УДК 621.18: 662.767
DOI https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.3/23

Серт І.В.
Державний університет «Одеська політехніка»

Беглов К.В.
Державний університет «Одеська політехніка»

МОДЕЛЬ СПАЛЮВАННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ ЗМІННОГО СКЛАДУ В КОТЛІ

Автоматизація є невід'ємною частиною життя сучасного суспільства. Оскільки ми живемо в епоху інформатизації та великих обсягів виробництва на підприємствах, то виникає потреба у скороченні часу праці виробництва з метою підвищення вигоди підприємства.

Є багато різних способів підвищення якості праці (від кваліфікування персоналу до закупівлі новітнього обладнання та розробки рішень, які виявляються в процесі виробництва). Хоча вже існує багато технічних рішень вирішення виробничих проблем, проте з кожним днем виникають нові проблеми, для яких належить розробляти нові методики вирішення. Виробництво електроенергії є важливою ланкою у сфері виробництва для потреб суспільства через значну потребу.

І скільки б не існувало методів вирішення проблем, які є у теплоенергетиці, актуальним нині залишається виявлення та своєчасне налаштування системи під час зміни вхідного складу палива через перехід котлів на нові види, тому робота присвячена саме з'ясуванню цього.

За розрахунками були отримані вихідні дані для створення передавальних функцій, за допомогою них побудована АСР (автоматична система регулювання), зняті показники кривих розгону та налаштовані балансувальний і коригувальний регулятори, а також лінійні та нелінійні об'єкти систем, проведено синтез цих моделей для порівняння їх роботи та ефективності.

Проаналізовано перехідні процеси цих моделей із метою з'ясування ефективності додавання нелінійної моделі спалювання газоподібного палива для виявлення складу палива. Результат моделювання цих моделей дав змогу визначити, що у разі незначних відхилень від номінальної величини витрати палива та його складу обидві системи працюють майже однаково.

З'ясовано, що внаслідок значних змін витрати палива (близько 50% від номінального значення) та/або зміни його складу штатна система регулювання не забезпечує необхідної якості перехідних процесів.

Ключові слова: *нелінійна модель, концентрація димових газів, котел, склад димових газів, склад палива.*

Постановка проблеми. Нині залишається актуальним питання з'ясування складу димових газів на виході з котла. Раніше, коли як газоподібне паливо використовували природний газ та його склад був незмінним, потреби у нелінійній моделі, яка буде розглянута у роботі, не було.

Найбільшою проблемою є те, що не можна заздалегідь знати, скільки треба виділити повітря для спалювання газоподібного палива зі змінним складом, а це може змінювати аеродинаміку котла у гірший бік, що збільшить потрібну кількість спалювання (витрати) палива для певної потужності котла, а це є небажаним явищем під час вироблення електроенергії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Хоча вже було неодноразово проведено дослідження у сфері енергетики щодо з'ясування складу хімічних сполучень, однак під час спалювання природного палива використовували лінійну модель, яка була більш простою у застосуванні, але вона не дозволяла заздалегідь з'ясувати склад палива, тому саме виникнення нелінійної моделі уможливило використання різноманітнішого газоподібного палива.

Нами проаналізовано попередні роботи [1, с. 44–52], де розглянуто процес спалювання несертифікованого палива, а саме нафтопродукту, на відміну від того, де розглядається біогаз ([2, с. 32–36]) та те, як можна зменшити кількість продуктів згоряння з використанням альтернативних горючих газів, а також визначення складу вуглеводневого пального досліджено у роботі [3, с. 51–59].

У роботі [4, с. 127–136] запропоновано визначення палива зі змінним складом за допомогою методу, заснованого на рівнянні хімічної термодинаміки, а у роботі [5, с. 90] використано метод оптимального розподілення теплового навантаження між одиницями обладнання зі змінною калорійністю.

Постановка завдання. Мета статті – дослідити, як буде змінюватися концентрація кисню у вихідних

димових газах за умов зміни складу палива. Задля розрахунку змінного складу палива потрібно створити нелінійну модель спалювання газу (для підтримання системою оптимального процесу горіння).

