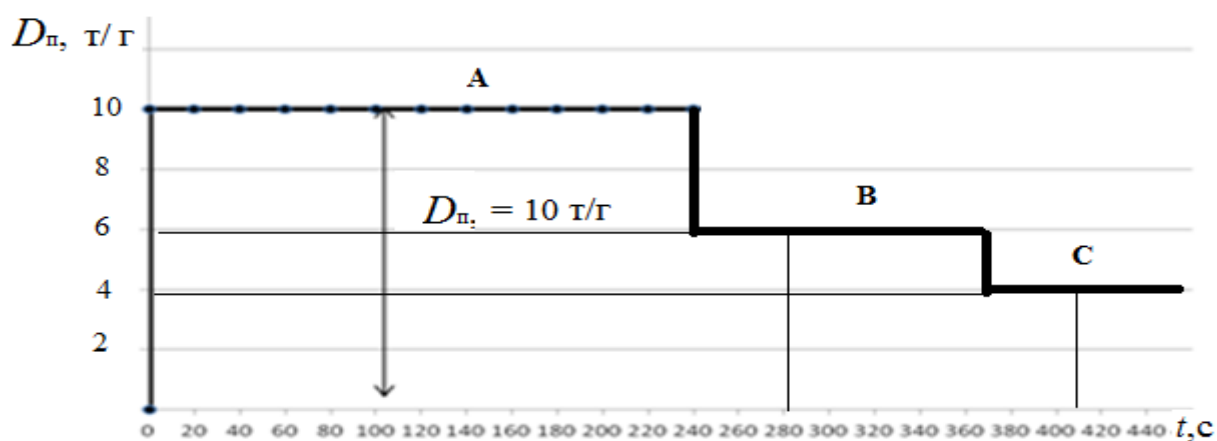


Рис. 2.40. Зміни парового навантаження утилізаційного СПУ «КУП -1300 з номінальною паропроductивністю 16500 кг/год»

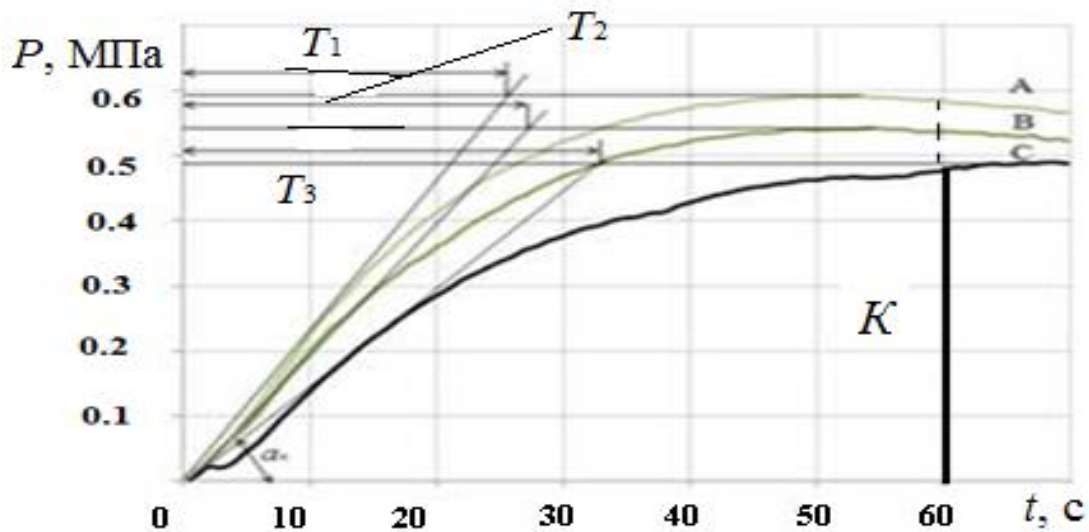


Рис. 2.41. Процеси зміни тиску пару в утилізаційному СПУ «КУП 1300» при впливі парового навантаження: А –  $0,85 P_n$ ; В –  $78 P_n$ ; С –  $0,7 P_n$ ;  $T$  – постійна часу;  $K$  – коефіцієнт посилення при запуску СПУ з «гарячого стану»

У програмі представлено комбінований СПУ D-типу з номінальними параметрами: витрата пару -  $D = 100$  (т/год), витрата палива -  $B_T = 145$  (т/год), тиск -  $P = 3$  МПа, температура перегрітого пару -  $T_{пп} = 510$  °С, температура насиченого пару -  $T_{нп} = 314$  °С.

Передатна функція підсистеми утилізаційного котла по каналу управління (швидкість роботи димососа випускних газів СГД - зміст  $\text{NO}_x$  в атмосфері), отримана за допомогою судової системи моніторингу «ACONIS-2000E», являє собою інерційну ланку другого порядку, значення параметрів якої визначено на основі експериментальних і робочих даних (див. рис. 2.42 – 2.43), і їх обробці графічним методом [138] має вигляд:

$$W(s) = \frac{4}{(19s^2 + 5s + 1)}.$$

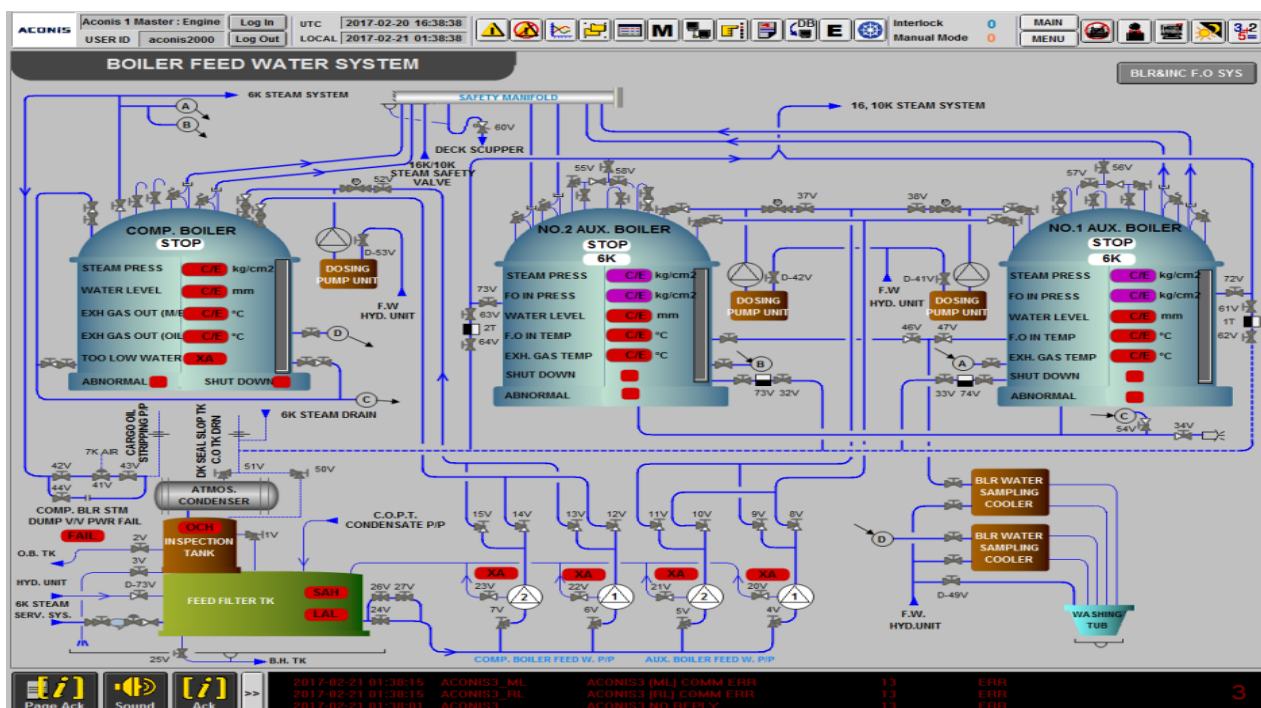


Рис. 2.42. Мнемосхема в програмі моніторингу «ACONIS» для управління обладнанням комбінованого СПУ, працюючого на ПТУ і вантажні насоси нафтового танкеру «Minerva Roxanne»



Рис. 2.43. Контрольна панель суднового КПК МАС 35, що демонструє значення основних контрольованих параметрів

Перехідна характеристика режиму роботи комбінованого СПУ, що отримана за допомогою програми моніторингу СПУ «ACONIS-2000E», показана на рис. 2.44.

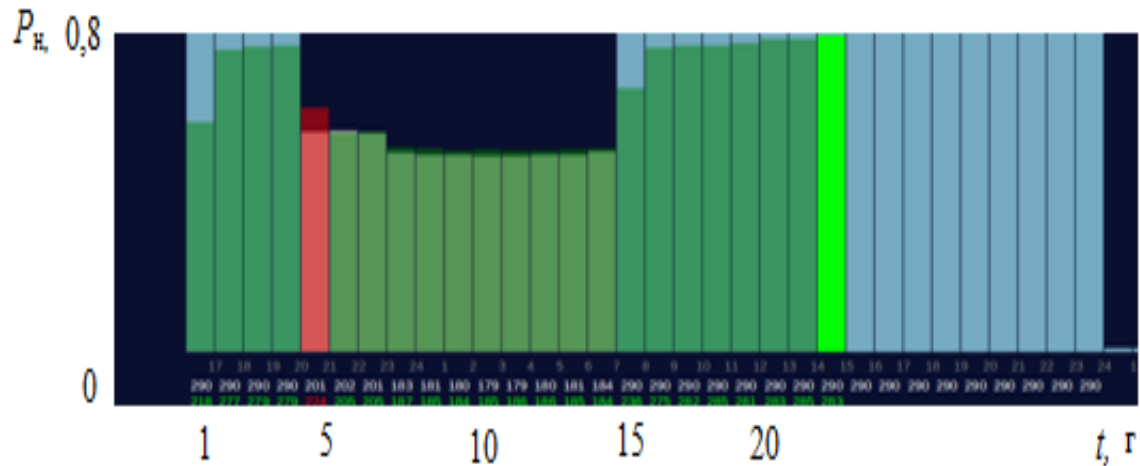


Рис. 2.44. Мнемосхема, яка демонструє процес зміни теплового навантаження ( $P_n$ ) СПУ в режимі вантажних операцій танкера «Minerva Roxanne»

Як видно з графіка (див. рис. 2.44) середнє теплове навантаження КПК при вантажних операціях судна знаходиться в діапазоні 0,6 – 0,8 від номінального.

Для визначення ступеню адекватності отриманої моделі об'єкту управління, припустимо, що система стаціонарна і лінійна в діапазоні зміни амплітуди вхідного сигналу і в околицях робочого режиму. Вихідними даними для ідентифікації є експериментальні значення кривої розгону об'єкта, отримані в дискретні моменти часу:

$$t_j, j = 1, 2 \dots N.$$

Застосуємо метод найменших квадратів (МНК) [60] для визначення значень коефіцієнтів передатної функції за умови максимальної відповідності моделі і об'єкта при встановленому заздалегідь, на підставі форми перехідної функції та динамічних властивостей об'єкта, типу передавальної функції. Розглянемо застосування методу найменших квадратів для ідентифікації цифрової моделі



другого порядку, яка апроксимує розглянутий вище аперіодичний об'єкт другого порядку, що описується моделлю об'єкта:

$$T_1 \frac{d^2 y}{dt^2} + T_2 \frac{dy}{dt} + y(t) = k_0 u(t).$$

Процедура дискретизації моделі приводить до рівняння лінійної регресії, окремому випадку загального рівняння, для якого визначено порядки  $n = 2, m = 1$ :

$$y(k) = a_1 y(k-1) + a_2 y(k-2) + bu(k-1), \quad k = 1, 2, \dots, N,$$

де  $a_1 = \frac{2T_1 - T_2 \Delta t}{T_1}$ ;  $a_2 = \frac{(T_2 - \Delta t) \Delta t - T_1}{T_1}$ ;  $b = \frac{k_0 \Delta t^2}{T_1}$  – параметри дискретної моделі,

які підлягають оцінюванню;  $\Delta t$  – період квантування. Реалізуємо наступну схему в середовищі SIMULINK [38] (рис. 2.45):

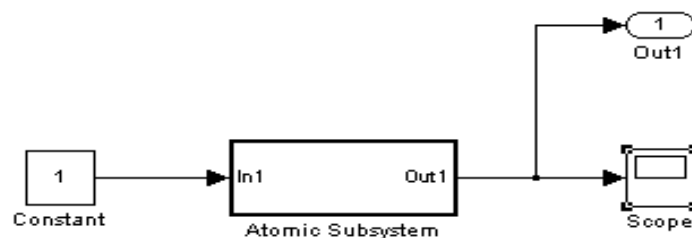


Рис. 2.45. Схема процесу ідентифікації

Параметри дискретної моделі  $a$ ,  $b$  визначаються на основі загального співвідношення МНК наступним чином:

$$\begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = [\psi^T \psi]^{-1} \psi^T \begin{bmatrix} y(2) \\ y(3) \\ \dots \\ y(N) \end{bmatrix}.$$

Розглянемо застосування явної форми МНК для параметричної ідентифікації тієї ж АРСС-моделі об'єкта другого порядку з урахуванням заданих порядків  $n = 2, m = 1$ .

Використання моделі для оцінок коефіцієнтів  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b$  на основі вибірки з  $N$  (от 1 до  $N$ ) експериментальних даних приведе до наступної системи рівнянь виду:

$$\begin{cases} a_1 y(1) + a_2 \cdot y(0) + bu(1) = y(2); \\ a_1 y(2) + a_2 \cdot y(1) + bu(2) = y(3); \\ \dots \\ a_1 y(N-1) + a_2 \cdot y(N-2) + bu(N-1) = y(N). \end{cases}$$

Матрична форма запису даної моделі має стандартний вид лінійної моделі:

$$\begin{bmatrix} y(1) & y(0) & u(1) \\ y(2) & y(1) & u(2) \\ \dots & & \\ y(N-1) & y(N-2) & u(N-1) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y(2) \\ y(3) \\ \dots \\ y(N) \end{bmatrix}.$$

С урахуванням позначення матриці вихідних даних входу-виходу:

$$\Psi = \begin{bmatrix} y(1) & y(0) & u(1) \\ y(2) & y(1) & u(2) \\ \dots & & \\ y(N-1) & y(N-2) & u(N-1) \end{bmatrix},$$

параметри дискретної моделі  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b$  визначаються на основі загального співвідношення МНК:

$$\begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ b \end{bmatrix} = [\Psi^T \Psi]^{-1} \cdot \Psi^T \begin{bmatrix} y(2) \\ y(3) \\ \dots \\ y(N) \end{bmatrix}.$$

Також приведемо програмну реалізацію явного МНК об'єкту другого порядку з передатною функцією  $W_o(p) = \frac{k_0}{T_1 p^2 + T_2 p + 1}$  і коефіцієнтами

$$k_0 = 4; T_1 = 19; T_2 = 5 \text{ хв.}$$

Приведемо програмну реалізацію оцінювання параметрів  $K_0$ ,  $T_1$ ,  $T_2$  об'єкту за допомогою рекурентного МНК при використанні АРСС – моделі об'єкту

другого порядку [39]. Текст програми в спеціалізованому додатку MatLab [39] для ідентифікації параметрів моделі представлений нижче:

```
s1=tf([4],[19 5 1]) % безперервна передатна функція об'єкту
T_end=60; % інтервал вимірювань
dt=0.2; % шаг дискретизації
t=0:dt:T_end; % масив дискретного часу
N=length(t); % розмір вибірки
u=ones(N,1); % масив значень одиничної вхідної дії
y=lsim(s1,u,t); % масив значень вихідної дії
n=2; % порядок об'єкту
I=diag([1 1 1]);
i=1; % початковий крок
P=1000*I; % початкове приближення
betta=[0;0;0];
bet(i, R =betta; % масив оцінок параметрів
% черговий крок обчислень
For i= n: N-1
R=[y(i+n-2:-1:i-1);u(i+n-2:-1:i)]'; % формування розширеної матриці даних
gamma=P*R'/(R*P*R'+1);
betta=betta+gamma*(y(i+1)-R*betta);
P=(I-gamma*R)*P;
bet(I,= betta;
end;
plot(bet,'+');
T1=dt^2/(1-betta(1)-betta(2)) % розрахунок параметрів безперервної моделі
T2=(betta(2)*T1+T1+dt^2)/dt
K=betta(3)*T1/dt^2.
```

Оцінки параметрів безперервної моделі:

$$T_1 = 18.8; T_2 = 5.03; K = 4.05.$$

З одержаних розрахованих результатів видно високу точність оцінювання (95 %) всіх параметрів моделі. Розрахункова практика і криві розгону (рис. 2.46) показують, що рекурентний МНК має високу збіжність (90 %) і отримана модель є адекватною об'єкту управління СПУ.

Аналіз процедури верифікації за оцінками параметрів моделі, а також порівняльних характеристик (див. рис. 2.46 процеси №1 і № 2) дозволяє отримати **заключення** про виявлення чинників, що підвищують процедуру параметричної ідентифікації діючих на основі синтезу методів авторегресії ковзного середнього (АРКС) і рекурентного методу найменших квадратів, що дозволяє отримати лінійні моделі САУ параметрів СПУ зі значенням ступеня адекватності рівним 95 %.

Дослідження статичних характеристик СПУ за допомогою паспортних даних (рис. 2.47) [204] дозволяє визначити, як будуть змінюватися витратні параметри котла при зміні парового навантаження ( $P_H$ ) в діапазоні 25, 50, 75, 100 %.

Отримана за допомогою програми Matlab [39] система рівнянь регресії (2.39) показує залежність між витратою палива ( $B_T$ ) і витратою повітря ( $D_B$ ), витратою димових газів ( $G_{дг}$ ) і витратою палива тощо, а також дозволяє визначити основні показники роботи допоміжного СПУ на всіх режимах теплового навантаження:

$$\left. \begin{aligned} D_{п}(P_{н}) &= 0,04P^3 + 0,04P^2 + 11,2P + 21,8; \\ B_T(P_{н}) &= 1,4P^3 + 24,2P^2 + 851,8P + 1603,4; \\ D_B(P_{н}) &= 921P^2 + 1362P + 25827; \\ G_{дг}(P_{н}) &= 938P^2 + 14014P + 27434; \\ D_B(B_T) &= -359B_T^3 + 559B_T^2 + 13591B_T + 26109; \\ G_{дг}(B_T) &= -360B_T^3 + 551B_T^2 + 14445B_T + 27735. \end{aligned} \right\} \quad (2.39)$$

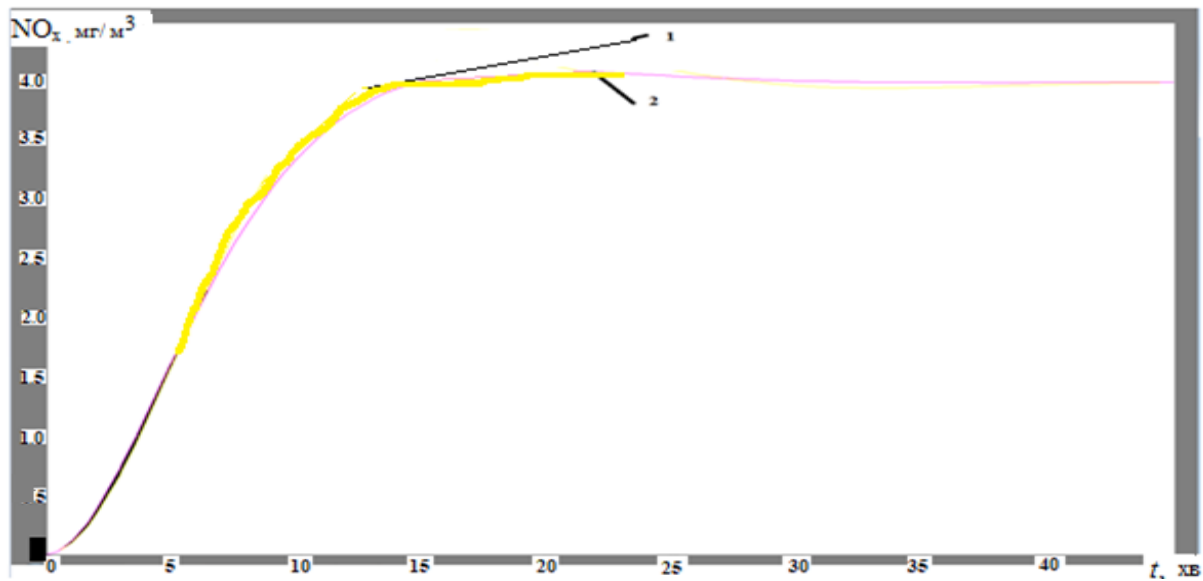


Рис. 2.46. Процес верифікації моделі – криві розгону об'єкту - утилізаційного парового котла по каналу управління (витрата димових газів – вміст  $\text{NO}_x$ ): 1 – об'єкт (запуск СПУ з «гарячого стану з набором навантаження 0,1 від номінального»); 2 – модель

Характеристики СПГ МАС-35В

| Навантаження                         |     | 25%                | 50%    | 75%    | 100%   |        |
|--------------------------------------|-----|--------------------|--------|--------|--------|--------|
| Парова продуктивність                |     | kg/h               | 8,750  | 17,500 | 26,250 | 35,000 |
| Тиск у барабані                      |     | kg/cm <sup>2</sup> | 16.0   | 16.0   | 16.0   | 16.0   |
| Температура живлячої води            |     | deg.C              | 80.0   | 80.0   | 80.0   | 80.0   |
| Температура насиченого пару          |     | deg.C              | 203.4  | 203.4  | 203.4  | 203.4  |
| ККД (LHV BASE)                       |     | %                  | 82.1   | 82.8   | 81.9   | 80.5   |
| Теплова продуктивність               | HHV | kcal/kg            | 10,280 | 10,280 | 10,280 | 10,280 |
|                                      | LHV | kcal/kg            | 9,713  | 9,713  | 9,713  | 9,713  |
| Споживання мазута                    |     | kg/h               | 644    | 1,277  | 1,937  | 2,628  |
| Надлишкове споживання повітря        |     | %                  | 31     | 16     | 15     | 15     |
| Вміст O2                             |     | %                  | 5.0    | 3.0    | 2.9    | 2.9    |
| Споживання приточного повітря        |     | kg/h               | 11,820 | 20,740 | 31,190 | 42,320 |
| Споживання димових газів             |     | kg/h               | 12,460 | 22,020 | 33,130 | 44,940 |
| Температура навколишнього середовища |     | deg.C              | 45     | 45     | 45     | 45     |

Рис. 2.47. Характеристики допоміжного СПУ Mitsubishi MAC -35 [204].

Статичні залежності, одержані на основі рівнянь регресії (2.39), представлені на рис. 2.48 – 2.49.

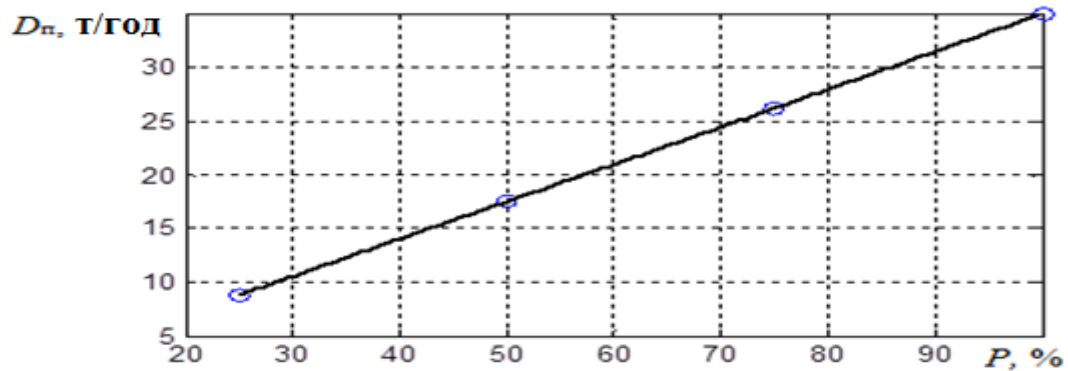


Рис. 2.48. Статична характеристика витрати пару СПУ МАС 35 від парового навантаження агрегатів СЕУ

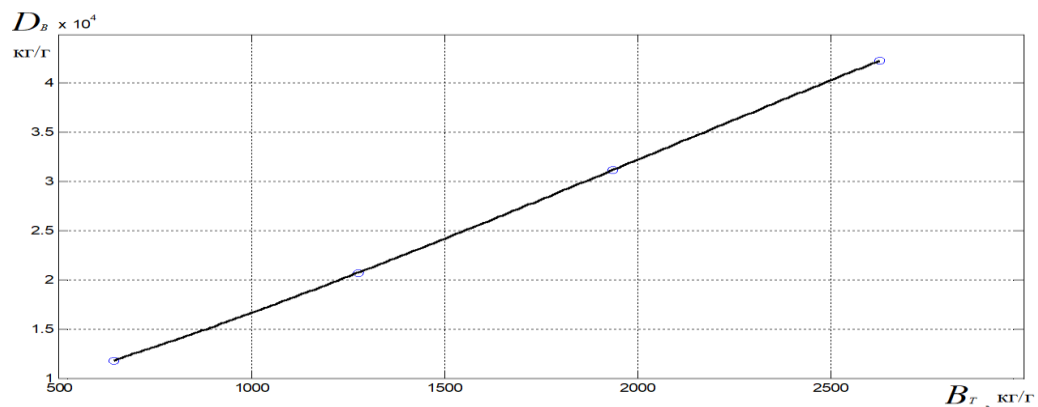


Рис. 2.49. Статична характеристика витрати повітря СПУ МАС 35 від витрати палива

Експериментальна характеристика, яка демонструє залежність коефіцієнта надлишку повітря від навантаження, показана на рис. 2.50. На основі експериментальних даних за допомогою програми MatLab одержано рівняння регресії:

$$\alpha(P_H) = 0.014P^4 - 0.05P^3 + 0.06P^2 - 0.03P + 1.12. \quad (2.40)$$

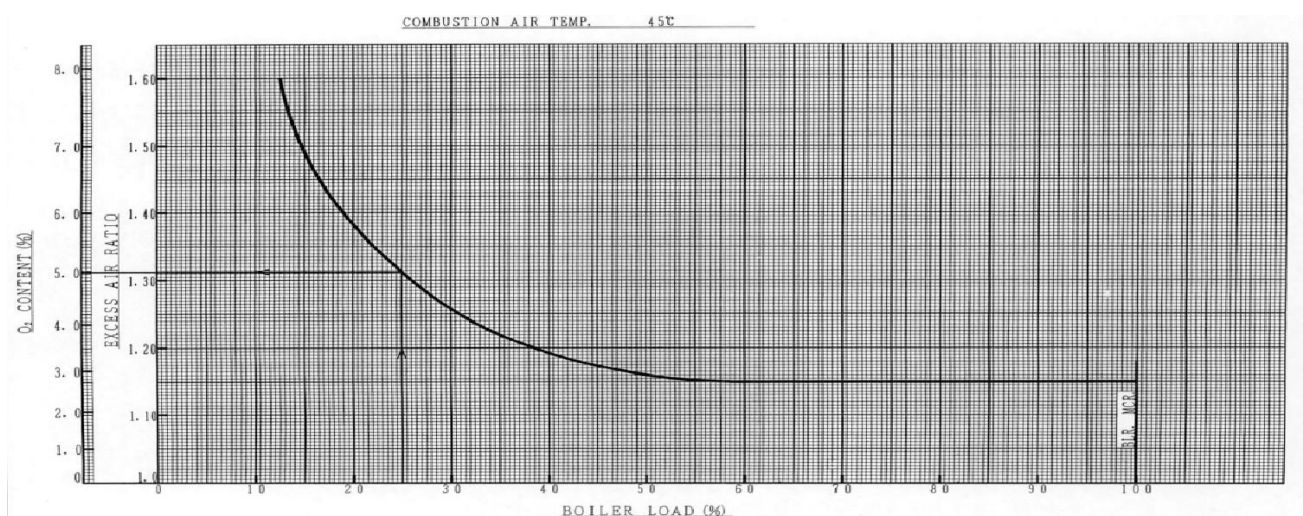


Рис. 2.50. Експериментальна статична характеристика залежності коефіцієнту надлишку повітря від теплового навантаження СПУ MAC 35 [204].

Для перевірки ступеня адекватності отриманої статистичної моделі (2.40) отримана теоретична залежність (рис. 2.51). Порівняльний аналіз теоретичних (див. рис. 2.51) і експериментальних даних (див. рис. 2.50) демонструє їх схожість, тобто, отримане рівняння адекватно описує експериментальний процес.

Математичні моделі адекватно описують статистичні характеристики СПУ і можуть бути використані в ході подальших досліджень при моделюванні пропонованих САУ, а також розрахунку статичних коефіцієнтів диференціальних рівнянь, що описують динаміку параметрів СПУ.

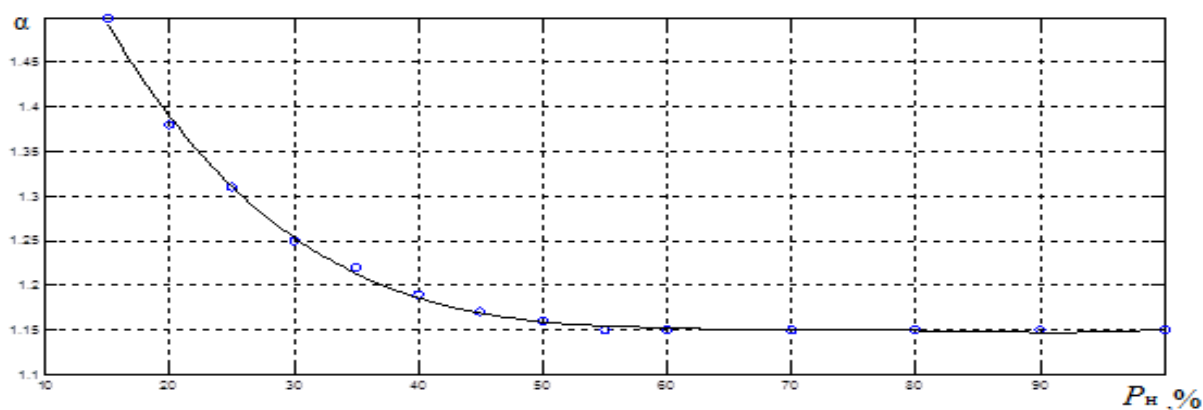


Рис. 2.51. Розрахункова статична характеристика параметрів СПУ

Передатні функції, отримані в ході апроксимації сімейства кривих розгону каналів управління і збурення СПУ, а також аналітичного моделювання об'єктів парових водотрубних котлів з примусовою циркуляцією різних марок, зведені в табл. 2.11. Подальше застосування отриманих моделей в процесах моделювання діючих і пропонованих САУ дозволить успішно досліджувати якість процесів експлуатації СПУ.

Таблиця 2.11

Передатні функції основних каналів САУ ДПК, УПК, КПК, одержані на основі експериментальних даних при паровому навантаженні 0,5 від номінального

| №  | Канал управління                                                                  | Передатна функція                           |
|----|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| 1  | 2                                                                                 | 3                                           |
| 1  | витрата повітря – вміст O <sub>2</sub>                                            | $w(s) = \frac{100}{400s+1} e^{-15s}$        |
| 2  | продуктивність димососа – розрядження в топці                                     | $W(s) = \frac{10}{12s^2 + 8s + 5} e^{-5s}$  |
| 3  | витрата палива – вміст O <sub>2</sub>                                             | $w(s) = \frac{-3.58}{7s+1} e^{-2s}$         |
| 5  | подача живильної води – рівень в барабані                                         | $W(s) = \frac{0.28}{27s} e^{-4s}$           |
| 6  | витрата палива – тиск пару                                                        | $w(s) = \frac{0.65}{5s+1} e^{-2s}$          |
| 7  | витрата води на охолодження – температура перегрітого пару                        | $w(s) = \frac{8.07}{3.58s+1} e^{-2s}$       |
| 8  | витрата повітря – вміст O <sub>2</sub>                                            | $W(s) = \frac{1.1}{2s^2 + 13s + 1} e^{-5s}$ |
| 9  | витрата випускних газів дизеля – тиск пару в турбогенератор                       | $W(s) = \frac{0.45}{(3.9s+1)^3} e^{-0.52s}$ |
| 11 | швидкість роботи димососа випускних газів СГД – вміст NO <sub>x</sub> в атмосфері | $W(s) = \frac{4}{(19s^2 + 5s + 1)}$         |
| 12 | витрата відпрацьованих газів – тиск пару                                          | $W(s) = \frac{1}{(7s+1)(5s+1)} e^{-0.5s}$   |



| 1  | 2                                               | 3                                                                                                      |
|----|-------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 13 | співвідношення витрати палива – витрата повітря | $W(s) = \frac{0.5}{(12 \cdot s + 1)} \cdot \frac{1}{(2 \cdot s + 1)} \cdot \frac{1}{(3 \cdot s + 1)};$ |
| 14 | витрата води на продувку – вміст NaCl           | $w(s) = \frac{1.5}{25s + 1} e^{-15s}$                                                                  |
| 15 | витрата пару – рівень в барабані                | $W_{Gn-h}(s) = \frac{-0,027}{37,6s} e^{-25s}$                                                          |
| 16 | витрата пару – тиск пару                        | $W(s) = \frac{-4.9}{148s + 1} e^{-60s}$                                                                |
| 17 | витрата палива – витрата пару                   | $W(s) = \frac{0.5}{25s + 1}$                                                                           |
| 18 | витрата пару – температура пару                 | $W(s) = \frac{-3.91}{5,07s + 1}$                                                                       |

Також, за допомогою отриманих передавальних функцій (див. табл. 2.11) можна проводити додаткові дослідження, які пов'язані з визначенням технічного стану елементів СПУ. Згідно з методом технічної діагностики [170] проводяться виміри амплітудно-частотних (АФЧ) і фазо-частотних (ФЧХ) характеристик, за допомогою генератора хитної частоти або генератора синусоїдальних коливань параметрів СПУ (тиску повітря, тиску пари, розрядження в топці, тиску води, температури вихідних газів тощо). Представлені характеристики заміряються як при нормальній роботі СПУ (на ряді теплових режимах), так і у випадках передаварійних ситуацій (за допомогою імітації збоїв в вузлах і елементах СПУ на експериментальному стенді). Аварійні ФЧХ і АЧХ будуть еталонними. Для своєчасного діагностування можливості виникнення несправностей в вузлах СПУ буде визначатися величина і швидкість відхилення по амплітуді і фазі, що виміряно в ході експлуатації допустимих характеристик СПУ від еталонних.

Для перевірки ефективності запропонованого методу на прикладі визначення характеристик параметрів СПУ використовується модель яка представлена у вигляді передавальної функцією по каналу «продуктивність димососу - розрядження в топці» (див. табл.2.11, № 2). Відомо, що непрямий

показник стійкості факела пальника - постійство розрядження у верхній частині топки котла. Топки котлів повинен працювати під невеликим розрядженням, рівним в середньому 10-20 Па у верхній частині топкової камери. Розрядження сприяє стійкості факела і є непрямим показником матеріального балансу між повітрям що нагнітається в топку і вихідними газами. При цьому збільшення розрядження в топці СПУ призводить до зростання присосов повітря і відповідно до зменшення ККД парогенератора.

Пропонована система діагностики ефективності процесу розрядження представлена на рис. 2.52. Система регулювання якості горіння палива з'єднана з системою регулювання розрідження в топці котла. Регулятор розрядження (РС) приймає сигнал по розрідженню від датчика (РЕ) в верхній частині топки, після чого відбувається вплив і змінюється положення напрямних апаратів димососів (ДС). Основним збуренням для САУ розрядження в топці барабанного котла проявляється в змінну витрати повітря. До датчика розрядження (РЕ) підключений генератор частоти (СЕ) який вимірює АФЧХ значень розрядження в топці по осцилограмме пульсацій тиску.

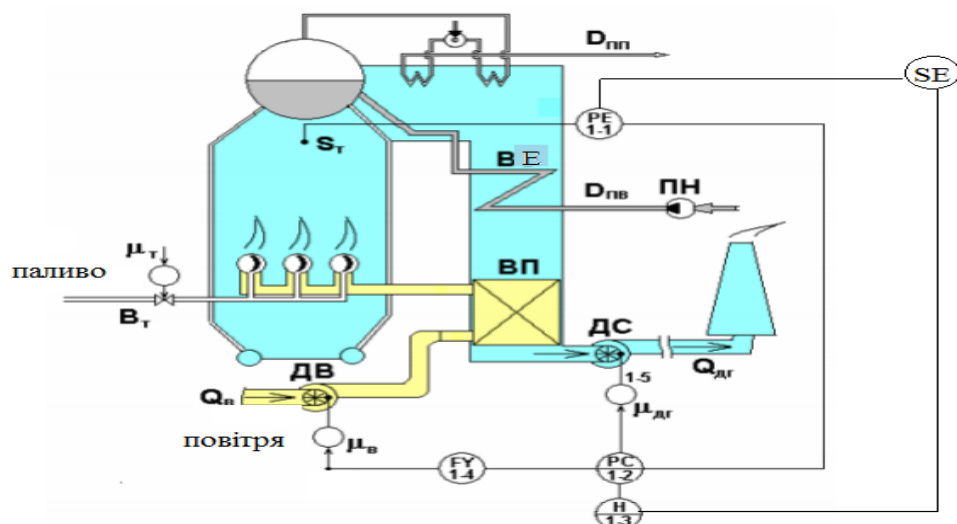


Рис. 2.52. Схема регулювання розрідження в топці СПУ з додатковим датчиком визначення частоти і амплітуди вимірюваного параметри: РЕ-датчик розрядження;

РС - регулятор розрядження; Н - пульт управління; FУ- комутаційна апаратура; SE – датчик АФЧХ

Передавальна функція по каналу «продуктивність димососу - розрядження в топці» при роботі СПУ на номінальному навантаженні має вигляд  $W(s) = \frac{10}{12s^2 + 5s + 1}$ , а її АФЧХ отримана за допомогою програмного пакету MatLab представлена на рис. 2.53.

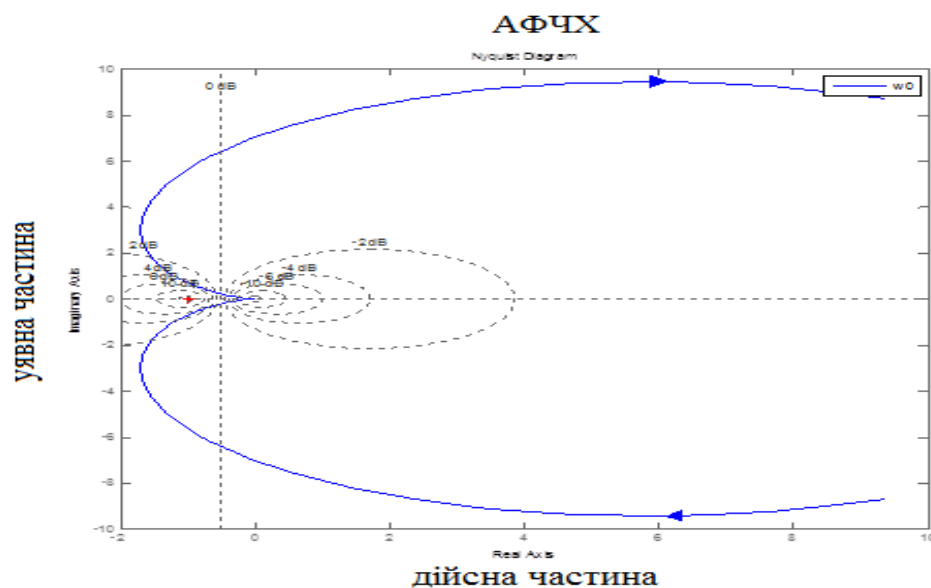


Рис. 2.53. АФЧХ передавальної функції під каналом «продуктивність димососу - розрядження в струмі» при роботі СПУ на 50% навантаженні

Після імітації передаварійний ситуації в програмі MatLab, еталонна АФЧХ представлена на рис.2.54.

Як видно з порівняльного аналізу рис. 2.53 і 2.54 в області позитивних і негативних амплітуд і частот, відхилення від еталону складає п'ять значень за амплітудою і три по частоті, тобто система перебуває на межі стійкості, тобто в передаварійному стані, який пов'язаний зі збільшенням розрядження в топці котла і можливим погасанням факелу пальника, що відбувається зі значною швидкістю.

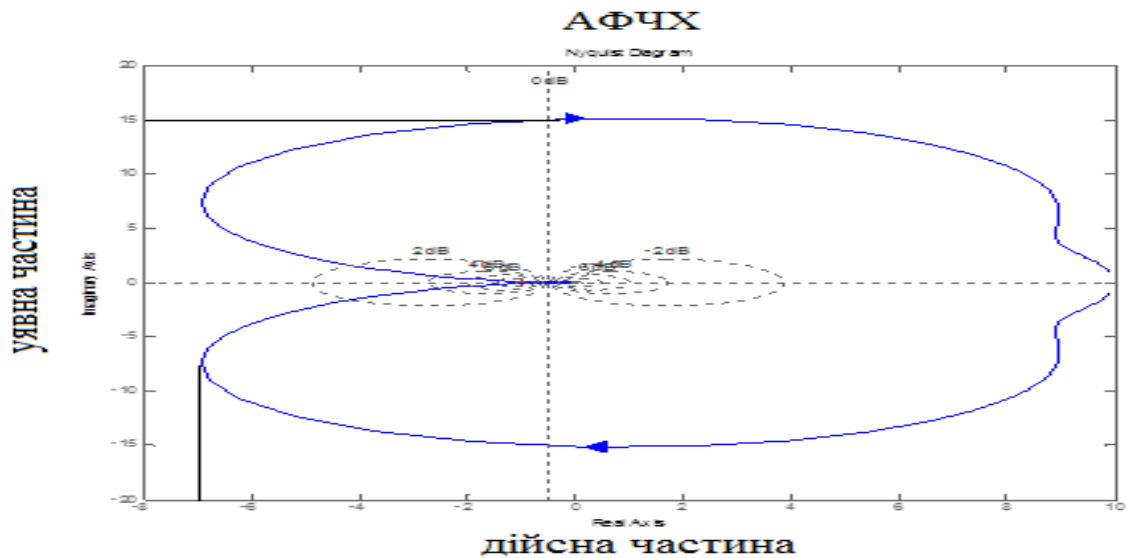


Рис 2.54. АФЧХ еталонної передавальної функції по каналу «продуктивність димососу - розрядження в топці» при знаходженні СПУ в передаварійному стані

Таким чином, використання запропонованого діагностичного методу і закладених в його програму амплітудно-частотних і фазових характеристик дозволить своєчасно встановити наявність передаварійних ситуацій на елементах і вузлах парогенератора і тим самим підвищити надійність СПУ в цілому.

## 2.5. Висновки до розділу

1. Визначено, що розроблена система універсальних лінійних диференціальних рівнянь моделей динаміки підсистем СПУ, дозволяє розрахувати параметри САУ з високою точністю та проаналізувати зміну параметрів СПУ при різних теплових навантаженнях.

2. Встановлено, що передавальних функцій амплітудно частотні і фазові характеристики контрольованих параметрів можуть бути використані в процесах діагностики технічного стану елементів СПУ за допомогою генератора

частотних коливань, що дозволить зменшити ймовірність виникнення аварійних ситуацій СПУ.

2. Встановлено, що оцінку зростання появи межкристалльної, низькотемпературної, кисневої та хімічної корозії в елементах СПУ можна здійснити за допомогою моделей САУ, які описують процеси концентрації розчинених речовин в котельній воді, швидкості протікання димових газів і пароутворення.

3. Доведено можливість використання методу пасивної ідентифікації Р. Калмана для об'єктів СПУ. Встановлено, що метод забезпечує високу ступінь адекватності аналітичних моделей при їх порівнянні з експериментальними даними.

4. Встановлено, що відмінність значень передатних функцій і їх порядку, які отримано за різними методиками, дозволяють зробити висновок, що використовувані методики графічної обробки експериментальних даних не є достатньо ефективною.

5. Доведено, що математичні моделі теплових і гідравлічних процесів, що протікають в СПУ, відрізняються можливістю аналізу процесів корозії в елементах СПУ. Моделі дозволяють оптимізувати настроювальні параметри регуляторів в САУ головних, допоміжних, утилізаційних і комбінованих водотрубних парових котлів різної парової продуктивності та провести розрахунки, що визначають вплив процесів регулювання на технічний стан елементів СПУ.

7. Доведено, що використання отриманих емпіричних моделей в процедурах теплотехнічної наладки і налагодження режимів горіння СПУ широкого конструктивного класу може привести до підвищення надійності та економічності роботи СПУ з урахуванням взаємного впливу теплотехнічних і технологічних факторів

### РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ САУ СПУ

#### 3.1. Дослідження нелінійних характеристик об'єктів управління СПУ

Відомо, що всі реальні САУ є в тій чи іншій мірі нелінійними системами. Нелінійність систем управління в більшості випадків пов'язана з нелінійністю реальних статичних характеристик елементів САУ параметрів СПУ. В той же час, сучасні цифрові САУ розглянутих СПУ, як правило, реалізують лінійні (ПД) закони управління. Динаміка об'єктів управління підпорядковується принципу суперпозиції і у контрольованих параметрів СПУ відсутні ознаки суттєвої нелінійності, наприклад, такі як режими незатухаючих періодичних коливань з постійною амплітудою і частотою (автоколивань), що виникають в системах при відсутності періодичних зовнішніх впливів при роботі на сталих режимах і сприятливою навігаційної обстановці.

Як правило, такі системи регулювання об'єктів СПУ можна віднести до класу слабконелінійних систем [153]. У такому випадку, для дослідження властивостей САУ СПУ прийнятну точність може забезпечити і лінійна математична модель. Однак, на значному ряді суден, все ще діє широкий клас систем управління, який реалізує нелінійний (позиційний або релейний) закон управління. На риболовних суднах і плавучих риболовних заводах часто використовуються парові котли із змінним тиском пари яке здійснюється позиційної САУ. Наприклад СПУ малої теплової потужності (котел з парової продуктивністю 4 т/год та робочим тиском 0,05 – 0,5 МПа). І часто, нехтуючи нелінійністю заради спрощення описуючої процес системи диференціальних рівнянь, розробниками приймається лінеаризована модель.

Наприклад, система автоматичного регулювання роботою утилізаційного котла марки КУВ-100 по температурі води, робота якої забезпечується позиційним регулятором з гідравлічними підсилювальними реле і поршневыми

сервомоторами подвійної дії, в [153] розглядається як лінійна. У той же час автоматична підтримка заданої температури пару на виході з котла відбувається шляхом перестановки заслінки (нелінійний елемент) перепускного пристрою в нижнє або верхнє положення і здійснюється сервомотором, який також є нелінійним елементом САУ. Неврахування властивостей нелінійних елементів в проектованій САУ СПУ тобто не врахування фізичних обмежень пристроїв управління може привести, з плином часу, до упору і руйнування елементів системи автоматичного управління.

З метою аналізу властивостей нелінійної САУ, розглядається схема релейного регулювання тиску пару в паровому котлі малої потужності і змінним тиском пару (парової котел марки КП 4000М, з парової продуктивністю 4 т/год та робочим тиском 0,05 - 0,6 МПа, котел обслуговується компанією Южспецмонтаж), яка здійснюється включенням і вимиканням електроприводного топкового пристрою за допомогою регулятора тиску пари. Експериментальна часова діаграма зміни регульованої величини ілюструється на рис.3.1

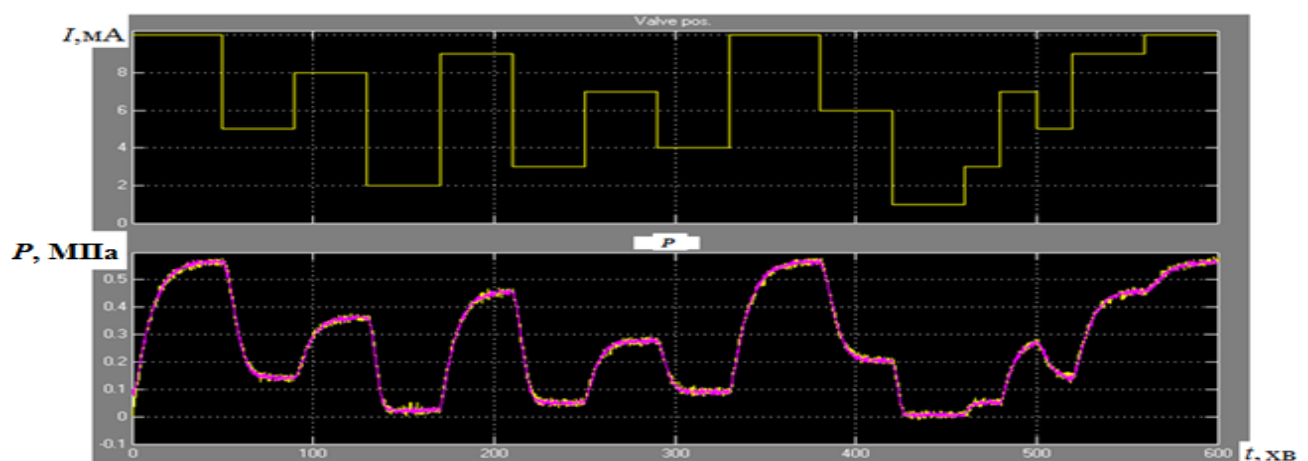


Рис. 3.1. Експериментальна часова діаграма зміни тиску пари в залежності від позиційного сигналу управління котла КП-4000

Частота включень залежить від величини споживання пару (зовнішнє

збурення, навантаження). Нерівномірність регулювання можна зменшити за рахунок звуження установки реле тиску, однак, при цьому зростає частота включень в роботу топкового пристрою. Це позначиться на надійності роботи САУ тиску. Відзначимо, що релейні суднові САУ застосовуються для регулювання процесів, в яких допускаються суттєві коливання регульованого параметру (регулювання тиску стиснутого повітря в компресорах при набиванні балонів, рівня води в утилізаційних СПУ, регулювання температури в морозильних камерах тощо). На основі наведених вище експериментальних даних (див. рис. 3.2), в програмному забезпеченні System Identification Toolbox [39], була розроблена математична модель релейного САУ тиску СПУ. Для виконання етапів ідентифікації та вибору програмної моделі, що адекватно описує експериментальні дані, використовуються часова діаграма (див. рис. 3.1).

Для опису релейної САУ тиску пару використовується дискретна ARMAX модель [39] виду:

$$A(q)y(t) = B(q)u(t - n_k) + C(q)e(t), \quad (3.1)$$

де  $y(t)$  – вихід в момент часу  $t$ ;  $n_a$  – число полюсів;  $n_b$  – число нулів плюс 1;  $n_c$  – число  $C$  коефіцієнтів;  $n_k$  – число тактів проходу вхідного сигналу на вихід (затримка системи);  $y(t - 1) \dots y(t - n_a)$  – попередні виходи від яких залежить поточний вихід;  $u(t - n_k) \dots u(t - n_k - n_b + 1)$  – попередні входи від яких залежить поточний вихід;  $e(t - 1) + \dots + c_{n_c}e(t - n_c)$  – значення білого шуму.

Параметри  $n_a$ ,  $n_b$ ,  $n_c$  – порядки ARMAX моделі,  $n_k$  – затримка,  $q$  – оператор затримки. В (3.1) наступні складові:

$$\begin{aligned} A(q) &= 1 + a_1q^{-1} + \dots + a_{n_a}q^{-n_a}; \\ B(q) &= b_1 + b_2q^{-1} + \dots + b_{n_b}q^{-n_b+1}; \\ C(q) &= 1 + c_1q^{-1} + \dots + c_{n_c}q^{-n_c}. \end{aligned}$$

Після завантаження даних (див. рис. 3.1) в програмний додаток ідентифікації System Identification Toolbox, що реалізує ARMAX модель [39], програмою



розраховані наступні значення, які описують модель каналу управління «позиція регулюючого органу - тиску пару»:

amx2221 = Discrete-time ARMAX model:  $A(z)y(t) = B(z)u(t) + C(z)e(t)$ ;

$A(z) = 1 - 1.968 (+/- 0.003824) z^{-1} + 0.9687 (+/- 0.003765) z^{-2}$ ;

$B(z) = 0.0004239 (+/- 6.504e-05) z^{-1} - 0.0003886 (+/- 6.639e-05) z^{-2}$ ;

$C(z) = 1 - 1.611 (+/- 0.0136) z^{-1} + 0.6698 (+/- 0.01346) z^{-2}$ .

Для перевірки достовірності моделі було проведено порівняння реакції одержаної моделі з експериментальними значеннями в додатку Simulink (рис. 3.4)

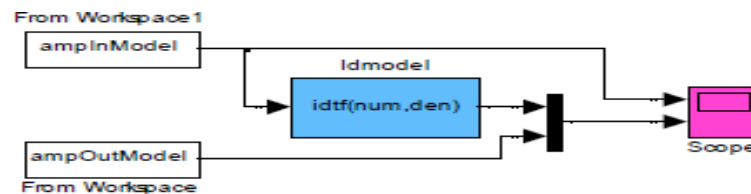


Рис. 3.2. Схема порівняння відгуку прототипу і його моделі

Також, для визначення адекватності моделі прототипу була виконана процедура верифікації, яка полягала в поданні на вхід об'єкта і моделі даних, які не використовувалися для ідентифікації, і порівнянні їх відгуків (рис. 3.3).

Порівняльний аналіз процесів 1 і 2, а також значень середнього відхилення  $A$  експериментальних і модельних даних (див. рис. 3.5 процеси) демонструє хорошу адекватність отриманої ARMAX моделі, рівну 90 %. На основі проведеної верифікації отримано наступне заключення - встановлено, що параметрична ідентифікація на основі синтезу методів авторегресії змінного середнього (АРЗС) і поворотного методу найменших квадратів дозволяє отримати лінійні моделі САУ параметрів СПУ зі значенням ступеня адекватності рівним 90 %.

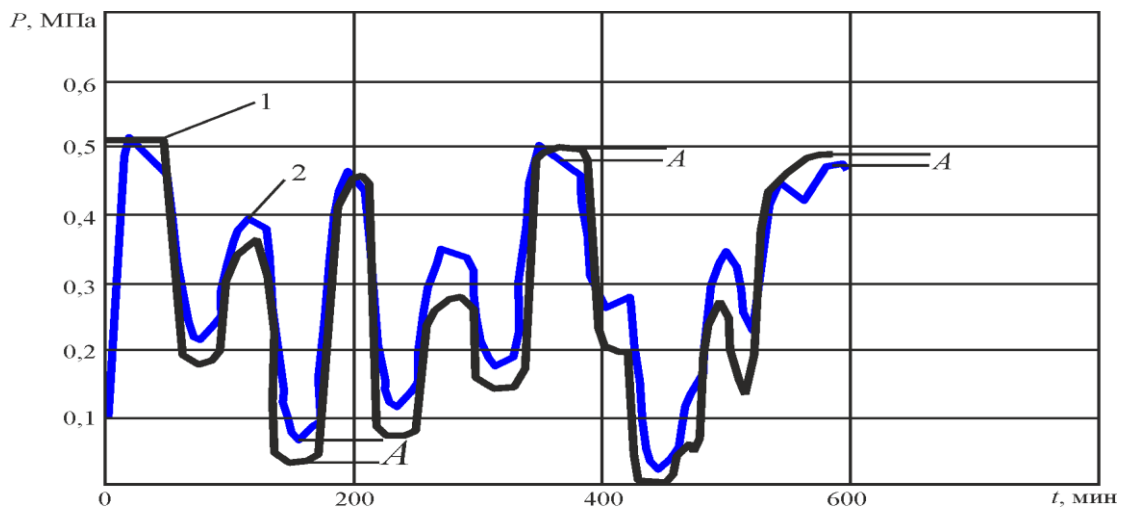


Рис. 3.3. Процес верифікації: 1 – прототип (експериментальні дані);  
2 – модель;  $A$  – середнє відхилення (10 %)

У [153] зазначено, що при достатній інтенсивності зовнішнього випадкового впливу (шторму) в коливальний режим можуть бути введені значення параметрів як регулюючих органів так і СПУ. Так в штормових умовах спостерігаються розгойдування ділянок регулювання тиску пару головних і допоміжних СПУ (інерційних об'єктів), частоти коливань значень параметрів в 10 – 15 разів нижче частот збурення. Хитавіца судна значно впливає на процеси циркуляції і теплопередачі в СПУ. В роботі [153] показано, що періоди хитавици і її прискорень близькі до періодів власних коливань циркуляційних контурів морських котлів. А інтенсивність (висота розмаху) процесу вертикальних прискорень має тривалі періоди, близькі до періодів коливань СПУ.

При досить сильних явищах хитавици можуть виникнути коливання коефіцієнта теплопередачі СПУ, які породжують суттєві коливання тиску пари на виході з котла. За умови, що штормові умови є типовими умовами плавання судна, аналіз характеристик процесів регулювання (САУ тиску пари), що приймають істотні нелінійні властивості, в даних умовах є важливою складовою синтезу САУ СПУ.

Відомо, що у деяких випадках в СПУ (особливо при сильній хитавиці судна) протікають процеси кавітаційної ерозії. В підйомних трубах кавітація виникає на виході пароводяної суміші в барабан. Сутність цього процесу полягає в тому, що деяка кількість бульбашок пари при виході струменя пароводяної суміші в недогрітій до кипіння воді схлопується, обумовлюючи гідравлічні мікроудари. При цьому першими починають схлопуватися бульбашки пара, що розташовані на периферії струменя, звідки починається її охолодження при вході в недогріту до кипіння воду. Під дією корозії пошкодження поширюється всередину труби. Під час цих руйнувань з'являється щілинна корозія, яка може викликати небезпечні пошкодження труб, упускаючи води з барабана [15]. З урахуванням вищевикладеного можна відзначити, що розробка нелінійних моделей, які враховують вплив хвильових збурень на експлуатаційні характеристики СПУ, є перспективним напрямком дослідження в областях розробки високонадійних САУ і вивчення процесів корозії в елементах СПУ.

Згідно з експериментальними даними СПУ змінного тиску пару [153], за допомогою програмного додатка System Identification Toolbox [39] були отримані наступні характеристики (рис. 3.4).

За допомогою додатку програми System Identification Toolbox [39] було представлено два подання нелінійного процесу зміни тиску пара в СПУ при сильній хитавиці. В якості моделей експериментального процесу були обрані ARMAX модель і нелінійна модель Вінера-Гаммерштейна [39] (рис. 3.5).

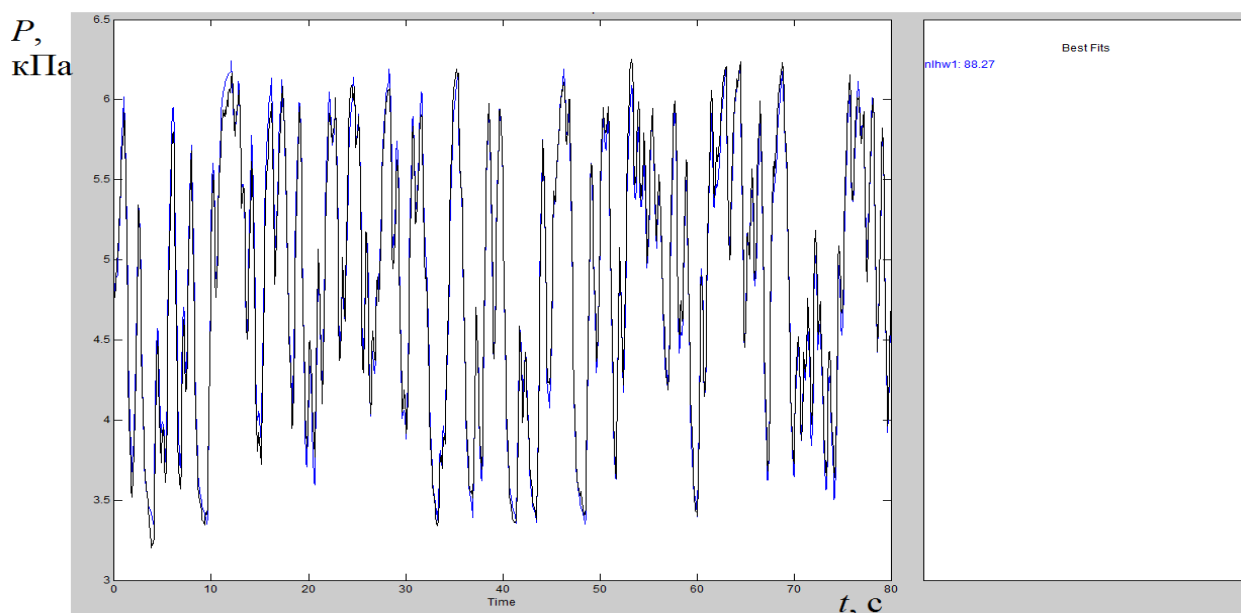


Рис. 3.4. Зміни тиску пару СПУ, зв'язаного з режимами роботи агрегатів СЕУ при сильній хитавици судна

В якості нелінійних елементів в моделі (див. рис. 3.6) реалізовані зона нечутливості (Dead Zone) і сигмоїдальна нейронна мережа (Sigmoid Network). Порівняльний аналіз двох моделей (ARMAX і Вінера – Гаммерштейна) представлений на рис. 3.7. Програма показала (див. рис.3.7), що нелінійна модель Вінера – Гаммерштейна, що реалізує нейронну мережу при валідації, повторює експериментальний процес (див. рис. 3.7) з достовірністю 95 %, на відміну від ARMAX достовірність якої нижче.

Таким чином, використання високоадекватної нелінійної моделі Вінера - Гаммерштейна для ефективної адаптації САУ тиску пару ДПК в умовах впливу значних збурень і зростання відхилення значення тиску пару від заданого, дозволить досягти необхідних показників якості САУ.

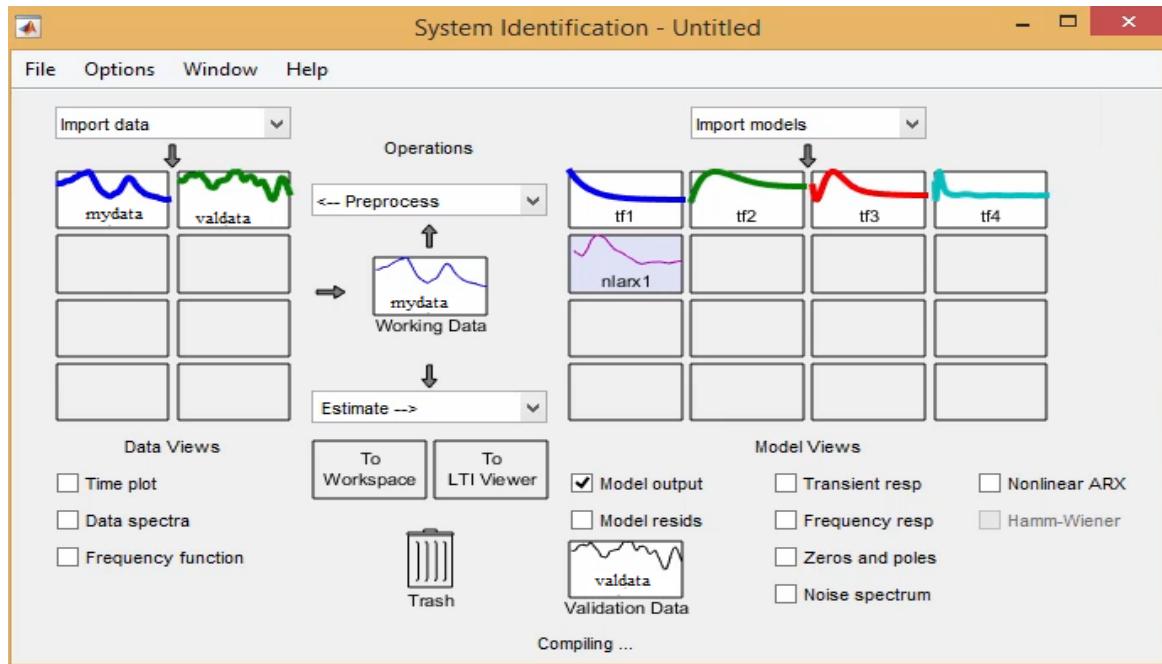


Рис. 3.5. Робоче вікно додатку ідентифікації System Identification Toolbox з використовуваними математичними моделями

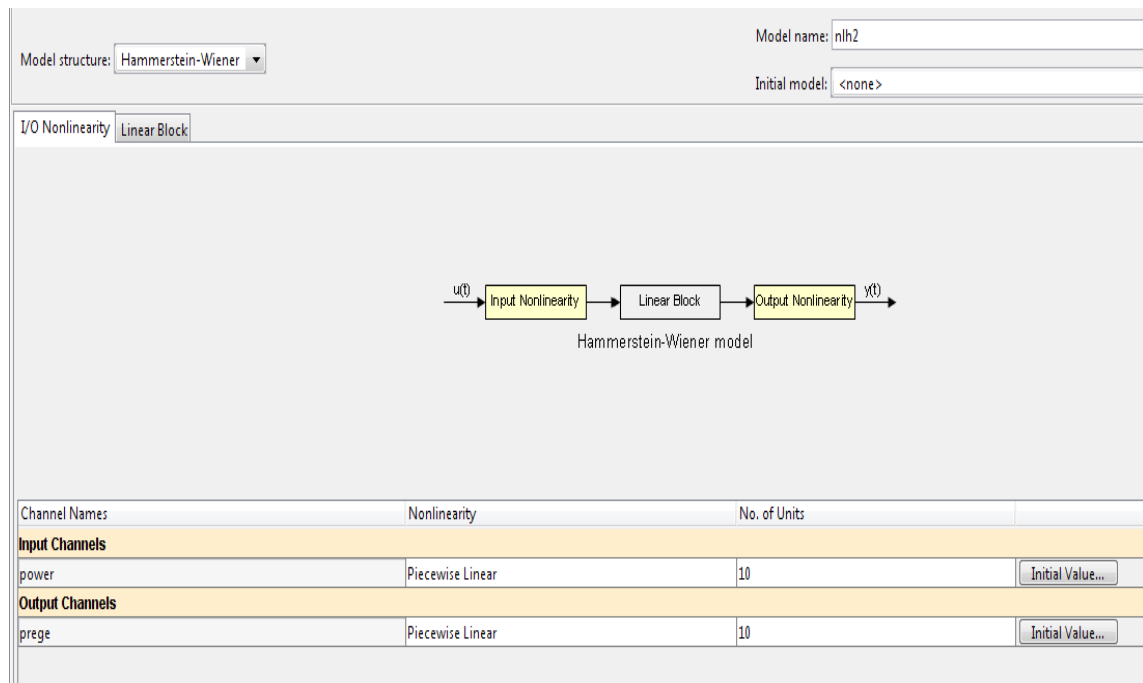


Рис. 3.6. Програмний вид нелінійної моделі Вінера – Гаммерштейна, що описує процес «витрата пару – тиск пару» при впливі значного зовнішнього збурення (хитавіці)

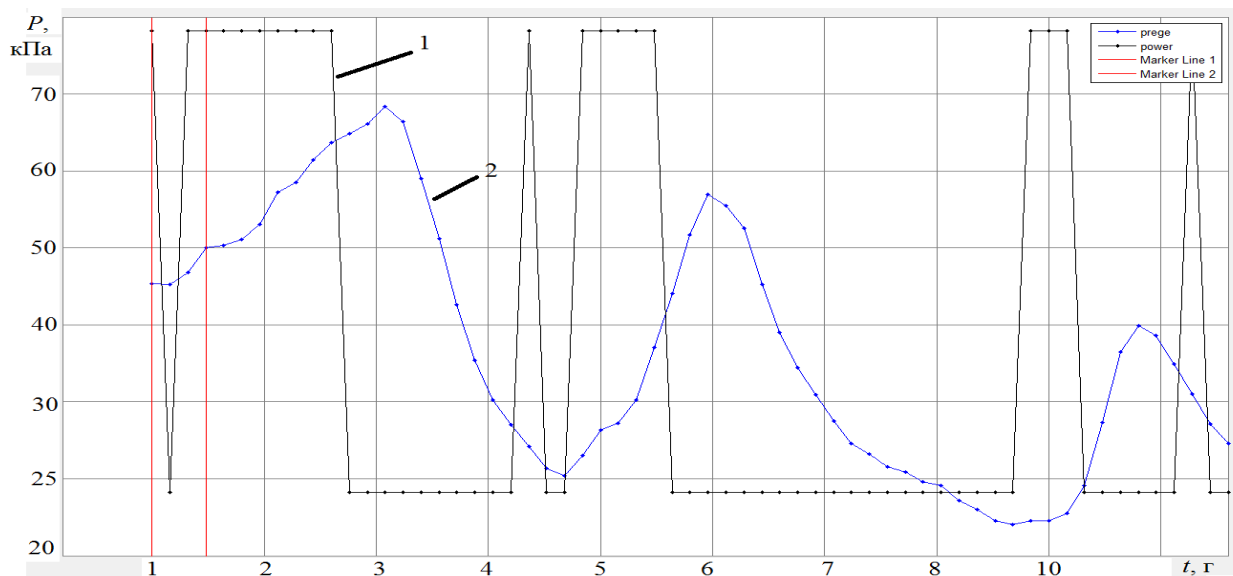


Рис. 3.7. Відображення моделі Вінера – Гаммерштейна по каналу «зміна парова навантаження (1) – зміна тиску пари (2)»

З огляду на те, що значні хвильові впливи на судно і, зокрема на агрегати СПУ, можуть викликати резонанс, що приведе до автоколивань, а в ряді випадків і розбіжному процесу регулювання [153], пропонується розробити нелінійну модель хвильових коливань (хвилювання моря в балах) з метою можливого її подальшого використання при моделюванні стійкості САУ СПУ.

За основу нелінійної моделі регулярних хвильових збурень пропонується прийняти диференціальне рівняння Ван дер Поля (осцилятор з нелінійним загасанням) виду [224]:

$$\frac{d^2x}{dt^2} - \mu(1-x^2)\frac{dx}{dt} + x = 0,$$

де  $x$  – координата точки (гребня хвилі), залежна від часу  $t$ ;  $\mu$  – коефіцієнт, що характеризує нелінійність і силу затухання коливань.

У осцилятора Ван дер Поля існують два ключових режима: при  $\mu > 0$  і при  $\mu = 0$ .

Коли  $\mu = 0$ , тобто осцилятор розраховується без затухання, то вказані вище рівняння перетворюються до виду гармонічного осцилятора:

$$\frac{dx^2}{dt^2} + x(t) = 0.$$

При  $\mu > 0$  система має деякі граничні цикли. Чим далі  $\mu$  від нуля, тим коливання осцилятора менше схожі на гармонічні.

Текст програми рішення представленого рівняння в командній строчці MatLab при початкових умовах: висота хвиль до 5 метрів (вершина гребня);  $\mu = 0$ ; час спостереження 100 с, показаний нижче. Досліджуване рівняння характеризує найбільш типовий зовні неконтрольований вплив - регулярне хвилювання.

```
>> tspan = [0, 100]; x0 = [5; 0]; Mu = 0.0;
>> disp(['Fig0 tspan = [0, 100]; mu=', num2str(Mu)])
Fig0 tspan = [0, 100]; mu=0
>> tic % Відраховуємо час
>> [t,x] = ode15s(@vanderpoldemo, tspan, x0,[],Mu);
>> toc;
Elapsed time is 10.58 seconds.
>> plot(t,x(:,1),'b','LineWidth',4)
>> xlabel('t'); ylabel('solution x')
>> title(['van der Pol Equation, \mu = ', num2str(Mu)])
>> hold on; tic
>> [t,x] = ode15s(@vanderpoldemo, tspan, x0,[],Mu);
>> toc;
Elapsed time is 13.5 seconds.
>> plot(t,x(:,1),'b','LineWidth',4)
>> hold off
Fig0 tspan = [0, 100]; mu=0
Elapsed time is 0.2 seconds.
Elapsed time is 0.3 seconds.
```

Перехідна характеристика представлена на рис. 3.8.

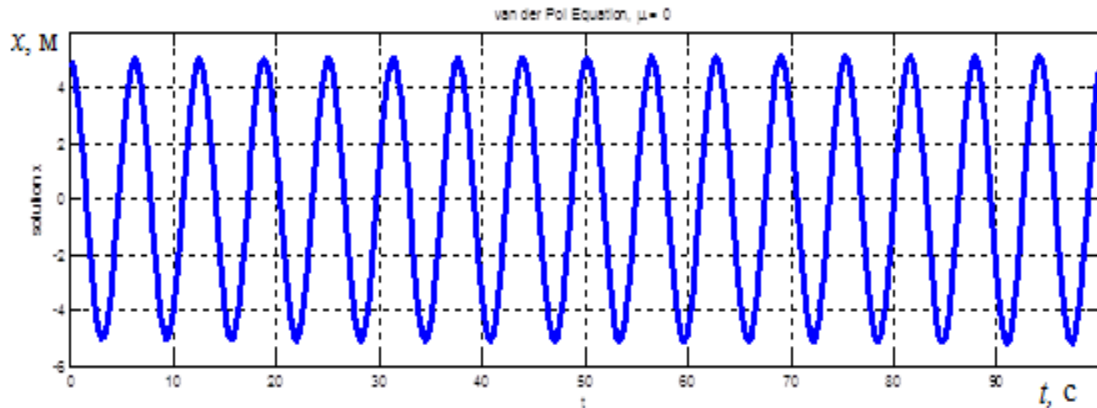


Рис. 3.8. Перехідна характеристика хвильових коливань

Відомим вченим О.М. Ляпуновим показано зв'язок між стійкістю нелінійної (вихідної) і лінеаризованої (приблизної моделі) систем у вигляді твердження: «... якщо лінеаризована система управління знаходиться поблизу або на межі стійкості, то для оцінки стійкості вихідної нелінійної системи слід провести додаткові дослідження (іншим методом або з більшою точністю, враховуючи малі нелінійності, відкинуті при лінеаризації за першим наближенням ...)» [138, с. 56].

Для аналізу САУ СПУ на стійкість проводилось дослідження САУ тиску пару СПУ з ПІ-регулятором, передатна функція якої має вигляд:  $W_p = 2 + \frac{1}{s}$  і об'єкт управління (канал регулювання «зміна тиску пару в паропроводі СПУ при впливі зовнішнього хвильового збурення (моделі гармонійного осцилятора)», описуваний диференціальним рівнянням:

$$2 \frac{d^3 P}{dt^3} + 3 \frac{d^2 P}{dt^2} + \frac{dP}{dt} = \frac{d^2 x}{dt^2} + 4 \frac{dx}{dt} + x.$$

Визначається передаточна функція об'єкта:

$$W_{об}(s) = \frac{s^2 + 4s + 1}{2s^3 + 3s^2 + s}.$$



Тоді передатна функція розімкнутої системи має вигляд:

$$W_{\infty}(s) = W_p(s) \cdot W_{oo}(s) = \left(2 + \frac{1}{s}\right) \cdot \frac{s^2 + 4s + 1}{2s^3 + 3s^2 + s} = \frac{2s^3 + 9s^2 + 6s + 1}{2s^4 + 3s^3 + s^2} = \frac{B(s)}{A(s)}.$$

Характеристичний вираз замкнутої системи:

$$D(s) = A(s) + B(s) = 2s^4 + 3s^3 + s^2 + 2s^3 + 9s^2 + 6s + 1 = 2s^4 + 5s^3 + 10s^2 + 6s + 1.$$

Передаточні функції замкнутої системи:

$$\Phi_z(s) = \frac{W_{\infty}(s)}{1 + W_{\infty}(s)} = \frac{B(s)}{D(s)} = \frac{2s^3 + 9s^2 + 6s + 1}{2s^4 + 5s^3 + 10s^2 + 6s + 1} \quad - \text{по завданню};$$

$$\Phi_E(s) = \frac{1}{1 + W_{\infty}(s)} = \frac{A(s)}{D(s)} = \frac{2s^4 + 3s^3 + s^2}{2s^4 + 5s^3 + 10s^2 + 6s + 1} \quad - \text{по помилці};$$

$$\Phi_{\epsilon}(s) = \frac{W_{oo}(s)}{1 + W_{\infty}(s)} = \frac{\frac{s^2 + 4s + 1}{2s^3 + 3s^2 + s}}{1 + \frac{2s^3 + 9s^2 + 6s + 1}{2s^4 + 3s^3 + s^2}} = \frac{s^3 + 4s^2 + s}{2s^4 + 5s^3 + 10s^2 + 6s + 1} \quad - \text{по збуренню}.$$

По передатним функціям визначаються коефіцієнти підсилення шляхом підстановки в них  $s = 0$ :

$$K_z = \Phi_z(0) = 1 \quad - \text{по завданню};$$

$$K_E = \Phi_E(0) = 0 \quad - \text{по помилці};$$

$$K_B = \Phi_B(0) = 0 \quad - \text{по збуренню}.$$

Стійкість САУ тиску СПУ визначається по критерію Гурвіца [138].

Оскільки коефіцієнти характеристичного вираження замкнутої системи:  $a_4 = 2$ ,  $a_3 = 5$ ,  $a_2 = 10$ ,  $a_1 = 6$ ,  $a_0 = 1$  (ступінь полінома  $n = 4$ ), то матриця Гурвица має вигляд:

$$\begin{pmatrix} 5 & 6 & 0 & 0 \\ 2 & 10 & 1 & 0 \\ 0 & 5 & 6 & 0 \\ 0 & 2 & 10 & 1 \end{pmatrix}.$$

Визначники дорівнюють:

$$\Delta_1 = 5 > 0;$$

$$\Delta_2 = \begin{pmatrix} 5 & 6 \\ 2 & 10 \end{pmatrix} = 5 \cdot 10 - 2 \cdot 6 = 38 > 0;$$

$$\Delta_3 = \begin{pmatrix} 5 & 6 & 0 \\ 2 & 10 & 1 \\ 0 & 5 & 6 \end{pmatrix} = (5 \cdot 10 \cdot 6 + 6 \cdot 1 \cdot 0 + 2 \cdot 5 \cdot 0) - (0 \cdot 10 \cdot 0 + 5 \cdot 5 \cdot 1 + 2 \cdot 6 \cdot 6) =$$

$$= 209 > 0;$$

$$\Delta_4 = 1 \cdot \Delta_3 = 1 \cdot 209 > 0.$$

Оскільки всі визначники позитивні, то САУ тиску пару стійка. Таким чином, отримано **заключення** про доцільність введення в процеси дослідження нелінійних судових САУ СПУ на стійкість – каналу зовнішнього збурення (хвильових коливань), що зазначено в диференціальному рівнянні Ван дер Поля [224].

