

**МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ УТВОРЕННЯ ШКІДЛИВИХ ВИКИДІВ У
ВИХІДНИХ ГАЗАХ СУДНОВИХ ПАРОВИХ КОТЛІВ****В.С. Михайленко¹, В.А. Щербінін¹, В.В. Лещенко¹, Р.Ю. Харченко¹,
Н.В. Ложечнікова²**¹Національний університет «Одеська морська академія», вул. Дідріхсона 8, Одеса, 65029, Україна;
e-mail: romann30@gmail.com²Одеський національний політехнічний університет, пр.-т Шевченка, 1, Одеса, 65022, Україна;
e-mail: fontan.lev@gmail.com

За причиною посилення вимог Міжнародної конвенції по запобіганню забрудненню від суден, зокрема, Положення про запобігання забрудненню повітряного середовища від судів, стає актуальним впровадження нових методів контролю і обмеження концентрації шкідливих викидів суднових агрегатів в атмосферу. У роботі проведено дослідження методів зниження концентрації вмісту викидів оксидів азоту NO_x у вихідних газах суднових парових котлів. Розглянуто сучасні наукові підходи в області зниження шкідливих викидів, зокрема проаналізовані їх переваги та недоліки. Зміст NO_x у вихідних газах може бути досягнуто шляхом впливу на максимальну температуру горіння, що забезпечується введенням газів рециркуляції. Димові гази з температурою 300-400 °С відбираються перед повітряним підігрівачем і рециркуляційних димососів і подаються в топку. В результаті максимальна температура в топці знижується на 120-130 °С і падає концентрація кисню в зоні горіння, що також зменшує утворення паливних NO_x . При цьому ККД парового котла знижується порівняно мало (0,01-0,03% на 1% рециркулюючих газів). Ефективність зменшення утворення оксидів азоту при введенні газів рециркуляції визначається наступними факторами: місцем відбору газів на рециркуляцію; умовами їх введення в топку; ступенем рециркуляції $r, \%$; розподілом газів рециркуляції за обсягом камери згорання; станом котла. Запропоновано метод, який реалізує нейромережвий алгоритм в системі управління рециркуляцією димових газів, який відрізняється можливістю мінімізації вмісту значень оксидів азоту NO_x при роботі суднового котла при різних теплових навантаженнях. Порівняльне моделювання запропонованої нейромережової і традиційної системи автоматичного управління процесом рециркуляції димових газів при роботі суднового котла з 50% навантаженням показало перевагу нейромережової системи управління, навченої на досягнення мінімально можливого вмісту шкідливих викидів в атмосфері.

Ключові слова: Шкідливі викиди, судновий барабанний водотрубний паровий котел, нейромережвий алгоритм, система управління рециркуляцією димових газів, теплове навантаження.

Вступ

Останні вимоги міжнародних конвенцій (МК): МАРПОЛ 73/78, Паризької конференції, затвердили нормативи шкідливих викидів та відходять газами суднових енергетичних установок (СЕУ). У зв'язку з цим на судах, що експлуатуються 10 і більше років, установка нового устаткування для зниження шкідливих викидів від агрегатів СЕУ, зокрема, суднових дизелів та парових котлів стало економічно не вигідно. Дана проблема передбачає пошук нових більш економічних шляхів модернізації систем горіння суднового палива й очищення газів с метою зниження концентрації шкідливих викидів в атмосферу [1] без значних капіталовкладень.

Аналіз основних досліджень і публікацій

Зараз діє цілий ряд підходів щодо зменшення концентрації шкідливих газів в атмосфері від обладнання СЕУ: первинні методи, які полягають в придушенні викидів, зокрема, NO_x в топках котлів або камерах згорання дизелів, і вторинні методи зниження викидів NO_x , які полягають в обробці димових газів після котла або дизеля [2]. Попри великий обсяг виконаних досліджень, роботи більшості вчених спрямовані на зниження викидів оксидів азоту методами селективного каталітичного і некаталітичного відновлення оксидів азоту [2]. Зазначені методи хоча і забезпечують високий ступінь очищення димових газів, але при цьому пов'язані зі значними фінансовими витратами і засновані на використанні небезпечних хімічних реагентів. Також за даними [1] коштовні апарати очищування – скрубери встановлені на не більш ніж на 1% від загального числа судів, і галузеві аналітики пророкують, що до 2021 року їх число навряд чи перевищить 10-20%. Тому проблема розробки та впровадження на судах нових, економічно відносно недорогих та екологічно ефективних методів очищення відпрацьованих газів судових дизелів і котлів від оксидів азоту і сірки в зв'язку зі строгими вимогами Додатка VI МК МАРПОЛ є актуальною.

Мета роботи

Дослідження процесу мінімізації шкідливих викидів газів судових парових котлів, зокрема оксидів азоту (NO_x).