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

− на основі відомих математичних моделей побудувати нову математичну модель спалювання газу в топці котла з можливістю зміни складу палива в процесі моделювання. Нова модель ураховує зміни коефіцієнта надлишку повітря (α) залежно від складу палива, а не тільки зміни його витрати;

− провести верифікацію, побудованої математичної моделі за відомих початкових умов, тобто за умови, коли склад палива є незмінним;

− проаналізувати, як штатна система регулювання компенсує зміну складу палива.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для регулювання відомою є лінійна математична модель об'єкта котла, наведена у формулах (1), (2), (3) та 4, які були взяті з [6, с. 73–74]. На прикладі розрахунку котла КВГМ-50 взяті значення у формулах (1, 2, 3, 4) та отримані значення об'єкта, наведені у передавальній функції (5). Динамічні властивості лінійного та нелінійного об'єктів є однаковими та з'ясовуються геометричними характеристиками котла. У статті розглянуто саме нелінійну модель спалювання палива. Уважається, що коефіцієнт α є сталим для лінійної моделі, проте через зміну складу палива та димових газів цей коефіцієнт буде розрахований. Наше нововведення полягає у тому, що коефіцієнт V_0 та α (1) буде розраховано у процесі роботи об'єкта, завдяки чому отримано графіки концентрації складових частин у димових газах (рис. 4). Ми досліджуємо поведінку лінійної і нелінійної моделі для однакових витрат, перехідні процеси яких зображені на рис. 5 і рис. 6.

$$\left.\begin{aligned} Q_L &= \alpha * V_0 * Q_\Gamma \\ \frac{C_{O_2}}{21} + \frac{C_{CO_2}}{K} &= 1 \\ \alpha &= \frac{K}{C_{CO_2}} \end{aligned}\right\} \quad (1)$$

$$\left.\begin{aligned} C_{O_2} &= 21 - \frac{21}{\alpha}; \\ \alpha &= \frac{Q_L}{V_0 Q_B}. \end{aligned}\right\} \quad (2)$$

де r_{O_2} – об'ємна частка кисню в повітрі.

Після лінеаризації отримаємо:

$$\Delta C_{O_2} = \frac{21}{\bar{Q}_L \bar{\alpha}} \Delta Q_L - \frac{21}{\bar{Q}_B \bar{\alpha}} \Delta Q_B. \quad (3)$$

де, Q_Γ – витрата димових газів;

Q_L – витрата повітря;

C_{O_2}, C_{CO_2} – концентрація кисню вуглекислого газу;

K – максимально теоретична досяжна концентрація CO_2 для заданого палива.

V_0 – теоретично необхідна витрата повітря для згорання одиниці палива м^3/м^3.

$$V_0 = \frac{1}{r_{O_2}}\left[0.5CO_2 + 0.5H_2 + 2CH_4 + 1.5H_2S + \sum\left(m + \frac{n}{4}\right)C_m H_n - O_2\right] \quad (4)$$

$$W(S) = \frac{1}{T_2^2 + T_1 S + 1} e^{\tau_3 s} \quad (5)$$

Коли котел розраховано на один вид палива і працює в одному режимі, то потреба у системі регулювання майже зникає (через простоту регулювання роботи котла). Під час зміни складу палива та складу димових газів виникають певні проблеми у вигляді зменшення ефективності вироблення енергії, збільшення споживання палива, неправильного розподілення між котлами для потрібного навантаження та налаштування динамічних та статичних характеристик котлу, через що зменшується показник ккд.

Саме тому введено нелінійний об'єкт лінійної моделі спалювання несертифікованого палива, що показано на рис. 2. З'ясовано вхідний склад біогазу та його сполучень за умов різного коефіцієнта збитку повітря α. У таблиці 1 представлено отримані сполучення за умов складу біогазу ($CH_4 - 55\%$; $CO_2 - 40\%$; $H_2S - 3\%$; $CO - 1\%$; $H_2 - 1\%$).

У системі застосовувалася схема недопалу α>0 та перепалу α<0 палива, що зображено на рис. 3, де α – коефіцієнт надлишку повітря. Можна чітко простежити, що у разі недопалу палива сполучень немає, а за умов перепалу палива змістова концентрація водню та чадного газу зникає, що свідчить про правильні розрахунки цих сполучень.

