

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ "ОДЕСЬКА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ"

Михайленко Владислав Сергійович



УДК 629.5.063 - 047.37

**КОНЦЕПЦІЯ РОЗРОБКИ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ СУДНОВИМИ
ПАРОЕНЕРГЕТИЧНИМИ УСТАНОВКАМИ**

Спеціальність 05.05.03 – двигуни та енергетичні установки

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Одеса – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному університеті "Одеська морська академія" Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: **Горб Сергій Іванович,**
доктор технічних наук, професор,
Національний університет "Одеська морська академія",
завідувач кафедри теорії автоматичного управління та обчислювальної техніки

Офіційні опоненти: **Арсірій Василь Анатолійович,**
доктор технічних наук, професор,
Одеський національний політехнічний університет,
завідувач кафедри прикладної екології та гідрогазодинаміки

Єфімов Олександр В'ячеславович,
доктор технічних наук, професор,
Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут",
завідувач кафедри парогенераторобудування

Тимошевський Борис Георгійович,
доктор технічних наук, професор,
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова,
завідувач кафедри двигунів внутрішнього згоряння, установок та технічної експлуатації

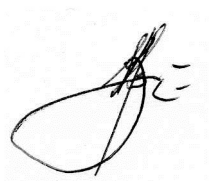
Захист відбудеться 23 березня 2021 року о 10.00 годині, на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.106.01, у Національному університеті "Одеська морська академія" за адресою: 65029, м. Одеса, вул. Дідріхсона, 8, корп. 1, зала засідань вченої ради.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного університету "Одеська морська академія" за адресою: м. Одеса, вул. Дідріхсона, 8, корп. 2, та за електронною адресою:

<http://onma.edu.ua/spetsializovana-vchena-rada-d-41-106-01>.

Автореферат розісланий 23 лютого 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради,
д.т.н., професор



В.В. Нікольський

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Суднові системи автоматичного управління (САУ) 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.

Суднова парогенераторна 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 САУ 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. Як правило, САУ СПУ в більшості розраховані на оптимізацію тільки номінального режиму роботи. Однак, при такому підході відбувається прискорення процесів утворення корозії на парогенеруючих елементах, що впливає на надійність роботи СПУ та значне збільшення показників вмісту шкідливих викидів у атмосферу.

Разом з тим, проблема захисту повітряного басейну стоїть дуже гостро. Токсичність оксидів азоту (NO_x) перевищує токсичність більшості інших шкідливих компонентів, тому проблема зниження викидів оксидів азоту в атмосферу має важливе значення у питанні охорони довкілля. Зниження NO_x ускладнюється тим, що їх максимальна поява відповідає режиму найбільш ефективного згоряння палива, тобто коефіцієнта корисної дії (ККД) СПУ, проте методи скорочення викидів NO_x не повинні призводити до зниження інтенсивності робочих процесів агрегатів СПУ. Тому проблема розробки і впровадження на судах нових, економічно відносно недорогих та екологічно ефективних технологій очищення димових газів СПУ від оксидів азоту, в тому числі за допомогою сучасних САУ, в зв'язку з вимогами Додатка VI МАРПОЛ є актуальною.

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 тощо.

За даними ІМО і Лондонського клубу взаємного страхування, аварії на судах через людські помилки складають не менш 70 - 75 %, при цьому значний сегмент зазначеної величини пов'язаний з причинами, що викликані неналежним технічним обслуговуванням САУ і експлуатацією агрегатів СЕУ, в тому числі СПУ.

Спеціалісти суднобудівних корпорацій стверджують, що в найближчому майбутньому судном буде управляти штучний інтелект без участі людини. Розробники суднових САУ в своїх проектних рішеннях обґрунтовують в найближчому майбутньому появу нового класу автоматизації для «Інтелектуального

судна» – AUT-0. 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 публікацій В.А. Арсірія, Б.Т. Бадагуєва, С.І. Горба, В.А. Голікова, Н.І. Денисенка, М. Дзіда, О.В. Єфімова, Е.В. Корнілова, В.К. Лисенка, Д.Х. Мілтоне, Б. Г. Тимошевського, А.А. Фока, А. Шоме, О.В. Щедролосоєва та інших показав, що питання економії паливних ресурсів і підвищення ККД парогенераторів, зниження вмісту шкідливих викидів у атмосферу, впливу корозії на суднові системи, використання альтернативного палива, вдосконалення математичних моделей енергетичних установок, оптимальної експлуатації СЕУ тощо, залишаються актуальними в умовах посилення нормативних показників NO_x , SO_x , зростання вартості енергоресурсів та конкуренції суднобудівних компаній за лідерство.

Таким чином, аналіз викладеного вище вказує на актуальність вирішення цілого ряду науково - прикладних задач, які в сукупності складають **наукову проблему** забезпечення ефективних екологічних і енергетичних показників роботи та надійності суднових високоавтоматизованих парогенераторів установок на усталених і перехідних режимах роботи з урахуванням вимог міжнародних конвенцій і за допомогою впровадження нової концепції розробки систем управління СПУ.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Актуальність вирішення проблеми в області розробки високоефективних САУ СПУ обумовлена необхідністю виконання вимог Додатка VI MARPOL 2016 року з розробки плану управління енергоефективністю 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 (розпорядження Кабінету Міністрів України № 2174-р від 20 жовтня 2010 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 налаштувальвальних 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 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 пароенергетичних 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 нейромережових систем управління процесами в парогенераторах СЕУ; імітаційного моделювання – для апробації і дослідження запропонованих моделей, методів і алгоритмів.

Експериментальні дослідження за визначенням математичних моделей парогенераторів виконувались на барабанних водотрубних парових котлах типу «ДКВР», «ГМ» тощо, які є за своїми конструктивними і виробничими

характеристиками аналоги суднових водотрубних парогенераторів фірм «Mitsubishi», «Alfa Laval Aalborg», «КАВ» тощо. Методи розрахунку оптимальних параметрів ПД-контролерів аналізувались з використанням лабораторних стендів кафедри електрообладнання і автоматики суден 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 судновими парогенераторними установками, 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 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 судового 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 ustalених 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 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 гвинтового 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 тренажерів - емуляторів: «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 - турбулізатора, 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 вклад 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 нейромережового 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 нейромережового регулятора, моделювання нейромережових 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: 15-19-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. Софія, Болгарія); 2 – 3-й МНПК «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті», (MINTT, м. Херсон, 2010 – 2011, 2017 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 дистанційний 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 МНТК «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика, (м. Одеса, НУ «ОМА», 2018 – 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), Index Copernicus, Google Scholar, INSPEC IDEAS тощо; 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.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У **вступі** обґрунтована актуальність обраної теми, сформульовані мета та завдання наукового дослідження, визначені наукова новизна й практичне значення отриманих результатів, показано особистий внесок автора в їх отриманні, охарактеризовані повнота викладення матеріалів дослідження у публікаціях, апробація результатів дослідження та їх впровадження.

У **першому розділі** виконано аналіз існуючих проблем і протиріч, які виникають на етапах розробки і впровадження САУ суднових парогенераторів. Вказано, що забезпечення регламентних енергетичних та екологічних показників роботи СПУ залежить від ефективної роботи системи управління параметрами парогенератора. У свою чергу, ефективність роботи системи управління визначається обраною концепцією розробки САУ, яка включає етапи проектування, наладки та експлуатації. Помилки, які допущено на будь-якому з них, призводять до зростання трудовитрат і часу простою обладнання, а також зводять до максимуму витрати на інших етапах життєвого циклу суднових парогенераторів.

Відзначається, що СПУ, як об'єкти управління, відрізняються широким розмаїттям за своїми конструктивними характеристиками і режимними параметрами, працюють в мінливих умовах навігаційного середовища і зміни режимів теплового навантаження. Величини навантажень СПУ залежать від типу судна, потужності та типу енергетичної установки, водотоннажності, призначення і району плавання судна. Парове навантаження СПУ в тривалих експлуатаційних режимах (стоянка з вантажними операціями, ходової) знаходиться в межах 10 - 90 % від номінального, а в короткочасних режимах (швартування, аварійний режим, зйомка з якоря) може бути зменшено до 20 - 40 % від номінального.

Виявлено та систематизовано три основні групи причин, що викликають збурення і впливають на елементи СПУ, що в свою чергу ускладнює роботу систем управління. Це, перш за все, умови, які задано 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 змінами (погіршенням) ефективності їх роботи, ушкодженнями, засміченням трубопроводів води і палива, несправністю сепараторів палива, 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.

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

При проведенні пуско-налагоджувальних робіт на нових або модернізованих СПУ, а так само при дистанційному управлінні СПУ, припускається значна ймовірність помилкових дій налагоджувального і обслуговуючого персоналу на судні, що може привести до подальшої неефективної роботи обладнання СПУ, яка супроводжується перевитратою палива, зниженням ККД, збільшенням вмісту шкідливих викидів димових газів (NO_x , SO_x) в атмосферу і аварійною зупинкою котла тощо.

Сукупність існуючих проблем висуває нові завдання по розробці високоефективних САУ, які здатні забезпечувати нормативні екологічні і енергетичні показники роботи СПУ протягом тривалого періоду експлуатації. Було висунуто гіпотезу – забезпечення ефективних екологічних і енергетичних показників роботи судових пароенергетичних установок може бути досягнуто за допомогою використання нової концепції розробки високоефективних САУ.

У другому розділі відзначено, що в зв'язку зі специфічними умовами роботи СПУ, впливом неконтрольованих зовнішніх збурень, зміною режимів навантаження агрегатів СЕУ, конструктивною різноманітністю СПУ, для отримання адекватних математичних моделей підсистем СПУ використовувався широкий ряд методів параметричної ідентифікації, класифікація яких показана на рис. 1.

Суднова пароенергетична установка як об'єкт управління являє собою складну динамічну систему з взаємопов'язаними вхідними та вихідними величинами (рис. 2). Виражена спрямованість ділянок регулювання по основних каналах регулюючих впливів, таких як: витрата живильної води $D_{\text{ПВ}}$ – рівень води в барабані $H_{\text{Б}}$; витрата води на уприскування $D_{\text{ВПР}}$ – температура перегріву пари $t_{\text{пн}}$; витрата палива $B_{\text{Т}}$ – тиск пари $P_{\text{п}}$; витрата повітря M_L ; вміст кисню у димових газах O_2 тощо, - дозволяє здійснити стабілізацію регульованих величин за допомогою незалежних одноконтурних систем регулювання, пов'язаних через загальний об'єкт управління (СПУ).

Вхідними керуючими впливами у математичних моделях підсистем СПУ як об'єктів для локальних систем регулювання є зміни: витрати палива $\Delta B_{\text{Т}}$, положення напрямних апаратів дугтьового вентилятора $\Delta \phi_L$ і димососа $\Delta \phi_L$, витрати живильної $\Delta D_{\text{ПВ}}$ і продувальної води $\Delta D_{\text{ПР}}$.

Контрольованими вихідними параметрами є зміни: концентрації кисню в димових газах ΔC_{O_2} , розрідження в топці ΔP_p , рівня води в барабані котла $\Delta h_{\text{б}}$, тиску пари $\Delta P_{\text{п}}$, витрати пари $\Delta D_{\text{п}}$, солевмісту в воді барабана котла $\Delta C_{\text{а}}$, витрати димових газів ΔM , витрати повітря ΔM_L , витрати живильної води $\Delta D_{\text{пв}}$. Основними збуреннями є зміни витрати пару, обумовлені зміною парової навантаження судових споживачів пара (агрегатів СЕУ).