Основна частина

Згідно з дослідженнями [3] зниження концентрації шкідливих викидів, зокрема, зміст NO_x у вихідних газах може бути досягнуто шляхом впливу на максимальну температуру горіння, що забезпечується введенням газів рециркуляції. Димові гази з температурою 300-400 °С відбираються перед повітряним підігрівачем і рециркуляційних димосмоків і подаються в топку. В результаті максимальна температура в топці знижується на 120-130 °С і падає концентрація кисню в зоні горіння, що також зменшує утворення паливних NO_x . При цьому ККД парового котла знижується порівняно мало (0,01-0,03% на 1% рециркулюючих газів). Ефективність зменшення утворення оксидів азоту при введенні газів рециркуляції визначається наступними факторами: місцем відбору газів на рециркуляцію; умовами їх введення в топку; ступенем рециркуляції $r, \%$; розподілом газів рециркуляції за обсягом камери згорання; станом котла.

Ефективність рециркуляції тим більше чим вище температура в зоні горіння. Вона знижується при:

- зменшенні навантаження котла;
- зменшенні температури горіння палива;
- збільшенні коефіцієнта надлишку повітря;
- підвищенні вмісту азотовмісних сполук в паливі.

Залежність вмісту азоту в продуктах згорання судового котла від коефіцієнта надлишку повітря визначається по формулі

$$\alpha = \frac{N_2}{N_2 - 3,76O_2} \quad (1)$$

Як типовий об'єкт дослідження обрано судовий допоміжний двобарабанний паровий котел (СПК) фірми Mitsubishi типу MAC 50, продуктивністю 50 тон пари на

годину, робочим тиском пари 1.57 МПа (16 кгс/см²), температурою пари 280 °С і ККД 82,5% (рис. 1). Цим типом котлів обладнані багато суден танкерного флоту [4].

Оскільки більшу частину часу СПК функціонує в стаціонарному режимі роботи на навантаженні, що приблизно дорівнює 50% від номінального з дотриманням принципу суперпозиції, а також у зв'язку з поширеності в САУ об'єктів СЕУ, лінійних ПІД - регуляторів (до 85% від усіх алгоритмів), вводилося допущення про можливість опису найбільш ймовірних режимів роботи СПК за допомогою лінійних математичних моделей, тобто вводилися спрощуючі припущення. Нелінійності, що входять в рівняння динаміки параметрів СПУ, відносяться до класу лінеарізуємих. Це дає можливість застосувати метод малих відхилень, що забезпечує цілком прийнятну точність не тільки при вирішенні задачі стійкості, але і при визначенні динамічних характеристик.

Так нелінійну модель СПК доцільно замінити спектром моделей, лінеаризованих щодо кількох режимів функціонування.

Вхідними керуючими впливами математичної моделі СПК як об'єкта управління (рис. 2) є: зміни витрати палива ΔB_T , положення напрямних апаратів дуттєвого вентилятора Δn_L і димососа Δn_T , витрати живильної $\Delta D_{ПВ}$ і продувочної води $\Delta D_{ПР}$. Контрольованими вихідними параметрами є: зміна концентрації кисню в димових газах ΔC_{O_2} , розрідження в топці ΔP_P , рівня води в барабані котла Δh_o , тиску пари в паровій магістралі ΔP_M або витрати пари ΔD_n (в залежності від режиму роботи котла), солевмісту в барабані котла ΔCa [4]. Основними збурюючими впливами є зміни витрати Δn_n і тиску пари в паропроводі ΔP , обумовлені зміною теплового навантаження споживача пари агрегатами СЕУ.