Додаємо в диференціальне рівняння, що характеризує динаміку процесу зміни тиску пара  $P$  при впливах каналу управління  $u$  і каналів обурення - хвильових коливань  $x$ , канал витрати пари  $D$  на агрегати СЕУ:

$$6,25 \frac{d^2 P}{dt^2} + 4 \frac{dP}{dt} + P(t) = \frac{dx^2}{dt^2} + x(t) + 2 \frac{du}{dt} + 148 \frac{dD(t)}{dt} + D(t).$$

Якщо позначити  $Y(s)$ ,  $X(s)$  і  $U(s)$  як зображення сигналів  $P$ ,  $x$  і  $u$  відповідно, то рівняння (при нульових початкових умовах) в даному випадку набуде вигляду:

$$6,25s^2 Y(s) + 4sY(s) + Y(s) = s^2 X(s) + X(s) + 2sU(s) + 148sD(s) + D(s).$$

Звідси отримано:

$$Y(s) = \frac{s^2 + 1}{6,25s^2 + 4s + 1} X(s) + \frac{2s}{6,25s^2 + 4s + 1} U(s) + \frac{148s}{6,25s^2 + 4s + 1} D(s).$$

Якщо позначити передавальні функції об'єкта як

$$W_x(s) = \frac{s^2 + 1}{6,25s^2 + 4s + 1}; W_u(s) = \frac{2s}{6,25s^2 + 4s + 1}; W_D(s) = \frac{148s}{6,25s^2 + 4s + 1},$$

то виходить рівняння замкнутої САУ:  $Y(s) = W_x(s)X(s) + W_u(s)U(s) + W_D(s)D(s)$ .

Якщо прирівняти цей вислів до нуля, то утворюється характеристичне рівняння:

$$6,25s^2 + 4s + 1 = 0,$$

коріння якого рівні:

$$s_1 = -\frac{2}{3} + j\frac{1}{2} \quad s_2 = -\frac{2}{3} - j\frac{1}{2}.$$

Розподіл коренів на комплексній площині показало, що коріння лежить в лівій півплощині, отже, об'єкт за критерієм стійкості тобто САУ тиску парастійка.

Аналіз наведених вище висновків дозволяє зробити **наукове положення** - стійкість САУ СПУ в умовах значної хитавіці судна можна забезпечити за допомогою моделі хвильових коливань, що уточнює межу переходу системи управління в нестійкий режим роботи.

На суднах пасажирського і танкерного флоту знайшла широке застосування технологічна схема роботи двох ДПК і одного КПК на загальну парову магістраль (рис. 3.11). При такому проектному рішенні допоміжні котли, виконуючи функцію генерації пару високої температури і тиску, схильні до впливу глибоких зовнішніх збурень, пов'язаних з режимом роботи парової турбіни і вантажних операцій на суднах.

Експериментальні перехідні процеси двох допоміжних СПУ марки Mitsubishi MAC 35, встановлених на нафтовому танкері «Minerva Roxanne» і одержані за допомогою системи моніторингу «ACONIS-2000E», показані на рис. 3.9 [204].

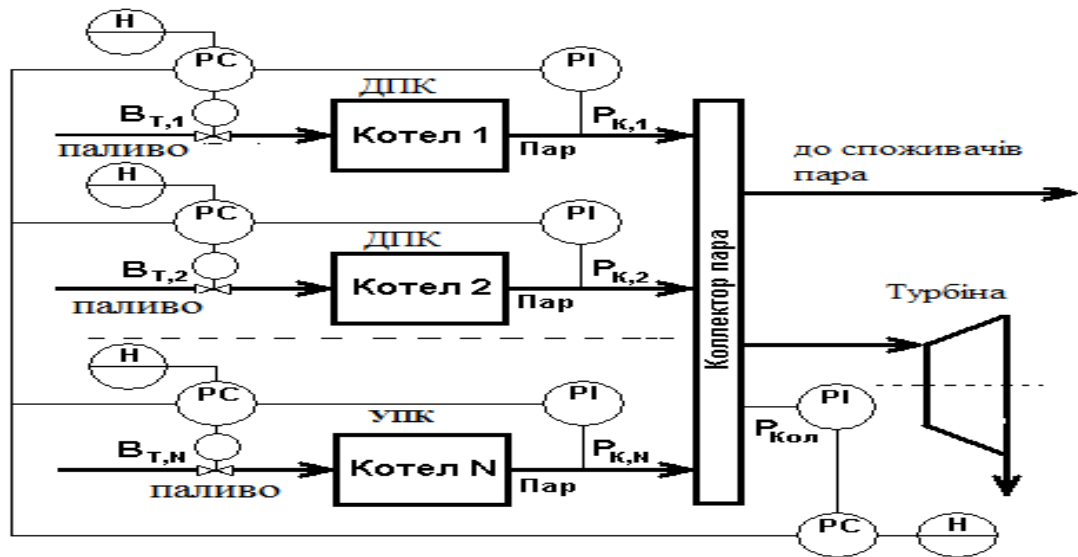


Рис. 3.9. Схема управління групою суднових допоміжних парових котлів MITSUBISHI MAC 35, з'єднаних загальним паропроводом і працюючих на турбіну SHINKO: РС – регулятор тиску; Н – пульт дистанційного управління; РІ – манометр

Аналіз виду перехідних процесів (рис. 3.10) дозволяє зробити висновок, що при різкому збільшенні електричного і парового навантаження система регулювання турбіни тут же збільшує споживання пару, проте топковий режим СПУ ще не збудований і виникає розбаланс виробництва і споживання пару, в результаті чого падає тиск пару в магістралі і в тракті робочого середовища котла. Утворюється коливальний режим, який характеризується істотною нелінійністю. Здатність СПУ змінювати вироблення пару відповідно до зміни зовнішнього (електричного) навантаження називається маневреністю котла [3]. Дана умова роботи СПУ вимагає використання більш швидкодіючих САУ, щоб зміни навантажень не викликали глибоких відхилень параметрів робочого середовища. Кожен СПУ за своїми конструктивними характеристиками має оптимальне значення швидкості зміни навантаження, при якій сумарні тепловтрати, в перехідному процесі будуть найменшими і значення максимально допустимої швидкості зміни навантаження, вище якої можлива

аварійна ситуація. Індикатором швидкості зміни навантаження є зміна тиску в робочому тракті котла  $dP/dt$ , МПа /хв.

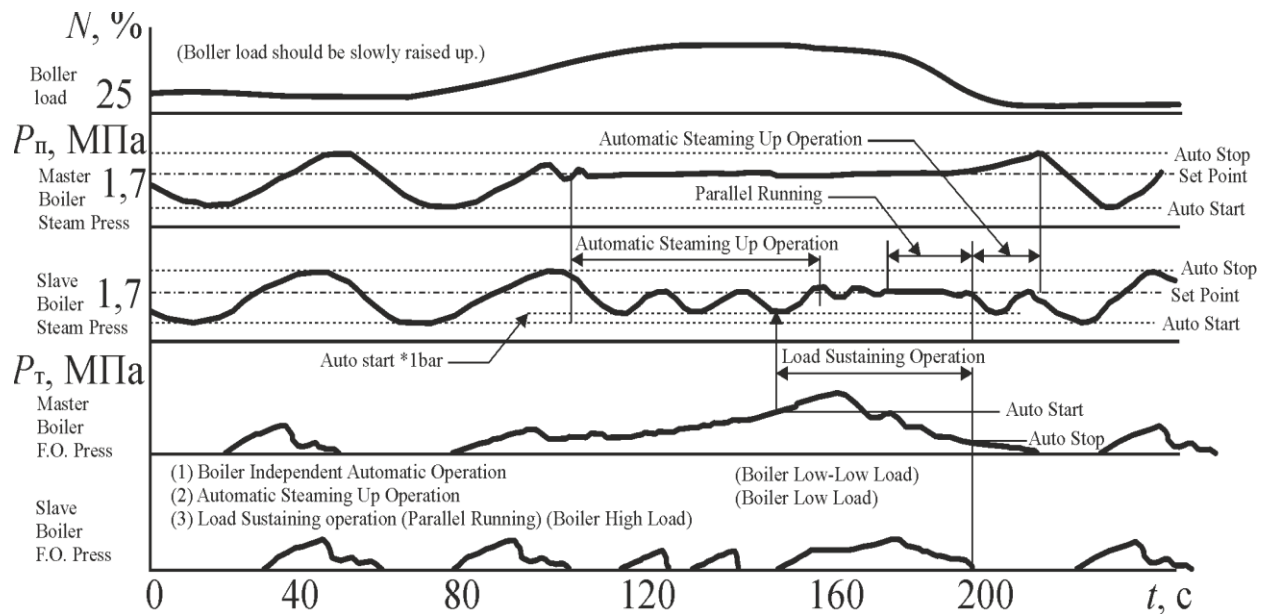


Рис. 3.10. Перехідні характеристики СПУ при паралельній роботі на СПТУ нафтового танкера «Minerva Roxanne»:  $N$  – навантаження;  $P_{\text{п}}$  – тиск пари;  $P_{\text{т}}$  – тиск палива [205]

Для складання математичної моделі по каналу «витрата палива - тиск пару» при роботі СПУ в маневреному режимі використовуються нелінійні моделі [39].

Розрізняють два класи нелінійних регресій [39], за допомогою яких складається нелінійна модель перехідного режиму (див. рис. 3.10):

- регресії, нелінійні щодо включених в аналіз вхідних і вихідних (пояснюють) змінних (регресорів), але лінійні по оцінюваним параметрами (коефіцієнтам рівнянь);
- регресії, нелінійні по оцінюваним параметрам. Наприклад, розглянуті вище лінійні структури ARX і ARMAX моделей можуть бути розширені до нелінійних наступним чином:

- використанням нелінійних ARX регресорів, тобто нелінійних виразів затриманих за часом вхідних і вихідних змінних;
- заміною зваженої суми лінійних регресорів нелінійної ARX моделлю, яка має більш гнучку нелінійну функцію відображення:

$$F(y(t-1), y(t-2), y(t-3), \dots, u(t), u(t-1), u(t-2), \dots),$$

аргументами для  $F$  являються моделі регресорів  $y$  і  $u$ . Для наглядності нелінійну модель ARX структури можна відобразити структурною схемою на рис. 3.11.

За допомогою додатку System Identification Toolbox (рис. 3.11 – 3.12) одержана дискретна ARX [39] модель, яка використовує апарат  $Z$ -перетворення:

$$\text{Discrete-time IDPOLY model: } A(z)y(t) = B(z)u(t) + e(t)$$

$$A(z) = 1 + z^{-1} + 0.5 z^{-2}; B(z) = 0.415; e(t) - \text{дискретний білий шум,}$$

де  $z^{-1} = e^{-sT}$  – оператор затримки;  $T$  – інтервал дискретизації.

Процес визначення ступеня адекватності вибраної моделі представлений на рис. 3.13. По аналізу ступеню адекватності аналізованих моделей, розрахованих в програмному додатку (див. рис. 3.13), встановлено, що ARX модель демонструє найбільш високий ступінь збіжності з експериментальними даними.

Для досліджуваного процесу - двох допоміжних СПУ, встановлених на танкері «Minerva Roxanne», які працюють на загальну парову магістраль СПТУ, за допомогою SCADA системи моніторингу ACONIS-2000E, встановленої в центральному посту управління судном, отримані експериментальні характеристики (рис. 3.14 – 3.15).

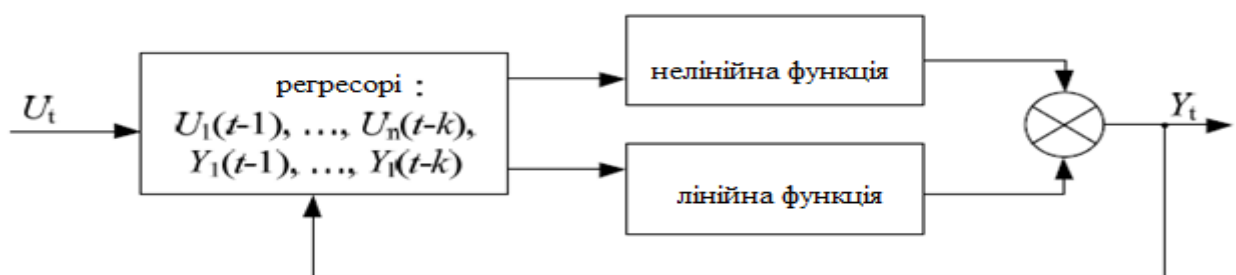


Рис. 3.11. Структурна схема нелінійної ARX моделі

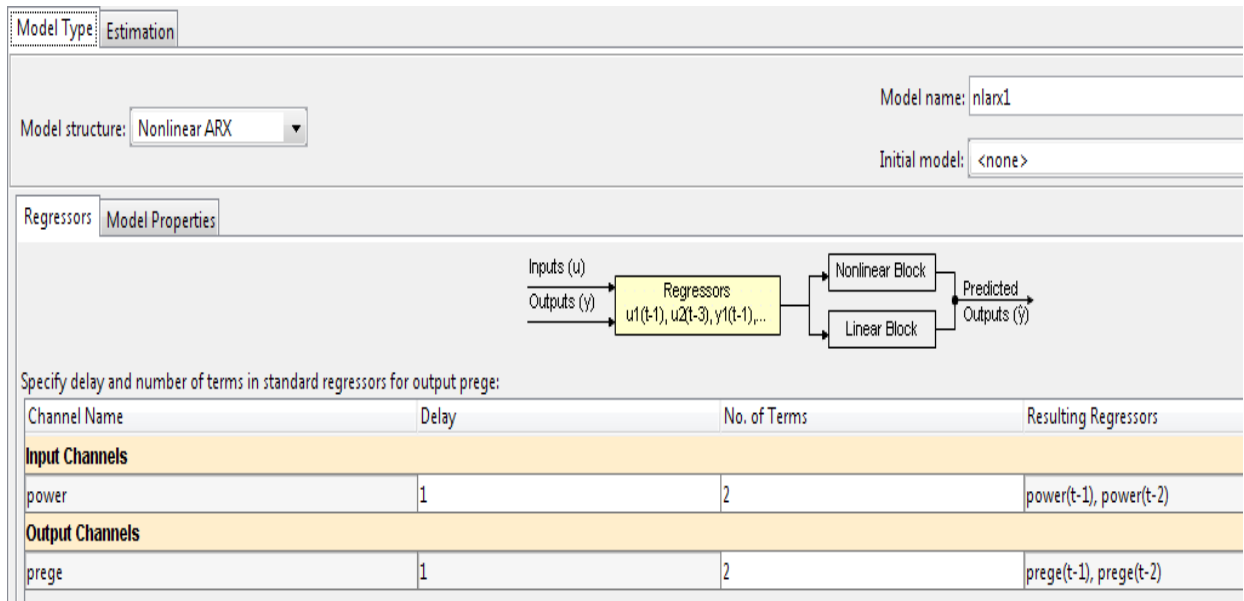


Рис. 3.12. Нелінійна ARX модель яка описує процес зміни тиску пара СПУ

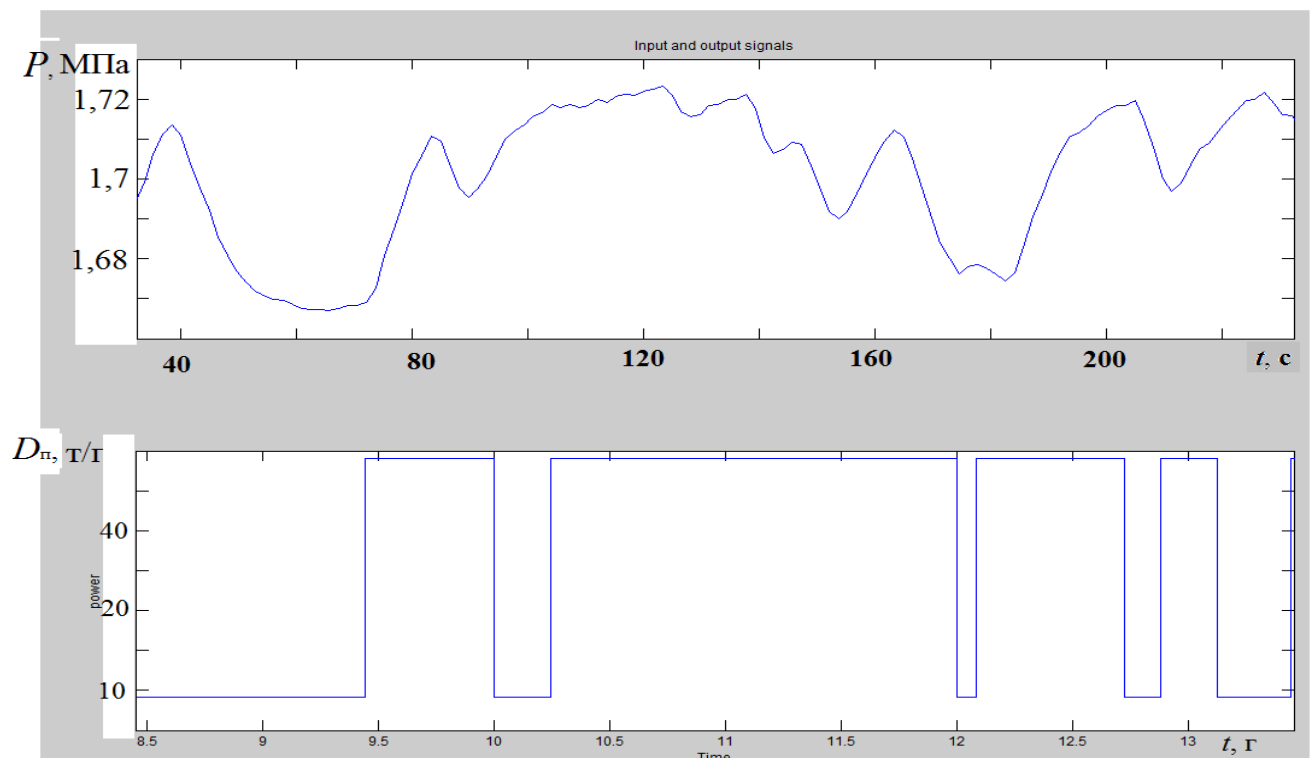


Рис. 3.13. Досліджуваний процес в додатку System Identification Toolbox отриманий на основі використаної нелінійної моделі

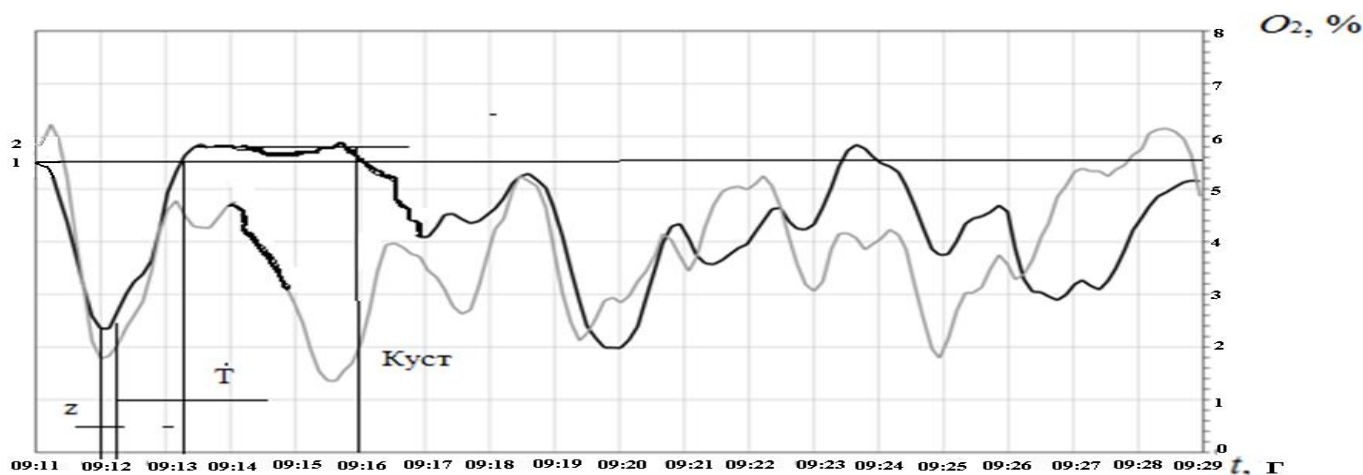


Рис. 3.14. Перехідні характеристики САУ вмісту  $O_2$  в вихідних газах комбінованого (1) і допоміжного (2) СПУ нафтового танкера «Minerva Roxanne»

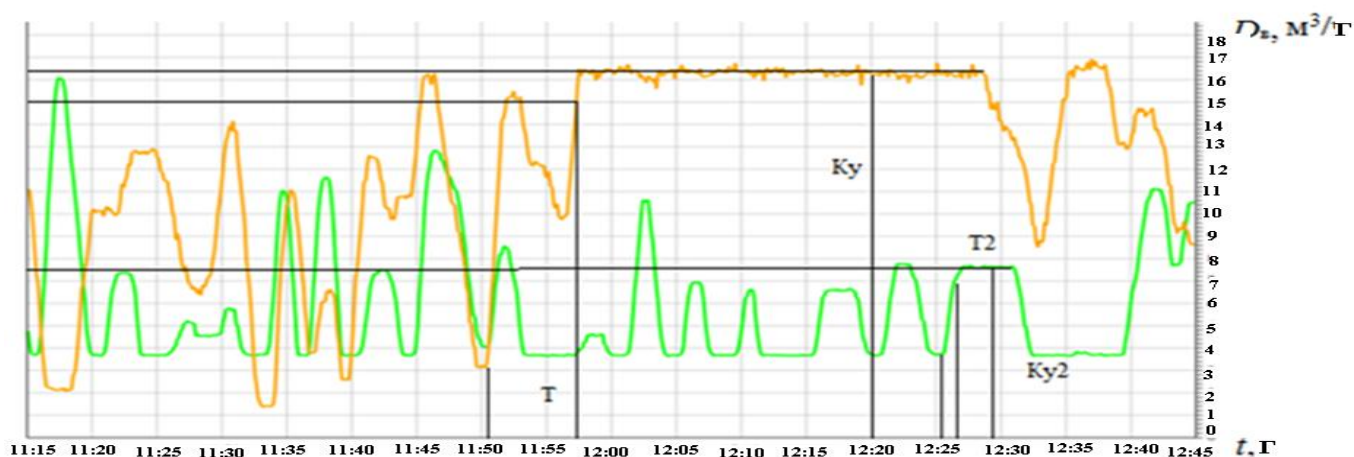
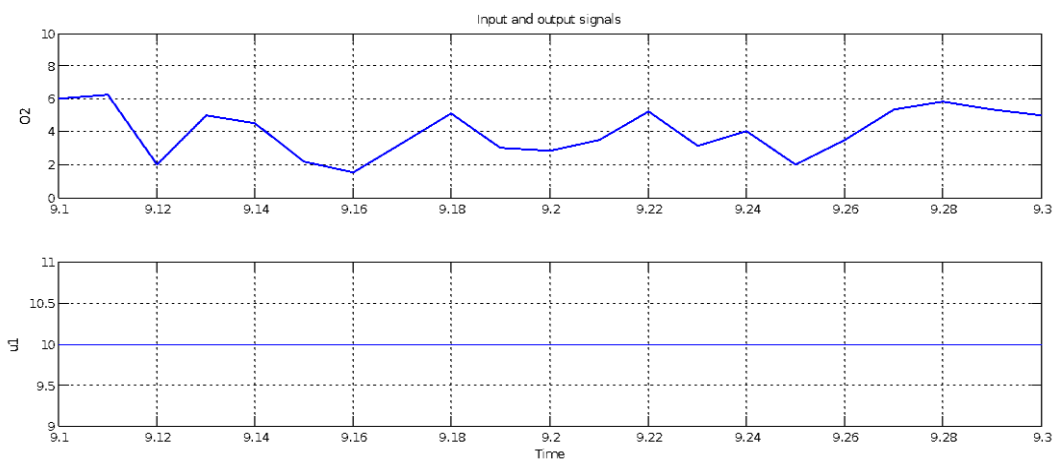


Рис. 3.15. Скріншот з мнемосхеми, який демонструє зміну витрати живильної води в комбінованому (1) і допоміжному (2) СПУ, що працюють спільно в перехідних режимах на танкері «Minerva Roxanne»

Слід зазначити, що об'єкти управління демонструють значні нелінійні характеристики, тому для отримання моделі аналізованої системи використовувалася нелінійна ARX модель. Процес ідентифікації та валідації на незалежному наборі даних в програмі System Identification Toolbox (SIT) показаний на рис. 3.16 – 3.17.





ис. 3.16. Експериментальна залежність вмісту кисню в вихідних газах

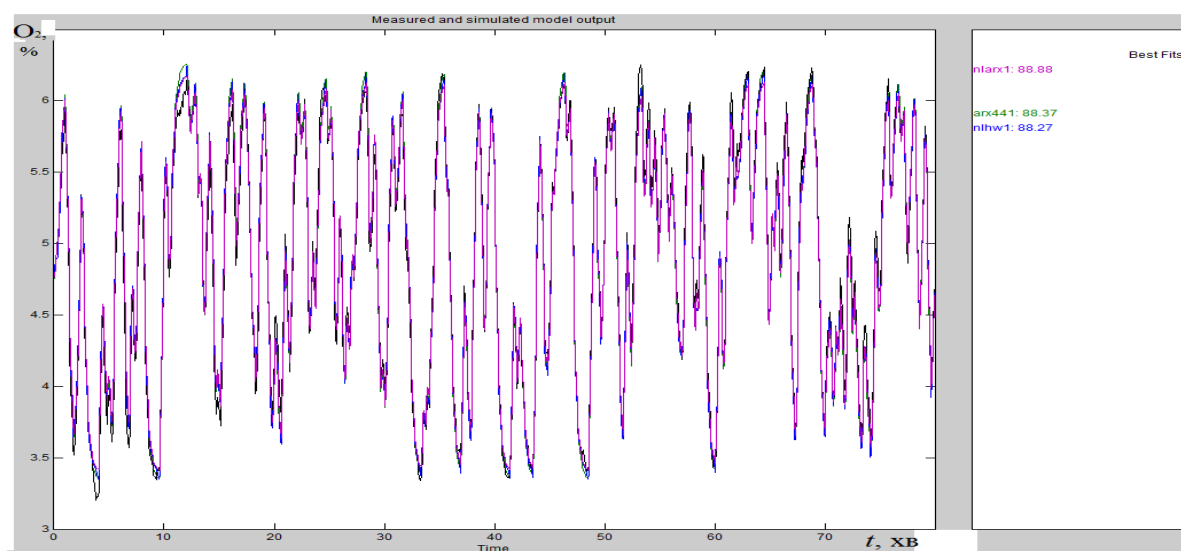


Рис. 3.17. Визначення ступеня адекватності нелінійних моделей в програмі System Identification Toolbox при верифікації: nlarx1 – нелінійна ARX модель з ступенем адекватності 88,8 %

На рис. 3.18 – 3.19 показані вид нелінійної моделі і її тривимірна поверхня, визначені за допомогою додатку SIT.

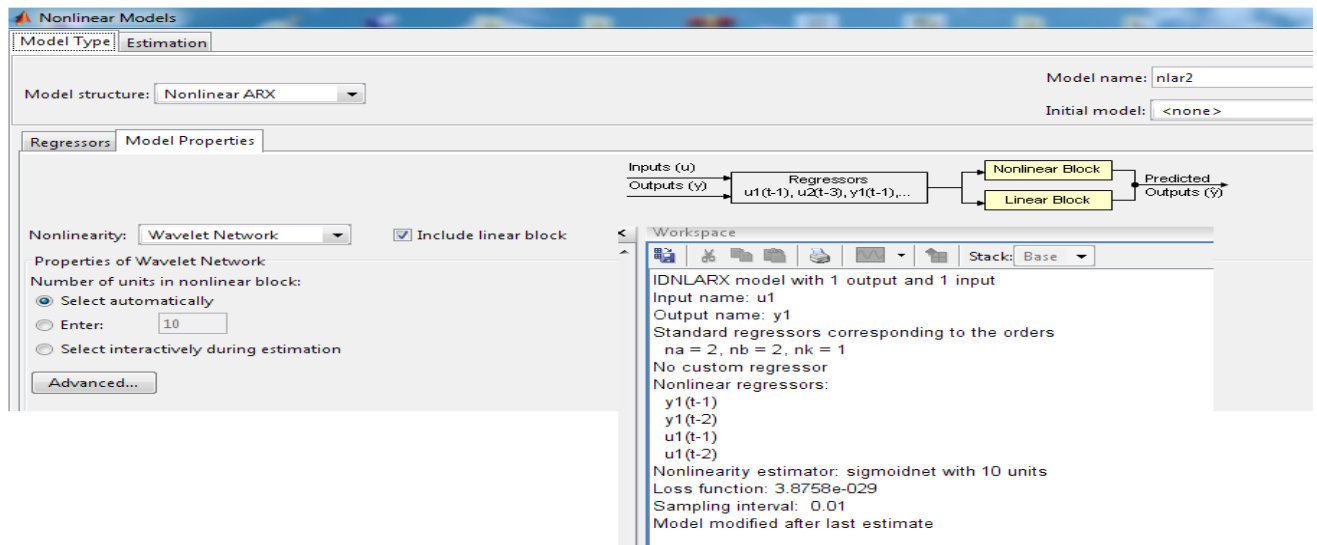


Рис. 3.18. Структура і параметри нелінійної ARX моделі

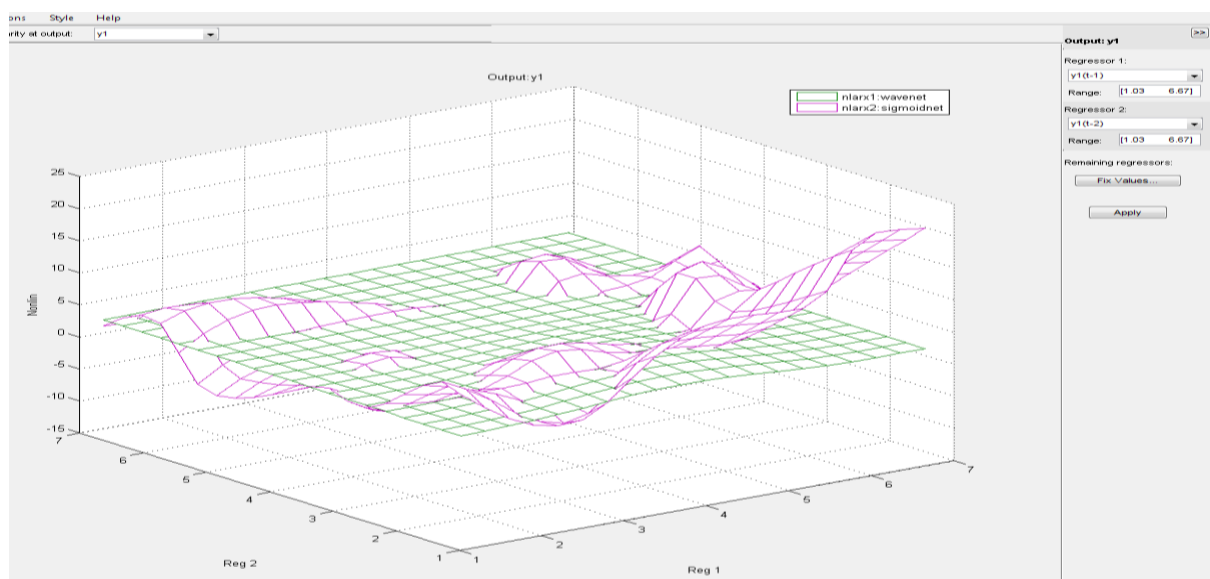


Рис. 3.19. Трьохмірна поверхня одержаної нелінійної ARX моделі

Слід зазначити, що програма System Identification Toolbox надає кілька нелінійних оцінок  $g(x)$  для нелінійних моделей ARX. Нелінійність формується у вигляді вейвлета (wavenet), сигмоїдальної мережі (sigmoidnet), бінарного дерева (treepartition), багаторівневої нейронної мережі (neuralnet), лінійної оцінки (linear) [70]. За замовчуванням використовується нелінійна оцінка у вигляді вейвлета (див. рис. 3.18). На підставі проведеного дослідження отримано

результати, які дозволяють удосконалити інструментарій використання нелінійної ARX моделі для параметричної ідентифікації характеристики вмісту кисню у вихідних газах від теплового навантаження СПУ, що дозволяє відображати досліджуваний процес зі ступенем адекватності рівній 95 %, а також використовувати отриману модель для аналізу процесу появи кисневої корозії.

### 3.2. Розробка експертного критерію оцінки якості експлуатаційних процесів СПУ при проведенні налагоджувальних робіт

Налагодження САУ включає в себе наладку приладів і засобів автоматизації котла, а також випробування схеми автоматики безпеки, попереджувальної і аварійної сигналізації. По завершенні робіт складається технічний висновок з налагодження, карта параметрів настройки регуляторів які забезпечують безпечну роботу котла і акти випробувань. Наступну наладку необхідно провести через три роки.

Відомо, що основними критеріями настройки регуляторів в САУ параметрів СПУ є показники якості перехідних процесів, від вибору показників і їх значень багато в чому залежить подальша ефективність всієї СПЕУ, що безпосередньо впливає на досягнення локальних і глобальної цільових функцій. Як правило, експерти-наладчики або розробники систем управління найбільш часто вибирають прямі показники з огляду на їх простоти і наочності. Прямі показники якості визначають по перехідному процесу, що виникає в системі управління при ступінчастому зовнішньому впливі [138].

Слід зазначити, що особливості ПІ і ПІД-регуляторів такі, що при оптимізації одного показника якості перехідного процесу САУ, як правило, погіршується інший. Наприклад, зменшення часу регулювання супроводжується

зростанням коливальності перехідного процесу, а при бажанні розробника САУ отримати аперіодичний перехідний процес з'являється проблема зменшення його тривалості і першого відхилення тощо. Таким чином, перед проектувальниками постає завдання багатокритеріальної оптимізації настроюваних параметрів одноконтурних САУ, що входять до складу САУ СПУ.

До поширеної категорії, в процесах проектування, показників якості САУ відносяться інтегральні оцінки, які обчислюють або безпосередньо по перехідній функції, або за коефіцієнтами передаточної функції системи. Можна відзначити, що інтегральний критерій якості перехідного процесу [138]:

$$I = \int_0^{\infty} h(t) dt \rightarrow \min, \quad (3.2)$$

також не враховує можливість зменшення часу регулювання з одночасним згладжуванням коливальності, так як визначається:

$$I = \frac{K_{\lambda} T_u}{K_{об} K_p},$$

де  $K_{\lambda}$  – коефіцієнт об'єкту по каналу збурення;  $K_{об}$  – коефіцієнт посилення об'єкту по каналу завдання;  $K_p$  – коефіцієнт пропорційності;  $T_u$  – постійна інтегрування (настройки ПІ-регулятора (контролера). Так, згідно методики настройки ПІД-регулятора: «збільшення пропорційного коефіцієнта збільшує швидкодію і знижує запас стійкості»; «зі зменшенням інтегральної складової помилка регулювання з плином часу зменшується швидше»; «зменшення постійної інтегрування зменшує запас стійкості» [154].

Зазначені протиріччя при неоптимальному налагодженні САУ додатково впливають на надійнісні характеристики обладнання, зокрема на час безаварійної роботи, а також супроводжуються перевитратою палива, електроенергії на власні потреби, шкідливими викидами в атмосферу тощо і для того, щоб забезпечити оптимальну якість управління складними тепловими

процесами в СПУ в умовах суттєвої апіорної невизначеності або часткової зміни параметрів об'єкта управління, викликаного зміною режиму та впливом цілої низки внутрішніх і випадкових збурень, необхідний пошук нових підходів в області оптимізації показників якості САУ.

З урахуванням того, що ключову роль у виборі показників якості та розрахунку значень параметрів регуляторів виконують експерти-розробники, пропонується розглянути експертну методику реалізації оптимальної САУ (рис. 3.20). Структура запропонованої САУ включає ідентифікатор для аналізу показників якості роботи САУ, об'єкт регулювання (контур СПУ), регулятор, експерта - здійснює розрахунок оптимальних параметрів регулятора. Слід зазначити, що експерт віддає пріоритет ключовими показниками САУ, так як одночасна оптимізація всіх показників неможлива. Роль експерта, також може виконувати програмний модуль, який реалізує експертну систему.

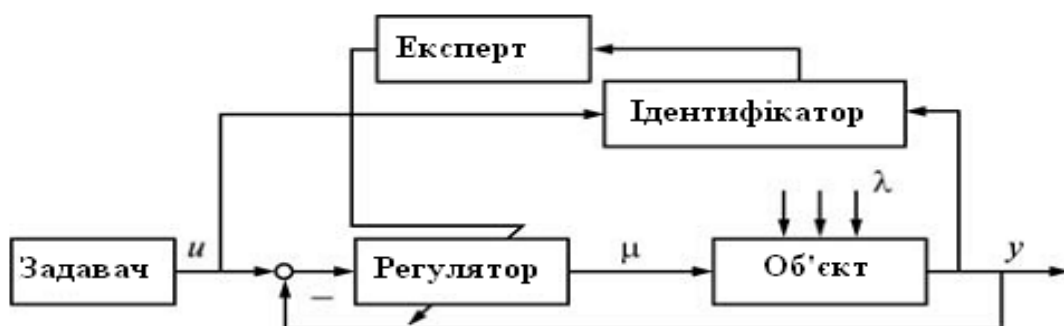


Рис. 3.20. Експертна система регулювання параметрів СПУ:

$u$  – завдання;  $y$  – вихід об'єкту;  $\mu$  – управляючий вплив;  $\lambda$  – збурення

З аналізу робіт в області автоматизації парогенеруючих об'єктів [56, 137, 153] і вимог, що пред'являються до параметрів протікання парогенеруючих процесів [128], можна зробити висновок на користь вибору двох ключових показників якості перехідного процесу, що визначають надійність технологічних

агрегатів: (перерегулювання) і економічність енергоресурсів роботи виконавчих механізмів САУ (час регулювання).

З причини складності одночасної оптимізації обох критеріїв в силу їх взаємовпливу, для оптимального налагодження САУ параметрів СПУ пропонується експертний комбінований показник якості  $P_{\text{комб}}$  (3.3), що дозволяє оцінити перехідний процес за допомогою мінімуму суми зважених відносин перерегулювання до допустимого перерегулювання і часу регулювання до допустимого часу регулювання перехідного процесу:

$$P_{\text{комб}} = \min_i (w_L \cdot G_i + w_R \cdot T_i), \quad (3.3)$$

де  $i = 1, \dots, n$ ;  $n$ , – кількість перехідних процесів при варіації параметрів типових регуляторів САУ;  $w_L, w_R$  – вагові коефіцієнти;  $w_L + w_R = 1$ ; зважений час регулювання:  $T_i = T_{pi} / T_{di}$ ;  $T_{pi}$  – час регулювання;  $T_{di}$  – допустимий час регулювання; зважене перерегулювання:  $G_i = \Delta G_i / \Delta G_{di}$ ;  $\Delta G_i$  – перерегулювання;  $\Delta G_{di}$  – допустиме перерегулювання. Параметри:  $\Delta G_{di}, T_{di}, w_L, w_R$  визначає експерт.

Використання пропонованого безрозмірного показника  $P_{\text{комб}}$  при розробці і налагодженню САУ контурів СПУ може дозволити досягти очікуваних перехідних процесів, що відповідають вимогам [128], які пред'являються до параметрів СПУ, в порівнянні з традиційними показниками в умовах обмеженості часу на процеси налагодження і трудомісткості самого процесу, а також при функціонуванні СПУ в динамічному режимі.

Для апробації нового експертного критерію якості настроюваної САУ і перевірки її ефективності складена методика ітераційного моделювання.

У запропонованій методиці оптимального налагодження САУ параметрів СПУ останній етап процесу (розрахунок настроюваних параметрів регулятора і їх установку в пам'ять контролера) виконує висококваліфікований наладчик (експерт), то для обліку його досвіду використовуються експертні методи оцінки якості роботи САУ. Основна ідея експертних методів полягає в тому, щоб

використовувати інтелект людей, їх здатність шукати і знаходити рішення слабоформалізованих задач. В теорії експертних оцінок розроблений ряд методів проведення експертизи. Найбільш ефективними, на думку [92], виявилися методи ранжирування та приписування балів.

Методика визначення ефективності експертного критерію передбачає участь в процесі процедури приписування балів трьох експертів в області розробки, налагодження та експлуатації САУ СПУ.

Використовуваний в методиці метод приписування балів [92] заснований на тому, що експерти оцінюють важливість приватного критерію за шкалою [0-10]. При цьому дозволяється оцінювати важливість дробовими величинами або приписувати одну і ту ж величину з обраної шкали кількома критеріями. Позначимо через  $h_{ik}$ -бал  $i$ -го експерта для  $k$ -критерію, тоді:

$$r_{ik} = \frac{h_{ik}}{\sum_{k=1}^m h_{ik}},$$

де  $\sum_{k=1}^m h_{ik}$  – сума  $i$ -ої строчки.

параметр  $r_{ik}$  – називають вагою, підрахованою для  $k$ -критерія  $i$ -м експертом.

Звідси, враховуючи, що  $r_i = \sum_{j=1}^L r_{ji}$ , одержимо:

$$\lambda_i = \frac{r_i}{\sum_{i=1}^m r_i}.$$

В представлений задачі дослідження експертного критерію  $P_{\text{комб}}$  є два критерія  $T_i$  і  $G_i$  (див. 3.4) для САУ рівня води в барабані СПУ. Три експерта поставили критеріям наступні бали:

№  $T_i, G_i$

1 9 6,  $h_{11}=9, h_{12}=6; \sum_1=15$

2 10 6,  $h_{21}=10, h_{22}=6; \sum_2=16$

$$3 \quad 10 \quad 5, \quad h_{31}=10, h_{32}=5; \sum_3=15$$

Матриця експертних оцінок представлена в табл. 3.1.

Вагові коефіцієнти  $r_{ik}$  визначаються як [93]:

$$r_{11}=h_{11}/15=9/15; r_{12}=h_{12}/15=6/15; r_{21}=h_{21}/16=10/16; r_{22}=h_{22}/16=6/16;$$

$$r_{31}=h_{31}/15=10/15;$$

$$r_{32}=h_{32}/15=5/15$$

Таблиця 3.1

Значення експертних оцінок

| Експерти     | Критерії    |            |
|--------------|-------------|------------|
|              | $F_1$       | $F_2$      |
| 1(розробник) | $h_{11}=9$  | $h_{12}=6$ |
| 2 (наладчик) | $h_{21}=10$ | $h_{22}=6$ |
| 3 (оператор) | $h_{31}=10$ | $h_{32}=5$ |

Суму значень кожної строчки представлено в табл. 3.2

Таблиця 3.2

Сума експертних оцінок

| Експерти | Критерії |       | Сума |
|----------|----------|-------|------|
|          | $F_1$    | $F_2$ |      |
| 1        | 9        | 6     | 15   |
| 2        | 10       | 6     | 16   |
| 3        | 10       | 5     | 15   |

Матриця вагових коефіцієнтів представлена в табл. 3.3:

$$\sum r_i=1,89+1,11=3.$$

Підсумкові вагові коефіцієнти по кожному з критеріїв рівні:

$$\lambda_1=1,89/3=0,63; \lambda_2=1,11/3=0,37.$$



Таким чином,  $\lambda_1 > \lambda_2$  і 1-й критерій важливіший 2-го критерія. Таким чином, перший критерій важливіший другого в 1,7 рази. По аналогічній методиці проведена апробація для підсистеми стабілізації тиску пару в СПУ.

Таблиця 3.3

## Вагові коефіцієнти

| Експерти | Критерії   |            |
|----------|------------|------------|
|          | $F_1$      | $F_2$      |
| 1        | 9/15       | 6/15       |
| 2        | 10/16      | 6/16       |
| 3        | 10/15      | 5/15       |
| Сума     | $r_1=1,89$ | $r_2=1,11$ |

Для послідууючої апробації запропонованого експертного показника якості САУ параметрів СПУ і порівняння його з типовими показниками проводився імітаційний експеримент.

Так, згідно з поданою вище методикою експертного опитування щодо якості САУ СПУ, час регулювання перехідного процесу стабілізації тиску пару в СПУ важливіше його коливальності (за умовами експлуатації в 5 разів, що викликано необхідністю як найшвидшого досягнення заданих параметрів і виходу на робочий тепловий режим СПУ без спрацювання аварійного датчика). Встановлений час регулювання характеризує маневреність СПУ і можливість запобігання настання аварійної ситуації, наприклад, при збільшенні парового навантаження і відповідному зниженні тиску пару аж до аварійного значення, а значить і спрацювання аварійного датчика рівня води в барабані СПУ.

Для обліку необхідної допустимої величини відхилення регульованого параметра від завдання, використовуються встановлені значення з методики проведення випробування парогенераторів середньої і високої потужності [156, 158, 180, 182]. При проведенні випробувань в маневреному режимі параметри роботи котла повинні дотримуватися в межах, зазначених в табл. 3.4.

Таблиця 3.4

## Допустимі відхилення параметрів СПУ

| Показник                     | Допустимі відхилення параметрів при паропроductивності котла       |                                                                   |
|------------------------------|--------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
|                              | до 20 т/год                                                        | св. 20 т/год                                                      |
| Витрата живильної води       | $\pm 6 \%$                                                         | $\pm 3 \%$                                                        |
| Паропроductивність           | $\pm 6 \%$                                                         | $\pm 3 \%$                                                        |
| Тиск в барабані              | $\pm 4 \%$                                                         | $\pm 2 \%$                                                        |
| Температура перегрітого пару | $+ 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$<br>$- 15 \text{ }^{\circ}\text{C}$ | $+ 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$<br>$- 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ |
| Рівень води в барабані       | $\pm 10 \%$                                                        | $\pm 10 \%$                                                       |
| Витрата продувної води       | $\pm 20 \%$                                                        | $\pm 10 \%$                                                       |

Отже, з урахуванням встановлених експертами пріоритетів і відповідно до методу аналізу ієрархій [115], експерт приписує елементу 2, 1 матриці вагових коефіцієнтів  $A$  значення 5, тобто  $a_{21} = 5$ :

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{12} \\ a_{21} & \dots & a_{22} \end{bmatrix}.$$

Це автоматично передбачає, що  $A_{12} = 1/5$ . Позначивши через  $R$  і  $L$  критерії часу регулювання і перерегулювання, можна записати матрицю порівняння у вигляді:

$$A = \begin{matrix} L & R \\ \begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{5} \\ 5 & 1 \end{pmatrix} \end{matrix}.$$

Відносні ваги критеріїв  $R$  і  $L$  можна визначити діленням елементів кожного стовпця на суму елементів цього ж стовпчика. Отже, для нормалізації матриці  $N$  ділимо елементи першого стовпчика на величину  $1 + 5 = 6$ , елементи другого – на величину  $1 + 1/5 = 1,2$ . Шукані відносні ваги  $w_R$  і  $w_L$  критеріїв обчислюються у вигляді середніх значень елементів відповідних рядків нормалізованої матриці:

$$A = \begin{matrix} L & R \\ \begin{pmatrix} 0,17 & 0,17 \\ 0,83 & 0,83 \end{pmatrix} \end{matrix}.$$

Середні значення елементів стрічок:

$$w_R = (0,83 + 0,83)/2 = 0,83;$$

$$w_L = (0,17 + 0,17)/2 = 0,17.$$

Для апробації запропонованого експертного критерію  $P_{\text{комб}}$  оцінки якості налаштованої САУ проводилося імітаційне моделювання роботи ПІ-регулятора при управлінні об'єктом СПУ (судновим допоміжним парогенератором марки «Альфа Лаваль» з парової продуктивністю пара до 80 т/год та тиском 1,5 МПа), представленій у вигляді математичної моделі (передатної функції) по каналу «витрата палива - тиск пару», отриманої у другому розділі.

На імітаційній моделі, розробленої в пакеті MatLab (рис. 3.21) модель об'єкта (канал регулювання тиску), представлений функцією передачі інерційної ланки і ланки транспортного запізнювання:

$$W(s) = \frac{1,5}{5s+1} e^{-2s}.$$

У модельований САУ (рис. 3.4) використовується нелінійний елемент – обмеження відсотка ходу регулюючого органу (Saturation), а також вимірювальний прилад (манометр з нормуючим перетворювачем), з інерційністю [26] і представленим у вигляді інерційної ланки виду:

$$W(s) = \frac{3}{7s+1}.$$

На модельовану САУ впливає канал зовнішнього збурення (зміна витрати пару – зміна тиск пару), представлений у вигляді інерційної ланки виду:

$$W(s) = \frac{-2}{17s+1}.$$

За умовами технологічного процесу, що пред'являється до парогенеруючих СЕУ при регулюванні тиску пару [154], допустимий час регулювання  $T_p$  становить 120 с, а перерегулювання  $\Delta G_d = 20$  %. Безрозмірні настройки ПІ-

регулятора розраховані по табличному методу А. Копеловича [64] за інтегральним критерієм якості (3.2) для теплоенергетичних систем, які пропонуються в рамках розробки та налагодження традиційних САУ об'єктів СЕУ [11, 141] склали:  $K_{p1} = 0,3$ ;  $T_{i1} = 24$ .

Перехідний процес модельованої САУ показаний на рис. 3.22 (процес 1). Згідно з (3.4) комбінований показник даного процесу становить:

$$P_1 = (0,17 \cdot (0/20) + 0,83 \cdot (90/120)) = 0,6. \quad (3.4)$$

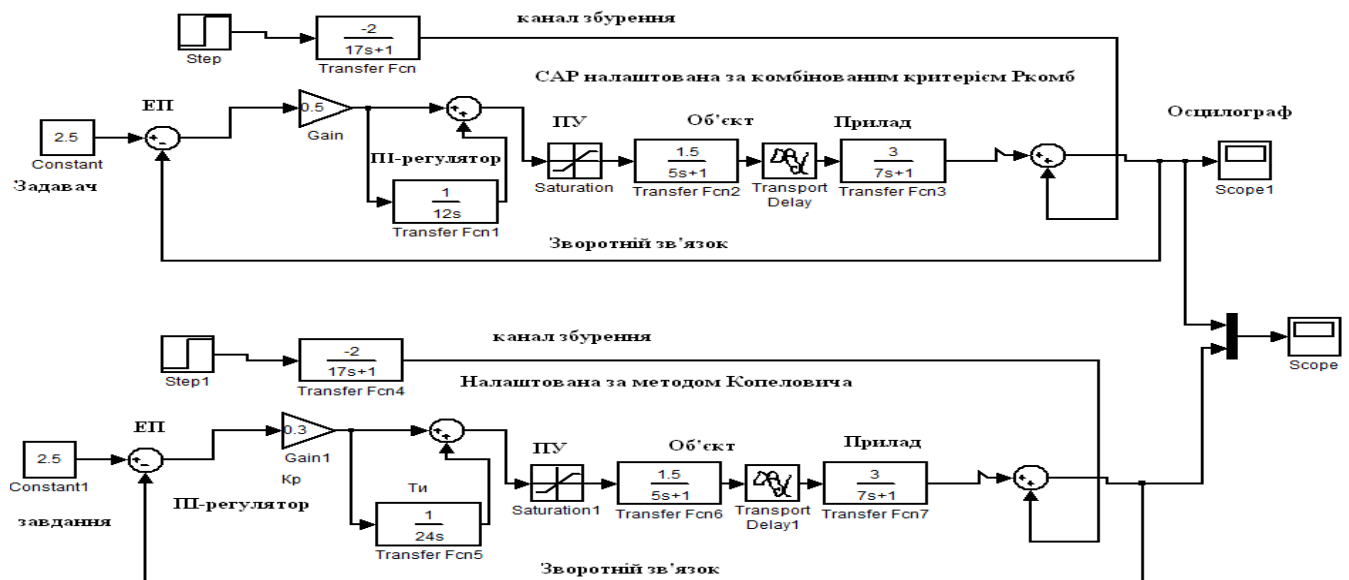


Рис. 3.21. Імітаційна схема моделювання одноконтурної САУ тиску пари в судновому водотрубному парогенераторі паровою продуктивністю 80 т / год з метою апробації експертного критерію якості: ЕП – елемент порівняння; ПВ – пристрій управління (регулюючий орган з приводом)

Після оптимізації ПІ-регулятора для отримання перехідного процесу з меншим часом регулювання, виходячи з пріоритетів експертного критерію якості, за допомогою експертних правил настройки [155] нові значення настроюваних параметрів склали:  $K_{p2} = 0,5$ ;  $T_{i2} = 12$ . Перехідний процес другої САУ тиску в порівнянні з процесом першої САУ див. на рис. 3.22. САУ тиску

пару з новими настройками продемонструвала: час перехідного процесу  $T_p = 35$  с; перерегулювання  $G = 16$  %. Згідно (3.4) комбінований показник якості другої САУ склав:

$$P_2 = ((0,17 \cdot (16/20) + 0,83 \cdot (35/120))) = 0,4. \quad (3.5)$$

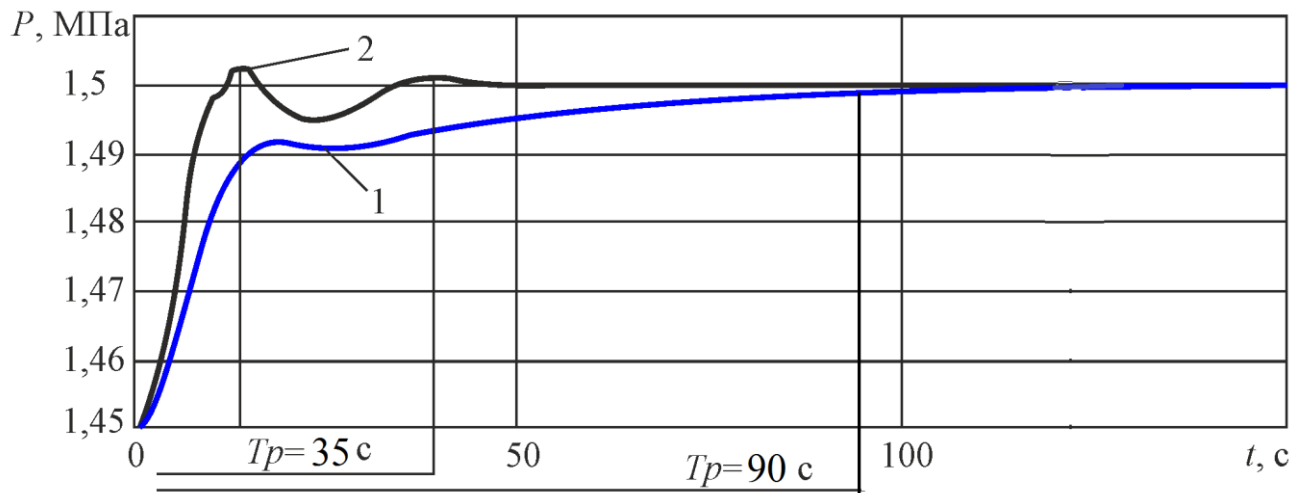


Рис. 3.22. Перехідні процеси САУ тиску пари СПУ в умовах зміни парового навантаження на 10 %, і різних критеріях якості з зоною нечутливості регулятора 0,5 %: 1 – інтегральний; 2 – експертний комбінований

Для аналізу часу роботи електроприводу пристрою управління проведено наступне моделювання (рис. 3.23). Графіки управляючих впливів з виходу ПІ-регуляторів представлені на рис. 3.24. Аналіз процесів управління показує менший час роботи приводу, що одержує управляючий вплив від регулятора, параметри якого оптимізовані за допомогою пропонованого критерію якості САУ.

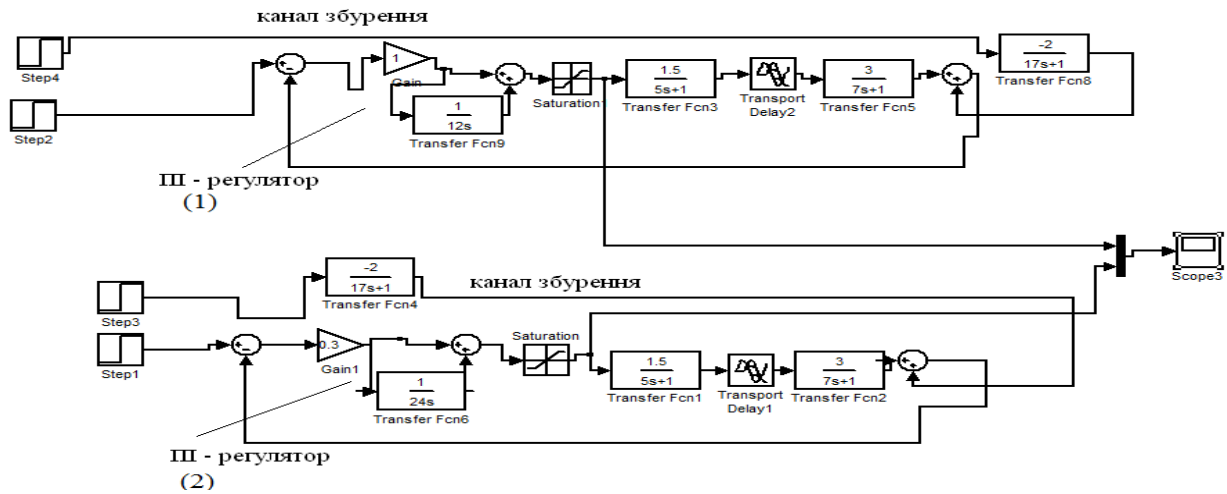


Рис. 3.23. Схема моделювання управляючих впливів САУ тиску пари ДПК Альфа Лаваль 80

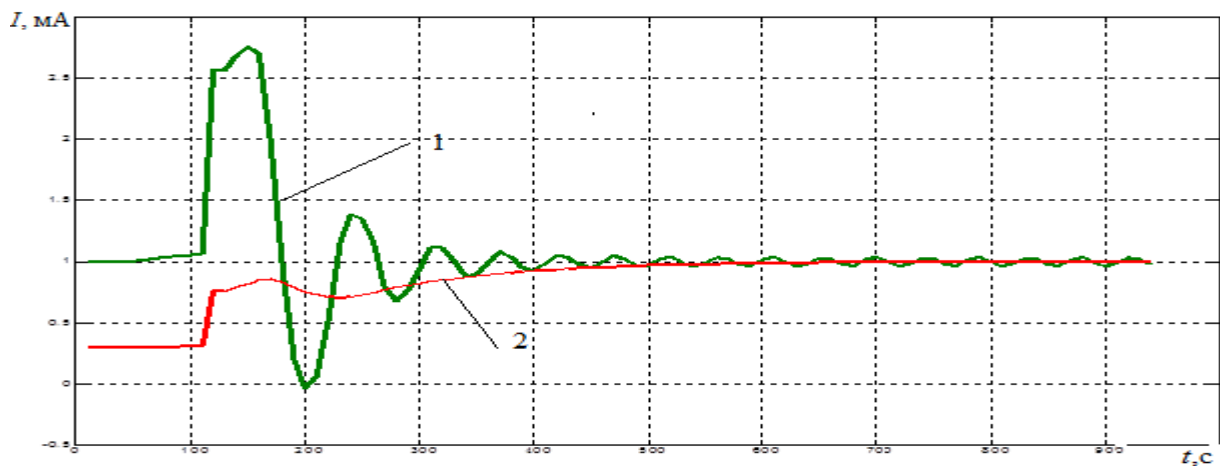


Рис. 3.24. Траєкторія управляючих впливів на виході ПІ-регуляторів в САУ тиску пари: 1 – вихід першого регулятора; 2 – вихід другого (див. рис. 3.23)

Таким чином, виходячи з значень аналізованих показників якості перехідних процесів САУ тиску пару, можна стверджувати, що так як  $P_2 < P_1$ , то ПІ-регулятор другої САУ налаштований оптимально в порівнянні з регулятором першої (згідно з заданим критерієм і пріоритетам). При цьому, експертним показником  $P_{\text{кобм}}$  враховуються вимоги технологічного регламенту до САУ судових парових котлів. Слід зазначити, що до різних технологічних процесів парових котлів можуть бути пред'явлені різні вимоги відповідно до правил

експлуатації допоміжних СПУ [128] і вимог, представлених в табл.3.4., а також, умов експлуатації, досвіду обслуговуючого персоналу, станом устаткування тощо Облік перерахованих характеристик також може бути виражений у вигляді вагових коефіцієнтів  $w$  і відповідного комбінованого експертного критерію якості САУ.

На основі проведеного дослідження можливо висунути **наукове положення** - забезпечення заданої якості експлуатаційних характеристик СПУ на перехідних режимах роботи виконується за допомогою комбінованого критерію ефективності, який враховує мінімум суми зваженого значення перерегулювання і зваженого значення часу регулювання по умові експертного пріоритету, вираженого в виді вагових коефіцієнтів.

### 3.3. Дослідження ефективності адаптивних САУ в процесах зміни теплового режиму СПУ

Для повноти дослідження з визначення ефективності експертної методики налагодження САУ параметрів агрегатів СЕУ проводилися натурні експерименти на лабораторному стенді мікропроцесорної техніки кафедри ЕО і АС НУ «ОМА» (рис. 3.28 – 3.29). Як адаптивний регулятор було обрано контролер МПР 51 с системою тиску повітря (датчик тиску повітря вентилятора Huba Control), який реалізує адаптивний ПД-закон управління при регулюванні тиску повітря. Як об'єкт управління виступає повітропровід якої може бути представлено як модель у вигляді інерційної ланки. Інерційна ланка описує і датчик тиску. Компанія виробник контролера заявляє, що пропонуваний адаптивний алгоритм роботи регулятора може бути використаний для автоматизації парових котлів [53].



Рис. 3.28. Щит управління з контролерами МПР 51 і МИК 51, які використовуються для аналізу методів адаптивного управління

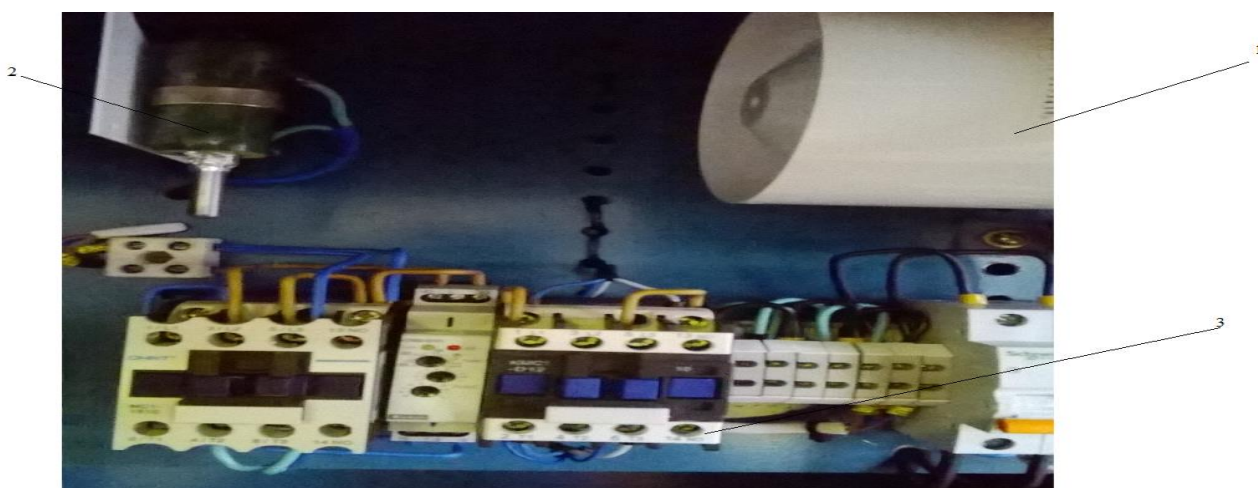


Рис. 3.29. Монтажні схеми підключення пристроїв виміру і управління до контролеру: 1 – вентилятор з устроєм переключення швидкості ; 2 – датчик тиску; 3 – пускова апаратура на яку приходів сигнал від регулятора

Інтерфейс програми настройки регулятора і перехідні процеси досліджуваної АСР показані на рис. 3.30 – 3.31.



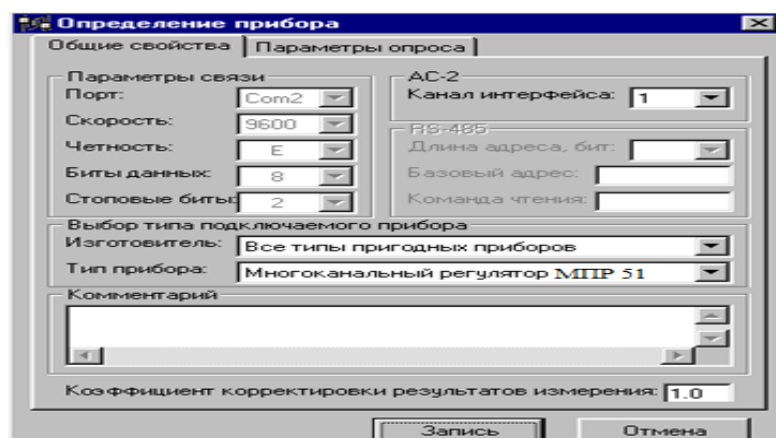


Рис. 3.30. Вікно інтерфейсу програми Owen process manager (SCADA) встановлення зв'язку між робочою станцією (комп'ютером) і контролером МПР 51, що реалізує адаптивний ПІД-закон

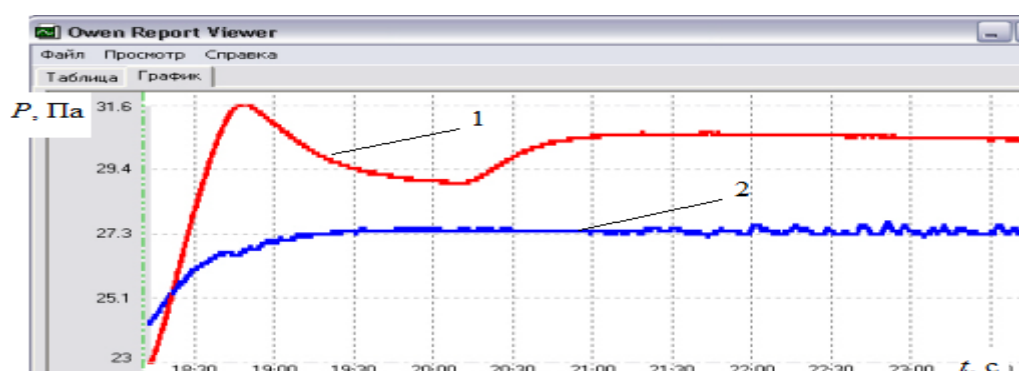


Рис. 3.31. Перехідні процеси аналізованої САУ з ПІД-регулятором в SCADA-системі «Owen Process Manager»: 1 – процес управління який реалізує метод Циглера-Нікольса; 2 – процес управління який реалізує експертну методику оптимізації

Перехідні процеси (див. рис. 3.31) демонструють значний закид і помилку регулювання у регулятора, настройки якого розраховані за допомогою методу Циглера-Нікольса [231]. Запропонований експертний метод [115], що враховує комбінований критерії якості САУ, продемонстрував очікувані значення, які є оптимальними за параметрами часу регулювання і перерегулювання.

На основі імітаційного моделювання САУ тиску пару допоміжного СПУ був виконаний аналіз (табл. 3.6) використовуваних методів адаптивного управління, пропонованих для САУ агрегатів СЕУ провідними зарубіжними компаніями [32, 52, 53, 184, 192].

Таблиця 3.6

## Методи адаптації САУ об'єктів СЕУ

| Компанія-виробник | Метод ідентифікації                                                         | Математична модель об'єкту                | Метод адаптації               | Недоліки                                                                                                  |
|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Foxboro Eхact     | Ступінчастий сигнал або прямокутний імпульс                                 | Першого порядку з запізненням             | Циглера-Никольса              | Автоколивальний режим в процесі експерименту                                                              |
| ABB               | Режим релейного регулювання з гістерезисом і додатковий ступінчастий скачок | Частотна                                  | Табличний (формули), AMIGO    | Тривалість процесу ідентифікації та адаптації; наявність еталонних моделей тільки для номінального режиму |
| Emerson           | Релейний                                                                    | Другого порядку з запізненням             | Табличний і Циглера-Николса   | Значна амплітуда коливань; неможливість ручного коректування                                              |
| Honeywell         | Одиничний скачок                                                            | Першого порядку з запізненням             | Табличний і експертні правила | Тривалість процесу ідентифікації; неоптимальні налаштування регулятора, необхідність ручного коректування |
| Siemens           | Пасивна                                                                     | Першого або другого порядку з запізненням | Таблични, CHR                 | Неврахування експертних рекомендацій; відсутність функції прогнозу аварійної ситуації                     |

## 3.4. Висновки до розділу

1. Доведено, що експертний комбінований критерій оцінки ефективності процесу налагодження САУ параметрами СПУ забезпечують задану якість експлуатаційних характеристик СПУ в статичних і динамічних режимах роботи,

покращує адаптацію СПУ до умов експлуатації і підвищує можливість безвідмовної роботи обладнання СПУ.

3. Встановлено, що відсутність ефективної адаптації СПУ призводить до збільшення зростання аварійних ситуацій, відхилення експлуатаційних параметрів від оптимальних, що призводить до прискорення зростання процесів утворення корозії і, як наслідок, до зниження надійності елементів.

4. Встановлено, що блочно-орієнтована ARX модель для параметричної ідентифікації нелінійної характеристики вмісту кисню у вихідних газах від теплового навантаження СПУ дозволяє відображати експериментальний процес з допустимим ступенем адекватності. Використання запропонованих моделей дозволяє проводити подальші дослідження з визначення процесів кавітаційної ерозії в елементах СПУ.

5. Встановлено, що стійкість САУ СПУ в умовах значної хитавиці судна можна забезпечити за допомогою моделі хвильових коливань, що уточнює межу переходу системи управління в нестійкий режим роботи та виникнення аварійних ситуацій СПУ.

6. Доведено, що застосування отриманих нелінійних емпіричних моделей в процесах розробки САУ СПУ і експлуатації СПУ дозволить забезпечити вирішення головного завдання - створення концепції по розробці САУ, яка забезпечує досягнення високих експлуатаційних показників СПУ при роботі на різних теплових режим.

7. Отримано наукове положення - забезпечення заданої якості експлуатаційних характеристик СПУ на перехідних режимах роботи досягається за рахунок застосування запропонованого комбінованого критерію ефективності, який враховує мінімум суми зваженого значення перерегулювання і зваженого значення часу регулювання по умові експертного пріоритету, вираженого в виді вагових коефіцієнтів.

## РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА МЕТОДІВ СТВОРЕННЯ САУ СПУ, ЩО ДІЮТЬ НА ОСНОВІ ТЕОРІЇ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

### 4.1. САУ параметрами суднових комбінованих котлів

Суднові комбіновані котли за своєю конструкцією об'єднують елементи допоміжних і утилізаційних котлів, що дозволяє їх експлуатувати як на ходовому режимі роботи, так і на стоянці судна. Широке використання КПК останнім часом доводить їх перспективність в області підвищення енергоефективності кораблів торгового і пасажирського флоту. З урахуванням специфіки конструкції і можливості роботи на основних режимах судна (стояночний, ходовий тощо) в широкому паровому діапазоні перспективним є дослідження САУ КПК.

На ряді сучасних суднових КПК встановлений двоканалний модульний регулятор фірми Siemens марки Simatic S7-400, який реалізує ПІ-закон управління [163] і, одночасно підтримує задане значення тиску пара і вміст кисню у вихідних газах СПУ (рис. 4.9). З причини поширеності двоканалних САУ КПК представляє науковий інтерес аналіз ефективності їх роботи з урахуванням додавання в систему управління нелінійних алгоритмів нечіткої логіки.

На рис. 4.1 розташовані: 1 загальний пароводяний колектор, до якого приєднані труби 7, 8, 9 паливної частини допоміжного котла і труби 2 утилізаційної частини (поверхні нагрівання). Труби 2 утилізаційної частини омиваються випускними газами головного двигуна в напрямі від низу до верху. Завдяки перегородки 4 обидві частини суднового комбінованого котла по газовій стороні повністю розділені і можуть працювати окремо одна від одного або одночасно в залежності від режиму роботи головного двигуна. Управління

утилізаційної частиною КПК здійснюється за допомогою поворотної заслінки, а допоміжною частиною - паливної форсункою 6.

За компонованням паливна і утилізаційна частини являють собою звичайні вертикальні суднові водотрубні парові котли [152].

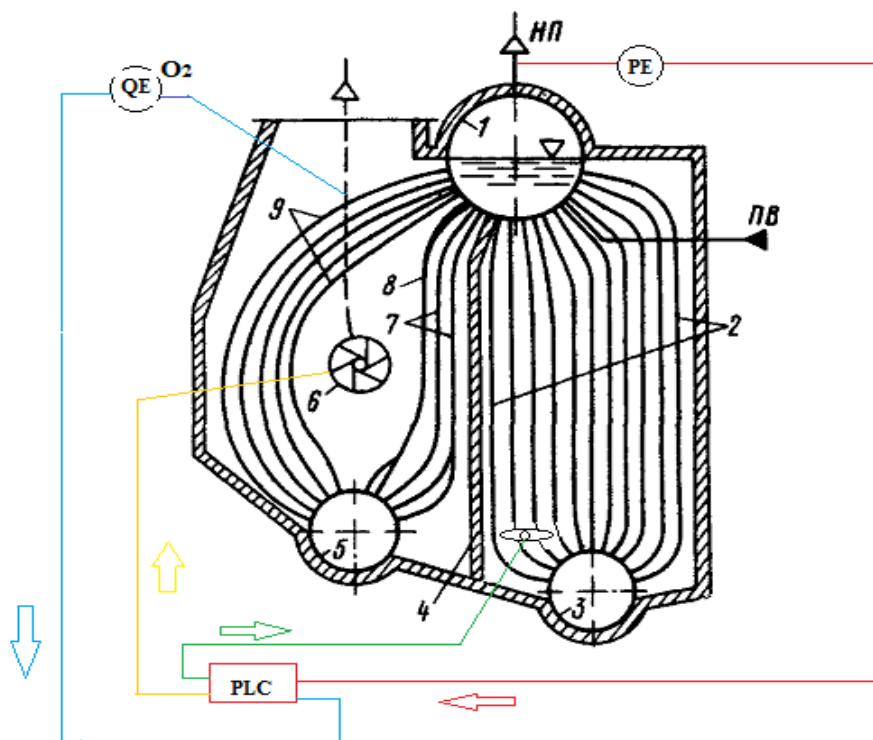


Рис. 4.1. Схема САУ параметрами КПК марки КВК 2.5: PE – датчик тиску; ПВ – живильна вода; НП – насичений пар;  $QE^{O_2}$  – аналізатор змісту кисню в вихідних газах допоміжної частини КК; PLC – двоканальний програмований логічний контролер Simatic S7-400, діючий по ПІ-закону

Аналогічної конструкцією володіє і судновий комбінований парогенератор Alfa Laval Aalborg [177,183] з ротаційною форсункою. Продуктивність секції, що працює на рідкому паливі, становить 0,75 – 5 т / г, а робочий тиск до 9 бар. Парогенератор Aalborg ОС являє собою вертикальний циліндричний котел з утилізаційної секцією, що складається з димогарних труб, а в конвекційної

частини секції, що працює на рідкому паливі, встановлені голчасті водяні труби [184].

Робота двоканального контролера (див. рис. 4.1) представлена наступним чином: на входи РС надходять сигнали за поточними значеннями тиску пару і змісту  $O^2$  у вихідних газах допоміжної частини котла, а виходами контролера (керуючими впливами) є команди на привід поворотною заслінкою (утилізаційної частини) і на подачу палива в форсунки 6 допоміжної частини котла. Таким чином, нечіткий контролер зможе забезпечити оптимальний процес горіння палива і підтримання необхідного тиску пару. Слід зазначити, що настройка традиційних ПІ-регуляторів в двозав'язаних системах автоматичного регулювання вельми трудомістке завдання, що вимагає детального коригування налаштувань:  $K_p$  – коефіцієнт передачі і  $T_i$  – часу інтегрування при проведенні пуско-налагоджувальних робіт. Рекомендовану методику настройки двозав'язної САУ [90], як правило, використовують в умовах якщо:

- спостерігається малий взаємний вплив контурів;
- швидкодія одного контуру значно вища від другого (контури рознесені по частотах);
- в перехресних зв'язках одна з передавальних функцій має коефіцієнт передачі (посилення) значно менше, ніж інша, тобто спостерігається односторонній вплив.

Однак, в перехідних умовах роботи суднових комбінованих парогенераторів, при різких змінах навантажень головних двигунів і вплив на САУ зовнішніх і внутрішніх випадкових збурень, значення параметрів передавальних функцій об'єкта по каналах збурення і управління змінюються більш ніж на 50 % від номінальних, що вимагає установки нових (оптимальних для поточного режиму) значень параметрів двоканального ПІ-регулятора СПУ. Однак, в умовах браку часу у оперативного персоналу в силу тенденції його

скорочення, відсутності на судах спеціальних технічних засобів реєстрації та ідентифікації процесів САУ СПУ, недостатнього методичного матеріалу з налагодження САУ СПУ тощо, фахівці з САУ змушені встановлювати ті значення параметрів регуляторів які були розраховані на стадії проектування САУ СПУ і вказані в судновий технічної документації. Рекомендовані параметри настройки регуляторів є оптимальними тільки для одного, як правило, запроектованого номінального режиму роботи СПУ, і їх установка призводить до зниження ефективності роботи САУ СПУ в процесі експлуатації КПК на інших режимах відмінних від розрахованого.

Виходячи з вищесказаного, проведено дослідження, що пропонується до застосування в комбінованих СПУ, універсального двоканального нечіткого регулятора діючого на платформі контролера компанії SIEMENS S7-300 [53] і що працює на основі алгоритму І. Мамдані [206]. Пропонований нечіткий контролер СПУ повинен досягти оптимальних процесів на найбільш частих режимах парового навантаження (від 20 до 70 % від номінального) без коригування настроювальних параметрів. Методика синтезу нечіткої САУ передбачає розробку нечіткої моделі регулювання процесів співвідношення «паливо - повітря» і комп'ютерну апробацію отриманої моделі САУ, діючу в умовах невизначеності - вплив на об'єкт управління випадкових і детермінованих збурень (у вигляді змін значень параметрів передавальної функцій об'єкта управління в широкому діапазоні навантаження по каналам збурення і управління).

На першому етапі методики проектування пропонується структурна схема двоканальної нечіткої САУ параметрами КПК (рис. 4.2).