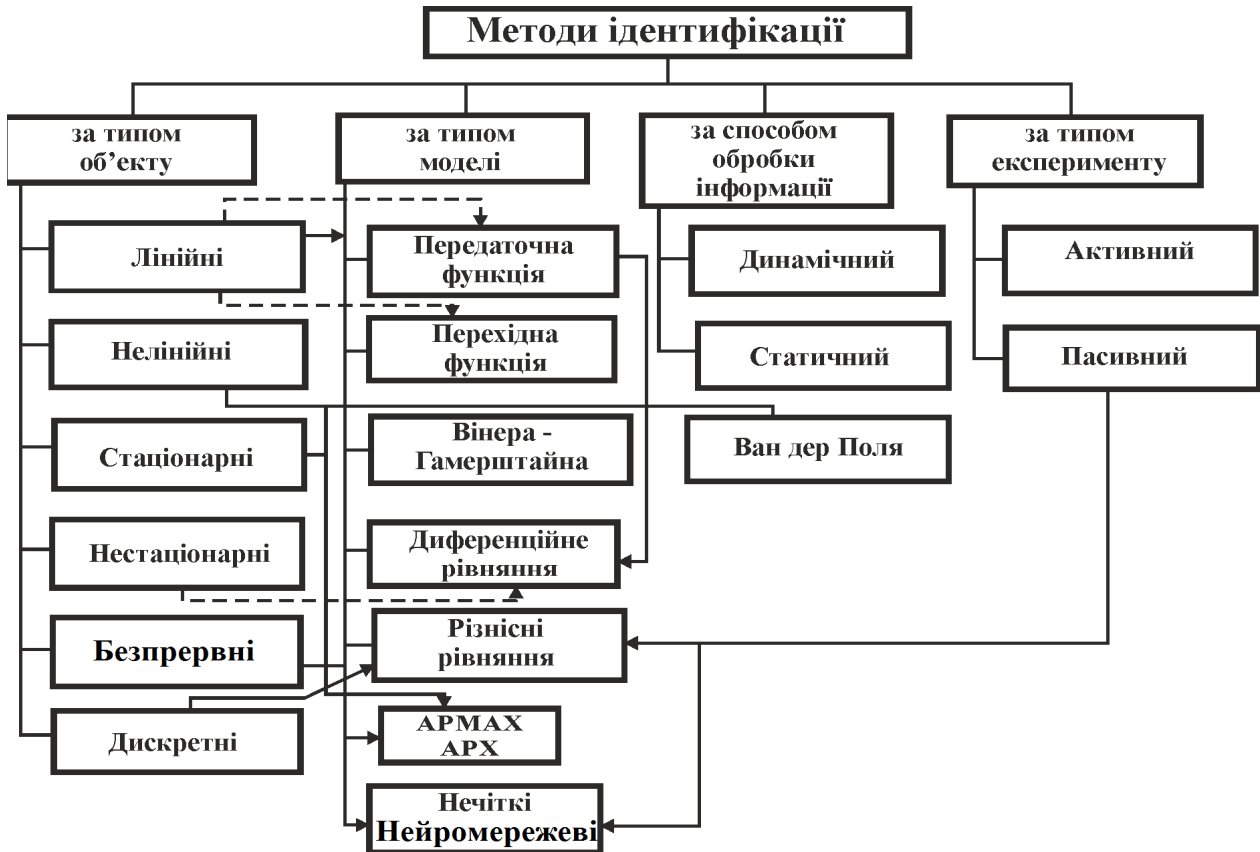


Рис. 1. Класифікація методів, які використовувалися в процесах ідентифікації параметрів підсистем СПУ

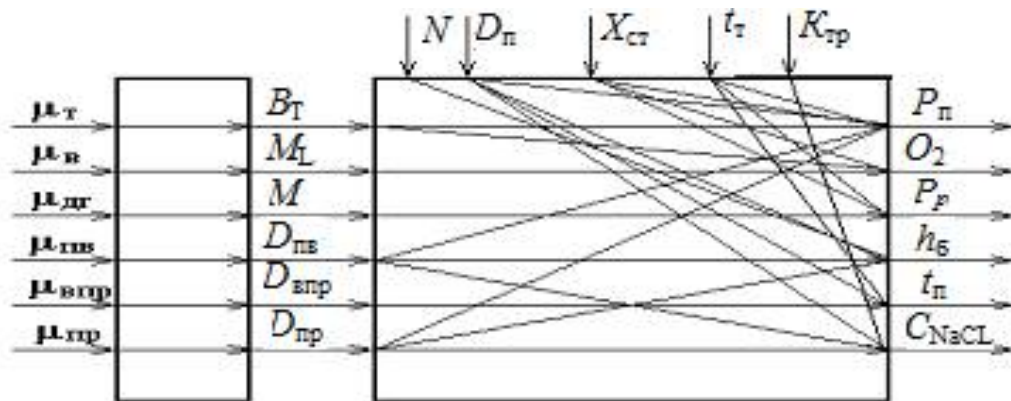


Рис. 2. Структурна схема взаємозв'язку параметрів барабанного водотрубного суднового парогенератору (етап структурної ідентифікації): $D_{п}$ – витрата пари; t_T – температура палива; P_p – розрідження; $P_{п}$ – тиск пари; h_6 – рівень в барабані; $t_{п}$ – температура пари; C_{NaCl} – вміст солі у води; $D_{пв}$ – витрата живильної води; M_L – витрата повітря; $D_{впр}$ – витрата води на паровий перегрівач; $D_{пр}$ – витрата води на продувку; M – витрата димових газів; B_T – витрата палива; μ_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

При розрахунку систем автоматичного регулювання та моделюванні їх роботи масові витрати палива ΔB_T , живильної $\Delta D_{ПВ}$ і продувальної води $\Delta D_{ПР}$, повітря і димових газів були виражені через положення відповідних регулюючих органів $\Delta \varphi_B$, $\Delta \varphi_{ПВ}$, $\Delta \varphi_{ПР}$, $\Delta \varphi_G$, $\Delta \varphi_B$.

Вихідні дані для розрахунку коефіцієнтів диференціальних рівнянь, отриманих на основі рівнянь матеріального і теплового балансу, прийняті з технічної документації суднового парового водотрубного допоміжного котла середньої потужності компанії Mitsubishi марки МАС 50В парової продуктивністю 50 т/год та робочим тиском пари 1,57 МПа. Даним типом котлів обладнано багато суден танкерного флоту. Розрахунок теплових і гідравлічних коефіцієнтів диференціальних рівнянь, що описують динаміку теплофізичних процесів в підсистемах СПУ, проводився для трьох найбільш поширених режимів теплового навантаження СПУ (25 %, 50 %, 75 % від номінального). Вибрані навантаження пов'язані з ходовим і маневреним режимом судна, а також вантажними операціями під час стоянки. Розрахунки показали, що динамічні властивості розрідження в топці при тепловому навантаженні СПУ 50 % від номінального описуються рівнянням виду:

$$5,8 \frac{d\Delta P_p}{dt} + \Delta P_p(t) = -23,4 \Delta \varphi_G(t) + 34,3 \Delta M(t). \quad (1)$$

В продуктах згоряння 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 конденсуються на них і викликають корозію металу. Таким чином, з урахуванням впливу швидкості вихідних димових газів на процеси виникнення низькотемпературної корозії ΔN_k^T , пропонується доповнити рівняння (1) параметром, що характеризує процес корозії:

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

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

де t_s – температура насичення водяних парів, відповідна їх парціальному тиску в продуктах згоряння, °С; $\Delta \varphi_G$ – положення направляючого апарату димососа, % по якій визначається швидкість димових газів; Q_H^p – нижча теплота згоряння робочої маси палива, кДж/кг; k_i^n і T_i^n – коефіцієнти, приймаючі постійне значення в заданому режимі функціонування котла (n – відповідає номеру диференціального рівняння, i – порядковий номер коефіцієнта).

Для режиму навантаження 75 %, одержали:

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

Після підстановки розрахованих коефіцієнтів у рівняння (1) отримуємо:

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

Аналогічним чином можна отримати значення коефіцієнта k_4^{21} і для інших навантажувальних режимів роботи СПУ.

Динамічні властивості повітроводу, що визначають залежність між зміною подачі повітря в топку котла ΔM_L і положенням направляючого апарату дуттьового вентилятора $\Delta \phi_B$, описуються рівнянням виду:

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

Зміни концентрації кисню в димових газах ΔC_{O_2} :

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

де τ – час транспортного запізнювання (приймається рівним величині інерційності газоаналізатора, для газоаналізатора марки "Testo-Term" $\tau = 30$ с).

Встановлено, що контроль процентного вмісту кисню у вихідних газах може дозволити оптимізувати не тільки процес горіння палива за показником коефіцієнта надлишку повітря α , а також сповільнити процес утворення низькотемпературної N_k^T і газової G_k^T корозії. З урахуванням запропонованих додаткових аналізованих параметрів процесу корозії рівняння представляється в удосконаленому вигляді:

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

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

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

Значення коефіцієнтів $k_6^{23} = f(\alpha)$; $k_8^{23} = f(O_2; H_2O; NO_2; CO_2)$ визначаються експериментально.

Таким чином, розв'язання рівняння (2) дозволяє визначити динамічну залежність вмісту кисню у вихідних газах СПУ від режимних факторів по каналах зміни витрати повітря і палива в межах горіння палива, а також динаміку процесів утворення N_k^T і G_k^T .

Високотемпературна корозія і зношування поверхонь нагріву СПУ 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. З урахуванням даного процесу, рівняння динаміки вмісту солі у воді барабана СПУ (визначається за допомогою водневого показника рН) запропоновано доповнити параметром корозійного зношування ΔS (міжкристальної корозії), викликаній результатами впливу металу з висококонцентрованим соляним розчином (лугом):

$$T_1^{26} \frac{d \Delta pH}{dt} + \Delta pH = k_2^{26} \Delta D_{пв} (t - \tau) + k_4^{26} \Delta D_n (t - \tau) + k_6^{26} \Delta S. \quad (3)$$

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

де A – коефіцієнт пропорційності залежить від температури живильної води; ρ_m – густина металу труб, кг/м^3 ; n – показник ступеня (параболи) окислення металу, при дифузійному режимі $n = 0,5$;

τ – час транспортного запізнювання, характеризує інерційність датчика провідності (солеміра) СР 10, $\tau = 5$ с.

Аналогічно розраховані значення коефіцієнтів для трьох режимів роботи СПУ (25 %, 50 %, 75 % від номінального теплового навантаження).

Після підстановки розрахованих коефіцієнтів в (3) отримуємо:

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

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

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

Розв'язання записаних рівнянь дозволяє врахувати вплив теплового навантаження СПУ на процес утворення корозійного зношування

Відзначено, що киснева корозія є найбільш небезпечним видом корозії на трубах і поверхнях нагріву СПУ. Характерною особливістю кисневої корозії є утворення місцевих точкових осередків корозії, що доходять до глибоких язв і наскрізних дірок. Виходячи з важливості контролю кісню і значного його впливу на кисневу корозію $K_k^{O_2}$ в барабані СПУ, пропонується його використання в рівняння динаміки процесу концентрації кісню в живильній воді:

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

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

Таким чином, можна проаналізувати вплив ряду параметрів (витрати живильної води, витрата пари) на процеси утворення кисневої корозії в барабані 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 з оцінці технічного стану конструктивних елементів парогенератора.

Також, були отримані рівняння динаміки СПУ по каналах рівня води в барабані СПУ, температури перегрітої пари, тиску пара в магістральному паропроводі парової турбіни і тощо.

На основі аналізу взаємозв'язку вхідних і вихідних параметрів встановлено, що математична модель СПУ як об'єкта управління, що характеризує динамічні властивості основних регульованих параметрів, і лінеаризована в межах одного режиму функціонування, описується системою диференціальних рівнянь восьмого порядку. Дане припущення є достатньою умовою для детального аналізу ефективності САУ СПУ.

Розрахована система рівнянь динамічних параметрів СПУ по каналах управління була промодельована за допомогою пакета прикладних програм Matlab з

метою визначення ступеня адекватності моделі реальному об'єкту. Результати моделювання для режиму роботи на 75 % теплового навантаження допустимо узгоджується (похибка не більше 10 %) з результатами експериментальних досліджень, проведених на Одеській ТЕЦ з водотрубними котлами середньої потужності типу ГМ-50, паровою продуктивністю 50 т/год і тиском 1,5 МПа, що відповідає характеристикам досліджуваного типового СПУ Mitsubishi MAC-B 50. Таким чином, точність експериментальних моделей об'єктів управління, у вигляді передавальних функцій отриманих графічної обробкою сімейства кривих розгону, підтверджена аналітичними моделями.

У третьому розділі проведено дослідження нелінійних характеристик об'єктів управління СПУ.

На риболовних суднах і плавучих риболовних заводах часто використовуються парові котли із змінним тиском пари. Регулювання тиску пари здійснюється включенням і вимиканням частини форсунок з одночасною зміною тиску палива перед форсунками за допомогою позиційного регулятора тиску палива. Для опису позиційного (релейного) САР тиску пари СПУ малої теплової потужності (котел з паровою продуктивністю 4 т/год та робочим тиском 0,05 – 0,5 МПа) використовувалась дискретна ARMAX модель виду:

$$A(q) y(t) = B(q) u(t - n) + C(q) e(t).$$

В наступні складові:

$$\begin{aligned} A(q) &= 1 + a_1 q^{-1} + \dots + a_{na} q^{-na}; \\ B(q) &= b_1 + b_2 q^{-1} + \dots + b_{nb} q^{-nb+1}; \\ C(q) &= 1 + c_1 q^{-1} + \dots + a_{nc} q^{-nc}, \end{aligned}$$

де $y(t)$ – вихід в момент часу t ; параметри n_a, n_b, n_c – порядки ARMAX моделі, q – оператор затримки.

Після завантаження експериментальних даних в програмний додаток ідентифікації System Identification Toolbox якої реалізовує ARMAX модель, програмою розраховані наступні значення що описують модель каналу управління «позиція регулюючого органу – тиск пара»:

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 визначення адекватності моделі прототипу виконана процедура верифікації, яка полягала в поданні на вхід об'єкта і моделі експериментальних даних, які не використовувалися для ідентифікації, і порівнянні їх значень (рис. 3.).