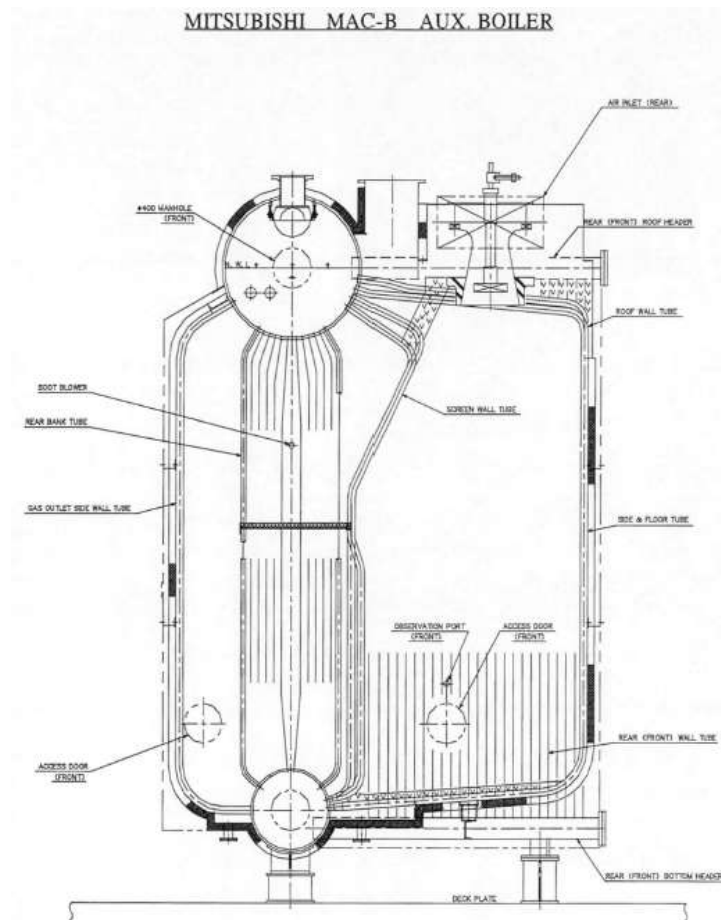


Рис. 1. Конструктивний вид допоміжного СПК

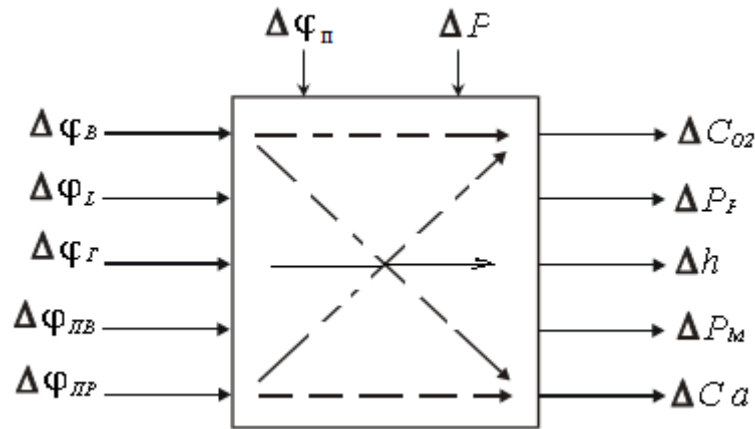


Рис. 2. Параметрична схема СПК

При розрахунку багатовимірної і типової систем автоматичного регулювання та моделюванні їх роботи масові витрати палива ΔB_T , живильної $\Delta D_{ПВ}$ і продувної $\Delta D_{ПР}$ води будуть виражені через положення відповідних регулюючих клапанів $\Delta \varphi_B$, $\Delta \varphi_{ПВ}$ і $\Delta \varphi_{ПР}$.

У зв'язку з наявністю істотних нелінійностей в системі управління рециркуляцією, маючи на увазі специфічні умови роботи СПУ і часту зміну режимів навантаження, пропонується замість стандартного лінійного ПІД - регулятора скористатися адаптивним нелінійним нейромережевим регулятором. Реалізація нейромережевого регулятора або контролера (FFC) (рис. 3) може бути виконана на базі нейрочипа СМ1К фірми The Cogni Mem Technologies. Даний чіп містить 1024 нейрона, які працюють паралельно [5].

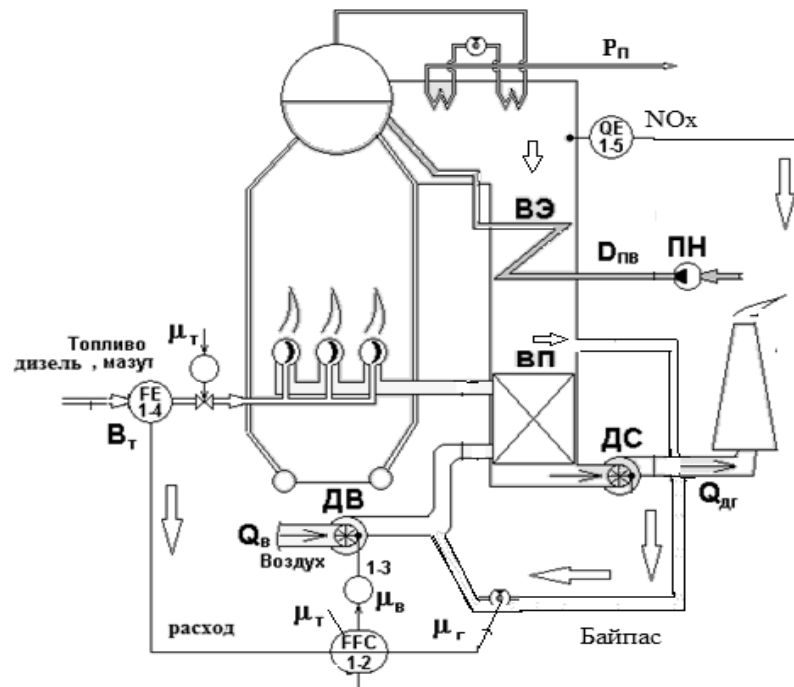


Рис. 3. Схема нейромережевої системи управління процесом рециркуляції димових газів парогенератора марки Mitsubishi Marin Main Boiler МВ паровою продуктивністю 150 т/год. ДС - димосос; ДВ - дуттєвий вентилятор; ВП - повітряний підігрівач; ВЕ - водяний економайзер; ПН - живильний насос; QE - газоаналізатор; FFC - регулятор рециркуляції (нейромережевий); FE - витратомір; μ - керуючі впливи.

Основним структурним елементом математичної моделі СПК, необхідним для апробації системи управління рециркуляції димових газів, є газо-повітряний тракт, який складається з газоходу і повітроводу. Регульованими параметрами для цієї ділянки є розрідження димових газів у верхній частині топкової камери і надлишок повітря, що характеризує економічність процесу горіння.

При виведенні диференціальних рівнянь газоходу і повітроводу, як ділянок регулювання розрідження в топці, були прийняті наступні допущення: газохід після димососа і повітропровід після дуттєвого вентилятора дуже короткий і зворотна реакція тиску в топці на витрату мазуту і повітря на вході впливає мало; акумулююча ємність топки і газоходів зосереджена в одному об'ємі, а дроселююча здатність газоходів і поверхонь нагріву зосереджена в одній точці. Регулювання здійснюється шляхом зміни положення направляючого апарату димососа і дуттєвого вентилятора. З урахуванням перерахованих припущень регульовані ділянки можуть бути замінені спрощеною системою, що складається з ємності, дроселя і димососа (дуттєвого вентилятора).