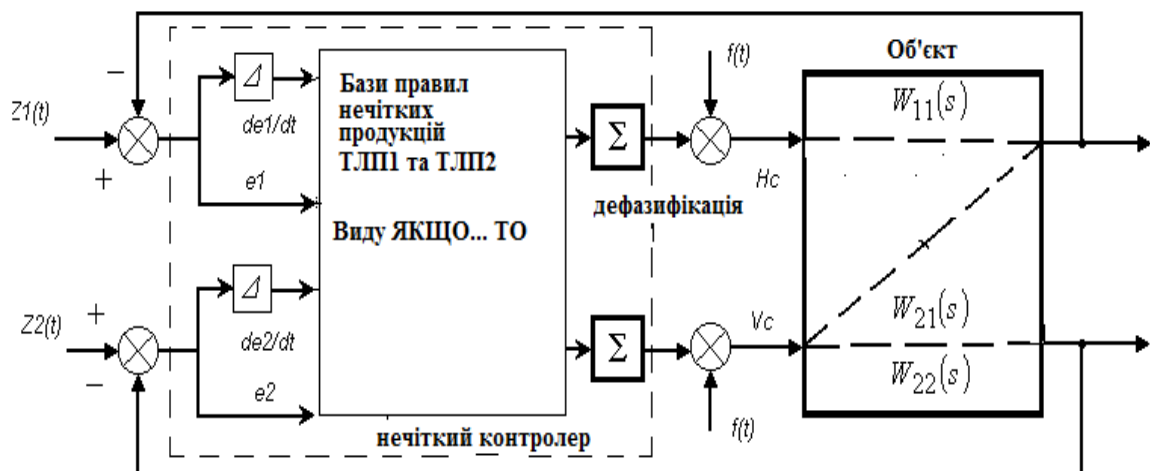


Рис. 4.2. Структурна схема двоканального НЛК, що управляє двома параметрами КПК:  $Z_i(t)$  – завдання відповідному по каналу управління;  $e_i$  – помилка;  $\Delta$  – диференціатор;  $\Sigma$  – блок дефазифікації;  $f(t)$  – канал збурення;  $W_i(s)$  – передатні функції об'єкту по каналам управління і перехресного зв'язку;  $H_c$  – управляючий вплив по першому каналу регулювання;  $V_c$  – управляючий вплив по другому каналу регулювання

На наступному етапі пропонованої методики розробки нечіткої двоканальної САУ, за допомогою пакета Fuzzy Logic Toolbox, проводиться визначення числа входів і виходів, а також їх фазифікації. Виходячи із загальновідомої структури нечіткого контролера [27] на вхід контролера подаються чотири лінгвістичні змінні: ( $e_1$ ,  $e_2$  – сигнали неузгодженості двох каналів;  $de_1/dt$ ,  $de_2/dt$  – похідні сигналів неузгодженості), а виходом є ( $H_c$ ,  $V_c$  – керуючі впливи).

При проведенні фазифікації визначаються нечіткі множини для відхилення  $e_1(t)$  і швидкості її зміни  $e_1'(t)$  управляючого впливу  $H_c(t)$ , а також для помилки  $e_2(t)$ , і швидкості її зміни  $e_2'(t)$  і управляючого  $V_c(t)$  по другому каналу регулювання. Вид, і кількість функцій належності визначено за допомогою рекомендацій [75] і проведених імітаційних експериментів [87-90]:



$$\left. \begin{aligned} E_1 = NB^\Delta &= (e_1(t), \mu_1(e_1(t))); E_4 = Z^\Delta = (e_4(t), \mu_4(e_4(t))); E_7 = PB^\Delta = (e_7(t), \mu_7(e_7(t))); \\ E_2 = NS^\Delta &= (e_2(t), \mu_2(e_2(t))); E_5 = PM^\Delta = (e_5(t), \mu_5(e_5(t))); E_3 = NM^\Delta = (e_3(t), \mu_3(e_3(t))); \\ E_6 = PS^\Delta &= (e_6(t), \mu_6(e_6(t))); E_i \in E; i = \overline{1, 7}; e(t) \in E, \end{aligned} \right\}$$

де  $E$  – універсальна множина відхилень;  $e(t)$  – поточне значення відхилення в певний момент часу;  $\mu_i(e_i(t))$  – функція належності до нечіткої множини  $e_i(t)$ ;  $NB$  – негативно велике,  $NS$  – негативно середнє,  $NM$  – негативно мале,  $Z$  – нульове,  $PS$  – позитивно середнє,  $PM$  – позитивно мале,  $PB$  – позитивно велике.

Аналогічним чином визначаються нечіткі множини (функції приналежності) для другого відхилення, швидкостей зміни відхилення двох каналів і керуючих впливів (виходу нечіткого контролера). Похідна помилки регулювання:  $dE_1/dt \triangleq (e'_m, \mu_e(e'_m(t)))$ ,  $q = 1, 2, \dots, n_7$ ,  $n_7=7$ .

Управляючого впливу (вихід) нечіткого контролера:

$$Hc \triangleq (u_m^e, \mu_\kappa(u_m(t))), c = 1, 2, \dots, n_7, n_7 = 7,$$

$$\text{де } e_1(t) = z_1(t) - y_1(t), e_1'(t) = \frac{de(t)}{dt}.$$

Етап дефазифікації по першому каналу регулювання проводиться методом центру тяжкості [75]:

$$H_c = \frac{\sum_{c=1}^7 H_c \cdot \mu(H_c)}{\sum_{c=1}^7 \mu(H_c)}.$$

Аналогічний метод використовується для дефазифікації керуючого впливу другого каналу управління:

$$V_c = \frac{\sum_{c=1}^7 V_c \cdot \mu(V_c)}{\sum_{c=1}^7 \mu(V_c)}.$$

Для апробації запропонованої нечіткої моделі двоканального регулятора параметрів комбінованого СПУ і аналізу її ефективності використовувався пакет

(Simulink) [38]. Об'єктом регулювання обраний комбінований паровий котел KBK 2.5 [69] з взаємопов'язаними регульованими параметрами (див. рис. 4.2). При моделюванні двоканальної НСАУ використовуються передавальні функції по каналам регулювання  $W_{11}$  «витрата дуттьового повітря – вміст  $O^2$  в димових газах ( $\alpha$ )» і  $W_{22}$  «співвідношення витрати палива – тиск пару» каналу взаємних зв'язків  $W_{21}$ , тип, порядок і параметри яких визначені відповідно до динамічних характеристик СПУ [35] і результатами другого розділу. Універсальна ТЛП (експертна база знань) двоканального НЛК представлена в табл. 4.1.

Таблиця 4.1

ТЛП двоканального НЛК управління параметрами КПК

| Відхилення $e_1(t)$<br>$e_2(t)$ | Похідна від відхилення, $e_1'(t); e_2'(t)$ |           |           |           |           |           |           |
|---------------------------------|--------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                                 | NB                                         | NS        | NM        | Z         | PM        | PS        | PB        |
|                                 | $H_c(t); V_c(t)$                           |           |           |           |           |           |           |
| <i>NB</i>                       | <i>NB</i>                                  | <i>NB</i> | <i>NB</i> | <i>OS</i> | <i>Z</i>  | <i>PM</i> | <i>PS</i> |
| <i>NS</i>                       | <i>NS</i>                                  | <i>NS</i> | <i>NS</i> | <i>NM</i> | <i>PM</i> | <i>PM</i> | <i>PS</i> |
| <i>NM</i>                       | <i>NS</i>                                  | <i>NM</i> | <i>NM</i> | <i>Z</i>  | <i>Z</i>  | <i>PM</i> | <i>PS</i> |
| <i>Z</i>                        | <i>NS</i>                                  | <i>NM</i> | <i>NM</i> | <i>Z</i>  | <i>PM</i> | <i>PM</i> | <i>PS</i> |
| <i>PM</i>                       | <i>NM</i>                                  | <i>NM</i> | <i>Z</i>  | <i>Z</i>  | <i>PM</i> | <i>PM</i> | <i>PS</i> |
| <i>PS</i>                       | <i>NM</i>                                  | <i>NM</i> | <i>Z</i>  | <i>PM</i> | <i>PS</i> | <i>PS</i> | <i>PS</i> |
| <i>PB</i>                       | <i>NS</i>                                  | <i>NM</i> | <i>Z</i>  | <i>PS</i> | <i>PS</i> | <i>PB</i> | <i>PB</i> |

Імітаційна структура НСАУ КПК, в середовищі Simulink, показана на рис. 4.3. На двоканальну САУ параметрами КПК впливають канали зовнішнього збурення (зміна парової навантаження СЕУ і витрати відпрацьованих газів головного двигуна судна). Модель каналів зовнішнього збурення представлена, на схемі моделювання (див. рис. 4.3) у вигляді інерційної ланки першого порядку. Перехідні процеси двоканальної нечіткої САУ комбінованого СПУ,

отримані на віртуальному осцилографі (Scope2), показані на рис. 4.4 Процеси носять аперіодичний характер (див. рис. 4.4) з часом регулювання  $T_p = 35$  с, що демонструє успішну роботу нечіткого регулятора при роботі САУ в номінальному режимі.

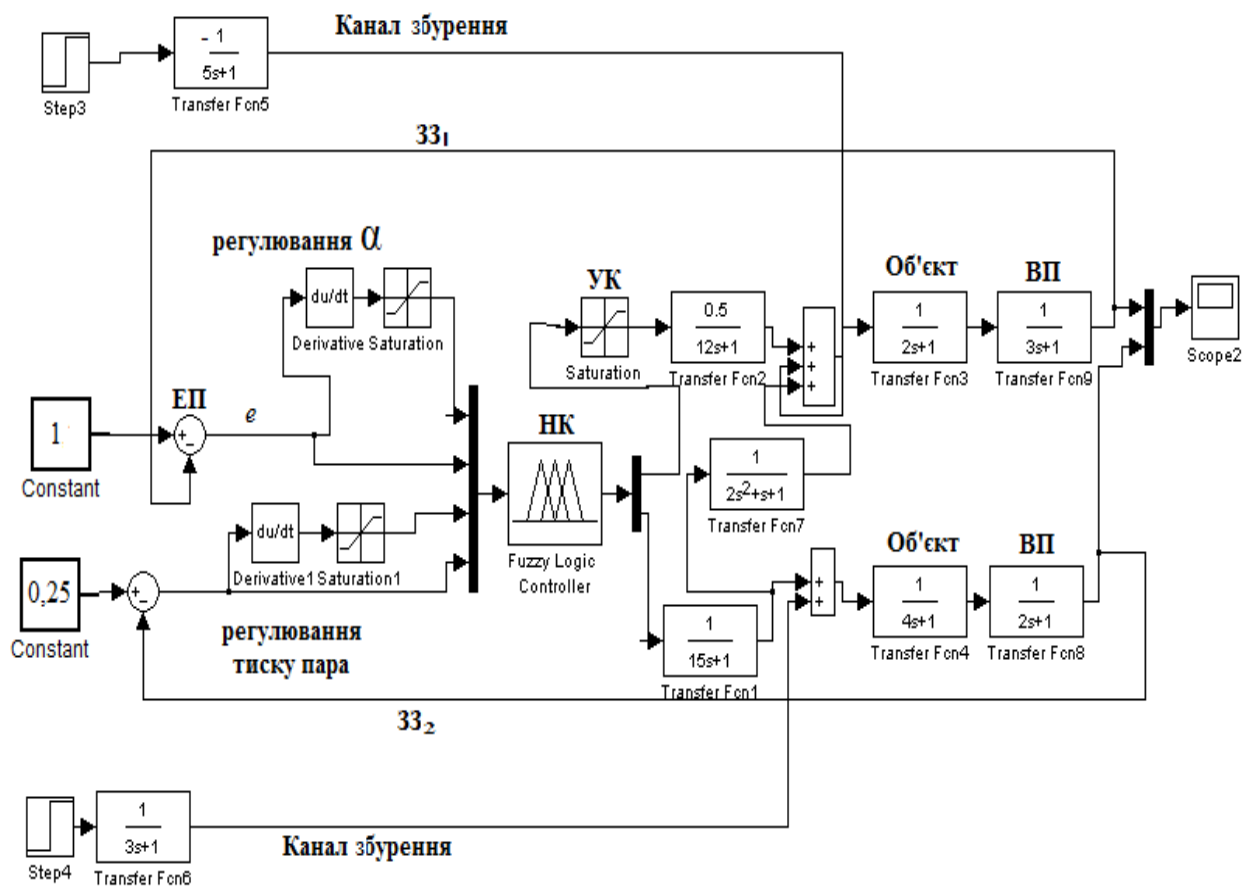


Рис. 4.3. Імітаційна модель нечіткої двоканальної САУ коефіцієнта надлишку повітря і тиску пари в СПУ КВК 2,5: ЕП – елемент порівняння;  $e$  – помилка регулювання; НК – двоканальний нечіткий контролер; ЗЗ – зворотний зв'язок; УК – устрій керування (нелінійний елемент); ВП – вимірювальний перетворювач (манометр і киснемір)

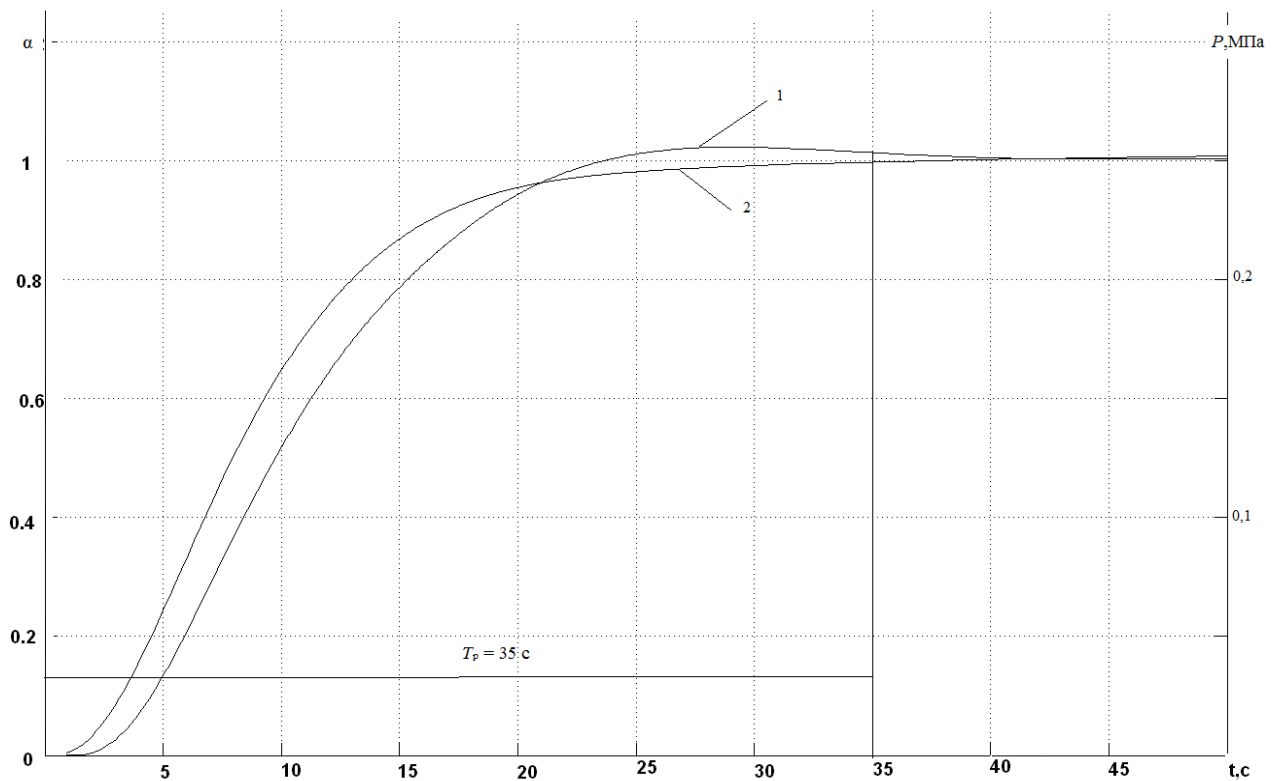


Рис. 4.4. Сталі процеси двоканальної нечіткої САУ параметрами комбінованого СПУ КВК 2,5 при роботі в номінальному режимі: 1 – процес стабілізації коефіцієнта надлишку повітря; 2 – процес стабілізації тиску пари в СПУ при роботі в сталому режимі

Також, в процесі моделювання було встановлено, що традиційна САУ КПК з ПІ-регулятором демонструє значно більший час регулювання (на 20 %), а також не має можливості корекції значення змісту  $O_2$  у вихідних газах, тобто коефіцієнт надлишку повітря завжди постійний. Зазначена сталість  $\alpha$  в САУ вносить погіршення в показники економічності і екологічності КПК при роботі на теплових навантаженнях, відмінних від номінального.

Разом з тим, запропонована до впровадження універсальна двоканальна НСАУ проявляє стійкість при зміні завдання і впливі каналів зовнішнього і внутрішнього збурення, демонструє значну швидкодію і відсутність закидання, тобто є оптимальною за показниками підтримки експлуатаційних характеристик.

#### 4.2. Метод парметричної ідентифікації підсистем СПУ

Для підвищення ефективності процесу експлуатації СПУ і зниження трудовитрат на процеси налагодження і теплотехнічних випробувань СПУ при ходових і швартових випробувань, пропонується новий метод розробки експертної системи, який дозволяє прискорити і спростити процедуру налагодження та адаптації СПУ до умов експлуатації. Процес розробки експертної системи включає синтез традиційного табличного [64] і нечіткого наукових підходів [11] в області теорії адаптивних систем управління [139].

Розроблюваний метод адаптації ПІ-регулятора використовує нечіткий алгоритм Такагі-Сугено [222, 223], апробований в [97]. На рис. 4.5 представлена, пропонована структура адаптації настроюваних параметрів регулятора в САУ тиску пару в СПУ.

У завдання блоку ідентифікації (БІО) входить оцінка значень параметрів об'єкта регулювання ( $T$ ,  $K$ ,  $\tau$ ), що надходять від датчиків або оператора і дозволяють розрахувати параметри настройки ПІ або ПІД-регулятора в САУ СПУ у випадках незадовільної якості роботи САУ тобто погіршення експлуатаційних показників.

Нечітка експертна система (НЕС), що реалізує алгоритм Такагі-Сугено [222, 223], отримуючи дані значення, самостійно розраховує нові оптимальні настройки регулятора і здійснює його автонастройку по команді від оператора.

Наявність НЕС дозволяє оптимізувати процес регулювання згідно із заданими показниками якості. Блок ідентифікації проводить пасивну ідентифікацію об'єкта, який функціонує в сталому режимі або перехідному режимі. Також, в ряді випадків, ідентифікація може носити активний характер, наприклад, для порівняльного аналізу математичних моделей, отриманих в ході пасивної і активної ідентифікації.

Для розробки експертної системи визначені основні параметри моделі суднового парогенеруючого об'єкта (парового котла): «постійна часу  $T$ », «коефіцієнт посилення  $K$ », «запізнювання  $\tau$ », і проведені їх фазифікації. Значення параметрів ідентифікації лежать в діапазонах (малі (М), середні (S), великі (В)).

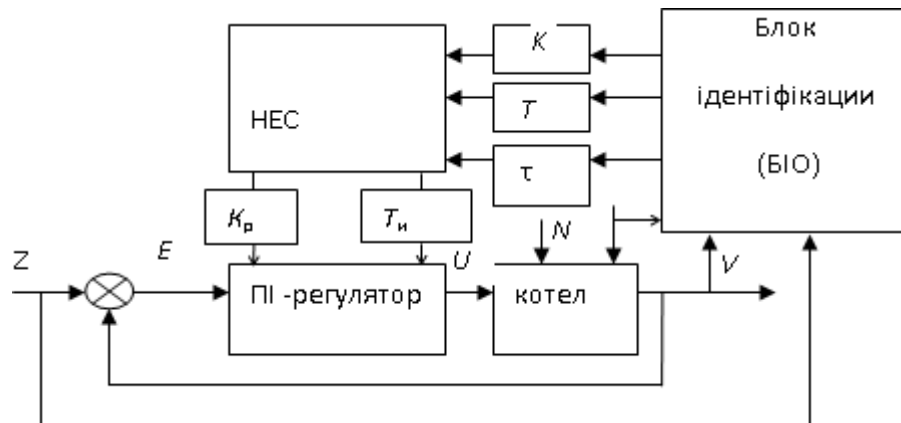


Рис. 4.5. Структура системи адаптації ПІ – регулятора в САУ тиску пари в СПУ за допомогою експертної системи: НЕС – нечітка експертна система;  $E$  – помилка регулювання;  $K$  – коефіцієнт посилення;  $T$  – постійна часу об'єкту;  $\tau$  – запізнювання;  $Z$  – завдання;  $V$  – вихідний параметр;  $N$  – збурення;  $U$  – управляючий вплив;  $K_p$ ,  $T_i$ , – оптимальні настройки ПІ-регулятора

Принцип дії алгоритму Такагі-Сугено [221, 222], на основі якого працює пропонується НЕС, полягає в складанні правил продукції виду: «ЯКЩО ... ТО» або (IF ... THEN) тільки по одній нечіткості. Застосовувані правила є нечіткими тільки в частині IF, тоді як в THEN присутні функціональні залежності (формули розрахунку настроюваних параметрів САУ):

$$R^{(1)} : \text{IF } (x_1 \text{ є } A_1^1 \text{ AND } x_2 \text{ є } A_2^1 \dots \text{ AND } x_n \text{ є } A_n^1) \text{ THEN } y_1 = f^{(1)}(x_1, x_2, \dots, x_n),$$

$$R^{(N)} : \text{IF } (x_1 \text{ є } A_1^N \text{ AND } x_2 \text{ є } A_2^N \dots \text{ AND } x_n \text{ є } A_n^N) \text{ THEN } y_N = f^{(N)}(x_1, x_2, \dots, x_n).$$

де  $A_n$  – терм-множини. Допустимо, що на вхід НЕС подається сигнал  $\bar{x} = (\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n)$ , який являється вектором значень параметрів об'єкту визначених

БІО, т.є.  $\bar{x} = f(T_i, K_k, \tau_j)$ . Визначимо вихідний сигнал НЕС  $\bar{y} = f(K_{pi}, T_{ij})$ . Логічні операції функціонування на прикладі одного правила ТЛП представлені нижче:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mu_{A_{21^1}}(\bar{x}_2), \dots, \mu_{A_{n1^1}}(\bar{x}_n); \\ \Pi_1 = \min(\mu_{A_{1^1}}(\bar{x}_1), \mu_{A_{21^1}}(\bar{x}_2), \dots, \mu_{A_{n1^1}}(\bar{x}_n); \\ \mu_{A_{1^1}}(\bar{x}_1), \mu_{A_{21^1}}(\bar{x}_2), \dots, \mu_{A_{n1^1}}(\bar{x}_n). \end{array} \right.$$

На наступному етапі розраховується:

$$\bar{y}_1 = f^{(1)}(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n).$$

Розглянемо розрахунки для інших правил  $\Pi(k)$ ,  $k = 2, \dots, N$ . Для правила  $\Pi_N$  отримуємо:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mu_{A_{1^N}}(\bar{x}_1), \mu_{A_{21^N}}(\bar{x}_2), \dots, \mu_{A_{n^N}}(\bar{x}_n); \\ \min(\mu_{A_{1^N}}(\bar{x}_1), \mu_{A_{21^N}}(\bar{x}_2), \dots, \mu_{A_{n^N}}(\bar{x}_n); \\ \Pi_N = \text{или} \\ \mu_{A_{1^N}}(\bar{x}_1), \mu_{A_{21^N}}(\bar{x}_2), \dots, \mu_{A_{n^N}}(\bar{x}_n); \\ \bar{y}_N = f^{(N)}(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n). \end{array} \right.$$

Вихідний сигнал НЕС, який реалізує алгоритм Такаги-Сугено [221, 222] представляє собою нормалізовану зважену суму окремих виходів  $\bar{y}_1, \dots, \bar{y}_N$ :

$$\bar{y} = \frac{\sum_{k=1}^N w^k \bar{y}_k}{\sum_{k=1}^N w^k}.$$

В лінійному випадку базу правил НЕС запишемо в виді:

$$\begin{aligned} R^{(k)} : & \text{IF} (x_1 \text{ єсть } A_1^k \text{ AND } x_2 \text{ єсть } A_2^k \dots \text{ AND } x_n \text{ єсть } A_n^k) \\ & \text{THEN } y_k = c_0^{(k)} + c_1^{(k)} x_1 + \dots + c_n^{(k)} x_n \end{aligned}$$

де  $c_n$  – коефіцієнти рівняння.

Припустимо, що у об'єкта в ході функціонування в силу впливу збурень відбувається зміна значень параметрів  $K$ ,  $T$ ,  $\tau$  на деякому діапазоні. І для забезпечення оптимальних показників якості роботи СПУ необхідно перенастроювання регулятора САУ. У такому випадку для адаптації настроюваних параметрів регулятора необхідне знання математичної моделі об'єкта управління. Визначення моделі можна виконати за допомогою системи моніторингу регульованих параметрів СПУ. Наприклад, в системі управління процесом горіння палива в топці СПУ зі штучною циркуляцією, оператор, спостерігаючи за витратою палива, що надходить на пальники, може за допомогою візуалізації перехідних процесів на мнемосхемі станції моніторингу відзначити зміни витрати палива, що надходить в топку СПУ, тобто збільшення коефіцієнта посилення каналу управління ( $K$ ); зміна запізнювання ( $\tau$ ) залежить від часу включення паливного насосу до моменту надходження палива в пальниковий пристрій; інерційність характеризується постійною часу ( $T$ ) у випадках зміни витрати пару тощо Дані спостереження і їх динаміка може бути використана для процедури ідентифікації параметрів моделі та технічної діагностики обладнання СПУ.

Для перевірки висунутого припущення про використання параметрів перехідних процесів для ідентифікації був виконаний експеримент.

При проведенні імітаційного експерименту, розглядалася робота на прикладі реалізації НЕС з двома правилами, що моделюють міркування експерт-наладчика САУ СПУ, виходячи із знання їм параметрів об'єкта, отриманих за допомогою комп'ютерної системи моніторингу (SCADA-системи) у вигляді електронної реєстрації перехідних процесів по каналах управління і збурення (рис. 4.6). Формули для розрахунку значень настроюваних оптимальних параметрів ПІ-регулятора для САУ тиску пари суднового котла використовуються згідно [153].



Пропонована НЕС допомагає налагоджувальникові і оператору САУ СПУ, крім видачі розрахованих оптимальних налаштувань регулятора, проводити ідентифікацію значень параметрів САУ. НЕС на основі знання відповідності значень прив'язки параметрів навантаження СПУ до режимних відповідним параметрам, отриманим в ході активної ідентифікації за кількома найбільш частим режимам роботи (20 %, 50 %, 70 % від номінального навантаження) (див. рис. 4.6).

Розроблена НЕС дозволяє визначити ідентифікуються значення ( $T$ ,  $K$ ,  $\tau$ ) на всіх режимних діапазонах СПУ. Етапи створення експертної системи згідно [79], для блоку ідентифікації (БІО) (див. рис. 4.7), виконані в програмному забезпеченні Fuzzy Logic Toolbox, представлені нижче (рис. 4.9 – 4.12).

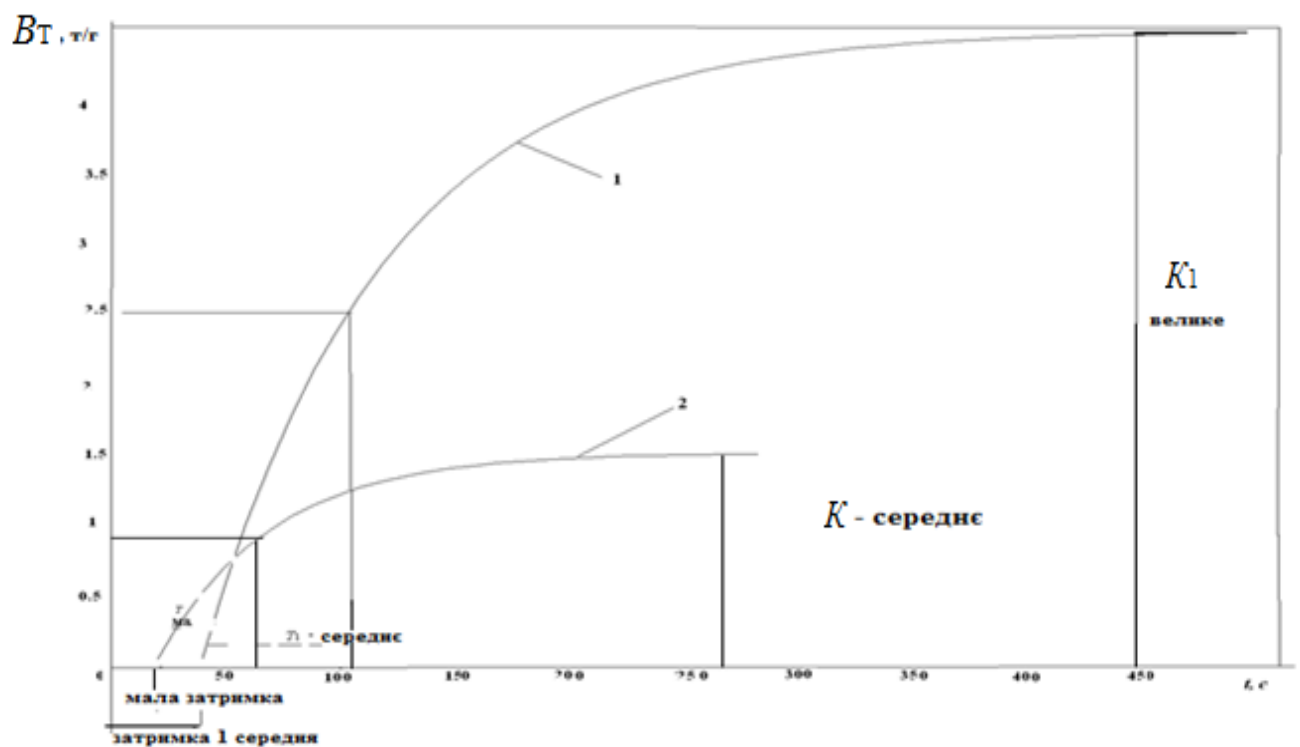


Рис. 4.6. Сталі процеси САУ витрати палива, що надходить в топку СПУ КАВ 1.6 / 7 при виході на задану теплове навантаження: 1 – на номінальну; 2 – на 33 % від номінальної;  $K$  – коефіцієнт підсилення;  $T$  – постійна часу

Робота експертної системи блоку ідентифікації параметрів СПУ КАВ 1.6 / 7 по каналу «зміна положення регулюючого органу - витрата палива» ( $K$ ,  $T$ ,  $\tau$ ) при найбільш частих теплових навантаженнях СПУ: 16 %, 50 %, і 75 % від номінальної представлена на рис. 4.7 – 4.112.

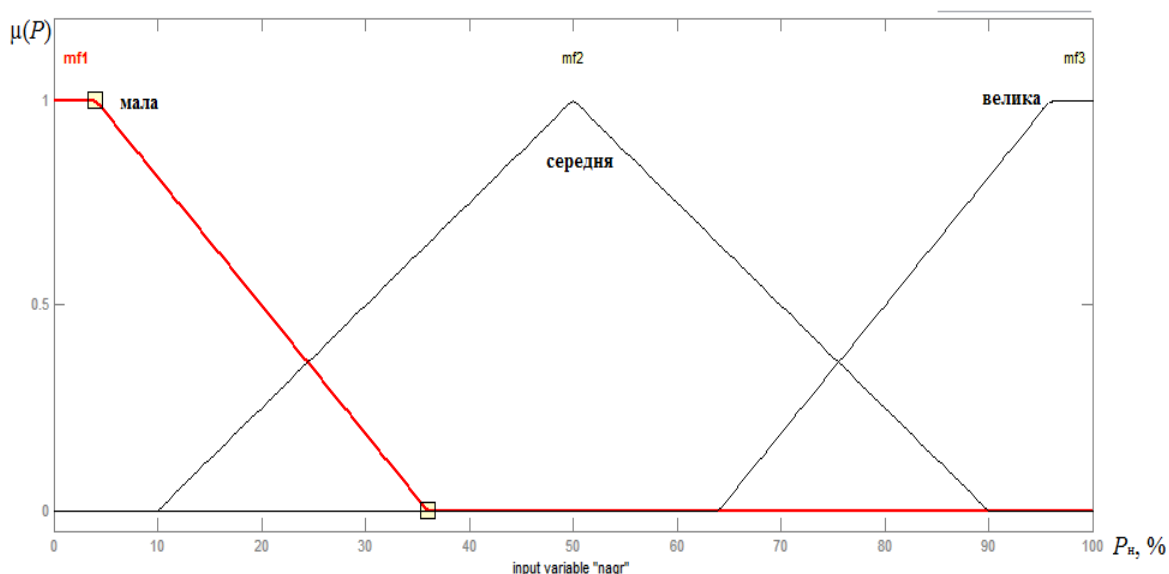


Рис. 4.7. Функції приналежності лінгвістичний змінної «навантаження СПУ»

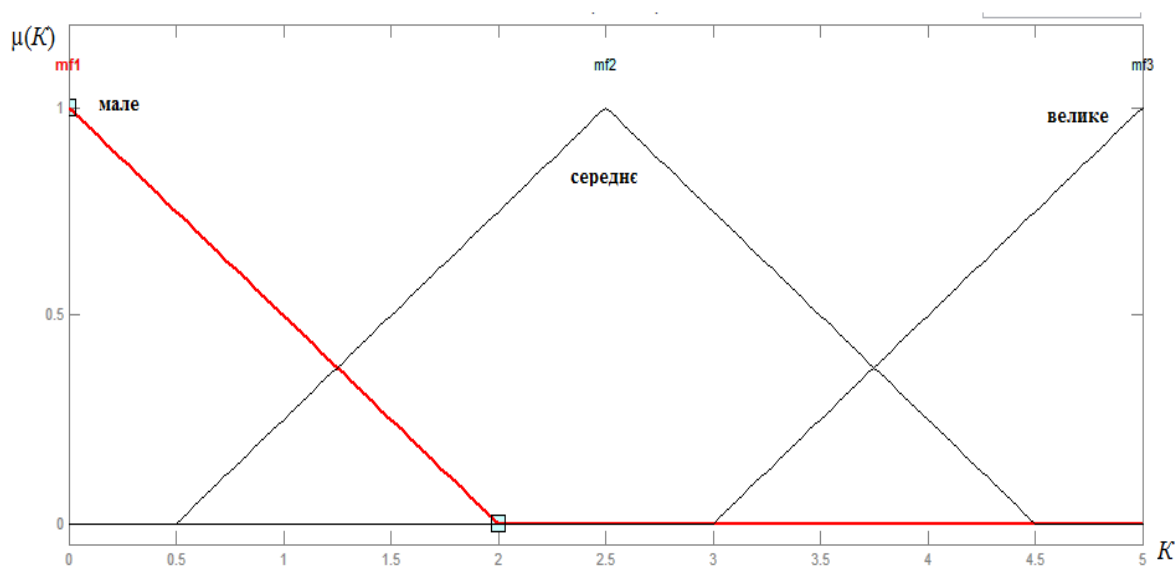


Рис. 4.8. Функції приналежності лінгвістичної змінної «коефіцієнт посилення»

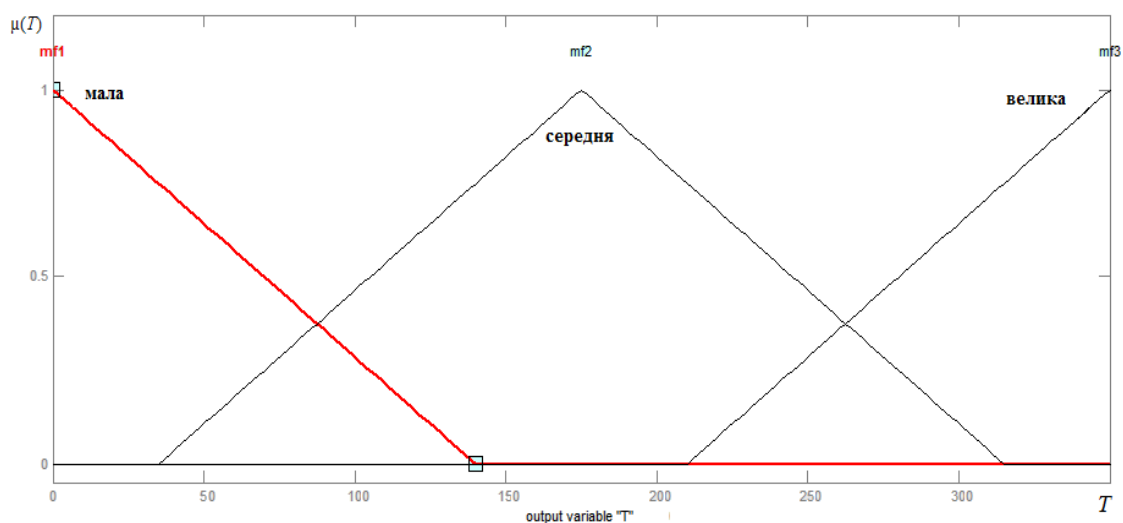


Рис. 4.9. Функції приналежності лінгвістичної змінної «постійна часу об'єкту управління»

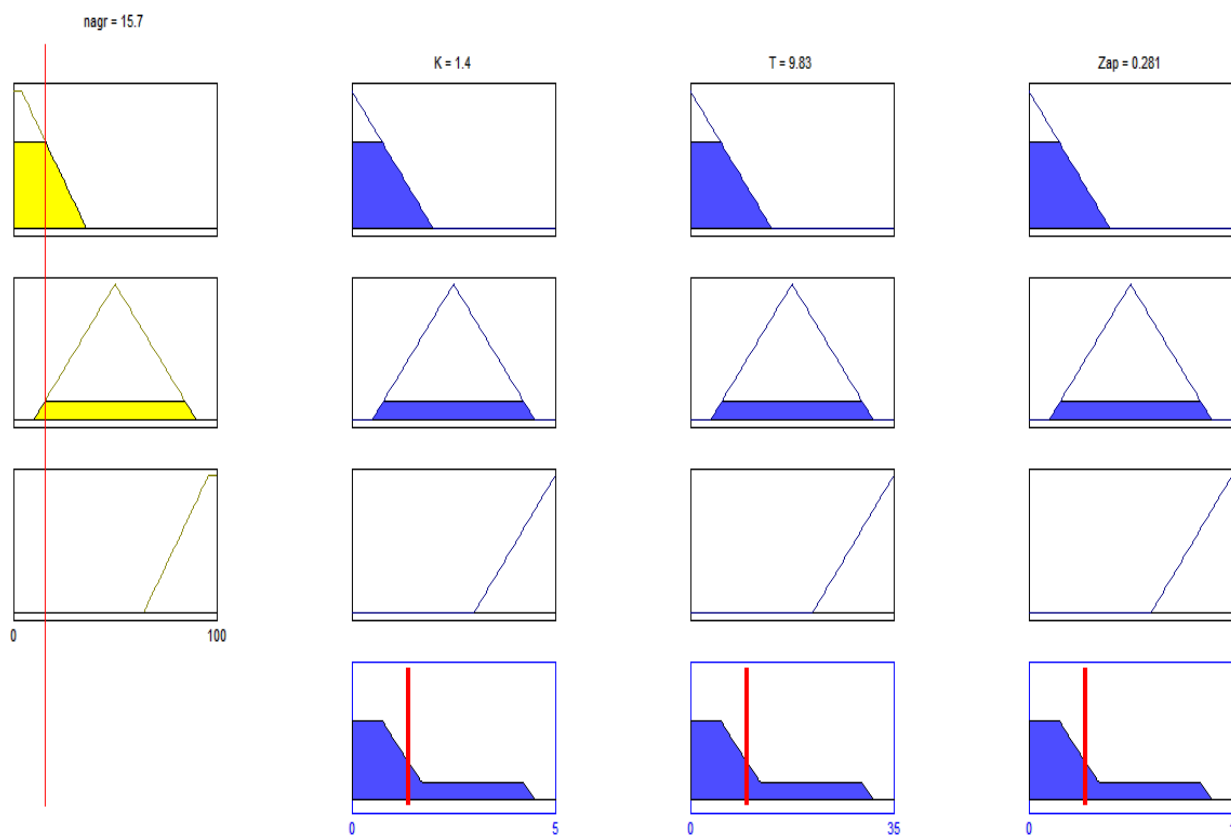


Рис. 4.10. Ідентифікація параметрів СПУ в НЕС при навантаженні 16 % від номінального: nagr – навантаження;  $K$  – коефіцієнт посилення;  $T$  – постійна часу; Zap – запізнювання

За допомогою розробленої НЕС можна визначити значення параметрів СПУ на всіх можливих режимах роботи. Крім цього експертна система реалізує апроксимаційну залежність ідентифікованих параметрів від навантаження СПУ (рис. 4.13).

Результат роботи НЕС як універсального апроксиматора при ідентифікації підсистеми СПУ, функціонуючої на різних теплових навантаженнях, пов'язаних і зміною парової продуктивності представлений в табл. 4.2.

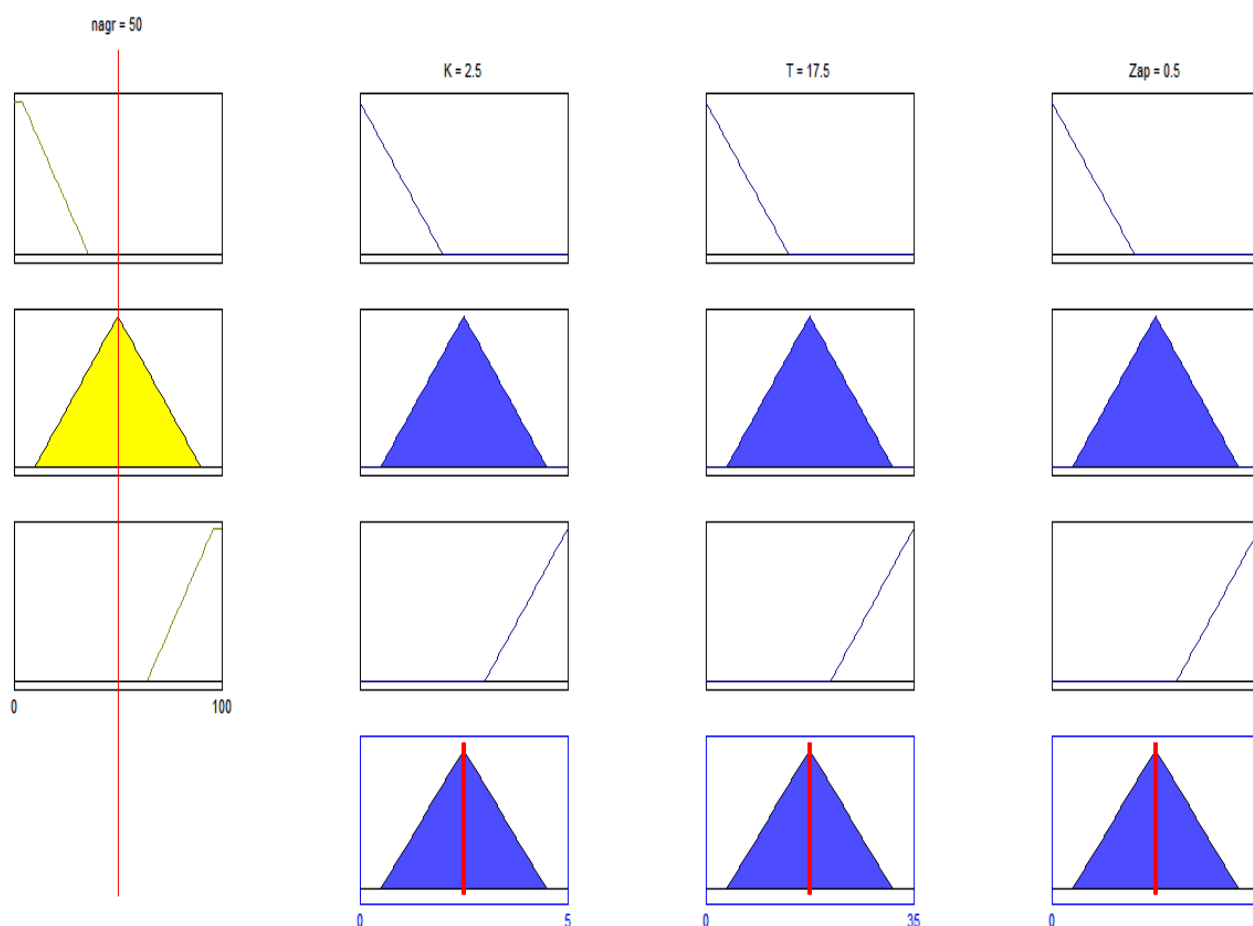


Рис. 4.11. Ідентифікація параметрів СПУ в НЕС при навантаженні 50 % от номінального: при навантаженні 50 % параметри об'єкту складають  $K = 2,5$ ;  $T = 17,5$ ;  $\tau = 0,5$

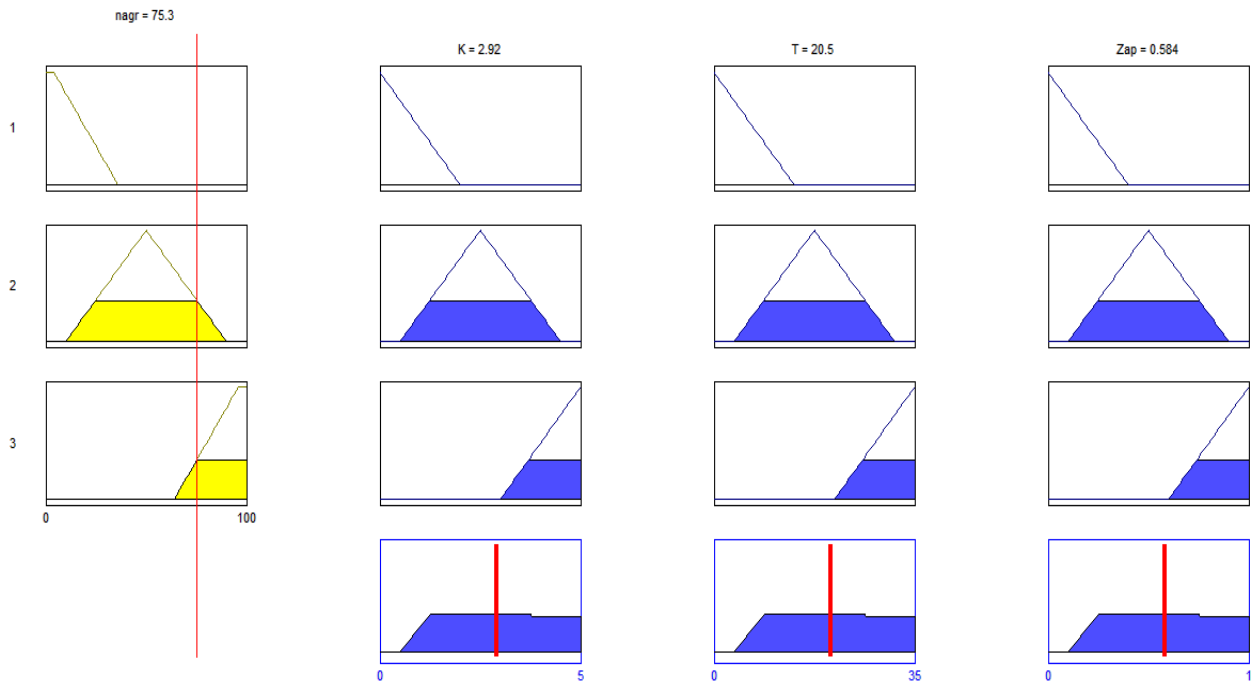


Рис. 4.12. Ідентифікація параметрів СПУ в НЕС при навантаженні 75 % от номінальної: параметри об'єкту складають  $K = 2,9$ ;  $T = 10,5$ ;  $\tau = 0,58$

Таблиця 4.2

Результати параметричної ідентифікації, одержані за допомогою НЕС

| Теплове навантаження, % | $K$ кг/с % хода | $T$ , хв | $\tau$ , с |
|-------------------------|-----------------|----------|------------|
| 15                      | 1,41            | 9,85     | 12         |
| 25                      | 1,55            | 12,1     | 16         |
| 35                      | 2,1             | 15,49    | 18         |
| 45                      | 2,6             | 16,00    | 28         |
| 55                      | 2,8             | 17,60    | 33         |
| 65                      | 2,87            | 19,90    | 35         |
| 75                      | 2,99            | 20,55    | 40         |

Як видно з рис. 4.13, отримана модель є нелінійною. Можна відзначити, що представлений підхід щодо реалізації НЕС, може бути використаний і для ідентифікації параметрів СПУ САУ ключових процесів СПУ (рівня води;

температури пара; горіння палива тощо) та визначення швидкості їх зміни для використання в засобах технічної діагностики.

Після етапу ідентифікації параметрів СПУ проведеної першої підсистемою НСЕ, друга її частина виконує розрахунок оптимальних настроювальних параметрів регулятора САУ СПУ.

Так, згідно з отриманими значеннями параметрів процесів кривої розгону ( $K$ ,  $T$ ,  $\tau$ ) (див. рис. 4.6) пропонуються наступні правила в нечіткій базі знань НЕС з розрахунку оптимальних адаптивних налаштувань ПІ-регулятора САУ тиску пари в СПУ, апробованих в [96]: П(1): Якщо ( $T$  є мале І  $K$  є середнє І  $\tau$  є мале) ТО  $K_{p1} = 0,6/K(\tau/T)$ ,  $T_{i1} = 0,6 T$ ;

П(2) : Якщо ( $T$  є середнє І  $K$  є більше І  $\tau$  є середнє) ТО  $K_{p2} = K(\tau/T)$ ,  $T_{i2} = T$  тощо.

Для апробації запропонованого методу розглянемо САУ тиску пару на виході з ДПК марки КАВ 1.6/7 (рис. 4.14). САУ позволяє стабілізувати тиску пара що надходить як на агрегати СЕУ так і на пароперегрівач і парову турбінку.

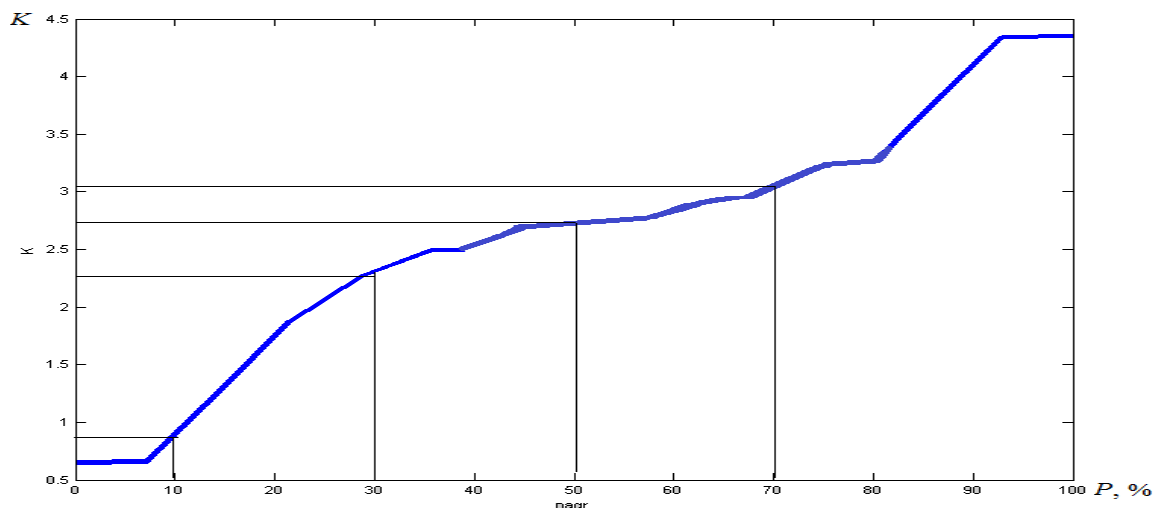


Рис. 4.13. Залежність зміни значення посилення об'єкта  $K$  (САУ тиску пари) в залежності від парового навантаження агрегатів СЕУ

Об'єктом управління є СПУ по каналу «витрата палива - тиск пару» яка діє в перехідному режимі - піддана впливу зовнішніх збурень. Основним зовнішнім

збурюючим впливом є зміна витрати пару внаслідок зміни режимів роботи споживачів пару агрегатів СЕУ.

Основним способом регулювання тиску пару в перехідному (як і в сталому) режимі є вплив на витрату палива, що подається в топку в залежності від відхилення тиску в магістралі паропроводу. При моделюванні САУ по каналу управління «витрата палива - тиск пару» використовується модель об'єкта управління (суднового ДПК марки КАВ 1.6 / 7), визначена у розділі 2.

При розробці НЕС розрахунку оптимальних параметрів ПІ-регулятора тиску пару (рис. 4.15) використовувався додаток Fuzzy Logic Toolbox (FTL) пакету Matlab [75]. Кількість і тип функцій приналежності були визначені виходячи з правил нечітких продукцій і експериментів [62,98,104].

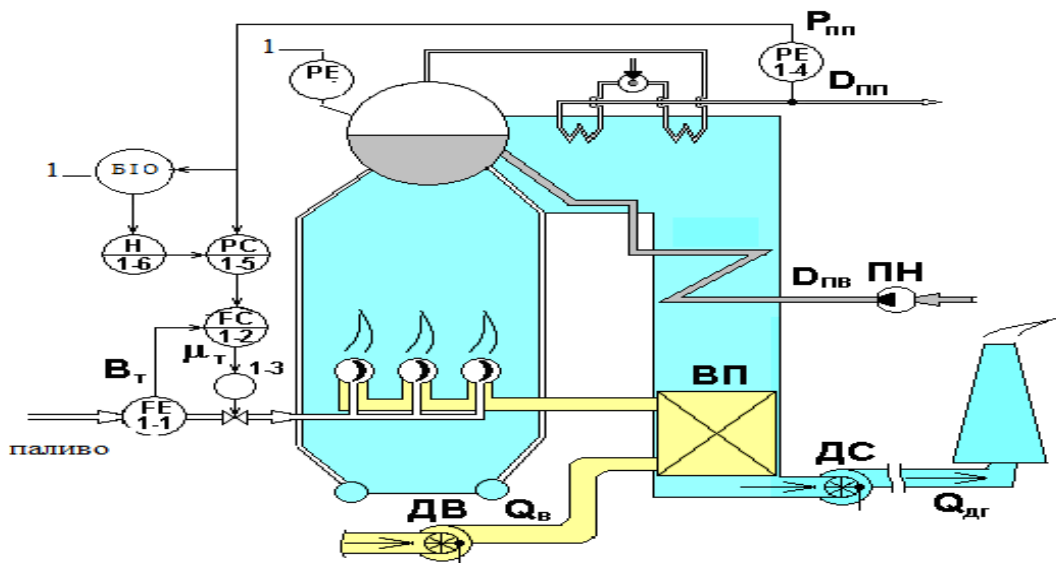


Рис. 4.14. САУ тиску пару в паропроводі ДПК: FF – датчик витрати палива; FC – контролер (регулятор) витрати палива; PC – контролер тиску пару; БІО – блок ідентифікації параметрів об'єкту; PE – датчик тиску; Н – пульт управління з НЕС; ДВ – дуттєвий вентилятор; ДС – димосос; ПН – живильний насос; ВП – повітряний підігрівач; ВЕ – водяний економайзер;  $P_{пп}$  – тиск пару;  $B_m$  – витрата палива;  $D_{пп}$  – витрата пару;  $D_{пв}$  – витрата живильної води;  $Q_v$  – витрата повітря;  $Q_{дг}$  – витрата димових газів;  $\mu_T$  – управляючий вплив

На рис. 4.16 – 4.17 представлені функції належності вхідних параметрів НЕС. Детальний процес створення нечіткої експертної системи для блоку адаптації САУ в додатку FLT, що визначає оптимальні параметри настройки ПІ і ПІД-регулятора в САУ СПУ представлений на рис. 4.18 – 4.21.

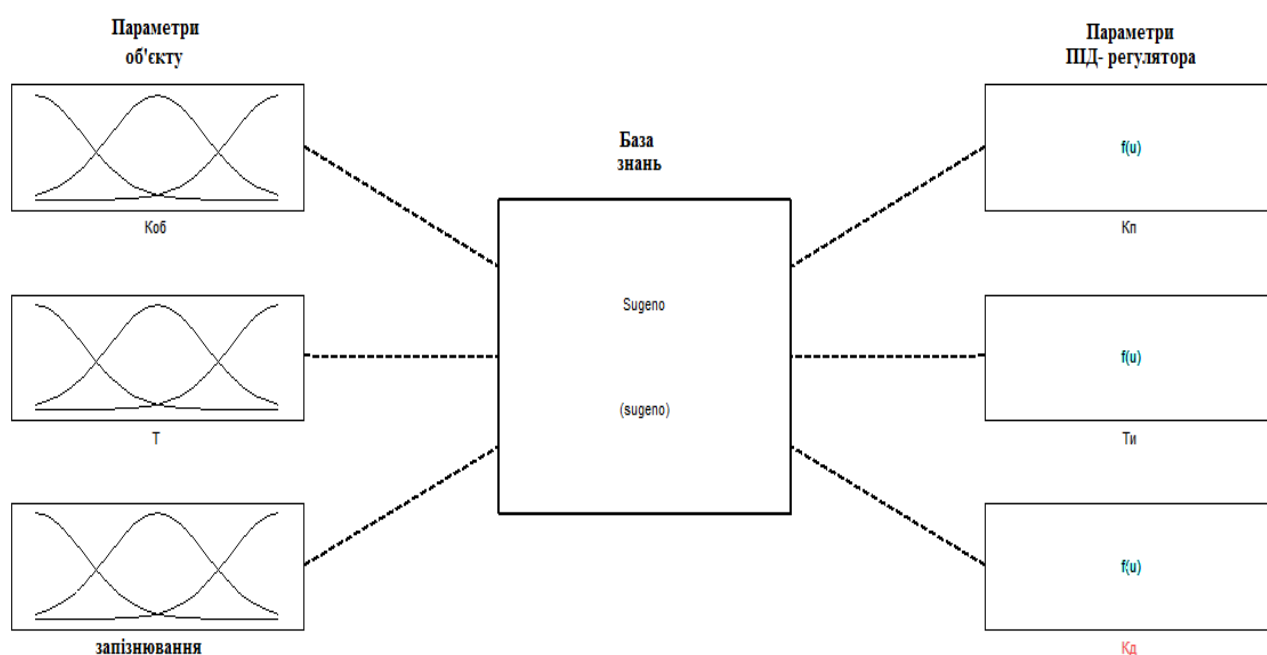


Рис. 4.15. Інтерфейс, реалізований в додатку (FTL), НЕС розрахунку оптимальних параметрів ПІД-регулятора в САУ тиску пари в СПУ КАВ 1.6/7

Для верифікації роботи НЕС використаний метод інспектування [10], в якості розрахункових значень взяті ступені істинності терм-множини «середнє» при номінальних умовах роботи парогенеруючого об'єкта:  $K = 0,65$  МПа / % ходу;  $T = 10$  хв;  $\tau = 4$  с.

Значення ступенів істинності по кожному правилу склали:

$$\Gamma(1): \mu_{T1}^1(10) = 0,3; \mu_{K1}^1(0,65) = 0,5; \mu_{\tau1}^1(4) = 0,4;$$

$$\Gamma(2): \mu_{T1}^2(10) = 0,8; \mu_{K1}^2(0,65) = 0,2; \mu_{\tau1}^2(4) = 0,6.$$



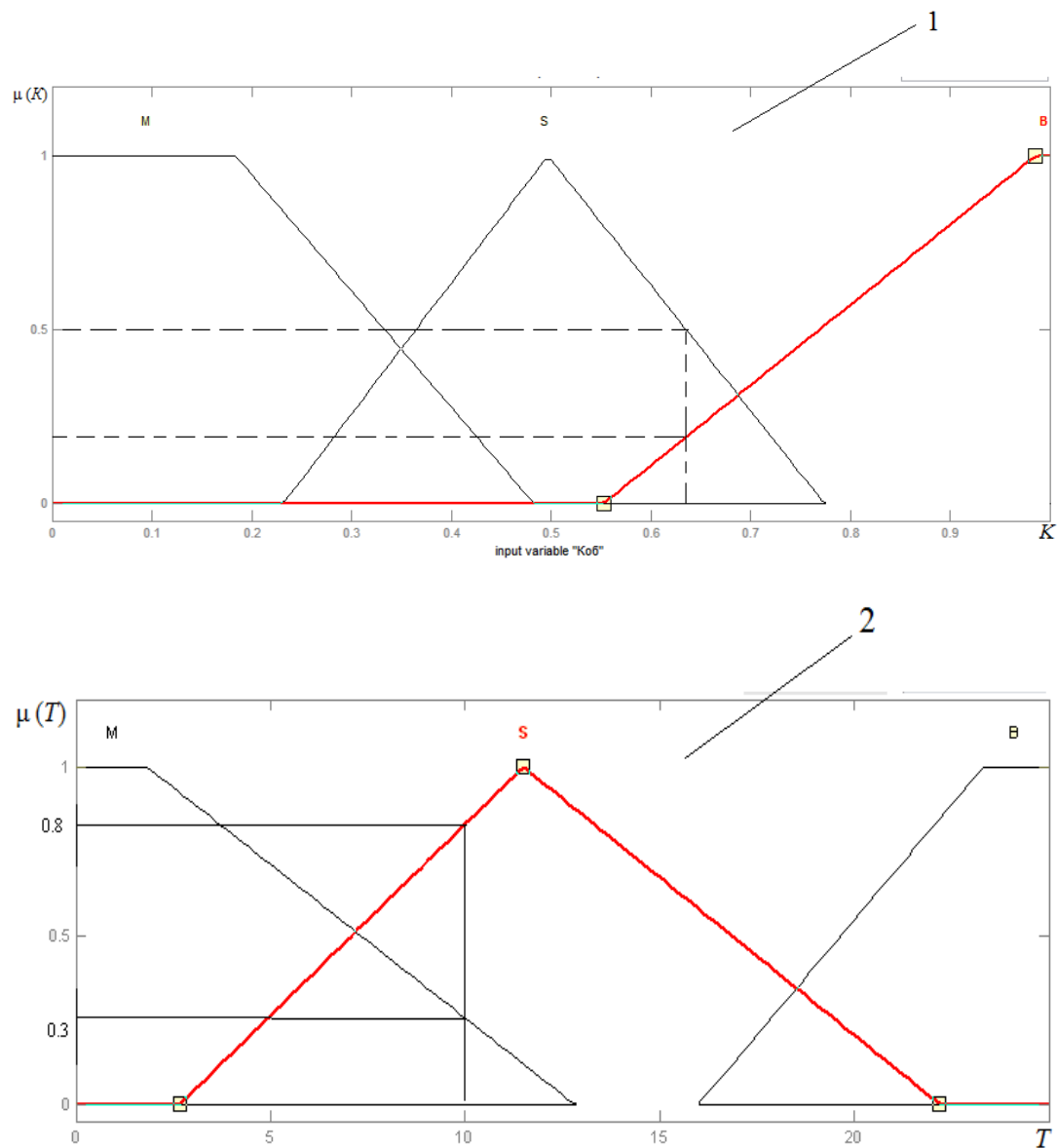


Рис. 4.16. 1 – Функції приналежності лінгвістичної змінної (ЛП) «коефіцієнт посилення» з визначенням значень функцій приналежності: М – малий; S – середній; В – великий; 2 – функції приналежності ЛП «постійна часу» з визначенням значень ступеня істинності функцій приналежності М і S

З урахуванням того, що зважені значення ступенів істинності  $w_k$  ( $k=1,2$ ) розраховуються по  $\Gamma(1)$ , одержимо  $w^1 = \min(0,3; 0,5; 0,4) = 0,3$ ; по  $\Gamma(2)$  -  $w^2 = \min(0,8; 0,2; 0,6) = 0,2$ .

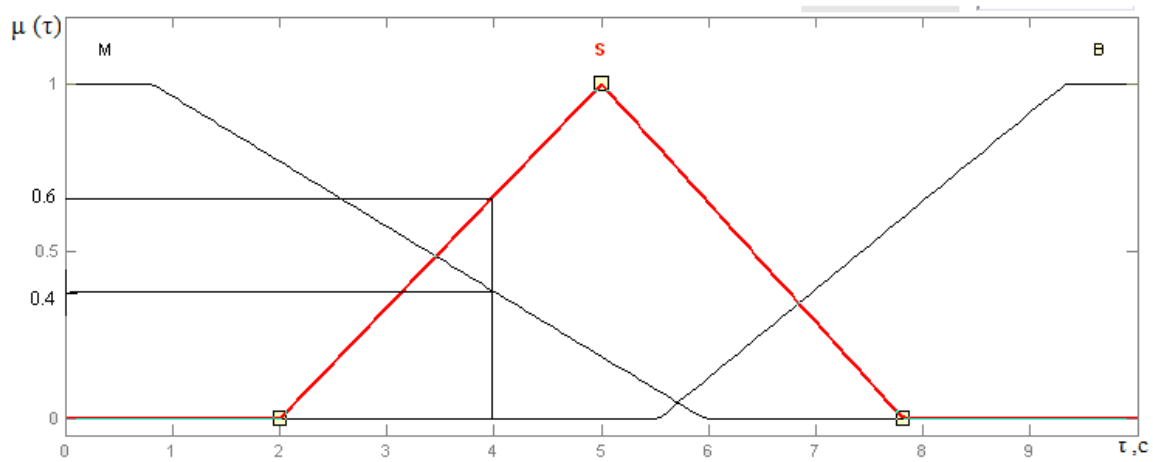


Рис. 4.17. Функції приналежності ЛП «запізнювання» з визначенням значень ступеня істинності функцій приналежності

```

1. If (Ko is in1mf1) and (T is in2mf1) and (zapazd is in3mf1) then (Ti is out1mf1) (1)
2. If (Ko is in1mf1) and (T is in2mf1) and (zapazd is in3mf2) then (Ti is out1mf2) (1)
3. If (Ko is in1mf1) and (T is in2mf1) and (zapazd is in3mf3) then (Ti is out1mf3) (1)
4. If (Ko is in1mf1) and (T is in2mf2) and (zapazd is in3mf1) then (Ti is out1mf4) (1)
5. If (Ko is in1mf1) and (T is in2mf2) and (zapazd is in3mf2) then (Ti is out1mf5) (1)
6. If (Ko is in1mf1) and (T is in2mf2) and (zapazd is in3mf3) then (Ti is out1mf6) (1)
7. If (Ko is in1mf1) and (T is in2mf3) and (zapazd is in3mf1) then (Ti is out1mf7) (1)
8. If (Ko is in1mf1) and (T is in2mf3) and (zapazd is in3mf2) then (Ti is out1mf8) (1)
9. If (Ko is in1mf1) and (T is in2mf3) and (zapazd is in3mf3) then (Ti is out1mf9) (1)
10. If (Ko is in1mf2) and (T is in2mf1) and (zapazd is in3mf1) then (Ti is out1mf10) (1)
11. If (Ko is in1mf2) and (T is in2mf1) and (zapazd is in3mf2) then (Ti is out1mf11) (1)
12. If (Ko is in1mf2) and (T is in2mf1) and (zapazd is in3mf3) then (Ti is out1mf12) (1)
13. If (Ko is in1mf2) and (T is in2mf2) and (zapazd is in3mf1) then (Ti is out1mf13) (1)
14. If (Ko is in1mf2) and (T is in2mf2) and (zapazd is in3mf2) then (Ti is out1mf14) (1)
15. If (Ko is in1mf2) and (T is in2mf2) and (zapazd is in3mf3) then (Ti is out1mf15) (1)
16. If (Ko is in1mf2) and (T is in2mf3) and (zapazd is in3mf1) then (Ti is out1mf16) (1)
17. If (Ko is in1mf2) and (T is in2mf3) and (zapazd is in3mf2) then (Ti is out1mf17) (1)
18. If (Ko is in1mf2) and (T is in2mf3) and (zapazd is in3mf3) then (Ti is out1mf18) (1)
19. If (Ko is in1mf3) and (T is in2mf1) and (zapazd is in3mf1) then (Ti is out1mf19) (1)
20. If (Ko is in1mf3) and (T is in2mf1) and (zapazd is in3mf2) then (Ti is out1mf20) (1)
21. If (Ko is in1mf3) and (T is in2mf1) and (zapazd is in3mf3) then (Ti is out1mf21) (1)
22. If (Ko is in1mf3) and (T is in2mf2) and (zapazd is in3mf1) then (Ti is out1mf22) (1)
23. If (Ko is in1mf3) and (T is in2mf2) and (zapazd is in3mf2) then (Ti is out1mf23) (1)
24. If (Ko is in1mf3) and (T is in2mf2) and (zapazd is in3mf3) then (Ti is out1mf24) (1)
25. If (Ko is in1mf3) and (T is in2mf3) and (zapazd is in3mf1) then (Ti is out1mf25) (1)
26. If (Ko is in1mf3) and (T is in2mf3) and (zapazd is in3mf2) then (Ti is out1mf26) (1)
27. If (Ko is in1mf3) and (T is in2mf3) and (zapazd is in3mf3) then (Ti is out1mf27) (1)

```

Рис. 4. 18. Графічний інтерфейс ТЛП розрахунку оптимального параметра ПІ-регулятора:  $K_o$  - коефіцієнт підсилення;  $T$  - постійна часу;  $zapazd$  - запізнювання;  $T_i$  - час інтегрування; mf1 - терм - безліч «низький»; mf2 - «середній»; mf3 - «високий»

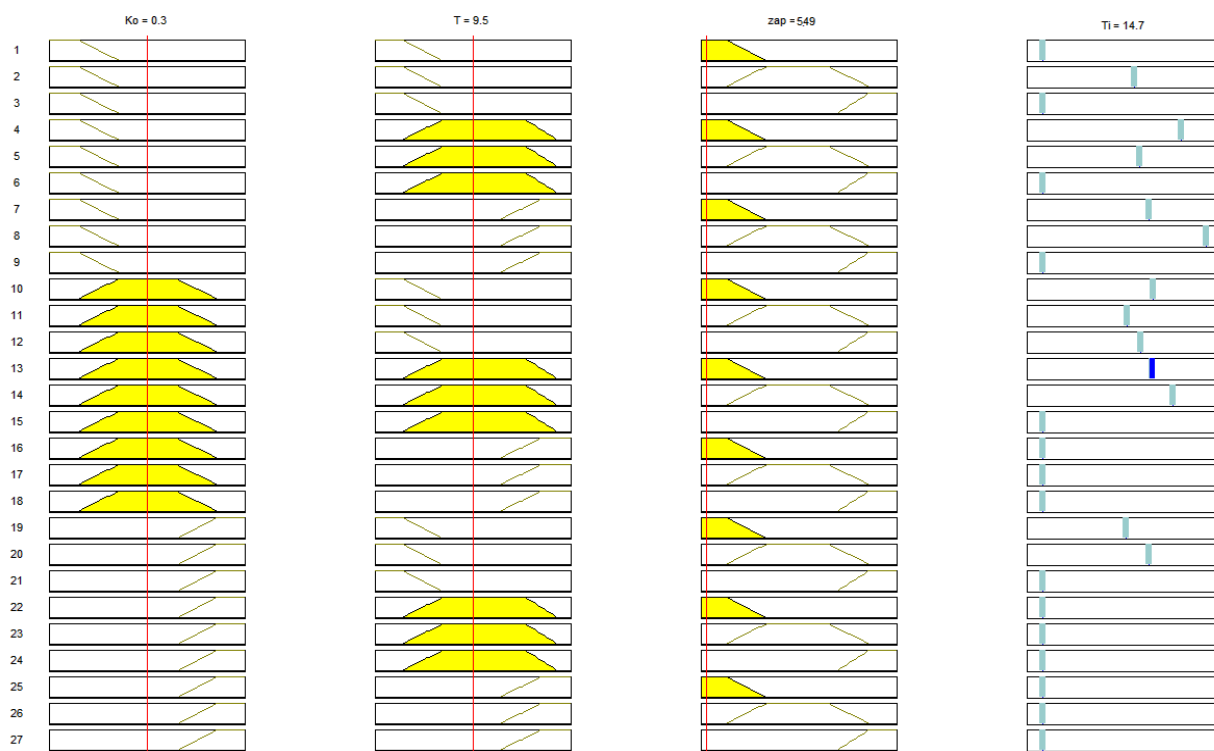


Рис. 4.19. Результат роботи системи нечіткого виведення по розрахунку  $T_i$ :  
при параметрах моделі  $K = 0,3$ ;  $T = 9,5$ ;  $\tau = 5,5$ ; безрозмірна настройка  
 $T_i = 14,7$

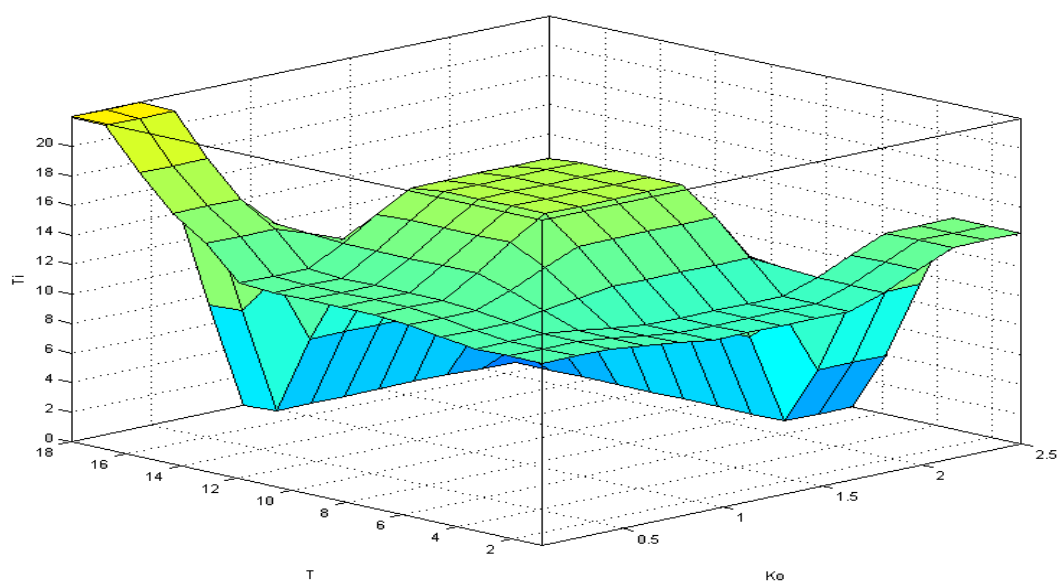


Рис. 4.20. Перегляд тривимірної поверхні системи нечіткого виведення НЕС

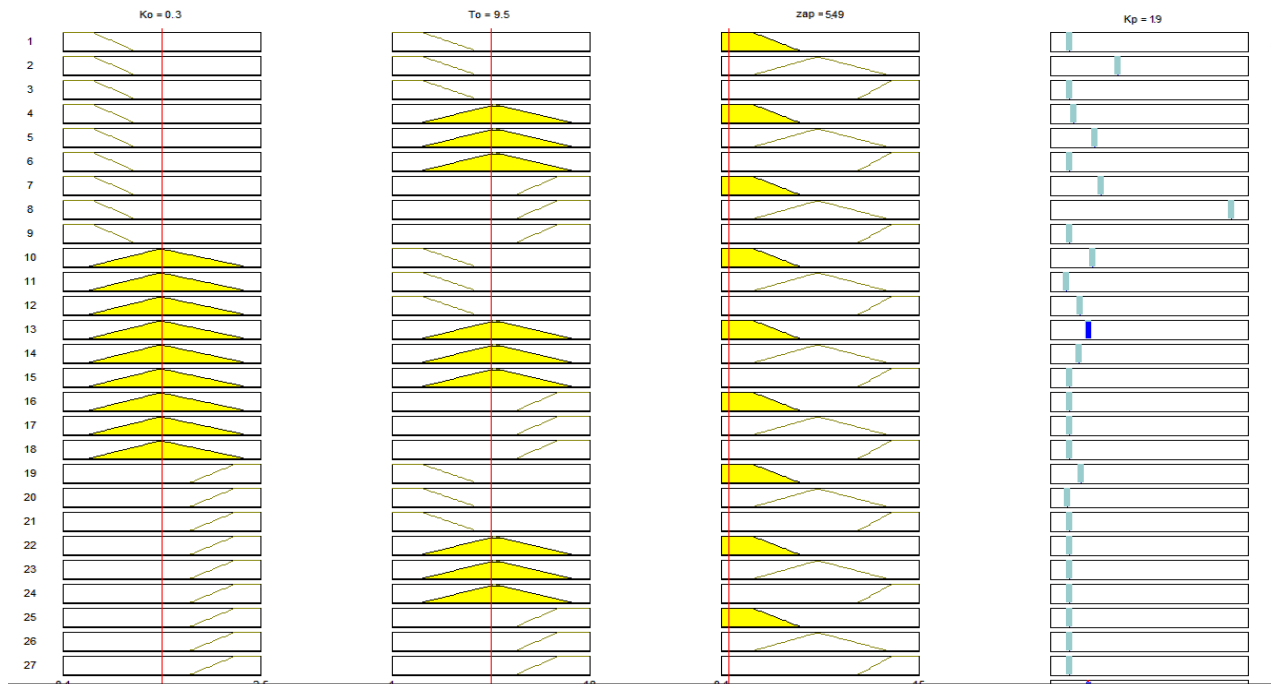


Рис. 4.21. Програма перегляду результату роботи нечіткої експертної системи (системи нечіткого виведення) за визначенням значення  $K_p$  при  $K = 0,3$ ;

$T = 9,5$ ;  $\tau = 5,5$ ; безрозмірна настройка  $K_p = 1,9$

Також згідно розрахункам и результатам  $\Gamma$  (1, 2), одержано:

$$K_p^1 = f(5; 0,65; 2) = 2,3; T_i^1 = f(5) = 3; K_p^2 = f(5; 0,65; 2) = 3,8; T_i^2 = f(5) = 5.$$

Пропонована система управління є однією з варіантів нечіткого адаптивного ПІ-регулятора. З урахуванням рекомендацій [56, 140, 165] оптимальні адаптивні значення налаштувань ПІ-регулятора для САУ тиску пару склали:  $K_p = 2,9$ ;  $T_i = 3,8$ . Дані значення виставляються в регуляторі оператором або блоком адаптації, який реалізує класичний табличний метод [63].

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. 4.3.

Таблиця 4.3

## Значення параметрів регулятора рекомендовані НЕС

| Параметри моделі    |                        |          |            | Оптимальні параметри регулятора |       |
|---------------------|------------------------|----------|------------|---------------------------------|-------|
| навантаження<br>СПУ | $K$ , МПа/%<br>хода РО | $T$ , хв | $\tau$ , с | $K_p$                           | $T_i$ |
| 25 %                | 0,15                   | 5,0      | 2,8        | 0,7                             | 10,4  |
| 50 %                | 0,30                   | 9,5      | 7,0        | 1,9                             | 14,7  |
| 75 %                | 0,90                   | 18,0     | 9,0        | 2,2                             | 24,0  |

Для перевірки ефективності запропонованої нечіткої адаптивної САУ, виконано моделювання (рис. 4.22) в додатку Simulink (MatLab) [38]. 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 СПУ.

