

Усовершенствование системы управления рециркуляцией дымовых газов судового вспомогательного котла

Михайленко В.С.¹, Ложечников В.Ф.²
НУ «Одесская морская академия», Одесса, Украина¹
Одесский национальный политехнический университет²
vladmihailen@gmail.com¹, fontan@optima.com.ua²

Improvement of the flue gas recirculation control system of the ship auxiliary boiler

Vladislav Mikhailenko¹, Vadim Lozhechnikov²
NU "Odessa Maritime Academy", Odessa, Ukraine¹
Odessa National Polytechnic University, Odessa, Ukraine²
vladmihailen@gmail.com¹, fontan@optima.com.ua²

Анотація - Пропонується ефективний алгоритм нейромережі для системи управління рециркуляцією димових газів судового допоміжного котла для зниження вмісту NO_x у вихідних газах.

Abstract - An efficient neural network algorithm is offered for the flue gas recirculation control system of a ship auxiliary boiler to reduce the NO_x content in the exhaust gases.

DOI: 10.31653/1819-3293-2019-1-25-53-62

Известно, что с 1 января 2020 года Международная морская организация (ИМО) ужесточает нормы максимального содержания серы в морском топливе (бункерном мазуте) с 3,5 до 0,5 % с целью позитивного воздействия на окружающую природную среду [1]. Эти нормы ставят перед судоходными компаниями ряд новых задач по поиску и внедрению на судах оптимальных технологий (в плане цена – эффективность), направленных на снижение содержания вредных выбросов.

В настоящее время действует целый ряд подходов по уменьшению концентрации NO_x в дымовых газах оборудования СЭУ: первичные методы, заключающиеся в подавлении образования NO_x в топках котлов или камерах сгорания дизелей и вторичные методы снижения выбросов NO_x, заключающиеся в обработке дымовых газов после котла

или дизеля [2]. Несмотря на большой объем выполненных исследований, большинство работ направлено на снижение выбросов оксидов азота методами селективного каталитического и некаталитического восстановления оксидов азота [2]. Указанные методы хотя и обеспечивают высокую степень очистки дымовых газов, но при этом связаны со значительными финансовыми затратами и основаны на использовании опасных химических реагентов. Также по данным [1] скрубберы установлены на более чем на 1 % от общего числа судов, и отраслевые аналитики предсказывают, что к 2020 году их число вряд ли превысит 10 – 20 %. Поэтому проблема разработки и внедрения на судах новых, экономически относительно недорогих и экологически эффективных методов очистки отработавших газов судовых дизелей и котлов от оксидов азота и серы является актуальной.

Известно, что снижение образования NO_x может быть достигнуто путем воздействия на максимальную температуру горения, что обеспечивается вводом газов рециркуляции. Дымовые газы с температурой 300 – 400 °С отбираются перед воздухоподогревателем и рециркуляционным дымососом и подаются в топочную камеру. В результате максимальная температура в топке снижается на 120 ... 130 °С и падает концентрация кислорода в зоне горения, что также уменьшает образование топливных NO_x . При этом КПД парового котла снижается сравнительно мало (0,01 – 0,03 % на 1 % рециркулирующих газов) [3].

Эффективность подавления образования оксидов азота при вводе газов рециркуляции определяется следующими факторами: место отбора газов на рециркуляцию; условиями их ввода в топочную камеру; степенью рециркуляции r , %; распределением газов рециркуляции по объему топочной камеры; состоянием котла.

Существует несколько способов ввода газов рециркуляции в топку (рис. 1):

- в под (нижнюю часть) топки (процесс 1);
- в шлиц под горелками (процесс 2);
- в воздухопровод горячего воздуха (процесс 3);
- непосредственно в горелочное устройство в один из воздушных потоков или между потоками воздуха (процесс 4);
- в поток топлива на горелку (процесс 5);.

Как показано на рис. 1 эффективность снижения выбросов оксида азота при реализации представленных способов существенно различается.

Применение рециркуляции является одним из самых доступных и недорогих средств снижения образования оксида азота в топочных камерах агрегатов СЭУ. В ряде случаев, снижение выброса оксидов

азота в эксплуатационных условиях на 30 – 35 % можно обеспечить без какой-либо реконструкции. Так, в исследованиях ВТИ [3], проведенных при сжигании мазута в промышленном парогенераторе ТГМП-114 с прямоточными горелками, такое снижение достигалось даже при подаче рециркулирующих газов с $r=23\%$ при $T=350\text{ }^{\circ}\text{C}$ через шлицы, расположенные под каждой горелкой при номинальной и 58 %-й нагрузках.