Для порівняння цих моделей здійснено синтез їх АСР, який зображений на рис. 2.

де zadanie – завдання регулятору;

IPO1, IPO2 – уміст кисню, %;

S-dP1, S-dP2 – властивості об'єкта за каналом «хід регулювального органу – витрата повітря»;

V_0 – теоретично необхідний об'єм кисню, $м^3 / м^3$;

V_f – кількість палива, м^3/с;

V_A – стехіометрична витрата повітря, $м^3 / м^3$;

Air Flow – витрата кисню, $м^3 / м^3$;

Object_nonlin – лінійний об'єкт;

Object_lin – лінійний об'єкт.

Щоб з'ясувати, як змінюється склад димових газів на виході, було збільшено витрату палива та змінено його склад. На графіках перехідних процесів показано, що у разі невеликих збурень нелінійна модель працює майже так, як і

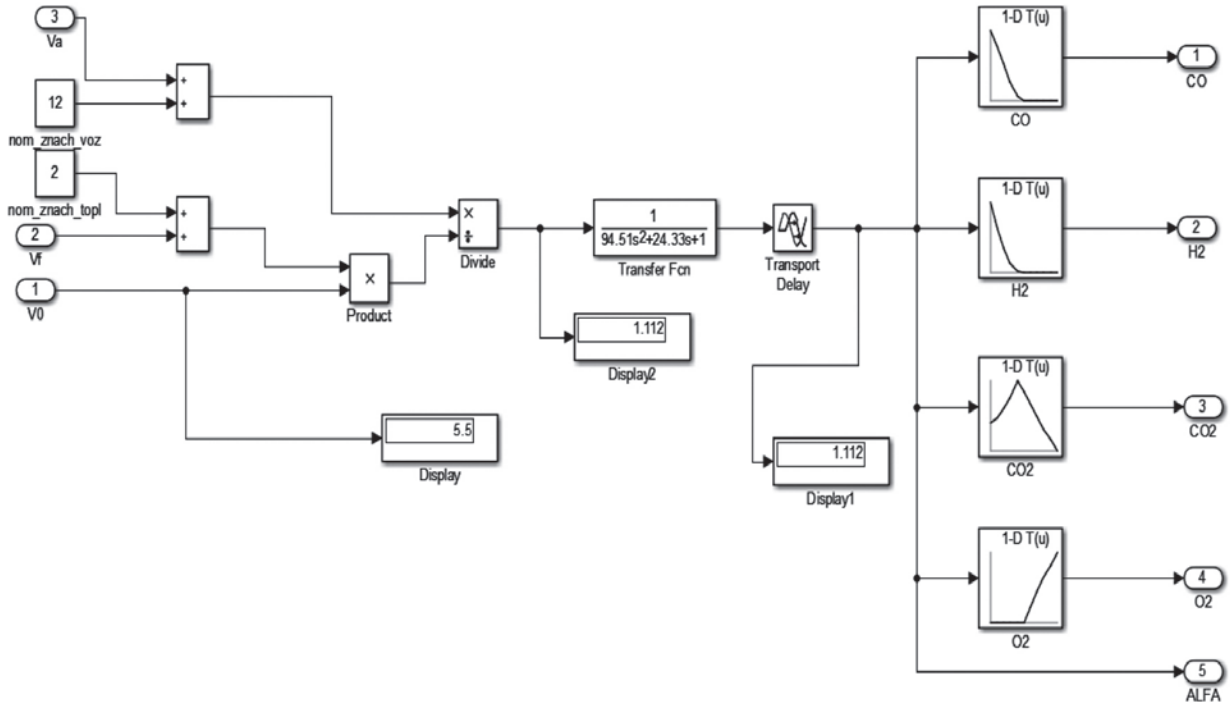

Рис. 1. Нелінійна модель об'єкта керування
де, CO, H_2, CO_2, O_2 – складники димових газів, які залежать від α