Щоб отримати установки для типового ПІ-регулятора розраховані по Г (1) і рекомендовані НЕС склали:  $K_p = 3,8$ ,  $T_i = 5$ . Порівняльний аналіз перехідних процесів регулювання експлуатаційних параметрів СПУ запропонованої і типовий САУ представлений на рис. 4.23.

Імітація перехідного режиму роботи суднового парового котла – зниження і зростання парової продуктивності на 2 т/год, також виконувалася в програмі Simulink [38], перехідні процеси нечіткої і традиційної адаптивних САУ представлена на рис. 4. 24.

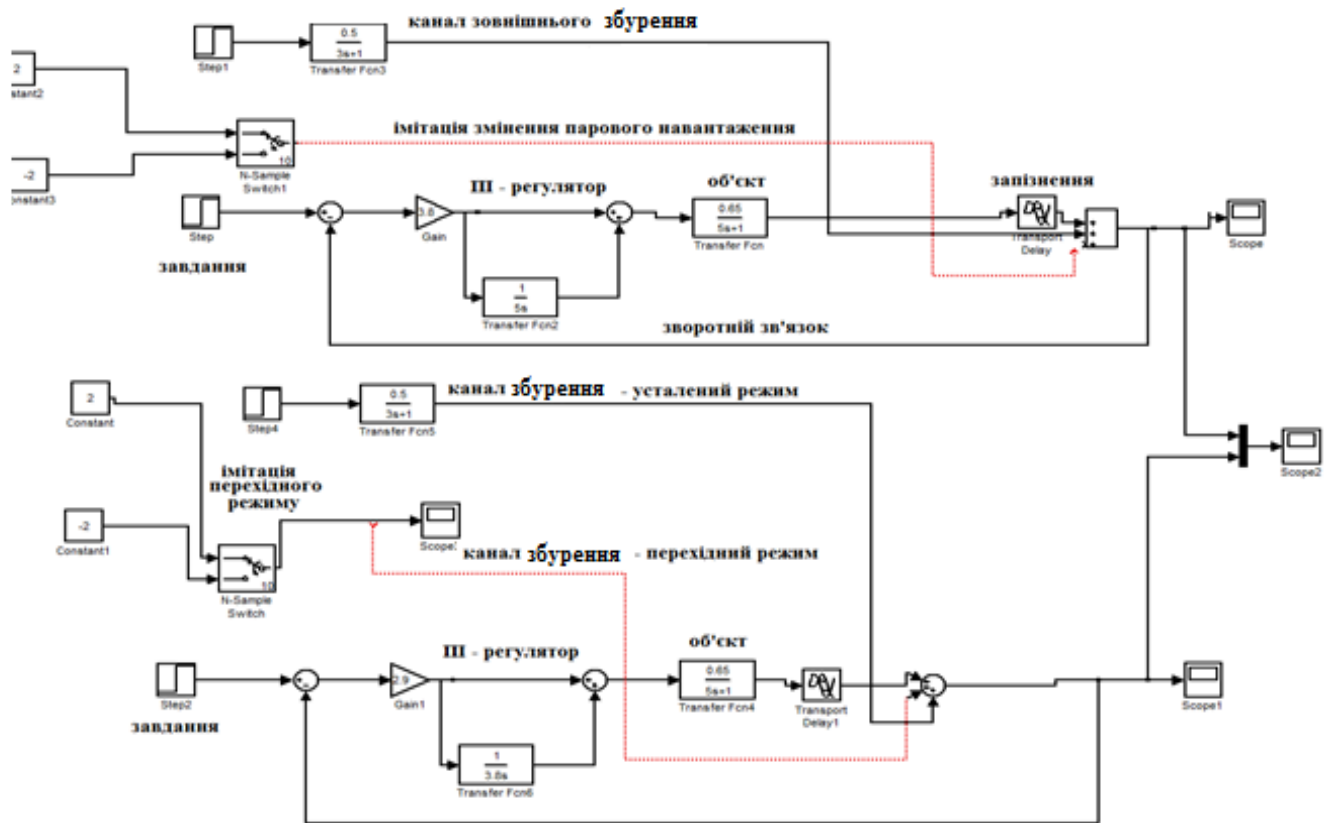


Рис. 4.22. Комп'ютерна модель САУ тиску пари в СПУ КАВ 1.6/7

Порівняльний аналіз показників якості перехідних процесів САУ тиску пари (див. рис. 4.23 – 4.24) із зоною нечутливості  $\Delta = 0,5 \%$ , демонструє, що використання нечіткої експертної системи, що реалізує алгоритм Тагакі-Сугено [221, 222], в процесах налагодження та експлуатації САУ СПУ дозволяє зменшити час регулювання  $T_p$  більш ніж в два рази в порівнянні з традиційною системою регулювання що дозволяє СПУ виходити на заданий тепловий режим з оптимальним часом.

Також, за допомогою використовуваних НЕС, відбувається економія часу (за результатами експерименту на процедури ідентифікації та оптимізації САУ в середньому до 40 хв) налагоджувального персоналу САУ параметрів СПУ. Таким чином, відбувається зменшення трудовитрат на наладку всій САУ СПУ, на прикладі парового котла обслуговується компанією «Южспецмонтаж», в

середньому на одну годину. Можна відзначити, що використання запропонованого універсального методу нечіткої адаптації судових САУ може бути успішно застосовується також для автоналагодження типових ПД і ПІД-регуляторів для всіх типів СПУ.

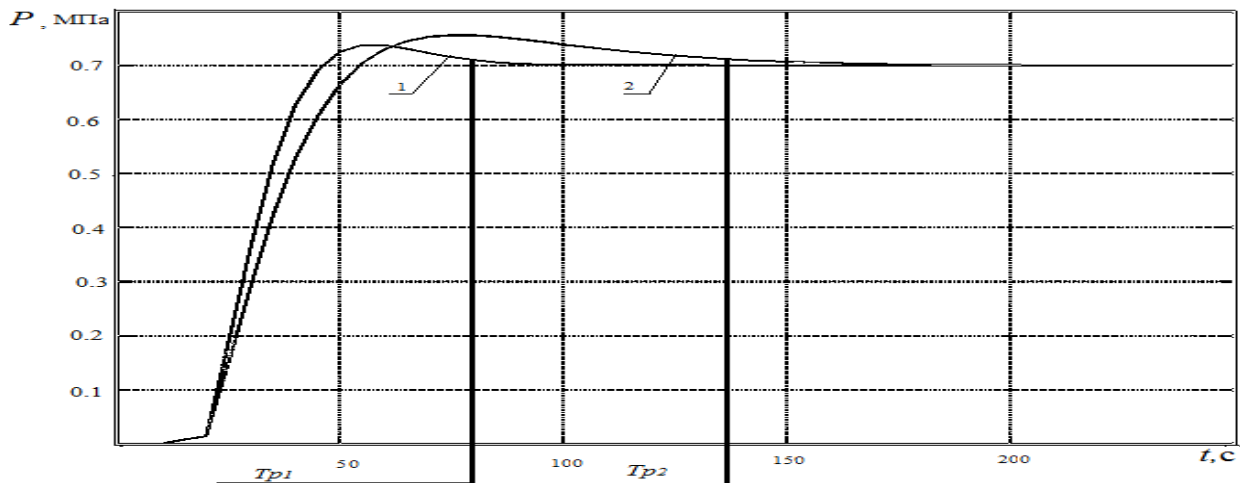


Рис. 4.23. Сталі процеси САУ тиску пари СПУ марки КАВ 1.6 / 7: отримані за допомогою: 1 - методу нечітких адаптивних налаштувань; 2 – табличного (CHR), при виході на номінальний тепловий режим;  $T_p$  – час регулювання

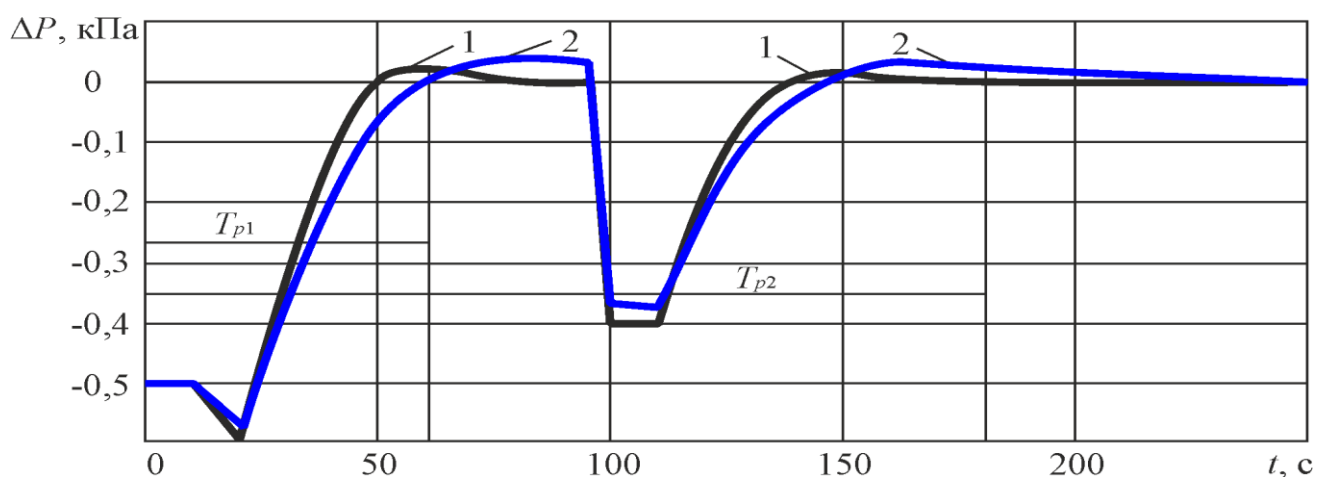


Рис. 4.24. Перехідні процеси демонструють відхилення тиску пари при зміні парового навантаження - зміні теплового режиму СПУ: 1 – нечітка адаптивна САУ; 2 – традиційна адаптивна САУ тиску пари яка реалізує табличний метод автонастройки

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

#### 4.3. Експертна система адаптації параметрів регуляторів з ідентифікацією показників експлуатаційних процесів СПУ

Досвід свідчить про те, що втручання оператора в процес налагодження та експлуатації СПУ може бути ефективним, якщо воно ґрунтується на детальному розумінні ситуації, що склалася на об'єкті управління. Таким чином, ефективна взаємодія "людина - експертна система" грає важливу роль не тільки в попередженні помилок персоналу, але і допомагає оператору в нештатній ситуації в процесах експлуатації складних суднових енергетичних установок.

Застосування математичного апарату оцінки достовірності даних в залежності від помилок дій операторів САУ в теплоенергетичних об'єктах, наведеного в [9], дозволяє скласти таблицю (табл. 4.4.). залежності помилок операторів від ступеня завантаженості та відсутності програмних засобів підтримки прийняття рішень, які реалізують, як правило, експертні системи, що засновані на знаннях і досвіді висококваліфікованих фахівців.

Для оптимізації САУ в умовах, коли очікувані критерії якості процесів експлуатації не відповідають встановленим, тобто близькі до передаварійного стану і зупинки СПУ, пропонується метод розробки експертної системи



адаптації. Проектована НЕС, реалізована в нечіткому адаптері, діє за алгоритмом І. Мамдані [206].

Таблиця 4.4

Відсоток помилок операторів в залежності від завантаженості

| Ступінь завантаженості оператора | Оцінка відсотка помилок оператора САУ парогенеруючих установок    |                                               |
|----------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
|                                  | Ручна операція виконання з перевіркою в експертній системі (СППР) | Ручна операція виконана без використання СППР |
| низька                           | (0,1 – 0,3 %)                                                     | (1 – 5 %)                                     |
| середня                          | (0,1 – 0,8 %)                                                     | (2 – 10 %)                                    |
| висока                           | (0,1 – 1 %)                                                       | (5 – 15 %)                                    |
| дуже висока                      | (0,3 – 1,5 %)                                                     | (10 – 30 %)                                   |

Для підвищення ефективності процедури адаптації САУ параметра СПУ запропонована структура (рис. 4.25), діюча за допомогою нечіткого адаптивного пристрою (нечіткого адаптера на базі нечіткого мікроконтролера марки Motorola 68HC12) [196].

Пропонований метод і його структура, на прикладі адаптації ПІ-регулятора в САУ тиску пара СПУ, моделюється в умовах імітації впливу каналів збурень у вигляді змін значень параметрів передавальних функцій об'єкта по каналах управління і зовнішнього збурення).

Запропонований метод розробки НЕС до коригування параметрів настройки ПІ-регуляторів у процесі адаптації та оптимізації к умовам експлуатації, використовує ТЛП для нечіткого адаптера у вигляді наступних лінгвістичних правил [103,104,154]:

- якщо перехідний процес характеризується слабкою коливальністю (або відсутністю такої), але великою тривалістю, то настройку  $K_p$  регулятора слід збільшувати, а налаштування  $T_i$  зменшувати;

- якщо перехідний процес носить сильно виражений коливальний характер, то  $K_p$  повинен бути зменшений тощо.

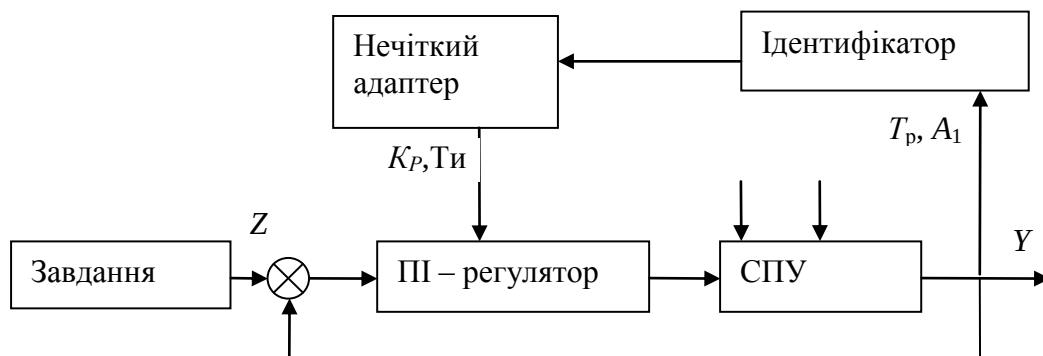


Рис. 4.25. Структура нечіткої адаптації САУ СПУ:

$N$  – зовнішні збурення;  $Z$  – завдання;  $T_p$  – час регулювання;  $A_1$  – перша амплітуда перехідного процесу;  $Y$  – вихідне значення;  $K_p$  – коефіцієнт пропорційності;  $T_i$  – постійна інтегрування (настройки ПІ-регулятора)

Для проведення моделювання допускається, що структура передаточної функції об'єкта (суднового утилізаційного парогенератора фірми Лаваль по каналу «витрата газів – тиск пару» складається з декількох аперіодичних ланок із запізненням виду:

$$W(s) = \frac{K}{(T(s) + 1)^n} e^{-\tau(s)},$$

зі значеннями, що змінюються протягом часу, в певному діапазоні (до 60 %), випадковим чином в залежності від навантаження агрегатів СЕУ.

Утилізаційний парогенератор «Лаваль 8.5» по каналу управління «витрата випускних газів дизеля - тиск пару в турбогенератор», має математичну модель у вигляді передаточної функції, отриманої у другому розділі.

На рис. 4.26 представлена схема утилізації теплоти великотоннажного танкера (дедвейт до 250 тис. тон), паропродуктивність кожного двоконтурного водотрубного котла - 50 т/год, робочий тиск 2.2 МПа; паропродуктивність утилізаційного котла 8.5 т/год, робочий тиск) – 7 МПа. Утилізаційна суднова парогенеруюча установка шведської фірми «Лаваль 8.5» з температурою пару 320 °С [40].

Відомо, що регулювання параметрів СПУ може виконується безперервним, позиційним і комбінованим способом. Безперервне регулювання використовують в СПУ, як правило, з середньою і великою продуктивністю пару, а також в ДПК, що забезпечують паром турбогенератор, для стійкої роботи якого тиск пару має підтримуватися постійним. Позиційне регулювання використовують в ДПК і КПК, які виробляють пар для загальносуднових і експлуатаційних потреб судна, де допустима зміна тиску пару в відносно широких межах. В таких схемах при досягненні верхнього заданого тиску пару в котлі САУ припиняє процес паливоспалювання, і відбір пару здійснюється за рахунок теплоти, акумульованої в пароводяному об'ємі СПУ до тих пір, поки тиск пару не досягне нижнього заданого значення.

Після цього САУ здійснює пуск СПУ і забезпечує його роботу до тих пір, поки тиск пару не досягне верхнього заданого значення. Комбіноване управління поєднує в собі позиційний і безперервний принципи і використовується, як правило, в САУ КПК, в якій позиційний алгоритм використовується в області малих навантажень КПК, а безперервний при навантаженнях від 25 – 100 % [153].

Використовуючи метод настройки САУ, який реалізує комбінований алгоритм з встановленим показником коливальності  $M = 1,55$  розраховані параметри ПІ-регулятора тиску пару в КПК марки «Лаваль 8.5».

Апробація налаштувань (параметрів регулятора) проведена в програмі MatLab (Simulink) (див. рис. 4.27). Для перевірки робастності типовий САУ

тиску пару – вводиться фактор невизначеності (додавання каналу зовнішнього збурення – вплив парового навантаження турбіни, вираженого у вигляді:

$$W_{N-y}(s) = \frac{1,5}{(3,9(s) + 1)},$$

і збільшення значень параметрів об'єкту на 60 % – зміна температури вихідних газів суднового головного двигуна в виді:

$$W_{z-y}(s) = \frac{0,65}{(7(s) + 1)^3} e^{-0,52(s)}.$$

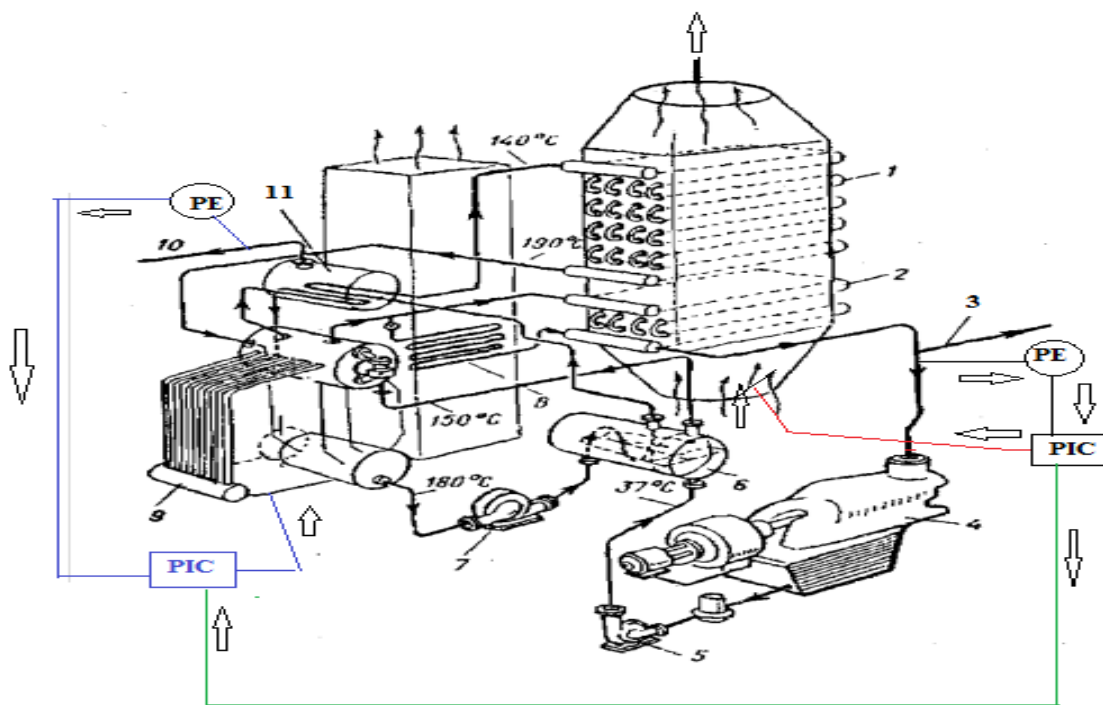


Рис. 4.26. Схема системи утилізації теплоти великотоннажного танкера (дедвейт 250 тис. Т): 1 – пароутворювача секція утилізаційного котла; 2 – пароперегрівач КПК; 3 – трубопровід підведення пару до споживачів; 4 – турбогенератор; 5, 7 – поживний і циркуляційний насоси; 6 – підігрів живильної води; 8 – пароперегрівач; 9 – водотрубний котел на рідкому паливі; 10 – трубопровід підведення пару низького тиску до споживачів; 11 – парогенератор низького тиску; РЕ-датчик тиску пару; PIC-регулятори тиску пару з вбудованим нечітким адаптером на базі мікроконтролера Motorola 68HC12

Процеси САУ тиску пари на виході УПК показані на рис. 4.28. Аналіз виду процесів (див. рис. 4.28) показує, що показники якості САУ при впливі каналів збурення (див. процес 2) погіршилися, об'єкт знаходиться на кордоні області стійкості і ПІІ-регулятор необхідно адаптувати під нові умови роботи СПУ.

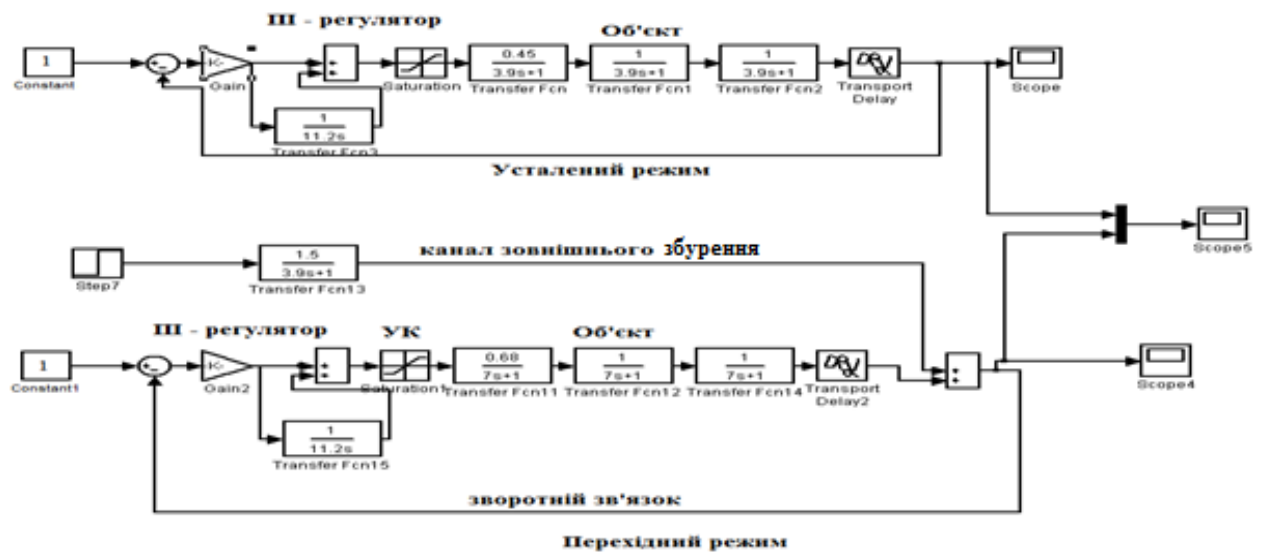


Рис. 4.27. Моделювання САУ тиску пари СПУ «Лаваль 8.5»

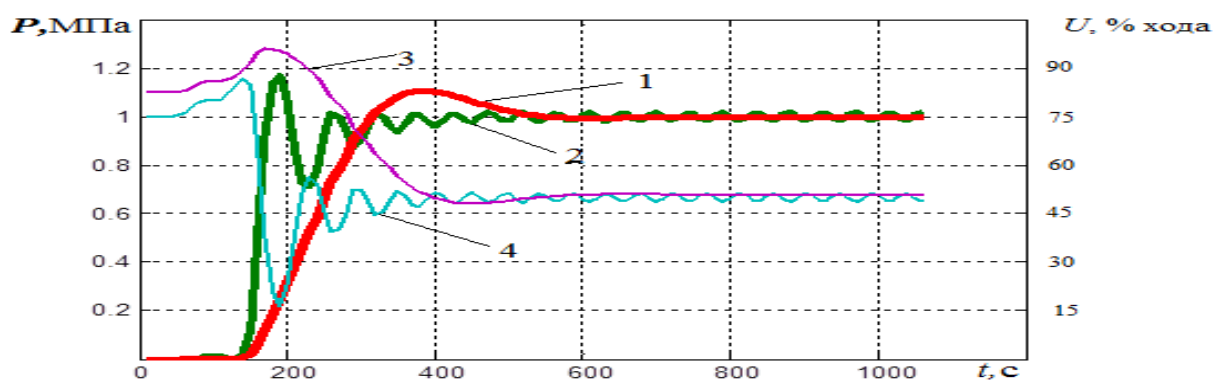


Рис. 4.28. Процеси управління: 1 – САУ тиск пари при роботі УПК Лаваль з паропроодуктивністю 2 т/год в сталому режимі; 2 – САУ тиску в СПУ Лаваль, працюючому в динамічному режимі з переходом на паропроодуктивність на 8 т/год при впливі каналу зовнішнього збурення; 3 – управляючий вплив ( $U$ ) першої САУ (№ 1); 4 – управляючий вплив другої САУ (№ 2)

При розробці нечіткої моделі (нечіткого адаптера) в середовищі MatLab (FLT) приймемо два входи – «перша амплітуда», «час регулювання» і два виходи – «коефіцієнт пропорційності», «час інтегрування». При розробці етапу фазифікації вихідних і вихідних параметрів нечіткої системи використовуються функції приналежності  $Z$  і  $S$ -образного виду [75, 98, 164]. Визначено нечіткі множини і універсум вхідних і вихідних параметрів, нечіткі множини описані за допомогою лінгвістичних змінних (ЛП) і виражені аналітичним методом за такими формулами  $Z$  і  $S$ -образних функцій відповідно:

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

де  $a$  і  $b$  – деякі числові параметри, приймаючі визначені дійсні значення і впорядковані відношенням  $a > b$ .

В якості метода дефазифікації вибраний метод центру тяжіння:

$$K_p = \frac{\sum_{i=1}^n K_{p_i} \mu(K_{p_i})}{\sum_{i=1}^n \mu(K_{p_i})}; \quad T_i = \frac{\sum_{i=1}^n K_{p_i} \mu(T_{i_i})}{\sum_{i=1}^n \mu(T_{i_i})}.$$

База знань нечіткого адаптера (блоку адаптації чинного на базі мікроконтролера Motorola 68HC12), реалізована в програмі MatLab (FLT) і представлена в табл. 4.5. У таблиці представлені наступні позначення: М – мале; S – середнє; В – велике.

Вікно результатів роботи нечіткого адаптера при вхідних значеннях  $A_1 = 0,1$  і  $T_p = 500$  с, визначених ідентифікатором по перехідному процесу, рекомендує настройки ПІ-регулятора САУ тиску пари КПК:  $K_p = 1,58$ ,  $T_i = 19,4$  (рис. 4.29 процес 1).

Таблиця 4.5

## База знань нечіткого адаптеру

|                                                                                    |
|------------------------------------------------------------------------------------|
| IF ( $A_1$ is $M$ ) and ( $T_p$ is $M$ ) then ( $K_p$ is $S$ )( $T_I$ is $S$ ) (1) |
| IF ( $A_1$ is $M$ ) and ( $T_p$ is $B$ ) then ( $K_p$ is $S$ )( $T_I$ is $B$ ) (1) |
| IF ( $A_1$ is $B$ ) and ( $T_p$ is $M$ ) then ( $K_p$ is $M$ )( $T_I$ is $S$ ) (1) |
| IF ( $A_1$ is $B$ ) and ( $T_p$ is $B$ ) then ( $K_p$ is $B$ )( $T_I$ is $B$ ) (1) |
| IF ( $A_1$ is $S$ ) and ( $T_p$ is $S$ ) then ( $K_p$ is $B$ )( $T_I$ is $S$ ) (1) |

Для верифікації нечіткої бази знань (експертної системи) проводилася перевірка ефективності роботи адаптера при допустимих показниках якості  $A_1 = 0,11$ ,  $T_p = 500$  с, визначених за перехідним процесом. Результат роботи адаптера САУ (розрахунок оптимальних настроюваних параметрів ПІ-регулятора) тиску пару на виході КПК показаний на рис. 4.29 - 4.30.

При апробації рекомендованих НЕС налаштувань ПІ-регулятора (див. рис. 4.29) отримані перехідні процеси на рис. 4.31. Як видно з рис. 4.31 процеси задовольняють необхідним показниками і процес 1 відрізняється поліпшеними характеристиками  $A_1 = 0,1$ ,  $T_p = 350$  в порівнянні з процесом 1 на рис. 4.28. Процес 2 (див. рис. 4.30) є стійким і відповідає необхідним показникам в порівнянні з процесом 2 (див. рис. 4.28) САУ тиску пару.

Таким чином, виходячи з результатів проведених експериментів, можна стверджувати, що використання методу по розробці нечіткого адаптера є ефективним засобом в пасивної адаптації типової САУ параметрів СПУ, що функціонує в специфічних суднових умовах.

Аналіз результатів моделювання (див. рис. 4.31) демонструє скорочення часу регулювання в два рази при досягненні оптимального (мінімально допустимого) і відсутність закидання.

Запропонований метод побудови адаптивного ПІ-регулятора з нечіткою експертною системою дозволяє виключити з процесу налагодження САУ етап

активної ідентифікації параметрів об'єкта СПУ і пов'язані з ним активні методи, засновані на внесенні додаткових впливів (збурень) в канал управління [138 – 140].

Використання запропонованого методу на етапах налагодження нової або модернізованої судновий САУ об'єктів СПУ дозволяє скоротити час на визначення математичної моделі об'єкта і розрахунку оптимальних настроювальних параметрів типових регуляторів. Також метод дозволяє виключити помилки налагодження САУ за попереднім аналізом при налагодженні парогенератора ГМ - 50 фахівцями компаній "Южспецмонтаж" що виникають в процесах настройки в силу впливу «людського фактора» на 25 %, та скоротити трудомісткість на виконання налагоджувальних робіт контурів САУ СПУ. Аналогічні показники роботи експертної системи для процесів налагодження та адаптації САУ СПУ були отримані і при ходових випробуваннях на парових котлах КАВ танкера " механік Хачепурідзе" у ПРАТ «Дунайсудноремонт» місті Ізмаїл.

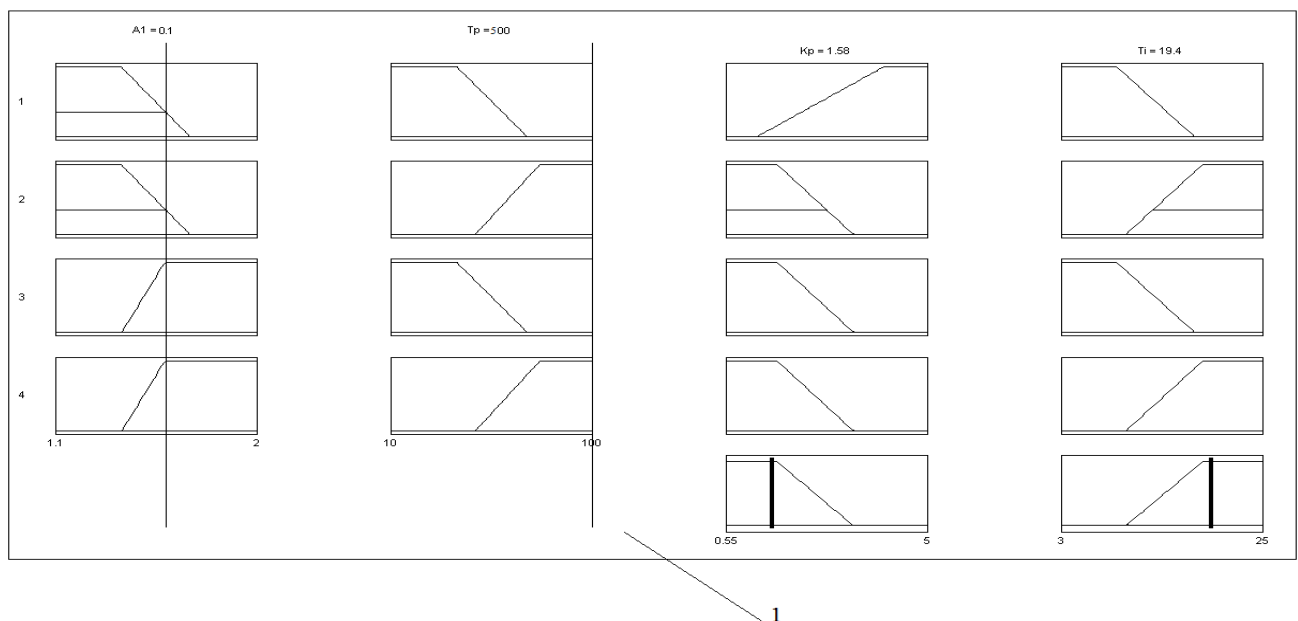


Рис. 4.29. Вікно результатів роботи нечіткого адаптера: 1 – задовільні показники якості ( $A$ ,  $T_p$ ) перехідного процесу САУ тиску пари УПК:  $A_1 = 0,1$ ,  $T_p = 500$ ;



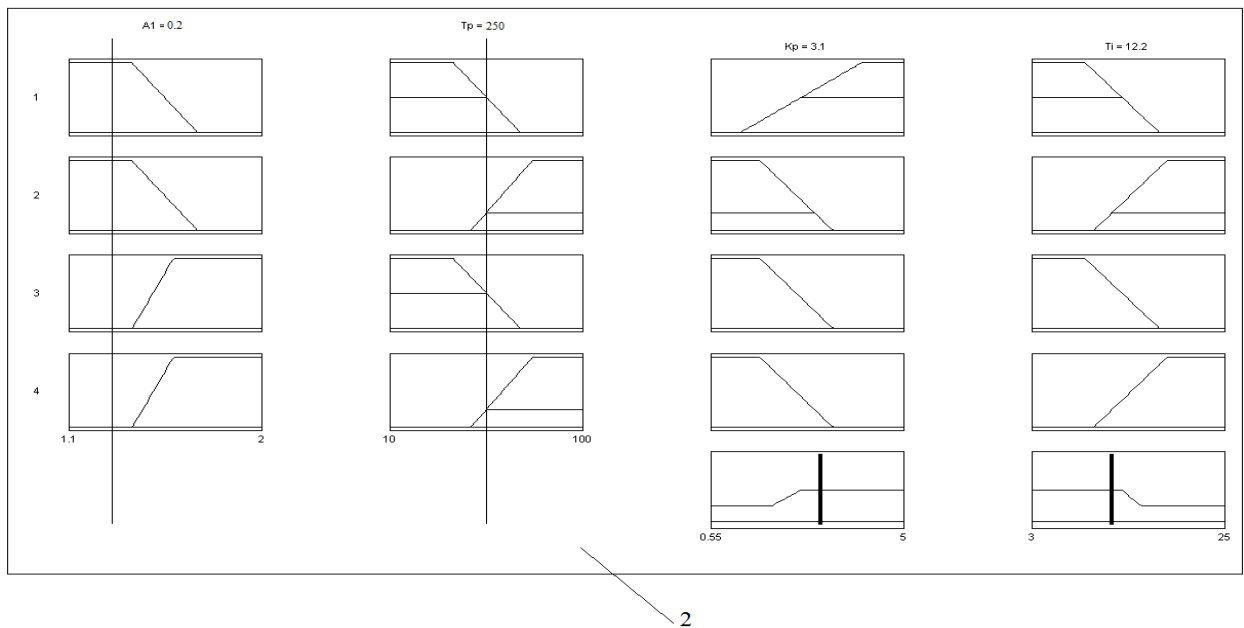


Рис. 4.30. Вікно результатів роботи нечіткого адаптера: 2 – незадовільні показники якості ( $A$ ,  $T_p$ ) перехідного процесу САУ тиску пари УПК  $A_1 = 0,2$ ;  $T_p = 250$  с;  $K_p = 3,1$ ;  $T_i = 12,2$

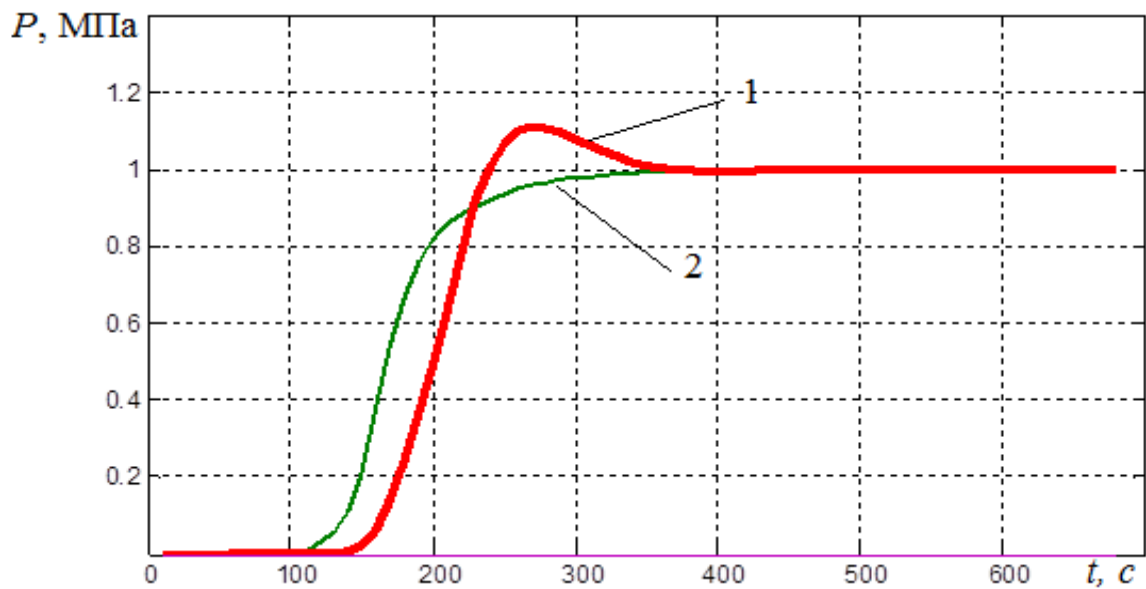


Рис. 4.31. Процеси управління: 1 – адаптивна САУ тиску в СПУ, працюючому в динамічному режимі з переходом на паропродуктивність 8 т/ч і впливу каналу зовнішнього збурення; 2 – адаптивна САУ тиску пари при роботі УПК Лаваль з паропродуктивністю 2 т/год в сталому режимі

#### 4.4. Нечітка апроксимація значень коефіцієнтів диференційних рівнянь СПУ

Представлено метод апроксимації теплових розрахункових коефіцієнтів диференційних рівнянь, що описують динаміку контрольованих параметрів СПУ за допомогою експертної системи (СППР). Як приклад, для реалізації запропонованого метода використовується рівняння (2.3), яке описує зміни концентрації кисню в димових газах  $C_{O_2}$  від змін витрат повітря  $M_L$  і палива  $B_T$ . Значення рівняння були отримані в ході попередніх розрахунків (див. табл. 2.3) і представлено в табл. 4.6:

$$T_2^{23} \frac{d^2 \Delta C_{O_2}}{dt^2} + T_1^{23} \frac{d \Delta C_{O_2}}{dt} + \Delta C_{O_2} = k_2^{23} \Delta M_L(t - \tau) + k_4^{23} \Delta B_T(t - \tau)$$

Таблиця 4.6

Вихідні дані рівняння для розробки СППР

| Навантаження від<br>номінального | 25 %  | 50 % | 75 %  |
|----------------------------------|-------|------|-------|
| $T_2^{23}$ , с                   | 64    | 36   | 25    |
| $T_1^{23}$ , с                   | 8     | 6    | 5     |
| $k_2^{23}$ , кг/ %               | 5,3   | 3    | 1,5   |
| $k_4^{23}$ , кг/с %              | -91,3 | -50  | -33,9 |

Першим етапом метода розробки нечіткої системи підтримки прийняття рішень при ідентифікації параметрів підсистем СПУ є визначення вхідних і вихідних змінних (рис. 4.32). На представленому нижче рисунку вхідним параметром НЕС є теплове навантаження СПУ, що визначається поточною витратою пару, а вихідними параметрами є розрахункові коефіцієнти досліджуваного рівняння динаміки.

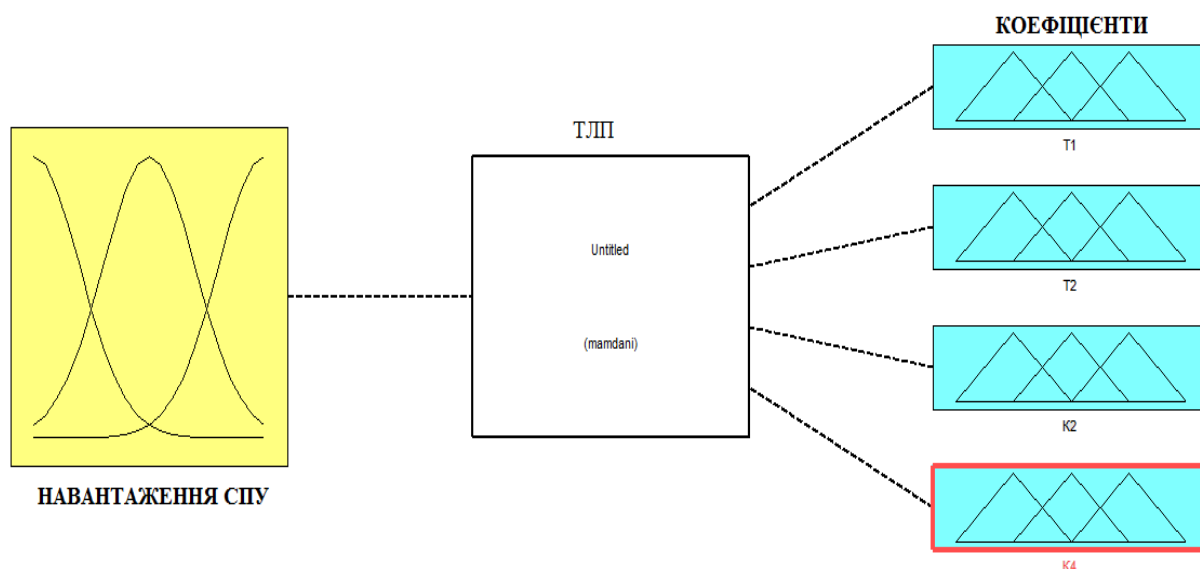


Рис. 4.32. Програмний інтерфейс, синтезований НЕС розрахунку теплових коефіцієнтів СПУ в залежності від теплового навантаження

Другим етапом являється процес фазифікації входу і виходів експертної системи (рис. 4.33 – 4.36).

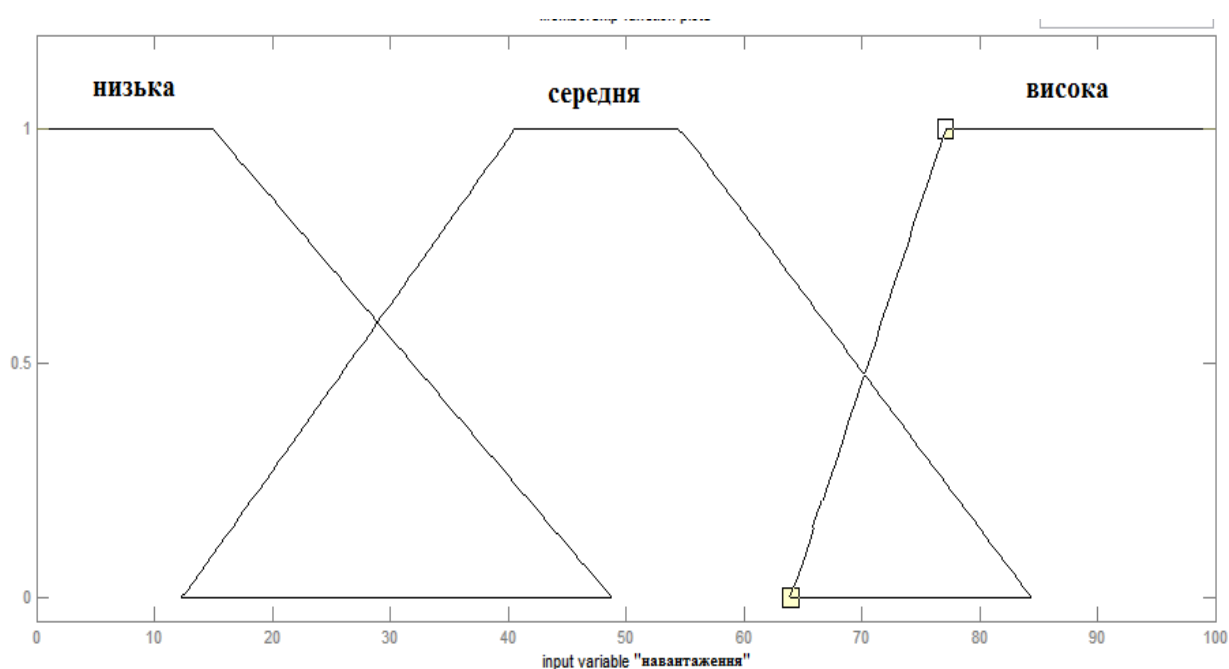


Рис. 4.33. Функції приналежності змінної « теплове навантаження СПУ»

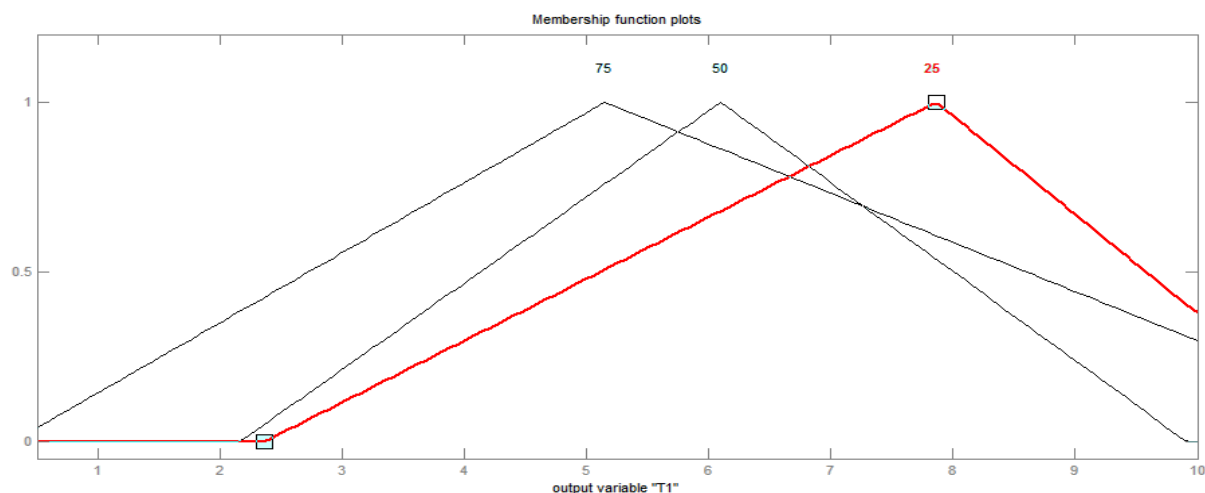


Рис. 4.34. Функції приналежності значень коефіцієнта  $T_1$

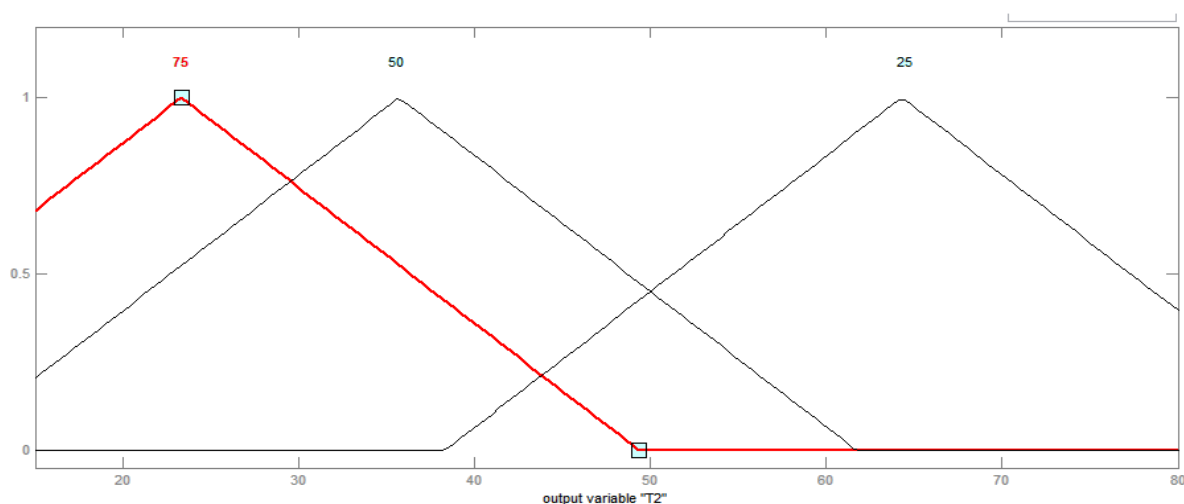


Рис. 4.35. Функції приналежності значень коефіцієнта  $T_2$

Решта коефіцієнтів також проходять етап фазифікації за допомогою трикутних функцій належності аналогічно ( дів. рис. 4.35).

На третьому етапі в пакеті MatLab [75] розробляється ТЛП за допомогою системи нечіткого виведення, яка реалізує алгоритм Сугено [221]. На наступному етапі проводиться перевірка адекватності СППР за допомогою порівняння значень розрахованих коефіцієнтів з табл. 4.5 і значень розрахованих програмою (рис. 4.37).

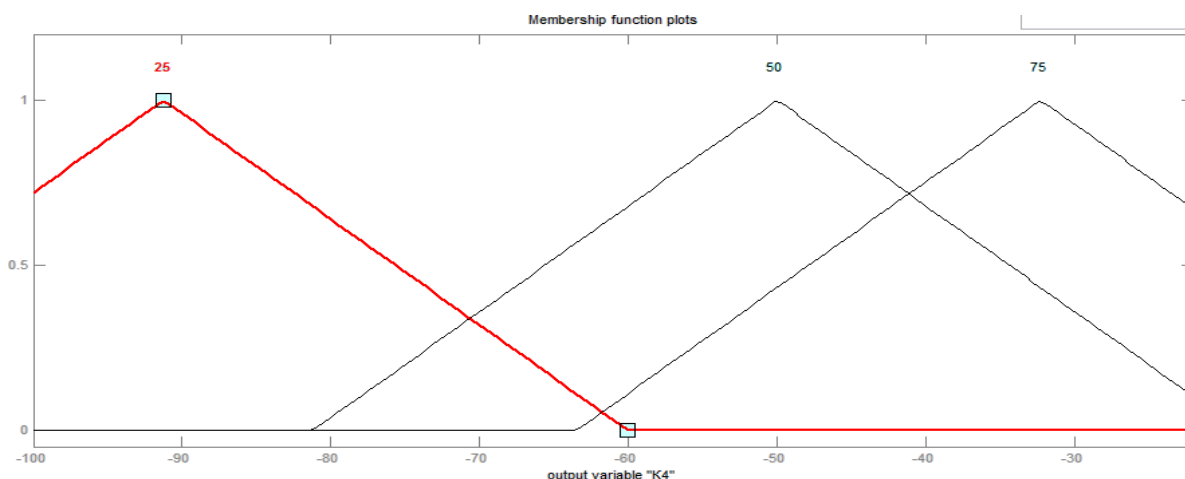


Рис. 4.36. Функції приналежності значень коефіцієнта  $K_4$

Верифікація СППР було перевірено також і на двох інших відомих режимах роботи, відхилення яких знаходиться в допустимих межах не більше 5 %. З урахуванням процедури інтерполяції нелінійних значень для режиму 35 % теплового навантаження запропонована нечітка СППР видає такі значень теплових коефіцієнтів (рис. 4.38).

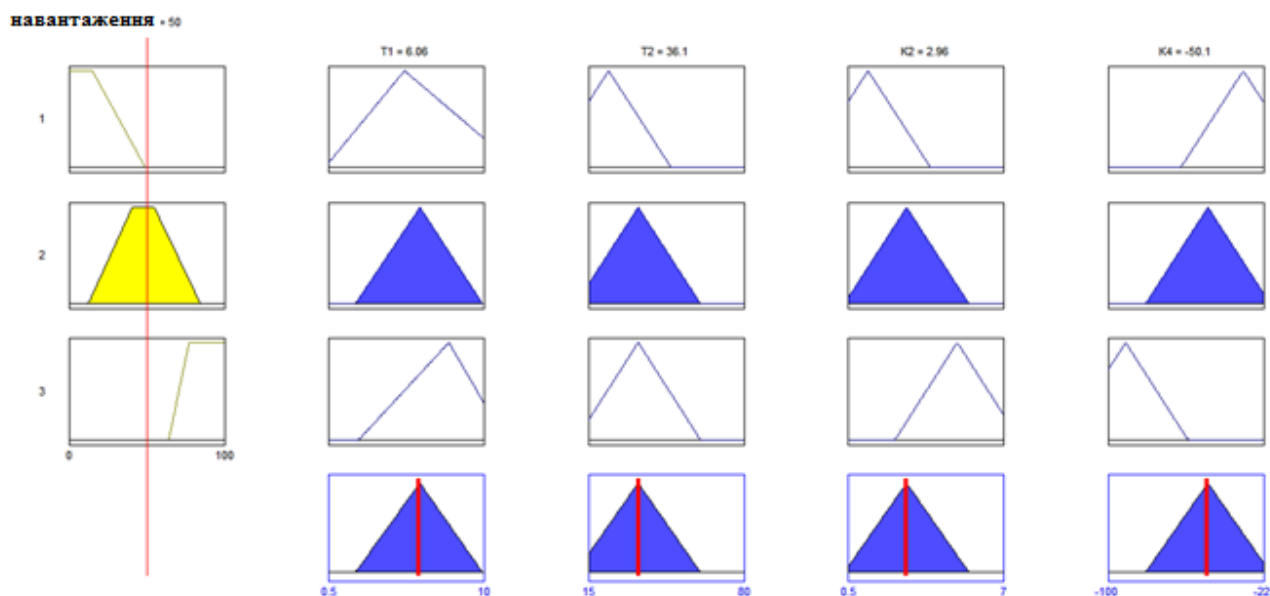


Рис. 4.37. Розрахунок значень коефіцієнтів рівняння (2.3) за допомогою СППР при тепловому навантаженні 50 %:  $T_1 = 6,06$ ;  $T_2 = 36,1$ ;  $K_2 = 2,96$ ;  $K_4 = -50,1$

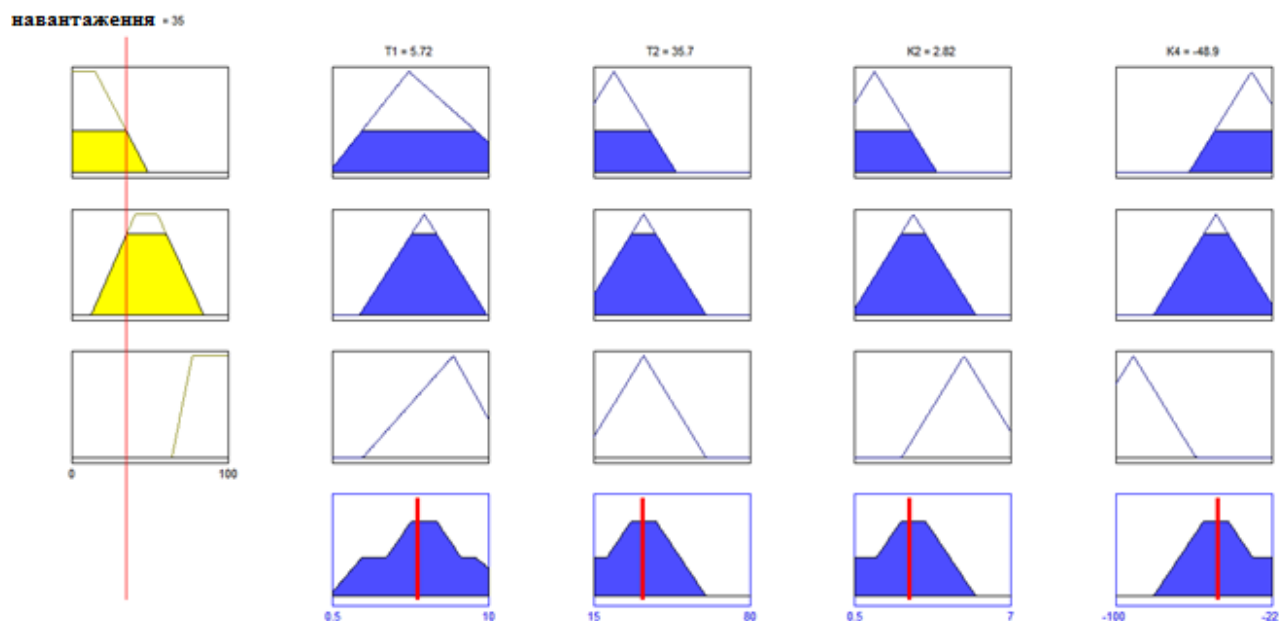


Рис. 4.38. Інтерфейс, що демонструє результати розрахунку НЕС теплового режиму СПУ, рівного 35 % від номінального

Визначені СППР розрахункові значення теплових коефіцієнтів (2.4) для трьох теплових режимів СПУ представлені в табл.4.7.

Таблиця 4.7

Значення теплових коефіцієнтів

| Навантаження від номінального | 17 %  | 35 % | 85 %  |
|-------------------------------|-------|------|-------|
| $T_2^{23}$ , с                | 64    | 36   | 25    |
| $T_1^{23}$ , с                | 8     | 6    | 5     |
| $k_2^{23}$ , кг/ %            | 5,3   | 3    | 1,5   |
| $k_4^{23}$ , кг/с %           | -91,3 | -50  | -33,9 |

Після підстановки значень (див. табл.4.7) в (2.3) одержали:

$$64 \frac{d^2 \Delta C_{O_2}}{dt^2} + 8 \frac{d \Delta C_{O_2}}{dt} + \Delta C_{O_2} = 5,3 \Delta M_L (t - 30) - 91,3 \Delta B_T (t - 30);$$

$$36 \frac{d^2 \Delta C_{O_2}}{dt^2} + 6 \frac{d \Delta C_{O_2}}{dt} + \Delta C_{O_2} = 3 \Delta M_L (t - 30) - 50 \Delta B_T (t - 30);$$

$$25 \frac{d^2 \Delta C_{O_2}}{dt^2} + 5 \frac{d \Delta C_{O_2}}{dt} + \Delta C_{O_2} = 1,5 \Delta M_L (t - 30) - 33,9 \Delta B_T (t - 30).$$

Таким чином, розроблен метод який дозволяє за допомогою СППР отримати значення теплових і гідравлічних коефіцієнтів для всіх робочих режимів роботи СПУ. Знання математичних моделей основних каналів СПУ дозволить визначити оптимальні параметри настройки для адаптивних регуляторів в САУ ключових процесів СПУ, а також провести додаткові дослідження динамічних процесів СПУ. Можна відзначити, що запропонований метод є універсальним для всіх типів СПУ.

#### 4.5. Висновки до розділу

1. Встановлено, що метод синтезу двоканального НЛК в САУ тиску пари в КПК здійснює підтримку заданого коефіцієнта надлишку повітря і стабілізацію тиску пара на всіх режимах теплового навантаження СПУ з поліпшеними показниками часу виходу на задане навантаження і відсутністю значних коливань експлуатаційних параметрів, що впливає на надійність роботи СПУ.

3. Доведено, що універсальна НЕС процесу ідентифікації параметрів математичних моделей підсистем СПУ (об'єктів управління). на прикладі САУ витрати палива, показала допустиму адекватність отриманих результатів. Це дозволяє спростити і прискорити процес налагодження, модернізації, адаптації і

технічної діагностики суднових парогенеруючих об'єктів широкого конструктивного класу.

4. Доведено, що універсальна НЕС процесу адаптації настроюваних параметрів регулятора в одноконтурной САУ СПУ продемонструвало а покращену адаптацію СПУ до експлуатаційних умов при зміні теплового режиму роботи. Своєчасне підтримання заданого тиску пари без значних відхилень сприяє зниженню аварійних ситуацій і уповільненню зростання хімічної корозії в елементах СПУ, тобто в цілому підвищенню надійності СПУ.

5. Встановлено, що метод синтезу НЕС процесу налагодження САУ СПУ, що реалізує аналіз показників якості процесів експлуатації, показало можливість досягнення встановлених показників в півтора рази швидше в порівнянні з типовою САУ. НЕС дозволяє досягти значного зменшення часу налагодження, приблизно, в два рази в порівнянні з традиційною методикою. Використання НЕС як програмного тренажера для фахівців з наладки суднових САУ знижує зростання помилкових дій операторів і наладчиків САУ СПУ, і підвищує надійність роботи СПУ в цілому до 25 %.

6. Запропоновано універсальний метод апроксимації розрахункових коефіцієнтів рівнянь динаміки параметрів всіх конструктивних типів СПУ, яка реалізує нелінійний алгоритм нечіткого виводу та демонструє високу ступінь адекватності експериментальних і теоретичних значень теплових коефіцієнтів. Метод дозволяє використовувати отримані рівняння в подальших дослідженнях властивостей СПУ з метою поліпшення їх конструктивних, екологічних і економічних характеристик.

7. Використання запропонованих методів в процесах розробки, налагодження і адаптації СПУ до умов експлуатації забезпечує досягнення високих експлуатаційних показників, що дозволяє стверджувати про їх ефективність запропонованої концепції розробки високоефективних САУ.



## РОЗДІЛ 5. РОЗРОБКА НЕЙРОМЕРЕЖЕВИХ САУ СПУ

### 5.1. Методологія синтезу нейромережєвих САУ СПУ

В даний час в найбільш поширені методології розробки САУ агрегатів СЕУ використовуються аналітичні моделі, які в процесі налагодження та подальшій експлуатації енергетичних об'єктів коригуються. З урахуванням перспективності розвитку методів теорії штучного інтелекту і початком їх впровадження в САУ автономних суднів найбільш доцільним видається спільне застосування нейронних мереж з математичними моделями, що отримано на стадії проектування СПУ. При цьому на початковому етапі експлуатації СПУ використовуються аналітичні моделі, які в подальшому коригуються нейронними мережами. Теоретичні моделі засновано на фізичних властивостях процесів, що протікають в СПУ і наближено описують існуючі взаємозв'язки всіх регульованих параметрів, а нейронна мережа вивчає і реалізує необхідні корективи в моделі, специфічні для певних режимів роботи СПУ і умов їх експлуатації. Даний підхід пропонується використовувати і для підвищення показників процесів експлуатації СПУ.

Відомо, що динамічні параметри характеристик СПУ, певні для початкового етапу пуску, сильно відрізняються від тих же параметрів, визначених для кінцевого етапу пуску або нормального режиму роботи. Наприклад, запізнювання по температурі пару по тракту парового котла по каналу регулюючого впливу значно більше, а коефіцієнти посилення  $K$  – менше в початковій стадії пуску порівняно з кінцем пуску і виходом на заданий режим роботи [56, 109]. У зв'язку з вище переліченим, необхідність застосування адаптивних інтелектуальних систем управління складними, багаторежимними парогенеруючими процесами (контурів регулювання СПУ) з функцією

апроксимації значень контрольованих параметрів, а також володіють властивістю самонавчання може бути доцільною.

Пропонована універсальна методологія розробки і налагодження інтелектуальних САУ СПУ, на прикладі САУ температури перегрітого пару, що надходить в СПТУ, будується на основі наступного алгоритму:

- визначення критеріїв ефективності запропонованих структур і методів управління об'єктами СПУ;
- проведення експерименту;
- накопичення і узагальнення отриманого результату;
- порівняння з діючими САУ;
- впровадження успішних теоретичних результатів в практику.

Методологія апробована на прикладі розробки та навчання гібридної мережі (ННМ) для визначення оптимальних значень параметрів ПІ-регулятора в САУ температури перегрітого пару при зміні навантаження об'єкта (перехідний режим роботи суднової парової турбіни) і наявності пускового режиму [102, 153]. На початковому етапі методології запропонована структура гібридної САУ з функцією адаптації для оптимального управління СПУ протягом всього часу експлуатації (рис. 5.1). Згідно висунутої гіпотези дана структура є ефективною для складних об'єктів СПУ.

Структура адаптивної настройки ПІ - контролера (регулятора), заснована на використанні активних частотних методів ідентифікації та визначенні оптимальних параметрів ПІ - контролера гібридної мережею. Застосування частотних методів дозволило забезпечити перешкодозахищеність алгоритму та раціонально організувати активний експеримент на діючій системі в плані підтримки області стійкості САУ СПУ.

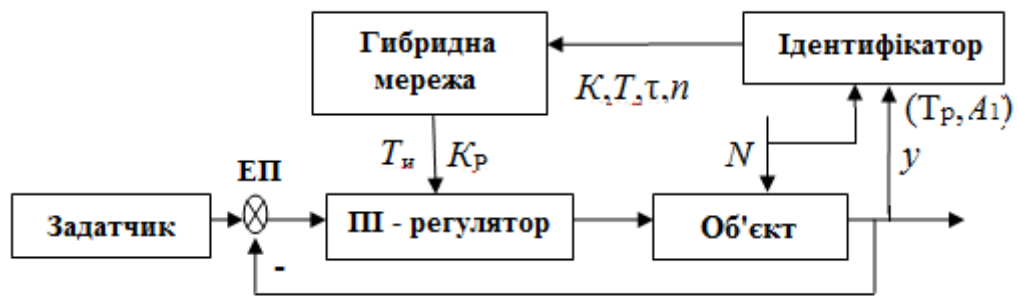


Рис. 5.1. Структура гібридної САУ параметрів СПУ:  $K$  – коефіцієнт посилення об'єкту;  $T$  – постійна часу об'єкта;  $\tau$  – запізнювання;  $n$  – порядок об'єкта;  $y$  – вихідний параметр;  $N$  – збурення; ЕП – елемент порівняння

Ідентифікація за допомогою комплексної частотної характеристики здійснювалася шляхом подачі на вхід системи двох синусоїдальних сигналів від генератора на відмінних між собою частотах, що належать до суттєвого діапазону [138]. Структура моделі об'єкта (пароперегрівача ДПК Mitsubishi MB 220) у вигляді передаточної функції по каналу «переміщення регулюючого органу витрати охолоджуючої води на пароохолоджувач» – «зміна температури перегрітої пари» складається з декількох інерційних ланок із запізненням зі значеннями, що змінюються в певному діапазоні в залежності від виду навантаження або режиму роботи парового котла [220, 235, 236]. Ідентифікатор визначає значення параметрів об'єкта і його порядок. Надалі дані значення використовуються оптимізатором у вигляді нейро-нечіткої мережі (див. рис. 5.2), що діє за алгоритмом Такагі - Сугено [222] для пошуку оптимальних значень параметрів ПІ - регулятора ( $K_p$ ,  $T_n$ ). Для визначення значень чотирьох невідомих параметрів об'єкта ( $K$ ,  $T$ ,  $\tau$ ,  $n$ ), пропонується використовувати розроблену в попередньому розділі НЕС ідентифікації.

Апробація запропонованої структури у вигляді методики з розробки та експлуатації інтелектуальної САУ проводилася для каналу управління «витрата конденсату - температура перегрітого пару» (рис. 5.2).

Перевищення розрахункової температури всього на 10 °С знижує довговічність металу в 2,5 рази. Більше 60 % пошкоджень СПУ зосереджені в пароперегрівальному тракті. Перегрів і коливання температури металу прискорюють мікроструктурні зміни, окислення, викликають розтріскування захисної оксидної плівки [127]. Підтримання температурного режиму перегрітої пари є важливим фактором безвідмовної роботи і довговічності металу труб пароперегрівачів СПУ, а також забезпечення високого ККД парової турбіни.

Приймалося допущення, що ідентифікатор визначив такі значення параметрів передатної функції досліджуваного об'єкта по каналу регулювання "витрата води на вприскування - температура перегрітої пари» згідно з отриманою у другому розділі моделі СПУ Mitsubishi MB. За допомогою методики [142], реалізованої в програмі MathCAD, були розраховані оптимальні значення параметрів ПІ - регулятора.

Для отримання тестової вибірки (другий етап методології) - матриці навчання нейро-нечіткої мережі значень оптимальних параметрів каскадного ПІ - контролера, було проведено моделювання в програмі MatLab (Simulink) з ручним коригуванням значень налаштувань  $K_p$  та  $T_n$ , значення параметрів передатної функції об'єкта змінювалися з урахуванням різних режимів роботи головного ДПК Mitsubishi MB 220 [144]. Результати експерименту представлені в табл. 5.1.

Таблиця 5.1

Оптимальні настройки ПП - регулятора для НМСАУ температури перегрітої пари  
СПУ Mitsubishi MB 220, що функціонує в діапазоні теплових навантажень від 10  
до 100 %

|             |      |      |       |       |       |       |       |      |       |       |
|-------------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|
| $K, C^0/\%$ | 0,5  | 1    | 5     | 15    | 5     | 12    | 4,43  | 7,05 | 11,9  | 13,7  |
| $T_{хв}$    | 10,5 | 13,1 | 13,9  | 14,3  | 14,5  | 14,7  | 15,48 | 16,5 | 17,6  | 18,4  |
| $\tau, хв$  | 0,5  | 1    | 1,5   | 1     | 0,5   | 0,5   | 0,92  | 0,5  | 0,5   | 0,7   |
| $K_p$       | 1,34 | 0,99 | 0,49  | 0,146 | 0,135 | 0,031 | 0,22  | 1,92 | 0,031 | 0,021 |
| $T_{и}$     | 1,91 | 5,55 | 40,63 | 20,4  | 1,92  | 1,58  | 6,61  | 0,10 | 1,58  | 3,55  |

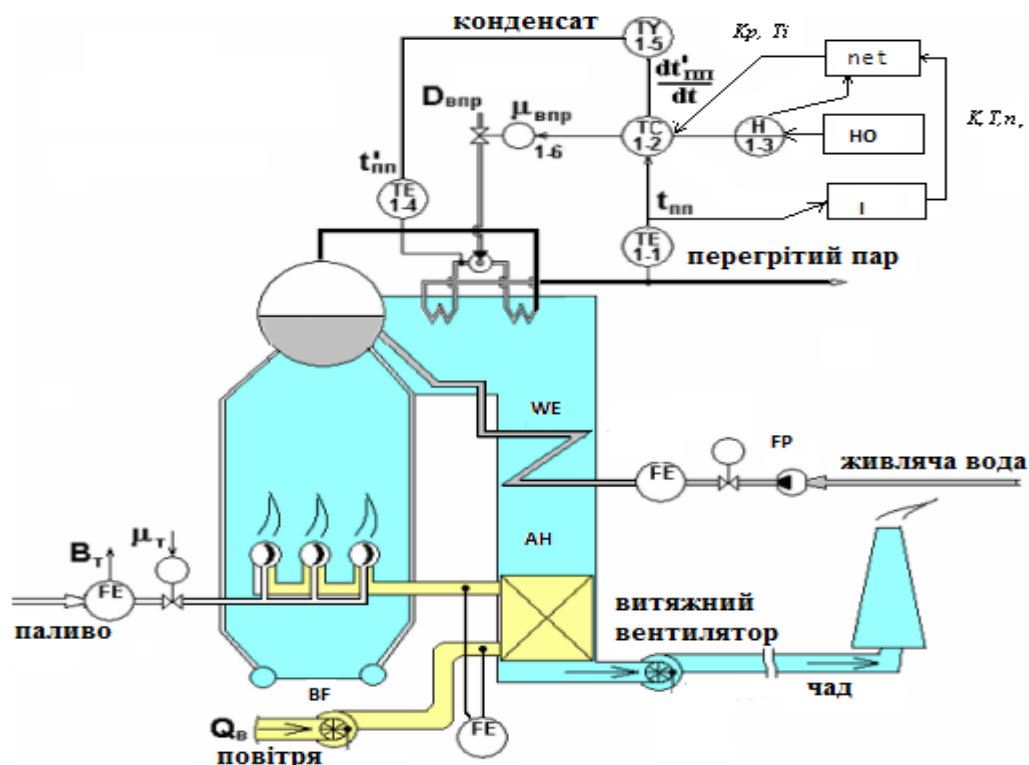


Рис. 5.2. Функціональна схема автоматизації СПУ з САУ температури перегрітої пари: I – ідентифікатор параметрів об'єкта; HO – задатчик (пульт); net – нейронна нечітка мережа;  $T_I$  – термopapa;  $T_C$  – регулятор температури перегрітого пару;  $T_Y$  – диференціатор;  $F_E$  – витратомір;  $\mu$  – керуючі впливи

У програмі Matlab (ANFIS) [75] проведена розробка адаптивної системи

нейро-нечіткого виведення (рис. 5.3) для апроксимації залежності, що представляє причинно-наслідковий зв'язок між параметрами моделі об'єкта:  $K$ ,  $T$ ,  $\tau$  і настроювальними параметрами регулятора:  $K_p$ ,  $T_u$ . (Третій етап запропонованої методології). Виходячи з рекомендацій [210] і експериментів в середовищі MatLab (Fuzzy Logic Toolbox) було обрано кількість (три) і тип функцій приналежності (трапецеїдальний і трикутний), що описують вхідні значення. В процесі навчання використано кількість циклів, що дорівнює 40, і обраний метод навчання - зворотного поширення помилки [12, 109]. Таким чином, гібридною мережею було реалізовано відображення параметрів ПП-регулятора по характеристикам об'єкту регулювання:

$$S^k = f(x^k) = f(x_1^k, x_2^k, \dots, x_n^k), k = 1, 2, \dots, N,$$

при наявності навчальної множини  $((x^1, y^1), \dots, (x^N, y^N))$ , (див. табл. 5.1).

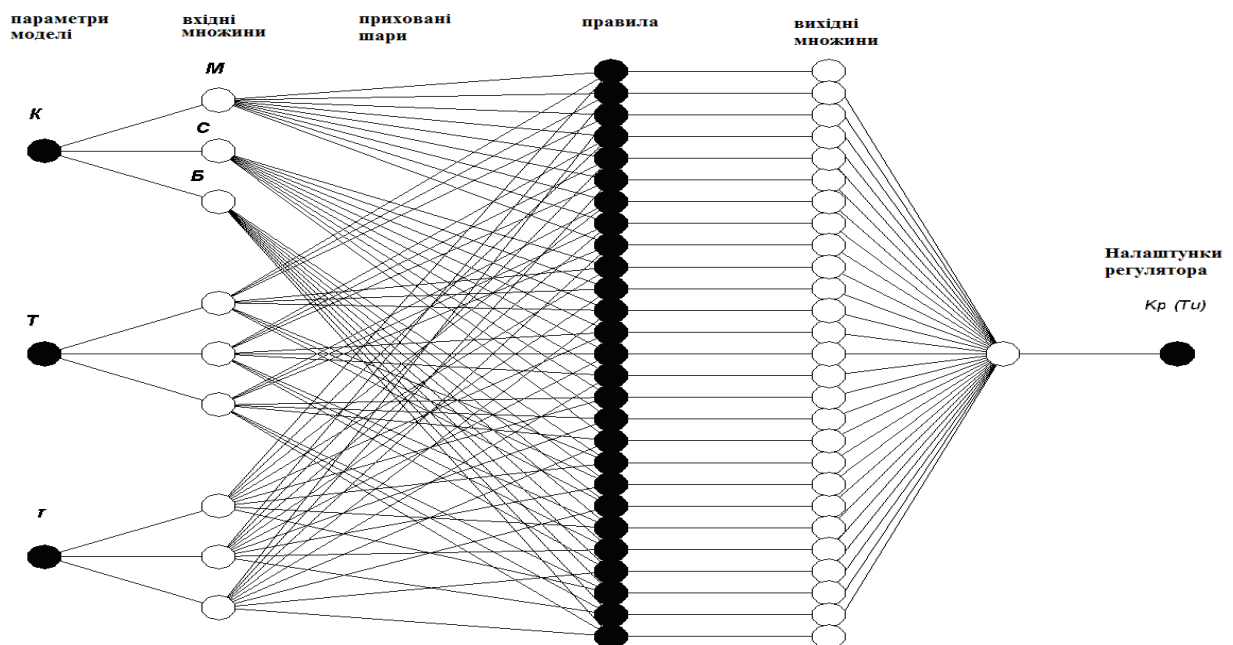


Рис. 5.3. Структура запропонованої гібридної мережі розрахунку оптимальних параметрів САУ температури перегрітого пару

Для моделювання функції  $f$  використовується алгоритм Сугено [221] з базою знань типу:  $\Pi_i$ : ЕСЛИ  $x_1 \in A_{i1}$  И  $x_2 \in A_{i2}$  И  $x_1 \in A_{in}$ , ТО  $T_{ui} = S_i$ ,  $i=1, 2, \dots, m$ , де  $A_{ij}$  –

нечіткі множини трикутної форми, що описують висловлювання експерта з налагодження САУ СПУ (мале (М), середнє (С), велике (В)),  $S_i$  – вихідні значення об'єкту. Ступень істинності  $\mu$  правила  $i$  визначається за допомогою операції кон'юнкції. Вихід нечіткої системи визначається методом центра тяжіння [75]:

$$T_{ик} = \frac{\sum_{i=1}^m \mu_i S_i}{\sum \mu_i}.$$

В процесі навчання ННМ використовувався гібридний метод з кількістю циклів 30 (рис. 5.4).