Порівняльний аналіз процесів 1 і 2, а також значень середнього статистичного відхилення A експериментальних і модельних даних (див. рис. 3) демонструє адекватність отриманої ARMAX моделі на рівні 90 %.

Встановлено, що в штормових умовах спостерігаються розгойдування ділянок регулювання тиску пари СПУ, частоти коливань значень параметрів в 10 – 15 разів нижче частот обурення. Хитами судна значно впливає на процеси циркуляції і теплопередачі в СПУ. Періоди хитами і її прискорень близькі до періоду власних коливань циркуляційних контурів морських котлів. При досить сильних явищах

хитавиці можуть виникнути коливання коефіцієнта теплопередачі СПУ, які породжують суттєві коливання тиску пари на виході з котла. Коли штормові умови є типовими умовами плавання судна, аналіз характеристик процесів регулювання (САУ тиску пари), що мають істотні нелінійні властивості, є важливою складовою синтезу САУ СПУ.

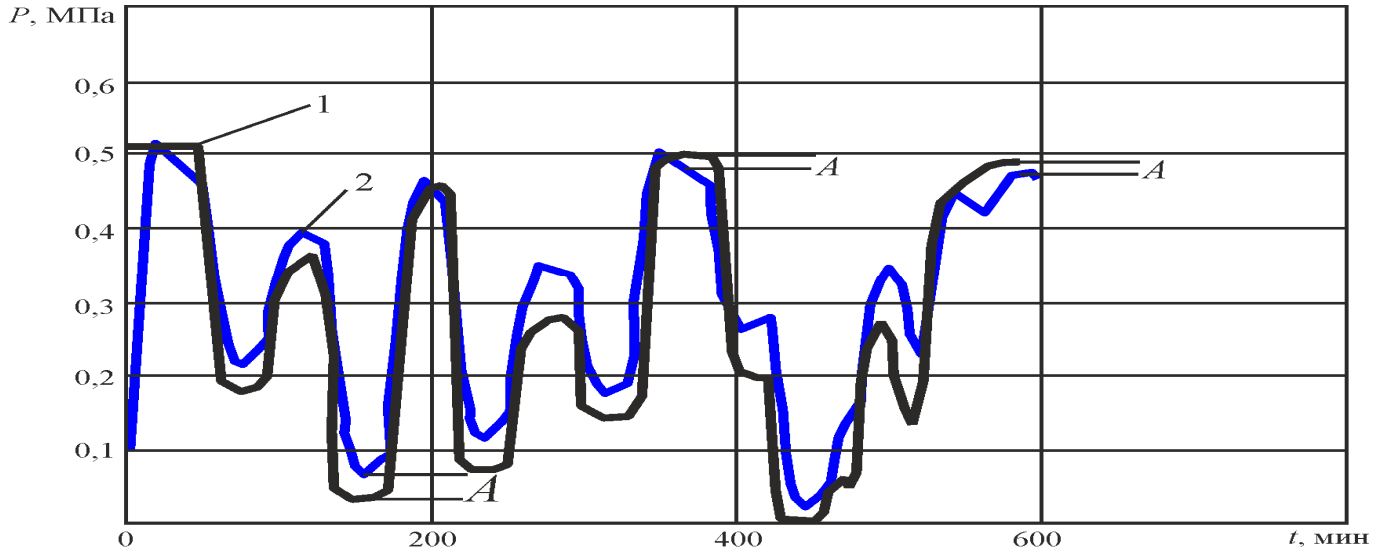


Рис. 3. Процес верифікації: 1 – прототип (експериментальні дані);
2 – модель; A – середнє відхилення (10 %)

В силу того, що значні хвильові впливу на судно і зокрема на агрегати СПУ можуть викликати резонанс, який приводить до значних автоколивань параметрів, а в ряді випадків і до їх розходження, тобто аварії, була запропонована методика визначення стійкості досліджуваної САУ параметрів СПУ в умовах сильного шторму.

За основу моделі хвильових збурень пропонується прийняти диференціальне рівняння Ван дер Поля (осцилятор з нелінійним загасанням) виду:

$$\frac{d^2x}{dt^2} - \mu(1 - x^2) \frac{dx}{dt} + x = 0,$$

де x – координата точки (гребеня хвилі), що залежить від часу t ; μ – коефіцієнт, що характеризує нелінійність і силу загасання коливань.

Представлений підхід пропонується використовувати для запобігання аварійних ситуацій СПУ при резонансній хитавиці, тобто в умовах сильного шторму (за шкалою Бофорта 9 – 12 балів). Так, у випадках, коли розрахована САУ буде нестійка, пропонується зміна закону управління і налаштувальних параметрів регуляторів. А в разі значного шторму – рекомендувати операторам СПУ не проводити зміну теплового навантаження.

На суднах пасажирського і танкерного флоту знайшла широке застосування технологічна схема роботи двох допоміжних і одного утилізаційного котлів на загальну парову магістраль. При такому проектному рішенні допоміжні котли, виконуючи функцію генерації пари високої температури і тиску, схильні до впливу глибоких зовнішніх збурень, пов'язаних з режимом роботи парової турбіни (СПТУ) і вантажних операцій на судні. 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. 4).

Аналіз виду перехідних процесів (див. рис.4) дозволяє зробити висновок, що при різкому збільшенні електричного та парового навантаження система регулювання турбіни відразу збільшує споживання пари, проте топковий режим СПУ ще не перебудований і виникає розбаланс виробництва і споживання пари, в результаті чого падає тиск пари в магістралі і в тракті робочого середовища котла. Утворюється коливальний режим, який характеризується істотною нелінійністю.

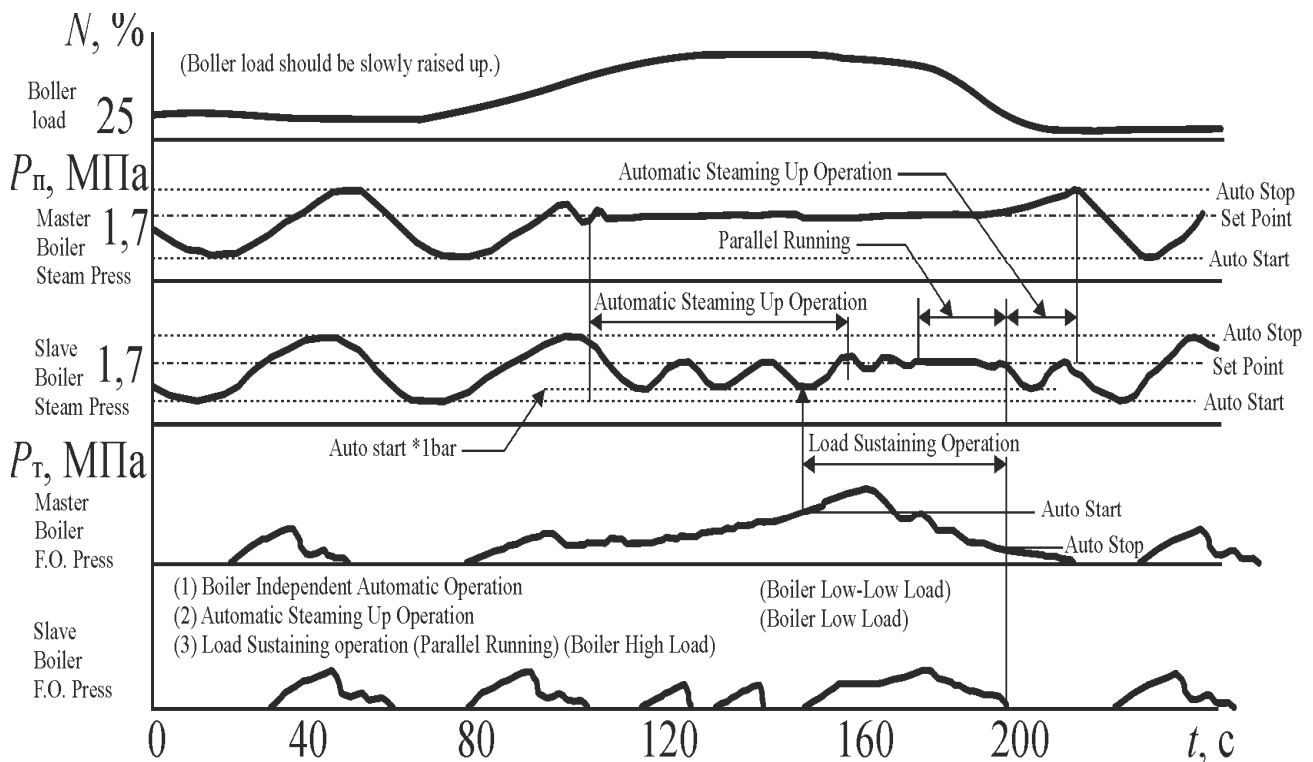


Рис. 4. Перехідні характеристики СПУ при паралельній роботі на СПТУ нафтового танкера «Minerva Roxanne»: N – навантаження; $P_{\text{п}}$ – тиск пари; $P_{\text{т}}$ – тиск палива

За допомогою програми System Identification Toolbox (рис. 5, 6) отримана дискретна нелінійна ARX модель представлених нелінійних процесів, що використовує апарат Z-перетворення:

Discrete-time IDPOLY model: $A(z)y(t) = B(z)u(t) + e(t)$;

$$A(z) = 1 + z^{-1} + 0,5 z^{-2}; B(z) = 0,415,$$

де $z^{-1} = e^{-sT}$ – оператор затримки; T – інтервал дискретизації. Ступінь адекватності моделі склав 95 %.

Дослідженням 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 високим ступенем адекватності. Використання запропонованих моделей дозволяє проводити подальші дослідження з визначення процесів кавітаційної ерозії в елементах СПУ.

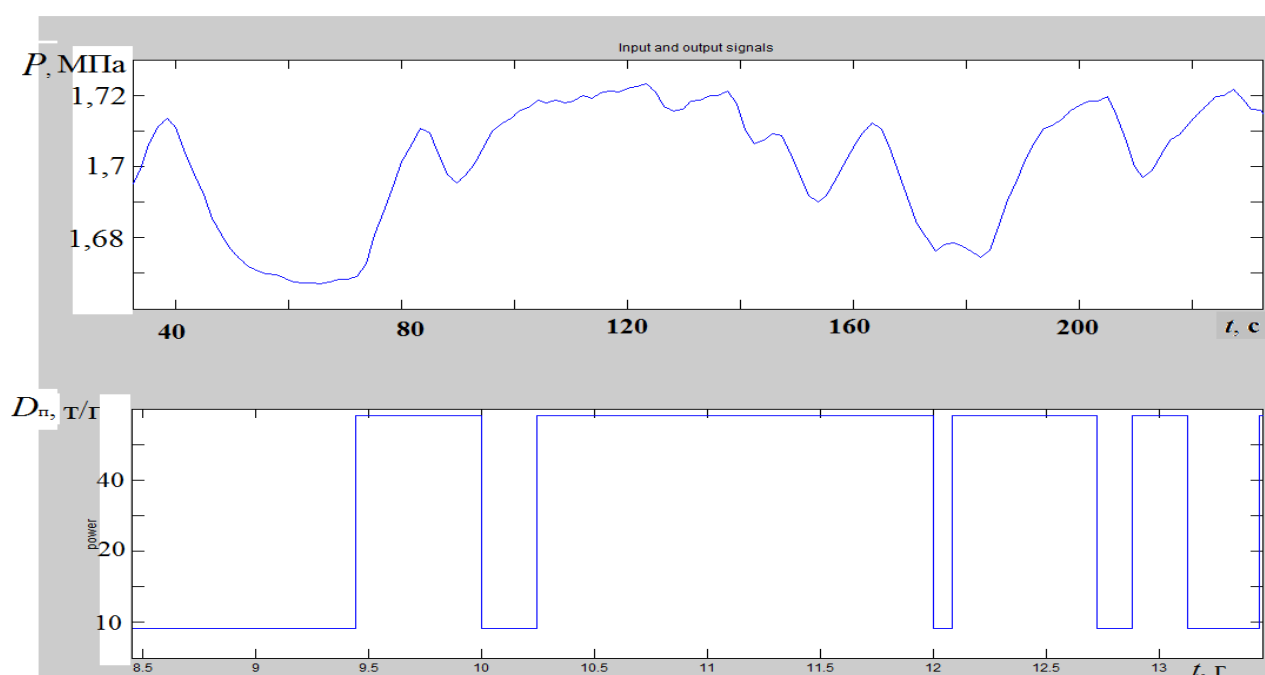


Рис. 5. Досліджуваний процес в додатку System Identification Toolbox, отриманий на основі використаної нелінійної моделі: а) – вхідний сигнал; б) – вихідний сигнал

