

Кучинська К.А.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Новіков П.В.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Волощук В.А.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Степанець О.В.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ КОНДЕНСАЦІЙНОГО КОТЛА ДЛЯ ПОБУДОВИ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА

У статті проведений аналіз динамічних характеристик конденсаційного котла при роботі на усіх можливих режимах експлуатації. Метою статті є отримання математичної моделі конденсаційного котла як об'єкту керування, що враховує зміни параметрів залежно від режиму роботи. Отримана модель планується використовуватися для побудови цифрового двійника конденсаційного котла в системі керування і аналізу ефективності функціонування обладнання. Наведена структурна схема складових цифрового двійника досліджуваного конденсаційного котла. Проведений аналіз останніх досліджень і публікацій щодо розробки математичних моделей конденсаційних котлів. Наведений опис технологічної схеми модульного конденсаційного котла. Побудована схема зв'язків вхід-вихід технологічного об'єкту керування. Математичні моделі у вигляді функцій передачі розроблено на основі експериментальних даних, які відображають роботу котла на усьому робочому діапазоні. Оцінювання точності отриманих моделей здійснено за середнє квадратичним критерієм. Проведено аналіз параметрів моделі на нелінійність залежно від режиму роботи об'єкта дослідження. Для деяких параметрів моделі, зокрема коефіцієнтів підсилення і часового запізнення, спостерігається суттєва зміна значень в залежності від режиму роботи котла, інші параметри практично не залежать від режиму роботи об'єкта. Для параметрів моделі, що залежать від режиму роботи конденсаційного котла, знайдено математичні залежності, які описують зміну цих параметрів в залежності від значень вхідних величин. Отримані залежності подані у вигляді як формул, так і просторових поверхонь для графічного представлення. Розроблена модель конденсаційного котла в подальшому буде використана для розробки цифрового двійника конденсаційного котла. Наведена структура цифрового двійника досліджуваного конденсаційного котла із зазначенням функцій компонентів системи.

Ключові слова: конденсаційний котел, динамічні характеристики, аналіз нелінійності параметрів, цифровий двійник, моделювання, математична модель.

Постановка проблеми. За різними оцінками приблизно 40 % котельно-підного палива України, а це в основному імпортований природний газ, спрямовується на теплозабезпечення населення [1]. Саме в теплозабезпечення населених пунктів сконцентровано суттєвий потенціал енергозаощадження та зниження негативного впливу підприємств комунального теплозабезпечення на довкілля.

Одним із досягнень сучасної опалювальної техніки є використання конденсаційної технології для підвищення ефективності опалювальних котлів [2]. Основна задача конденсаційної тех-

ніки – охолодити продукти згоряння нижче температури точки роси і відібрати теплоту конденсації водяної пари для використання її в корисних цілях. Відповідно, ефективна робота конденсаційного котла має місце лише при застосуванні низькотемпературних (низькоексергетичних) систем теплозабезпечення будинків із відповідними теплотехнічними характеристиками. Результати напрацювань, отриманих вітчизняними та зарубіжними вченими, доводять перспективність розвитку низькотемпературних (низькоексергетичних) систем теплозабезпечення будівель [3; 4].

Прорив у розвитку цифрових технологій (збільшення обчислювальних потужностей і зниження їх вартості) дає змогу об'єднати інформаційні технології з операційними процесами і створити так звані цифрові двійники фізичних об'єктів. Заснований на великому обсязі накопичених даних, отриманих в ході вимірювань цілого ряду показників за період експлуатації, та відповідних математичних і комп'ютерних моделях, цифровий двійник дає можливість більш точно оцінити та спрогнозувати поведінку об'єкту, швидше виявити можливі дефекти у ньому, обґрунтовано запропонувати технічні зміни і, як наслідок, підвищити ефективність відповідно до вибраних критеріїв [5].