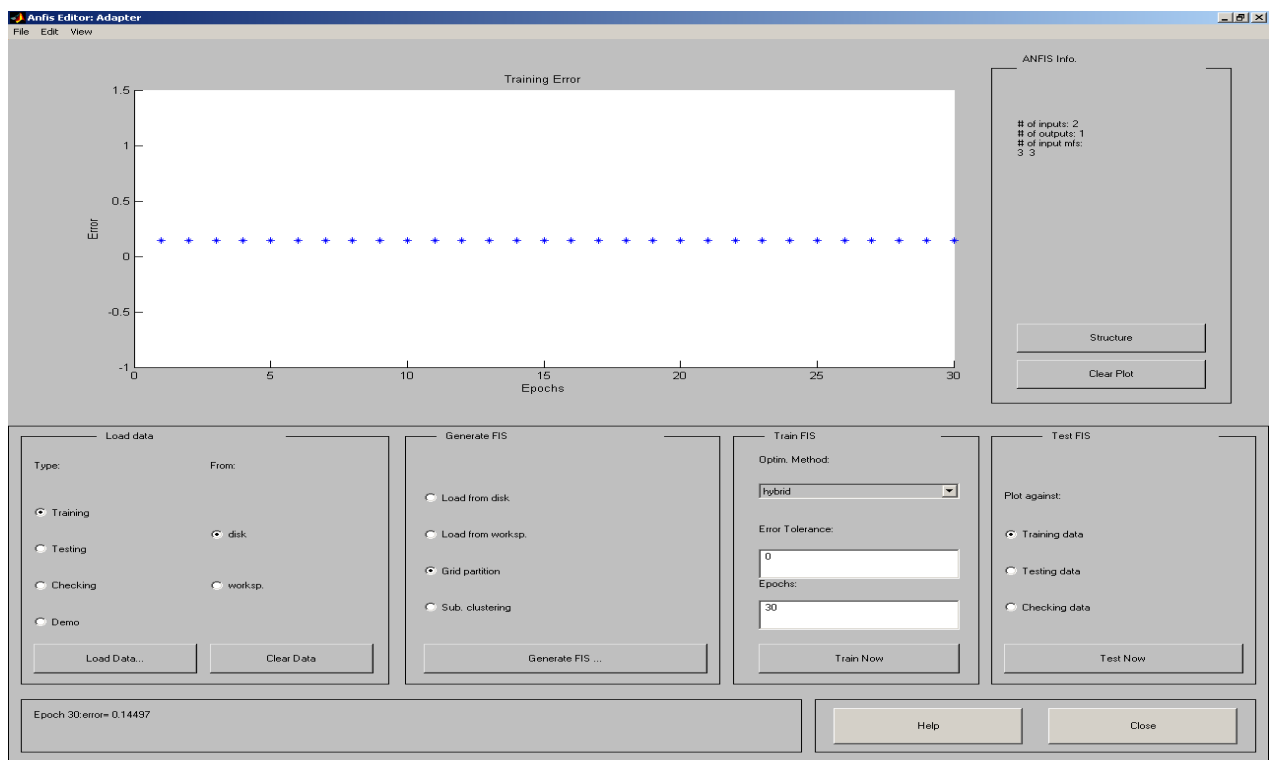


Рис. 5.4. Процес навчання ННМ в додатку anfisedit з демонстрацією значення помилки (Error)

Після навчання ННМ і подачі на її вхід значень параметрів моделі САУ температури пару СПУ: ( $K = 8,27$ ;  $T = 3,05$ ;  $\tau = 0,928$ ), відсутніх в тестовій

вибірці, (див. табл. 5.1) і визначених у результаті ідентифікації, ННМ рекомендувала значення оптимальних параметрів для ПІ - регулятора САУ температури перегрітого пару:  $T_{\text{и}} = 5,15$ ;  $K_p = 0,12$ , а традиційний метод визначення параметрів регулятора по КЧХ:  $K_p = 0,21$ ,  $T_{\text{и}} = 5,65$ .

У програмі MatLab (Simulink) [38] розроблені моделі каскадних САУ з ПІ-регуляторами і інерційними об'єктами третього порядку з запізненням (модель пароперегрівача по каналу регулювання) (рис. 5.5).

На вхід системи подавався сигнал завдання по температурі перегрітого пару після пароперегрівача. При зміні значень параметрів передатної функції об'єкту у випадках переходу парогенератора на інший режим (моделюванні дії параметричного збурення) та встановлення нових значень параметрів об'єкту в ході експерименту:  $K = 13,7$ ;  $T = 5,4$ ;  $\tau = 1,1$ , ННМ рекомендувало настройки регулятору:  $K_p = 0,81$ ;  $T_{\text{и}} = 6,33$ , а традиційний адаптивний метод реалізує частотний алгоритм по допоміжній функції:  $K_p = 0,021$ ;  $T_{\text{и}} = 3,55$ . Підстановка цих значень у схему програми Simulink дозволила отримати перехідні процеси, що представлені на рис. 5.6.

Для перевірки ефективності ННМ на можливість достовірного визначення прогнозних значень параметрів моделі об'єкта управління при виході СПУ на навантаження 105 %, використовувалася програмна функція `evaifis`. Програмний код для реалізації функції прогнозних значень параметрів моделі нейромережевої адаптивної САУ при роботі СПУ на форсажному режимі показаний нижче.



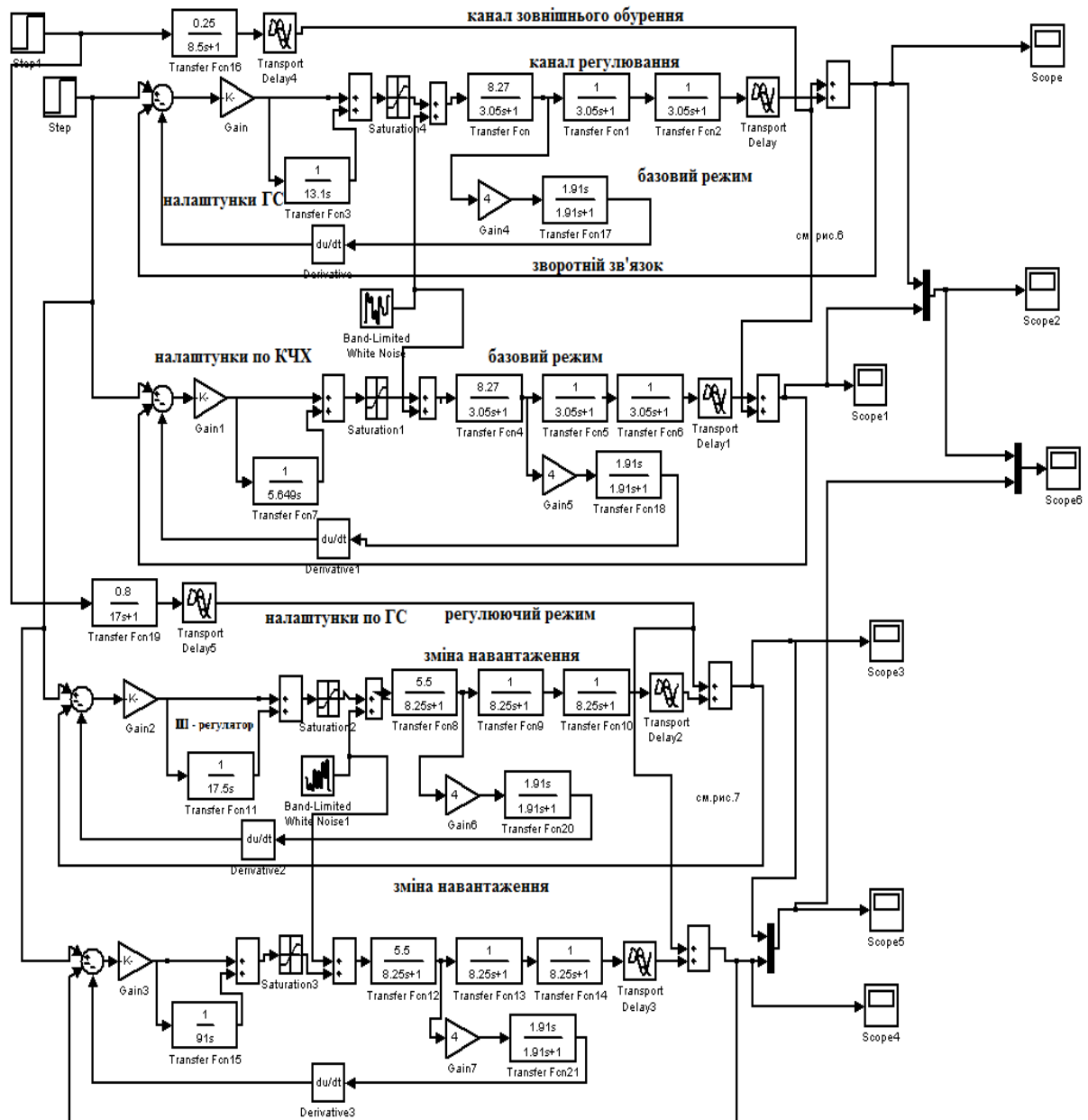


Рис. 5.5. Комп'ютерна модель апробації САУ температури пари CPU Mitsubishi MB 220 з ПІ-регуляторами при дії каналу зовнішнього збурення і компенсації збурень за допомогою нейромережевого адаптера

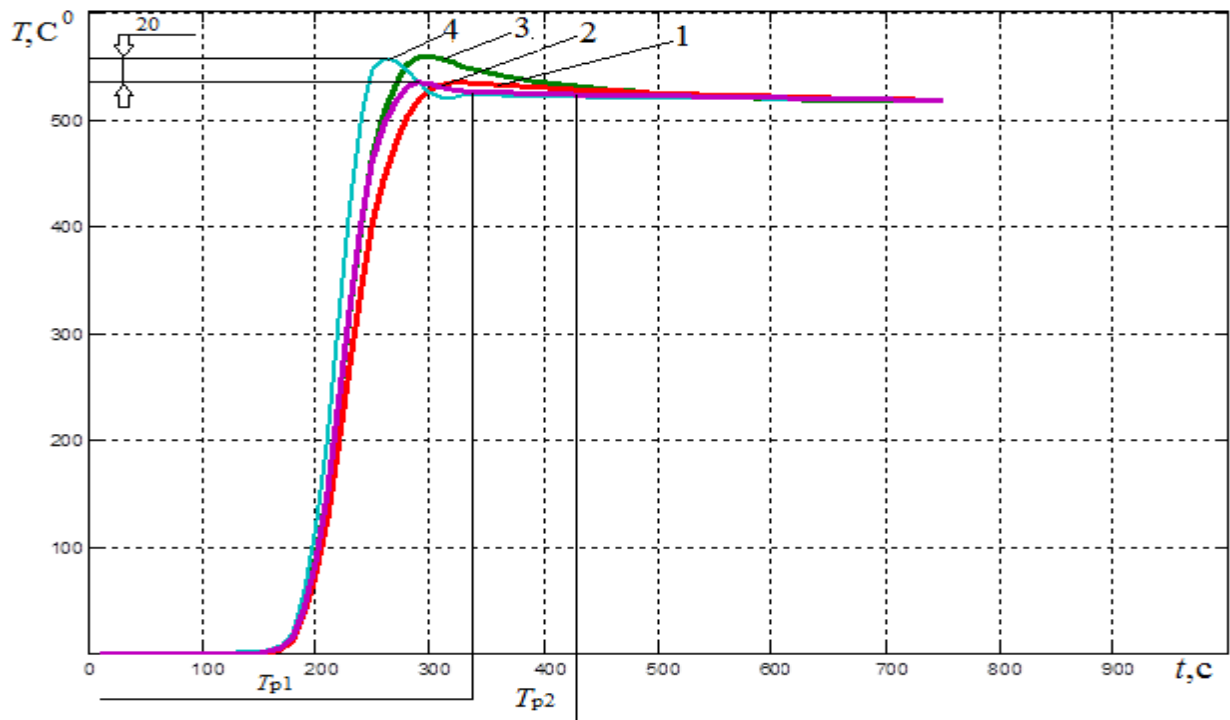


Рис. 5.6. Процеси САУ СПУ Mitsubishi MB 220 по каналу регулювання: 1 – традиційної САУ температури перегрітої пари (при номінальному навантаженні); 2 – нейронечіткої САУ (при тепловому навантаженні 50 %); 3 – традиційної САУ (при навантаженні 75 %); 4 – нейронечіткої САУ (при навантаженні 75 %)

out = evaifis ([4.43 7.05 11.9 13.7]), ansmod)

out = 14.1

тобто програма прогнозує значення параметра  $K = 14.1$

out = evaifis ([15.48 16.5 17.6 18.4]), ansmod1)

out = 19.3, тобто  $T = 19.3$  хв.

Достовірність розрахованих значень підтверджується низьким рівнем помилки навчання ННМ (див. рис. 5.4).

Аналогічним чином ННМ розраховує і оптимальні параметри для регулятора, що відповідні апроксимованим параметрам моделі САУ СПУ при проміжному тепловому навантаженні. Адаптивні настройки нейромережевої

САУ дозволяють, за результатами моделювання (див. рис. 5.6) отримати оптимальний перехідний процес з мінімально допустимим часом регулювання і закидом. Таким чином, при роботі СПУ на критичному навантаженні нейромережева САУ дозволяє уникнути виникнення аварійної ситуації, пов'язаної з перегрівом і подальшим руйнуванням пароперегрівача.

З порівняльного аналізу показників якості перехідних процесів САУ температури пару (див. рис. 5.6) можна зробити висновок, що при сталому режимі роботи об'єкта гібридний і традиційний ПІ-регулятори демонстрували однакові показники якості (див процеси 1 і 2 на рис. 5.6), проте, при впливі параметричного збурення (зміни парового навантаження агрегатів СЕУ), гібридна САУ система має менший час регулювання ( $T_{p2} = 330$  с) в порівнянні з традиційною адаптивною САУ ( $T_{p3} = 420$  с) (див. процеси 3 і 4 на рис. 5.6), т.е. запропонована НМСАУ є оптимальною.

## 5.2. Оптимізація показників шкідливих викидів в димових газів

### СПУ за допомогою системи моніторингу

Для аналізу ефективності процесу горіння мазутного палива в паровому котлі і вмісту шкідливих викидів в атмосферу, була проведена серія натурних експеримент на водотрубному паровому котлі ГМ - 50. План експериментів був аналогічний плану методики налагодження систем управління судових парових котлів [153].

У процесі проведених замірів при налаштування теплового режиму водотрубних парових котлів компанії [156] було встановлено, що при навантаженні водотрубного парогенератора марки ГМ-50, що дорівнює 0,9 від номінальної, і при коефіцієнті надлишку повітря -  $\alpha = 1,4$ , вміст оксидів азоту

склало  $77 \text{ мг/м}^3$  при його коливанні ( $20 - 80 \text{ мг/м}^3$ ) в залежності від значення  $\alpha$  і навантаження.

При проведенні експлуатаційних випробувань використовувались штатні прилади котла. Додатково застосовувались газоаналізатори ДГП-3М та переносні автоматичні цифрові газоаналізатори типу "Testo-Term" с похибкою вимірювань  $2,5 \%$  [16].

Слід зазначити, що коефіцієнт надлишку повітря  $\alpha$  - відношення дійсної кількості повітря  $V_g$ , поданого в топку котла до теоретично необхідного для горіння  $V^o$  визначається [7]:

$$\alpha = \frac{V_g}{V^o}.$$

Значення  $\alpha$  багато в чому залежить від складу і виду палива, топкового режиму, ступеня досконалості змішування палива з повітрям тощо. Якщо відомий хімічний склад газів, одержуваних при згорянні палива, коефіцієнт надлишку повітря може бути визначений за "азотної" формулою, яка для випадку повного горіння палива записується таким чином [7]:

$$\alpha = \frac{N_2}{N_2 - 3,76 O_2},$$

де  $N_2$  – вміст азоту в продуктах горіння, %, звідси слідує, що зі збільшенням вмісту кисню у вихідних газах величина азоту також зростає.

Можна відзначити, що аналіз значень  $CO_2$  може бути використаний як альтернатива значенням  $O_2$  у вихідних газах парогенератора у випадках, коли в системі управління процесом горіння несправний киснемір.

Таким чином, для зниження вмісту шкідливих викидів СПУ необхідно зниження значення  $\alpha$ . Відповідно до загальноприйнятої методики налагодження судових парогенераторів [153],  $\alpha$  може приймати значення [126]:

для суднових колов (СПУ) з високою паровою продуктивністю  $\alpha \approx 1,03 - 1,25$ ;

для СПУ з малою і середньою паровою продуктивністю (до 50 т/год)  $\alpha \approx 1,01 - 1,5$ .

При проведенні експлуатаційних випробувань використовувались штатні прилади. Додатково застосовувались газоаналізатори ДГП-ЗМ та переносні автоматичні цифрові газоаналізатори типу "Testo-Term" с похибкою вимірювань 2,5 %.

Вимірювання швидкості газу в газоході здійснювалося за допомогою пневмометричні трубок типу Піто-Прандтля і мікроманометрі. Подальший розрахунок швидкості газу  $v$  (м / с) здійснено за формулою:

$$v = \sqrt{\frac{2P_d}{\rho}}.$$

де  $\rho$  - щільність газу при робочих умовах, кг/м<sup>3</sup>. Динамічний тиск вихідного газу  $P_d$  обчислюється за формулою:

$$P_d = pb\kappa_T.$$

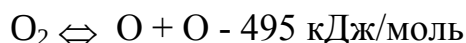
де  $p$  - показання за шкалою мікроманометра, Па;  $b$  - коефіцієнт, що залежить від кута нахилу вимірювальної трубки мікроманометра (наводиться в паспортних даних засобів вимірювання);  $\kappa_T$  - коефіцієнт напірної трубки, який визначається при її перевірці. Для трубок конструкції Піто-Прандтля  $\kappa_T = 0,9-1,0$ .

При цьому, для визначення розрахункового значення швидкості димових газів використовувалася формула:

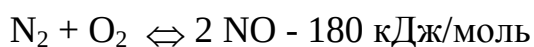
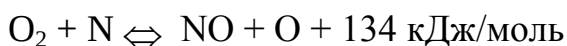
$$v_p = \frac{B_p V_g (T + 273)}{F \cdot 273}. \quad (5.1)$$

де  $B_p$  - витрата палива, кг / год (сірчастий мазут);  $V_g$  - об'єм димових газів, м<sup>3</sup>;  $T$  - температура продуктів згоряння °С;  $F$  - площа перерізу газоходу (м<sup>2</sup>). Згідно

(5.1) збільшення швидкості і об'єму димових газів з незмінним витратою палива призведе до зменшення температури димових газів. Таким чином, залежність (5.1) можна враховувати для процесу зниження вмісту шкідливих викидів якії залежить від температури вихідних газів. Залежно від механізму утворення оксиду азоту в процесі горіння палива розрізняють "термічні", "швидкі" та "паливні" оксиди азоту. Термін "термічний" оксид азоту отримав за те, що в основі механізму його утворення лежить залежність концентрації NO від температури в зоні горіння. Найбільш повно сукупність явищ, що відбуваються при окисненні азоту в топках теплогенераторів може бути описана на підставі теорії Я.Б. Зельдовича і М.М. Семенова [45]. Умовою окислення азоту повітря є дисоціація молекули кисню повітря під впливом високих температур, що йде з поглинанням теплоти:



Атомарний кисень реагує з молекулою азоту, а що утворився в результаті ендотермічної реакції атомарний азот вступає в екзотермічну реакцію з молекулярним киснем



Зміна концентрації оксиду азоту в одиницю часу визначається

$$dC_{\text{NO}}/dt \rightleftharpoons k_1 \times C_{\text{N}_2} \times C_{\text{O}_2} - k_2 \times [C_{\text{NO}}]^2 . \quad (5.2)$$

де  $C_{\text{N}_2}$ ,  $C_{\text{O}_2}$  - відповідно концентрації  $\text{N}_2$  і  $\text{O}_2$ , об. %;  $C_{\text{NO}}$  - рівноважна концентрація NO, об. % (тобто концентрація, що виходить при необмеженого боргом протікання реакції);  $k_1$ ,  $k_2$  - константи швидкості прямих і зворотних реакцій.

Рівноважна концентрація NO виходить з виразу (5.2) при  $dC_{NO} / dt = 0$  при відомих константах швидкостей реакцій

$$[C_{NO}] = 4,6 \times \sqrt{C_{O_2} \times C_{N_2}} \times \exp(-21500/(R \times T)).$$

З аналізу цієї формули випливає, що рівноважна концентрація оксиду азоту зростає зі збільшенням температури і концентрації кисню (концентрація азоту змінюється мало). Рівноважна концентрація NO понад  $1 \text{ г/м}^3$  має місце при температурі понад  $1600^\circ\text{C}$  і подвоюється при підвищенні температури на кожні  $200 \dots 250^\circ\text{C}$ .

В процесі експериментів (рис.5.7 – 5.11) було встановлено, що при зниженні теплового навантаження котла до 0,5 і стабілізації  $\alpha$  – зміст  $\text{NO}_x$  у вихідних газах знижується, в середньому, до 30 %. Також було встановлено, що зниження швидкості проходження димових газів на  $1 \text{ м/с}$  (за рахунок плавного зменшення обертів двигуна димососа) знижує вміст  $\text{NO}_x$  в середньому на  $10 \text{ мг/м}^3$  у порівнянні з димососом рециркуляції, працюючим на одній швидкості. Також, в ході експериментів, був встановлений і зростання вмісту  $\text{SO}_x$  у вихідних газах при збільшенні  $\alpha$ . Схожа динаміка зазначених спостережень простежується і в [160], що є підтвердженням зазначених вище залежностей.

Згідно з результатами отриманих даних можна зробити висновок, що з ростом теплової потужності, тобто витрати палива, підвищується і середній температурний рівень як в топці, так і в факелі. Причому між температурою в топці і тепловою потужністю агрегату існує логарифмічна залежність. Як показано вище концентрація оксиду азоту експоненціально залежить від температури в зоні горіння. Численні дослідження показали, що між концентрацією NO і тепловою потужністю агрегату в діапазоні робочих навантажень існує лінійна залежність [7, 14]. Це може бути пояснено тим, що складався логарифмічна і експоненціальна залежності вироджуються в пряму лінію. Однак при навантаженнях, близьких до максимальних, тобто при

досягненні максимальної температури, спостерігається стабілізація концентрація оксиду азоту (рис.5.10).

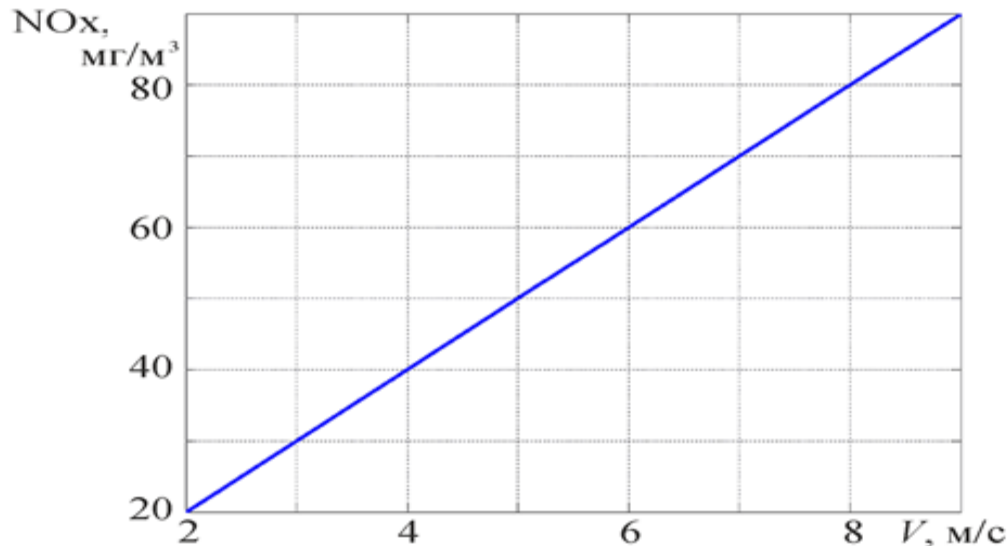


Рис. 5.7. Залежність вмісту  $\text{NO}_x$  парового котла ГМ-50 від швидкості вихідних газів

При збільшенні коефіцієнта надлишку повітря в зоні реакції зростає як концентрація  $\text{O}_2$ , так і  $\text{N}_2$ . Таким чином мало б спостерігатися лінійне збільшення концентрації  $\text{NO}$ . Однак поряд досліджень [7, 45] встановлено, що зростання виходу оксиду азоту зі збільшенням коефіцієнта надлишку повітря спостерігається до значень, близьких до 1,5, а потім настає зменшення його концентрації. Це може бути пояснено таким чином. При спалюванні палива в топку подається не гомогенна суміш палива з повітрям. При ( $\alpha < 1,5$ ) концентрації  $\text{O}_2$  в локальних зонах не вистачає на протікання реакції окислення азоту. Кисень в першу чергу витрачається на окислення вуглеводів в результаті протікання ланцюгових реакцій горіння. При збільшенні  $\alpha$  до 1,5 зростає як частка вільного  $\text{O}_2$ , так і температура в зоні горіння внаслідок більш повного вигорання вуглеводів [45].



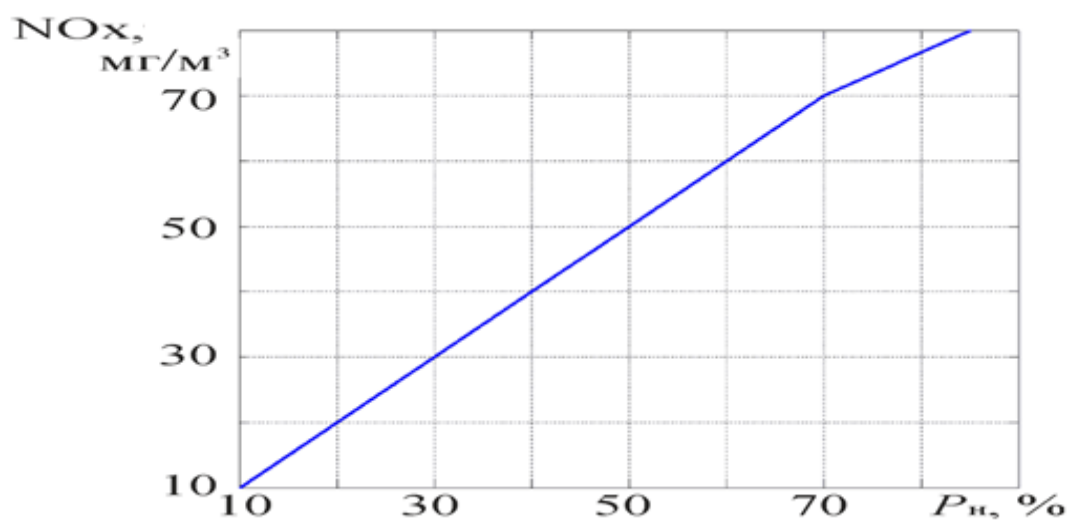


Рис. 5.8. Залежність вмісту  $\text{NO}_x$  в димових газах від теплового навантаження котла ГМ-50

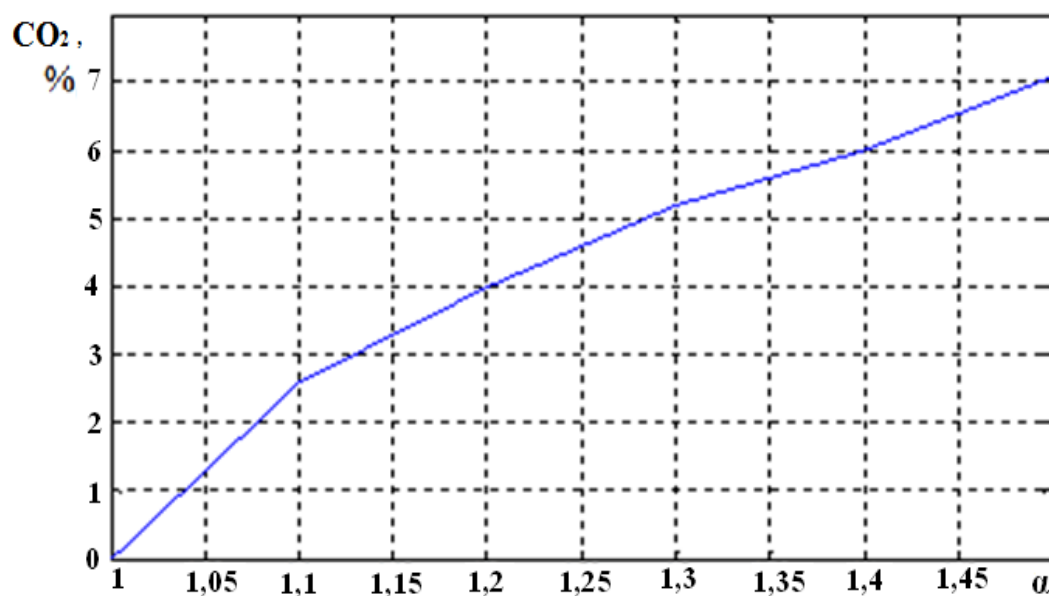


Рис. 5.9. Залежність вмісту  $\text{CO}_2$  в вихідних газах СПУ від  $\alpha$

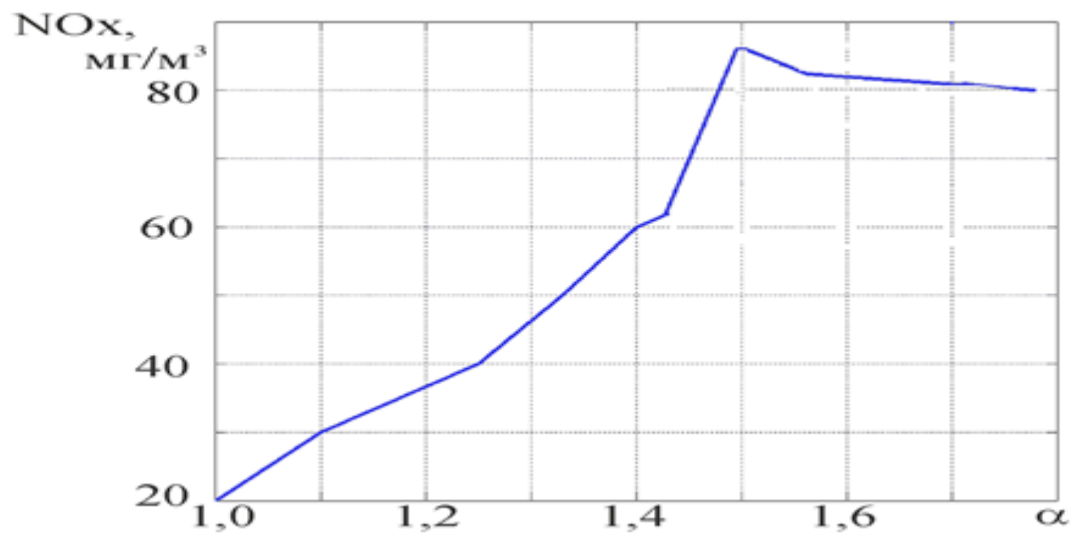


Рис. 5.10. Залежність вмісту  $\text{NO}_x$  в димових газах котла ГМ-50 від значення  $\alpha$

При подальшому збільшенні  $\alpha$  спостерігається надмірна кількість кисню та азоту в зоні реакції. Це повинно було б сприяти збільшенню концентрації  $\text{NO}$  в продуктах згоряння. Але на нагрів надлишку  $\text{O}_2$  і  $\text{N}_2$  витрачається теплота, що виділяється в ході окислення вуглеводів, тобто горіння. Це призводить до зниження середнього температурного рівня факела, а отже, до зниження концентрації  $\text{NO}_x$ .

Таким чином, для зниження вмісту шкідливих викидів СПУ необхідно зниження значення  $\alpha$ . Залежності концентрації шкідливих викидів від режимів роботи промислового парового котла і його управляючих елементів враховані в процесі навчання нейромережевої системи моніторингу вмісту шкідливих викидів від СПУ.

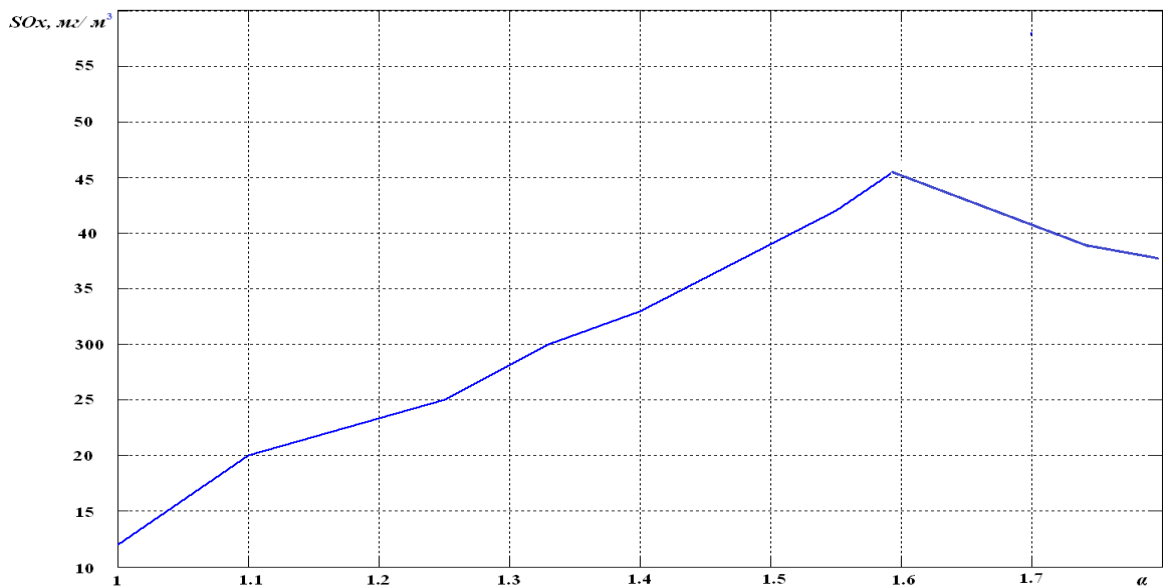


Рис. 5.11. Залежність вмісту  $SO_x$  в димових газах котла ГМ-50 від коефіцієнта надлишку повітря  $\alpha$

Розробка такої системи може дозволити оптимізувати екологічну складову процесу горіння. В умовах, запиту від оператора коли до акваторії знаходження судна пред'являються суворі обмеження щодо вмісту шкідливих викидів, нейромережева система, відповідно до своєї навчальної вибірки, отриманої за допомогою експериментальних даних (рис. 5.7 – 5.11), видає рекомендації оператору котла щодо вибору і підтримці оптимального  $\alpha$  і заданих швидкостей обертання повітряного вентилятора і димососа СПУ, що забезпечує зниження  $NO_x$  і  $SO_x$ .

Останнім часом були розроблені прилади з використанням твердотільних датчиків, які здатні швидко і відтворено вимірювати вміст  $CO$ ,  $O_2$  в димових газах. Особливістю одного з таких газоаналізаторів, розробленого за участю фахівців компанії «Інформаналітика» [16] є використання керамічних сенсорів, що визначають зміст  $CO$  і  $O_2$  при температурах аналізованого газу до  $1000\text{ }^{\circ}C$ , що дозволяє використовувати схему динамічного відбору проби (рис. 5.12).

Використання пропонованого для СПУ методу динамічного відбору проби дозволить істотно спростити і знизити вартість системи, що призводить до її ефективного використання для котлів невисокої потужності. Обмеження у використанні методу динамічного відбору проби - швидкість потоку, при якій забезпечується надійна подача проби до сенсорів. Як показано [16] достатньою є швидкість газового потоку 2 м/с. Поєднання динамічного відбору проби і використання високотемпературних сенсорів дозволяє позбутися проблем, які пов'язані з конденсацією продуктів горіння в системі відбору проби, і, крім того, істотно збільшує швидкодію системи в цілому. Передача даних від первинного перетворювача до блоку індикації здійснюється за допомогою інтерфейсу RS-485. Блок індикації дозволяє зчитувати поточні значення концентрації CO і O<sub>2</sub>, крім цього, він служить для формування керуючих струмових сигналів 4-20 мА. Відстань, на яке може бути віднесений блок індикації від місця монтажу пробовідбірних пристроїв та первинного перетворювача, досягає 500 м.

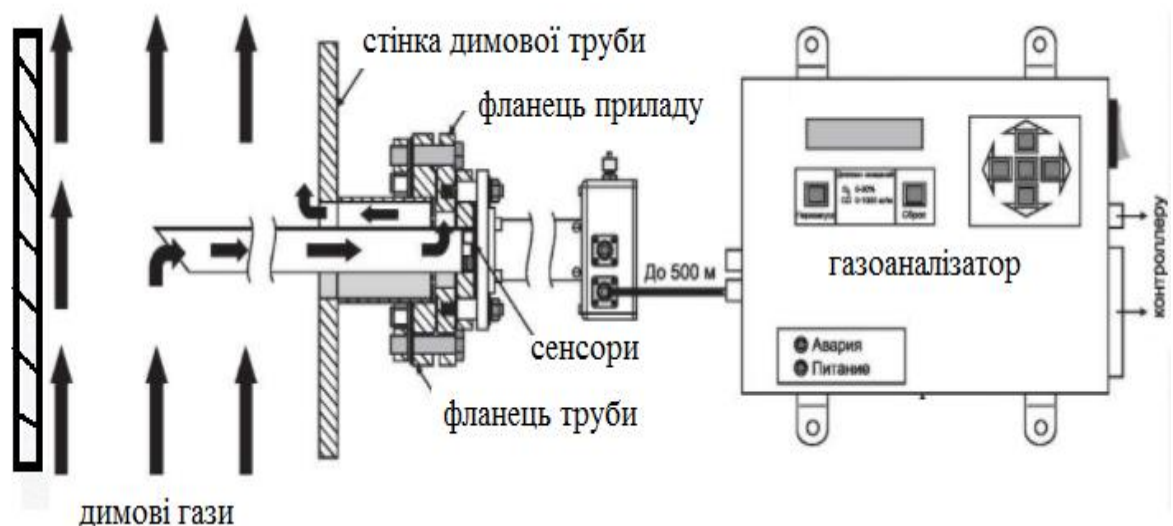


Рис. 5.12. Схема відбору димових газів для газоаналізатору котла

Виходячи з експериментальних даних на представлених вище діаграмах, була навчена нейронна мережа для системи моніторингу щодо оптимізації

процесом управління СПУ, тобто процесом горіння палива, з метою зниження вмісту шкідливих викидів в атмосферу. Апробація навченої нейронної мережі, що доповнює діючу суднову систему моніторингу, проводилася для наступних умов: «У випадках, якщо вимоги щодо акваторії знаходження судна до вмісту оксидів азоту в атмосфері, наприклад  $\text{NO}_x =$  до  $48 \text{ мг/м}^3$ », тоді НМ за запитом оператора (рис. 5.13) видає необхідні значення коефіцієнта надлишку повітря, навантаження СПУ, швидкості газів наступні:  $\alpha = 1,3$ ;  $P_n = 40 \%$  від номінальної; швидкість газів  $v = 4 \text{ м/с}$ , тобто двигун димососа рециркуляції димових газів, підключений до частотного перетворювача, починає розвивати задані оберти по сигналу, отриманому від оператора, також оператор СПУ дистанційно повинен контролювати баланс розрядження в топці і стійкість горіння факела пальника.

Передбачається, що дані значення можуть, після підтвердження команди від оператора, встановлюватися як задані для регулятора в САУ горіння палива СПУ з метою оптимізації процесу за критеріями мінімізації шкідливих викидів (рис.5.14) .

Навчання нейронної мережі було проведено в програмі Matlab (Neural Networks Toolbox).

З метою визначення адекватності експериментальної вибірки НМ проведено теоретичний аналіз залежності впливу режимів роботи СПУ на вміст  $\text{NO}_x$  у вихідних газах. Розрахунок виконаний за допомогою методики [160].

Сумарна кількість оксидів азоту  $\text{NO}_x$  в перерахунку на  $\text{NO}_2$  (в г/с, т/рік), що викидаються в атмосферу з димовими газами, визначається за формулою:

$$M_{\text{NO}_x} = B_T \cdot Q_i^r \cdot K_{\text{NO}_2}^M \cdot \beta_t \cdot \beta_\alpha \cdot k_p, \quad (5.3)$$

де  $B_T$  – фактична витрата палива на котел кг/с (т/год);  $Q_i^r$  – нижча теплота згоряння палива, МДж/кг;  $K_{\text{NO}_2}^M$  – питомий викид оксидів азоту при спалюванні мазуту, г/МДж.

Для парових СПУ:

$$K_{NO_2}^M = 0,01 \cdot \sqrt{D} + 0,1,$$

де  $D$  – фактична паропроодуктивність котла, т/год;  $\beta_t$  – безрозмірний коефіцієнт, що враховує температуру повітря, що подається:

$$\beta_t = 1 + 0,002 \cdot (t_{гв} - 30),$$

де  $t_{гв}$  – температура гарячого повітря, °С;  $\beta_\alpha$  – безрозмірний коефіцієнт, що враховує вплив надлишку повітря на утворення оксидів азоту при спалюванні рідкого палива.

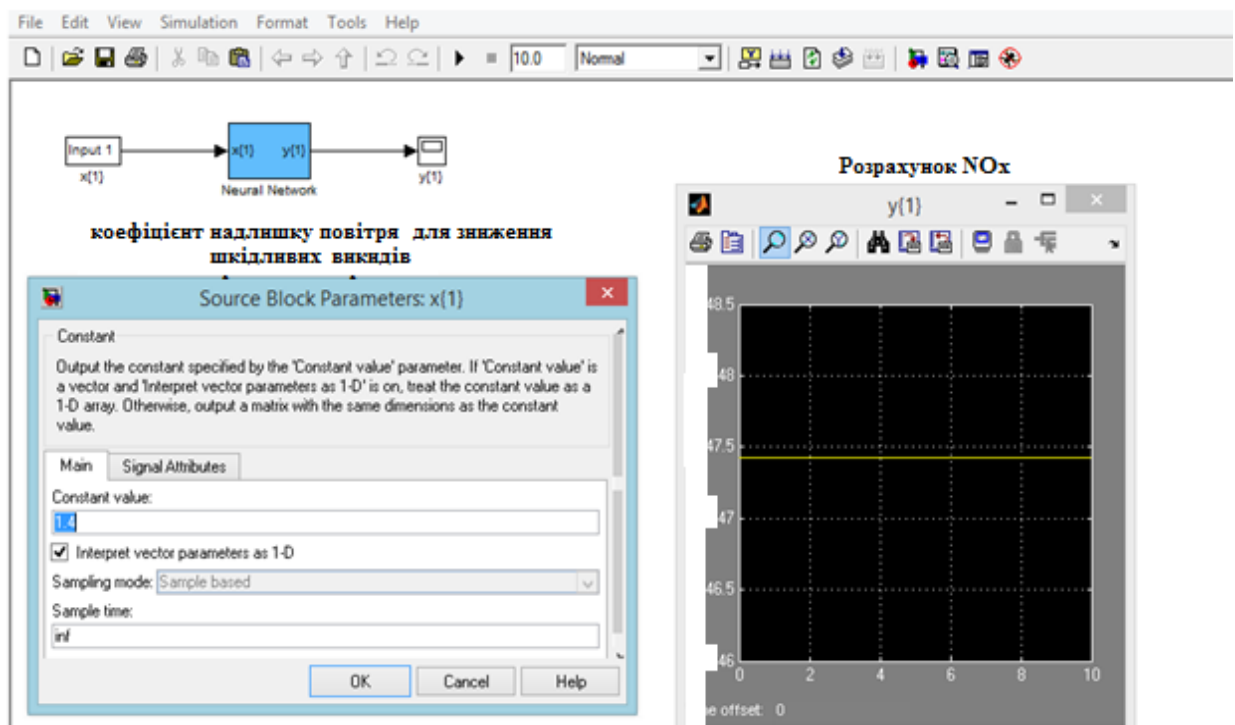


Рис. 5.13. Програма роботи НМ, що визначає значення  $NO_x$  при заданому  $\alpha$

В залежності від режиму СПУ значення  $\beta_\alpha = 1,11 - 1,45$ . (фактично рівний  $\alpha$ ). Зниження коефіцієнту  $\beta_\alpha$  (тобто зменшення викидів  $NO_x$ ) за рахунок зниження концентрації кисню  $O_2$ , обмежується зростанням концентрації  $CO$  понад 0,01%. Однак, збільшувати концентрацію кисню  $O_2$  для зниження  $\beta_\alpha$  не рекомендується через зростання втрат з газами  $q_2$  [166].  $k_\pi$  – коефіцієнт

перерахунку: при визначенні викидів в грамах в секунду  $k_{\text{г}} = 1$ ; при визначенні викидів в тонах в рік  $k_{\text{т}} = 10^{-3}$ .

Слід зазначити, що залежність (5.3) не відображає повною мірою вміст оксидів азоту в димових газах від теплової навантаження котла і коефіцієнта надлишку повітря, що викликає труднощі для її використання в САУ оптимізації показників шкідливих викидів з урахуванням теплового навантаження СПУ. Таким чином, в ході проведення експериментів, була отримана емпірична формула залежності змісту оксидів азоту від експлуатаційних параметрів СПУ:

$$C_{NO_x} = \frac{O_2}{P_n} R_{N_2} \frac{B_T}{D_{\partial.г.}}. \quad (5.4)$$

де  $O_2$  – вміст кисню в димових газах котла, %;  $P_n$  - теплове навантаження СПУ, %;  $R_{N_2}$  - коефіцієнт концентрації азоту, мг/м<sup>3</sup>;  $B_T$  - витрата палива, кг/год;  $D_{\partial.г.}$  - витрата димових газів, кг/год.

$$R_{N_2} = 7,5 \cdot \frac{D_{\partial}}{50 + D_{\partial.г.}}.$$

Облік формули (5.4) в програмі регулятора САУ горіння палива в СПУ дозволяє здійснити зниження значення оксидів азоту шляхом збільшення витрати димових газів (швидкості обертання димососу газів і вентилятора повітря) або шляхом зниження вмісту кисню (зниження коефіцієнта надлишку повітря) без зниження парової завантаження тобто витрати палива.

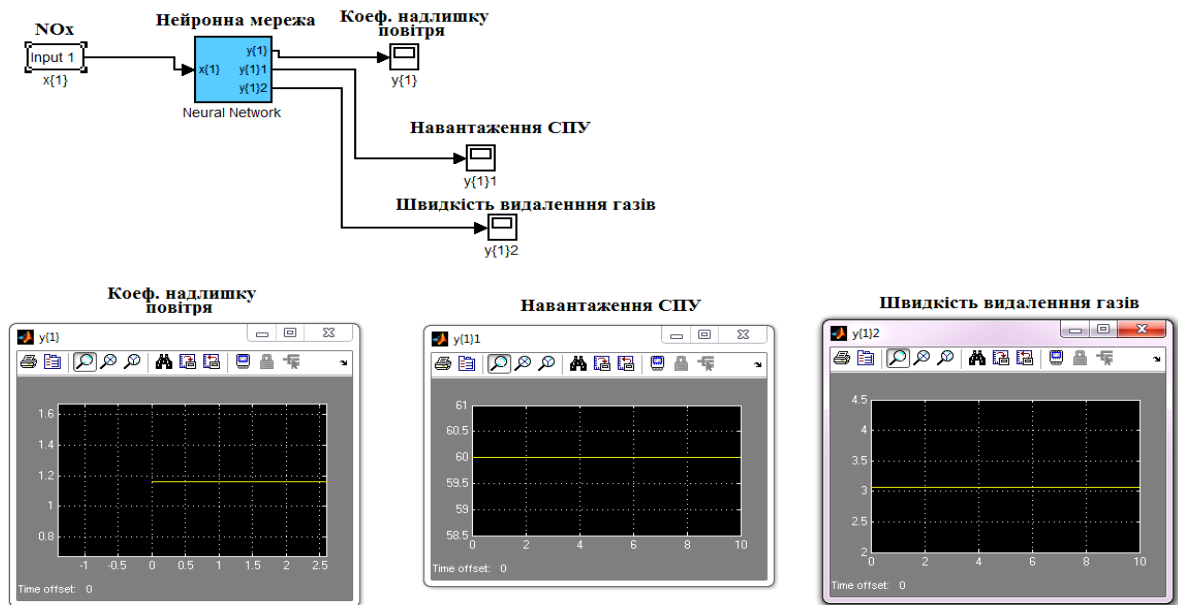


Рис.5.14. Моделювання нейромережевої системи моніторингу  $\text{NO}_x$

На рис. 5.15 показані результати розрахунку за формулою (5.4) і дані отримані під час проведення експерименту. При розрахунку використовувалися паспортні дані СПУ компанії Мітсубіші марки MAC 35 [203].

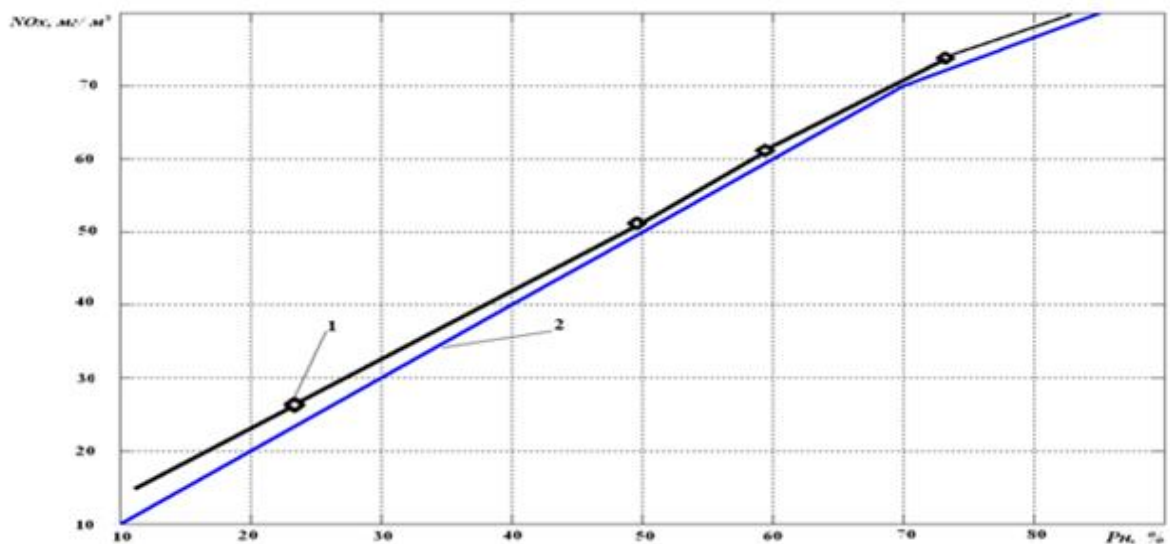


Рис. 5.15. Експериментальна (1) і аналітична (2) залежності вмісту оксидів азоту від теплового навантаження парового котла



Як видно з рис.5.15. запропонована універсальна емпірична формула (5.4) дозволяє з великою вірогідністю прогнозувати зміни концентрації оксидів азоту в залежності від теплової завантаження допоміжних СПУ широкого конструктивного класу.

Згідно даних [203] при навантаженні СПУ МАС 35 рівному 25 %, приймаються наступні вихідні значення:  $B_T = 0,35$  кг/с;  $Q_i = 43$  МДж/кг (тяжке паливо);  $K_{NO_2}^M = 0,12$  мг/с;  $\beta_t = 1,08$ ;  $\beta_\alpha = 1,16$ . Для представлених значень  $M_{NO_x}$  буде рівна 22,6 мг/с.

З урахуванням рекомендацій нейронної мережі щодо зниження  $NO_x$ , тобто підтриманню  $\alpha$ , вираженому в виді  $\beta_\alpha = 1,11$  і одночасному збільшенню швидкості проходження димових газів згідно зниженню їх температури -  $\beta_t = 1,02$ , вміст  $NO_x$  складе 17 мг/с. У даному випадку розрахунки показали що використання НМ на прикладі одного найбільш розповсюдженого режиму СПУ дозволяє знизити  $NO_x$  на 5,6 мг/с або 25 %.

Результати моделювання та розрахунки показали, що використання нейромережевої системи моніторингу димових газів промислового мазутного котла ГМ 50 і суднового котла МАС 35 дозволяє знизити вміст  $NO_x$ , приблизно на 25 %, в порівнянні з типовою системою управління яка не оснащена димососом з частотним приводом і системою моніторингу. Можна зробити висновок що використання запропонованої системи дозволяє знизити вміст шкідливих викидів СПУ в атмосферу без значних витрат на технологічне переоснащення судна.

### 5.3. Система корекції коефіцієнта надлишку повітря для зниження вмісту $\text{NO}_x$ в димових газах СПУ

Для умов, коли на судні в силу чинного технологічного процесу, неможливо зниження теплового навантаження СПУ, але при цьому стоїть завдання по зниженню вмісту шкідливих викидів в атмосферу, проведено наступне дослідження. Для дослідження СПУ різної парової продуктивності проведено моделювання нейромережевої САУ оптимізації  $\alpha$  (режиму горіння палива) допоміжного СПУ марки МАС 35. Вихідні дані для проведення моделювання та навчання нейронної мережі нейромережевого регулятора були взяті з експериментальних характеристик СПУ Mitsubishi МАС-35 (рис. 5.20) [205] і другого розділу. Для навчання нейромережевого контролера (НМК) в САУ горіння на основі експериментальних даних [203] була складена навчальна вибірка (табл. 5.2). Значення коефіцієнту надлишку повітря розраховувалося за змістом вільного кисню  $\text{O}_2$  в газах, які покидають топку, за формулою зазначеною нижче з урахуванням експериментальних характеристик СПУ (див. рис. 5.15):

$$\alpha = \frac{21}{21 - \text{O}_2}.$$

Згідно з розрахунками, за представленою вище методикою, отримані наступні значення (див. табл. 5.2) дозволяють знизити вміст  $\text{NO}_x$  до 15 % в порівнянні з традиційною САУ, що не оптимізує  $\alpha$ .

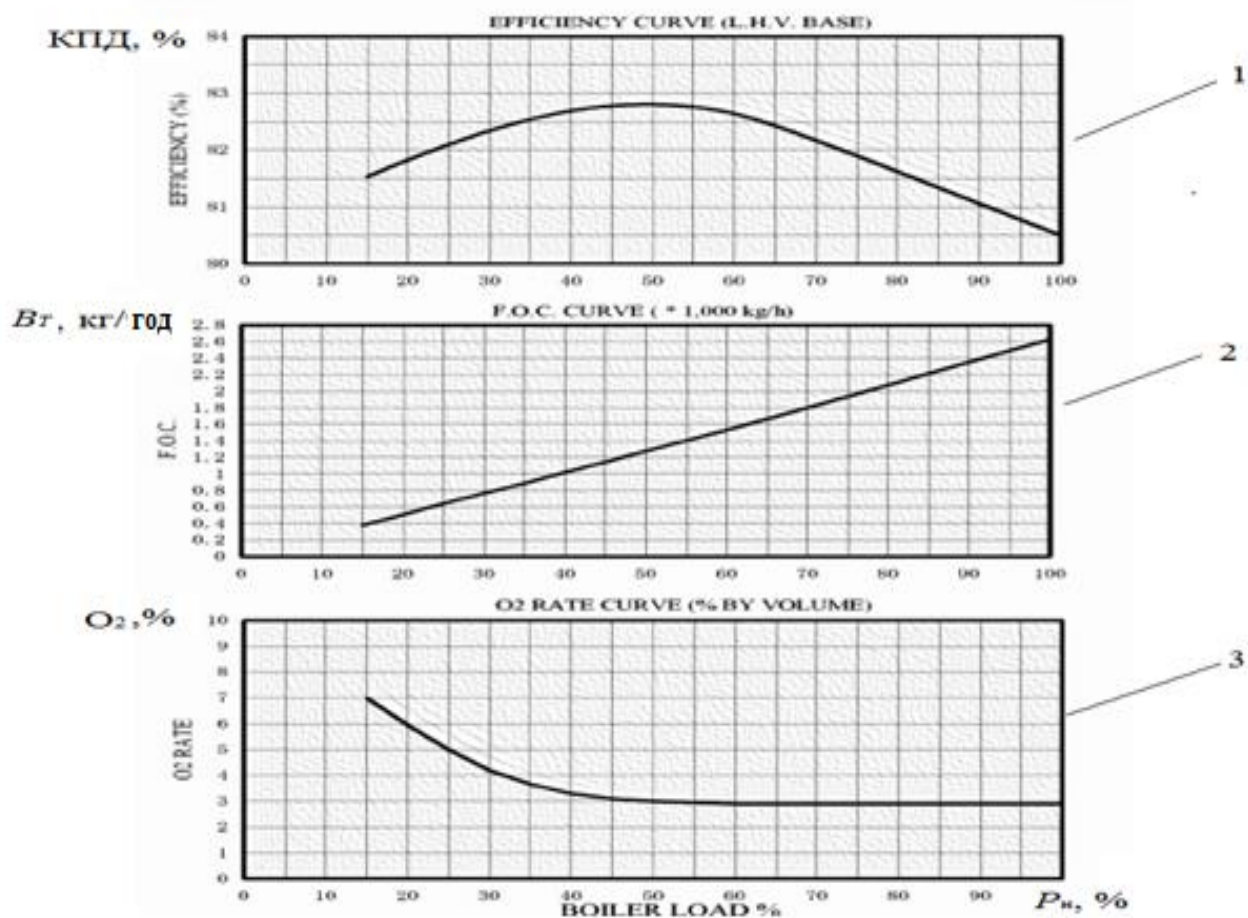


Рис. 5.20. Експериментальні характеристики залежностей: 1 – КПД %; 2 – витрата палива (мазуту) FOC; 3 – вміст O<sub>2</sub> від навантаження boiler load ( $P_n$ ) суднового парогенератору MAC 35 [203]

Таблиця 5.2

Навчальна вибірка для НМК оптимального режиму горіння палива за критерієм мінімізації NO<sub>x</sub> та підтримки максимально – припустимого ККД СПУ

| Навантаження СПУ, $P_n$ %           | 15   | 30   | 50   | 70   | 90   |
|-------------------------------------|------|------|------|------|------|
| $\alpha$                            | 1,32 | 1,22 | 1,15 | 1,10 | 1,05 |
| NO <sub>x</sub> , мг/м <sup>3</sup> | 15,2 | 13,5 | 22,1 | 48,2 | 63,3 |
| ККД, ( $\eta$ ) %                   | 81,5 | 82,3 | 82,8 | 82,1 | 80,5 |

Важливість для вирішення багатокритеріальної задачі з одночасної оптимізації екологічних (вмісту шкідливих викидів) та економічних (ККД) показників СПУ представляють експериментальні залежності які показані на рис. 5.21. і наведені в роботі [14].

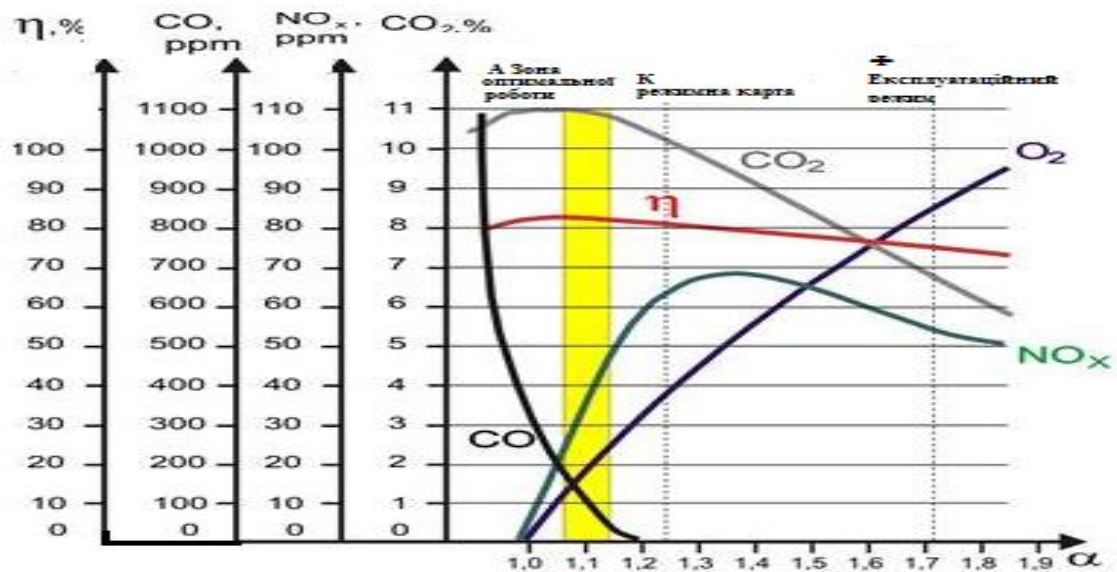


Рис. 5.21. Вплив коефіцієнта надлишку повітря на ККД і концентрацію основних компонентів димових газів котла ДКВР - 6,5-13 ГМ з робочим тиском 1,3 МПа і витратою пара 6,5 т/год [14]

Експериментальні залежності демонструють (див. рис. 5.21), що зменшення  $\alpha$  сприяє: зниженню вмісту  $O_2$ , підвищенню ККД і, як наслідок, зниженню температури димових газів і споживання електроенергії вентилятором і димососом. При цьому зменшуються значення  $NO_x$ , але одночасно зростає вміст  $CO_2$ . Область економічно вигідного режиму спалювання палива відповідає малим значенням кисню (0,5 – 1,5 %) і змістом оксиду вуглецю ( $CO$ ) на рівні 12 – 60 мг/м<sup>3</sup>. Робота в цій зоні (А), виділеної на штрихуванням, може бути забезпечена тільки автоматичною корекцією роботи пальників. Лінії, відповідні роботи котла по режимній карті (К) і фактичному режиму (Ф), показують коли

за рахунок негерметичності топочно-димового тракту погіршуються економічні показники котла [14].

Для визначення оптимальної альтернативи рекомендуємо вибрати коефіцієнт надлишку повітря в умовах мінімізації шкідливих викидів і максимізації ККД водотрубного котла ДКВР 6.5-13 ГМ малої теплової потужності, альтернативі СПУ малої потужності. Розрахунок проводився за методом багатокритеріальної оптимізації (головного критерію з ваговими коефіцієнтами).

Таблиця 5.3

Експериментальні дані

| Альтернативи, $\alpha$  | $\eta$ , % | $\text{NO}_x$ , ppm | $\text{CO}_2$ , ppm |
|-------------------------|------------|---------------------|---------------------|
| $0,95 < \alpha < 1,2$ ; | 80         | 10                  | 10,5                |
| $1,2 < \alpha < 1,4$ ;  | 81         | 62                  | 10,3                |
| $1,4 < \alpha < 1,6$ ;  | 78         | 70                  | 9,0                 |
| $1,6 < \alpha < 1,8$ ;  | 75         | 60                  | 7,5                 |
| $1,8 < \alpha < 1,9$ .  | 73         | 50                  | 6,0                 |

Для вирішення завдання п'ятикритеріальної оптимізації в умовах обмеження визначаються локальні цільові функції:

$$(\text{ККД}) f_1 = 80x_1 + 81x_2 + 78x_3 + 75x_4 + 73x_5 \longrightarrow \max;$$

$$(\text{NO}_x) f_2 = 10x_1 + 62x_2 + 70x_3 + 60x_4 + 50x_5 \longrightarrow \min;$$

$$(\text{CO}_2) f_3 = 10,5x_1 + 10,3x_2 + 9x_3 + 7,5x_4 + 6x_5 \longrightarrow \min.$$

З урахуванням пріоритету контролю  $\text{NO}_x$ , ваговий коефіцієнт другого критерію складе 0,5; інші ваги складають 0,25. Лінійна оптимізаційна функція має вигляд:

$$f = f_1 - f_2 - f_3 = 12,3x_1 - 13,5x_2 - 17,8x_3 - 13,1x_4 - 8,2x_5.$$

У даній ситуації, головним критерієм є вміст  $\text{NO}_x$ , що підлягає мінімізації. Тому, для виконання цієї умови з урахуванням накладених обмежень оптимальним рішенням є мінімізація значень  $\alpha$  на всьому робочому діапазоні СПУ.

Для завдання оптимізації ККД СПУ, в умовах заданих обмежень на вміст оксидів азоту і вуглецю в димових газах, програма, що реалізує симплекс-метод (рис. 5.22), рекомендує наступні рішення: «оптимальний план роботи СПУ (підтримки заданого теплового режиму з урахуванням ККД) можна записати так:  $x_1 = 0$ ,  $x_2 = 30/417$ ,  $x_3 = 70/834$ ,  $x_4 = 0$ ,  $x_5 = 0$ .

**симплексний метод**

**Заповніть коефіцієнти змінних, натисніть Далі**

**Ввід даних**

| $x_1$ | $x_2$ | $x_3$ | $x_4$ | $x_5$ |             | B  |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------------|----|
| 80    | 81    | 78    | 75    | 73    | $\geq \vee$ | 85 |
| 10    | 62    | 70    | 60    | 50    | $\leq \vee$ | 71 |
| 10,5  | 10,3  | 9,0   | 7,5   | 6     | $\leq \vee$ | 11 |

Функція цели  $F(x)$

| $x_1$ | $x_2$ | $x_3$ | $x_4$ | $x_5$ | C | extr       |
|-------|-------|-------|-------|-------|---|------------|
| 12,3  | -13,5 | -17,8 | -13,1 | -8,2  | 0 | min $\vee$ |

Форма решения симплекс-метода:

Рис. 5.22. Програма розрахунку цільової функції симплекс-методом

Згідно з розрахунком, який зроблено в програмі (див. рис. 5.22), аналіз оптимального плану роботи СПУ за умови максимізації ККД СПУ в умовах заданих обмежень рекомендує приймати як найбільш вигідну стратегії другу і третю, тобто 30 % часу на другому режимі з  $\alpha = 1,2$  і 70 % на третьому тепловому режимі з  $\alpha = 1,4$  т.е.  $O_2 = 6$  %. У такому випадку при накладених обмеженнях на вміст шкідливих викидів в димових газах (мінімізації) буде підтримуватися максимально можливий ККД СПУ. Даний висновок враховується в процесі навчання НМСАУ оптимізації  $\text{NO}_x$  і ККД СПУ в умовах прийнятих обмежень.

Методи навчання нейромережових регуляторів, при яких мінімізується відхилення поточного виходу об'єкту від вхідного впливу, не завжди добре справляються в завданнях 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 [148]. У зв'язку з цим, пропонується метод прогнозуючого модельного нейроуправління, який мінімізує функціонал вартості інтегральної помилки, прогнозованою на кілька тактів вперед [11].

Синтез нейромережової системи управління проводився за допомогою пакета прикладних програм Neural Network Toolbox системи MATLAB [116]. Для вирішення поставленого завдання ефективним рішенням представляється нейромережовий регулятор NN Predictive Controller [107, 116]. Нейромережовий регулятор використовує модель нелінійного керованого об'єкта (СПУ) у вигляді нейронної мережі для того, щоб передбачати його майбутню поведінку. Крім того, регулятор обчислює сигнал управління, який оптимізує поведінку об'єкта (регульованого параметра СПУ) 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 нейромережового регулятора.

Для прогнозування майбутньої поведінки регульованих параметрів СПУ і обчислення помилок регулювання, використовується прямий нейроемулятор, навчений за допомогою алгоритму зворотного поширення помилки [116] на прикладі адаптованого для конкретного режиму СПУ, ПІД-регулятора. Відмінність запропонованого методу від типового методу навчання НМ [148] 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.

В результаті вибирається оптимальний управляючий вплив, що приводить об'єкт до потрібного стану на цільовій траєкторії  $r(k + 1)$  (заданого значення  $\alpha$ ). На думку ряду дослідників [148] недоліком даного методу є неможливість його застосування в системах з високою частотою дискретизації тому, що оптимізаційний алгоритм за один такт не встигатиме знаходити оптимальний управляючий вплив. Можна відзначити, що, так як СПУ є інерційним об'єктом, і зміна теплових режимів його роботи відбувається зі значним запізненням, то метод може бути успішно апробований в суднових САУ парогенеруючих агрегатів. З урахуванням простоти, зручності і наявності бібліотеки елементів НМ, для навчання НМК в САУ горіння були використані вбудовані в електронну бібліотеку спеціалізовані програмні редактори. Програмна модель НМСАУ оптимізації  $\alpha$  і інтерфейс настройки нейрорегулятора представлені на рис. 5.23.

Процес синтезу нейроконтролера був проведений за допомогою програмного модуля NN Prediction Controller на рис. 5.24. Для ідентифікації об'єкта управління була використана програмна утиліта Plant Identification на рис. 5.25 [116].

Основні параметри настройки НМК (див. рис. 5.25), значення яких підібрані виходячи з рекомендацій [116], вказані нижче:

Control Horizon ( $N_u$ ) - верхня межа підсумовування при оцінці потужності управління; Control Weighting Factor ( $\rho$ ) – коефіцієнт ваги для складової потужності управління  $\rho = 0,05$ ; Search parameter ( $\alpha$ ) – 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.

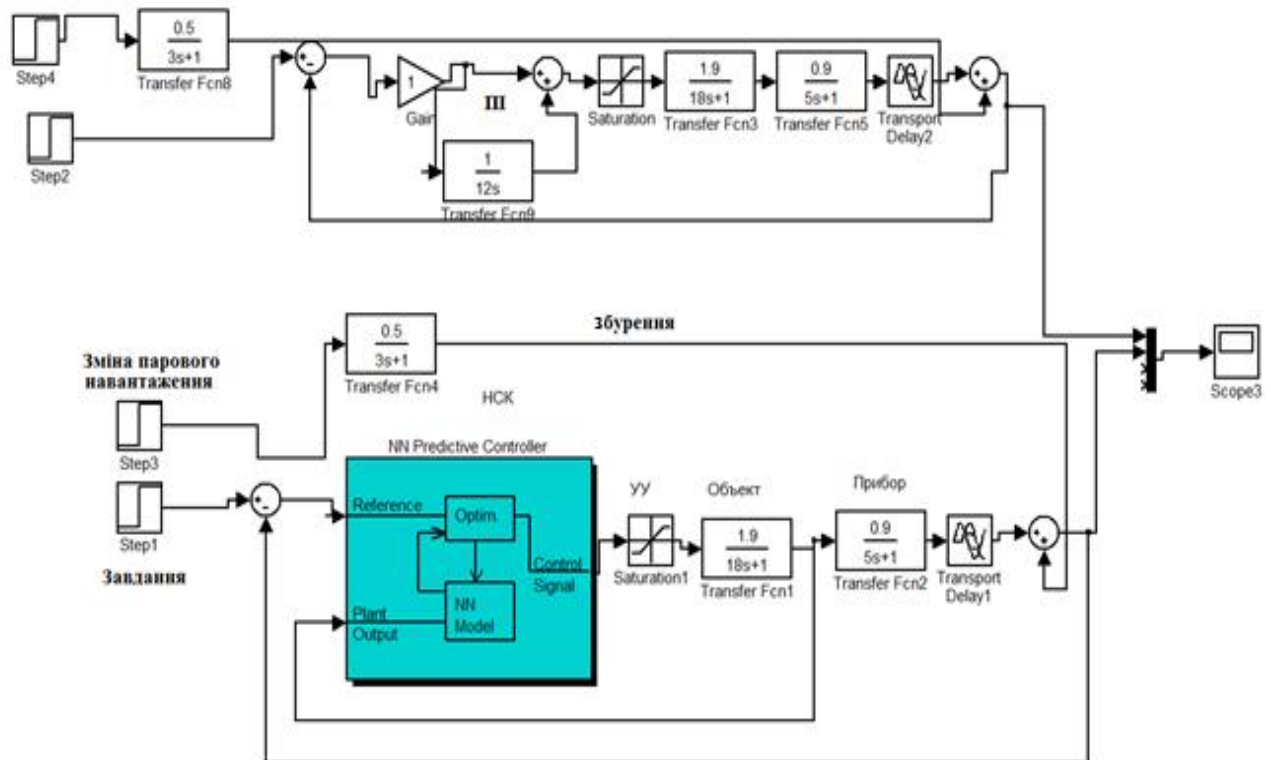


Рис. 5.23. Моделювання САУ с ПІ – регулятором і НМСАУ оптимізації  $\alpha$

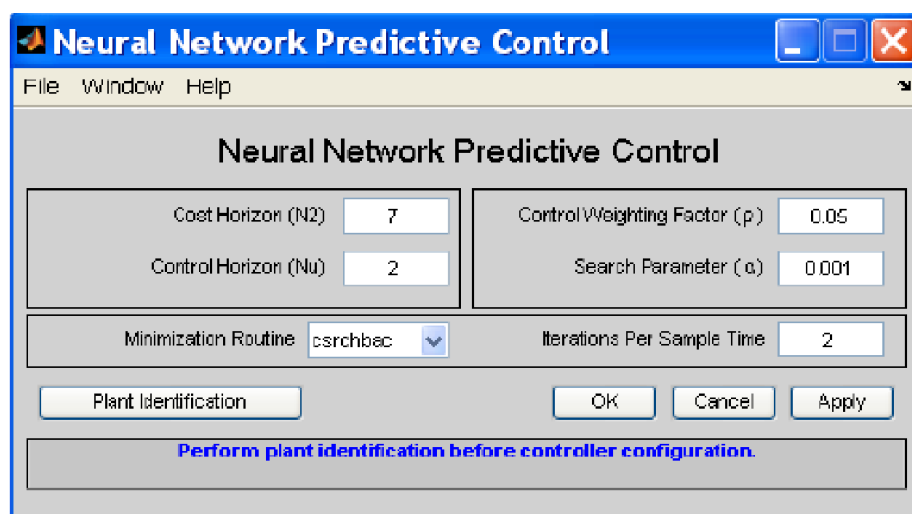


Рис. 5.24. Інтерфейс настройки НМК

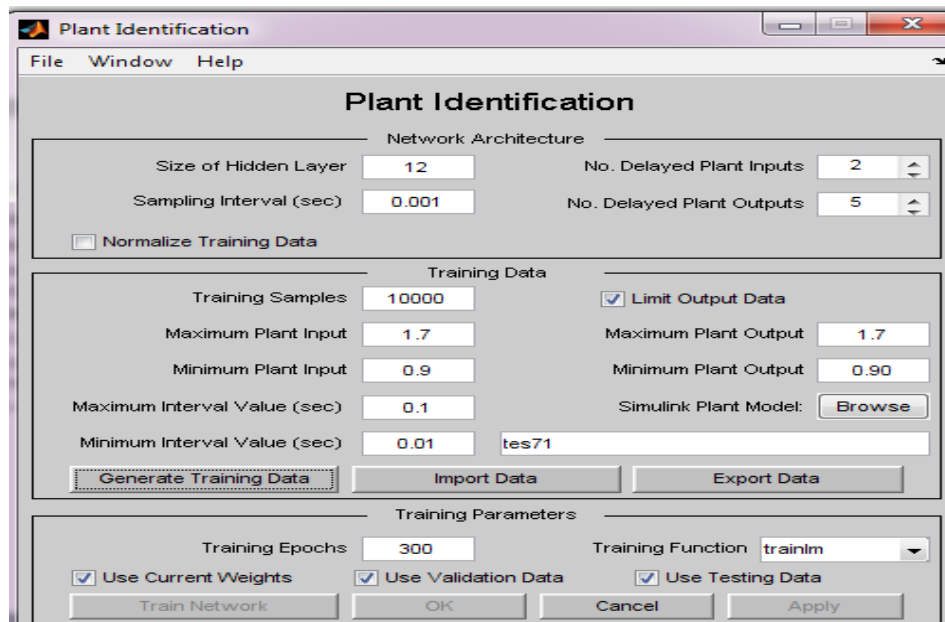


Рис. 5.25. Інтерфейс програми нейромережевої ідентифікації

Параметри архітектури НМ:

Size of Hidden Layer ( $N$ ) – розмір прихованого шару, визначається кількістю використовуваних нейронів; Sampling Interval ( $\Delta t$ ) – такт дискретності в секундах, визначає інтервал між двома послідовними моментами знімання даних; No. Delayed Plant Inputs ( $N_i$ ) - кількість елементів запізнювання на вході моделі; No. Delayed Plant Outputs ( $N, j$ ) – кількість елементів запізнювання на виході моделі; Normalize Training Data. Вікна контролю нормування навчальних даних до діапазону  $[0 - 1]$ .

Параметри навчання НМ:

Training Epochs – кількість циклів навчання; Training function – завдання навчальної функції; Use Current Weights – вікно контролю, що дозволяє підтвердити використання поточних ваг нейронної мережі; Use Validation / Testing Training – вибір цих вікон контролю означає, що по 25 % даних з навчальної послідовності буде використано для формування контролю і текстового підмножин.

Параметри навчальної послідовності:

Training samples (NB) – довжина навчальної вибірки (кількість точок знімання інформації); Maximum Plant Input ( $\phi_{\max}$ ) – максимальне значення вхідного сигналу; Minimum Plant Input ( $\phi_{\min}$ ) – мінімальне значення вхідного сигналу; Maximum Interval Value (sec) ( $t_{\max}$ ) – максимальний інтервал ідентифікації в секундах; Minimum Interval Value (sec) ( $t_{\min}$ ) – мінімальний інтервал ідентифікації в секундах;

Simulink Plant Model – завдання моделі Simulink із зазначенням вхідних і вихідних портів, використовуваних при побудові нейромережевої моделі керованої системи.

Елементи НМ відповідають наступним параметрам: розмір прихованого шару  $S = 12$ , кількість елементів запізнювання на вході моделі  $N_i = 2$  і кількість елементів запізнювання на виході моделі  $N_j = 5$ . Дана мережа є статичною. Мережа використовує 1 вектор входу з 6 елементами, має 2 шари з 12 нейронами в першому (прихованому) шарі і 1 нейроном у другому (вихідному) шарі. Використовувані функції активації: гіперболічного тангенса (tansig) - в першому шарі, лінійна (purelin) - у другому шарі при цьому помилка навчання, а так само помилка на контрольній і тестовій множині є не перевищує 10 - 3. Успіх навчання або тренування НМ (рис. 5.26) в значній мірі залежить від довжини навчальної вибірки (NB) і такту дискретності  $\Delta t$ , що визначає інтервал між двома послідовними моментами знімання даних. Оптимальними в розв'язуванні задачі є: NB = 10000,  $\Delta t = 0,001$  с.

Використовуваної в моделі НМСУ  $\alpha$ , 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 [116]:

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

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;  $y_r$  и  $y_m$  – бажана і реальна реакції моделі. Величина  $\rho$  визначає внесок потужності (швидкості) управління.

Залежно від режиму роботи СПУ запропонована нейромережева САУ автоматично вибирає оптимальне значення коефіцієнту надлишку повітря ( $\alpha$ ) на відміну від традиційної, що підтримує значення коефіцієнту без змін на віх режимах роботи СПУ. Ефективність роботи НМСУ досягається за рахунок зміни кількості повітря (теоретичного обсягу повітря), що подається дуттєвим вентилятором в систему горіння палива з метою досягнення необхідного процентного вмісту кисню у вихідних газах, або  $\alpha$ . Перехідні процеси модельованої НМСАУ показані на рис. 5.27.