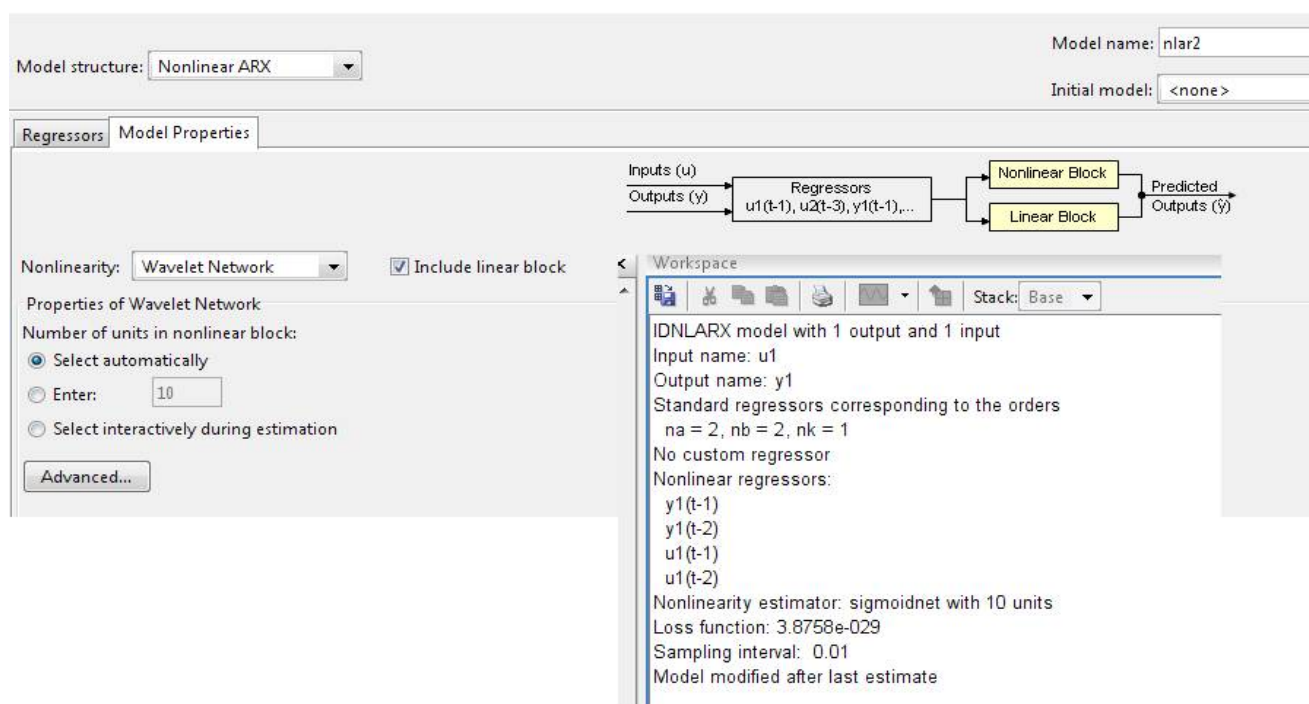


Рис. 6. Структура і параметри нелінійної ARX моделі

З причини складності одночасної оптимізації ряду критеріїв (показників якості перехідних процесів САУ СПУ) в силу їх взаємного впливу, для оптимізації процесу розробки САУ пропонується використовувати експертний комбінований показник якості $P_{\text{комб}}$. Запропонований критерій дозволяє оцінити перехідний процес за допомогою двох найбільш значущих показників – мінімуму суми зважених відносин

перерегулювання до припустимого перерегулювання і часу регулювання до припустимого часу регулювання перехідного процесу:

$$P_{\text{комб}} = \min(w_L \cdot G_i + w_R \cdot T_i), \quad (4)$$

де $i = 1, \dots, n$; n – кількість перехідних процесів при варіації настроювальних параметрів типових регуляторів; w_L, w_R – вагові коефіцієнти, $w_L + w_R = 1$, w_L та w_R визначає експерт; T_i – зважений час регулювання, $T_i = T_{pi}/T_{di}$; T_{pi} – час регулювання; T_{di} – допустимий час регулювання; G_i – зважене перерегулювання, $G_i = \Delta G_i/\Delta G_{di}$; ΔG_i – перерегулювання; ΔG_{di} – допустиме перерегулювання.

Методика визначення параметрів експертного критерію передбачає участь в процесі процедури приписування балів експертів в області розробки, налагодження та експлуатації САУ СПУ.

Так, згідно з методикою експертного опитування щодо якості САУ СПУ, час регулювання перехідного процесу стабілізації тиску пари 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 аварійної ситуації, наприклад, при збільшенні парового навантаження і відповідному зниженні тиску пари аж до аварійного значення, а значить і спрацювання аварійного датчика рівня води в барабані СПУ.

В процесі апробації запропонованого експертного критерію оцінки якості налаштованої САУ проводилося імітаційне моделювання роботи ПІ-регулятора при управлінні об'єктом СПУ (судновим допоміжним парогенератором марки «Альфа Лаваль» з паровою продуктивністю пари 80 т/год та тиском 1,5 МПа), представленій у вигляді математичної моделі (передатної функції) по каналу «витрата палива – тиск пари», отриманої у другому розділі. За умовами технологічного процесу, що пред'являється до парогенеруючих СЕУ при регулюванні тиску пари, допустимий час регулювання T_p становить 120 с, а перерегулювання $\Delta G_d = 20$ %. Безрозмірні настройки ПІ-регулятора розраховані по табличному методу А. Копеловича за інтегральним критерієм якості для теплоенергетичних систем, які пропонуються в рамках розробки та налагодження традиційних САУ парогенеруючих об'єктів.

Перехідний процес модельованої САУ показаний на рис. 7 (процес 1). Згідно з (4) комбінований показник даного процесу становить:

$$P_1 = (0,17 \cdot (0/20) + 0,83 \cdot (90/120)) = 0,6.$$

САР тиску пари з новими настройками продемонструвала: час перехідного процесу $T_p = 40$ с; перерегулювання $G = 16$ %. Згідно (4) комбінований показник якості другої САУ:

$$P_2 = ((0,17 \cdot (16/20) + 0,83 \cdot (35/120))) = 0,4.$$

Тобто, згідно запропонованому критерію (4) друга САУ налаштовано краще та дозволяє забезпечити задане теплове навантаження в два рази швидше в порівнянні з типовою системою управління, тобто демонструє більш маневрені властивості, отже зниження ймовірності виникнення аварійної ситуації при форсованому режимі роботи і в умовах значної хитавиці судна. Слід зазначити, що до різних технологічних процесів парових котлів широкого конструктивного класу можуть бути пред'явлені

різні вимоги відповідно до правил експлуатації допоміжних СПУ, а також умов експлуатації, досвіду обслуговуючого персоналу, станом устаткування тощо.

В четвертому розділі проведено дослідження методів проектування системи нечіткого виведення в САУ СПУ і обрані методи фазифікації, агрегування, акумуляції і дефазифікації, які дозволяють отримати перехідні процеси з заданими показниками якості.

Для підвищення ефективності процесу експлуатації і зниження трудовитрат налагодження СПУ при ходових і швартових випробуваннях, пропонується метод розробки експертної системи, що дозволяє прискорити і спростити процедуру налагодження та адаптації САР параметрів СПУ.

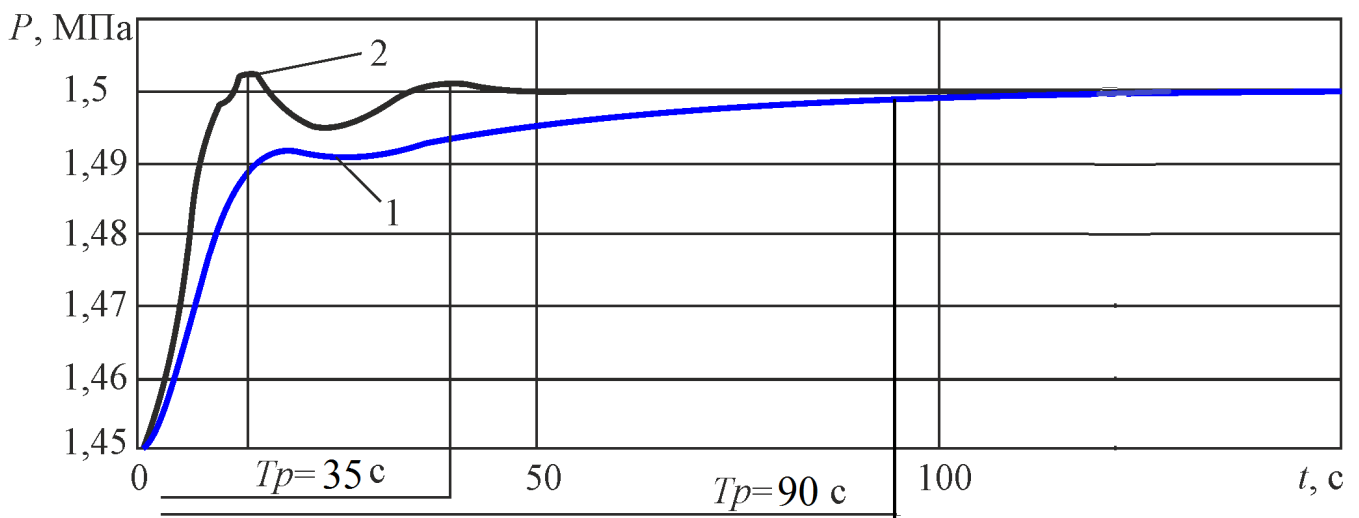


Рис. 7. Перехідні процеси САУ тиску пари СПУ в умовах зміни парового навантаження на 10 %, і різних критеріях якості з зоною нечутливості регулятора 0,5 %: 1 – інтегральний; 2 – експертний комбінований

Процес розробки експертної системи включає синтез традиційного табличного і нечіткого наукових підходів в області теорії адаптивних систем управління. Представлений метод адаптації ПІ-регулятора використовує нечіткий алгоритм Тагакі-Сугено. На рис. 8 і 9 представлено, запропоновано структура і функціональна схеми адаптації параметрів налаштування регулятора в САР тиску пари в СПУ. Схема передбачає стабілізацію тиску пари, що надходить як до агрегату СЕУ, так і до пароперегрівнику при роботі на парову турбину.

Так, згідно з отриманими значеннями параметрів процесів розгону (K , T , τ) пропонуються наступні правила в нечіткій експертній системі (НЕС) з розрахунку оптимальних адаптивних налаштувань ПІ-регулятора САР тиску пари в СПУ, апробованих в публікаціях автора та в методиці налагодження стаціонарних парогенераторів.

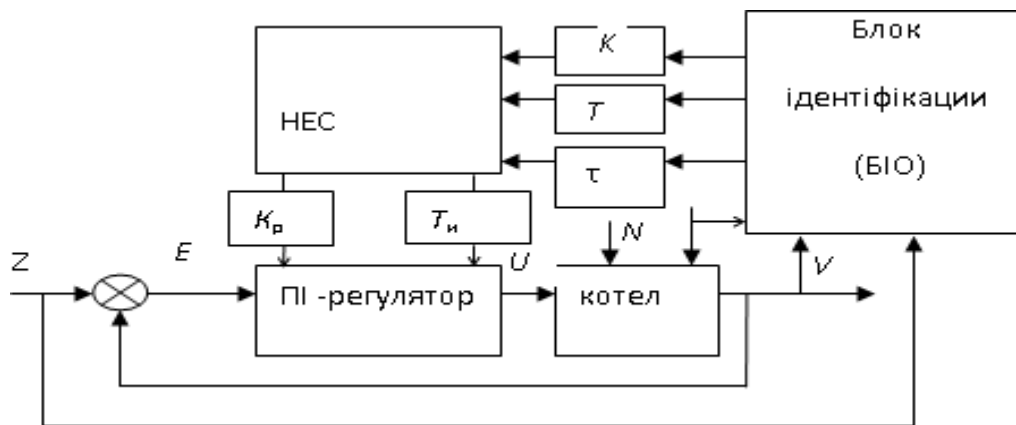


Рис. 8. Структура системи адаптації ПІ-регулятора в САУ тиску пари в СПУ за допомогою експертної системи: НЕС – нечітка експертна система; E – помилка регулювання; K – коефіцієнт посилення; T – постійна часу об'єкта; τ – запізнювання; Z – завдання; V – вихідний параметр; N – збурення; U – керуючий вплив; K_p , T_i – оптимальні настройки ПІ-регулятора

Робота НЕС складається з розрахунку оптимальних параметрів регулятора згідно з розробленими правилами типу: П(1): ЯКЩО (T є мале І K є середнє І τ є мале) ТО $K_{p1} = 0,6/K(\tau/T)$, $T_{i1} = 0,6 T$; П(2): ЯКЩО (T є середнє І K є велике І τ є середнє) ТО $K_{p2} = K(\tau/T)$, $T_{i2} = T$ тощо.