Регульованою величиною є відхилення тиску в топці ΔP_p від заданого значення; вхідний величиною (регулюючим впливом) – зміна положення направляючого апарату димососа $\Delta \varphi_\Gamma$. В якості зовнішнього збурення приймемо зміну витрати газів на притоці ΔM . Таким чином, диференціальні рівняння в приростах з урахуванням лінеаризації в робочих точках мають такий вигляд [6]:

$$T_1^{21} \frac{d\Delta P_p}{dt} + \Delta P_p = k_1^{21} \Delta \varphi_\Gamma + k_2^{21} \Delta M .$$

$$T_1^{21} = (a_L^\Gamma - a_P^\Gamma) \frac{m_\Gamma}{\bar{P}_\Gamma} \alpha ; k_1^{21} = -b_P^\Gamma ; k_2^{21} = a_L^\Gamma - a_P^\Gamma , \quad (2)$$

де m_Γ – маса димових газів в газоході котла в стаціонарному режимі роботи, кг;

\bar{P}_Γ – тиск димових газів у верхній частині топкової камери, Па;

$a_p^\Gamma, a_L^\Gamma, b_p^\Gamma$ – визначаються графічно за витратними характеристикам газоходу і димососа; k_i^n і T_i^n - коефіцієнти, які мають постійне значення в заданому режимі функціонування котла (n - відповідає номеру диференціального рівняння, i - порядковий номер коефіцієнта); α - коефіцієнт (для мазуту 0.65).

Вихідні дані для розрахунку коефіцієнтів диференціальних рівнянь визначені по напірним характеристикам відцентрового димососа одностороннього всмоктування DN-12,5 [7] і гідравлічної характеристиці газоходу мазутного водотрубного барабанного котла ГМ 50 (аналог суднових допоміжних котлів середньої потужності типу МАС) представлені в [4]:

$$m_g = 78,2 \text{ кг}; P_g = 1,01 \text{ кПа}; \alpha = 1,15; \alpha_L^g = 2\text{kQ}$$

$$k = \frac{\Delta H_p}{Q_p^2} = \frac{5000 - 1200}{70000^2} = 0,7 \cdot 10^{-6} \text{ мм.вод.ст.} \cdot \text{год}^2 / \text{м}^6$$

$$\alpha_L^g = 2 \cdot 0,7 \cdot 10^{-6} \cdot 72 \cdot 10^3 = 50,4 \cdot 10^{-3} \text{ мм.вод.ст.} \cdot \text{год} / \text{м}^3 = 0,5 \text{ Па} \cdot \text{год} / \text{м}^3 = 23,6 \text{ Па} \cdot \text{с} / \text{кг}$$

$$\alpha_L^g = \frac{\Delta H_p}{Q_p^2} = \frac{40,4}{5,5 \cdot 10^3} = 7,3 \cdot 10^{-3} \text{ мм.вод.ст.} \cdot \text{год}^2 / \text{м}^3 = 0,07 \text{ Па} \cdot \text{год} / \text{м}^3 = 1,89 \text{ Па} \cdot \text{с} / \text{кг}$$

$$b_p^g = \frac{\Delta H_\phi}{\Delta_\phi} = \frac{80,2}{50} = 1,6 \text{ мм.вод.ст.} / \% = 15,7 \text{ Па} / \% \text{ ходу}$$

$$T_1^{21} = (23,6 - 1,9) \cdot \frac{78,2}{1,01 \cdot 10^3} \cdot 1,15 = 1,93 \text{ с}$$

$$k_1^{21} = -15,7 \text{ Па/\% ходу}$$

$$k_1^{21} = 21,7 \text{ Па} \cdot \text{с/кг}$$

Таким чином, після підстановки коефіцієнтів в рівняння (2) отримали

$$1,93 \frac{dP_p}{dt} + P_p(t) = -15,7 \varphi_{\Gamma}(t) + 21,7 M(t) \quad (3)$$

Після виконання перетворення Лапласа (3) отримані передаточні функції за каналами управління $W(s)_{\mu-p}$ (зміна положення направляючого апарату – зміна тиску димових газів) і збурення $W(s)_{M-p}$ (зміна витрати газів – зміна рециркуляційного тиску в газоході)

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

Тривимірна модель направляючого апарату димососа з зазначенням зміни кута положення $\Delta\varphi_{\Gamma}$ представлена на рис. 4.

Після виконання розрахунків для двох найбільш часто працюючих режимів СПУ (50% і 25% від номінального парового навантаження) отримані наступні значення коефіцієнтів диференціального рівняння (2) на трьох режимах теплового навантаження (табл.1).

Таблиця 1.