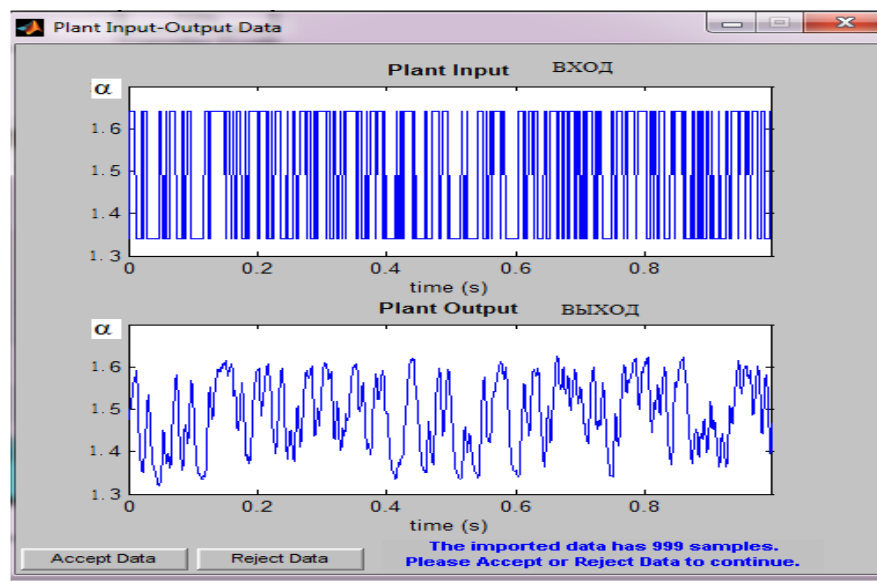


Рис. 5.26. Моделювання нейромережевої системи ідентифікації об'єкту управління

Апробація запропонованої НМСАУ оптимізації процесу горіння проводилася також на двох інших режимах роботи СПУ. Аналіз показників якості перехідних

процесів (рис. 5.27) продемонстрував їх відповідність очікуваним значенням (час регулювання 300 с, відхилення дорівнює нулю).

Для додаткової перевірки ефективності запропонованої НМСАУ проводилося моделювання імітації зміни парового навантаження агрегатів СЕУ на ДПК (рис. 5.28). Перехідні процеси НМСАУ показані на рис. 5.29.

Експерименти підтвердили, що для забезпечення динамічної відповідності між витратами повітря і палива необхідно, щоб сигнали за видатками повітря і палива були малоінерційними (запізнювання близько до нуля, постійна часу не більше 3 – 5 с). Для підтримки гранично малих надлишків повітря необхідно забезпечити досить точну стабілізацію розрідження в перехідних режимах. Досягається це подачею на регулятор розрідження додаткового сигналу динамічного зв'язку від регулятора повітря, або випереджаючого сигналу по витраті палива (навантаженні).

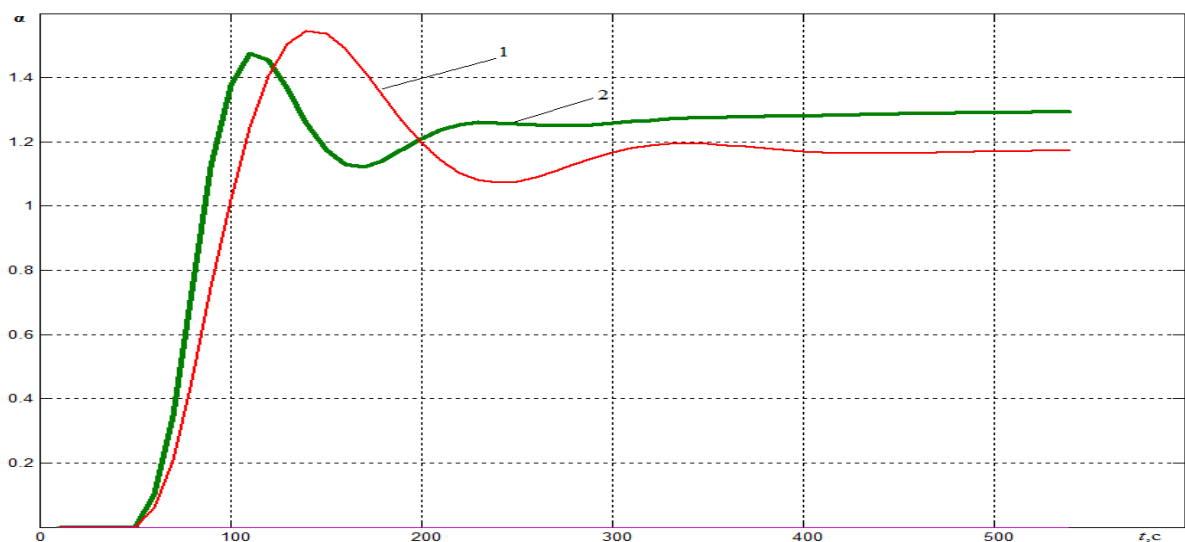


Рис. 5.27. Процеси нейромережевої системи оптимізації  $\alpha$  в залежності від теплового режиму СПУ: № 1 – режим теплового навантаження 0,15 підтримуваний НМК; № 2 - навантаження 0,15 % САУ з ПІ-регулятором (№ 1, 2 сталий режим роботи СПУ)

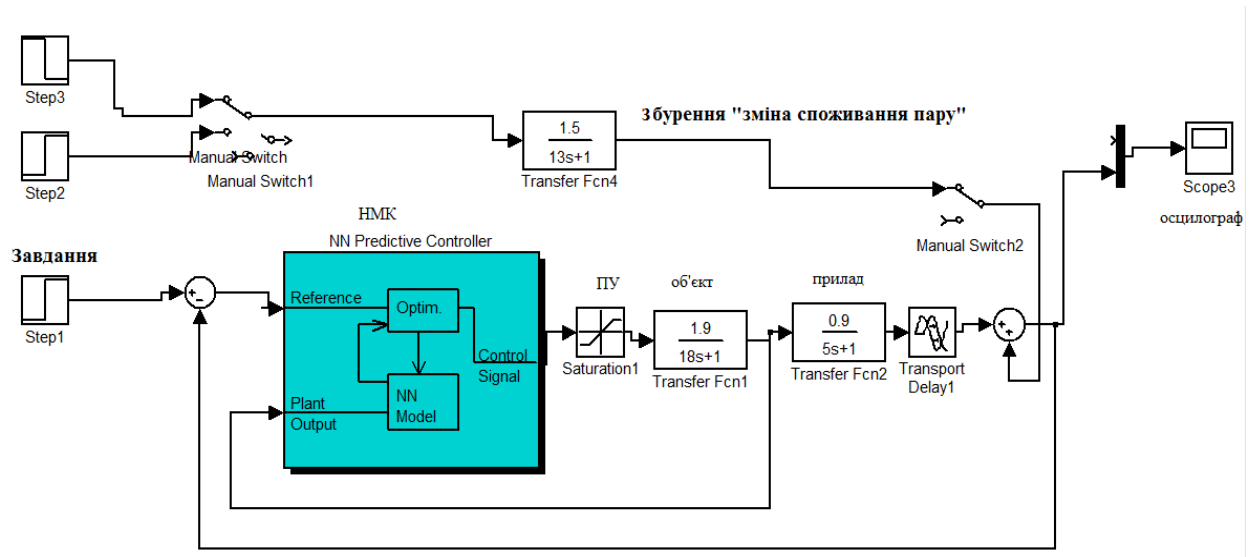


Рис. 5.28. Модель НМСАУ коефіцієнтом надлишку повітря при впливі каналу збурення «зміна першого навантаження СЕУ»

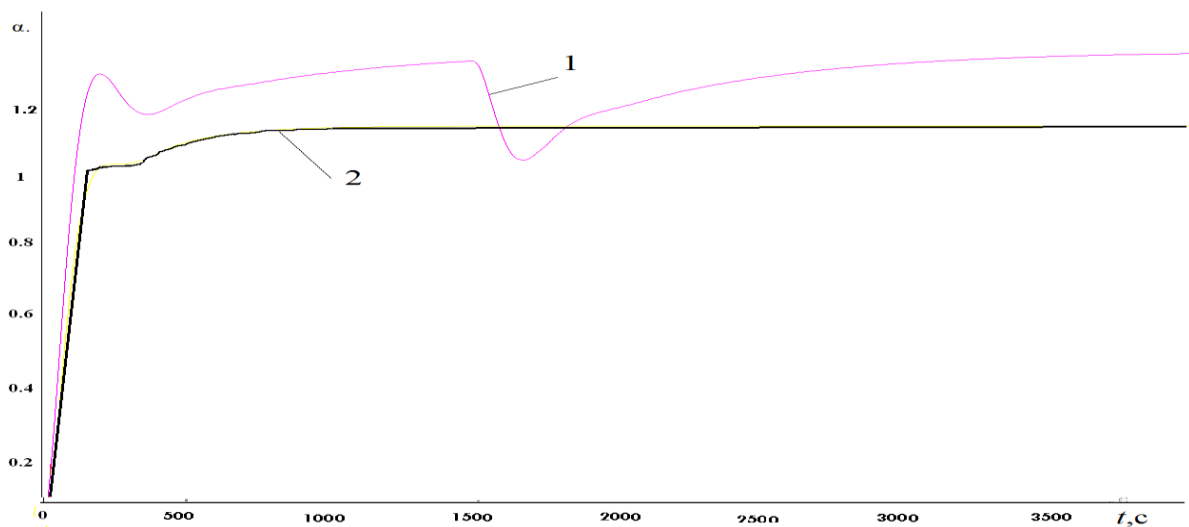


Рис. 5.29. Перехідні процеси нейромережевої системи оптимізації коефіцієнту надлишку повітря в САУ горіння палива: 1 – перехідний режим, викликаний збільшенням теплового навантаження (падіння  $\alpha$  з 1,25 до 1,05) і його подальшим зниженням навантаження до 0,15 (зростання  $\alpha$  до 1,25); 2 – усталений режим роботи СПУ танкера при тепловому навантаженні 0,5 від номінального ( $\alpha = 1,1$ )

У практичному плані запропонована нейромережева САУ процесу горіння палива в СПУ моделювалася на використання поширеним модульним пальником Aalborg KBOG-E з розпилом під тиском. Aalborg KBOG-E являє собою двоохпаливний пальник, що відповідає зростаючому світовому попиту на універсалізацію використання суднового палива [178]. При використанні з котлами невеликої потужності пальник може працювати на зрідженому природному газі, що є альтернативою важкого палива (HFO) і малов'язкому судновому паливу (MGO) на танкерах СПУ, а також на інших судах, таких як суховантажі і контейнеровози, що перевозять цистерни з зрідженим газом. Двоохпаливний пальник Aalborg KBOG-E призначений для допоміжних парових котлів Aalborg OS, паропродуктивність яких знаходиться в діапазоні 5,6 – 25,5 т /год і 0,75 – 5,0 т/год, відповідно [177].

#### 5.4. Рециркуляційний метод зниження вмісту $\text{NO}_x$

##### в димових газах СПУ

На підставі досліджень [173] відомо, що зниження виникнення  $\text{NO}_x$  може бути досягнуто шляхом впливу на максимальну температуру горіння, що забезпечується введенням газів рециркуляції. Димові гази з температурою 300-400 °C відбираються перед повітропідігрівачем і спеціальним рециркуляційним димососом, і подаються в топку. В результаті максимальна температура в топці знижується на 120-130 °C і падає концентрація кисню в зоні горіння, що також зменшує утворення паливних  $\text{NO}_x$ . При цьому ККД парового котла знижується порівняно мало (0,01 - 0,03% на 1 % рециркульованих газів) [76,114,173].

Технічно можливо забезпечити рециркуляцію і без спеціального рециркуляційного димососу. Для цього в димоході котла поблизу димососу

встановлюється спеціальний язовий шибер, що дозволяє регульовано відбирати близько 20 % димових газів направляти їх на вхід дуттьового вентилятора. Використання даних технологічних рішень, спрямованих на зниження шкідливих викидів, з урахуванням їх ефективності на промислових парогенераторах і в умовах зростаючої актуальності представленого напрямку і посилення вимог шостої конвенції МАРПОЛ [131], представляється доцільним і в судових парогенеруючих установках.

Ефективність придушення утворення оксидів азоту при введенні газів рециркуляції визначається наступними факторами: місце відбору газів на рециркуляцію; умовами їх введення в топку; ступенем рециркуляції  $r$ , % яка відповідає відношенню витрати димових газів в системі рециркуляції до загальної витрати газів що виходять з димової труби; розподілом газів рециркуляції за обсягом камери згоряння; станом котла.

Існує кілька способів введення газів рециркуляції в топку (рис. 5.30) [173]:

- в під (нижньої частини) топки (процес 1);
- в шліц під пальниками (процес 2);
- в повітропровід гарячого повітря (процес 3);
- безпосередньо в пальниковий пристрій в один з повітряних потоків або між потоками повітря (процес 4);
- в потік палива на пальник (процес 5).

Як показано на рис. 5.30, ефективність зниження викидів оксиду азоту при реалізації представлених способів суттєво різниться.

Застосування рециркуляції є одним з найдоступніших і недорогих засобів зниження утворення оксиду азоту в топкових камерах агрегатів СЕУ. У ряді випадків, зниження викиду оксидів азоту в експлуатаційних умовах на 30 - 35 % можна здійснити без будь-якої реконструкції. Так, в дослідженнях [173], проведених при спалюванні мазуту в промисловому парогенераторі ТГМП -114 з прямострумними пальниками, таке зниження досягалося навіть при подачі



рециркулюючих газів з  $r = 23 \%$  при  $T = 350 \text{ }^{\circ}\text{C}$  через шліци, розташовані під кожною горілкою при номінальному і  $58 \%$  -му навантаженнях.

Ефективність рециркуляції тим більше, чим вище температура в зоні горіння. Вона знижується при:

- зменшенні навантаження котла;
- зменшенні температури горіння палива;
- збільшенні коефіцієнта надлишку повітря;
- підвищенні вмісту азотовмісних сполук в паливі.

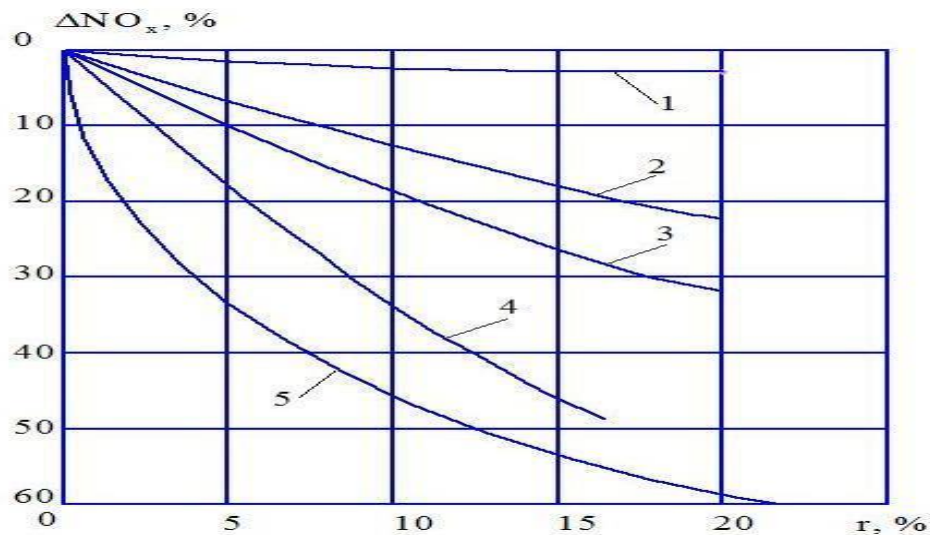


Рис. 5.30. Вплив способу введення газів рециркуляції на зниження концентрації оксидів азоту при спалюванні палива: 1 - введення димових газів в топку; 2 - введення газів під пальник; 3 - введення в повітропровід; 4 - введення в пальник; 5 - введення в потік палива [173]

В димоході СПУ встановлюється спеціальнийшибер (позіція 3 на рис.5.31), що дозволяє регульовано відбирати близько 20 % димових газів направляти їх на повітряпровід дуттьового вентилятора (рис.5.31). При цьому технічному рішенні регулятор розрідження буде підтримувати розрідження в верху топки впливом на напрямні апарати димососу навіть при малих надлишки повітря.

Рішення по вибору способу (дів позиція 4 на рис. 5.31) буде економічним така як впровадження технології введення димових газів на пальник потребує нових конструктивних розробок системи горіння, а при введення газів в систему подачі палива, температура мазуту або дізеля не буде відповідать необхідним стандартам [145].

З метою апробації представленої технології зниження вмісту шкідливих викидів, проведено моделювання НМСАУ рециркуляцією димових газів в повітропровід СПУ марки МАС 35 (дів. рис 5.31). У зв'язку з наявністю нелінійностей в системі управління пропонується замість стандартного лінійного ПД - регулятора скористатися адаптивним нейромережевим регулятором. Реалізація нейромережевого регулятора (FFC) (див. рис. 5. 31) може бути виконана на базі нейрочіпу CM1K фірми The CogniMem Technologies. Даний чіп містить 1024 нейрона, що працюють паралельно. При необхідності збільшення кількості нейронів в мережі, є можливість встановити модуль CME1K з двома нейрочіпами CMK1. Також для контролю поточної витрати повітря, димових газів і палива на контролер FFC подаються сигнали про швидкість обертання двигунів вентилятора, димососа (1, 2) і витрати палива від витратоміра (FE).

Також розглянуті чіпи дозволяють наростити мережу до 8192 нейронів шляхом з'єднання чотирьох таких модулів. Зв'язок з нейроконтролером по комп'ютеру здійснюється по послідовній шині I2C (400 кбіт / с) [121]. На НМК надходять три сигналу (див. рис. 5.31): по каналу зворотного зв'язку (поточного утримання  $\text{NO}_x$  позиція 6 на рис. 5.31, вимірюному газоаналізатором QE); по каналу зовнішнього збурення (поточну витрату пару на агрегати СЕУ - вимірюному витратоміром FE 1-4); по каналу внутрішнього збурення (зміна витрати палива вимірюється витратоміром FE).

Також для якісного управління ступенем рециркуляції  $r = Q_r / Q_{\text{дг}}$ , відбуваються виміри поточної витрати димових газів (датчик FE, позиція 5) і

витрати газів в системі рециркуляції (датчик датчик FE №1, позиція 4). Інформація від засобів вимірювання надходить на адаптивний регулятор (FFC). Контролер в свою чергу управляє кутом поворотушибера (сигнал - позиція 3) для підтримки постійної ступеня рециркуляції незалежно від теплового навантаження СПУ. Також, за запитом від оператора може бути здійснено плавне регулювання швидкості обертання димососа (позиція 2, дів рис. 5.31 ) і вентилятора (позиція 1, дів рис. 5.31) з метою підтримки заданого витрати димових газів і розрядження в топці котла.

Досліджуваним структурним елементом математичної моделі котла є газоповітряний тракт, який складається з газоходу і повітропроводу. Регульованими параметрами для цієї ділянки є розрідження димових газів у верхній частині топкової камери і надлишок повітря, що характеризує економічність процесу горіння. При виведенні диференціальних рівнянь газоходу і повітропроводу, як ділянок регулювання, були прийняті наступні допущення: газохід після димососу і повітропровід після дуттєвого вентилятора дуже короткий і що зворотна реакція тиску в топці на витрату мазуту і повітря на вході нехтуємо мала; акумулююча ємність топки і газоходів зосереджена в одному обсязі, а дроселююча здатність газоходів і поверхонь нагріву зосереджена в одній точці.

Регулювання здійснюється шляхом зміни положення направляючого апарату димососу і дуттєвого вентилятора. З урахуванням перерахованих припущень регульовані ділянки можуть бути замінені спрощеною системою, що складається з ємності, дроселя і димососу (дуттєвого вентилятора).

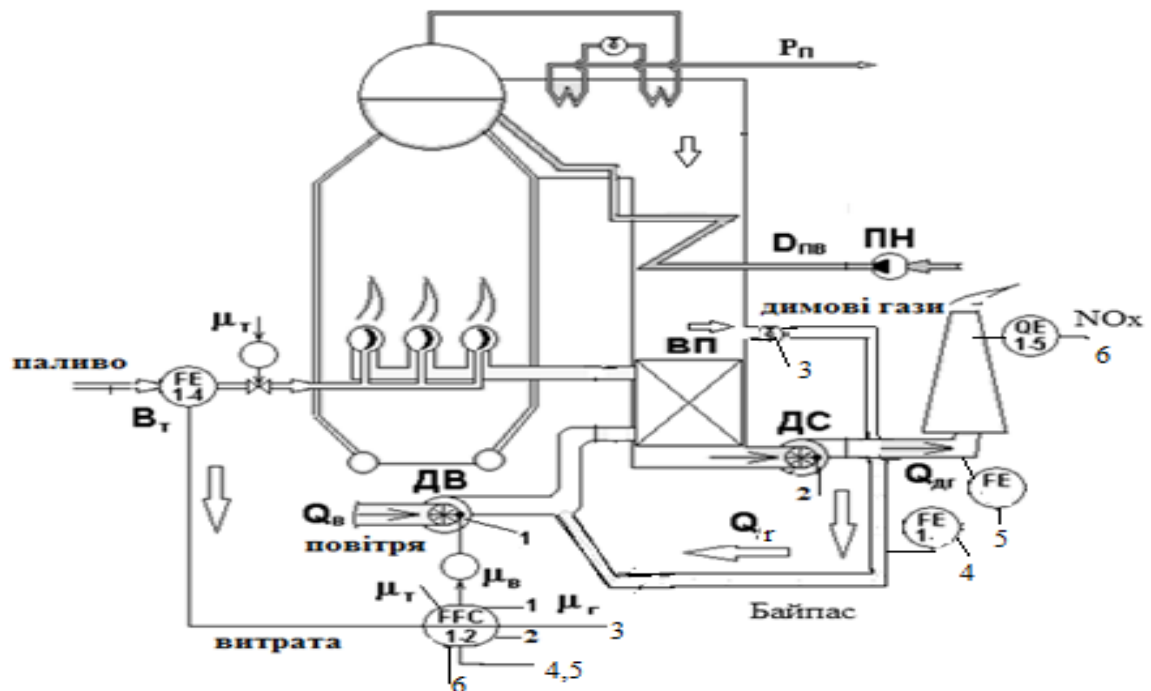


Рис. 5.31. Схема комбінованої неймережевою системи управління процесом рециркуляції димових газів парогенератора марки Mitsubishi Marin Main Boiler MB паропроодуктивністю 50 т/год: ДС - димосос; ДВ - дуттєвий вентилятор; ВП - повітряний підігрівач; ПН - живильний насос; QE - газоаналізатор контролю  $\text{NO}_x$ ; FFC - регулятор рециркуляції; FE - витратомір;  $\mu_i$  - керуючі впливи;  $Q_{\text{дг}}$  - витрата димових газів;  $Q_v$  - витрата повітря;  $P_n$  - тиск пару; 1,2 - сигнали швидкості обертання;  $Q_r$  - витрата газів в системі рециркуляції

Регульованою величиною є відхилення тиску в рециркуляційному газоході від заданого значення; вхідною величиною (регулюючим впливом) - зміна положення направляючого апарату димососу. В якості зовнішнього обурення приймемо зміна витрати газів на притоці. Таким чином, рівняння динаміки має такий вигляд [132]:

$$T_1^{21} \Delta \dot{P}_p + \Delta P_p = k_2^{21} \Delta \varphi_r + k_4^{21} \Delta M.$$

Динамічні властивості повітропроводу, що визначають залежність між змінами подачі повітря в топку котла і положенням направляючого апарату дуттєвого вентилятора  $\Delta\varphi_B$ , описуються рівнянням виду [132]:

$$T_2^{22}\Delta\ddot{M}_L + T_1^{22}\Delta\dot{M}_L + \Delta M_L = k_1^{22}\Delta\dot{\varphi}_B + k_2^{22}\Delta\varphi_B,$$

де  $k_i^n$  і  $T_i^n$  – коефіцієнти, приймаючи постійне значення в заданому режимі функціонування котла ( $n$  – відповідає номеру диференційного рівняння,  $i$  – порядковий номер коефіцієнту);  $\Delta M_L$  – зміна витрати повітря, де:

$$T_1^{21} = (a_L^r - a_p^r) \frac{m_r}{\bar{P}_r} \alpha; \quad k_2^{21} = -b_p^r; \quad k_4^{21} = a_L^r - a_p^r,$$

де  $m_r$  – маса димових газів в газоході котла в стаціонарному режимі роботи, кг;  $\bar{P}_r$  – тиск димових газів в верхній частині топкової камери, Па;  $a_p^r, a_L^r, b_p^r$  – коефіцієнти, які визначаються графічно по витратним характеристикам газоходу і димососу [7]:

$$T_2^{22} = \frac{-a_p^B (a_L^B)^2}{a_L^B - a_p^B} \left( \frac{m_B}{\bar{P}_B} \alpha \right)^2; \quad T_1^{22} = \frac{-2a_p^B a_L^B + (a_L^B)^2}{a_L^B - a_p^B} \left( \frac{m_B}{\bar{P}_B} \alpha \right); \quad k_1^{22} = \frac{b_p^B a_L^B}{a_L^B - a_p^B} \left( \frac{m_B}{\bar{P}_B} \alpha \right); \quad k_2^{22} = \frac{b_p^B}{a_L^B - a_p^B},$$

де  $m_B$  – маса димових газів в повітропроводі котла в стаціонарному режимі роботи, кг;  $\bar{P}_B$  – середнє значення тиску повітря в повітропроводі, Па;  $a_p^B, a_L^B, b_p^B$  – коефіцієнти, які визначаються графічно по витратним характеристикам повітропроводу і дуттєвого вентилятора;  $\alpha$  – коефіцієнту надлишку повітря.

Вихідні дані для розрахунку коефіцієнтів, представлених вище диференційних рівнянь, визначені по напірним характеристикам відцентрового димососу одностороннього всмоктування [76] і гідравлічної характеристики газоходу СПУ МАС 50 [203]. Після розрахунку в [114], на підставі вихідних даних, отримано наступне рівняння:

$$1,93 \frac{dP_p}{dt} + P_p(t) = -15,7\varphi_r(t) + 21,7M(t).$$

Після виконання перетворення Лапласа отримані передатні функції по каналам управління  $W(s)_{\mu-p}$  (зміна положення направляючого апарату - зміна тиску димових газів) і збурення  $W(s)_{M-p}$  (зміна витрати газів - зміна рециркуляційного тиску в газоході СПУ):

$$W(s)_{\mu-p} = \frac{-15,7}{(1,93s+1)}; \quad W(s)_{M-p} = \frac{21,7}{(1,93s+1)}.$$

Сумарна кількість оксидів азоту  $NO_x$  в перерахунку на  $NO_2$  (в г/с, т/рік), що викидаються в атмосферу з димовими газами з урахуванням каналу рециркуляції димових газів, визначається за формулою [160]:

$$M_{NO_x} = B_T \cdot Q_i^r \cdot K_{NO_2}^M \cdot \beta_t \cdot \beta_\alpha \cdot (1 - \beta_r) \cdot (1 - \beta_\delta) \cdot k_n,$$

де  $\beta_r$  – безрозмірний коефіцієнт, що враховує вплив рециркуляції димових газів через пальники на утворення оксидів азоту.

При подачі газів рециркуляції в суміші з повітрям:

$$\beta_r = 0,17 \cdot \sqrt{r},$$

де  $r$  – ступінь рециркуляції димових газів, %;  $\beta_\delta$  – безрозмірний коефіцієнт, що враховує ступінчасте введення повітря в топку:

$$\beta_\delta = 0,018 \cdot \delta,$$

де  $\delta$  – доля повітря, яке подається в проміжну зону факелу (в процентах от загальної кількості організованого повітря), згідно [160] 20 – 30 %;  $k_n$  – коефіцієнт перерахунку.

Для перевірки припущення про доцільність використання технології рециркуляції димових газів в СПУ проведено розрахунок з урахуванням методики представленої вище і витратних характеристик СПУ МАС 50 для теплового навантаження 50 % [205], а також ступеня рециркулюючих газів  $r = 20$  %  $\beta_r$  буде дорівнювати 0,76, а  $\beta_\delta$  складе 0,54. Тоді з урахуванням  $\alpha = 1,11$ , вміст  $NO_x$  у вихідних газах буде:  $M_{NO_x} = 51,5 \cdot (1-0,76) \cdot (1-0,54) \cdot 1,11$

= 61,9 г/м<sup>3</sup>. Таким чином, з урахуванням рециркуляції та оптимального значення вміст NO<sub>x</sub> було зменшено на 29 г/м<sup>3</sup> у порівнянні з діючою САУ горіння підтримує  $\alpha$  без змін рівним 1,22 (див.рис. 5.27 процес 2). Або для одного режиму СПУ МАС 50 з урахуванням похибки вимірювання приладів (до 5 %) більше ніж на 40 %. Після проведення аналогічних розрахунків при інших теплових навантаженнях СПУ отримані дані для навчання НМ (табл. 5.4).

Для моделювання нейромережевої САУ рециркуляції, в умовах впливу збурення, на основі експериментальних і розрахункових даних була складена навчальна вибірка корекції коефіцієнту надлишку повітря в залежності від парового навантаження СПУ (табл. 5.5) для досягнення мінімально можливого значення NO<sub>x</sub>.

Таблиця 5.4.

Навчальна вибірка для НМК оптимального режиму горіння важкого палива за критерієм мінімізації NO<sub>x</sub> та ступенем рециркуляції 20 %

| Навантаження котла, %               | 10   | 30   | 50   | 70   | 90   |
|-------------------------------------|------|------|------|------|------|
| $\alpha$                            | 1,3  | 1,21 | 1,11 | 1,08 | 1,0  |
| NO <sub>x</sub> , мг/м <sup>3</sup> | 15   | 47   | 62   | 78   | 83   |
| ККД                                 | 80,4 | 82,3 | 83,7 | 82,1 | 80,1 |

Навчальна вибірка НМ складалася з матриці вхідних сигналів (оптимальний управляючий вплив адаптивно налаштованого ПД - регулятора для підтримки заданого тиску відхідних газів в контурі рециркуляції або байпасі) і матриці відповідних вихідних сигналів (значень NO<sub>x</sub>). Слід зазначити, що положення направляючого апарату (див. рис. 5.31) безпосередньо впливає на тиск газів в байпасі і відповідно визначає поточне значення NO<sub>x</sub>. З урахуванням простоти і наявності бібліотеки елементів НМ, для навчання нейромережевого контролера були використані спеціалізовані програмні редактори в пакеті MatLab [116], що

реалізують методи еталонного управління (рис. 5.32) і діють на основі алгоритму навчання - зворотного поширення помилки [12]. Нейрони першого шару мають активаційну функцію - гіперболічний тангенс, а у нейронів другого шару активаційні функції лінійні [12, 213].

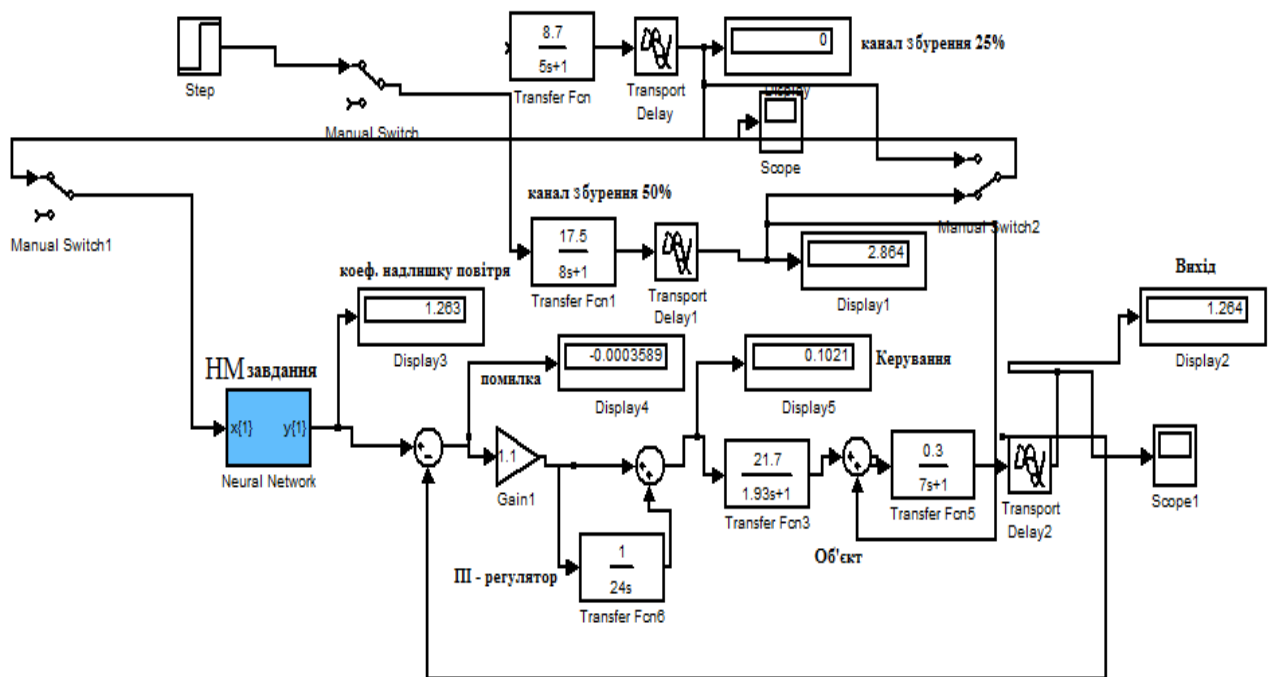


Рис. 5.32. Комп'ютерна модель визначення параметрів еталонної вибірки навчання НМК на прикладі оптимального ПІ - регулятора для декількох теплових режимів СПУ

Таблиця 5.5

Навчальна вибірка (еталонна модель) НМК оптимізації  $\alpha$

|          |       |       |       |       |
|----------|-------|-------|-------|-------|
| $\alpha$ | 1,3   | 1,21  | 1,12  | 1,08  |
| $E$      | -0,45 | -0,36 | -0,24 | -0,09 |
| $U$      | -0,15 | -0,1  | -0,27 | -0,14 |

Запропонована НМСАУ одночасно з корекцією коефіцієнту надлишку повітря (рис. 5.33), мінімізує і зміст  $\text{NO}_x$  у вихідних газах. Моделювання запропонованої



НМСАУ і традиційної (з ПІ - регулятором) САУ процесу рециркуляції димових газів при роботі СПУ на 25 % теплового навантаження показало перевагу (зменшення вмісту на  $110 \text{ мг/м}^3$ ) нейромережевої системи управління, навченої на досягнення мінімально можливого вмісту шкідливих викидів в атмосфері.

При подальшому моделюванні НМСАУ з моделлю управління по каналу коефіцієнт надлишку повітря - вміст  $\text{NO}_x$  на різних теплових режимах роботи СПУ отримані наступні перехідні процеси (рис. 5.35 - 5.37). Порівняльний аналіз процесів НМСАУ на різних теплових режимах роботи СПУ (див. рис. 5.35 - 5.37) продемонстрував зменшення зміст  $\text{NO}_x$  до 55 % в порівнянні з типовою системою управління з ПІД - регулятором. Таким чином, використання запропонованої структури управління представляється перспективною для впровадження на судах.

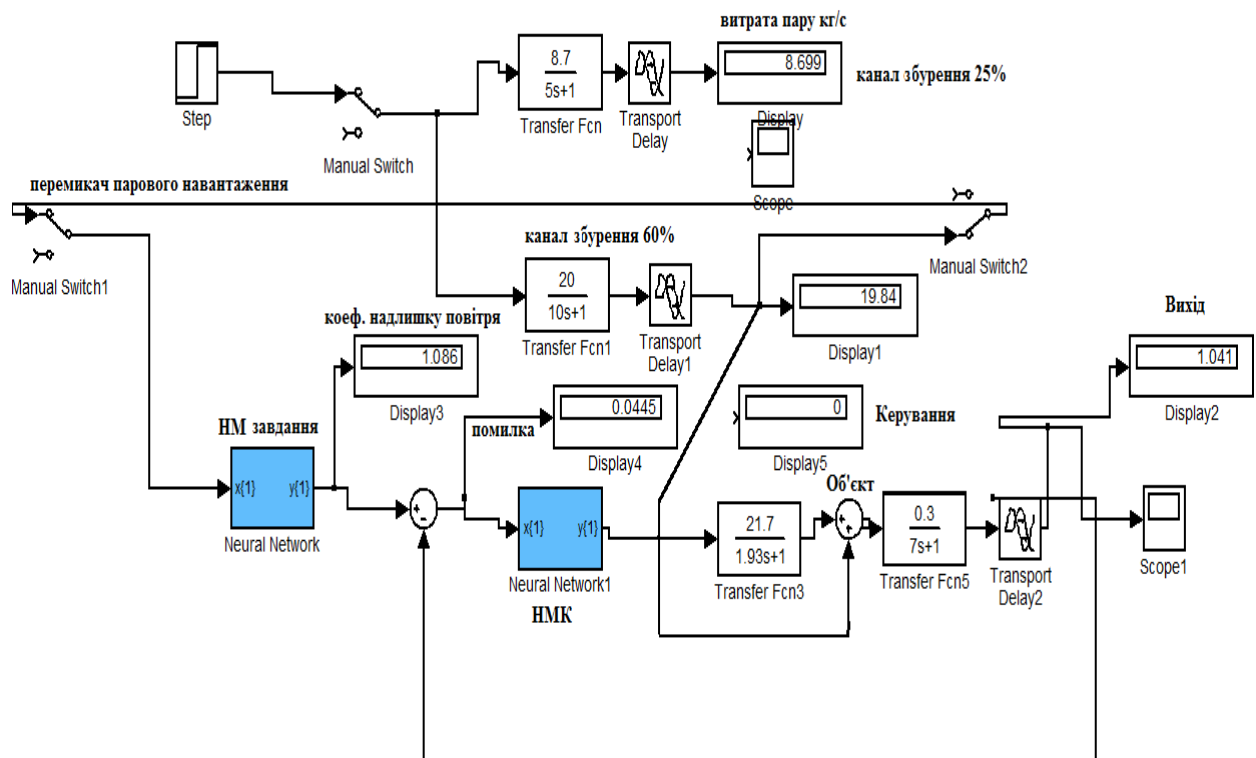


Рис. 5.33. Комп'ютерна модель комбінованої НСУ оптимізацією  $\alpha$  в залежності від парового навантаження СЕУ

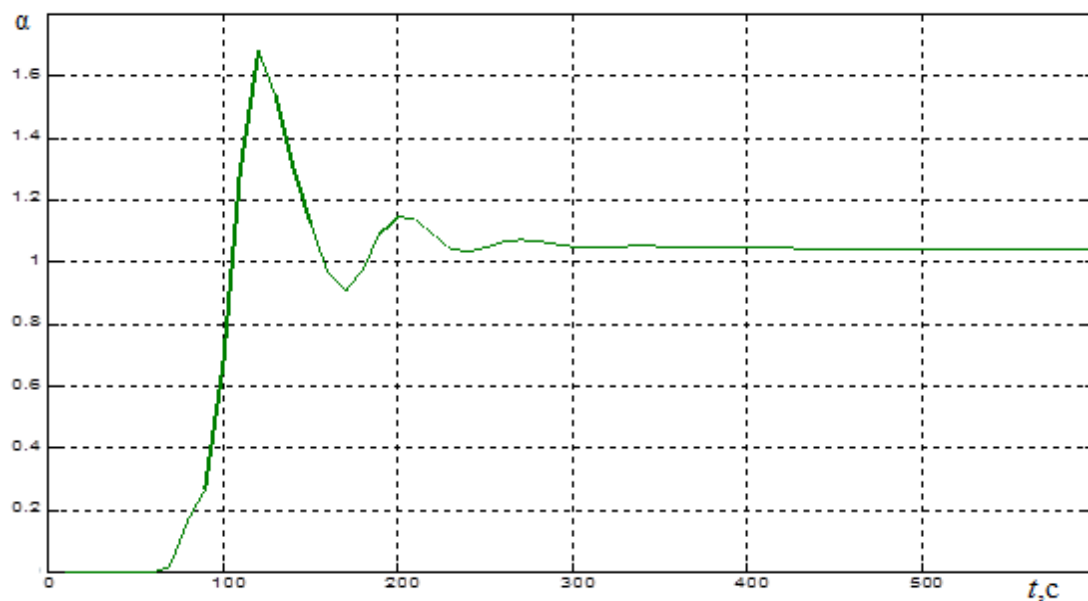


Рис. 5.34. Процес стабілізації  $\alpha$  при роботі СПУ МАС 50 на тепловому режимі, рівному 70 %

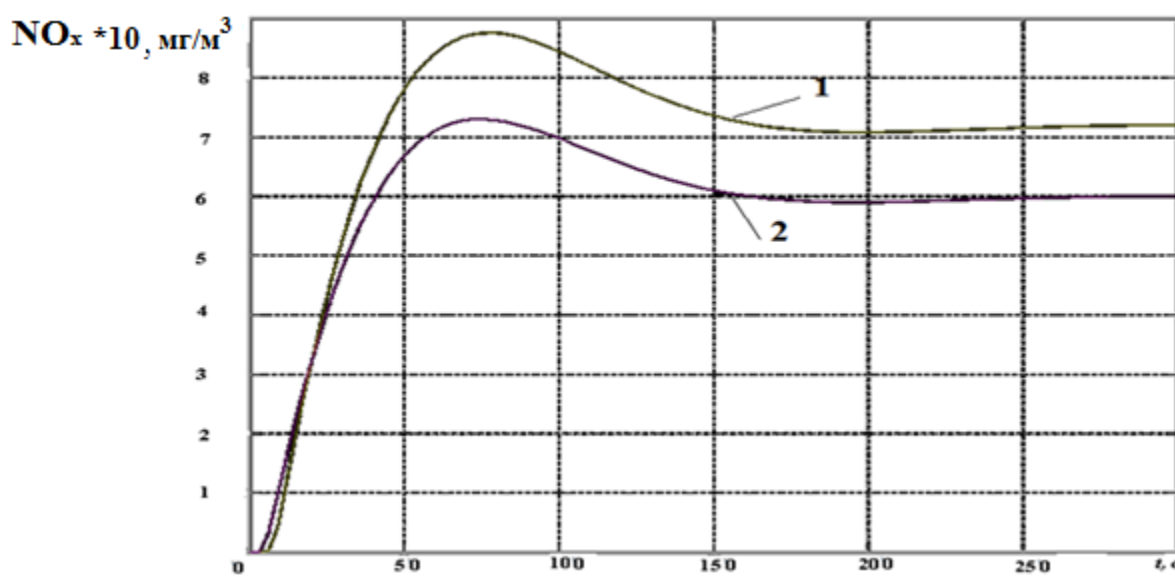


Рис. 5.35. Процеси регулювання вмісту  $\text{NO}_x$  у вихідних газах СПУ МАС 50:  
1 - САУ з ПІД - регулятором ( $\alpha = 1,22$ ); 2 - нейромережева САУ з адаптивної рециркуляцією і оптимізацією ( $\alpha = 1,11$ ) при тепловому навантаженні СПУ 0,5 від номінального

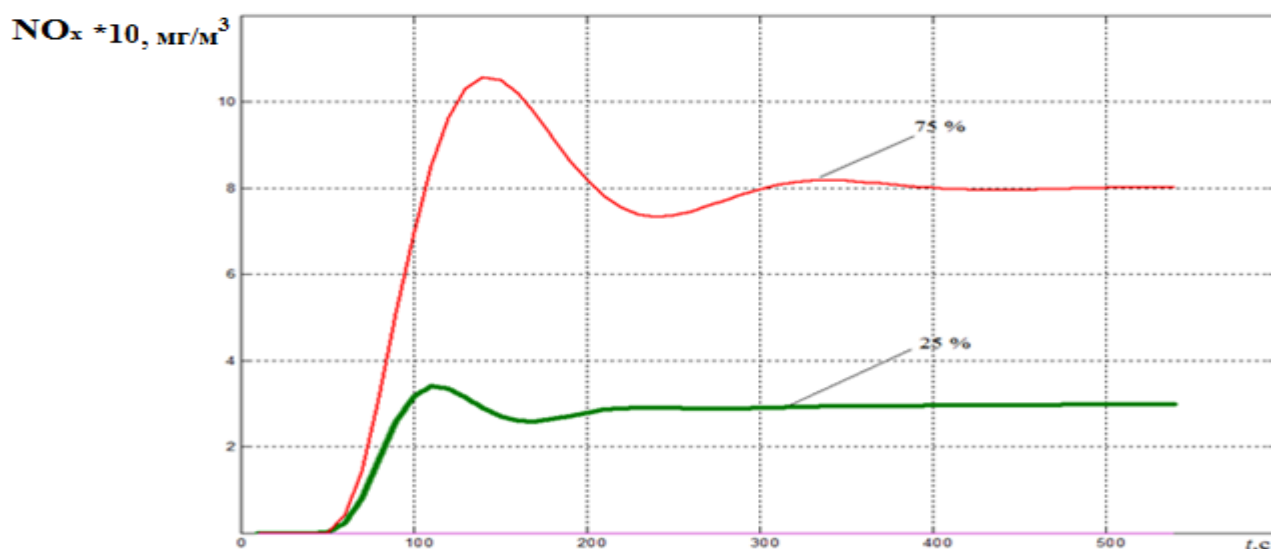


Рис. 5.36. Процеси регулювання вмісту  $\text{NO}_x$  в відхідних газах СПУ  
МАС 50 при роботі на двох теплових режимах

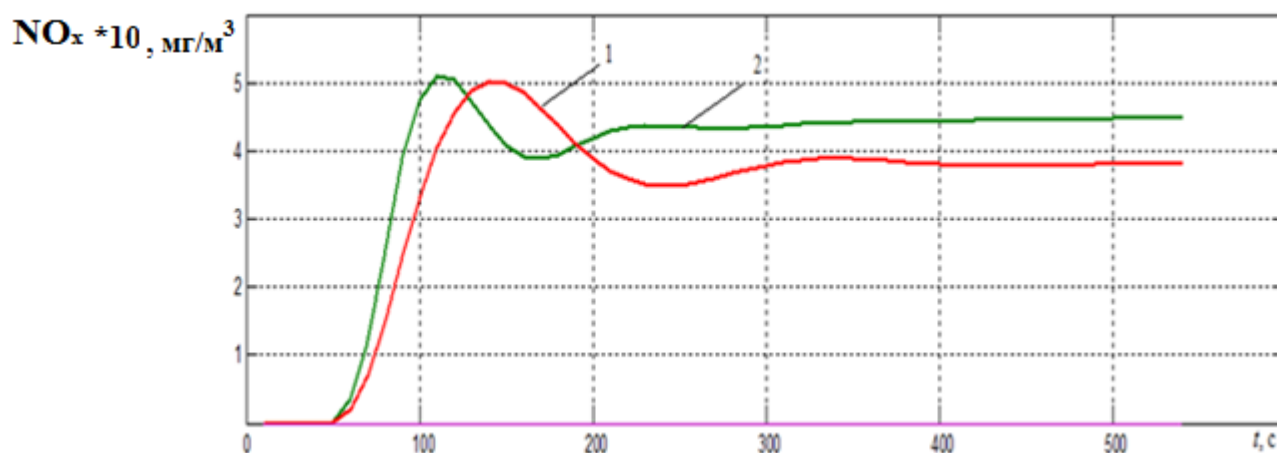


Рис. 5.37. Процеси НМСАУ вмісту  $\text{NO}_x$  в відхідних газах СПУ МАС 50:  
1 – при навантаженні 15 %, 2 – при навантаженні 30 %

Отримані значення  $\text{NO}_x$  відповідають розрахованим за представленою вище методикою, що підтверджує достовірність проведених експериментів і ефективність методики розробки нейромережевої САУ оптимізації  $\alpha$ . Слід зазначити, що запропонована НМСАУ може бути використана для широкого спектру ДПК і КПК середньої і високої потужності зарубіжних і українських

суднохідних компаній. За результатами експериментів висувається нове **наукове положення** - зниження вмісту оксиду азоту досягається адаптивним управлінням процесу рециркуляції димових газів у повітряпровод СПУ з урахуванням як характеристик процесу горіння палива, так режимів її теплового навантаження.

### 5.5. Система оптимізації процесом витрати палива СПУ

У більшості застосовуваних в даний час пристроїв спалювання палива оптимізація режиму горіння забезпечується шляхом підтримки співвідношення витрат палива і повітря (тиску перед пальникових пристроїв) відповідно до режимної карти СПУ [35]. Такий спосіб є недостатньо ефективним, він не дозволяє вести облік зміни температури і вологості повітря, теплотворної здатності палива і ряду інших чинників. У зв'язку з цим, при складанні режимних карт допускають наявність значного надлишку повітря, щоб ні не допустити виникнення хімічного недожога. В результаті в деяких режимах кількість повітря перевищує оптимальне в 1,5-2 рази, що призводить до необхідності нагріву надлишково повітря, що подається, тобто до збільшення теплових втрат з газами і як наслідок до значного зниження ККД СПУ [35].

Діючі САУ оптимізації співвідношення «паливо-повітря» які використовують газоаналізатори, виробляють процес регулювання по величині  $O_2$  у відхідних газах. Однак ці системи, як правило, не працюють в режимі регулювання, а газоаналізатор використовується в моніторинговому режимі, що обумовлено рядом причин [16]:

- концентрація  $O_2$  в димових газах залежить не тільки від інтенсивності дуття, а й від інших умов експлуатації (неконтрольований підсмоктування повітря, зміна характеристик пальників в процесі експлуатації, неідентичність

пальників в СПУ, зміна теплотворної здатності палива викликані переходом з важкого на легке, коливання температури і вологості дутьового повітря тощо), що, в свою чергу, знижує ефективність роботи системи з регулюванням за величиною вмісту кисню;

- обмежене поширення контролерів, що мають адаптивні і стійкі (надійні) алгоритми роботи з газоаналізаторами (багато з розроблених алгоритмів регулювання не враховують перехідні процеси в топці при зміні потужності тобто не мають властивість оптимізації  $\alpha$ ).

Також, відповідно до загальноприйнятої методики налагодження САУ параметрами СПУ [153], рекомендовано на основі залежності ККД і сумарних втрат від надлишку повітря, яка визначається індивідуально для кожного парогенератора, доцільно підтримувати коефіцієнт надлишку повітря  $\alpha_{\text{опт}}$ , при якому ККД котла  $\eta_k \rightarrow \eta_{\text{max}}$  і сумарні втрати  $\sum_{i=2}^6 q_i$  зводяться до мінімуму [55].

Значення  $\alpha$ , в основному, впливає на  $q_2$  (втрати тепла з відхідними газами), і  $q_3$ ,  $q_4$  (втрати тепла від хімічного і механічного недопалу палива); експериментальні залежності впливу втрат на ККД водотрубного парогенератора [57] при значеннях коефіцієнту надлишку повітря  $\alpha$  представлені на (рис. 5.38).

Ділянка регулювання економічності процесу горіння за вмістом кисню в топкових газах складається з топкової камери і примикаючого до неї газоходу конвективного перегрівання до місця вимірювання вмісту  $O_2$ , %. Вхідний регулюючий вплив ділянки - витрата повітря, що надходить в топку  $Q_v$ , а вихідна (регульована) величина - вміст вільного кисню в поворотній камері газоходу за пароперегрівачем  $O_2$ , %. Оптимальне значення  $O_2$  в поворотній камері при номінальному навантаженні і спалюванні пилоподібного палива лежить в межах 3 – 5 %; при спалюванні мазуту і зрідженого газу воно значно менше (від 0,2 до 2 %) [77].

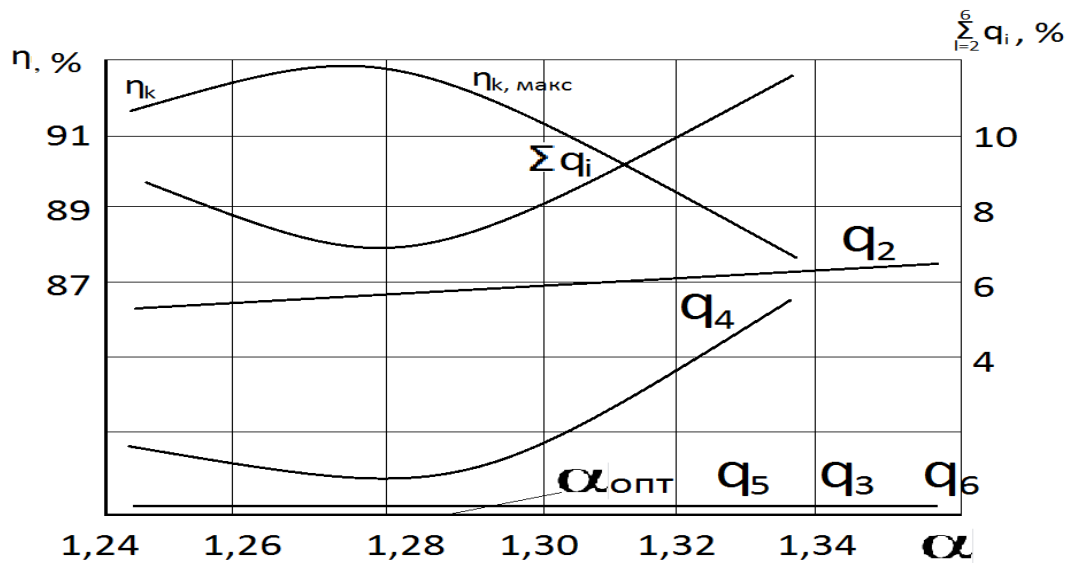


Рис. 5.38. Експериментальні залежності  $\sum_{i=2}^6 q_i = f_\alpha$  и  $\eta_k = f_\alpha$  для СПУ марки «КВ 35/25», встановленого на танкерах паропродуктивністю 35 т/ч [ 57]

Практичний інтерес викликає аналіз експериментальної залежності [57] теплових втрат допоміжного СПУ  $q_2, q_3$  від коефіцієнту надлишку повітря  $\alpha$ . Як видно з наведеної залежності (див. рис. 5.38) зі збільшенням  $\alpha$  значення  $q_2$  зростає, а втрата від хімічної неповноти згоряння  $q_3$  прагне до нуля.

При подальшому зростанні  $\alpha$  величина  $q_3$  знову починає рости внаслідок зниження температурного рівня в топці. А мінімальне сумарне значення  $(q_2 + q_3)$  буде відповідати оптимальному або економічному значенню  $\alpha_{\text{опт}}$ , яке передбачається враховувати при навчанні нейромережевого регулятора процесу горіння палива в топці СПУ. На рис. 5.39 показані експериментальні залежності [57] паропродуктивності  $D$ , коефіцієнту надлишку повітря  $\alpha$ , температури гарячого повітря  $t_{\text{гв}}$ , швидкості газів  $v_{\text{yx}}$ , теплової втрати  $q_2$  і ККД допоміжного СПУ  $\eta$ , отримані в ході теплотехнічних випробувань СПУ паровою продуктивністю 0,7 кг/с. СПУ, оснащений економайзером і повітропідігрівником. Аналіз експериментальних даних (табл. 5.6. та рис. 5.39) показує, що для СПУ існує найбільш економічний режим роботи, при якому ККД приймає максимальне значення. Облік представлених залежностей, а

також математичних моделей, отриманих у другому розділі, може дозволити оптимізувати режими роботи СПУ з метою підтримки максимально можливого ККД для робочого режиму, за рахунок зміни значень  $\alpha$  в нейромережевий САУ горіння. Метод визначення ККД СПУ по прямому балансу [31] вимагає створення складної вимірювальної схеми для визначення витрат і параметрів потоків води і пару, що можливо тільки на спеціальних випробувальних стендах. В експлуатаційних умовах значно простіше визначати втрати теплоти  $q_i$  - за результатами вимірювань параметрів процесів, що протікають в повітряно-газовому тракті котла. В цьому випадку ККД визначають за методом зворотного теплового балансу [31].

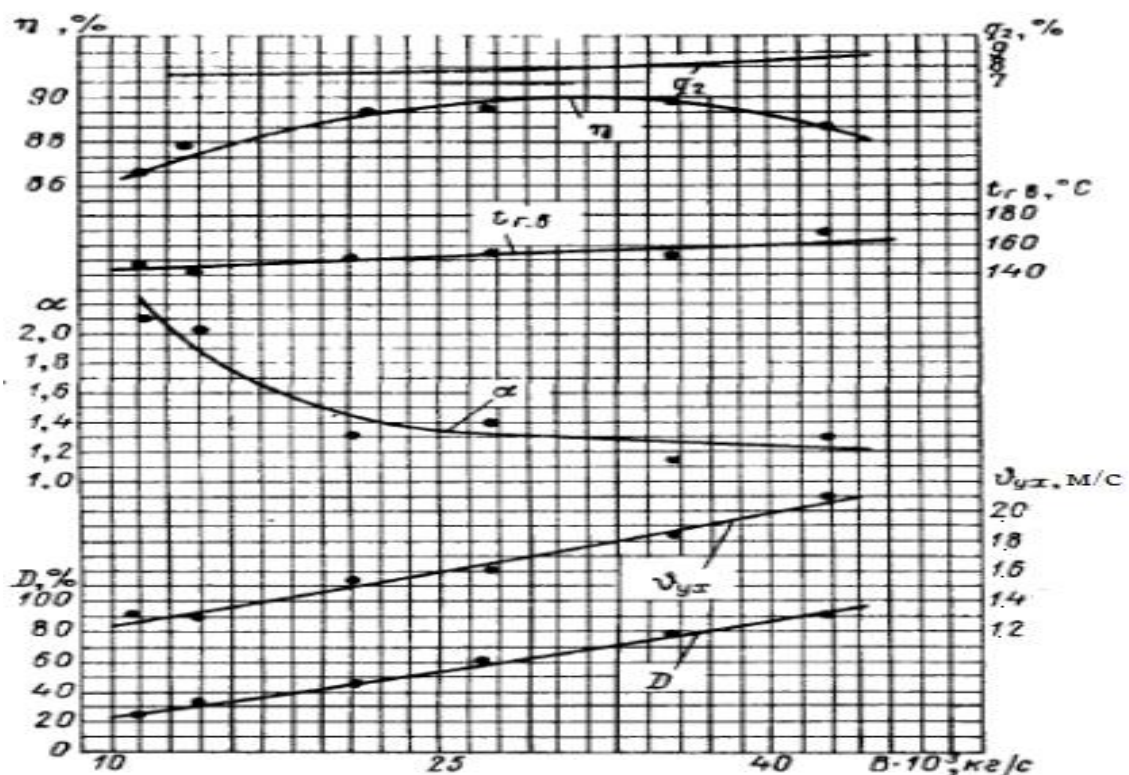


Рис. 5.39. Експериментальні характеристики СПУ паровою продуктивністю 0,7 кг/с [57]

Таблиця 5.6.

Робочі параметри ДПК Mitsubishi MAC-35 В (режимна карта) [205]

| Навантаження                                      | 25 %  | 50 %  | 75 %  | 100 % |
|---------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| парова продуктивність, кг/год                     | 8750  | 17500 | 26250 | 35000 |
| тиск у барабані, кг/см <sup>2</sup>               | 16    | 16    | 16    | 16    |
| температура живильної води, °С                    | 80    | 80    | 80    | 80    |
| температура насиченого пару, °С                   | 203,4 | 203,4 | 203,4 | 203,4 |
| ККД (LHV BASE), %                                 | 82,1  | 82,8  | 81,9  | 80,5  |
| теплотворна здатність HHV (важке паливо), ккал/кг | 10280 | 10280 | 10280 | 10280 |
| теплотворна здатність LHV (легке паливо), ккал/кг | 9713  | 9713  | 9713  | 9713  |
| споживання мазута, кг/год                         | 644   | 1277  | 1937  | 2628  |
| надлишкове споживання повітря, %                  | 31    | 16    | 15    | 15    |
| вміст O <sub>2</sub> , %                          | 5,0   | 3,0   | 2,9   | 2,9   |
| споживання приточного повітря, кг/год             | 11820 | 20740 | 31190 | 42320 |
| споживання димових газів, кг/год                  | 12460 | 22020 | 33130 | 44940 |
| температура навколишнього середовища, °С          | 45    | 45    | 45    | 45    |

В СПУ зазвичай враховують такі теплові втрати: з вихідними димовими газами  $q_2$  від хімічної  $q_3$  і механічної  $q_4$  неповноти згоряння палива і в навколишнє середовище  $q_5$ . Тоді ККД СПУ визначається з зворотного рівняння теплового балансу по формулі [31]:

$$\eta_k = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5), \quad (5.1)$$

де  $q_2$  – втрата тепла з вихідними газами;  $q_3$  – теплові втрати від хімічного недопалу;  $q_4$  – теплові втрати від механічної неповноти згоряння палива;  $q_5$  – втрати тепла через обмундировку.

В свою чергу  $q_2$  визначають по формулі [40]:

$$q_2 = \frac{I_{y_{xz}} - \alpha V_B^O C_B t_B}{Q_c''} \cdot (100 - q_4), \quad (5.2)$$



де  $I_{ухг}$  - ентальпія відхідних газів;  $V_B^O$  - теоретичний об'єм повітря;  $C_B$  - теплоємність повітря;  $t_B$  - температура повітря;  $Q_c^H$  - теплота згоряння палива.

Для СПУ, працюючих на мазуті, втрата  $q_4$  можлива при неправильному обслуговуванні, роботі з надмірним надлишком або недоліком повітря і низьку якість розпилення мазуту. У цих випадках втрата  $q_4$  з'являється внаслідок сажоутворення і коксування мазуту. У нормальних умовах експлуатації котлів з мазутним опаленням втрата теплоти  $q_4$  практично відсутня при всіх його навантаженнях ( $q_4 = 0$ ) [166]. Теплові втрати  $q_3$  і  $q_4$  пов'язані з досконалістю процесу спалювання палива, тому їх відносять до топкових втрат. Втрата теплоти в навколишнє середовище через зовнішні поверхні  $q_5$  визначається в основному розмірами котла, якістю ізоляції, компонованням повітряних каналів і обшивки. При достатньої теплоізоляції і гарному її стани втрата  $q_5$  залежить від режиму роботи. У разі нормального навантаження сучасного ДПК, в якому передбачено охолодження стін повітрям, що поступає в топку, зазвичай  $q_5 = 0,1 - 0,5\%$ . [137]. У формулі (5.1) для аналізу представляють інтерес втрати  $q_2$  і  $q_3$ , так як  $\alpha$  не впливає на  $q_5$ . Згідно [6,31], встановлено, що при оптимальному значенні  $\alpha$ , ККД СПУ буде рости, внаслідок зменшення втрат  $q_2$ , і відсутності втрат  $q_3$ . При проведенні режимно-налагоджувальних випробуваннях на промисловому паровому котлі ДКВР 4-13 компанії Южспецмонтаж була отримана наступна залежність (рис.5.40), можна припустити, що вона буде також і відображати динаміку втрат в СПУ.

Як видно з графіків (див. рис. 5.40) зі збільшенням  $\alpha$  величина  $q_3$  починає зменшуватися, але при цьому зростають втрати  $q_2$ . Таким чином, оптимальне значення  $\alpha$  буде відповідати випадку, коли сумарні втрати  $q_2 + q_3$  будуть мінімальними.

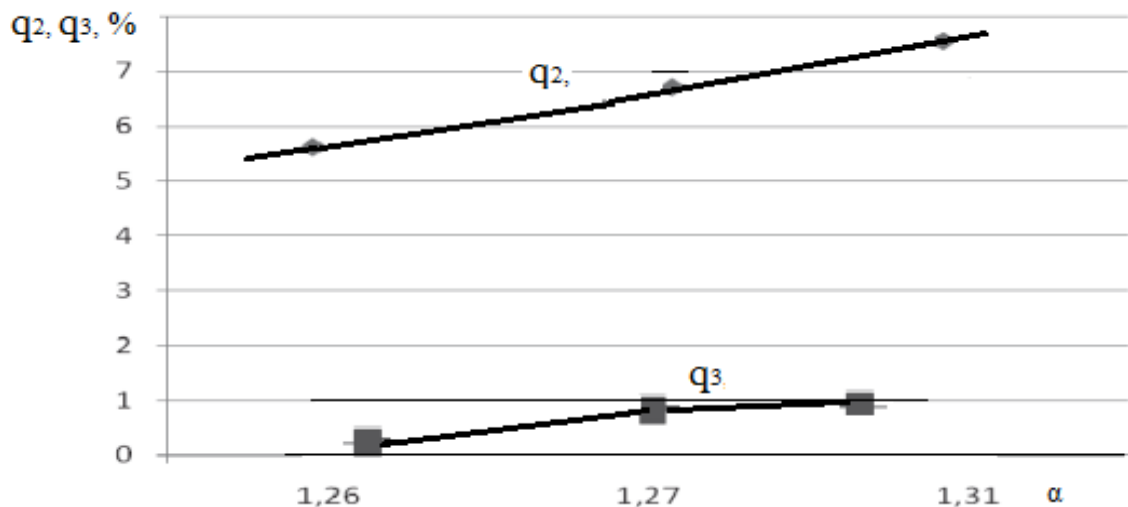


Рис. 5.40. Експериментальні залежності  $q_2$  і  $q_3$  від  $\alpha$  (паровий котел ДКВР 4-13 при роботі на тепловому навантаженні 70 %)

Таким чином, для підтримки ККД СПУ на максимально можливому значенні для найбільш поширених режимів теплового навантаження виникає завдання оптимізації  $\alpha$ . В силу того, що значення  $q_3$  малі в порівнянні з  $q_2$ , пропонується, що ними можна знехтувати. Також слід враховувати, що на  $q_2$ , а отже і ККД СПУ, впливають процеси присоса повітря. Так згідно [159], зниження температури газів в результаті зайвого надходження холодного повітря зменшує кількість тепла, переданого випромінюванням. За результатами дослідів [159] встановлено, збільшення присосів повітря в топку на 0,1 % знижує кількість тепла, переданого випромінюванням, до 4 - 5 %. А зменшення теплосприйняття радіаційними поверхнями нагріву викликає перевантаження наступних конвективних поверхонь, в зв'язку з чим температура димових газів збільшується.

Наприклад, за даними [158], присос повітря в топку  $\Delta\alpha_t = 0,1 - 0,2$  підвищує температуру відхідних газів на 4 - 8<sup>0</sup> С. Присоси повітря в газоході котлоагрегату знижують температуру димових газів в зоні присосів і зменшують кількість тепла, переданого поверхнями нагріву, розташованим за місцем

присосу. В результаті цього в наступних по ходу газів поверхнях нагріву збільшується температура димових газів, в той же час дані процеси, як правило, не контролюються на СПУ. Підвищення температури відхідних газів призводить до збільшення втрат з газами  $q_2$  і отже до додаткових витрат палива  $\Delta B$  на вироблення однієї і тієї ж кількості пару.

Таким чином, для оптимізації ККД СПУ пропонується також дооснастити САУ горіння додатковими датчиками (розрядження в топці і вмісту кисню у вихідних газах) для контролю присосів повітря. Для визначення оптимальної області значень  $\alpha$ , які дозволяють мінімізувати втрати  $q_2$  і сутенно збільшити ККД СПУ, було проведено тепловий розрахунок для декількох теплових режимів роботи. Приклад розрахунку для одного режиму СПУ (65 %) представлений нижче.

Склад горючої маси (флотський мазут М 100) [31]:

$$C^{\Gamma} = 86,5 \% ; H^{\Gamma} = 12,6 \% ; N^{\Gamma} = 0,3 \% ; O^{\Gamma} = 0,2 \% ; S^{\Gamma} = 0,4 \% ; A^{\Gamma} = 0,05 \% ;$$

$$W^{\Gamma} = 1,5 \% ; Q_c^{\Gamma} = 40800 \text{ кДж/кг.}$$

Вихід золи (позначається  $A^P$ ) при спалюванні мазутів не перевищує 0,1 – 0,3 %. Вміст води (вміст вологи  $W^P$ ) в мазутах коливається в широких межах: від 0,5 до 5 %. Обводнення мазутів відбувається в основному в процесі транспортування.

Состав рабочей массы топлива согласно [72]:

$$C^P = C^{\Gamma} \frac{100 - W^P - A^P}{100} = 85,16;$$

$$H^P = H^{\Gamma} \frac{100 - W^P - A^P}{100} = 12,4;$$

$$N^P = N^{\Gamma} \frac{100 - W^P - A^P}{100} = 0,29;$$

$$O^P = O^{\Gamma} \frac{100 - W^P - A^P}{100} = 0,19;$$

$$S^P = S^{\Gamma} \frac{100 - W^P - A^P}{100} = 0,39.$$

Теоретичний об'єм повітря [72] складає:

$$V_B^O = 0,089 \cdot (C^P + 0,375S^P) + 0,266H^P - 0,033O^P = 10,86 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Приймаючи:  $I_{y_{x2}} = 4000$  кДж/кг по діаграмі димових газів при температурі відхідних газів  $t_{y_{xg}} = 230$  °С;  $t_B = 45$  °С;  $C_B = 1,33$  кДж/кг К, з урахуванням оптимізації НМСАУ  $O_2 = 2,4$  %, і з урахуванням, що тоді  $\alpha$  складає 1,13 згідно (5.2) втрати  $q_2$ :

$$q_2 = \frac{4000 - 1,13 \cdot 10,86 \cdot 1,33 \cdot 45}{40800} \cdot 100 = 8,0 \text{ \%}.$$

Втрати  $q_3 = 1,3$  % – приймається середнє значення для ДПК;  $q_5 = 0,5$  % – приймається для ДПК при навантаженні 50 % від номінального [77].

Тоді ККД бруто (5.1) СПУ МАС 35:

$$\eta = 100 - (8,0 + 1,3 + 0,5) = 90,2 \text{ \%}.$$

Таким чином, як показали розрахунки при  $\alpha = 1,13$ , ККД СПУ склав 90,2 % , що на 7 % більше, ніж у діючого СПУ МАС 35 при роботі на режимі 50 % від номінального і при  $\alpha = 1,18$ . (ККД дорівнює 82,8 % (див. табл.5.6.).

З урахуванням оптимального значення  $\alpha$  і системи контролю процесів підсосу повітря проведено розрахунок приросту ККД СПУ за рахунок зменшення присосів повітря в топку і газохід. Прийняте теплове навантаження СПУ дорівнює 30 %. Вихідні дані для розрахунку представлені в табл. 5.7.

Таблиця 5.7.

Вихідні дані для розрахунку приросту ККД СПУ МАС 35

| Параметри                                               | До оптимізації $\alpha$ і без контролю присосів повітря | Після оптимізації $\alpha$ і з процесом зниження присосів повітря |
|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| Температура відхідних газів за повітряним економайзером | 230                                                     | 210                                                               |
| Коефіцієнт надлишку повітря                             | 1,31                                                    | 1,12                                                              |
| Втрати з відхідними газами $q_2$                        | 8,0                                                     | 5,2                                                               |

Зниження втрат  $q_2$  для СПУ МАС 35 визначені по формулі [158]:

$$\Delta q = \left( \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{\alpha_1} \right) + \left( \frac{t_1 - t_2}{t_1} \right) \times q_2,$$

де  $\alpha_1$  – коефіцієнт надлишку повітря до зменшення присосів (1,31);  $\alpha_2$  – коефіцієнт надлишку повітря після зменшення присосів (1,12);  $t_1$  – температура відхідних газів за повітряним економайзером до зменшення присосів, 230 °С;  $t_2$  – температура відхідних газів за повітряним економайзером після зменшення присосів, 210 °С;  $q_2$  - втрати тепла з відхідними газами до зменшення присосів, 8 %.

Після підстановки значень отримали:

$$\Delta q = 1,2.. \%.$$

Таким чином, після зниження присосів повітря зверх нормативу, вдалося збільшити ККД СПУ на 1,2 %. Можна відмітити, що проведений розрахунок враховував зниження присосів повітря тільки в газоході СПУ. Вмісті з тим, за умови автоматичного контролю і подальшого зниження присосів повітря в топці СПУ також можливе збільшення ККД на 1 – 3 %. Таким чином, розрахунки показали, що з урахуванням оптимізації  $\alpha$  і зниження присосів повітря можливе збільшення ККД СПУ на сталому режимі до 9 %.

Для перевірки припущення про можливість збільшення ККД за рахунок оптимізації  $\alpha$  і , таким чином зниження витрати палива, в порівнянні з чинним ДПК МАС 35, працюючому на тепловому навантаженні, що дорівнює 50 %, проведено розрахунок попереднього теплового балансу і витрати палива. Дані розрахунку представлені в таблиці Додатку І.

Таким чином, при вихідній витраті палива СПУ МАС 35 на навантаженні 50 %, рівному 0,35 кг/с (див. табл.5.6.) з урахуванням зростання ККД СПУ після оптимізації  $\alpha$  і зниження присосів повітря, витрата склала 0,28 кг/с, тобто економія палива на прикладі одного режиму склала 20 %. Можна відзначити, що

значний приріст ККД (до 10 %) за попереднім розрахунком можливий тільки в умовах мінімізації втрат з газами, втрат пов'язаних з недопалом і присосами повітря. У реальних умовах роботи СПУ і з урахуванням похибки засобів вимірювання і управління горінням палива підтримка максимального ККД, згідно з розрахунком, при максимально допустимих  $q_2$  і  $q_3$  можливо на рівні 88 % (приріст до 8% в залежності від теплового режиму і стану поверхонь нагріву). Таке зростання ККД дає згідно з розрахунком за наведеною нижче формулою [14] економію палива  $\Delta B$  до 18 %.

$$\Delta B = \frac{D_k(i_n - i_{n\theta}) + D_k(i_{кв} - i_{n\theta})P_1}{Q_n^p \cdot \eta_{k1}} - \frac{D_k(i_n - i_{n\theta}) + D_k(i_{кв} - i_{n\theta})P_2}{Q_n^p \eta_{k2}}.$$

де  $D_k$  – парова продуктивність котла, кг/год;  $i_n, i_{пв}, i_{кв}$  – ентальпія пари, живильної і котлової води, ккал/кг;  $P_1, P_2$  – частка продувки котла до й після його налагодження;  $\eta_{k1}, \eta_{k2}$  – ККД котла до й після його налагодження, %;  $Q_n^p$  – теплотворна здатність палива, ккал/кг.

Частка продувки СПУ визначається як:

$$P = \frac{D_{np}}{D_k} 100\%.$$

де  $D_{np}$  – витрата продувочної води, кг/год

Технічний стан СПУ визначається штатними контрольно-вимірювальними приладами за такими параметрами: тиск і температура робочого середовища (палива, живильної води, пари, повітря, димових газів); рівень води в котлі; паропроductивність (при наявності паромерів) або витрата живильної води (при наявності водомірів); витрата палива і його рівень у видатковій цистерні; показники якості котлової і живильної води; хімічний склад газів (при наявності газоаналізаторів).

Додатково повинні контролюватися параметри: температура відхідних газів, вміст кисню в димових газах, температура зовнішньої поверхні обшивки котла за допомогою контактного термометра або дистанційного вимірювача температури; віброшвидкість механізмів паливної, повітряної і живильної систем - за допомогою приладів вимірювача шуму і вібрації ВШВ-003, а також рівень ударних імпульсів механізмів - за допомогою індикатора стану підшипників типу ІСП-1, ефективність згоряння палива - приладами типу FEM або PCO 960. За допомогою цих приладів можна визначити ККД згоряння палива в топці котла [52].

Порівнюючи ККД згоряння палива в чистому котлі і в забрудненому, можна оцінити ступінь забруднення поверхні нагрівання. При вимірі приладами FEM або PCO 960 необхідно, щоб температура живильної води і навантаження котла по пару були постійними. Технічний стан забрудненого котла вважається хорошим при зниженні ККД згоряння не більше ніж на 2 %, задовільним - зниження ККД згоряння на 2 - 6 % і незадовільним - зниження ККД згоряння більш ніж на 6 % [46].

При відсутності приладів ступінь забруднення поверхні нагрівання котла може бути оцінена по збільшенню температури відхідних газів в порівнянні з чистим котлом. Якщо різниця температури відхідних газів забрудненого котла не перевищує 10 °С в порівнянні з температурою газів чистого котла, то технічний стан забрудненого котла вважається хорошим, задовільним - збільшення температури відхідних газів становить 10 - 40 °С і незадовільним - збільшення температури відхідних газів становить 40 - 60 °С та більше [46].

Для оперативного аналізу продуктів згоряння використовувалися аналізатори димових газів FEM, PCO 961 фірми Neotronic та TESTO 300, які служать для оптимізації процесу горіння і визначення забрудненості поверхні нагрівання СПУ і можуть також використовуватися для визначення коефіцієнта надлишку

повітря, відносна похибка вимірювання приладів згідно з паспортними даними 0,5 % [53].

Прилад FEM містить електрохімічний кисневий датчик, термопару і мікропроцесор, в приладі PCO 961 є додатковий електрохімічний датчик окису вуглецю. Відбір проби газів здійснюється за допомогою зонда. Вимірювання виконуються в перерізі газоходу котла. Зонд призначений для вимірювання температур в діапазоні від 25 до 999 °C, власне прилад може експлуатуватися при температурі 0 - 50 °C (протягом 2 хв до 100 °C). Після включення приладу автоматично регулюються протягом 20 с на температуру і вміст кисню в навколишньому середовищі. Після настройки приладу натискається кнопка використовуваного виду палива (мазут, газ, тверде паливо). Зонд приладу вводиться в газохід через отвір діаметром 10 - 15 мм. Обмежувач зонда регулюється таким чином, щоб датчик знаходився приблизно в центрі перерізу газоходу. Пробу відбирають протягом 1 хв. Температуру газу, вміст кисню і ефективність спалювання палива прочитують на дисплеї при натисканні кнопки «вибір показань».

Ефективність процесу згоряння (ККД СПУ) обчислюється в приладі для вищої теплотворної здатності палива (флотського мазуту) за формулою [46]:

$$\eta_{cz} = 100 - [RL + \frac{K_1 t}{21 - O_2} + K_2 (1121,4 + t)],$$

де згідно з паспортом приладу  $RL$  - втрати теплоти в навколишнє середовище, що приймаються 3 %; поправочні коефіцієнти  $K_1 = 0,712$ ;  $K_2 = 0,00512$  (для рідкого палива - мазуту);  $t$  - різниця між температурою відхідних газів і температурою навколишнього середовища;  $O_2$  - вміст кисню в продуктах згоряння, %.

Стан поверхні нагрівання парогенератора (забрудненість) оцінювалося за різницею між двома значеннями ефективності згоряння палива, одне з яких



відповідає чистим поверхням нагріву котла. Зниження значення ефективності згоряння палива більш ніж на 5 % (при оптимальному співвідношенні паливо - повітря) свідчить про забруднення поверхні нагрівання.