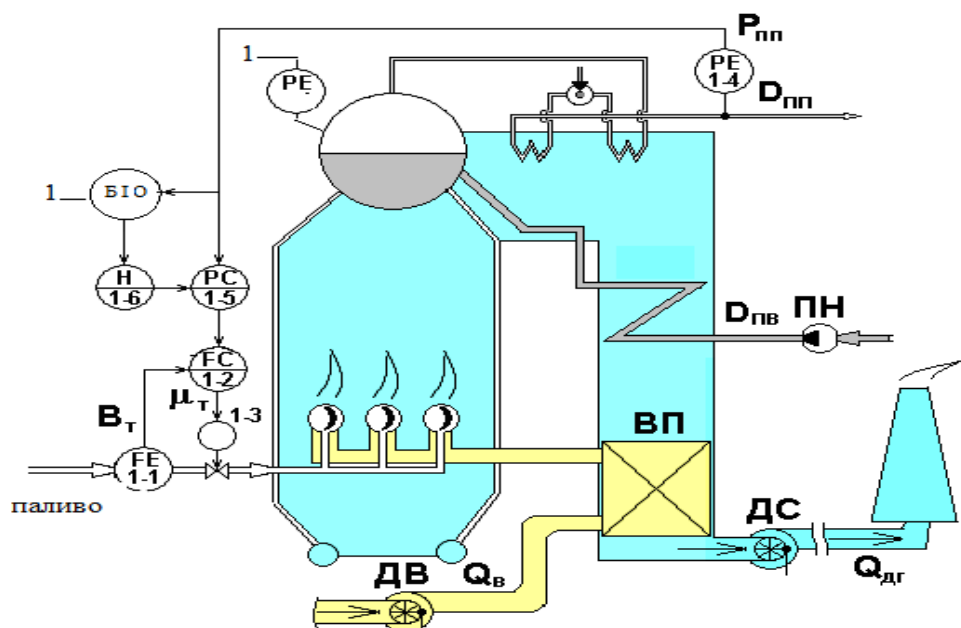


Рис. 9. Функціональна САУ тиску пари в паропроводі ДПК: FF – датчик витрати палива; FC – контролер (регулятор) витрати палива; PC – контролер тиску пари; БІО – блок ідентифікації параметрів об'єкту; PE – датчик тиску; Н – пульт управління з НЕС; ДВ – дуттьовий вентилятор; ДС – димосос; ПН – живильний насос; ВП – повітряний підігрівач; ВЕ – водяний економайзер; $P_{пп}$ – тиск пари; V_T – витрата палива; $D_{пп}$ – витрата пару; $D_{пв}$ – витрата живильної води; Q_v – витрата повітря; $Q_{дг}$ – витрата димових газів; μ_T – управляючий вплив

Значення параметрів моделі об'єкта управління та оптимальних параметрів регулятора представлені в табл. 1. За допомогою використовуваних НЕС, відбувається економія часу персоналу СПУ (за результатами експерименту на процедури ідентифікації та оптимізації САУ в середньому до 40 хв).

Таблиця 1

Значення параметрів регулятора рекомендовані НЕС по каналу
«витрата палива – тиск пари»

Параметри моделі СПУ				Оптимальні параметри регулятора	
навантаження	K , МПа/% хода РО	T , хв	τ , 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

Таким чином, відбувається зменшення трудовитрат на наладку СПУ на прикладі, під час ходових випробувань на танкері «Mekhanik Khachepuridze» спеціалістами ПРАТ «Дунайсудноремонт», в середньому на одну годину.

Можна відзначити, що використання запропонованого універсального методу нечіткої адаптації судових САУ може бути успішно застосоване також для автоналагодження типових ПД і ПД-регуляторів всіх типів СПУ.

Порівняльний аналіз показників якості перехідних процесів САУ тиску пари (рис. 10) із зоною нечутливості $\Delta = 0,5 \%$, демонструє, що використання нечіткої експертної системи, яка реалізує алгоритм Такагі-Сугено, в процесах налагодження та експлуатації САУ СПУ дозволяє зменшити помилку регулювання (e) і час регулювання T_p більш ніж в два рази в порівнянні з традиційною системою наладки, що дозволяє СПУ виходити на заданий тепловий режим з оптимальним часом.

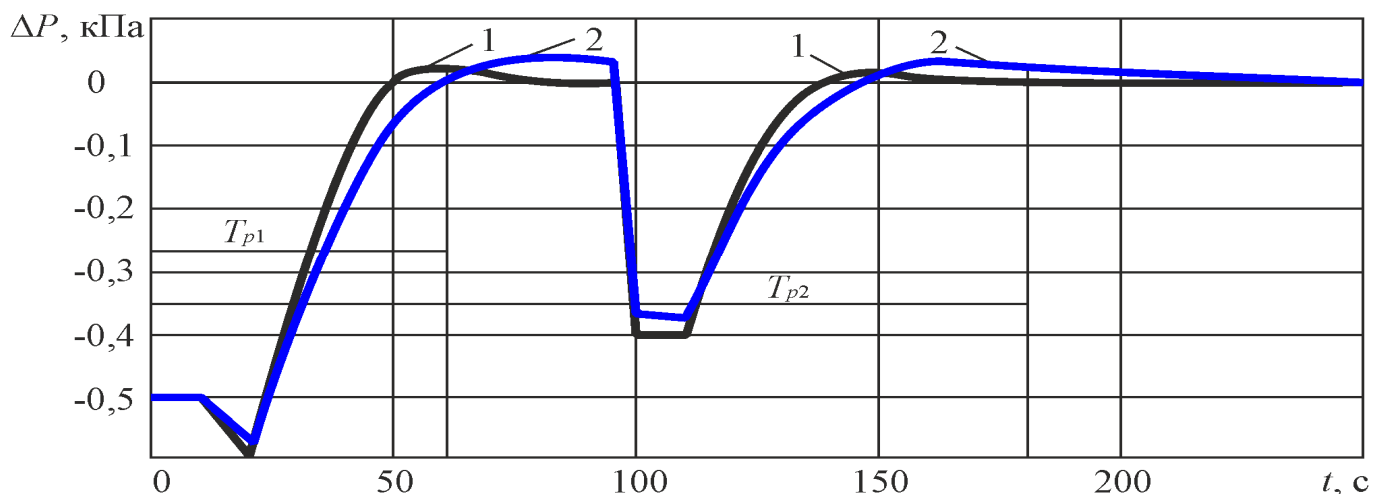


Рис. 10. Перехідні процеси демонструють відхилення тиску пари СПУ при зміні парового навантаження: 1 – нечітка адаптивна САУ; 2 – традиційна адаптивна САУ тиску, яка реалізує табличний метод адаптації

П'ятий розділ присвячений розробці нейромережових систем моніторингу та управління показниками шкідливих викидів СПУ в атмосферу. Зниження утворення NO_x може бути досягнуто шляхом зниження температури горіння, що забезпечується введенням газів рециркуляції. Димові газі відбираються перед повітропідігрівачем і рециркуляційний димосос подає їх в систему горіння котла. В результаті максимальна температура в топці знижується на $120 - 130^\circ\text{C}$ та падає концентрація кисню в зоні горіння, що також зменшує утворення NO_x .

Запропоновано конструктивне рішення технології рециркуляції димових газів – в димоході СПУ встановлюється спеціальний шибер (позіція 3 на рис. 11), що дозволяє регульовано відбирати близько 20 % димових газів, направляти їх на повітряпровод дуттьового вентилятора. При цьому технічному рішенні регулятор розрідження буде підтримувати розрідження в верхній частині топки впливом на напрямні апарати димососу навіть при малих надлишках повітря. Рішення по вибору способу рециркуляції буде економічним, так як впровадження технології введення димових газів на пальник потребує нових конструктивних розробок системи горіння, а при введенні газів в систему подачі палива, температура мазуту або дизеля не буде відповідати необхідним стандартам.

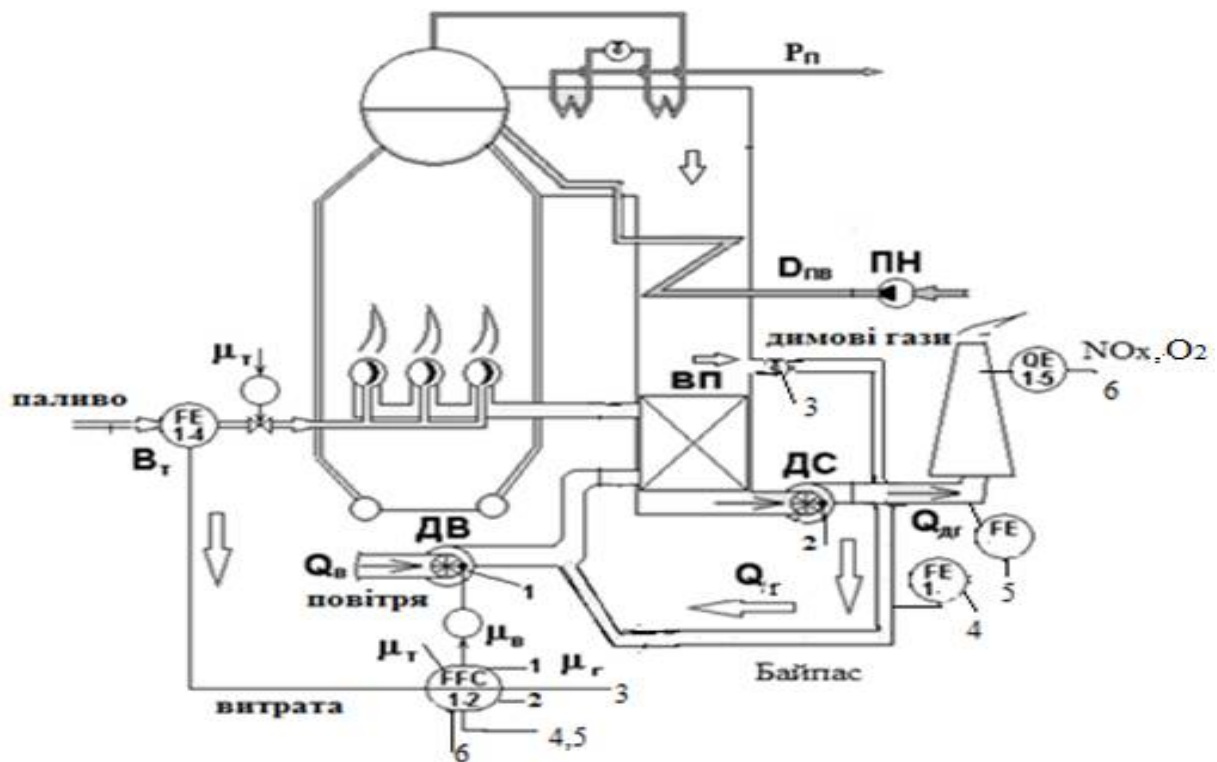


Рис. 11. Схема нейромережової системи управління процесом рециркуляції димових газів парогенератора марки Mitsubishi Marin Main Boiler MB паропроодуктивністю 50 т/год: ДС - димосос; ДВ – дуттьовий вентилятор; ВП – повітряний підігрівач; ПН – живильний насос; QE – газоаналізатор контролю NO_x , O_2 ; FFC – регулятор рециркуляції; FE – витратомір; μ_i – керуючі впливи; $Q_{дг}$ – витрата димових газів; Q_B – витрата повітря; P_n – тиск пари; 1, 2 – сигнали швидкості обертання; Q_r – витрата газів в системі рециркуляції

З метою апробації представленої технології зниження вмісту шкідливих викидів (рис. 11), проведено моделювання нейромережевої САУ (НМСАУ) рециркуляцією димових газів в повітропровід СПУ марки МАС 35. У зв'язку з наявністю нелінійностей в системі управління пропонується замість стандартного лінійного ПД-регулятора скористатися адаптивним нейромережевим регулятором. Реалізація нейромережевого регулятора (НМК) – (FFC) (див. рис. 11) може бути виконана на базі нейрочіпу CM1K фірми The CogniMem Technologies. Даний чіп містить 1024 нейрона, що працюють паралельно. 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).

На НМК надходять три сигнали (див. рис. 11): по каналу зворотного зв'язку (поточного утримання NO_x позиція 6 на рис. 11, вимірюваному газоаналізатором QE); по каналу зовнішнього збурення (поточну витрату пари на агрегати СЕУ – вимірюваному 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 нейрорегулятор (FFC). Контролер в свою чергу управляє кутом повороту шиберу (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) і вентилятора (позиція 1) з метою підтримки заданої витрати димових газів і розрядження в топці котла.