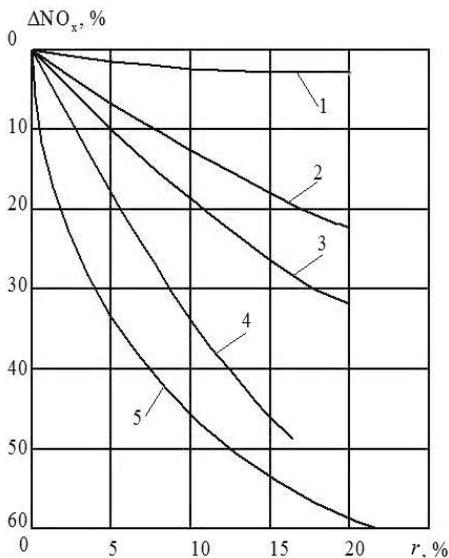


Рис. 1. Влияние способа ввода газов рециркуляции на снижение концентрации оксидов азота при сжигании топлива

Эффективность рециркуляции тем больше, чем выше температура в зоне горения. Она снижается при:

- уменьшении нагрузки котла;
- уменьшении температуры горения топлива;
- увеличении коэффициента избытка воздуха;
- повышении содержания азотосодержащих соединений в топливе.

Технически возможно обеспечить рециркуляцию и без специального рециркуляционного дымососа. Для этого в дымоходе котла вблизи дымососа устанавливается специальный шибер, позволяющий регулируемо отбирать около 20 % дымовых газов и направлять их на вход дутьевого вентилятора [3]. Использование данных технологиче-

ских решений, направленных на снижение вредных выбросов, представляется перспективным направлением и в агрегатах СЭУ.

С целью апробации представленной технологии снижения содержания вредных выбросов, проведено моделирование САУ рециркуляцией дымовых газов в воздуховод парового котла (рис. 2). Исследуемым структурным элементом математической модели котла является газоздушный тракт, который состоит из газохода и воздуховода. Регулируемыми параметрами для этого участка являются разрежение дымовых газов в верхней части топочной камеры и избыток воздуха, характеризующий экономичность процесса горения.

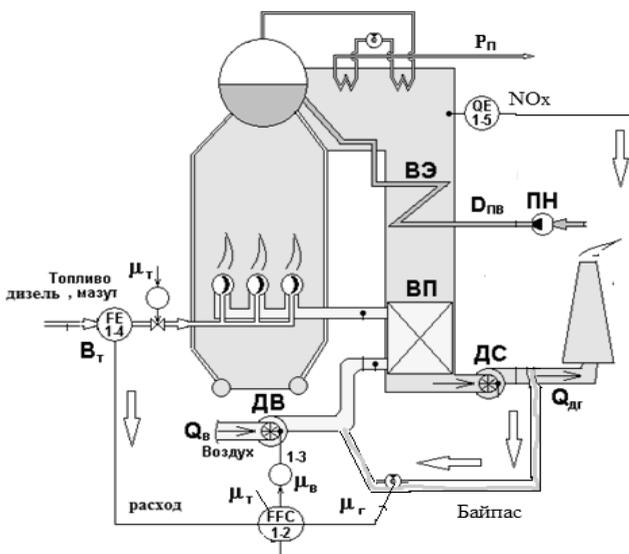


Рис. 2. Схема системы нейросетевой системы управления процессом рециркуляции дымовых газов парогенератора марки Mitsubishi Marin Main Boiler MB паропроизводительностью 50 т/ч: ДС – дымосос; ДВ – дутьевой вентилятор; ВП – воздушный подогреватель; ВЭ – водяной экономайзер; ПН – питательный насос; QE – газоанализатор; FFC – регулятор рециркуляции; FE – расходомер; μ – управляющие воздействия

При выводе дифференциальных уравнений газохода и воздуховода, как участков регулирования, были приняты следующие допущения: газоход после дымососа и воздуховод после дутьевого вентилятора очень короткие и обратная реакция давления в топке на расход

мазута и воздуха на входе пренебрежимо мала; аккумулирующая емкость топки и газоходов сосредоточена в одном объеме, а дроселирующая способность газоходов и поверхностей нагрева сосредоточена в одной точке. Регулирование осуществляется путем изменения положения направляющего аппарата дымососа и дутьевого вентилятора. С учетом перечисленных допущений регулируемые участки могут быть заменены упрощенной системой, состоящей из емкости, дросселя и дымососа (дутьевого вентилятора).