Розрахункові коефіцієнти рівняння (1)

Навантаження від номінального	25%	50%	75%
T_{21}^j	1,9	5,8	7,6
k_{21}^j	-15,7	-23,4	-56,2
k_{21}^2	21,7	34,3	42,8

Таким чином, отримана система диференціальних рівнянь для трьох режимів роботи СПУ має вигляд:

$$\left. \begin{aligned} 1,93 \frac{dP_p}{dt} + P_p(t) &= -15,7 \varphi_{\Gamma}(t) + 21,7 M(t) \\ 5,8 \frac{dP_p}{dt} + P_p(t) &= -23,4 \varphi_{\Gamma}(t) + 34,3 M(t) \\ 7,6 \frac{dP_p}{dt} + P_p(t) &= -56,2 \varphi_{\Gamma}(t) + 42,8 M(t) \end{aligned} \right\}$$

Зміна кута лопатей направляючого апарату димососа показано на рис. 4

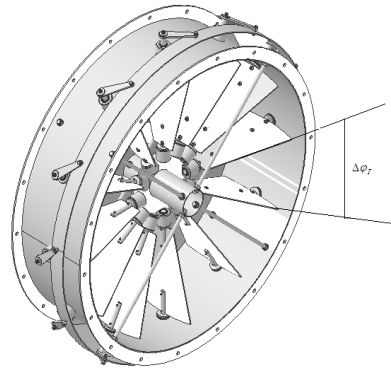


Рис. 4. Тривимірна модель направляючого апарату

Перехідні характеристики представленої системи рівнянні по каналах керування й збурення представлені на рис. 5-6.

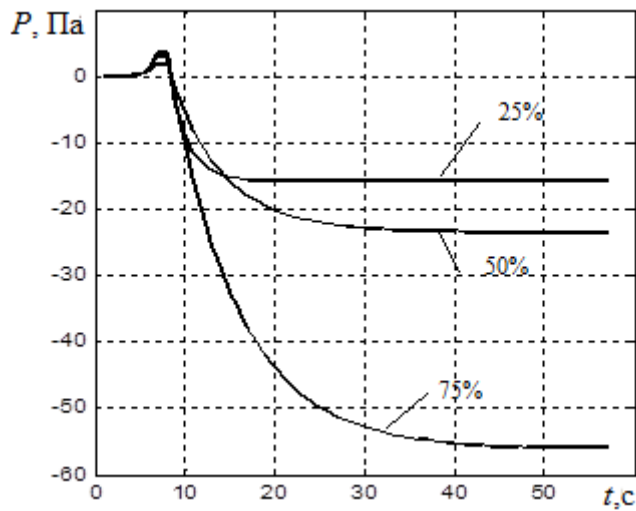


Рис. 5. Зміна тиску димових газів для трьох режимів роботи СПК при роботі направляючого апарату

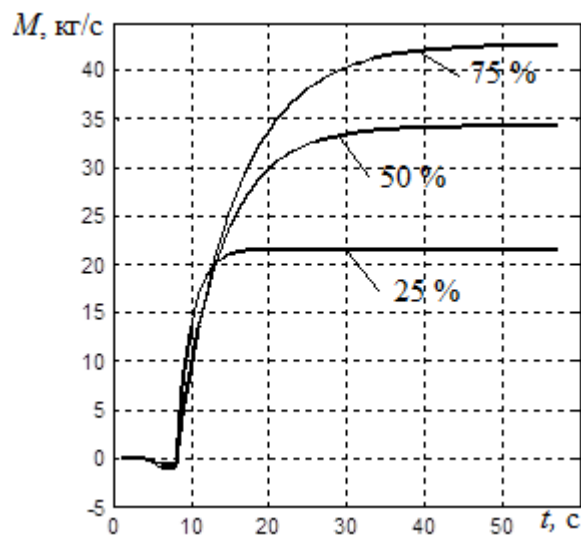


Рис. 6. Зміна витрати димових газів при трьох режимах роботи

Втрата теплоти з газами q_2 є найбільшою з усіх теплових втрат в суднових парогенераторах. Для СПУ вона коливається в межах від 5 до 23% і більше [7]. Величина q_2 залежить від ентальпії відхідних газів, яка визначається за формулою:

$$I_{yx} = V_{\Gamma} \times C_{\Gamma} \times V_{yx}.$$

де V_{Γ} - обсяг відхідних газів, м³; C_{Γ} - об'ємна ізобарна теплоємність продуктів згоряння, кДж / (м³К); V_{yx} - швидкість газів, м / с.

При контролі V_{yx} необхідно враховувати, що температура стінки хвостових поверхонь нагріву t_{ct} СПК повинна бути вище точки роси t_p , при якій суміш водяної пари сірчаної кислоти що знаходиться в продуктах згоряння конденсується. При виникненні умов коли $t_{ct} < t_p$, суміш парів починає конденсуватися на поверхнях нагріву і під впливом сірчаної кислоти починає відбуватися інтенсивне руйнування металів труб, тобто починається процес низькотемпературної корозії. У продуктах згоряння сірчистих мазутів завжди присутні пари води і сполуки 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 [8].

Таким чином, з урахуванням впливу швидкості V_{yx} димових газів, що відходять, на процеси утворення низькотемпературної корозії ΔN_k^T , пропонується доповнити рівняння (2) параметром, що характеризує корозійний процес.