Концептуально складовими цифрового двійника є дані, різноманітні моделі та сервісні інтерфейси (рис. 1). Цифровий двійник повинен містити дані про свою фізичну копію, тому що вони використовуються у моделях для відображення та оцінки стану і поведінки об'єкта. Дані можуть містити не лише технологічну інформацію від сенсорів та виконавчих механізмів, а й відомості впродовж всього життєвого циклу об'єкта – від проектування (конструкторські моделі, специфікації, технічні характеристики), процесу та специфіки реалізації (методи виробництва та дані

про контроль якості), експлуатації (конфігурації, режими роботи, поточні та архівні дані, відмітки про обслуговування) до процедури утилізації.

Для розуміння та прогнозування робочих станів і поведінки екземпляра об'єкта цифрова копія повинна включати в себе аналітичні або розрахункові моделі, а також моделі, які сприяють оцінці можливих впливів та прийняттю релевантних рішень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Висока ефективність конденсаційних котлів (ККД>90 %) та постійне всесвітнє зростання цін на паливо роблять їх все привабливішими для споживачів, не зважаючи на вищу вартість ніж у традиційних котлів [3]. Однак, досягнення високої ефективності конденсаційних котлів можливе лише при їх експлуатації в оптимальному режимі, що може забезпечити лише правильно підібрана, налаштована та впроваджена система автоматизації.

Традиційний підхід до створення класичної системи автоматизації передбачає наявність моделі об'єкта автоматизації. Модель може бути представлена у багатьох видах [6–8]. Розрахунок класичної системи автоматизованого керування вимагає функції передачі об'єкта керування. Для отримання цих функцій передачі необхідно мати розгінні характеристики об'єкта (реакцію на сту-