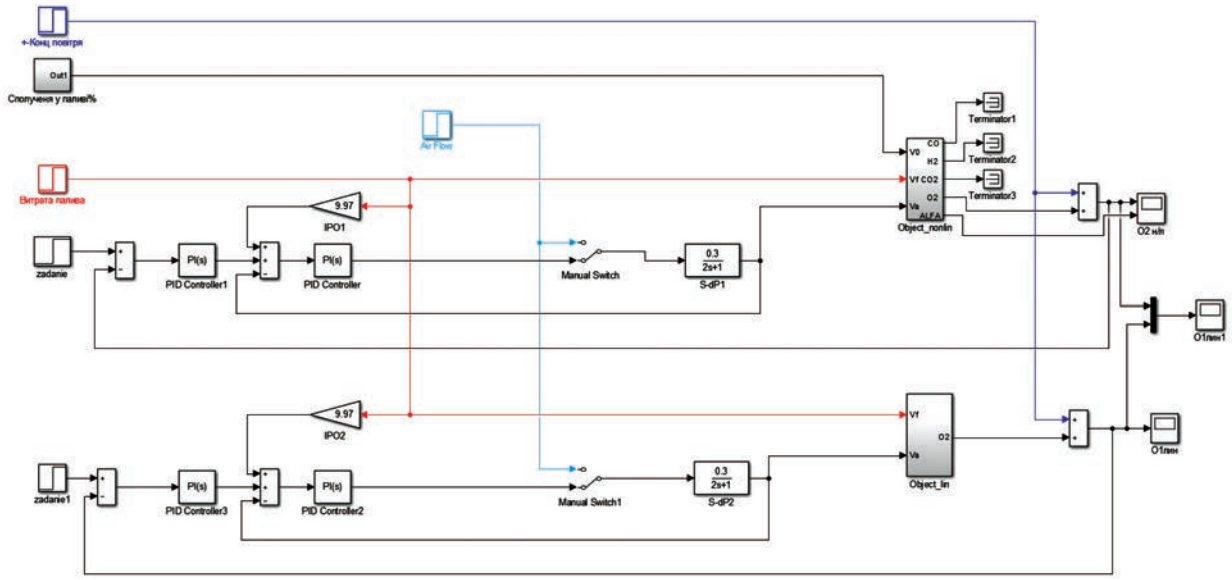

Рис. 2. Синтез лінійної АСР (знизу) та нелінійної (зверху) моделі спалювання газоподібного палива

Таблиця 1

Відсоткові сполучення у біогазі залежно від α

α	0,8	0,84	0,88	0,92	0,96	1	1,04	1,08	1,12	1,16	1,2
R_{CO}	0,0328	0,0256	0,0176	0,0085	0,0021	0	0	0	0	0	0
R_{H_2}	0,0311	0,0201	0,011	0,004	0,0006	0	0	0	0	0	0
R_{O_2}	0	0	0	0	0	0	0,0068	0,0132	0,0192	0,0248	0,0301