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:

$$M_{\text{NO}_x} = B_p \cdot Q_i^r \cdot K_{\text{NO}_2}^M \cdot \beta_t \cdot \beta_\alpha \cdot (1 - \beta_\Gamma) \cdot (1 - \beta_\delta) \cdot k_{\text{п}}, \quad (5)$$

де B_p – 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:

$$K_{\text{NO}_2}^M = 0,01 \cdot \sqrt{D} + 0,1,$$

де D – фактична паропроодуктивність котла, т/год; β_t – безрозмірний коефіцієнт, що враховує температуру повітря, що подається $\beta_t = 1 + 0,002 \cdot (t_{\text{гв}} - 30)$; $t_{\text{гв}}$ – температура гарячого повітря, °С; β_α – безрозмірний коефіцієнт, що враховує вплив надлишку повітря на утворення оксидів азоту при спалюванні рідкого палива, в залежності від режиму СПУ $\beta_\alpha = 1,0 - 1,45$ (фактично рівний α – коефіцієнту надлишку повітря); β_Γ – безрозмірний коефіцієнт, що враховує вплив рециркуляції димових газів через пальники на утворення оксидів азоту (при подачі газів рециркуляції в суміші з повітрям):

$$\beta_\Gamma = 0,17 \cdot \sqrt{r},$$

де r – ступінь рециркуляції димових газів, %; β_δ – безрозмірний коефіцієнт, що враховує ступінчасте введення повітря в топку:

$$\beta_{\delta} = 0,018 \cdot \delta;$$

δ – доля повітря, яке подається в проміжну зону факелу (в процентах від загальної кількості організованого повітря), $\delta = 20 - 30 \%$; k_p – коефіцієнт перерахунку.

Згідно паспортних даних при навантаженні СПУ МАС 35, рівному 50 %, 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. Для перевірки припущення про доцільність використання технології рециркуляції димових газів в СПУ з корекцією α проведено розрахунок з урахуванням методики, представленої вище і витратних характеристик СПУ МАС 50 для теплового навантаження 50 %, а також ступеня рециркулюючих газів $r = 20 \%$. Коефіцієнт β_T буде дорівнювати 0,76, а β_{δ} складе 0,54. Тоді з урахуванням $\alpha = 1,11$, зміст NO_x у вихідних газах $M_{NO_x} = 61,9$ мг/м³.

Таким чином, з урахуванням рециркуляції та оптимального значення α , вміст NO_x було зменшено на 29 мг/м³ у порівнянні з діючою САУ горіння, яка підтримує α без змін рівним 1,22. 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 нейронної мережі (НМ) (табл. 2) для досягнення мінімально можливого значення NO_x .

Таблиця 2

Навчальна вибірка для НМК оптимального режиму горіння важкого палива за критерієм мінімізації NO_x та ступенем рециркуляції $r = 20 \%$

Навантаження котла, %	10	30	50	70	90
α	1,3	1,21	1,11	1,08	1,0
NO_x , мг/м ³	15	47	62	78	83
ККД	80,4	82,3	83,7	82,1	80,1

З урахуванням простоти і наявності бібліотеки елементів НМ, для навчання нейромережевого контролера (НМК) були використані спеціалізовані програмні редактори в пакеті MatLab, що реалізують методи еталонного управління і діють на основі алгоритму навчання – зворотнього поширення помилки.

При подальшому моделюванні НМ САУ з моделлю управління за каналом «коефіцієнт надлишку повітря – вміст NO_x » на різних теплових режимах роботи СПУ отримані перехідні процеси. Порівняльний аналіз процесів НМ САУ на різних теплових режимах роботи СПУ продемонстрував зменшення вмісту NO_x до 55 % в порівнянні з типовою системою управління з ПД-регулятором. Таким чином, використання запропонованої структури управління є перспективним для впровадження на судах.

Також під час експериментів на промислових парогенераторах було встановлено, що зниження швидкості проходження димових газів на 1 м/с (за рахунок плавного зменшення обертів двигуна димососа) знижує вміст NO_x в середньому на 10 мг/м³ у порівнянні з димососом, працюючим на одній швидкості. Також, при експериментах, було встановлено зростання вмісту SO_x у вихідних газах

при збільшенні α . При цьому, для визначення розрахункового значення швидкості димових газів використовувалася формула:

$$v_p = \frac{B_T V_g (T + 273)}{F \cdot 273}, \quad (6)$$

де B_T – витрата палива, кг/год (сірчастий мазут); V_g – об'єм димових газів, м³; T – температура продуктів згоряння, °C; F – площа перерізу газоходу, м².

Відповідно до (6) збільшення швидкості і об'єму димових газів з незмінною витратою палива призведе до зменшення температури димових газів. Таким чином, залежність (6) можна враховувати для процесу зниження вмісту шкідливих викидів, які залежать від температури вихідних газів.

Слід зазначити, що залежність (5) не відображає повною мірою вміст оксидів азоту в димових газах від теплового навантаження котла і коефіцієнта надлишку повітря, що викликає труднощі для її використання в САУ оптимізації показників шкідливих викидів з урахуванням теплового навантаження СПУ. Під час проведення експериментів, отримана емпірична формула залежності витрати оксидів азоту від експлуатаційних параметрів СПУ:

$$C_{NO_x} = \frac{O_2}{P_n} R_{N_2} \frac{B_T}{D_{д.г.}},$$

де O_2 – вміст кисню в димових газах котла, %; P_n – теплове навантаження СПУ, %; R_{N_2} – коефіцієнт концентрації азоту, який визначається за методикою, що враховує відношення фактичної об'ємної витрати пари до номінальної (м³/с); B_T – витрата палива, кг/год; $D_{д.г.}$ – витрата димових газів, кг/год.

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.

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. 12 – 15), видає рекомендації оператору СПУ щодо вибору і підтримці оптимального α і заданих швидкостей обертання повітряного вентилятора і димососа СПУ, що забезпечує зниження NO_x і SO_x .

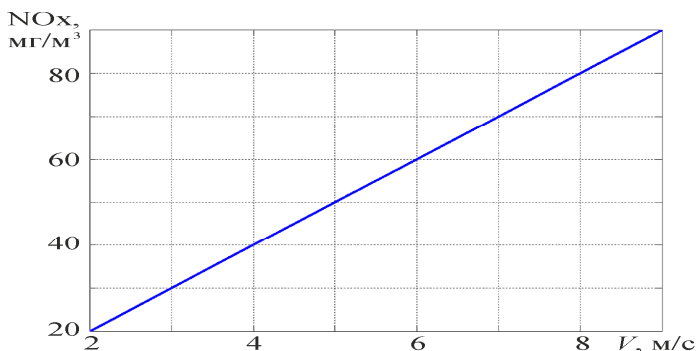


Рис. 12. Залежність вмісту NO_x парового котла ГМ-50 від швидкості вихідних газів

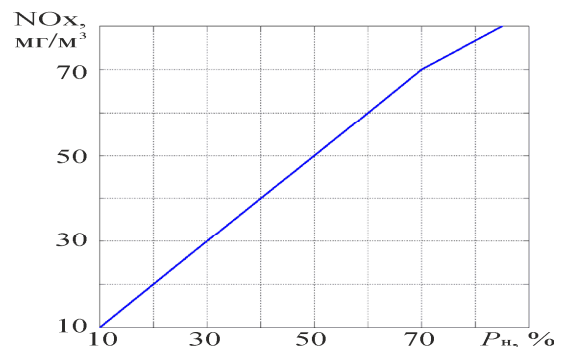


Рис. 13. Залежність вмісту NO_x в димових газах від теплового навантаження котла ГМ-50

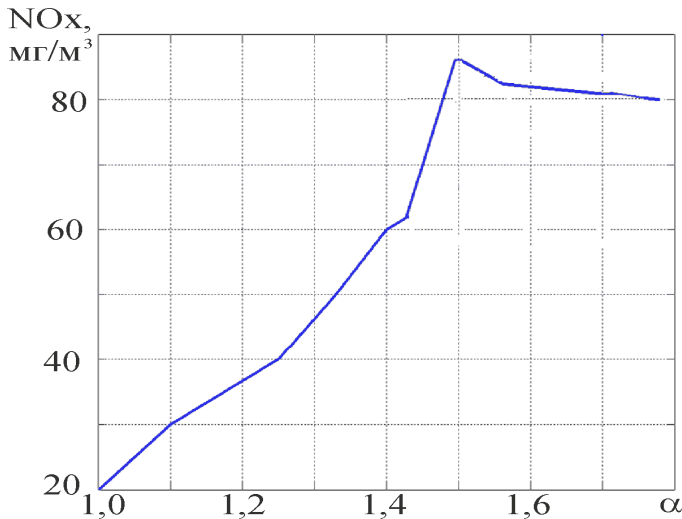


Рис. 14. Залежність вмісту NO_x в димових газах котла ГМ-50 від значення α

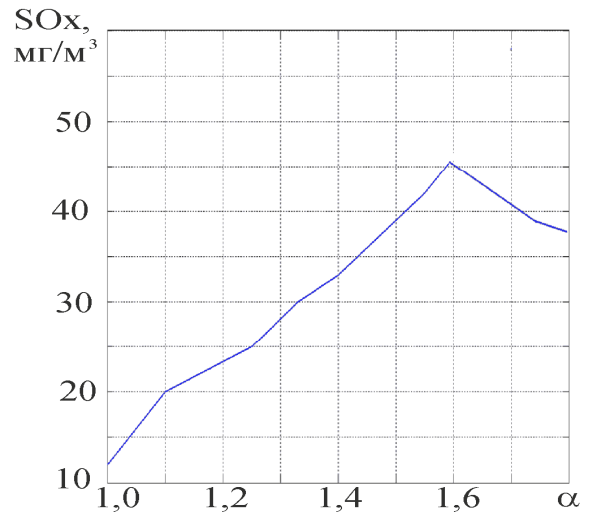


Рис. 15. Залежність вмісту SO_x в димових газах котла ГМ-50 від коефіцієнта надлишку повітря α

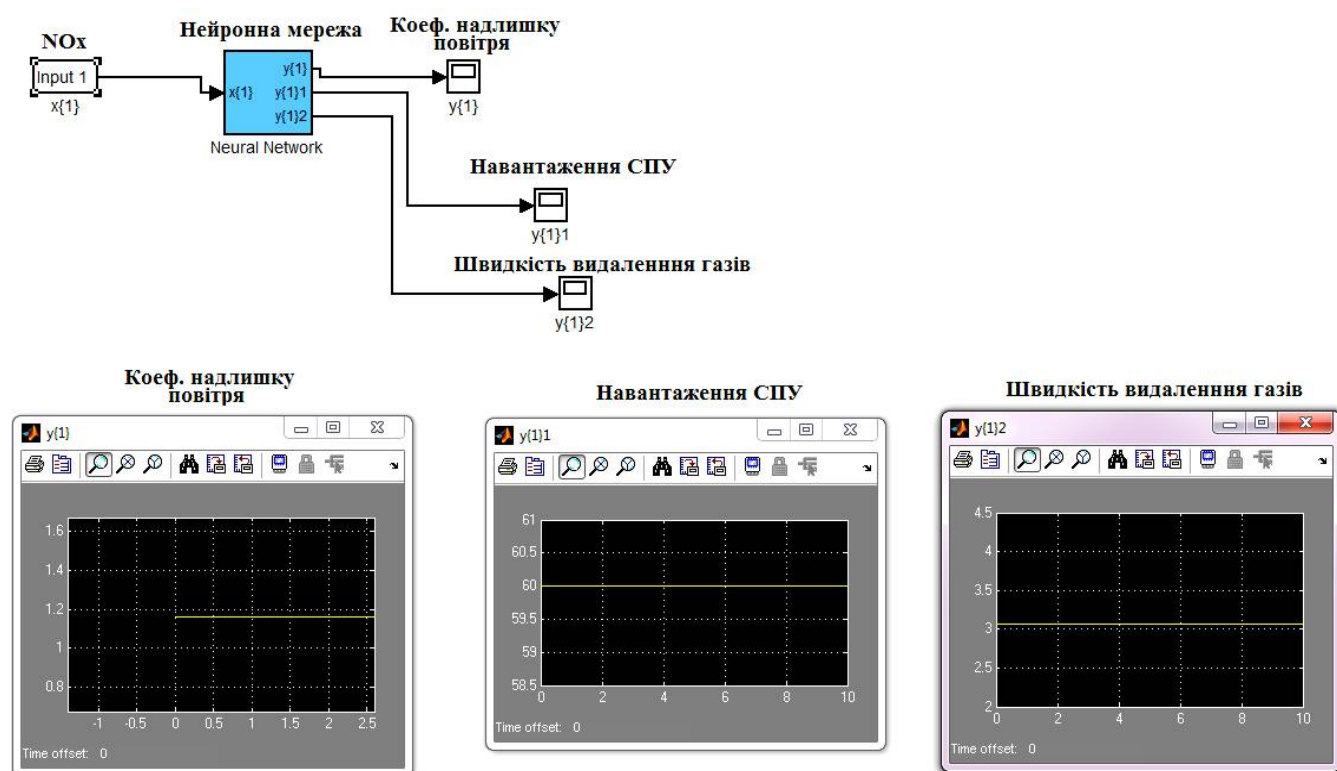
Апробація навченої нейронної мережі, що доповнює діючу суднову систему моніторингу, проводилася для наступних умов: «у випадках, якщо вимоги щодо акваторії знаходження судна до вмісту оксидів азоту в атмосфері, наприклад NO_x = до 48 мг/м³», тоді НМ за запитом оператора (рис. 16) видає необхідні значення коефіцієнта надлишку повітря, навантаження СПУ, швидкості газів – $\alpha = 1,3$; $P_n = 40$ % від номінальної; $v = 4$ м/с. Тобто двигун димососа рециркуляції димових газів, підключений до частотного перетворювача, починає розвивати задані оберти по сигналу отриманому від оператора. Також оператор СПУ має дистанційно контролювати баланс розрядження в топці і стійкість горіння факела палика.