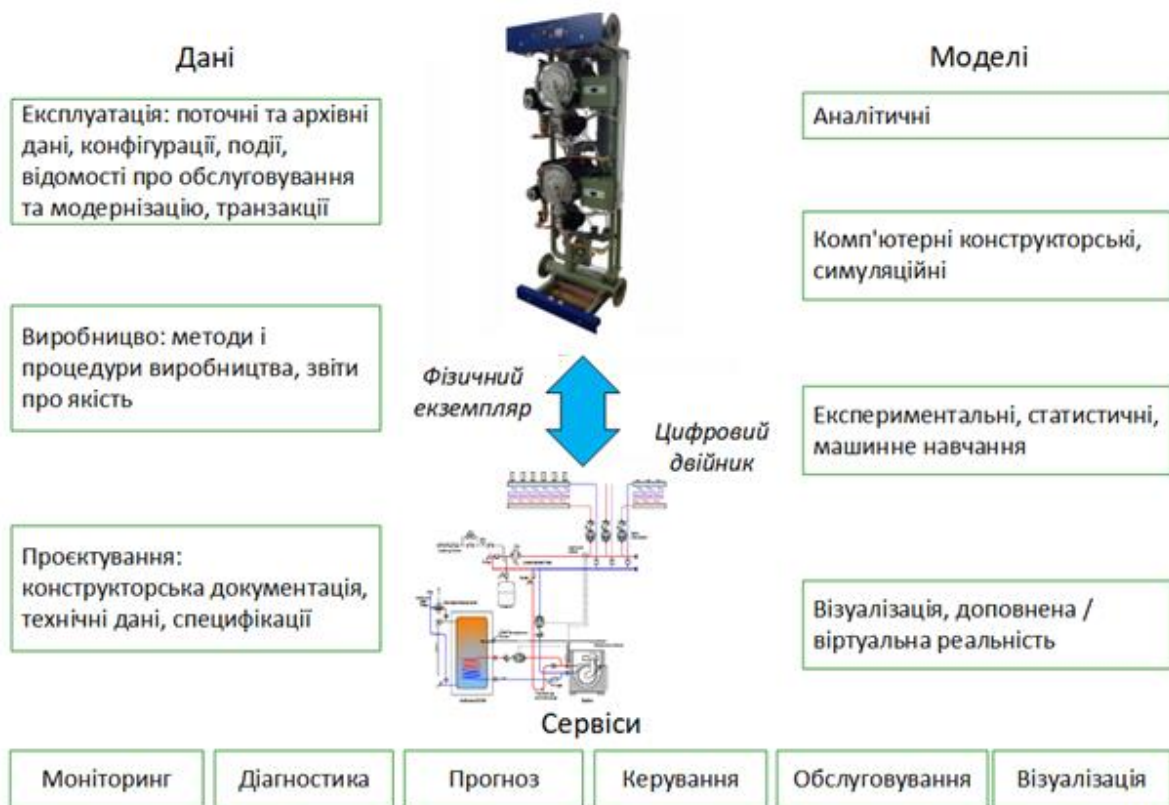


Рис. 1. Складові цифрового двійника

пінчасте збурення) і провести процедуру ідентифікації. Процедура ідентифікації складається з двох головних етапів: вибору структури функції передачі та підбору параметрів відповідно до обраного виду функції передачі. Існує багато аналітичних та графічних методів для ідентифікації параметрів об'єкту: метод логарифмування, метод дотичної, метод 2/3 та інші [9–11].

Постановка завдання. Метою статті є отримання математичної моделі конденсаційного котла як об'єкту керування, що враховує зміни параметрів залежно від режиму роботи. Для досягнення мети необхідно виконати наступні завдання: розробка моделі об'єкту керування, що враховує зміни параметрів залежно від режиму роботи котла; аналіз параметрів моделі на нелінійність.

Виклад основного матеріалу

Опис технологічного об'єкту управління

Модуль конденсаційного котла складається з двох паралельно підключених нагрівальних елементів (проточних водонагрівачів), які окремо розташовані одні над одним. На рис. 2 зображено технологічну схему модульного конденсаційного котла.

Кожен нагрівальний елемент має конденсаційний теплообмінник 1, в якому теплоносієм проходить через паралельно підключені спіральні трубчасті елементи, які утворюють камеру згорання.

У центрі камери згорання знаходиться газовий пальник типу «премікс» з електродами розпалювання і контролю полум'я. Перед згоранням на пальник подається попередньо приготована суміш газу з повітрям через газохід 2. Суміш подається за допомогою вентилятора 3, що має змінне число обертів, яке задається блоком керування в залежності від необхідної потужності, здійснюється так звана «модуляція полум'я», що регулюється в межах від 20 % до 100 % від номінальної потужності. Вентилятор всмоктує повітря через сопло, що зв'язане з газовим клапаном, який подає газ на вхід вентилятора у кількості, яка пропорційна кількості всмоктаного повітря. Відпрацьовані димові гази відводяться з камер згорання у димохід. У процесі згорання палива утворюється конденсат, який збирається у сифонах-конденсатозбірниках. Звідти конденсат потрапляє у загальну систему видалення конденсату, що монтується при складанні модулів у котельну установку.

Теплоносієм з колектора «зворотної» лінії системи опалення T2 (від споживача) рухається за допомогою циркуляційних насосів 4 через трубопроводи з датчиками потоку до теплообмін-

ника. Після проходження теплообмінника, де відбувається нагрівання теплоносія димовими газами, він надходить у подаючий колектор T1 (до споживача). Усі трубопроводи оснащені запірною арматурою, що дає можливість відключати окремі частини модуля від загальних колекторів для зручного обслуговування. Також зворотний на подаючий колектори закінчуються фланцями, що призначені для монтажу модуля в котельну установку.

Вздовж горизонтальної осі модуля проходить газовий колектор G1, який також закінчується приєднувальними фланцями, що дає можливість отримати загальний газовий колектор при об'єднанні декількох модулів в котельну установку.