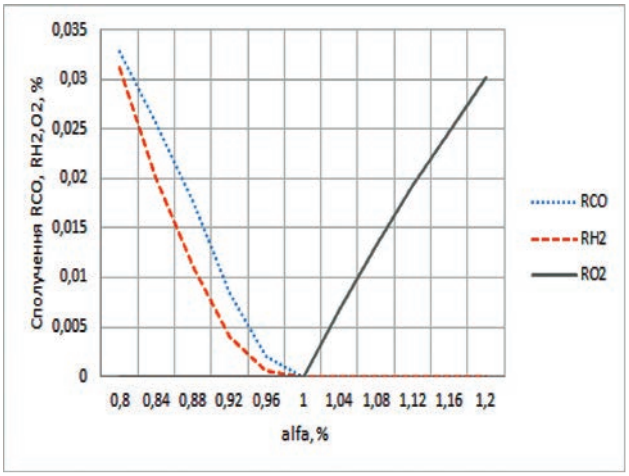

Рис. 3. Залежність кисню, водню та чадного газу від коефіцієнта α

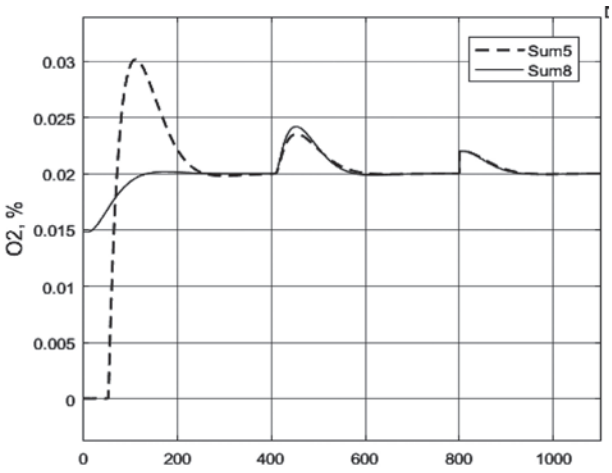

Рис. 4. Порівняння роботи нелінійної (sum5) та лінійної (sum6) систем за умов малих збурень (0,1 м^3/г від номіналу) витрати палива й однакового складу палива

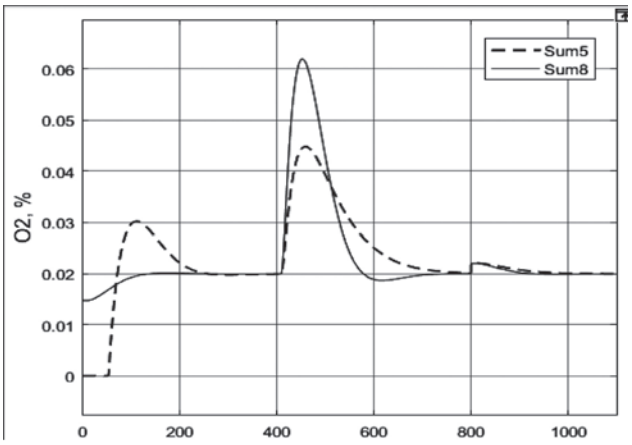

Рис. 5. Порівняння роботи нелінійної (sum5) та лінійної (sum6) систем за умов глибоких збурень (1 м^3/г від номіналу) витрати палива й однакового складу палива

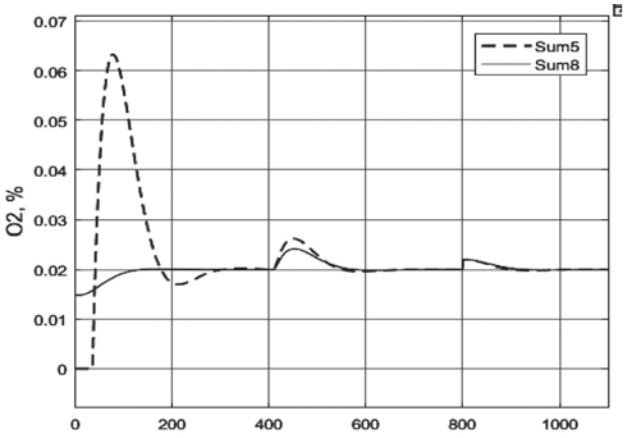

Рис. 6. Порівняння роботи нелінійної (sum5) та лінійної (sum8) систем за умов однакової витрати палива та різного складу

лінійна (рис. 4), проте якщо збурення більше запланованих (витрата палива, рис. 5) або збурення не є запланованими (зміна складу палива, рис. 6), вихідними складом палива був біогаз із таким складом: ($CH_4 - 55\%$; $CO_2 - 40\%$; $H_2S - 3\%$; $CO - 1\%$; $H_2 - 1\%$), після зміни складу – ($CH_4 - 36\%$; $CO_2 - 50\%$; $H_2S - 8\%$; $CO - 3\%$; $H_2 - 3\%$), то можна побачити, що лінійна система зразу здійснює регулювальний вплив на концентрацію кисню, на відміну від нелінійної, яка очікує зміну концентрації кисню на виході котла для цієї АСР, тому лінійна модель погано впорюється з ними.