Для зниження температури димових газів і додаткового підвищення ККД котла пропонується обладнати СПУ турбоутілізатором [47], тобто системою інтенсифікації передачі тепла технологічним процесом за допомогою збільшення питомої потоку тепла (зокрема, за допомогою турбулізаторів, збільшують турбулентність потоків робочого тіла). Турбулізатор (завихритель) (рис. 5.41) застосовується для збільшення часу теплопередачі від розпечених димових газів до металевих поверхонь теплообмінника. Таким чином, ефективність значно зростає. ККД СПУ підвищується. Конструкція турбулізатора влаштована таким чином, щоб притискати ламінарні потоки газів до поверхні стінок теплообмінника. Таким чином, турбулізатори виконують три основні функції:

- сповільнюють швидкість потоку розжарених газів, збільшують час теплообміну;
- притискають потік розпечених газів до стінок жаротрубного теплообмінника;
- спрощують чищення теплообмінника котла.

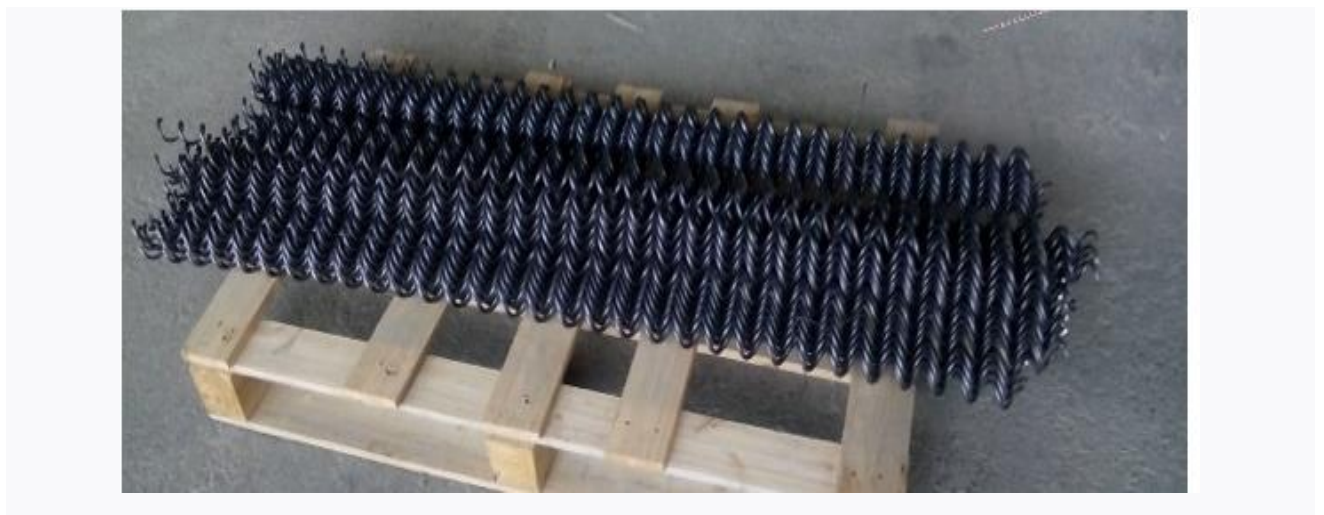


Рис. 5.41. Турбулізатор для СПУ

Згідно з експериментальними даними, що отримано при вимірі параметрів димових газів після установки турбулізатора в димоході промислового парогенератора ГМ - 50 (конструктивного аналога СПУ Mitsubishi MAC 50) температура відхідних газів при номінальному навантаженні котла впала з 177 до 130 °С. При вихідних даних до установки пристрою:  $t_{\text{вих.газ}} = 182 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $t_{\text{окр.середі}} = 35 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $\text{O}_2 = 6,5 \text{ } \%$ , ККД котла склав 80,1 %. Після установки турбулізатора і оптимізації показник  $\text{O}_2$ , ККД котла згідно з показаннями газоаналізатора димових газів TESTO 300 склав 86,3 % (рис. 5.42). Тобто за рахунок нових методів і засобів оптимізації процесу горіння, технічний стан котла вдалося підвищити з задовільного до хорошого.

Таким чином внаслідок корекції  $\text{O}_2$  (зменшення на 3 %), і зниження температури відхідних газів на 47 °С за рахунок турбулізатора вдалося досягти підвищення ККД котла на прикладі одного режиму згідно з розрахунками прилада і з урахуванням похибки виміру, на 6 %, що дало зниження витрати палива в середньому на 15 %.



Рис. 5.42. Фотографія аналізатора TESTO 300 з показниками параметрів парогенератора: температури димових газів (177 °С); вмістом CO (12 %); ККД (86,3 %);  $\alpha$  (1,17);  $\text{O}_2$  (3,4 %); CO (229 ppm)

Для суднових парогенераторів порівняльний аналіз реальних і можливих (розрахункових за умови впровадження НМСАУ оптимізації ККД) економічних показників роботи на прикладі ДПК МАС 35, представлений на рис. 5.43.

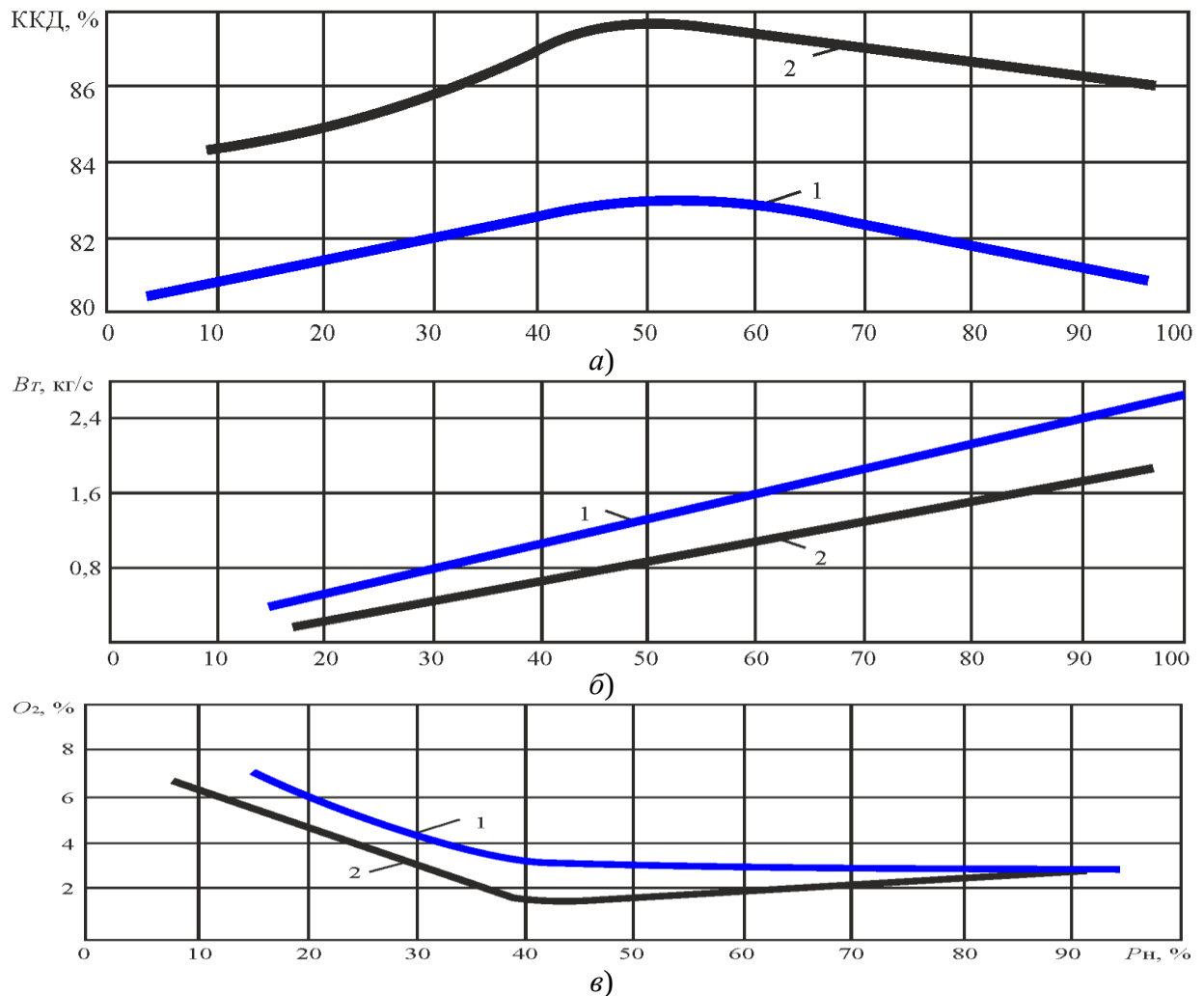


Рис. 5.43. Експериментальні (1) [205] і розрахункові за допомогою нейромережі (2) характеристики залежностей: ККД, витрати палива  $B_T$  і вмісту  $O_2$  від теплового навантаження  $P_H$  СПУ МАС 35:  
а) – efficiency (L.H.V. base); б) – F.O.C. (\* 1,000 кг/год); в) –  $O_2$  Rate (% by volume)

Для досягнення заданих економічних показників (див. рис.5.43 процеси 2) була розроблена нейромережева САУ оптимізації режимів горіння палива (табл. 5.8).

Таблиця 5.8.

Навчальна вибірка для НМК оптимального режиму горіння  
палива по критерію максимізації ККД СПУ МАС 35

| Теплове навантаження котла, % | 10  | 30   | 50  | 70   | 90   |
|-------------------------------|-----|------|-----|------|------|
| $\alpha$                      | 1,4 | 1,16 | 1,0 | 1,11 | 1,16 |
| ККД, %                        | 85  | 86   | 88  | 87   | 86   |

У запропонованій структурі нейроуправління процесами в СПУ (рис. 5.44), інформація про поточний витраті палива на вхід, пропонується до впровадження в САУ горіння палива, нейромережевого контролера (НМК) - (FFC) виробляє коригуючий вплив в САУ процесу повітроподачі. Для випадків зміни марки мазуту або переходу з мазуту на дизельне паливо, а в ряді випадків при бажанні судновласника використовувати в якості альтернативного палива зріджений газ чи вугілля, нейромережева САУ може оснащуватися датчиками (фоторезисторами) QE, контролюючими колір димових газів. Інформація від датчиків кольору диму, після перетворення сигналу в нечіткому модулі QC (див. позиція (1-4) на рис. 5.44), передається на нейромережевий контролер FFC (позиція (1-6) на рис. 5.44) регулює подачу повітря. Також на НСК надходять сигнали по каналах зворотного зв'язку від киснеміра ( $QE^{O_2}$  (1-5)) і датчика поточної витрати повітря (FE (1-1)) (див. рис. 5.44). Таким чином, пропонується нейромережева система управління реалізує комбінований принцип, тому, що отримує інформацію по каналах збурення і відхилення одночасно. Стібілізація тиску пару в барабані здійснюється за допомогою датчика тиску  $P_n$  по каналу (2-2).

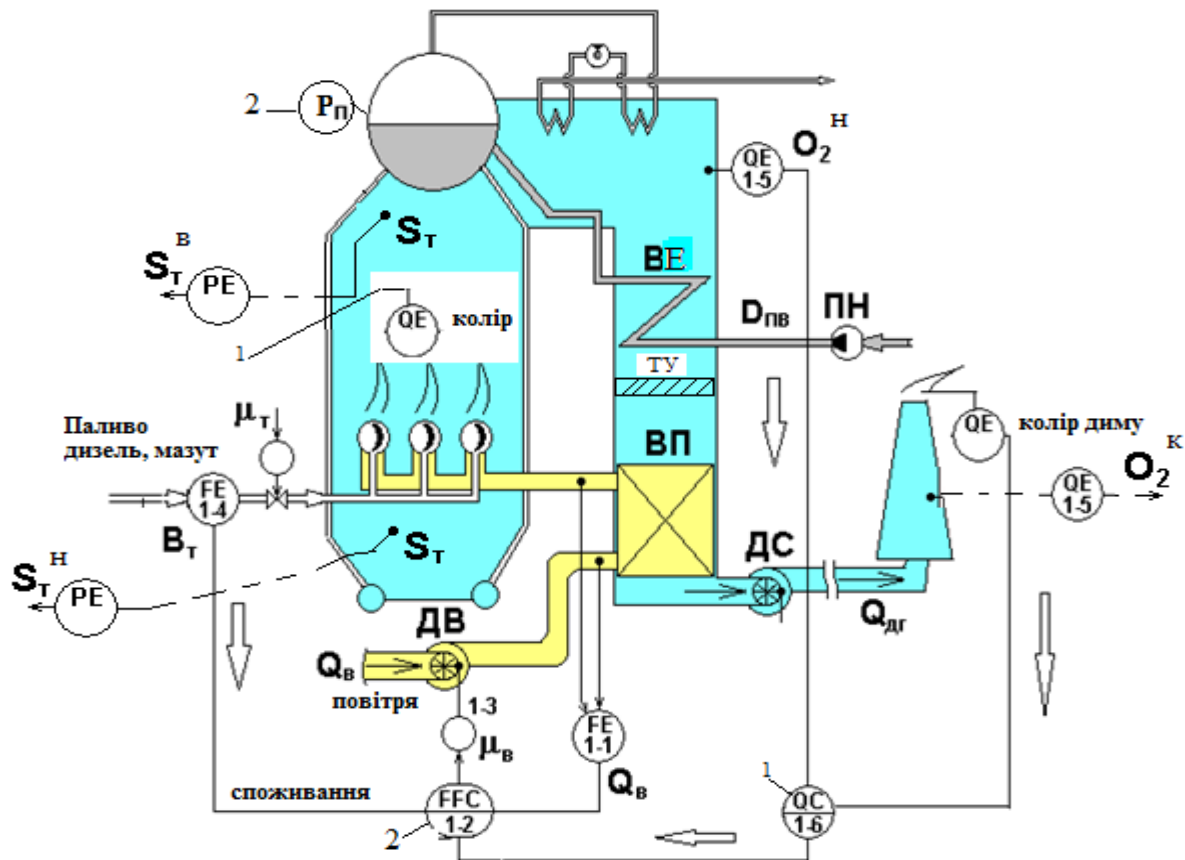


Рис. 5.44. Схема системи нейромережевої системи управління процесом горіння палива в СПУ Mitsubishi Marin Main Boiler MB паропродуктивністю 180 т/ч, з контролем підсосу повітря в топку і газоповітряний тракт:

ДС – димосос; ВП – повітряний підігрівач; ВЕ – водяний економайзер; ТУ – турбулізатор; ПН – живильний насос; FFC – нейромережевий регулятор; FE – витратомір;  $QE^{O_2}$  – киснемір; РЕ – датчики тиску (розрідження повітря);  $S_T^B$  – розрідження повітря в верхній частині топки;  $S_T^H$  – розрідження повітря в нижній частині топки;  $O_2^H$  – вміст кисню в початковому перерізі газоходу;  $O_2^K$  – вміст кисню в кінцевому перерізі газоходу

Можна відзначити, що фактично характеристики паливних клапанів істотно нелінійні і крутизна їх характеристик на знижених навантаженнях в два-три рази вище, тобто будь включення регулятора палива на знижених

навантаження призводить до зміни надлишку повітря на значення, більше регламентованого. Те ж саме відноситься і до регулятора загального повітря. Для забезпечення заданого надлишку повітря при зміні навантаження СПУ рекомендується збільшення часу сервомотором направляючого апарату дуттєвого вентилятора, використання спеціальних приставок для збільшення часу сервомоторів регуляторів палива і повітря [48].

Значення присосів в топку СПУ визначається по формулі:

$$\Delta\alpha_T^H = \frac{\alpha}{2} \left( 1 - \sqrt{\frac{S_T^K}{S_T^H}} \right).$$

Підтримка щільності топки необхідна при спалюванні будь-якого виду палива, але особливо важливо для газо-мазутних котлів при роботі з гранично малими надлишками повітря [31].

При аналізі газів киснеміром або газоаналізатором присоси в газоході визначаються за скороченою кисневою формулою [159]:

$$\Delta\alpha_T^H = 21 \left( \frac{1}{21 - O_2^K} - \frac{1}{21 - O_2^H} \right).$$

Згідно [31] межі концентрації палива, поза якими суміш не запалюється, залежать від хімічного складу палива, його температури і ряду інших менш суттєвих чинників. При тих температурах, які мають місце в реальних судових топках, паливоповітряна суміш здатна до займання при  $\alpha = 0,4 - 1,8$ .

На практиці величину  $\alpha$  і повноту згоряння палива оператори агрегатів СЕУ непрямо контролюють за кольором полум'я в топці і диму, що виходить з труби. При хорошому горінні полум'я повинно бути світло-жовтим або помаранчевим без почервоніння або потемніння в окремих ділянках топки, а дим - світло-сірим або коричневим. Темно-червоне полум'я і темний дим свідчать про нестачу повітря, а світлий вогонь з іскрами і білуватий дим - про надмірне надлишку. Ознакою незадовільної розпилювання палива є поява в полум'я темно-червоних смуг. Про повноту згоряння палива можна судити за кольором полум'я в топці

котла і за кольором диму, що виходить з димової труби СПУ. Ознакою повного горіння палива в судовому парогенераторі є світло-жовте полум'я в топці [7].

Кожному кольору полум'я відповідає певна температура в топці СПУ [7]:

|                                             |          |
|---------------------------------------------|----------|
| - червоний колір                            | 525 °C;  |
| - темно-червоний колір                      | 700 °C;  |
| - вишневий колір                            | 900 °C;  |
| - світло-вишневий колір                     | 1000 °C; |
| - світло-жовтий (світло - солом'яний) колір | 1200 °C; |
| - білий колір                               | 1300 °C; |
| - яскраво-білий колір                       | 1400 °C. |

Ефективність процесу спалювання характеризується відсутністю втрат від неповноти згоряння палива, а також коефіцієнтом надлишку повітря. Чим більше цей коефіцієнт, тим більше втрати теплоти з відхідними з котла продуктами згоряння [158].

За контролю температури пропонується САУ визначає початок наступу інтенсивного процесу горіння палива.

З урахуванням важливості, для ефективної роботи САУ процесу горіння різного виду палива в СПУ кольору диму і полум'я пальника, до нейромережевої САУ горіння (див. рис. 5.44) пропонується додатковий контур оцінки даних параметрів, що діє за алгоритмом І. Мамдані [206-208] і видає оцінку ефективності процесу горіння палива в СПУ. Етапи розробки експертної системи оцінки якості процесу горіння за показниками кольору диму і кольору полум'я пальника представлені на (рис. 5.45 - 5.48).

Вхідними параметрами в нечітку експертну систему є колір диму і колір факела (оцінюваний за допомогою фотодатчиків і термопар), а вихідним - коефіцієнт надлишку повітря  $\alpha$  в топці (рис. 5.48).

Присвоївши кожному кольору відповідну шкалу, програма розраховує коефіцієнт надлишку повітря і показує ефективність процесу горіння палива.

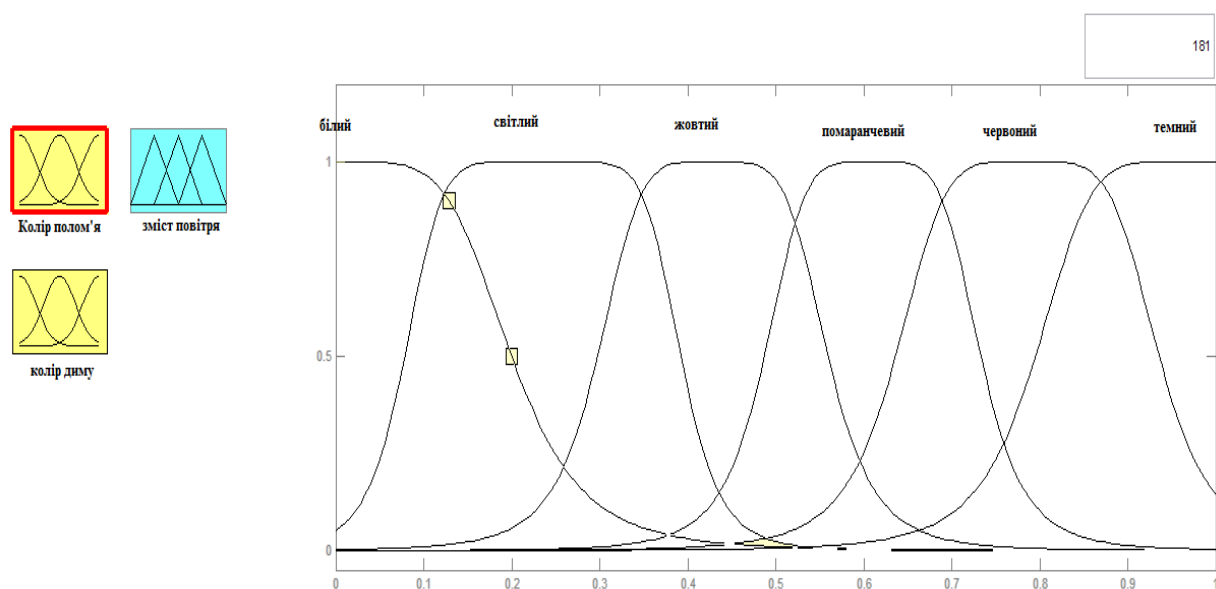


Рис. 5.45. Етап фазифікації параметра «колір полум'я» в програмі FTL

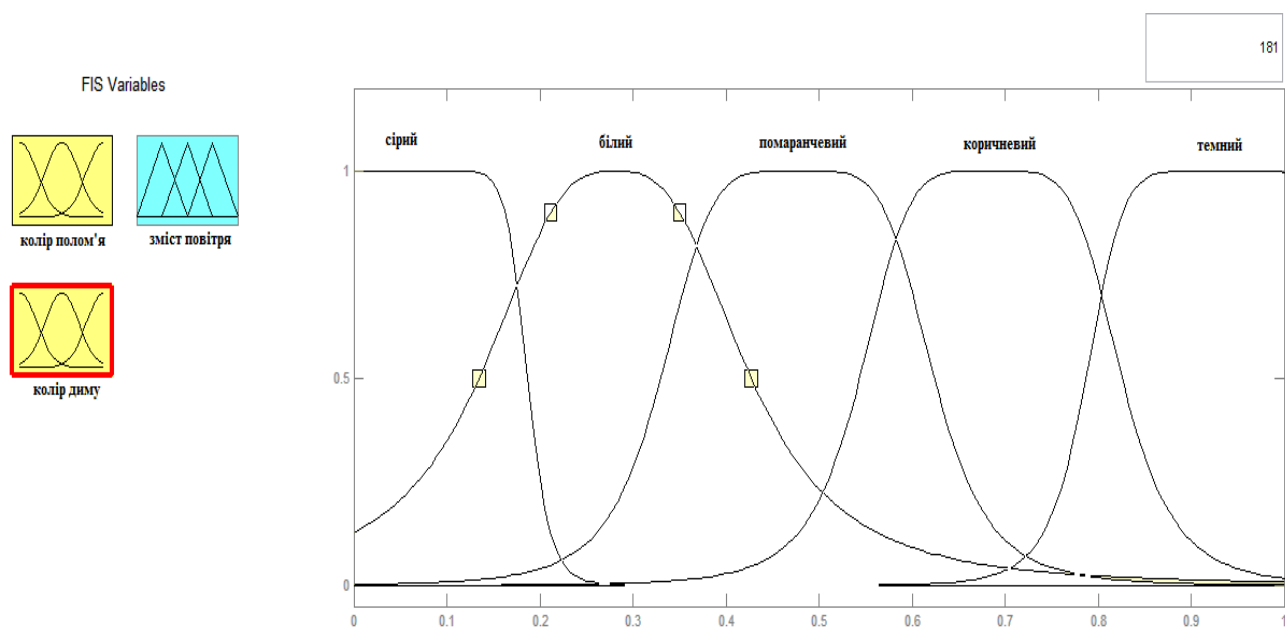


Рис.5.46. Етап фазифікації параметра «колір диму»



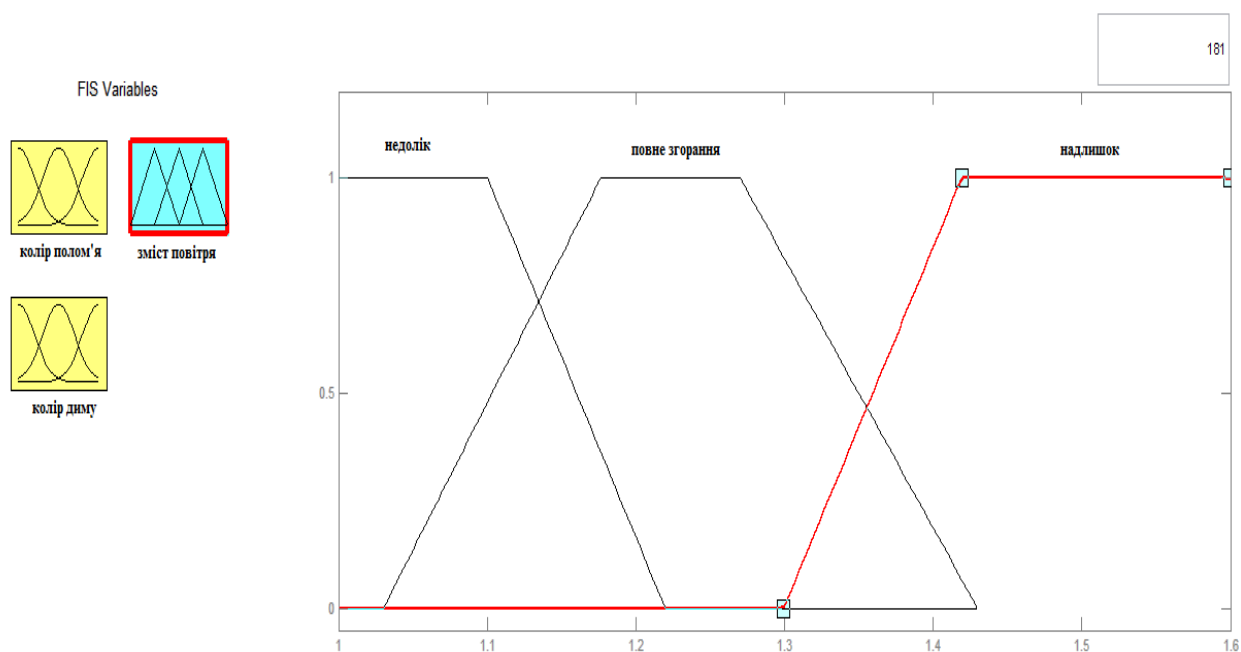


Рис. 5.47. Етап фазифікації параметра «коефіцієнт надлишку повітря в відхідних газах»

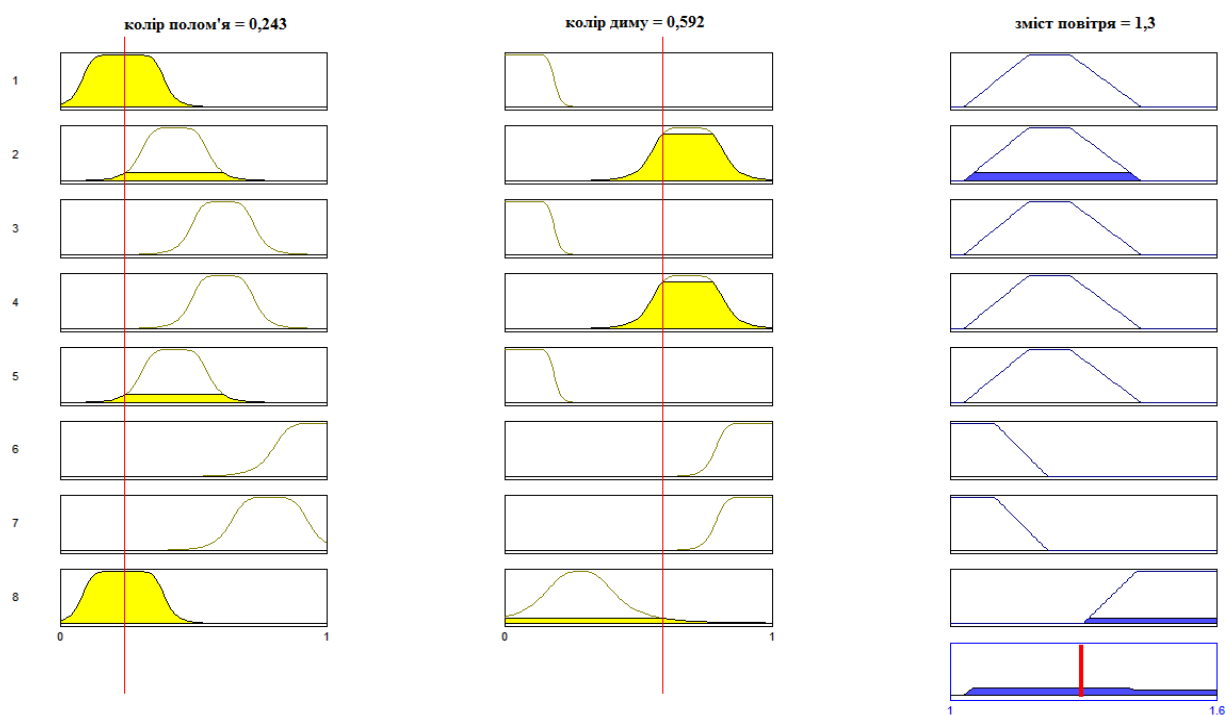


Рис. 5.48. Робота НЕС в програмі по визначенню  $\alpha$ : значення  $\alpha$  рівне 1,3 указує на повне згорання палива в топці допоміжного СПУ

Для запропонованої універсальної нейромережевої САУ горіння різного виду палива в топці суднового парогенератору, використана технологія застосування двох нейронних мереж, одна з яких виконує функцію нейроконтролера, а друга - функцію нейроемулатора, який навчається моделювати динаміку об'єкту управління [112]. Оскільки використовувана структура являє собою багат шарову мережу і алгоритм зворотного поширення помилки можна узагальнити на будь-яку мережу з прямим розповсюдженням сигналу, то пропонується модуль НМК навчається як і звичайна нейронна мережа. Для цього буде потрібна навчальна вибірка у вигляді пар  $(\bar{x}, d)$ , де  $\bar{x} = [x_1, \dots, x_n]^T$  - це вхідний вектор,  $d$  - еталонний сигнал. Завдання полягає в такій модифікації (корекції) параметрів модуля НМК, описаного виразом, щоб міра помилки, що задається виразом була мінімальною.

$$e = \frac{1}{2} [\bar{y}(\bar{x}) - d]^2.$$

Процес навчання НМ буде закінчений коли помилка досягне встановленої мінімальної величини. Для ваги  $\bar{y}^m$  вираз, який визначає спосіб модифікації, буде мати вид [12]:

$$\bar{y}^m(t+1) = \bar{y}^m(t) - \eta \frac{\partial e(t)}{\partial \bar{y}^m(t)},$$

де  $t = 0, 1, 2$ , позначає номер ітерації  $\bar{y}^m(0)$  початкове значення ваги), а константа  $\eta$  інтерпретується як коефіцієнт, який визначає швидкість навчання (він також називається кроком корекції).

Для навчання НМК проведено моделювання з типовим ПІД - регулятором, яке апробовано в роботі [107]. У проведеному імітаційному експерименті в пакеті MatLab [116], ПІД - регулятор був адаптований під зміни властивостей керованого об'єкта. Варіюванням значень об'єкту по каналу управління:  $T$  і  $K$ , передбачається ініціювати зміни значень параметрів ПІД - регулятора:  $K_p$ ,  $T_i$ ,  $K_d$ .

Тобто адаптувати їх з метою досягнення очікуваного перехідного процесу. Об'єктом управління є САУ горіння палива допоміжного СПУ, чинного в номінальному режимі. Модель об'єкта у вигляді передатної функції інерційної ланки була отримана в другому розділі. Параметр моделі, в процесі експерименту,  $T$  змінювався в залежності від парового навантаження СПУ і впливу каналу внутрішнього збурення - «зміна складу палива», в наступному діапазоні (5; 25; 45; 105). Відповідно, оптимізуються значення налаштувань ПД - регулятора САУ горіння палива в СПУ для отримання необхідного перехідного процесу. В якості навчальної вибірки для НМ використовуються значення сигналів неузгодженості ( $e_i$ ) - входи в НМК, і значення оптимальних керуючих впливів ( $u_i$ ), виміряні на виході ПД - регулятора в САУ. У процесі проведення експерименту отримані наступні дані, які є навчальною вибіркою для нейромережевого регулятора (табл. 5.9.).

Таблиця 5.9.

Навчальна вибірка для НМК

| $T$ | 5        | 25      | 45    | 105   |
|-----|----------|---------|-------|-------|
| $E$ | 0,000422 | 0,00069 | 0,096 | 0,049 |
| $U$ | 3,333    | 3,335   | 3,353 | 1,995 |

Дані табл.5.9. являють собою вхідний і цільовий вектори НМК в САУ горіння палива в топці СПУ. За допомогою наступної програми в додатку MatLab, була створена і протестована НМ, діюча в НМК

```
>> neural
>> e=[0.000422 0.00069 0.096 0.049];
>> u=[3.333 3.335 3.353 1.995];
>> net=newlind(e,u);
>> y=sim(net,e)
y = 3.0935 3.0928 2.8566 2.9731
```

>> gensim(net,-1).

Правила перетворення сигналів визначаються математичною моделлю нейрона, яка представлена у формі наступних аналітичних виразів [12, 169]:

$$s = \sum_{i=1}^n w_i x_i + b;$$

$$y = f(s),$$

де  $w_i$  – вага синапса  $i \in (1, 2, \dots, n)$ ;  $b$  – значення зміщення,  $s$  – результат підсумовування,  $x_i$  – вектор вхідного сигналу ( $i \in (1, 2, \dots, n)$ );  $f(s) = k s$  – лінійна функція активації. Для прикладу:  $w = -2,48$ ;  $b = 3,094$ ;  $k = 1$ , синаптичний зв'язок в нейроні являється гальмуючим (рис. 5.49).

Для перевірки ефективності роботи НМК в САУ горіння палива СПУ використовується структура з нейроемулятором [107]. Пропонована структура нейроемулятора, отримана за допомогою програми Neural Network. Для моделювання НМСАУ оптимізації  $\alpha$  в залежності від парового навантаження агрегатів СЕУ (рис. 5.50) використовувався спеціалізований математичний пакет MatLab (Simulink і Nero Toolbox) [116].

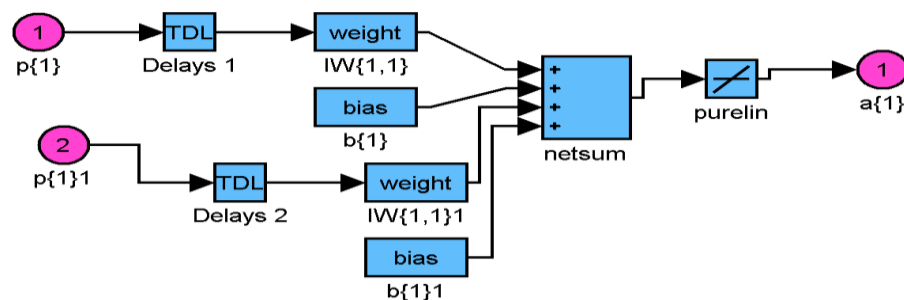


Рис. 5.49. Фрагмент моделі нейроемулятора, що реалізована в програмі Neural Network

Процеси модельованої НМСАУ корекції  $\alpha$  показані на рис. 5.51.

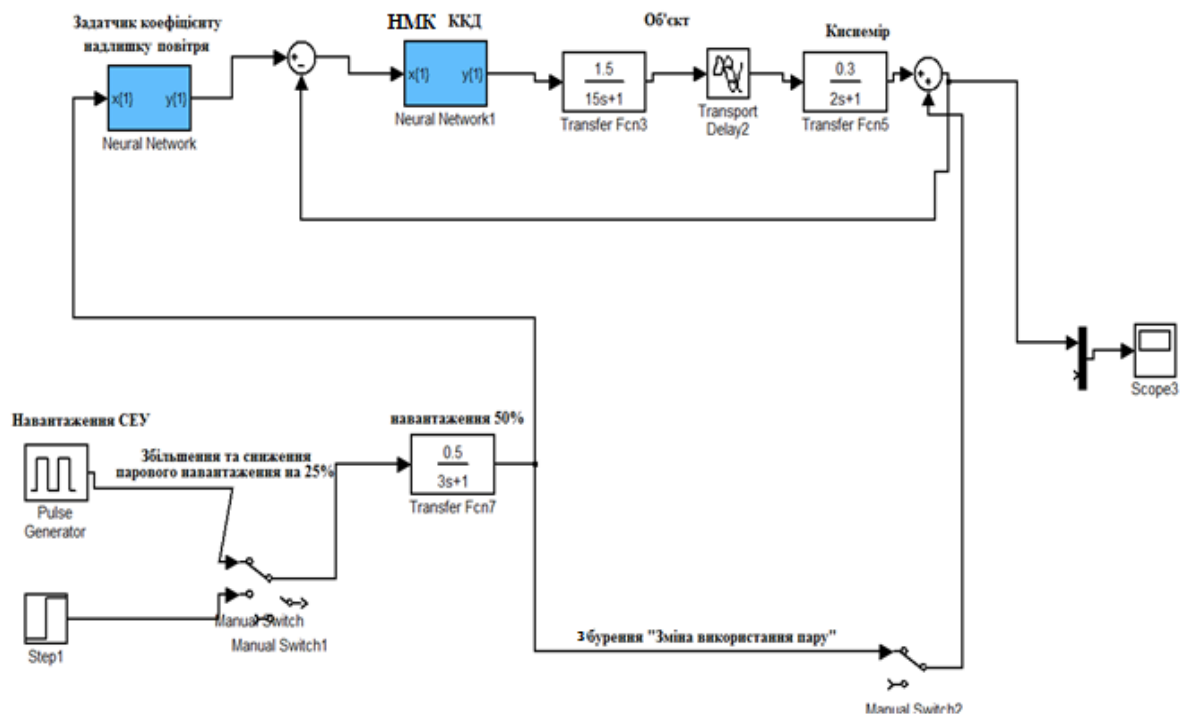


Рис. 5.50. Моделювання НМСАУ оптимізації  $\alpha$  з ціллю підвищення КПД СПУ

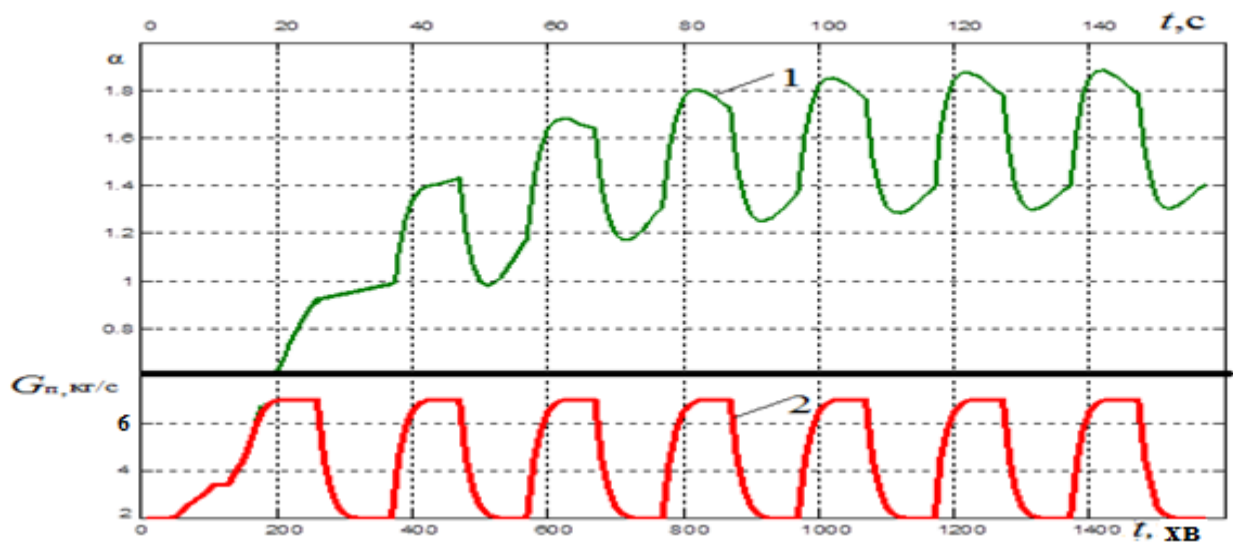


Рис. 5.51. Процеси впливу парового навантаження СЕУ (2) на оптимізацію  $\alpha$  (1) для досягнення максимального ККД СПУ МВ 50

Як видно з представлених характеристик (дів. рис. 5.52), запропонована НМСАУ корекції коефіцієнтом надлишку повітря успішно підтримує задані

значення в залежності від парової навантаження СЕУ, що дозволяє підтримувати ККД СПУ на високому рівні.

Проектне рішення представлено на рис. 5.52 (імітаційна модель), відображає запропоновану двоконтурну нейромережевої системи управління процесом горіння палива (див. рис. 5.44).

На схемі моделювання (див. рис. 5.52), на початку роботи САУ, контур управління об'єктом СПУ замикається класичним ПІД - регулятором. Далі, нейроконтролер вчиться керувати замкнутою системою, накопичуючи інформацію, після чого він підключається до системи управління і управляючі впливи нейромережевого і традиційного регуляторів складаються. Даний вид нейроуправління відносять до категорії гібридного [103,148,219].

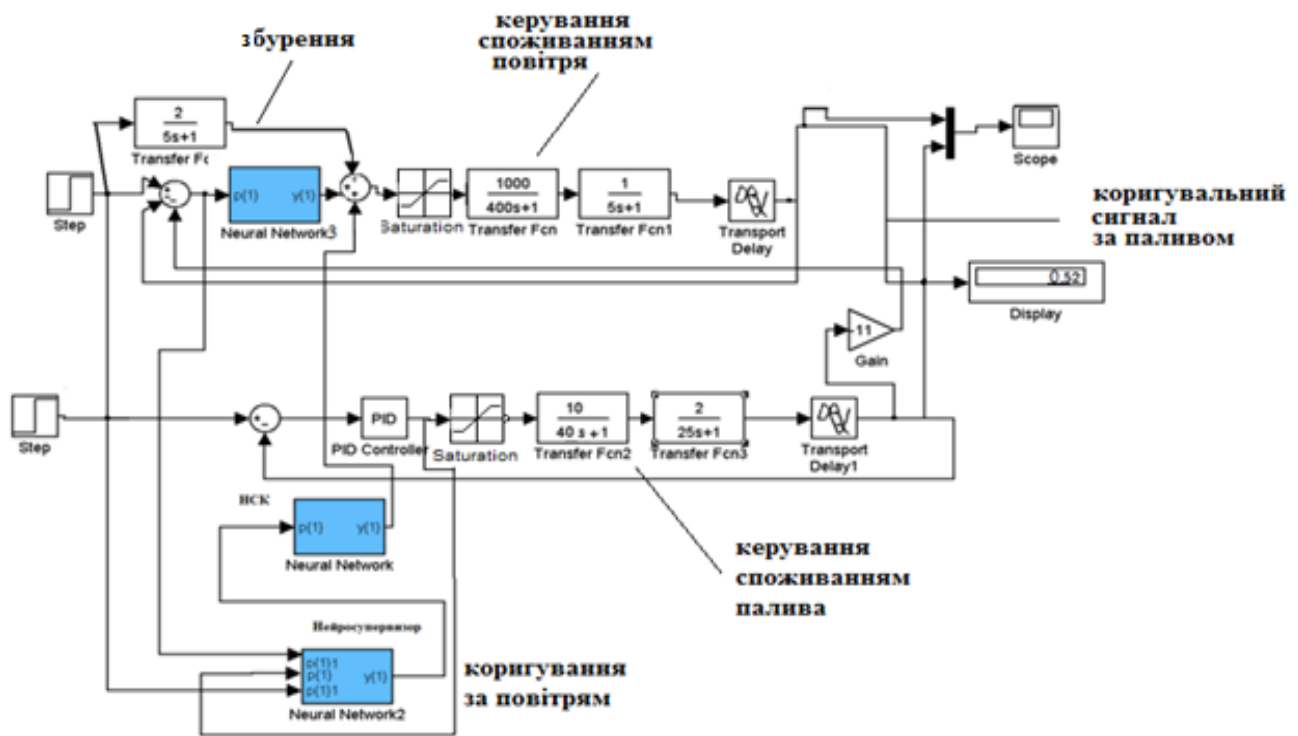


Рис. 5.52. Модель комбінованого нейроуправління процесом співвідношення «паливо-повітря» в системі оптимального горіння рідкого палива в топці СПУ МАС 35 з корекцією за поточним значенням  $O_2$  і імітацією каналу збурення «витрата пару на агрегати СЕУ»

В структурі управління (див. рис. 5.52) верхній канал - управління витратою повітря, нижній канал - коригування за змістом  $O_2$ . Нейронний супервізор є нейромемулятор, що забезпечує навчальною вибіркою нейромережевий контролер, який повторює роботу оптимального ПІД - регулятора. Перехідні процеси нейромережевої системи управління процесом горіння показані на рис. 5.53. Передатні функції каналів управління були отримані на основі аналізу математичних моделей парового котла в розділі 2.

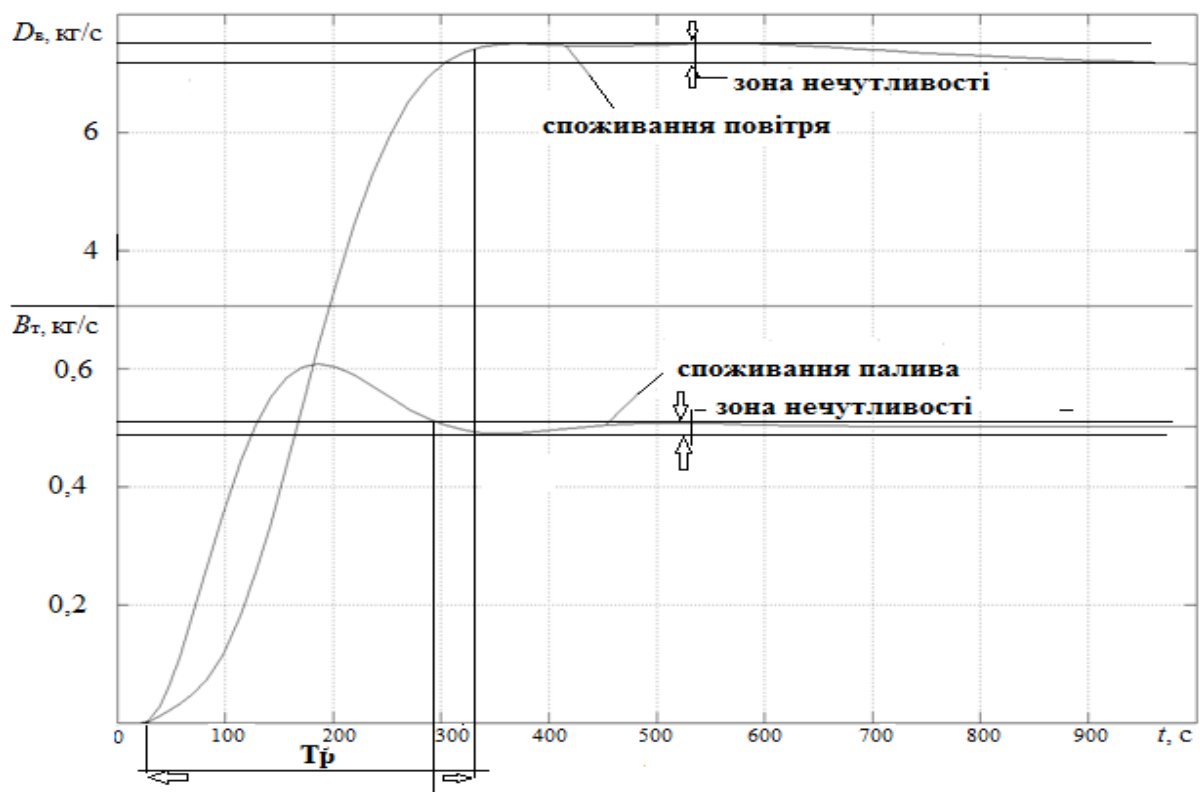


Рис. 5.53. Процеси нейромережевої двоконтурної САУ горіння, діючої по співвідношенню «витрата палива - витрата повітря» при сталому тепловому навантаженні ДПК МАС 35 рівному 35 %

Згідно з вимогами до систем управління суднових парових котлів [128] тиск повітря в коробі котла при змінах навантаження повинен забезпечувати

підтримку співвідношення паливо - повітря не нижче значення, при якому порушується бездимне горіння палива.

Перехідні процеси нейромережевої САУ відповідають очікуваному типу - аперіодичні з  $T_p = 330$  с (див. рис. 5.53), тобто запропонована система управління на 30 % швидше стабілізує задані параметри в порівнянні з традиційною САУ, а також відрізняється економічністю за рахунок нейромережевої оптимізації (корекції  $\alpha$ ) і його плавного зниження в залежності від навантаження, що призводить до економії палива для досліджуваного режиму на 10 % в порівнянні з традиційною САУ.

Для перевірки ефективності запропонованої НМСАУ було проведено імітаційне моделювання ще двох найбільш часто поширених режимів роботи (25, 75 %) теплового навантаження СПУ. Математичні моделі СПУ по каналах управління «положення регулюючого органу - витрата повітря», «витрата повітря - коефіцієнт надлишку повітря», «навантаження - витрата палива» використовувалася відповідно до розробок другого розділу.

Додаткові дослідження показали, що при зміні завдання контролерам, а також значень параметрів об'єкта (в силу впливу внутрішніх збурень - витрати палива) по каналах регулювання, САУ процесу горіння продемонструвала допустимий час регулювання і стійкість. Експеримент - імітація зміни режиму роботи СПУ (паровий навантаження СЕУ) з переходом від номінального на 25 і 65 % навантаження, з метою перевірки робастних і адаптивних властивостей запропонованої САУ, показав (рис. 5.54), що на нових режимах роботи нейромережева САУ також досягає заданих показників зі зниженням витрати палива до 12 % в порівнянні з традиційною САУ горіння.

Шляхом імітаційного моделювання та зміни параметрів математичної моделі по каналу «положення регулюючого органу - витрата палива», що відповідає тепловому навантаженню, рівному 30 %, проведено порівняльний аналіз традиційної та запропонованої САУ. Процеси регулювання показані на рис 5.55.



Згідно з експериментальними даними, витрата палива у НМСАУ на 11 % нижче, чим у традиційній (див. табл.5.6), що підтверджує її можливості з підтримки максимального ККД на всіх теплових режимах роботи СПУ.

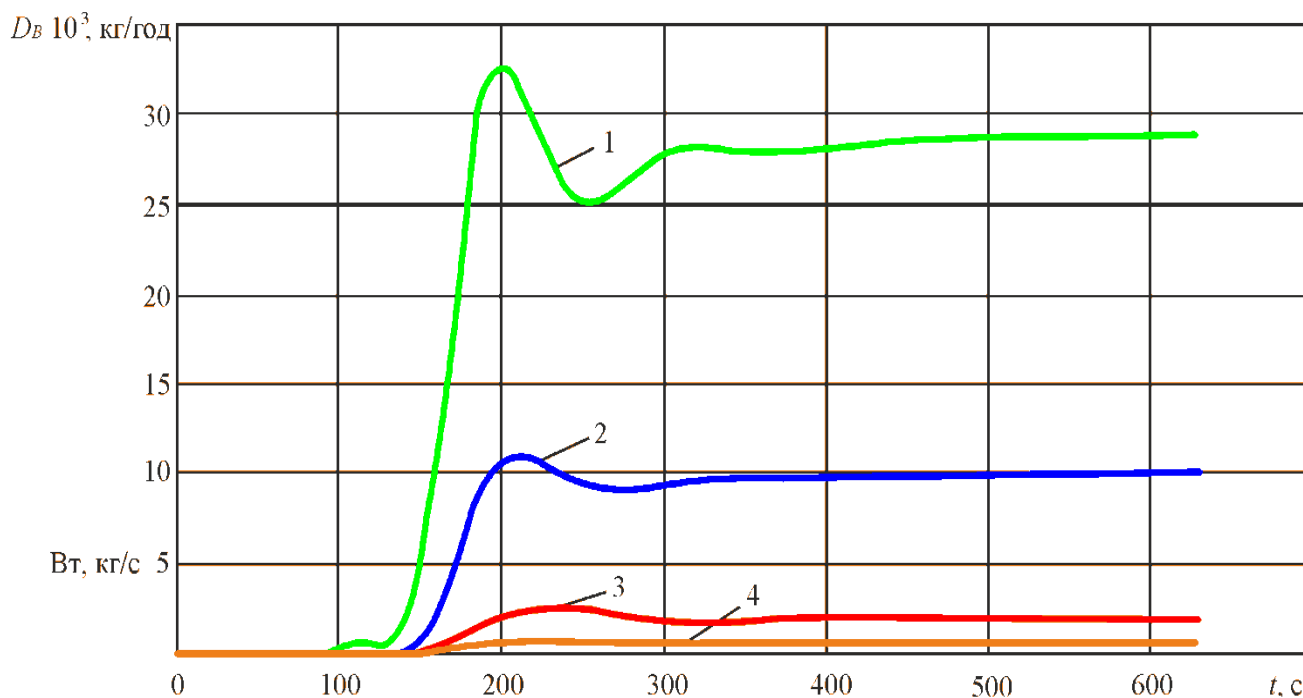


Рис. 5.54. Процеси двоконтурної НМСАУ горіння палива в топці ДПК «МАС 35»: 1,2 - процеси підтримання витрати повітря ( $D_v$ ), при навантаженні 65 і 25 %; 3, 4 - процеси підтримки витрати палива ( $B_t$ ) при навантаженні 65 % і 25 %

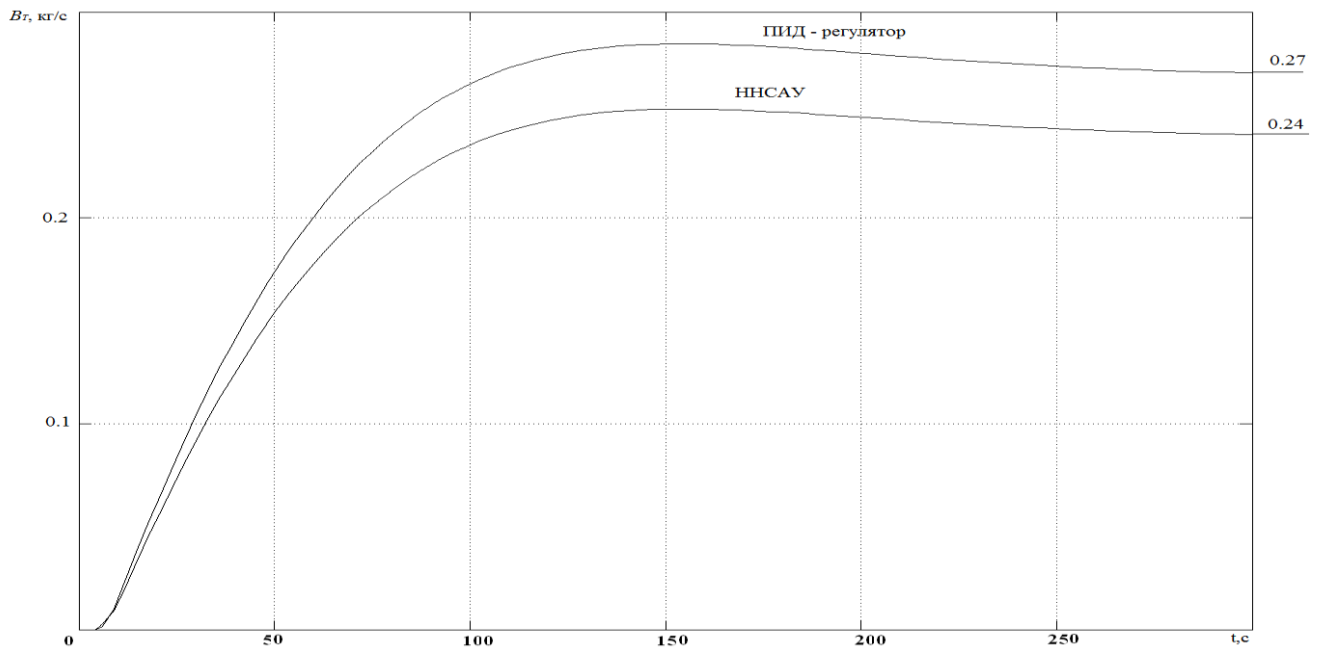


Рис 5.55. Сталі процеси САУ горіння: традиційної з ПІД - регулятором і нейромережевої при тепловому навантаженні ДПК МАС 35, що дорівнює 22 %

Для дослідження швидкодії запропонованої НМСАУ горіння при роботі в несприятливих умовах різкої зміни парового навантаження також було проведено імітаційне моделювання. Як канал збурення в якості моделі використовувався програмний блок Pulse Generator (див. рис. 5.51) пакета Simulink [38]. Перехідні процеси сталого і перехідного режимів показані на рис. 5.56. Час регулювання  $T_p$  на перехідному режимі при наборі теплового навантаження склало 120 с, що відповідає допустимому значенню [153]. Таким чином, запропонована НМСАУ має стійкість і при роботі на форсованому режимі.

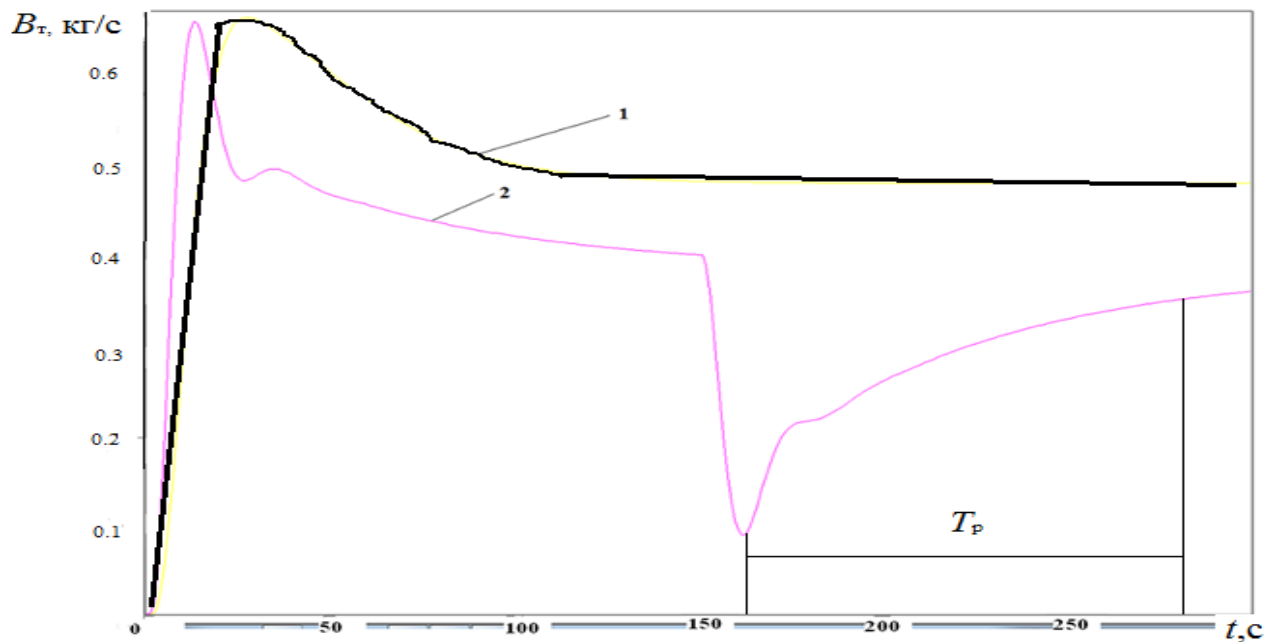


Рис. 5.56 Процеси систем управління витратою палива в СПУ марки МАС 35: 1 - сталий режим на тепловому навантаженні 70 %; 2 - перехідний режим, викликаний падінням з 60 % до 15 % і зростанням до 50 % парового навантаження СЕУ

## 5.5. Висновки до розділу

1. Доведено, що застосування методології синтезу та адаптації нейромережових САУ з функцією апроксимації значень експлуатаційних параметрів СПУ, на прикладі нейронечіткої САУ температури перегрітого пару СПУ МВ 220, продемонструвало поліпшені показники якості процесів експлуатації в порівнянні з типовою САУ, що сприяє підвищенню показників надійності роботи елементів СПУ і забезпечує підтримку заданого теплового режиму СПУ на всьому діапазоні парової навантаження агрегатів СЕУ.

2. Встановлено, що запропонована нейромережева система моніторингу яка дозволяє враховувати допустимі норми показників вмісту  $\text{NO}_x$  і  $\text{SO}_x$  у димових

газах СПУ і видає рекомендації оператору по їх підтримці, демонструє на прикладі найбільш тривалого теплового режиму СПУ зниження вмісту  $\text{NO}_x$  на 25 %.

4. Доведено, що нейромережевий метод рециркуляції димових газів в топку СПУ для зниження вмісту  $\text{NO}_x$  в димових газах продемонстрував зменшення вмісту  $\text{NO}_x$  в порівнянні з традиційною САУ горіння палива в середньому на 54 % в широкому діапазоні теплового навантаження.

5. Встановлено, що впровадження турбулізатора в димохід СПУ дозволяє знизити температуру димових газів, на прикладі одного теплового режиму парового котла ГМ 50, в середньому на  $46^\circ\text{C}$ , що з одночасною корекцією вмісту кисню (зниженням на 3 %) дозволяє провести збільшення ККД брутто на 6 %.

6. Взаємозв'язок запропонованих методологій і методів в процесах розробки та експлуатації СПУ дозволяє забезпечити вирішення головного завдання - створення нової концепції, забезпечує розробку високоефективних САУ, що досягають оптимальних екологічних і економічних показників суднових парогенераторів при їх роботі на усталених і динамічних режимах.

## ВИСНОВКИ

Проведені дослідження дозволяють формулювати наступні наукові результати.

1. Запропоновано нову концепцію розробки систем управління судновими пароенергетичними установками, яка відрізняється комплексним використанням нових моделей і методів на основних етапах життєвого циклу парогенеруючих установок (проектування, налагодження та експлуатації), що дозволяє досягти ефективних екологічних і енергетичних показників роботи парогенераторів.

2. Запропоновано метод створення системи адаптивної рециркуляції димових газів у повітряпровод суднових парогенераторів, який спрямован на зниження вмісту оксидів азота. Моделювання запропонованої системи управління продемонструвало зменшення вмісту  $\text{NO}_x$  в порівнянні з традиційною САУ горіння до 54 % в умовах експлуатації на найбільш частих робочих режимах.

3. Розроблено метод створення нейромережевої САУ оптимізації режиму горіння палива суднового парогенератора. Запропонована САУ оснащена додатковими каналами контролю кольору полум'я пальника, кольору димових газів і присосів повітря, що дозволяють коригувати коефіцієнт надлишку повітря та знизити втрати тепла з димовими газами. Встановлено, що застосування САУ на прикладі допоміжного парогенератора марки МАС 35 при роботі на навантаженні 50 % забезпечує підвищення ККД брутто на 8 %, та економію палива близько 18 %.

4. Розроблено нейромережеву систему моніторингу вмісту димових газів, яка дозволяє знизити вміст  $\text{NO}_x$ , на прикладі парового допоміжного котла марки МАС 35, в порівнянні з традиційною САУ до 25 % за рахунок корекції теплового навантаження, коефіцієнта надлишку повітря і швидкості протікання димових газів у газоході.

5. Запропоновано методологію синтезу САУ з функцією апроксимації значень експлуатаційних параметрів парогенератора. Проведений аналіз нейронечіткої САУ температури перегрітої пари парогенератора марки МВ 220 продемонстрував поліпшені показники якості процесів експлуатації в порівнянні з типовою САУ на перехідному режимі роботи, що сприяє підвищенню показників надійності роботи елементів СПУ і забезпечує підтримку заданого теплового режиму на всьому діапазоні парового навантаження агрегатів СЕУ.

6. Запропоновано метод синтезу двоканального нечіткого регулятора в САУ тиску пари комбінованого парового котла. Нечіткий регулятор дозволяє поліпшити показники часу виходу на задане теплове навантаження, що забезпечує своєчасну адаптацію до умов експлуатації і відсутність значних коливань експлуатаційних параметрів, що впливають на надійність роботи елементів парогенератора.

7. Запропоновано метод розробки експертної системи для апроксимації розрахункових коефіцієнтів рівнянь динаміки параметрів парогенераторів. Система демонструє високу ступінь адекватності експериментальних і теоретичних значень. Метод дозволяє використовувати аналітичні і імітаційні моделі в подальших дослідженнях властивостей СПУ, за допомогою експертної системи, з метою поліпшення їх конструктивних і експлуатаційних характеристик.

8. Розроблено універсальну експертну систему ідентифікації параметрів математичних моделей підсистем управління судновими парогенераторами. Використання системи дозволяє спростити і прискорити процес налагодження, модернізації і адаптації парогенеруючих установок та сприяє зниженню аварійних ситуацій.

9. Встановлено, що впровадження турбулізатора в конструкцію СПУ дозволяє знизити температуру димових газів, на прикладі одного теплового режиму парового котла ГМ 50, в середньому на 46 °С, що з одночасною корекцією

вмісту кисню (зниженням на 3 %) дозволяє провести збільшення ККД брутто до 6 %.

10. За результатом аналізу теплових та гідравлічних процесів, що протікають в підсистемах СПУ, отримано математичні моделі, які дозволяють проводити розрахунок оптимальних параметрів САУ, аналізувати зміну параметрів СПУ при навантаженні 25 – 75 % та діагностувати технічний стан елементів СПУ.

11. Зроблено удосконалення математичного опису фізико-хімічних процесів, що протікають в СПУ, що підвищує адекватність моделювання процесів управління і враховує процеси утворення корозії в конструктивних елементах парогенератора.

12. Основні науково-практичні результати впроваджені у виробничу діяльність, у навчальний процес НУ «ОМА», а також пройшли апробацію на наукових семінарах та конференція

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Александров В.Л. Интеллектуальные системы в морских исследованиях и технологиях / В.Л. Александров, А.Т. Матлах, Ю.И. Нечаев. – Санкт-Петербург: ГМТУ, 2001 – 395 с.
2. Арсирый В. А., Рябоконт П.М. Ограничения мощности котлов – проблема, которая может быть решена // Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики: Сборник трудов / Институт промышленной экологии. – К. : ИПЦ АЛКОН НАН Украины, 2020., с 133-137.
3. Артемов Г.А. Судовые энергетические установки / Г.А. Артемов, В.П. Волошин, Ю.В. Захаров, А.Я. Шквар. – Л.: Судостроение, 1987. – 480 с.
4. Акользин П.А. Коррозия металла паровых котлов / П.А. Акользин. – М.: ГЭИ, 1957. – 222 с.
5. Богданов В.И. Подпорин С.А. Использование нечеткой логики для повышения качества управления судном на курсе // Сб. научных трудов / СВМИ им. П.С. Нахимова. – Вып. 2(8). – Севастополь, 2005. – С. 89 – 97.
6. Бадагуев Б.Т. Судовые паровые и водогрейные котлы / Б.Т. Бадагуев. – М.: Альфа-Пресс, 2013. – 202 с.
7. Белоусов В.Н. Топливо и теория горения / В.Н. Белоусов, С.Н. Смородин, О.С. Смирнова. – СПб.: ГТУРП, 2011. – 84 с.
8. Беднаржевский В.С. Математическое моделирование и компьютерные технологии в задачах проектирования энергетических паровых котлов / В.С. Беднаржевский // Вычислительные технологии. – 2002. – Т. 7 № 6. – С. 13 – 23.
9. Борисов А.Н. Обработка нечеткой информации в системах принятия решений / А.Н. Борисов, А.В. Алексеев, Г.В. Меркурьева и др. – М: Радио и связь, 1989. – 304 с.



- 10.Бовина В.А. Верификация и подтверждение правильности (V&V) системы управления базой знаний с помощью формальных спецификаций/ В.А. Бовина // Международный научный журнал «Символ науки» №5. – 2015. – С. 17 – 20.
- 11.Бурцева Ю.С. Беспойсковый метод расчета настроек регуляторов на минимум квадратичного критерия [Текст]: автореферат диссертации кандидата тех. наук (05.13.06). Нац. исследовательски университет «МЭИ» / Ю.С. Бурцева. – Москва, 2013. – 45 с. URL: <https://www.mpei.ru/Science/Dissertations>.
- 12.Бураков М.В. Нейронные сети и нейроконтроллеры. Учебное пособие / М.В. Бураков. – СПб.: Изд-во ГУАП, 2013. – 284 с.
- 13.Бухановский А.В. Концепция исследовательского проектирования морских судов на основе интеллектуальных технологий и высокопроизводительных вычислительных средств / А.В. Бухановский, Ю.И. Нечаев // Искусственный интеллект №3. – 2011. – С. 25 – 41.
- 14.Воликов А.Н., Новиков О.Н., Окатьев А.Н. Экологическая эффективность сжигания газового и жидкого топлива в котлах малой и средней мощности // Современные проблемы науки и образования № 4. – 2012. – С. 156 – 162.
- 15.Ветольский Э.М. Предотвращение аварий судовых паровых котлов / Э.М. Ветольский. – Владивосток: АТР, 1995. – 116 с.
- 16.Газоанализаторы для оптимизации режимов горения топлива. URL: [http://www.infogas.ru/22\\_NT\\_4\\_2015](http://www.infogas.ru/22_NT_4_2015).
- 17.Гайворонский С.А. Синтез регулятора системы управления котельными агрегатами с использованием программного обеспечения MDSLS /С.А Гайворонский., Т.А Езангина. // Вестник ВГУ, Серия: Системный анализ и информационные технологии № 1, 2013. – С. 5 – 9.
18. Газрилов В. С. Управление технической эксплуатацией морского флота / В.С. Газрилов., М.М Гальперин. – М.: Транспорт, 2007. – 280 с.

19. Голиков В.А. Способы повышения надежности операторов судовых энергетических установок / В.А. Голиков, В.И. Капустин // Судовые энергетические установки: научно-технический сборник. Вып. 25. – Одесса: ОНМА, 2010. – С. 49 – 55.
20. Голиков В.А. Системный подход к проблеме безопасного управления судном /В.А. Голиков // Судостроение: сб. науч. тр. / ОНМА. – Вып. 17. – Одесса: «ИздатИнформ», 2009. – С. 51 – 58.
21. Головкин С.В., Романенко Н.Г. Разработка моделей работы судовых двигателей внутреннего сгорания на основе их степени работоспособности с применением нечеткой логики / С.В. Головкин, Н.Г. Романенко. // Морские интеллектуальные технологии № 1 (39) Т.1. – 2018. – С. 224 – 231.
22. Горб С.И. Настройка системы ДАУ "KaMeWa" на судах типа "SOCOL"/ С.И. Горб // Автоматизация судовых технических средств. Выпуск 15. – Одесса: ОНМА, 2009. – С. 8 – 21.
23. Горб С.И. Оптимальная организация технического обслуживания судов / С.И. Горб, А.В. Ланчуковский // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 1997. – Вып. 2. – Одесса: ОГМА. – С. 47 – 52.
24. Горб С.И. Компьютеризация технического менеджмента в судоходных компаниях / С.И. Горб // Состояние и перспективы развития морского транспорта: сб. докл. на межотр. науч.-практ. конфер., посвящённой 55-летию Украинского Дунайского пароходства. – Измаил-Одесса: ОГМА, 1999. – С. 67 – 71.
25. Горб С.И. Информационная система организации технического обслуживания судов: учебн. пособие для ВУЗов / С.И. Горб, А.С. Туркин. – Одесса: ОГМА, 1996. – 52 с.
26. Горелик Г.Б. Основы автоматики и автоматизации судовых энергетических установок / Г.Б. Горелик. – ХГТУ, 2011. – 121 с.

27. Гостев В.И. Проектирование нечетких регуляторов для систем автоматического управления / В.И. Гостев. – СПб.: БХВ-Петербург, 2011. – 416 с.
28. Глушков В.М. Макроэкономические модели и принципы построения ОГАС / В.М. Глушков. – М.: «Статистика», 1975. – 160 с.
29. Датчик проводимости CP10 Паспорт (Инструкция по монтажу и эксплуатации). URL: <https://stimexeng.com/oborudovanie/spirax/kotelnoe-oborudovanie/sistemy-neprerывnoi-produvki/>.
30. Деменков Н.П. Нечеткое управление в технических системах / Н.П. Деменков. – М.: МГТУ им. Баумана, 2005. – 200 с.
31. Дементьев К.С. Проектирование судовых парогенераторов / К.С. Дементьев, В.А Романов. – М.: Судостроение, 2016. – 336 с.
32. Денисенко В.В. ПИД-регуляторы: вопросы реализации / В.В. Денисенко // СТА. – 2007. – №4. – С. 86 – 97. – 2008. – №1. – С. 86 – 99.
33. Денисенко В.В. Разновидности ПИД-регуляторов / В.В. Денисенко // Автоматизация в промышленности. – 2007. – №6. – С. 45 – 50.
34. Денисенко Н.И. Безопасность и надежность судовых котлов / Н.И Денисенко, В.Г Харченко. – М.: Транспорт, 1988. – 192 с.
35. Денисенко Н.И. Судовые котельные установки / Н.И Денисенко, И.И. Костылев. – М.: Элмор, 2015. – 290 с.
36. Дзюба Д.А. Применение метода контролируемого возмущения для модификации нейроконтроллеров в реальном времени / Д.А. Дзюба, А.Н. Чернодуб // Математичні машини і системи. – 2011. – № 1. – С. 20 – 28.
37. Дорф Р. Современные системы управления / Р. Дорф, Р. Бишоп; пер.с англ. Б.И. Капылова. – М.: Лаборатория базовых знаний, 2002. – 832 с.
38. Дьяконов В.П. Simulink 5/6/7: [Самоучитель] / В.П. Дьяконов. – М.: ДМК-Пресс, 2008. – 781 с.

39. Дьяконов В., Круглов В. MATLAB. Анализ, идентификация и моделирование систем. Специальный справочник /В. Дьяконов, В. Круглов. – С. Пб.: Питер, 2001. – 448 с.
40. Енин В.И. Судовые котельные установки / В.И. Енин, Н.И. Денисенко, И.И. Костылев. – М.: Транспорт, 2003. – 216 с.
41. Еремин Е.Л. Адаптивные алгоритмы для одного класса динамических объектов с запаздыванием по управлению / Е.Л. Еремин, В.Ю. Косицын, Д.А. Теличенко // Информатика и системы управления. – 2010. – № 4 (26). – С. 137 – 149.
42. Еременко, Ю.И., Полещенко, Д.А., Глущенко, А.И. Об условиях применения ПИД-нейрорегулятора для управления объектами, описываемыми апериодическим звеном второго порядка с запаздыванием / Ю.И. Еременко, Д.А. Полещенко, А.И. Глущенко // Приборы и системы. Управление. Контроль. Диагностика. – 2013. – № 6. – С. 39 – 45.
43. Ефимов А. В. Влияние температурных зависимостей теплофизических характеристик материала на нестационарную теплопроводность в стенке барабана парового котла / А. В. Ефимов, Ю. В. Ромашов, В. Л. Каверцев // Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ" – Харків : НТУ "ХПІ", 2018. – № 12 (1288). – С. 28-31.
44. Жарков П.В. Оптимизация динамических процессов в котельном агрегате с использованием его нелинейной математической модели / П.В. Жарков, А.М. Клер // Научно-технические ведомости СПб. ГПУ. – 2008. – № 1 (53). – С. 41 – 49.
45. Зельдович Я.Б., Семенов Н.Н. Теория горения и детонации газов  
Монография. — М.: Академия наук СССР институт химической физики, 1944.  
— 70 с.

46. Заблоцкий Ю.В. Судовые паровые котлы. Тепловой баланс и расчет теплообмена в поверхностях нагрева: учебное пособие / Ю.В. Заблоцкий, С.А. Карьянский, С.В. Сагин. – Одесса: НУ «ОМА», 2017. – 208 с.
47. Завехритель-турболизатор для котлов. URL: <https://teplogidromash.ru/stati/turbulizatory-dlya-kotlov.html>
48. Исаков Л.И. Устройство и обслуживание судовой автоматики: Справочник. / Л.И. Исаков. – Л.: Судостроение, 1989. – 293 с.
49. Ибрагимов И.М. Использование систем искусственного интеллекта при эксплуатации энергетических объектов / И.М. Ибрагимов // Надежность и безопасность энергетики. – 2008. – № 1. – С. 51 – 56.
50. ИМО 2020 – перспективы судоходной отрасли и нефтеперерабатывающих заводов. URL: <https://modcon.ru/applications/> судоходство и морские перевозки.
51. Интеллектуальные решения для кораблей и судов от НПО «Аврора». URL: <https://www.avgorasystems.com/ru>.
52. Каталог продукции / Все необходимое для автоматизации на судах // [Каталог]: Полная номенклатура изделий АВВ. – М.: АВВ, 2016. – 340 с.
53. Каталог продукции / Средства промышленной автоматизации. Промышленные компьютеры и контроллеры на судах. Встраиваемые компьютерные системы [Каталоги продукции фирм Siemens, Микрол, Овен]. – М.: А-ТЕХ, 2019. – 450 с.
54. Коропова Л.А. Комплексная математическая модель динамики барабанного парового котла в задаче синтеза алгоритмов управления. / Л.А. Коропова, А.В. Степанец // Доклады БГУИР. – 2015. – № 2 (88). – С. 172 – 175.
55. Корнилов Э.В. Вспомогательные, утилизационные, термомасляные котлы морских судов (конструкция и эксплуатация) / Э.В. Корнилов, П.В. Бойко, Э.И. Голофастов. – Одесса, «Экспресс Реклама», 2008. – 240 с.
56. Ключев А.С. Наладка систем автоматического регулирования паровых котлоагрегатов / А.С. Ключев, А. Г. Товарнов. – М.: Энергия, 1970. – 270 с.