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

$$k_4^{21} = t_s + 2 \cdot 10^3 \sqrt[3]{\frac{\Delta \varphi_z}{Q_{np}^p}}$$

де t_s – температура насичення водяної пари, відповідна їх парціальному тиску в продуктах згоряння, °С; $\Delta \varphi_z$ – положення направляючого апарату димососа, %; Q_{np} – нижча теплота згоряння робочої маси палива, кДж/кг. Для режиму навантаження 75%, отримали:

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

після підстановки коефіцієнта, рівняння (2) має наступний вигляд:

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

У подальших рівняннях залежність від часу (t) не відображається.

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

Динамічні властивості повітряводу, що визначають залежність між зміною подачі повітря в топку котла і положенням направляючого апарату дуттєвого вентилятору $\Delta \varphi_B$, описуються рівнянням виду [9]:

$$T_2^{22} \frac{d^2 \Delta M_L}{dt^2} + T_1^{22} \frac{d \Delta M_L}{dt} + \Delta M_L = k_1^{22} \frac{d \Delta \varphi_B}{dt} + k_2^{22} \Delta \varphi_B. \quad (4)$$

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

$$k_2^{22} = \frac{b_P^B}{a_L^B - a_P^B},$$

де m_B – маса димових газів в повітроводі котла в стаціонарному режимі роботи, кг;

\bar{P}_B – середнє значення тиску повітря в повітроводі, Па;

a_P^B, a_L^B, b_P^B – визначаються графічно за витратними характеристикам повітряводу і дуттєвого вентилятора; M_L - витрата повітря, м³/год. Розрахункові значення коефіцієнтів для трьох режимів роботи СПК представлені в табл. 2.

Таблиця 2.

Розрахункові коефіцієнти рівняння (4)

Навантаження від номінального	25 %	50 %	75 %
T_2^{22}, c	3,9	6,8	9,3
T_1^{22}, c	4,2	9,1	16,1
$k_1^{22}, кг/\%$	2,3	4,5	7,4
$k_2^{22} кг/с\%$	8,1	26,1	28,3

Система диференціальних рівнянь що описують динамічні властивості повітряводу при трьох режимах роботи СПК має вигляд:

$$\left. \begin{aligned} 3,9 \frac{d^2 \Delta M_L}{dt^2} + 4,2 \frac{d \Delta M_L}{dt} + \Delta M_L &= 2,3 \frac{d \Delta \varphi_B}{dt} + 8,1 \Delta \varphi_B \\ 6,8 \frac{d^2 \Delta M_L}{dt^2} + 9,1 \frac{d \Delta M_L}{dt} + \Delta M_L &= 4,5 \frac{d \Delta \varphi_B}{dt} + 26,1 \Delta \varphi_B \\ 9,3 \frac{d^2 \Delta M_L}{dt^2} + 16,1 \frac{d \Delta M_L}{dt} + \Delta M_L &= 7,4 \frac{d \Delta \varphi_B}{dt} + 28,3 \Delta \varphi_B \end{aligned} \right\}$$

З метою подальшого моделювання САУ об'єктів СПК з ПІД - регуляторами, кожне з рівнянь системи представлено у вигляді передаточних функцій:

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

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

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

Для визначення динаміки процесу зміни коефіцієнта надлишку повітря, що впливає на концентрацію NOx, використовується експериментальна залежність (рис. 7)

[10, 11]. На основі цієї залежності відбувається навчання нейромережевого регулятора (НСК), керуючого процесом рециркуляції димових газів.

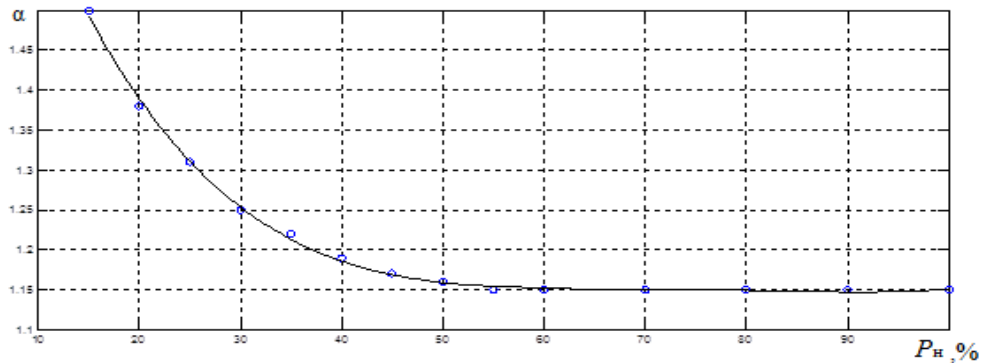


Рис. 7. Статична характеристика $\alpha = f(P_n)$

Навчальна вибірка для НСК оптимального режиму горіння палива за критерієм мінімізації NOx представлена в табл.3. З урахуванням наявності бібліотеки елементів нейронної мережі, для навчання нейромережевого контролера (НСК) були використані спеціалізовані програмні редактори в пакеті MatLab [10], що реалізують методи еталонного управління і діють на основі алгоритму навчання — зворотного поширення помилки [12, 13]. Нейрони 1-го шару мають активаційну функцію – гіперболічний тангенс, а у нейронів 2-го шару активаційні функції лінійні. Детальна схема навчання НСК представлена в роботі [12]

Таблиця 3.