Висновки. Отже, в цьому разі за допомогою використання прикладного пакета Mathlab Simulink побудовано синтез лінійної АСР із лінійним та нелінійним об'єктами. Отримано нову математичну модель після введення нелінійного об'єкта, яка враховує зміни коефіцієнта надлишку повітря (α) залежно від складу палива та димових газів, а не тільки зміни його витрати.

Після створення нелінійної моделі проведено верифікацію роботи цієї системи з лінійною моделлю у разі зміни витрати палива з малими та великими збуреннями.

А також проаналізовано, зважаючи на концентрацію кисню та менше відхилення від регульованої величини нелінійної моделі (порівняно з лінійною під час зміни складу палива), як штатна система реагує на це (порівняно з нелінійною). Отож, доцільно використовувати саме нелінійну модель. На основі цього умовиводу буде синтезовано новий регулятор для подальшого дослідження цієї теми.

Список літератури:

1. Maksimov M.V., Lozhechnikov V.F., Dobrovolskaya T.S., Bondarenko A.V., Mathematical model of noncertified burning fuels. East European journal of advanced technologies. 2014. Vol. 2. №8 (68). P. 44–52. URL: http://dspace.opu.ua/jspui/bitstream/123456789/6475/1/22420-40954-1-PB.pdf
2. Brunetkin O.I., Gorban S.O. Heat transfer optimization of heat exchange surfaces of boiler equipment with decrease in consumption of combustion products. Proceeding of the Odessa Polytechnic University. 2017. Vol. 3 (53). P. 32–36.
3. Brunetkin O.I., Demidenko V., The method of determining the composition of hydrocarbon fuel by the ratio of fuel and air consumption and temperature of combustion products. Odes'kyi Politechnichnyi Universytet Pratsi. 2019. Vol. 2(58). P. 51–59. URL: https://www.pratsi.opu.ua/articles/show/18440
4. Bondarenko A.V., Brunetkin O.I., Lysyuk A.V. Determining the quantitative composition of an unknown gaseous fuel and combustion products from the measured process parameters in the fuel combustion process. Odes'kyi Politechnichnyi Universytet Pratsi. 2014. Vol. 1(43). P. 127–136. URL: https://www.pratsi.opu.ua/articles/show/1073
5. Лысюк А.В., Беглов К.В. Оптимизация работы группы котельных агрегатов при сжигании несертифицированного топлива. Автоматика-2017: XXIV Міжнародна конференція з автоматичного управління (м. Київ, Україна, 13-15 вересня 2017 р.). Київ. 2017.
6. Демченко В.А. Автоматизация и моделирование технологических процессов АЭС и ТЭС. Одесса: Астропринт, 2001. 305 с.

Sert I.V., Beglov K.V. MODEL OF COMBUSTION OF NATURAL GAS COMPOSITION OF NATURAL GAS IN A BOILER

Automation is an integral part of modern society. As we live in an age of informatization and large volumes of production in enterprises, there is a need to reduce the working time of production in order to increase the benefits of the enterprise.

There are many different ways to improve the quality of work, from staff training, to the purchase of the latest equipment and the development of solutions that are identified during production. Although there are already many technical solutions to solve production problems, new problems arise every day, for which new methods of solving them should be developed. Electricity generation has an important link in the production of society's needs, due to its widespread need.

And no matter how many methods there are to solve the problems that exist in the heat industry, it is important today to identify and timely adjust the system when changing the fuel input, due to the transition of boilers to their new types, so the work is dedicated to this clarification.

As a result of calculations, the initial data for creation of transfer functions were received, by means of them ACS (automatic control system) was constructed, indicators of acceleration curves were removed and balancing and correcting regulators, and also linear and nonlinear objects of systems were adjusted. Subsequently, a synthesis of these models was performed to compare their performance and efficiency.

An analysis of the transients of these models was performed to determine the effectiveness of adding a nonlinear model of gaseous fuel combustion to determine the fuel composition. As a result of modeling these models, it was clear that with small deviations from the nominal value of fuel consumption and its composition, both systems work almost equally.

It was found that due to large changes in fuel consumption (about 50% of the nominal value) and / or changes in its composition, the standard control system does not provide the required quality of transients.

Key words: *nonlinear model, flue gas concentration, boiler, flue gas compositions, fuel composition.*