57. Ковалёв А.П. Судовые парогенераторы / А.П. Ковалёв, Н.С. Лелеев. – М.: Энергоатомизда, 1991. – 370 с.
58. Ковриго Ю.М., Адаптивное управление теплоэнергетическими процессами / Ю.М. Ковриго, Б.В. Фоменко, И.А. Полищук // ААЭКС. – 2007. – № (2) 20. – С. 147 – 156.
59. Ковриго Ю.М. Питання моделювання роботи виконавчих механізмів і регулюючих органів в системі управління котлоагрегатом / Ю.М. Ковриго, Р.П. САУов // Вестник Приазовского государственного технического университета. 2015. – Вып. 31. – С. 56 – 62.
60. Кринецкий И.И. Основы научных исследований / И.И. Кринецкий. – К.-Одесса: Вища школа, 1981. – 208 с.
61. Кондратенко Ю.П., Сіденко Є.В. Механізм двокаскадної корекції та аналіз методів редукування баз правил нечітких моделей прийняття рішень / Ю.П. Кондратенко, Є.В Сіденко //Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2013. – № 9. – С. 127 – 136.
62. Козак Ю.А. Регулирование основных параметров судовых объектов на основе нечеткой логики / Ю.А. Козак, В.С. Михайленко, В.М. Вишневская // Научно-технический сборник. Автоматизация судовых технических средств. Выпуск 11. – Одесса: ОНМА, 2006. – С. 86 – 92.
63. Копелович А.П. Инженерные методы расчета автоматических регуляторов / А.П Копелович. – М.: ГНТИ, 1960. – 190 с.
64. Коломейцева М.Б. Синтез адаптивной системы на базе нечеткого контроллера для многомерных систем / М.Б. Коломейцева, Д.Л. Хо // Журнал «Приборы и системы управления». – 2016. – № 3. – С. 34 – 37.
65. Консолидированный текст конвенции СОЛАС-74. URL: <http://www.sur.ru/upload/legislation/Solas74>.
66. Каретников В.В. Перспективы внедрения без экипажного судоходства на внутренних водных путях / В.В. Каретников, И.В. Пащенко, А.И. Соколов //

Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. – 2017. – Т. 9. – № 3. – С. 619 – 627.

67. Климчук А.А., Ложечников В.Ф., Михайленко В.С., Ложечникова Н.В. Усовершенствованная математическая модель динамики уровня жидкости в барабанном парогенераторе как объекте управления / А.А. Климчук, В.Ф. Ложечников, В.С. Михайленко, Н.В. Ложечникова // Международный научно-технический журнал «Проблемы управления и информатики». – 2019. – №3 – С. 54 – 64.

68. Костылев И.И., Денисенко Н.И. Идентификация повреждений элементов судовых котельных установок. Справочное пособие / И.И. Костылев, Н.И. Денисенко. – СПб.: "Элмор", 2017. – 152 с.

69. Котлоагрегаты КАВ: Техническое описание / Альбом иллюстраций. URL: <https://seatracker.ru/viewtopic.php>.

70. Круглов В.В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика / В.В. Круглов, В.В. Борисов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2001. – 382 с.

71. Кузнецов Е.В. Компьютерные тренажеры систем автоматического регулирования. Лабораторный практикум. / Е.В. Кузнецов. – Новороссийск, ГМУ им. адм. Ф.Ф. Ушакова, 2017. – 56 с.

72. Кузнецов Н.В. Тепловой расчет котельных агрегатов. Нормативный метод / Н.В. Кузнецов, В.В. Митор, И.Е. Дубовский. – М.: Энергия, 1973. – 296 с.

73. Куликова И.В. Влияние выбора алгоритмами нечеткого вывода на точность работы нечеткого регулятора / В.И. Куликова // International Journal of Advanced Studies, 2017. – Vol. 7, N. 4 – 3. – P. 66 – 72.

74. Лепский А.Г. Основные направления развития систем комплексной автоматизации на флоте / А.Г. Лепский, В.В. Цветоков, А.А. Щеглов // Вестник МГТУ, Том 7, № 3. – 2014. – С. 409 – 418.

75. Леоненков А.Ю. Нечеткое моделирование в среде Matlab и fuzzyTech / А.Ю. Леоненков. – СПб.: БХВ, 2003. – 720 с.

76. Ложечников В.Ф. Аналитическая многорежимная модель динамики газоздушного тракта барабанного котла / В.Ф. Ложечников, В.С. Михайленко, И.Н. Максименко // Автоматика. Автоматизация. Электрические комплексы и системы (ААЭКС). – 2007. – № 2 (20). – С. 29 – 34.
77. Лысенко В.К. Судовые паровые котлы. Устройство и эксплуатация / В.К. Лысенко, Б.И. Лубочкин. – М.: Транспорт, 1985. – 320 с.
78. Медведев В.С. Control System Toolbox. MatLAB 5 для студентов / В.С. Медведев, В.Г. Потемкин. – Г.: "ДИАЛОГ-МИФИ", 1999. – 287 с.
79. Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления: учеб. / под ред. Н.Д. Егупова, изд. 2-е. – М.: Изд-во МГТУ им. Бауман, 2002. – 744 с.
80. Милтон Д.Х. Судовые паровые котлы Пер. с англ. / Д.Х Милтон, Р.М. Лич. – М.: Транспорт, 1985. – 295 с.
81. Михайлов С.А. Гибридные интеллектуальные сети для оптимизации режимов эксплуатации судовых систем комфортного микроклимата / С.А. Михайлов, Р.Ю. Харченко // Судовые энергетические установки. – 2015. – № 36. – С. 24 – 32.
82. Михайленко В.С. Использование нечеткой адаптивной системы управления компьютерного мониторинга сетью котельных установок / Михайленко В.С., Никольский В.В. // Автоматика. Автоматизация. Электрические комплексы и системы. – 2007. – № 2 (20). – С. 157 – 163.
83. Михайленко В.С. Адаптивная система нейро-нечёткого управления сложным объектом/ Михайленко В.С., В.В. Никольский, В.Ф. Ложечников // Холодильная техника и технология. – 2008. – № 1 (111). –С. 73 – 77.
84. Михайленко В.С. Нечеткая экспертная система диагностики судового оборудования / Михайленко В.С., Оженко Е.М. // Автоматизация судовых технических средств: науч. -техн. сб. – 2008. – Вып. 14. – Одесса: ОНМА. – С. 36 – 41.



85. Михайленко В.С. Анализ нечеткой системы регулирования тепловым объектом / Михайленко В.С., Даниченко Н.В // Научные труды. – 2008. – Вып. 33. – Одесса: ОНАПТ. – С. 89 – 94.
86. Михайленко В.С. Нечеткая система регулирования давления пара судовой котельной установки объектом / Михайленко В.С., Оженко Е.М. // Холодильная техника и технология. – 2008. – № 5 (115). – С. 69 – 74.
87. Михайленко В.С. Сравнительный анализ комплексного и нечеткого регуляторов при управлении многомерным объектом [Текст] / В.С. Михайленко, В.Ф. Ложечников // Автоматика. Автоматизація. Електротехнічні комплекси та системи. – 2008. – № 2 (23). – С. 130 – 135. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/aaeks\\_2008\\_2\\_23](http://nbuv.gov.ua/UJRN/aaeks_2008_2_23).
88. Михайленко В.С. Сравнительный анализ нечеткого и ПИД-регуляторов при управлении объектами третьего и четвертого порядка с колебательностью / Михайленко В.С., Ложечников В.Ф. // Холодильная техника и технология. – 2009. – № 1 (117). – С. 67 – 71.
89. Михайленко В.С. Аналіз методів створення бази правил нечіткого контролера / Михайленко В.С. // Холодильная техника и технология. – 2009. – № 2 (118). – С. 77 – 82.
90. Михайленко В.С. Анализ методов разработки нечетких САУ для управления сложными взаимосвязанными объектами / В.С. Михайленко, В.Ф. Ложечников // Автоматика. Автоматизація. Електротехнічні комплекси та системи. – 2009. – № 1 (23). – С. 171 – 177.
91. Михайленко В.С. Метод настройки нечеткого адаптивного ПИД-контроллера / В.С. Михайленко, В.Ф. Ложечников // Автоматика. Автоматизація. Електротехнічні комплекси та системи. – 2009. – № 2 (24). – С. 131 – 138.

92. Михайленко В.С. Применение экспертных оценок при построении функций принадлежности / Михайленко В.С. // Холодильная техника и технология. – 2009. – № 5 (121). – С. 73 – 78.
93. Михайленко В.С. Нечеткие продукционные экспертные системы и их взаимодействие с сетями Петри / Михайленко В.С. // Холодильная техника и технология. – 2009. – № 6 (122). – С. 78 – 81.
94. Михайленко В.С. Сравнительный анализ методов дефаззификации в системах нечеткого управления / В.С. Михайленко // Холодильная техника и технология. – 2011. – № 3 (131). – С. 85 – 89.
95. Михайленко В.С. Сравнительный анализ робастной и нечеткой САУ действующих в условиях неопределенности / В.С. Михайленко, Р.Ю. Харченко // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. – 2011. – Вип. 24 (2). – С. 198 – 205.
96. Михайленко В.С. Использование нечеткого алгоритма Такаги – Сугено в адаптивных системах управления сложными объектами / В.С. Михайленко, Р.Ю. Харченко // Искусственный интеллект. Научно – теоретический журнал. – 2011. – № 2 . – С. 53 – 59.
97. Михайленко В.С. Алгоритм настройки адаптивного нейро-нечеткого ПИ – контроллера управления / Михайленко В.С. // Труды Одесского политехнического университета. – 2011. – № 2 (36). – С. 149 – 155.
98. Михайленко В.С. Влияние методов фаззификации и дефаззификации на качество переходных процессов в системах нечеткого управления / Михайленко В.С., Харченко Р.Ю. // Электротехнические и компьютерные системы. – 2011. – № 4 (80). – С. 199 – 204.
99. Михайленко В.С., Харченко Р.Ю. Сравнительный анализ теории принятия решений в условиях неопределенности и нечеткой логики на примере настройки ПИ–контроллера / Михайленко В.С., Харченко Р.Ю. // САУ и приборы автоматики. – 2011. – № 154. – С. 76 – 83.

100. Михайленко В.С. Анализ эффективности модального регулятора с наблюдателем при нахождении объекта в условиях неопределенности / Михайленко В.С. // Автоматизация судовых технических средств: науч. -техн. сб. – 2011. – Вып. 17. – Одесса: ОНМА. – С. 73 – 80.
101. Михайленко В.С. Анализ эффективности командных блоков в системах автоматизированного управления / Михайленко В.С. // Холодильная техника и технология. – 2011. – № 6 (134). – С. 77 – 82.
102. Михайленко В.С. Застосування гібридних мереж в адаптивних системах управління теплоенергетичних об'єктів / В.С. Михайленко, Р.Ю. Харченко // Наукові праці ВНТУ. – 2012. – № 1. – С. 1 – 9.
103. Михайленко В.С. Адаптивная настройка нечеткого ПИ – контроллера по идентификации переходного процесса / В.С. Михайленко, Р.Ю. Харченко // Труды Одесского политехнического университета. – 2012. – № 1 (38). – С. 152 – 156.
104. Харченко Р.Ю. Анализ адаптивных методов настройки нечетких и ПИ–регуляторов в сложных объектах управления / Р.Ю. Харченко, В.С. Михайленко // Вестник НТУ«ХПИ». – 2012. – № 37. – С. 78 – 89.
105. Михайленко В.С. Синтез интеллектуальной системы автоматического управления процессом горения топлива в энергоблоках тепловых электростанций / В.С. Михайленко, Р.Ю. Харченко // Промышленная теплотехника [Фахове видання України]. – 2012. – № 5. – С. 45 – 52.
106. Михайленко В.С. Синтез нейро-мережевої системи автоматичного регулювання рівня води в барабані котла енергоблоку ТЕС / Михайленко В.С., Харченко Р.Ю. // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2012. – №5. – С. 45 – 51.
107. Михайленко В.С. Синтез адаптивного нечеткого контроллера с прогнозирующей нейро-нечеткой сетью / В.С. Михайленко, Р.Ю. Харченко // Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки. – 2012. – № 3. – С. 30 –37.

108. Михайленко В.С. Анализ традиционных методов адаптации систем автоматического управления и их усовершенствование с использованием нейронных сетей / В.С. Михайленко, Р.Ю.Харченко // Радиоэлектронные и компьютерные системы. – 2012. – № 4 (56). – С. 50 – 56.
109. Михайленко В.С. Определение параметров математических моделей энергоблоков на основе аппарата гибридных сетей / Михайленко В.С., Харченко Р.Ю. // Информатика и математические методы в моделировании. – 2012. – Т. 2, № 3 (56). – С. 286 – 292.
110. Михайленко В.С. Инновационный подход в модернизации систем управления энергоблоков ТЭС / В.С. Михайленко // Промышленная энергетика. – 2014. – №7. – С. 38 – 42.
111. Михайленко В.С. Идентификация тепловых объектов в системах адаптивного управления с помощью нейро-нечетких сетей /Михайленко В.С., Варбанец Р.А. //Авиационно – космическая техника и технология. – 2015. – №10 (127). – С. 136 – 144.
112. Михайленко В.С. Интеллектуальная система управления процессом горения топлива в прямоточном парогенераторе энергоблока ТЭС / Михайленко В.С., Князева Н.А., Солодовник М.С. // Холодильная техника и технология. – 2015. – № 5 (51). – С. 80 – 87.
113. Михайленко В.С. Интеллектуализированные оценки надежности паросиловой установки большого судна / В.С. Михайленко, А.Н. Харабет // Энергетика: економіка, технології, екологія. – 2017. – № 3. – С. 103 – 107.
114. Михайленко В.С. Усовершенствование системы управления рециркуляцией дымовых газов судового вспомогательного котла / В.С Михайленко, В.Ф. Ложечников // Автоматизация судовых технических средств: науч. -техн. сб. – 2019. – Вып. 25. – Одесса: НУ «ОМА». – С. 53 – 62.
115. Михайленко В.С. Исследование экспертного показателя качества переходных процессов в автоматизированных системах регулирования ТЭС /

- В.С. Михайленко // Автоматизация. Современные технологии. – 2015. – № 2. – С. 32 – 36.
116. Медведев В. С. Нейронные сети. MATLAB 6 / В.С. Медведев, В.Г. Потемкин. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2012. – 496 с.
117. Нащокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача / В.В. Нащокин. – М.: Наука, 1980. – 496 с.
118. Нелепин Р.А. Автоматизация судовых энергетических установок / Р.А. Нелепин. – Л.: Судостроение, 1975. – 536 с.
119. Нечаев Ю. И. Адаптивный контроль процессов самоорганизации на основе нейродинамической системы / Нечаев Ю. И., Петров О. Н // Морские интеллектуальные технологии. Научный журнал № 2 (40) Т.1. – 2018. – С. 144 – 153.
120. Нечаев Ю.И. Нейронечеткая система поддержки принятия решений при оценке поведения сложного динамического объекта / Ю.И. Нечаев // Труды X-й международной конференции «Нейроинформатика 2003». – М.: МИФИ, 2003. – С. 97 – 164.
121. Нейронный процессор: URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Нейронный\\_процессор](https://ru.wikipedia.org/wiki/Нейронный_процессор).
122. Новиков С.И. Практическая идентификация динамических характеристик объектов управления теплоэнергетического оборудования / С.И. Новиков. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. – 64 с.
123. Орехов И.Г. Предотвращение аварий судовых котельных установок. / И.Г. Орехов. – М.: Транспорт, 1982. – 160 с.
124. Петров А.П. Автоматизация судовых энергетических установок / А.П. Петров. – Н. Новгород: ВГАВТ, 2009. – 298 с.
125. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление / А. Пегат. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. – 798 с.

126. Пираниан Б.Н. Судовые котельные установки / Б.Н. Пираниан., В.В. Баранов. – М.: Судостроение, 1989. – 239 с.
127. Писарев А. В. Расчетное определение динамических характеристик пароперегревательных участков котлоагрегатов / А.В. Писарев, С. И. Новиков // Энергетика и теплотехника: сб. науч. трудов Новосиб. гос. техн. ун-т. – Новосибирск, 2009. – С. 66 – 75.
128. Правила технической эксплуатации судовых вспомогательных паровых котлов. – Санкт–Петербург: Гипрорыбфлот-Сервис, 2018. – 80 с.
129. Правила классификации и постройки морских судов. Часть XV Автоматизация. НД №2-020101-104. – Санкт–Петербург: Гипрорыбфлот-Сервис, 2018. – 140 с.
130. Правила классификации и постройки морских судов. Часть X КОТЛЫ, ТЕПЛООБМЕННЫЕ АППАРАТЫ И СОСУДЫ ПОД ДАВЛЕНИЕМ ND N 2-020101-087 I. – Санкт–Петербург: Гипрорыбфлот-Сервис, 2016. – 120 с.
131. Правила предотвращения загрязнения воздушной среды с судов. Приложение VI // Международная конвенция по предотвращению загрязнения с судов. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/>.
132. Профос П. Регулирование паросиловых установок. – М.: Энергия, 1967. – 368 с.
133. Подпорин С. А. Использование нейро-нечетких контроллеров в системах управления движением морских судов / С. А. Подпорин // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних сил. – 2012. – Вип. 4. – С. 181 – 187.
134. Поступаева С.Г. Реализация алгоритмов нечеткого вывода для настройки ПИ–регулятора / С.Г. Поступаева, И.Е Грязнов // Известия ВолгГТУ. – 2017. – Вып 5 (200). – С. 78 – 83.
135. Пятакович В.А. Параметрическая оптимизация нейросетевой системы классификации морских целей по критерию надежность / В.А. Пятакович, В.Ф.

Рычкова // Морские интеллектуальные технологии. – 2018. – № 4 (42) Т. 5. – С. 153 – 162.

136. Ривкин С.Л. Теплофизические свойства воды и водяного пара / С.Л. Ривкин, А.А. Александров. – Л.: Судостроение, 1980. – 232 с.

137. Репин А.И. Математическое и программное обеспечение алгоритмов идентификации и адаптации САУ и их реализация в современных ПТК / А.И. Репин, Н.И. Смирнов, В.Р. Сабанин, А. Н. Максимов, А.Н. Игнатенко // Сборник трудов конференции. – 2008. – М.: Издательство МЭИ. – С. 34 – 45.

138. Ротач В.Я. Теория автоматического управления / В.Я. Ротач. – М.: МЭИ, 2008. – 396 с.

139. Ротач В. Я. Настройка регуляторов модифицированным методом Циглера-Николса / В. Я. Ротач // Промышленные контроллеры АСУ. – 2008. – №2. – С. 38 – 42.

140. Ротач В.Я. Об адаптивных системах управления с текущей идентификацией объекта / В.Я. Ротач // Промышленные САУ и контроллеры. – 2007. – № 5. – С. 21 – 28.

141. Ротач В.Я. К расчету оптимальных параметров реальных ПИД-регуляторов по экспертным критериям / В.Я. Ротач // Промышленные САУ и контроллеры. – 2006. – № 2. – С. 22 – 29.

142. Ротач В.Я. Настройка промышленных контроллеров по переходным характеристикам систем регулирования без их аппроксимации / В.Я. Ротач, В.Ф. Кузищин, С.В. Петров // Теплоэнергетика. – 2010. – № 10. – С. 50 – 57.

143. Ротач В.Я. О фазы ПИД-регуляторах / В.Я. Ротач // Теплоэнергетика. – 1999. – № 8. – С. 32 – 36.

144. Ротштейн А.П., Штовба С.Д. Влияние методов дефаззификации на скорость настройки нечеткой модели / А.П. Ротштейн, С.Д Штовба // Кибернетика и системный анализ. – 2002. – № 5. – С. 169 – 176.

145. Руководство по техническому надзору за судами в эксплуатации: Регистр. – С-Пб.: Транспорт, 2016. – 416 с.
146. Рутковская Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский. – М.: Горячая линия-Телеком, 2006. – 383 с.
147. Солодовников В.В. Статистическая динамика линейных систем автоматического управления / В.В. Солодовников. – М.: Физматгиз, 1960. – 656 с.
148. Сигеру О. Нейрокомпьютеры и их применение / Омату Сигеру, Халид Марзуки, Юсуф Рубия: пер с англ. Н.В. Батина под. ред. А.И. Галушкина, В.А. Птичкина. – М.: Изд. предприятие журн. “Радиотехника”, 2000. – 272 с.
149. Селезнёв Ю.С. Сжигание обводненных мазутов в судовых котельных установках / Ю.С. Селезнёв, В.Н. Стаценко., В.С. Кузин – ДВГТУ, 2004. – 104 с.
150. Серов Е.П. Динамика парогенераторов / Е.П. Серов, Б.П. Корольков. – М.: Энергия, 1972. – 416 с.
151. Сизых В.А. Судовая автоматика и аппаратура контроля / В.А. Сизых. – Л.: Транспорт, 1986. – 280 с.
152. Султанов А.М. Судовые вспомогательные и утилизационные котельные установки / А.М. Султанов. – Новороссийск: ГМУ им. адм. Ф.Ф. Ушакова, 2016. – 96 с.
153. Сыромятников В.Ф. Наладка автоматики судовых энергетических установок / В.Ф. Сыромятников. – Санкт-Петербург: Судостроение, 2009. – 352 с.
154. Справочник разработчика. РРМ-3. Защита и управление судовой электростанцией // DEIF A/S. – 113 с.
155. Тимошевський Б.Г., Ткач М.Р., Шалапко Д.О. Основні положення математичної моделі додавання водню на лінії високого тиску паливної



апаратури / Б.Г. Тимошевський., М.Р. Ткач., Д.О. Шалапко // Вісник ХНТУ №3 (62), 2017., Том 1. – С. 233-237.

156. Техническая документация по эколого-теплотехническим испытаниям котлоагрегата ГМ-50-15/250, ст.№3 (топливо: мазут) / “ОДЕССА ЭНЕРГОНАЛАДКА”. – Одесса, 2014. – 56 с.

157. Технические характеристики вспомогательных и утилизационных котлов марок: КАВ, КУП, Clayton, Zafa, Hitachi, Mitsubishi. URL: <http://shipservice.com.ua/>.

158. Трёмбовля В.И. Теплотехнические испытания котельных установок / В.И. Трёмбовля, Е. Д. Фигнер. – М.: Энергия, 1977. – 296 с.

159. Усков А. А. Системы управления с нечеткими супервизорными ПИД-регуляторами / А. А. Усков, Е. В. Киселев // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2005. – № 9. – С. 31 – 33.

160. Указания по расчету выбросов оксидов азота с дымовыми газами котлов тепловых электростанций РД 34.02.304-95. URL: <http://www.businesspravo.ru/Docum/>.

161. Усков А.А. Гибридный нейросетевой алгоритм построения аппроксимационных моделей сложных систем / А.А. Усков, С.А. Котельников // Программные продукты и системы. Приложение к журналу Проблемы теории и практики управления. – 2007. – № 3. – С. 63 – 64.

162. Фельдбаум А.А. Основы теории оптимальных автоматических систем / А.А. Фельдбаум. – М.: «Физматгиз», 1963. – 552 с.

163. Фок А.А. и др. Судовой механик. Том 2. /Под ред. А.А. Фок. – Ростов Н/Д: Феникс, 2010. – 1032 с.

164. Филимонов А.Б. Некоторые проблемные аспекты нечеткого ПИД-регулирования / А.Б. Филимонов, Н.Б. Филимонов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2018. – Том 19, № 12. – С. 762 – 768.

165. Харченко Р.Ю. Анализ адаптивных методов настройки нечетких и ПИ – регуляторов в сложных объектах управления / Р.Ю. Харченко, В.С. Михайленко // Научные труды ХПИ. – 2012. – № 37. – С. 78 – 89.
166. Хряпченков А.С. Судовые вспомогательные и утилизационные котлы. – 2-е изд. перераб. и доп. / А.С. Хряпченков. – Л.: Судостроение, 1988. – 296 с.
167. Хачоян М.М. Снижение выбросов оксидов азота с отработавшими газами судовых дизелей и котлов абсорбцией водой: автореферат диссертации кандидата тех. наук. ГМУ им. Ф.Ф. Ушакова, Новороссийск, 2013. URL: <http://www.dslib.net/sudovenergoustanovki>.
168. Цыпкин Я.З. Основы информационной теории идентификации / Я.З. Цыпкин. – М., Наука, 1984. – 320 с.
169. Шаровин И.М. Применение искусственных нейронных сетей для адаптации САУ в процессе их эксплуатации / И.М. Шаровин, Н.И. Смирнов, А.И. Репин // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2012. – № 4. – С. 27 – 32.
170. Шевцов Ю.Д., Дудник Л.Н. Алгоритм диагностики технического состояния двигателя по параметрам частотных характеристик масляного фильтра / Ю.Д. Шевцов, Л.Н. Дудник // Научно-технические ведомости СПбГПУ – 2018 . – № 4 . – С. 63– 69.
171. Штейнберг Ш.Е. Проблемы создания и эксплуатации эффективных систем регулирования / Ш.Е. Штейнберг, Л.П. Сережин, И.Е. Залуцкий, И.Г. Варламов // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2014. – № 7. – С. 1 – 7.
172. Штовба С. Д. Проектирование нечетких систем средствами MatLab / С. Д. Штовба. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 288 с.
173. Электроэнергетика и охрана окружающей среды. Функционирование энергетики в современном мире. URL: <http://energetika.in.ua/ru/books/book-5/intro>.

174. 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.
175. Aguero J. C. Virtual closed loop identification: a subspace approach / J. C. Aguero, G. C. Goodwin // 43rd IEEE Conference on Decision and Control. – 2004. – CDC, Vol. 1. – 14 – 17 Dec. – P. 364 – 369.
176. 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.
177. Aalborg Boiler OL type Quick Description & Troubleshooting. URL: <https://seatracker.ru/viewtopic.php?t=3682>.
178. Astrom K .J, Wittenmark B. F. Adaptive Control / K. J. Astrom, Wittenmark B. F. // Ed. Addison-Wesley Publishing. – Vol. 10, 1989. – P. 355 – 359.
179. Baocheng Lu, Jing Li. Design and application of marine boiler control system based on PLC and touch screen / Lu Baocheng, Li. Jing // 7th International Conference on Advanced Design and Manufacturing Engineering (ICADME 2017), Advances in Engineering Research, volume 136. – P. 388 – 391.
180. Boiler Operating Mistakes On Ships That Can Cost Big Time. URL: <https://www.marineinsight.com/tech/boiler>.
181. Boiler Construction and Design. URL: [https:// www.marineinsight.com](https://www.marineinsight.com).
182. Boiler Operation Engineering: Questions and Answers. URL: <https://seatracker.ru/viewtopic.php?t=17253>.
183. Boiler Aalborg. URL: <https://seatracker.ru/viewtopic.php?t=3960>.
184. Boiler Control Systems Engineering. URL: <https://seatracker.ru/viewtopic.php?t=1794>.
185. Chiu S. Using fuzzy logic in control applications: beyond fuzzy PID control / S. Chiu // IEEE Control Systems Magazine, vol. 18, Issue 5, Oct 1998. – P. 100 – 104.

186. Chuntao Man, Jia Li, Lanying Wang and Yantao Chi. The Fuzzy PID Control System for Superheated Steam Temperature of Boiler. // The 6th International Forum on Strategic Technology. – 2011. – P. 56 – 64.
187. J. Dvornik, S. Dvornik, Simulation Modelling and heuristic optimization of the ship steam boiler // The 26th IASTED International Conference on Modelling, Identification, and Control, MIC 2007, February 12 – 14, 2007. – Innsbruck, Austria, 105 – 108. – P. 66 – 74.
188. J. Dvornik, S. Dvornik, E. Tireli, System Dynamics Simulation Model of the Ship Steam Boiler, // 11<sup>th</sup> World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics, WMSCI 2007, Orlando, USA, July 8 – 11, 2007. – P. 77 – 84.
189. Dzida, M. On the possible increasing of efficiency of ship power plant with the system combined of marine diesel engine, gas turbine and steam turbine, at the main engine – steam turbine mode of cooperation, // Polish Maritime Research, 59. – 2019. – Vol. 16. – P. 47 – 52.
190. Instruction manual ship auxiliary boiler MAC– 35B / Mitsubishi heavy industries, LTD.
191. Escamilla–Ambrosio, P.J. A novel design and tuning procedure for PID type fuzzy logic controllers / P.J. Escamilla–Ambrosio, N. Mort // International IEEE Symposium on Intelligent Systems. – 2012, vol. 1. – P. 36 – 41.
192. G. Genre. Boiler Control Systems Engineering /Genre G. Publisher: The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2018. – 144 p.
193. A Guide. Boiler Construction and Design // MARINE BOILER SERIES. URL: [www.marineinsight.com](http://www.marineinsight.com).
194. Ho M.T. and PID Controller Design for Robust Performance / M.T. Ho, C.Y. Lin. // IEEE Trans. on Automatic Control, v. 48, № 8, Aug. 2003. – P. 1404 – 1409.
195. 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.

196. 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.
197. Improving Direct Efficiency of Boilers – Role of Automation. URL: <https://www.forbesmarshall.com>.
198. 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.
199. A. Sinan Karakurt, Yasin Ust. Marine Steam Turbines // INT – NAN 2011, Conference Paper August 2011. URL: <https://www.researchgate.net/publication/270239382>. – pp. 55 – 61.
200. Kalman R.E. A new approach to linear filtering and prediction problems. Journal of Basic Engineering 82 (1), 1960. – pp. 35 – 45.
201. Kawasaki steam boiler UME 65/52 // SHIP MANUALS.
202. 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.
203. Mac Type aux. boiler operation and maintenance instructions // Ship manuals. – 98 p.
204. Marine Boiler and Steam Turbine Generator. URL: [https://www.mhimme.com/auxiliary\\_boilers.html](https://www.mhimme.com/auxiliary_boilers.html).
205. Mitsubishi Auxiliary Boiler MAC-B. URL: <https://ru.scribd.com/document/334763233/Mitsubishi-Auxiliary-Boiler-MAC-B-pdf>.
206. 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.

207. 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. – P. 1 – 13.
208. Mamdani E.H. Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes / E.H. Mamdani // *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*. – 1973. – Vol. SMC-3, No. 1. – P. 28 – 44.
209. Ma L. Y., Y. J. Lin, and K. Y. Lee. Superheater steam temperature control for a 300 MW boiler unit with inverse dynamic process models. // *Proc. of the IEEE Power & Energy Society General Meeting*, in Minneapolis MN, USA, July 25 – 29, 2016. – P. 38 – 52.
210. Mikhailenko V.S. Analysis of Traditional and Neuro Fuzzy Adaptive System of Controlling the Primary Steam Temperature in the Direct Flow Steam Generators in Thermal Power Stations / V. S. Mikhailenko, R. Yu. Kharchenko. // *Automatic Control and Computer Sciences* – 2014. – Vol. 48, №. 6. – P. 334 – 344.
211. 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](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvngu_2014_4_11).
212. Mikhailenko Vladislav S., Solodovnik MihailS. Statement of the Synthesis Problem of the Intellectual System of Adaptive Management. / VladislavS. Mikhailenko, MihailS. Solodovnik. // *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, Gil-Lafuente, Zopounidis Constantin (Eds.). – 2015. – Vol. 675. – 223 p. – P. 165 – 179. (Springer).
213. Mikhailenko V. S. Analysis of the Adaptive Neural Network Router / V. S. Mikhailenko, M. S Solodovnik // *Automatic Control and Computer Sciences*. – 2016. – Vol. 50, No.1. – P. 46 – 53.

214. Myřków, J., A method of predicting the emission of toxic compounds from the exhaust gases of oil-fired auxiliary ship's boilers // *Obsáugiwanie Maszyn I UrządzeŃ OkrĆtowych OMiUO* Maritime University of Szczecin, 2005. – pp. 393 – 402.
215. Ross T. J. *Fuzzy Logic with Engineering Applications*, Hoboken, NJ: Wiley, 2016. – 580 p.
216. Schedrolosev O.V. Selection of a generalized efficiency criterion for the designing and technology of composite dock building / O.V. Schedrolosev // *Матеріали міжнародної наукової конференції «Теоретичні та прикладні питання математики, механіки та інформатики»*. – Караганда: Карагандинський державний університет імені академіка Е.А.Букетова, 2019. – С. 165 – 166.
217. Solberg. B. Control properties of bottom fired marine boilers. / B. Solberg, M. Karstensen, P. Andersen // In T. Gundersen, editor, *ECOS 2005 Conference*, volume 2, Trondhjem. – 2005 – Norway. – P. 669 – 678.
218. 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.
219. 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.
220. 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 2016. – P. 1 – 6.
221. 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.

222. 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.
223. Varlamov G.B., Pryimak K.O., Olinevych N., Ocheretyanko M. Features of integrated energy assessment of the actual environmental performance of energy facilities// Electromechanical and energy saving systems, 2015. – №4/2015 (32). – pp. 75 - 81.
224. Van der Pol, B., «On relaxation-oscillations», The London, Edinburgh and Dublin Phil. Mag. & J. of Sci., 2 (7), 978 – 992 (1927).
225. 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.
226. Yang T. Fuzzy cellular neural networks / T. Yang, L.O. Chua // A survey, Journal of Signal Processing, vol. 4, no. 1, Jan. 2016. – pp. 7 – 20.
227. Yongquan Y. A PID neural network controller / Y. Yongquan, H. Ying, Z. Bi // Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks, vol. 3, 20 – 24 July 2017. – P. 1933 – 1938.
228. Yu W. S. PID controller design using dynamical neural networks. Neural Networks Proceedings / W. S. Yu, T. C. Lu // IEEE World Congress on Computational Intelligence vol. 3, 4 – 9 May 2008. – P. 2131 – 2135.
229. Zadeh L. A. Fuzzy sets / L. A. Zadeh // Information and Control. – 1965, №8. – P. 338 – 353.
230. 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.



231. Ziegler J.C. Optimum settings for automatic controllers / J.C. Ziegler, N.B. Nichols // ASME. Transactions, 1942. – Vol. 64. – № 8. – P. 101 – 108.
232. Wei Wang, Han-Xiong Li, Jingtao Zhang. Intelligence-Based Hybrid Control for Power Plant Boiler // IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 10, No. 2 March 2012. – P. 10 – 18.
233. Xiangjie Liu, Felipe Lara-Rosano. Generalized Minimum Variance Control of Steam-Boiler Temperature using Neuro-Fuzzy Approach // Proceedings of the 5'World Congress on Intelligent Control and Automation, Hangzhou, P.R. China, June 15 – 19, 2018. – P. 134 – 148.
234. Xiangjie Liu, Hao Zhang. Modeling of an ultra-supercritical boiler-turbine system with stacked denoising auto-encoder and long short-term memory network // Information Sciences, Vol. 525, Jul 2020. – P. 134 – 152.
235. Yu Yanzhi, Xu Haichuan, Lv Junxian, Chen Duogang, Dong Gongjun, Shen Bo, Liu Sheng. 600 MW Supercritical Boiler's Main Steam Temperature Control Analysis // WASE International Conference on Information Engineering, 2016. – P. 56 – 68.
236. Gu Xiu Ping. Study on the Superheated Steam Temperature Control System Based on Fuzzy-Neural Network // Tianjin University, 2017. – P. 118 – 126.

## Додаток А. Акти впровадження результатів дисертаційного дослідження

ЗАТВЕРДЖУЮ



Проректор з науково-педагогічної  
роботи  
Національного університету  
«Одеська морська академія»  
д.т.н., професор

В.М.Захарченко

«10» 09 2020 р.

## АКТ

використання результатів дисертаційної роботи  
к.т.н., доцента Михайленка Владислава Сергійовича  
на тему «Концепція розробки систем управління судновими  
пароенергетичними установками» в науково-дослідних  
роботах які, виконувались і виконуються в університеті

Ми, що нижче підписались, начальник науково-дослідної частини університету Савчук В.Д., завідувач кафедри електрообладнання і автоматики суден Луковцев В.С. склали цей акт у тому, що Розділ 2. «Ідентифікація параметрів суднових парогенеруючих установок» дисертаційної роботи Михайленка В.С. ввійшов складовою частиною в заключний звіт науково-дослідній роботі «Підвищення ефективності, надійності і якості функціонування суднових енергетичних установок», ОНМА, Одеса, 2017 р. (державний реєстраційний номер № 0115U003582, науковий керівник к.т.н, доцент Луковцев В.С.).

Розділ 4. «Розробка методів проектування нелінійних систем керування, суднових парогенеруючих установок, діючих на основі теорії нечіткої логіки» дисертаційної роботи Михайленка В.С. ввійшов складовою частиною в звіт науково-дослідній роботі «Методи і способи підвищення ефективності функціонування суднових енергетичних установок», НУ «ОМА», Одеса, 2020 р. (державний реєстраційний номер № 0117U005137, науковий керівник к.т.н, доцент Луковцев В.С.).

Начальник науково-дослідної  
частини НУ «ОМА»,  
к.т.н.,с.н.с., професор

В.Д. Савчук

Завідувач кафедри електрообладнання  
і автоматики суден,  
к.т.н, доцент

В.С. Луковцев

ЗАТВЕРДЖУЮ»  
 Перший проректор  
 Національного університету  
 «Одеська морська академія»  
 д-р. ю. наук, професор  
 О.М. Шемякін



### АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи  
 к.т.н., доцента Михайленка Владислава Сергійовича  
 на тему « Концепція розробки ситсем управління  
 судновими пароенергетичними установками» в освітньому процесу  
 Національного університету «Одеська морська академія»

Ми, що нижче підписались, начальник навчального відділу Національного університету «ОМА» Пархоменко М.М., декан факультету автоматики і електромеханіки д.т.н., доц. Бодашко В.В., зав. кафедрою електрообладнання і автоматики суден к.т.н, доцент Луковцев В.С., склали цей акт про те, що результати дисертаційної роботи Михайленка В.С. впроваджені в освітній процес кафедри електрообладнання і автоматики суден у розділах дисциплін «Системи управління енергетичними та загально-судновими установками»; «Суднові системи моніторингу»; «Суднові інтегровані системи».

Начальник навчального відділу,

М.М. Пархоменко

Декан факультету  
 автоматики і електромеханіки,  
 д.т.н., доц.

В.В. Бодашко

Зав. кафедрою  
 електрообладнання і автоматики суден,  
 к.т.н., доц.

В.С. Луковцев

## АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи к.т.н., доцента

**Михайленко Владислава Сергійовича**

**«Концепція розробки систем управління судновими пароенергетичними  
установками»**

Цим актом підтверджується, що результати дисертаційної роботи к.т.н., доцента Михайленко В.С. впроваджені в методику проектування систем управління паровими котлами яка використовується компанією «Енергетичні інвестори».

Запропоновані методи та алгоритми успішно використовуються при складанні проектної технічної документації по САУ парових котлів і визначенню статичних і динамічних характеристик парогенеруючих систем. За допомоги програмного додатку що реалізує нейромережеву систему корекції коефіцієнта надлишку повітря в системах горіння, вдалося істотно знизити теплових втрат пов'язані з перепалом палива.

Директор



Савенко Д.А



«Затверджую»  
 Директор проектно - монтажної  
 компанії ТОВ «Южспецмонтаж»



Королев П.В.

### АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи к.т.н., доцента  
**Михайленко Владислава Сергійовича**

**«Концепція розробки систем управління судновими пароенергетичними  
 установками»**

Цим актом підтверджується, що результати дисертаційної роботи к.т.н., доцента Михайленко В.С. впроваджені в методику розробки і налагодження систем автоматичного управління паровими котлами малої і середньої потужності які знаходяться на обслуговуванні фахівцями компанії «Южспецмонтаж».

Отримані математичні моделі регульованих і контрольованих параметрів водотрубних парових котлів марок ДКВР, ГМ, НЛЗ, ТП та ін., використовуються для розрахунку настроювальних параметрів ПІД - контролерів в локальних контурах управління.

Розроблена Михайленко В.С. експертна система ідентифікації показників якості перехідних процесів систем управління парових котлів дозволяє істотно скоротити трудові витрати при проведенні пуско-налагоджувальних робіт систем управління котельних установок і прискорити виведення парогенераторів на заданий паровий режим без істотних відхилень регульованих параметрів.

«УТВЕРЖДАЮ»



Директор Ладжинской ТЭС

Данченко А.К.

2012 р.

## АКТ

внедрения результатов научной работы к.т.н., Михайленко В.С.  
в методику модернизации АСУ ТП ТЭС

Комиссия в составе:

председатель нач. ВТВ Сторожук В.А.

члены: нач. ЦТАИ Рокицкий В.И.

нач. АСУ Березицкий Д.А.

На основе анализа предоставленных научных материалов Михайленко Владислава Сергеевича, комиссия установила:

Предложенные к.т.н., доцентом Михайленко В.С., новые теоретические и практические решения по разработке и эксплуатации высокоэффективных систем управления парогенераторными установками являются актуальными и перспективными направлениями в области проектирования, наладки и адаптации АСУ энергоблоков

Разработанные методы и алгоритмы адаптивных нечетких, нейросетевых и нейро-нечетких АСУ процессами горения топлива, температуры перегретого пара, распределения паровой нагрузки, систем мониторинга содержания уходящих газов в атмосферу и т.д., способствуют повышению технико-экономических и экологических показателей энергоблоков, работающих в базовых и регулировочных режимах и увеличению их КПД. Предложенная концепция создания интеллектуальных систем управления парогенераторами является перспективной и будет учитываться в методике проведения процессов пуско-наладочных работ АСУ парогенераторов и внедрена в программно - технически комплекс электростанции и системы поддержки принятия решений операторами энергоблоков.

председатель нач. ВТВ

члены: нач. ЦТАИ

нач. АСУ

Сторожук В.А.

Рокицкий В.И.

Березицкий Д.А.

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор Ладыжинской ТЭС

Данченко А.К.

« 12 » ноября 2012 г.

АКТ

внедрения результатов научно-исследовательской Михайленко В.С. в работу по модернизации систем автоматического управления теплоэнергетическими процессами энергоблоков и вспомогательного энергетического оборудования Ладыжинской ТЭС

Комиссия в составе:

председатель нач. ВТВ Сторожук В.А.

члены: нач. ЦТАИ Рокицкий В.И.

нач АСУ Березицкий Д.А.

Комиссия установила:

Теоретические и практические решения по созданию и эксплуатации интеллектуальных САР ТП энергоблоков являются важным и актуальным направлением в области разработки, модернизации и построения новых энергоблоков и вспомогательного оборудования современных ТЭС. Разработанные методы и алгоритмы адаптивных нечетких автоматических систем управления технологическими процессами способствуют повышению технико-экономических показателей энергоблоков, работающих в базовых и регулировочных режимах, способствуют значительному энергоресурсосбережению в работе вспомогательного энергетического оборудования. Рассмотренная концепция интеллектуального управления является перспективной и будет применена при проведении процессов пуско-наладочных работ АСУ ТП, внедрена в программно – технических комплексах ТЭС, принята на вооружение в действиях операторов обслуживающих энергетические установки ТЭС и в дальнейших регламентных работах на электростанции.

председатель нач. ВТВ

Сторожук В.А.

члены: нач. ЦТАИ

Рокицкий В.И.

нач АСУ

Березицкий Д.А.



**ПРИВАТНЕ АКЦІОНЕРНЕ ТОВАРИСТВО  
«ДУНАЙСУДНОРЕМОНТ»**

Адреса: Україна, 68607, Одеська область, м. Ізмаїл, вул. Судноремонтників, 1  
р/р 26003010016987 Акціонерний Банк "Південний", МФО 328209, ОКПО 35855645  
телефон (04841) 2-50-04; телефакс: (04841) 2-50-04; e-mail: izmssrz@gmail.com

---

**АКТ**

про використання результатів дисертаційної роботи  
Михайленка Владислава Сергійовича  
«Концепція розробки систем управління судновими пароенергетичними  
установками»

Цей акт складено про те, що метод адаптації систем керування, який реалізовано у програмному продукті «Системи підтримки прийняття рішень при налагоджуванні контролера суднового котла», що запропоновано у дисертаційній роботі Михайленка Владислава Сергійовича «Концепція розробки систем управління судновими пароенергетичними установками» було використано під час проведення ходових випробувань на судні «Mekhanik Khachepuridze».

При цьому було забезпечено поліпшення експлуатаційних характеристик систем управління (зниження часу на процеси налагодження регуляторів суднового котла на 40 хвилин) і поліпшені показники якості перехідних процесів (зменшення часу регулювання на 35% і першого відхилення на 15%).

Голова правління ПрАТ «Дунайсудноремонт»



В.О. Сідаков



## Додаток В. Технологічна карта

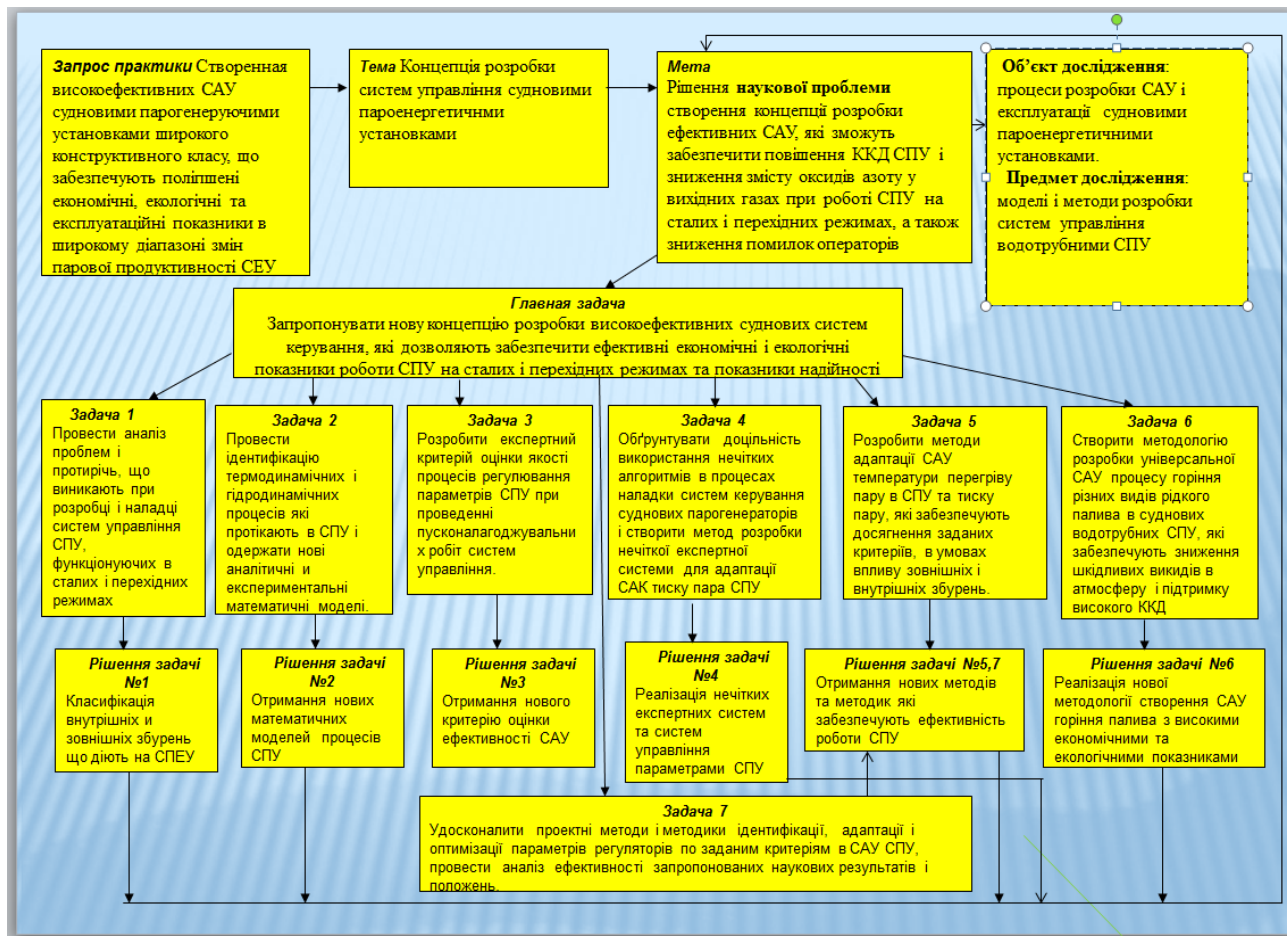


Рис. В. Структурна схема технології наукового дослідження

## Додаток Г. Техніко - економічні показники процесу впровадження НМСАУ СПУ

Для оцінки економічного ефекту від впровадження нового варіанту схеми інтелектуальної САУ СПУ Mitsubishi MB 180, яка працює з СПТУ 30 МВт ( $h_y = 7000$  год), використовуються дані теплового розрахунку і комп'ютерних експериментів з аналізу перехідних процесів НМСАУ. Так аналіз часу регулювання САУ температури перегрітого пару (рис.Г.1.) дозволяє стверджувати, що при номінальному і сталому режимах роботи СПУ нейромережевий і традиційний ПІ-регулятори демонстрували однакові показники якості (час регулювання  $T_{p1} = 200$  с). Однак, при впливі параметричного збурення (процеси 3 і 4 див. рис. Г.1), гібридна система володіє меншим часом регулювання ( $T_{p2} = 50$  с) в порівнянні з традиційною адаптивною САУ ( $T_{p3} = 88$  с), і першим відхиленням у гібридній САУ  $\Delta T_{1гр} = 15$  °С, традиційної  $\Delta T_{1гр} = 25$  °С, тобто запропонована гібридна САУ є оптимальною і економною, а традиційна каскадна САУ вимагає додаткової адаптації, що супроводжується економічними втратами (згідно з розрахунками - з перевитратою палива на 5 – 10 % в залежності від потужності парової турбіни).

ДПК марки Mitsubishi MB 180, що працює з СПТУ потужністю 30 МВт і діє під управлінням інтелектуальної САУ процесу горіння і моніторингу параметрів складу відхідного газу, кольору диму і витрати рідкого палива, а також при роботі 3 пальників, витрачає рідкого палива (мазуту) при номінальній потужності (згідно з розрахунками) близько 125 т/год. Вихід на задану температуру перегрітого пару досягається при роботі трьох пальників за  $T_{p1} = 200$  с, (див. рис. Г1). Для порівняння, традиційна САУ з ПІ-регулятором горіння палива в топці парогенератора Mitsubishi MB 180 передбачає роботу 6 пальників і досягнення заданої температури за  $T_{p2} = 500$  с. При витраті палива 136 т/ч в номінальному режимі (згідно з паспортними характеристиками ДПК).

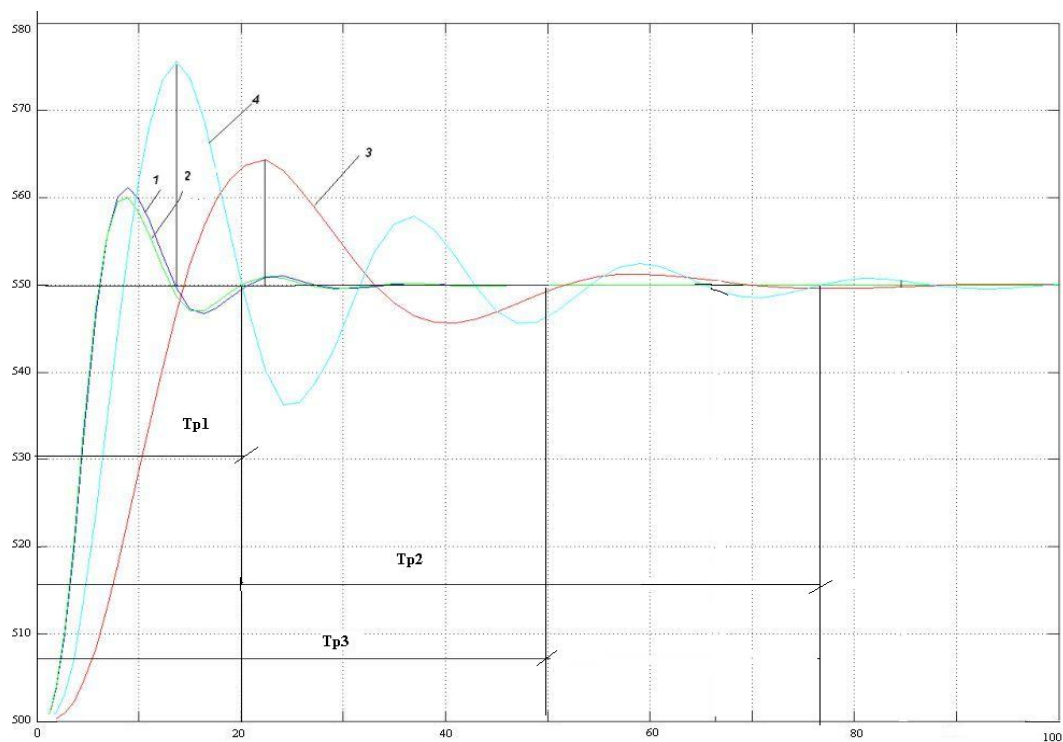
$T(t), ^\circ\text{C}$ 

 $t, \text{с}$ 

Рис. Г.1. Процеси по каналу регулювання:

- 1 – традиційної САУ (в сталому режимі),  
 2 – нейронечіткої САУ (сталий режим), 3 - нейронечіткої САУ (при зміні парового навантаження), 4 – традиційної САУ (при зміні парового навантаження).

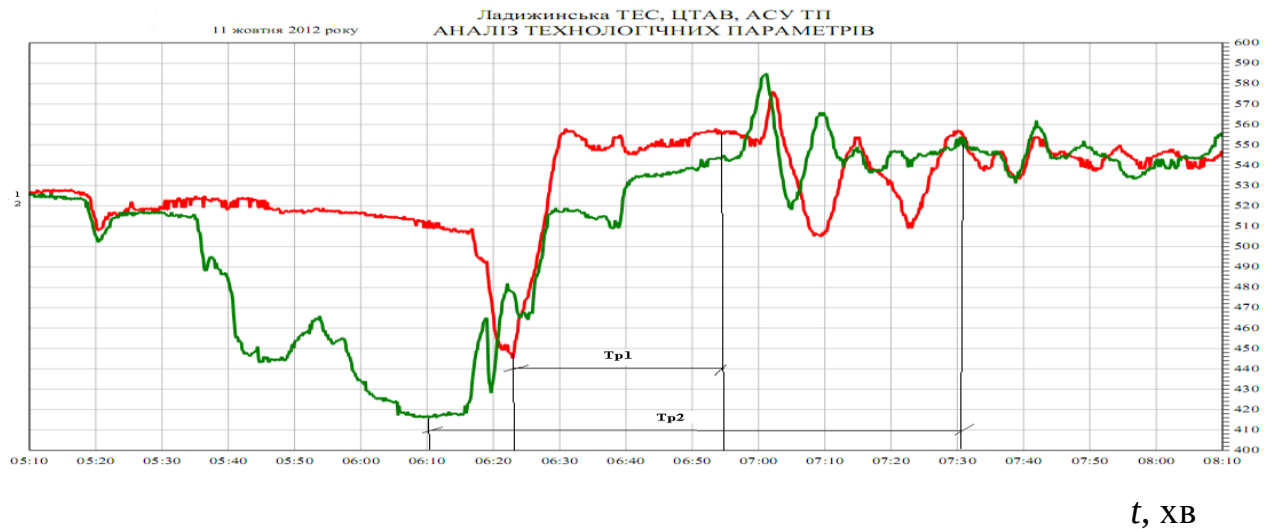
$T(t), ^\circ\text{C}$ 


Рис. Г.2. Перехідні процеси САУ температури перегрітої пари СПУ Mitsubishi MB 180

$T_{p1}$  – час регулювання в сталому режимі,  $T_{p2}$  – при перехідному режимі СПУ

Так для СПУ після впровадження інтелектуальної САУ приймемо наступні вихідні дані:  $D_{п.п}^м = 220$  т/г;  $B_T^{ном} = 125$  т/г (умовного палива);  $N_{тпн} = 30$  МВт;  $\eta_k = 53$  %; середньорічні  $D_{B_T}^{\sigma} = 4,5$  [%]<sup>2</sup> і  $D_{B_T}^н = 2,4$  [%]<sup>2</sup>; діюча САУ:  $\tilde{B}_T = 136$  т/г;  $b_y^н = 0,33$  кг/(кВт·г); (для діючої САУ - 0.4 кг/(кВт·г)) ;  $З_T = 17500$  грн./т (для флотського мазуту); (згідно економії часу регулювання на 8 хв) -  $\tilde{B}_T^{гнб} = 125$  т/г;  $A_{B_T} = 7,23$  [з апроксимуючої функції  $\eta_k = f(B_T)$ ];  $k_{D_{п.п.уП}} = 1$  т/(ч·%) [124].

Рішення. Визначаємо  $D_{B_T}$  у діючої САУ:

$$D_{B_T}^{\sigma} = \left( \frac{136}{950} \right)^2 25^2 \cdot 1 \cdot 4,5 = 55,13 (м / ч);$$

у інтелектуальної САУ:

$$D_{B_T}^{\sigma \text{int}} = \left( \frac{125}{950} \right)^2 25^2 \cdot 1 \cdot 4,5 = 48,85 (м / ч);$$

таким чином, при максимальній потужності СПУ економія палива складе  $\mathcal{E}_{кт} = 36,28$  (т/ч), тобто 12 %, в перерахунку на вартість  $C_{тэ} = 36,28 \cdot 750$  грн = 27210 грн. Далі знаходимо приріст ККД суднового парогенератора  $\Delta\eta_k/\eta_k = D_{B_T}^{\sigma} / D_{B_T}^{\sigma \text{int}}$

$$\Delta\eta_k/\eta_k = 1,54 \text{ \%}.$$

Тоді складова річного економічного ефекту від прироста ККД парового котла складе:

$$\Delta I = 7 \cdot 10^3 \cdot 8,282 \cdot 10^5 \cdot 0,3 \cdot 10^{-3} \cdot 21 \cdot \frac{2,94}{91} = 1179990 \text{ грн / год.}$$

При первинному вкладенні на модернізацію САУ головного водотрубного СПУ Mitsubishi MB 180 і впровадження інтелектуальних технологій  $C_1 = 950$  тис. грн, термін окупності капіталовкладень

$$C_{\text{трум}} = 950000 / 1179990 = 0,81 \text{ року або 10 місяців.}$$

Розрахунок економії коштів при поточних витратах від зниження витрат електроенергії на власні потреби СПУ є не тільки джерелами, а й одними з великих споживачів електроенергії на великотоннажному танкері. Середнє значення витрат енергії на власні потреби потужних СПУ СЕУ становить 4 – 8 % усієї кількості виробленої електроенергії суднової електростанції [124].

Економія поточних витрат від скорочення витрати енергії на власні потреби визначається зменшенням витрат енергосистеми судна на паливо при збереженні його відпуску споживачам

$$I_{c.n} = S_{T.C} \Delta N_{c.n},$$

де  $S_{T.C}$  – паливна складова собівартості електроенергії на найменш економічній СЕУ в енергосистемі;  $\Delta N_{c.n}$  – скорочення споживаної потужності на власні потреби. Визначити складову річного економічного ефекту від впровадження інтелектуальної САУ потужністю СПТУ за рахунок стабілізації частоти мережі, що веде до скорочення споживання потужності на власні потреби СЕУ на 1,5 %, дано  $\eta_{\text{э}}^{\text{б}} = 45,46 \text{ \%}$ ;  $\eta_{\text{э}}^{\text{н}} = 41,18 \text{ \%}$ ;  $S_{TC} = 0,73 \text{ коп/(кВт}\cdot\text{ч)}$ .

Рішення. Споживання потужності на власні потреби знайдемо по формулі

$$N_{c.n} = \frac{N_{\text{э}}(\eta_{\text{эб}} - \eta_{\text{эн}})}{39} = 0,0302 \cdot 800000 = 87794 \text{ кВт.}$$

Тоді скорочення споживаної потужності на власні потреби складе  $\Delta N_{с.н}=0,015 \cdot 87794 = 1317$  кВт, звідки складова річного економічного ефекта по формулі дорівнює:

$$\Delta И = 1317 \cdot 7000 \cdot 0,73 = 6729870 \text{ грн/рік.}$$

Слід зазначити, що наведені методики і приклади не охоплюють техніко-економічну ефективність інтелектуальної САУ об'єктів СПУ в цілому по всій СЕУ. Крім того, не розглядаються складові економічного ефекту від автоматизації в нестационарних і налагоджувальних режимах (пуски, аррестори, настройки, позаштатні ситуації), а також складові ефекту від технічно необхідних пристроїв і систем (запобіжні клапани, регулятори безпеки турбін, системи дистанційного управління регулюючими органами, СППР тощо). Можна вказати, що комплексна оцінка заходів щодо впровадження нових або вдосконалення існуючих варіантів САУ і САУ повинна враховувати поточні та капітальні витрати зі зміни характеристик ОУ (надійність, довговічність, складність), а також мінливість витрат по оперативному персоналу (чисельному складу, трудовитратам, скорочення помилкових дій і т. п.). Нові технічні засоби в СППР допоможуть швидше приймати обґрунтовані рішення з управління та оптимізувати витрати на проведення пуско-налагоджувальних робіт САУ СПУ. Процес налагодження суднових САУ об'єктів СПУ, за попередніми розрахунками при налагодженні берегових парогенераторів обслуговуючою компанією ТОВ «Южспецмонтаж», проходить в 3 рази швидше при використанні інтелектуальних адаптивних СППР, що істотно скорочує витрати на заробітну плату фахівцям з налагодження і модернізації САУ СПУ. Таким чином, економія палива при роботі СПУ в сталому режимах - при навантаженні 50 % від номінальної, згідно з наведеними розрахунками, склала близько 15 %; приріст ККД близько 8 %. Пропонована схема САУ оптимізації процесу горіння представлена на рис. Г.3.

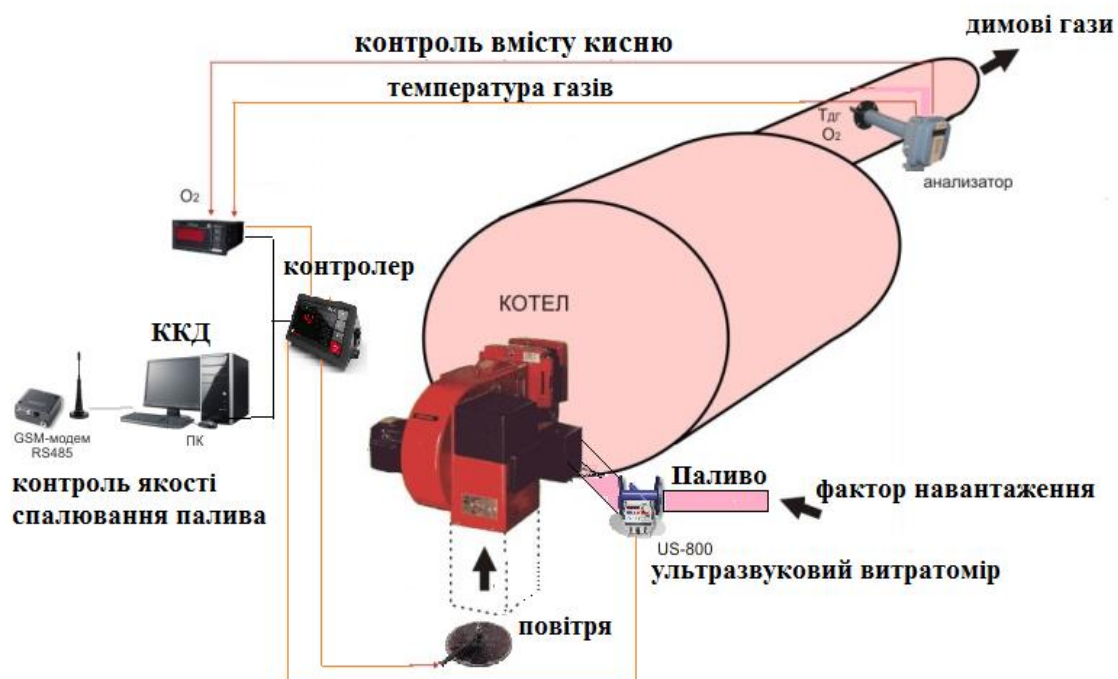


Рис. Г.3. Схема НМСАУ процесу оптимізації горіння палива в СПУ

Додаток І. Складання попереднього теплового балансу і визначення витрати палива ДПК МАС 35 з пароперегрівом

| № | Обумовлена величина                                              | Позначення  | Розмірність                                      | Розрахункова формула або спосіб визначення     | Результат розрахунку |
|---|------------------------------------------------------------------|-------------|--------------------------------------------------|------------------------------------------------|----------------------|
| 1 | 2                                                                | 3           | 4                                                | 5                                              | 6                    |
| 1 | Нижча теплота згорання робочої маси палива                       | $Q_H^P$     | $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$                   | З таблиць для заданої марки палива             | 38877                |
| 2 | Температура холодного повітря, яке поступає в повітропідігрівник | $t_{XB}$    | $^{\circ}\text{C}$                               | Приймається в межах 20 – 50 $^{\circ}\text{C}$ | 45                   |
| 3 | Температура підігрітого повітря, яке поступає в топку            | $t_{GB}$    | $^{\circ}\text{C}$                               | Приймають по таблицям [118]                    | 165                  |
| 4 | Теплоємність сухого холодного повітря при температурі, рівній    | $c_{XB}$    | $\frac{\text{кДж}}{(\text{м}^3 \cdot \text{K})}$ | 3 [118], по $t_{XB}$                           | 1,29                 |
| 5 | Теплоємність сухого підігрітого повітря при температурі, рівній  | $c_{GB}$    | $\frac{\text{кДж}}{(\text{м}^3 \cdot \text{K})}$ | 3 [118], по $t_{GB}$                           | 1,30                 |
| 6 | Теплоємність водяного пару при $t_{XB}$                          | $c'_{H_2O}$ | $\frac{\text{кДж}}{(\text{м}^3 \cdot \text{K})}$ | 3 [118], по $t_{XB}$                           | 1,49                 |



Продовження таблиці

| 1  | 2                                                                                 | 3               | 4                                                | 5                                                           | 6      |
|----|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|--------|
| 7  | Теплоємність<br>водяного пару tГВ                                                 | $c_{H_2O}$      | $\frac{\text{кДж}}{(\text{м}^3 \cdot \text{К})}$ | 3 [118], по $t_{ГВ}$                                        | 1,51   |
| 8  | Тепло, яке є в<br>вологому холодному<br>повітрі на вході в<br>повітропідігрівнику | $Q_{XB}$        | $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$                   | $\alpha(c_{XT} + 1,61W_B c'_{H_2O}) \cdot V_B^\circ t_{XB}$ | 643,5  |
| 9  | Тепло, внесене<br>вологим підігрітим<br>повітрям в топку                          | $Q_{ГВ}$        | $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$                   | $\alpha(c_{ГВ} + 1,61W_B c_{H_2O}) \cdot V_B^\circ t_{ГВ}$  | 2667,7 |
| 10 | Тепло, одержане<br>повітрям в<br>повітропідігрівнику                              | $\Delta Q_{ГВ}$ | $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$                   | $Q_{ГВ} - Q_{XB}$                                           | 2024,2 |
| 11 | Температура<br>холодного палива<br>перед паливо<br>підігрівником                  | $t_{XT}$        | $^{\circ}\text{C}$                               | Приймаємо рівній в<br>межах 20 – 50 $^{\circ}\text{C}$      | 40     |
| 12 | Температура<br>підігрітого палива,<br>що надходить до<br>форсунок (в топку)       | $t_{ГТ}$        | $^{\circ}\text{C}$                               | По рекомендації для<br>даної марки палива [159]             | 100    |
| 13 | Теплоємність<br>холодного палива                                                  | $c_{XT}$        | $\frac{\text{кДж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}$  | $1.73 + 0.0025 \cdot t_{XT}$                                | 1,81   |
| 14 | Теплоємність<br>підігрітого палива                                                | $c_{ГТ}$        | $\frac{\text{кДж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}$  | $1.73 + 0.0025 \cdot t_{ГТ}$                                | 1,98   |

## Продовження таблиці

| 1  | 2                                                                                                      | 3               | 4                              | 5                                                                                     | 6     |
|----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|--------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 15 | Тепло, що знаходиться в холодному паливі на вході в паливопідігрівник (фізичне тепло холодного палива) | $Q_{ХТ}$        | $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ | $c_{ХТ} t_{ХТ}$                                                                       | 54,4  |
| 16 | Тепло, внесене 1 кг підігрітого палива в топку (фізичне тепло підігрітого палива)                      | $Q_{ГТ}$        | $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ | $c_{ГТ} t_{ГТ}$                                                                       | 198,9 |
| 17 | Тепло, одержане паливом в паливопідігрівнику                                                           | $\Delta Q_{ГТ}$ | $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ | $Q_{ГТ} - Q_{ХТ}$                                                                     | 144,5 |
| 18 | Наявне тепло на 1 кг палива                                                                            | $Q_P^P$         | $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ | По даним для важкого палива                                                           | 42970 |
|    | Ентальпія живильної води                                                                               | $h_{ПВ}$        | $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ | По таблицям водяного пару [118], по тиску живильної води і тиску пару                 | 800   |
|    | Ентальпія перегрітої пари                                                                              | $h_{ПЕ}$        | $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ | По таблицям водяного пару [118], по тиску і температурі перегрітого пару              | 3263  |
|    | Кількість перегрітої пари в пароперегрівачі                                                            | $D_{ПЕ}$        | $\frac{\text{кг}}{\text{с}}$   | По паспортним даним СПУ МАС 35 при роботі на 50 % теплового навантаження (див. табл.) | 4,86  |

## Продовження таблиці

| 1                          | 2                                                             | 3          | 4      | 5                                                    | 6    |
|----------------------------|---------------------------------------------------------------|------------|--------|------------------------------------------------------|------|
| 19                         | Втрата тепла від хімічного недопалу (в процентах от $Q_p^p$ ) | $q_3$      | %      | Вибирається в межах 0,5 – 2,5 %                      | 1,3  |
| 20                         | Втрата тепла в навколишнє середовище                          | $q_5$      | %      | Вибирається в межах 0,5 – 1,5 %                      | 0,5  |
| 21                         | Ентальпія відхідних газів                                     | $I_{yx.g}$ | кДж/кг | По діаграмі $I - t$ , по $t_{yx.g}$                  | 2968 |
| 22                         | Температура відхідних газів                                   | $t_{yx.g}$ | °C     | Виходячи з паспортних даних СПУ МАС 35 [206]         | 220  |
| 23                         | Втрата тепла з відхідними газами                              | $q_2$      | %      | $\frac{I_{yx.g} - Q_{xb} - Q_{xt}}{Q_p^p} 100$       | 5,24 |
| 24                         | ККД СПУ МАС 35                                                | $\eta_k$   | %      | $100 - q_2 - q_3 - q_5$                              | 93   |
| Розрахована витрата палива |                                                               | $B_p$      | кг/с   | $\frac{D_{пе} (h_{пе} - h_{пв})}{0,01 \eta_k Q_p^p}$ | 0,28 |

## Додаток К Розрахунок процесу зростання низькотемпературної корозії в конструктивних елементах СПУ

Розглядаючи процес горіння рідкого палива можна вказати, що до чинників, що впливають на швидкість протікання низькотемпературної корозії, можна віднести умови протікання реакції горіння в топці. Так при підвищенні коефіцієнта надлишку повітря збільшується процентний вміст сірчаного ангідриду (при  $\alpha = 1,15$  окислюється 3,6 % сірки, який міститься в паливі; при  $\alpha = 1,7$  окислюється біля 7 % сірки). При коефіцієнтах надлишку повітря  $\alpha = 1,03 - 1,04$  сірчаний ангідрид практично не утворюється [69]. Таким чином, контроль процентного вмісту кисню в вихідних газах може дозволити оптимізувати не тільки процес горіння палива по показнику  $\alpha$ , але і уповільнити процес утворення низькотемпературної  $N_k^T$  і газової  $G_k^I$  корозій. З урахуванням пропонованих додаткових аналізованих параметрів рівняння представляється в удосконаленому вигляді:

$$T_2^{23} \frac{d^2 \Delta C_{O_2}}{dt^2} + T_1^{23} \frac{d \Delta C_{O_2}}{dt} + \Delta C_{O_2} = k_2^{23} \Delta M_L (t - \tau) + k_4^{23} \Delta B_T (t - \tau) + k_6^{23} \Delta N_k^T \cdot$$

Значення коефіцієнтів  $k_6^{23} = f(\alpha)$  визначаються експериментально.

Таблиця К.1

## Розрахункові коефіцієнти рівняння

| Коефіцієнти<br>рівняння                  | 25 % | 50 % | 75 % |
|------------------------------------------|------|------|------|
| $T_2^{23}, c$                            | 64   | 36   | 25   |
| $T_1^{23}, c$                            | 8    | 6    | 5    |
| $K_6^{23}, \text{мм/рік згідно}$<br>[69] | 0,05 | 0,08 | 0,1  |

Перехідні характеристики рівняння динаміки представлені на рис.К.1.

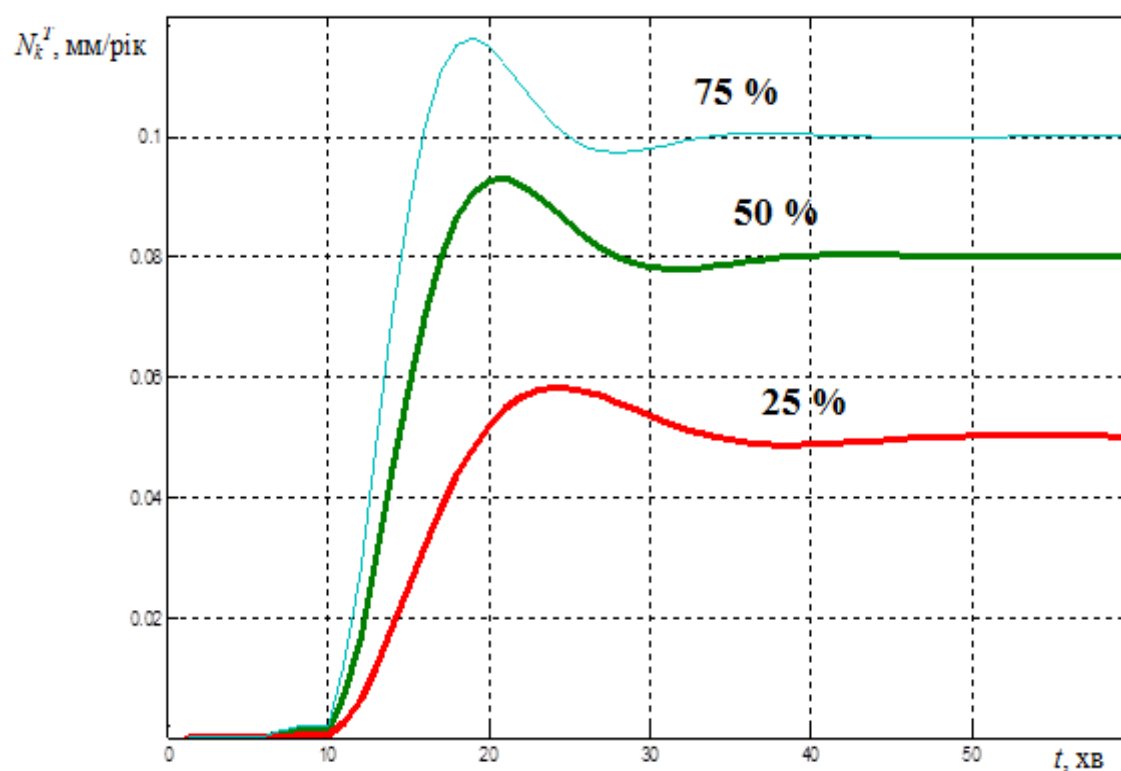
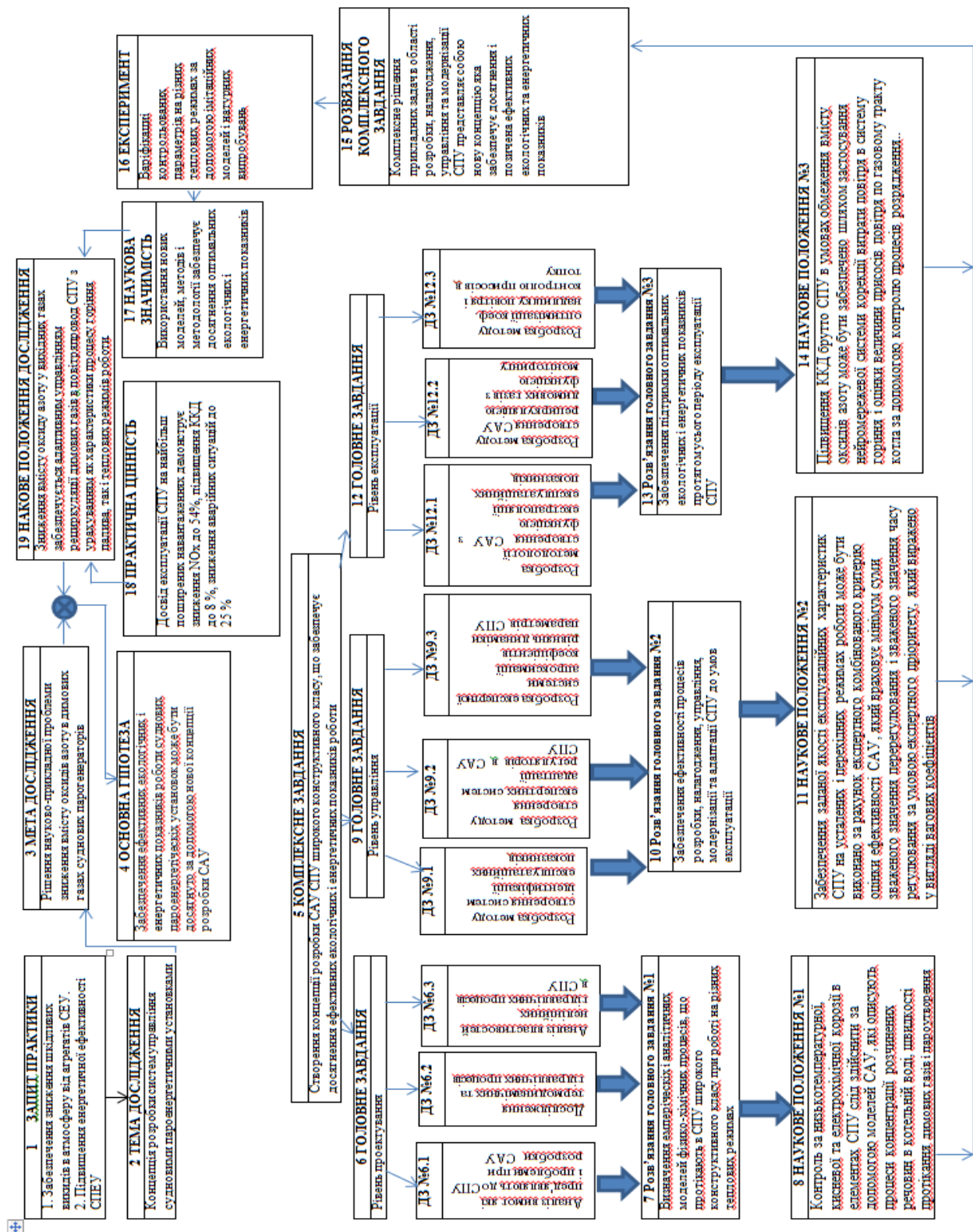


Рис. К.1. Зростання низькотемпературної корозії при різних теплових режимах СПУ

Додаток М. Карта технології проведених досліджень та отриманих наукових положень і практичних результатів.



Додаток Н. Експериментальний стенд лабораторії мікропроцесорної техніки  
кафедри ЕОіАС НУ «ОМА»



Рис. Н.1. Фотографія стенду з контролером для дослідження методів  
адаптивного управління