Навчальна вибірка для НСК

Навантаження котла, %	10	30	50	70	90
α	1,5	1,25	1,16	1,15	1,1
NOx * 100 мг/м ³	2,7	4,6	6,0	8,2	8,8

Перехідні процеси, отримані в результаті моделювання нейромережевої і традиційної САУ рециркуляції СПК на трьох режимах теплового навантаження, представлені на рис. 8-9.

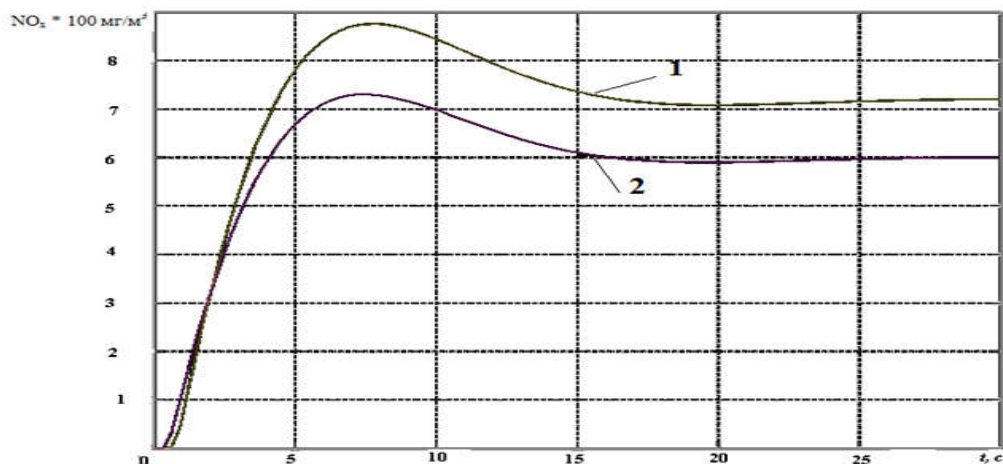


Рис. 8. Перехідні процеси регулювання змісту NOx у вихідних газах суднового котла: 1 – традиційна САУ з ПІД - регулятором ($\alpha = 1,3$); 2 – нейромережева САУ ($\alpha = 1,16$ див. табл.3) при тепловому навантаженні СПК, що дорівнює 0,5 від номінального.

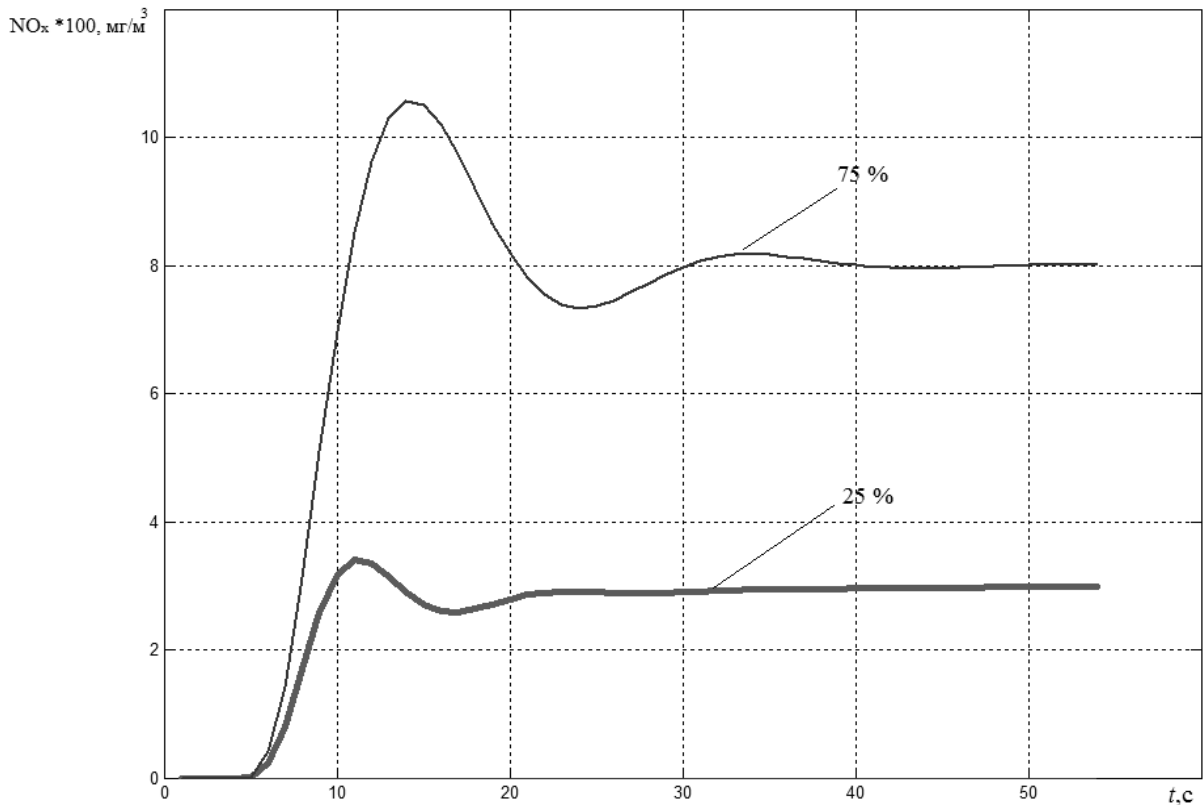


Рис. 9. Перехідні процеси регулювання змісту NO_x у вихідних газах суднового котла при роботі на двох теплових режимах 25, 75%

Висновки

Порівняльний аналіз перехідних процесів САУ (див. рис. 8-9) продемонстрував зменшення вмісту NO_x в середньому на 25% в порівнянні з типовою системою управління. Таким чином, використання запропонованої структури управління представляється перспективним для впровадження на судах різного типу і дозволяє виконати вимоги Міжнародних конвенцій без істотних капіталовкладень в закупівлю нового обладнання або модернізації старого.