Регулируемой величиной является отклонение давления в рециркуляционном газоходе от заданного значения ΔP_p ; входной величиной (регулирующим воздействием) – изменение положения направляющего аппарата дымососа $\Delta \varphi_\Gamma$. В качестве внешнего возмущения примем изменение расхода уходящих газов на притоке ΔM . Таким образом, уравнение динамики имеет следующий вид [4]:

$$T_1^{21} \Delta \dot{P}_p + \Delta P_p = k_2^{21} \Delta \varphi_\Gamma + k_4^{21} \Delta M, \quad (1)$$

где

$$T_1^{21} = (a_L^\Gamma - a_p^\Gamma) \frac{m_\Gamma}{\bar{P}_\Gamma} \alpha; \quad k_2^{21} = -b_p^\Gamma; \quad k_4^{21} = a_L^\Gamma - a_p^\Gamma;$$

k_i^n и T_i^n – коэффициенты, принимающие постоянное значение в заданном режиме функционирования котла (n – соответствует номеру дифференциального уравнения, i – порядковый номер коэффициента); m_Γ – масса дымовых газов в газоходе котла в стационарном режиме работы, кг; \bar{P}_Γ – давление дымовых газов в верхней части топочной камеры, Па; $a_p^\Gamma, a_L^\Gamma, b_p^\Gamma$ – определяются графически по расходным характеристикам газохода и дымососа.

Динамические свойства воздуховода, определяющие зависимость между изменением подачи воздуха в топку котла и положением направляющего аппарата дутьевого вентилятора $\Delta \varphi_B$, описываются уравнением вида [4]:

$$T_2^{22} \Delta \ddot{M}_L + T_1^{22} \Delta \dot{M}_L + \Delta M_L = k_1^{22} \Delta \varphi_B + k_2^{22} \Delta \varphi_B, \quad (2)$$

где

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

$$k_1^{22} = \frac{b_P^B a_L^B}{a_L^B - a_P^B} \left(\frac{m_B}{\bar{P}_B} \alpha \right); \quad k_2^{22} = \frac{b_P^B}{a_L^B - a_P^B};$$

ΔM_L – изменение расхода воздуха; m_B – масса дымовых газов в воздуховоде котла в стационарном режиме работы, кг; \bar{P}_B – среднее значение давления воздуха в воздуховоде, Па; a_P^B, a_L^B, b_P^B – определяются графически по расходным характеристикам воздуховода и дутьевого вентилятора; α – коэффициент избытка воздуха.

Исходные данные для расчета коэффициентов дифференциальных уравнений (1) и (2) определялись по напорным характеристикам центробежного дымососа одностороннего всасывания ДН-12,5 [7] и гидравлической характеристике газохода газо-мазутного барабанного котла ГМ-50 (аналог судовых вспомогательных котлов средней мощности) и представлены в [4]:

$$m_G = 87,1 \text{ кг}; \quad \bar{P}_G = 1,01 \cdot 10^5 \text{ Па}; \quad \alpha = 1,15; \quad a_L^G = 2 \cdot k \cdot \bar{Q}; \quad a_P^G = \frac{\Delta H_M}{\Delta Q};$$

$$k = \frac{H_P^{PP} - H_{\text{пост}}}{Q_P^2}; \quad k = \frac{355 - 12}{84000^2} = 0,0429 \cdot 10^{-6} \text{ мм вод.ст.} \cdot \text{ч}^2 / \text{м}^6;$$

$$a_L^G = 2 \cdot 0,0429 \cdot 10^{-6} \cdot 87,4 \cdot 10^3 = 7,5 \cdot 10^{-3} \text{ мм вод.ст.} \cdot \text{ч} / \text{м}^3 = 353 \text{ Па} \cdot \text{с} / \text{кг};$$

$$a_P^G = \frac{30,8}{-7,4 \cdot 10^3} = -4,16 \cdot 10^{-3} \text{ мм вод.ст.} \cdot \text{ч} / \text{м}^3 = -196 \text{ Па} \cdot \text{с} / \text{кг};$$

$$b_P^G = \frac{\Delta H_\Phi}{\Delta \Phi}; \quad b_P^G = \frac{92,3}{20} = 4,62 \text{ мм вод.ст.} / \% = 45,3 \text{ Па} / \%;$$

$$a_P^G = -196 \text{ Па} \cdot \text{с} / \text{кг}; \quad a_L^G = 353 \text{ Па} \cdot \text{с} / \text{кг}; \quad b_P^G = 45,3 \text{ Па} / \%;$$

$$T_1^{21} = (353 - (-196)) \frac{87,1}{1,01 \cdot 10^5} \cdot 0,9 = 0,425 \text{ с};$$

$$k_2^{21} = -45,3 \text{ Па} / \%; \quad k_4^{21} = 353 - 196 = 197 \text{ Па} \cdot \text{с} / \text{кг}.$$