Конденсаційний котел як об'єкт керування має два вихідних параметри:

- температура теплоносія, у даному випадку води, який надходить у подаючий колектор T1 (до споживача), надалі T_W_OUT;
- температура димових газів у димоході, надалі T_G_OUT.

Також конденсаційний котел як об'єкт керування має два основних вхідних параметри:

- кількість газу, що подається у пальник, надалі V_G_IN;

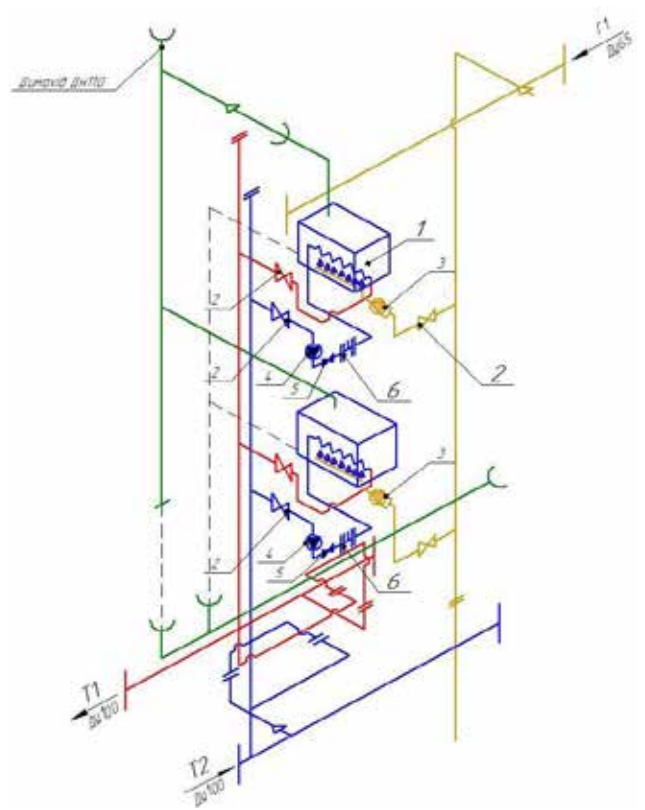


Рис. 2. Технологічна схема модульного конденсаційного котла

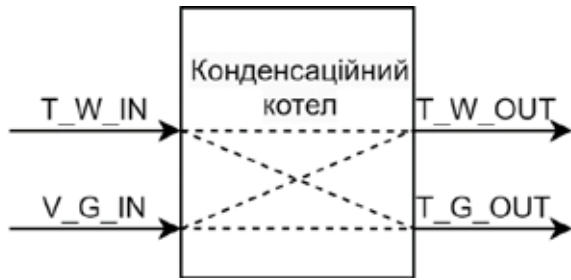


Рис. 3. Параметрична схема конденсаційного котла

- температура теплоносія (води) з колектора «зворотної» лінії системи опалення Т2 (від споживача), надалі T_{W_IN} .

На рис. 3 представлено параметричну схему конденсаційного котла як об'єкта керування [12].

Модель об'єкта керування представлятиметься у вигляді функцій передачі. Для визначення видів та параметрів функцій передачі було проведено 50 експериментів та отримано розгінні характеристики конденсаційного котла при різних режимах роботи. У табл. 1 наведено список температур теплоносія на вході у котел та витрати газу для яких було проведено експерименти для отримання розгінних характеристик.

На рисунку 4 наведено приклад графіку отриманих даних: T_{W_IN} має стале значення $50\text{ }^\circ\text{C}$, а V_{G_IN} змінюється від 10 % до 100 % від номі-

Таблиця 1

Значення вхідних параметрів котла для отримання розгінних характеристик

№ з.п.	Значення T_{W_IN} , $^\circ\text{C}$	Значення V_{G_IN} , % від номінального значення
1	25	10
2	30	20
3	40	40
4	50	60
5	60	80
6	70	100

нального значення витрати газу. На рисунку 5 наведено графік отриманих даних при сталому значенні V_{G_IN} 20 % від номінальної витрати газу, а T_{W_IN} змінюється від $25\text{ }^\circ\text{C}$ до $70\text{ }^\circ\text{C}$.