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.

При навантаженні СПУ МАС 35 рівному 50 %, згідно експериментальним характеристикам (табл. 3), використанні легкого палива, $\beta_t = 1,08$; $\beta_\alpha = 1,16$, M_{NO_x} буде рівна 22,6 мг/с.

З урахуванням розрахунків нейронної мережі щодо зниження NO_x , тобто підтриманню α , 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 17,0 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 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.

Рис. 16. Моделювання неймережевої системи моніторингу NO_x

Таблиця 3

Характеристики допоміжного СПУ Mitsubishi MAC-35

Навантаження	25 %	50 %	75 %	100 %
парова продуктивність, кг/год	8750	17500	26250	35000
тиск у барабані, кг/см ²	16	16	16	16
температура живильної води, °C	80	80	80	80
температура насиченого пару, °C	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 ₂ , %	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, °C	45	45	45	45

За отриманими результатами можна зробити висновок, що використання запропонованої системи дозволяє знизити вміст шкідливих викидів СПУ в атмосферу без значних витрат на технологічне переоснащення судна.

Підвищення температури відхідних газів призводить до збільшення втрат з газами q_2 і отже до додаткових витрат палива ΔB на вироблення однієї і тієї ж

кількості пари. 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 (рис. 17). Для визначення оптимальної області значень α , що дозволяють мінімізувати втрати q_2 і збільшити ККД СПУ, проведено тепловий розрахунок для декількох теплових режимів роботи. З урахуванням оптимального значення α і системи контролю процесів присоса повітря проведено розрахунок приросту ККД СПУ за рахунок зменшення присосів повітря в топку і газохід. Прийняте теплове навантаження СПУ дорівнює 50 %. Зниження втрат q_2 для СПУ МАС 35 визначено за формулою:

$$\Delta q = \left(\frac{\alpha_1 - \alpha_2}{\alpha_1} \right) + \left(\frac{t_1 - t_2}{t_1} \right) \times q_2,$$

де α_1, α_2 – коефіцієнти надлишку повітря до зменшення присосів і після; t_1, t_2 – температура газів за повітряним економайзером до зменшення присосів і після, °С; q_2 – втрати тепла з газами, щодо зменшення присосів повітря, %.

Розрахунки показали, що після зниження присосів повітря понад нормативної норми вдалося збільшити ККД СПУ на 1,5 – 2 %. Можна відзначити, що проведений розрахунок враховував зниження присосів повітря тільки в газоході СПУ. Разом з тим, за умови автоматичного контролю і подальшого зниження присосів повітря в топці СПУ, також можливе збільшення ККД до 3 %.

Значення присосів в топку СПУ визначається за формулою:

$$\Delta \alpha_T^n = \frac{\alpha}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{S_T^B}{S_T^H}} \right).$$

При аналізі газів киснеміром або газоаналізатором присоси в газоході визначаються за кисневою формулою:

$$\Delta \alpha_r^n = 21 \left(\frac{1}{21 - O_2^K} - \frac{1}{21 - O_2^H} \right).$$

Таким чином, при витраті палива СПУ МАС 35, який працював на навантаженні 50 % рівному 0,35 кг/с, з урахуванням зростання ККД СПУ після оптимізації α і зниження присосів повітря, витрата склала 0,28 кг/с, тобто економія палива на прикладі одного режиму склала до 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, а також оптимізацією α .

На практиці величину α і повноту згоряння палива оператори агрегатів СЕУ непрямо контролюють за кольором полум'я в топці і диму, що виходить з труби. З урахуванням важливості, для ефективності процесу горіння різного виду рідкого палива або газоподібного, в НМСАУ процесом горіння пропонується додатковий контур оцінки параметрів (кольору полум'я і кольору диму) – НЕС (див. рис. 17), що діє за нечітким алгоритмом І. Мамдані і видає оцінку ефективності процесу горіння палива в СПУ.

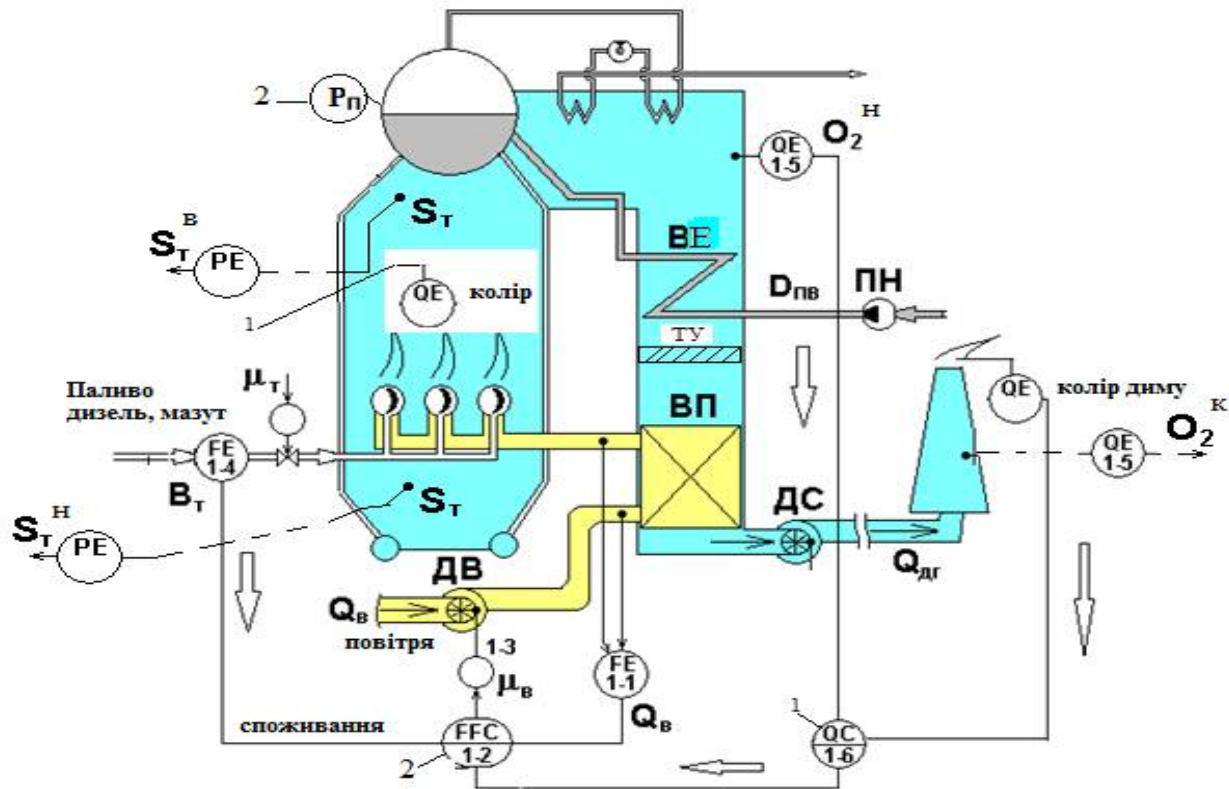


Рис. 17. Схема системи нейромережевої системи управління процесом горіння палива в СПУ Mitsubishi Marin Main Boiler з контролем підсосу повітря в топку і газоповітряний тракт:

ДС – димосос; ВП – повітряний підігрівач; ВЕ – водяний економайзер; ТУ – турбулізатор; ПН – живильний насос; FFC – нейромережевий регулятор; FE – витратомір; QE^{O_2} – киснемір; PE – 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

У реальних умовах роботи СПУ і з урахуванням похибки засобів вимірювання і управління горінням палива (до 5 %) отримання максимального ККД, згідно з розрахунком, при допустимих q_2 і q_3 – теплові втрати від хімічного недопалу, можливо на рівні 88 %. Порівняльний аналіз реальних і можливих (розрахункових за умови впровадження НМ САУ оптимізації ККД) економічних показників роботи СПУ на прикладі ВПК МАС 35 представлений на рис. 18. Для досягнення оптимальних економічних показників (див. рис. 18 процес 2) було розроблено нейромережеву САУ оптимізації режимів горіння палива згідно з даними навчання табл. 4.

У запропонованій структурі нейроуправління процесами в СПУ (див. рис. 17), інформація про поточну витрату палива на вхід, що пропонується до впровадження в САУ горіння палива, нейромережевого контролера (НМК) – (FFC) виробляє коригуючий вплив в САУ процесу повітроподачі.

Таблиця 4

Навчальна вибірка для НМК оптимального режиму горіння
палива по критерію максимізації ККД СПУ МАС 35

Теплове навантаження котла, %	10	30	50	70	90
α	1,4	1,16	1,0	1,11	1,16
ККД, %	84,2	86	87,9	87	86

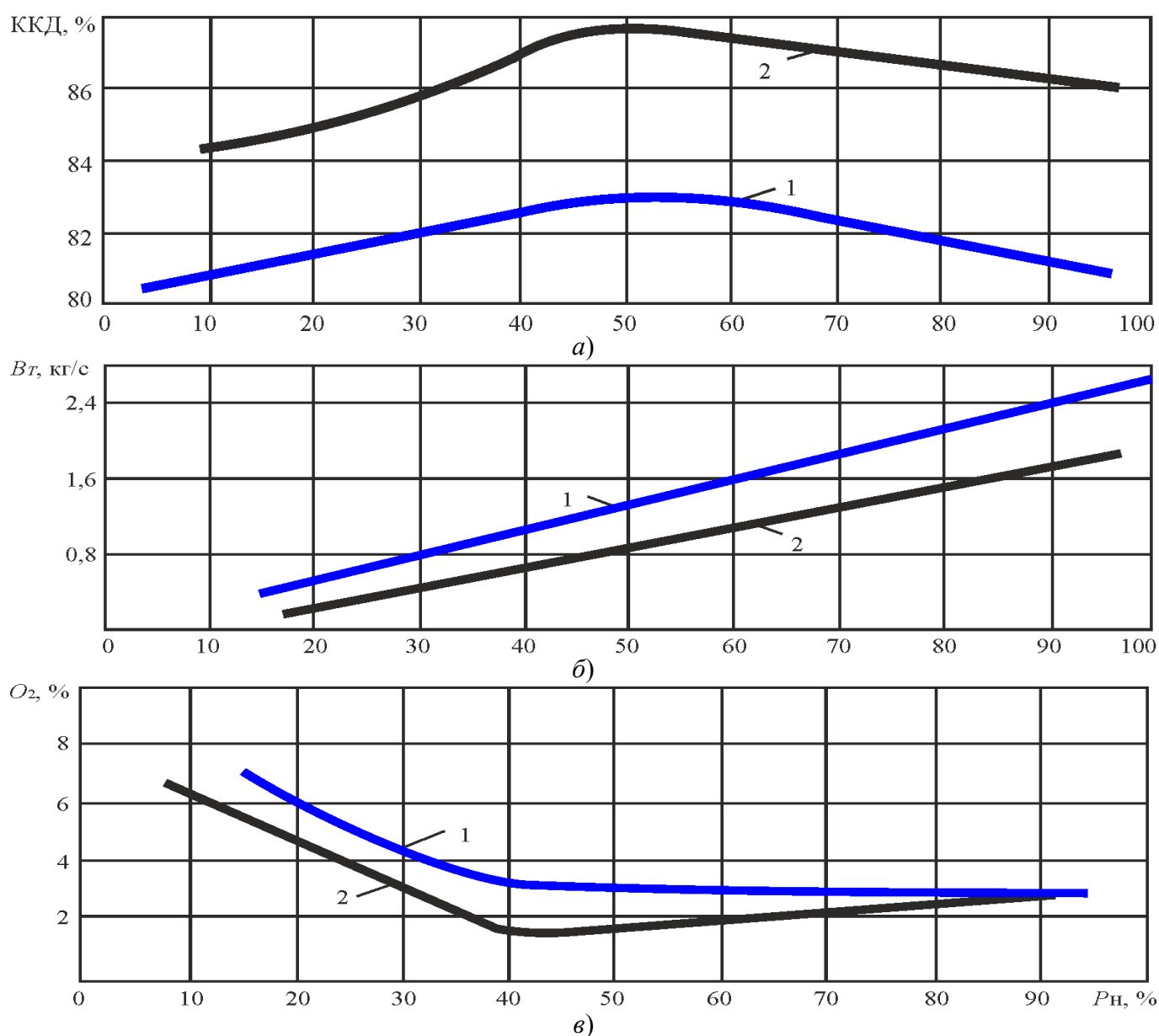


Рис. 18. Експериментальні (1) і розрахункові за допомогою нейромережі (2) характеристики залежностей ККД, витрати палива B_T і вмісту O_2 від теплового навантаження P_H СПУ МАС 35:

а) – efficiency (L.H.V. base); б) – F.O.C. (* 1,000 кг/год); в) – O_2 Rate (% by volume)

Для 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, нейромережева САУ може оснащуватися датчиками (фоторезисторами) QE, контролюючими колір димових газів. Інформація від датчиків кольору диму, після перетворення сигналу в нечіткому модулі QC (див. позицію 1–4 на рис. 17), передається на нейромережевий контролер FFC (позиція 1–6) якій регулює подачу повітря. Також на НМК надходять сигнали по каналах зворотного зв'язку від киснеміра ($QE^{O_2}(1-5)$) і датчика поточної витрати повітря ($FE(1-1)$) (див. рис. 17). Таким чином, запропонована нейромережева система управління реалізує комбінований принцип, тому, що отримує інформацію по каналах збурення і відхилення одночасно. Стабілізація тиску пари в барабані здійснюється за допомогою датчика тиску P_n по каналу (2–2).