После подстановки коэффициентов в уравнение (1) и выполнения преобразования Лапласа получены передаточные функции по каналам управления $W(s)_{\mu-p}$ (изменение положение направляющего аппарата – изменение давления дымовых газов) и возмущения $W(s)_{M-p}$ (изменение расхода уходящих газов – изменение рециркуляционного давления в газоходе):

$$W(s)_{\mu-p} = \frac{-45,3}{(0,43s + 1)}; \quad W(s)_{M-p} = \frac{197}{(0,43s + 1)}.$$

Ввиду наличия нелинейностей в системе управления предлагается вместо стандартного линейного ПИД-регулятора воспользоваться адаптивным нейросетевым регулятором. Реализация нейросетевого регулятора (FFC) (см. рис. 2) может быть выполнена на базе нейрочипа CM1K фирмы The CogniMem Technologies. Данный чип содержит 1024 нейрона, работающих параллельно. При необходимости увеличения количества нейронов в сети, имеется возможность установить модуль СМЕ1К с двумя нейрочипами СМК1. Также рассмотренные чипы позволяют нарастить сеть до 8192 нейронов, путем соединения четырех таких модулей. Связь с микроконтроллером по компьютеру осуществляется по последовательной шине I2C (400 кбит/с) [5].

Для моделирования нейросетевой САУ рециркуляции на основе экспериментальных [6] и расчетных данных была составлена обучающая выборка коррекции коэффициента избытка воздуха α в зависимости от паровой нагрузки котла (табл.) для достижения минимально возможного значения NO_x . Обучающая выборка ИНС состояла из матрицы входных сигналов (оптимальное управляющее воздействие адаптивно настроенного ПИД-регулятора для поддержания заданного давления уходящих газов в контуре рециркуляции или байпаса) и матрицы соответствующих выходных сигналов (значений NO_x). Следует отметить, что положение направляющего аппарата (см. рис. 2) напрямую влияет на давление газов в байпасае и соответственно определяет текущее значение NO_x . Схема обучения нейронной сети, являющейся ключевым механизмом работы адаптивной нейросетевой системы оптимального управления процессом рециркуляции, приведена на рис. 3, а программное окно обучения ИНС – на рис. 4. С учетом простоты и наличия библиотеки элементов ИНС, для обучения нейросетевого контроллера (НСК) были использованы специализированные программные редакторы в пакете MatLab [8], реализующие методы эталонного управления и действующие на основе алгоритма обучения – обратного распространения ошибки [8]. Нейроны первого слоя имеют активационную функцию – гиперболический тангенс, а у нейронов второго слоя активационные функции линейные (см. рис. 4).

Предложенная нейросетевая САУ кроме поддержания максимально возможного КПД судового котла в зависимости от нагрузки и коэффициента избытка воздуха, минимизирует содержание NO_x в уходящих газах (рис. 5).

Моделирование предлагаемой нейросетевой САУ и традиционной САУ процесса рециркуляции дымовых газов при работе судового котла с 25 % нагрузкой показало преимущество нейросетевой систе-

мы управления, обученной на достижение минимально возможного содержания вредных выбросов в атмосфере.

Таблица

Обучающая выборка для НСК оптимального режима горения топлива по критериям минимизации NO_x и достижения максимально возможного КПД котла

Нагрузка котла, %	10	30	50	70	90
α	1,1	1,18	1,21	1,25	1,32
$NO_x * 100$, мг/м ³	1	4	6	7,8	8,3

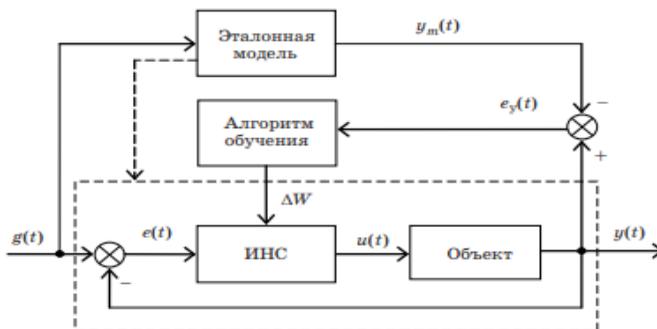


Рис. 3. Схема обучения нейросетевой системы управления (НСУ): ΔW – весовые коэффициенты; $y(t)$ – регулируемый выходной параметр; $g(t)$ – задание; $e(t)$ – ошибка; $y_m(t)$ – эталонный (модельный) выходной параметр (содержание NO_x); $e_y(t)$ – ошибка алгоритма обучения; ИНС – искусственная нейронная сеть (регулятор)