Список літератури

1. ИМО 2020 – перспективы судоходной отрасли и нефтеперерабатывающих заводов URL: <https://modcon.ru/applications/судоходство-и-морские-перевозки>.
2. Хачоян М.М. Снижение выбросов оксидов азота с отработавшими газами судовых дизелей и котлов абсорбцией водой: автореферат диссертации кандидата тех. наук. Новороссийск: ГМУ им. Ф.Ф. Ушакова, 2013. URL: <http://www.dslib.net/sudovenergoustanovki/snizhenie-vybrosov-oksidv-azota-s-otrabotavshimi-gazami-sudovyh-dizelej-i-kotlov.html>.
3. Електроенергетика и охрана окружающей среды. Функционирование энергетики в современном мире URL: <http://energetika.in.ua/ru/books/book-5/intro>
4. Профос П. Регулирование паросиловых установок. М.: Энергия, 1967. 368 с.
5. Нейронный процессор URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Нейронный_процессор.

6. Boiler Construction and Design. URL: www.marineinsight.com
7. Серов Е.П., Корольков Б.П. Динамика парогенераторов. М.: Энергия, 1972. 416с
8. Вентиляторный завод Укрвентсистемы URL: ukrvent.com/dn-12-5_dyamosos.html
9. Бураков, М.В. Нейронные сети и нейроконтроллеры. СПб.: ГУАП, 2013. 284 с.
10. Михайленко В.С., Ложечников В.Ф. Усовершенствование системы управления рециркуляцией дымовых газов судового вспомогательного котла. *Автоматизация судовых технических средств*. 2019. №.25. С. 53 – 62.
11. Mac type aux. boiler operation and maintenance instructions. URL: <https://ru.scribd.com/doc/219150052/Operation-and-Maintenance-1>.
12. Mikhailenko V.S. Kharchenko Yu. Analysis of traditional and neuro-fuzzy adaptive system of controlling the primary steam temperature in the direct flow steam generators in TPS. *Automatic Control and Computer Sciences*, 2014, V. 48, No. 6, P. 334–344.
13. Михайленко В.С. Харченко Р.Ю. Решение задач идентификации и управления температурным контуром системы охлаждения судового дизеля. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. 2017. №2 (17). С. 69-77.

MODELING THE PROCESS OF HAZARDOUS EMISSIONS FORMATION IN THE EXHAUST GASES OF SHIP'S STEAM BOILERS

V.S. Mikhailenko¹, V.A. Shcherbinin¹, V.V. Leshchenko¹, R.Yu. Kharchenk¹,
N.V. Lozhechnikova²

¹NU "Odessa Maritime Academy", Odessa, Ukraine, 8, Didrikhson str., Odessa, 65029, Ukraine, e-mail: romannn30@gmail.com

²Odessa National Polytechnic University, Shevchenko ave., 1, Odessa, Ukraine; e-mail: fontan.lev@gmail.com

In view of the tightening of the requirements of the International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, in particular, the Regulation on the Prevention of Air Pollution from Ships, it becomes urgent to introduce new methods for monitoring and limiting the concentration of harmful emissions from ship units into the atmosphere. The NO_x content in the exhaust gases can be achieved by influencing the maximum combustion temperature provided by the introduction of recirculation gases. Flue gases with a temperature of 300-400 ° C are selected in front of the air heater and recirculation smoke extractors and fed into the furnace. As a result, the maximum temperature in the furnace is reduced by 120-130 ° C and the oxygen concentration in the combustion zone decreases, which also reduces the formation of fuel NO_x. The efficiency of the steam boiler is reduced relatively little (0.01-0.03% per 1% of recirculation gases). The efficiency of suppression of the formation of nitrogen oxides during the introduction of recirculation gases is determined by the following factors: the place of selection of gases for recirculation; the conditions of their introduction into the furnace; the degree of recycling r,%; distribution of recirculation gases by the volume of the combustion chamber; boiler condition. The study of methods for reducing the concentration of NO_x in the exhaust gases of ship steam boilers. The modern scientific approaches in the field of reducing harmful emissions are

considered, in particular, their advantages and disadvantages are indicated. A method is proposed that implements a neural network algorithm in a flue gas recirculation control system, which is characterized by the ability to minimize the content of NO_x values when a ship's boiler is operating at different thermal loads.

Comparative modeling of the proposed neural network ACS and traditional ACS of the flue gas recirculation process when a ship's boiler is operating at 50% load has shown the advantage of a neural network control system trained to achieve the lowest possible content of harmful emissions in the atmosphere.

Keywords: harmful emissions, ship drum water-tube steam boiler, neural network algorithm, flue gas recirculation control system, heat load.