Для ефективної роботи САУ процесу горіння різного виду палива в СПУ, з урахуванням важливості контролю кольору диму і кольору полум'я пальника, до нейромережевої САУ горіння (див. рис. 17) пропонується додатковий контур оцінки даних параметрів, що діє за алгоритмом І. Мамдані 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 реалізовані в програмі Fuzzy Logik Toolbox (Matlab).

Вхідними параметрами в нечітку експертну систему є колір диму і колір факела (оцінюваний за допомогою фотодатчиків і термopар), а вихідним – коефіцієнт надлишку повітря α .

Присвоївши кожному кольору відповідну шкалу, програма розраховує коефіцієнт надлишку повітря і показує ефективність процесу горіння палива.

Таким чином, при вихідній витраті палива СПУ МАС 35 на навантаженні 50 %, рівному 0,35 кг/с (див. табл. 3), з урахуванням зростання ККД СПУ після оптимізації α 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 економію палива ΔB до 18 %:

$$\Delta B = \frac{D_k(i_n - i_{ng}) + D_k(i_{kv} - i_{ng})P_1}{Q_n^p \cdot \eta_{k1}} - \frac{D_k(i_n - i_{ng}) + D_k(i_{kv} - i_{ng})P_2}{Q_n^p \eta_{k2}},$$

де D_k – парова продуктивність котла, кг/г; $i_n, i_{пв}, i_{kv}$ – ентальпія пари, живильної і котлової води, ккал/кг; P_1, P_2 – частка продувки котла до й після його налагодження; η_{k1}, η_{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

Успіх навчання або тренування НМ в значній мірі залежить від довжини навчальної вибірки (НВ) і такту дискретності Δt , що визначає інтервал між двома послідовними моментами знімання даних. Оптимальними в розв'язуванні задачі є: НВ = 10000, $\Delta t = 0,001$ с.

Використання в моделі НМ САУ горіння, 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:

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

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

Моделювання НМ САУ оптимізації процесу горіння палива на типових теплових навантаженнях 25 і 65 % (рис. 19) також показало зниження витрати палива до 18 %.

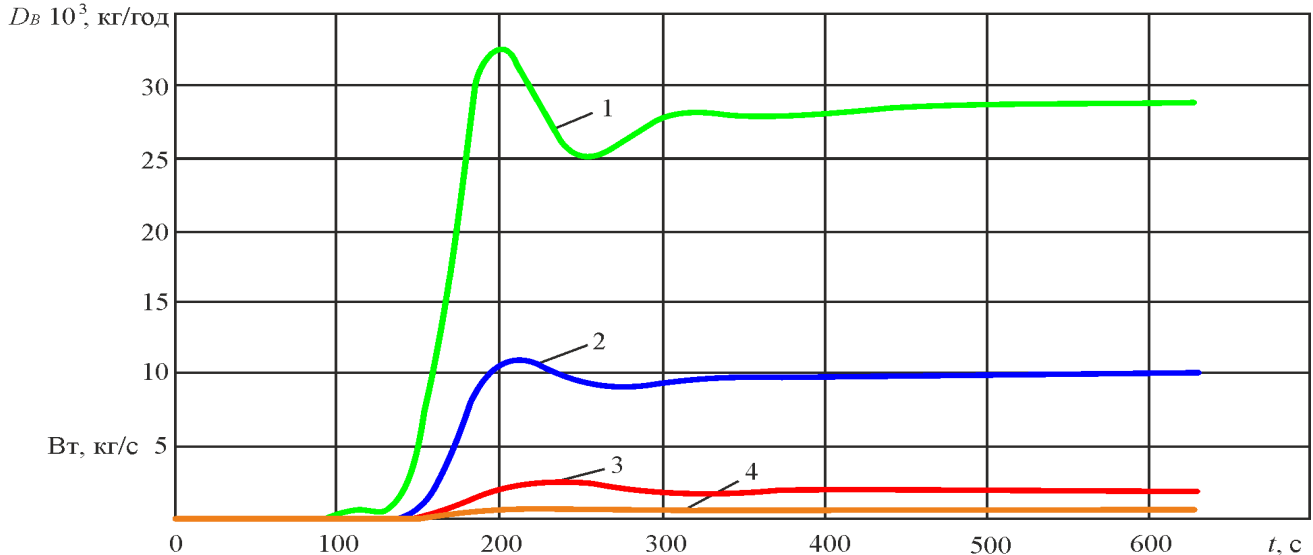


Рис. 19. Усталені процеси двоконтурної НМСАУ горіння палива в топці ДПК «МАС 35»: 1, 2 – процеси підтримання витрати повітря (D_v), при навантаженні 65 і 25 %; 3, 4 – процеси підтримки витрати палива (B_T) при навантаженні 65 % і 25 %

Для оперативного аналізу продуктів згоряння використовувався аналізатор димових газів TESTO 300. Прилад налаштован для оптимізації процесу горіння і визначення забрудненості поверхні нагрівання СПУ. Відносна похибка вимірювання прилада згідно з паспортними даними 0,5 %.

Ефективність процесу згоряння (ККД СПУ) обчислюється в приладі для вищої теплотворної здатності палива (флотського мазуту) за формулою:

$$\eta_{cz} = 100 - [RL + \frac{K_1 t}{21 - O_2} + K_2(1121,4 + t)],$$

де RL – втрати теплоти в навколишнє середовище, що згідно з паспортом приладу 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, %.

Згідно з експериментальними даними, що отримано при вимірі параметрів димових газів після установки гвинтового 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: $t_{\text{вих.газ}} = 182$ °С; $t_{\text{окр.середі}} = 35$ °С; $O_2 = 6,5$ %, - ККД котла склав 80,1 %. Після установки турбулізатора і оптимізації показник O_2 , ККД котла згідно з показниками газоаналізатора димових газів TESTO 300 склав 86,3 %. Тобто за рахунок нових методів і засобів оптимізації процесу горіння, технічний стан котла вдалося підвищити з задовільного до хорошого.

Таким чином внаслідок корекції O_2 (зменшення на 3 %), і зниження температури відхідних газів на 47 °С за рахунок гвинтового турбулізатора вдалося досягти підвищення ККД котла на прикладі одного режиму згідно з розрахунками прилада і з урахуванням похибки виміру, до 6 %, що дало зниження витрати палива в середньому на 15 %.

ВИСНОВКИ

Проведено дослідження дозволяє формулювати наступні наукові результати.

1. Запропоновано нову концепцію розробки систем управління судновими парогенеративними 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 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 MAC 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 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°C , 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 конференціях.

СПИСОК ОСНОВНИХ ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

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 – Science Index, Index Copernicus, Google Scholar, World Cat, BASE, Research Bib.*
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 –, Science Index, Index Copernicus, Google Scholar, World Cat.*
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.*
7. **Михайленко В.С.** Сравнительный анализ комплексного и нечеткого регуляторов при управлении многомерным объектом [Текст] / В.С. Михайленко, В.Ф. Ложечников // Автоматика. Автоматизация. Електротехнічні комплекси та системи [Фахове видання України]. – 2008. – № 2 (23). – С. 130 – 135. URL: 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 – Science Index, Index Copernicus, Google Scholar.*
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 – 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.*

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.*

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.*

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, 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

автоматики [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.**

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, 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, PИНЦ, 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, РІНЦ**

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.

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.**

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 входять 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 входять до МНБ – РИНЦ.*

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 входять 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 входять до МНБ – SCOPUS, INSPEC, Google Scholar, CNKI, DBLP, EBSCO Discovery Service, EI Compendex.*

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 контроллера 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 ученых. – 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.

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.

У дисертаційній роботі розглянуто науково-прикладні питання, що пов'язані з проблемами розробки судових САУ агрегатів (судових енергетичних установок) СЕУ і експлуатації СПЕУ, актуальні напрямки в області модернізації САУ і адаптації агрегатів СПЕУ до умов експлуатації. 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 ГМ і ДКВР та судових 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.

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 нейромережевих 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 нейромережевої САУ рециркуляції димових газів в топку СПУ, яка знижує вміст NO_x до 54 %. Розроблено нейромережеву САУ оптимізації витрати палива за рахунок контролю подачі повітря в топку і газохід СПУ, корекції коефіцієнта надлишку повітря, виходячи з парового навантаження агрегатів СЕУ та турбулізатора, що дозволяє збільшити ККД бруто СПУ до 6 % в залежності від теплового навантаження і стану поверхні нагріву.

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

АНОТАЦІЯ

Михайленко В.С. Концепция разработки систем управления судовыми парогенераторными установками. – Квалификационный научный труд на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.05.03 – Двигатели и энергетические установки. – Национальный университет «Одесская морская академия», Одесса, 2020.

В диссертационной работе рассмотрены научно-прикладные вопросы, связанные с проблемами разработки судовых систем автоматического управления (САУ) агрегатов судовых энергетических установок (СЭУ) и эксплуатации судовых парогенераторных установок (СПУ), актуальные направления в области модернизации САУ и адаптации агрегатов СПУ к условиям эксплуатации. Проведено параметрическую идентификацию подсистем СПУ. Рассчитаны коэффициенты уравнений динамики параметров СПУ при его работе на трех тепловых режимах и определены их степень адекватности. Получены новые дифференциальные уравнения локальных систем СПУ, которые позволяют оценить влияние управляющих воздействий САУ на процессы возникновения химической и электрохимической коррозии в элементах СПУ. С помощью натурных экспериментов на действующих вспомогательных СПУ Mitsubishi MB, аналогах СПУ – производственных паровых котлах ГМ и ДКВР и судовых эмуляторах были определены математические модели по каналам управления и возмущения для главных, вспомогательных, утилизационных и комбинированных СПУ и оценены точность полученных моделей. Модели могут быть использованы в дальнейших исследованиях свойств СПУ с целью улучшения их экологических и экономических характеристик.

Проведена разработка нейросетевых систем идентификации и управления СПУ. Предложена универсальная адаптивная нейросетевая система управления процессом горения жидкого топлива в топках СПУ, которая позволяет минимизировать содержание вредных выбросов в атмосферу. Апробированы методы разработки

нейросетевых систем мониторинга и оптимизации экологических показателей работы СПУ и показано их эффективность по сравнению с традиционными САУ. Представлена и апробирована методика разработки, настройки и эксплуатации нейросетевой САУ рециркуляции дымовых газов в топку СПУ, которая снижает содержание NO_x до 54 %. Разработанная нейросетевая САУ оптимизации расхода топлива за счет контроля подачи воздуха в топку и газоход СПУ, коррекции коэффициента избытка воздуха, исходя из паровой нагрузки агрегатов СЭУ и турбулизатора позволяет увеличить КПД брутто СПУ до 6 % в зависимости от тепловой нагрузки и состояния поверхности нагрева.

Ключевые слова: судовая паропроизводящая установка, математическая модель, система управления, ПИ-регулятор, тепловой режим, нечеткая экспертная система, нейросетевой регулятор.

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 first section deals with scientific and applied issues related to the development and operation of ship automated control system (ACS), current areas in the field of modernization and adaptation of ACS ship steam boilers. 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 the 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. Also, maintaining a given vapor pressure with the proposed system helps to reduce emergencies by 25 % and slow down the growth of chemical corrosion in the elements of the SGU, ie in general increase the reliability of the SPU. The developed methods form the basis of a new concept of creating highly efficient ACS.

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 SPU furnace, which reduces the 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.

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

Підп. до друку 22.02.2021. Формат 60х84/16. Папір офсет.
Гарнітура Times New Roman. Ум. друк. арк. 2,55.
Тираж 100 пр. Зам. № И21-02-39

Національний університет «Одеська морська академія»
65029, м. Одеса, Дідріхсона, 8.
Тел./факс (0482) 34-14-12
publish-r@onma.edu.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 1292 від 20.03.2003