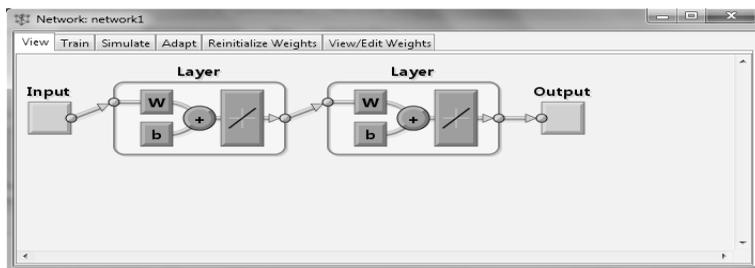


Рис. 4. Окно обучения ИНС в программе NNtool (MatLab)

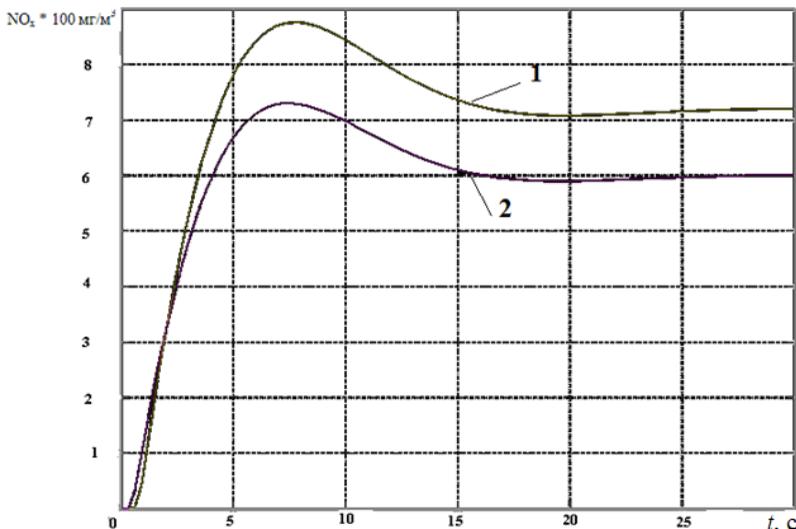


Рис. 5. Переходные процессы регулирования содержания NO_x в уходящих газах судового котла: 1 – традиционная САУ с ПИД-регулятором ($\alpha = 1,3$); 2- нейросетевая САУ ($\alpha = 1,15$) при нагрузке котла 0,25 от номинальной

Сравнительный анализ переходных процессов САУ (см. рис. 5) продемонстрировал уменьшение содержания NO_x на 14 % по сравнению с типовой системой управления с ПИД-регулятором. Таким образом, использование предлагаемой структуры управления представляется перспективной для внедрения на судах.

ЛИТЕРАТУРА REFERENCES

1. ИМО 2020 – перспективы судоходной отрасли и нефтеперерабатывающих заводов [Электронный ресурс]. Режим доступа: <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 ... канд. тех. наук. – Новороссийск: ГМУ им. Ф.Ф. Ушакова, 2013. // <http://www.dslib.net/sudovenergoustanki/snizhenie-vybrosov-oksidv-azota-s-otrabotavshimi-gazami-sudovyh-dizelej-i-kotlov.html>.

3. Электроэнергетика и охрана окружающей среды. Функционирование энергетики в современном мире [Электронный ресурс]. <http://energetika.in.ua/ru/books/book-5/intro>

4. Профос П. Регулирование паросиловых установок. – М.: Энергия, 1967. – 368 с.

5. Нейронный процессор. [Электронной ресурс]. Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Нейронный_процессор

6. Boiler Construction and Design. [Электронной ресурс]. Режим доступа: www.marineinsight.com

7. Вентиляторный завод Укрвентсистемы. [Электронной ресурс]. Режим доступа: http://ukrvent.com/dn-12-5_dymosos-html/

8. Бураков М.В. Нейронные сети и нейроконтроллеры: учеб. пособие. – СПб.: ГУАП, 2013. – 284 с.