Структури функцій передачі, якими здійснювалася апроксимація перехідних характеристик:

- для каналу “ $T_{W_IN} \rightarrow T_{G_OUT}$ ” було обрано інерційну ланку першого порядку з транспортним запізненням(АП1) її вигляд наведено у формулі (1);

- для каналів “ $T_{W_IN} \rightarrow T_{W_OUT}$ ” та “ $V_{G_IN} \rightarrow T_{W_OUT}$ ” було обрано інерційну ланку другого порядку(АП2), її вигляд наведено у формулі (2);

- для каналу “ $V_{G_IN} \rightarrow T_{G_OUT}$ ” було обрано інтегро-диференціовальну ланку(ІД), її вигляд наведено у формулі (3).

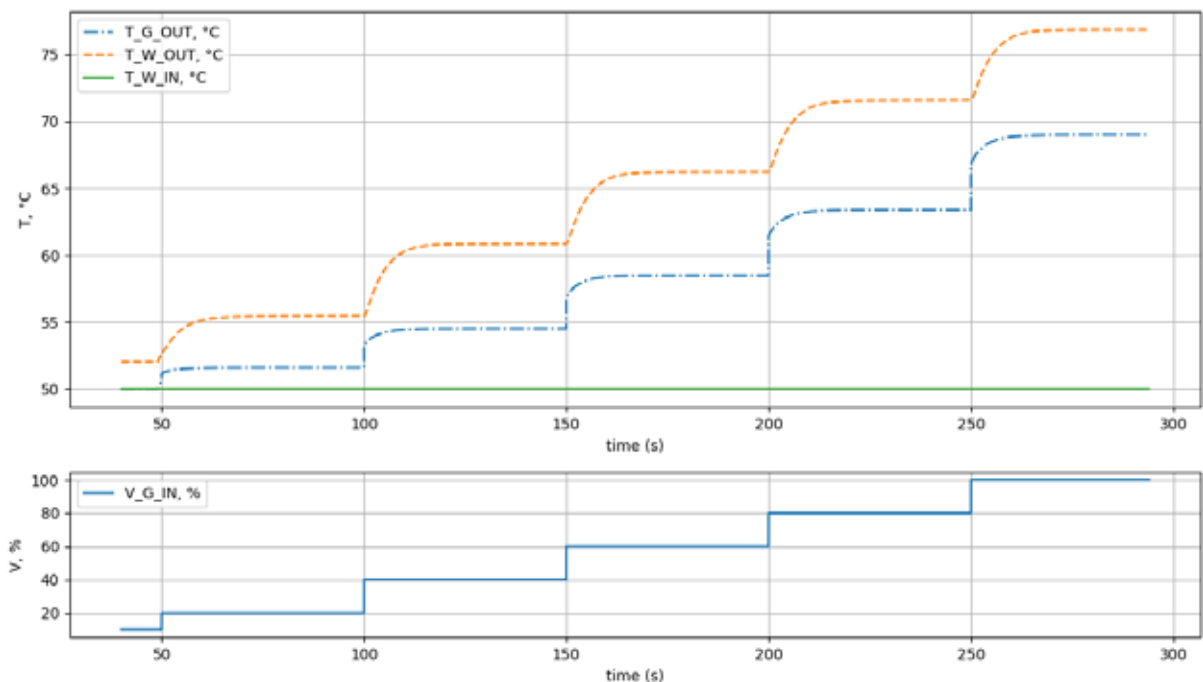


Рис. 4. Графік отриманих даних для T_{W_IN} дорівнює $50\text{ }^\circ\text{C}$ і V_{G_IN} змінюється від 10 % до 100 % від номінального значення витрати газу

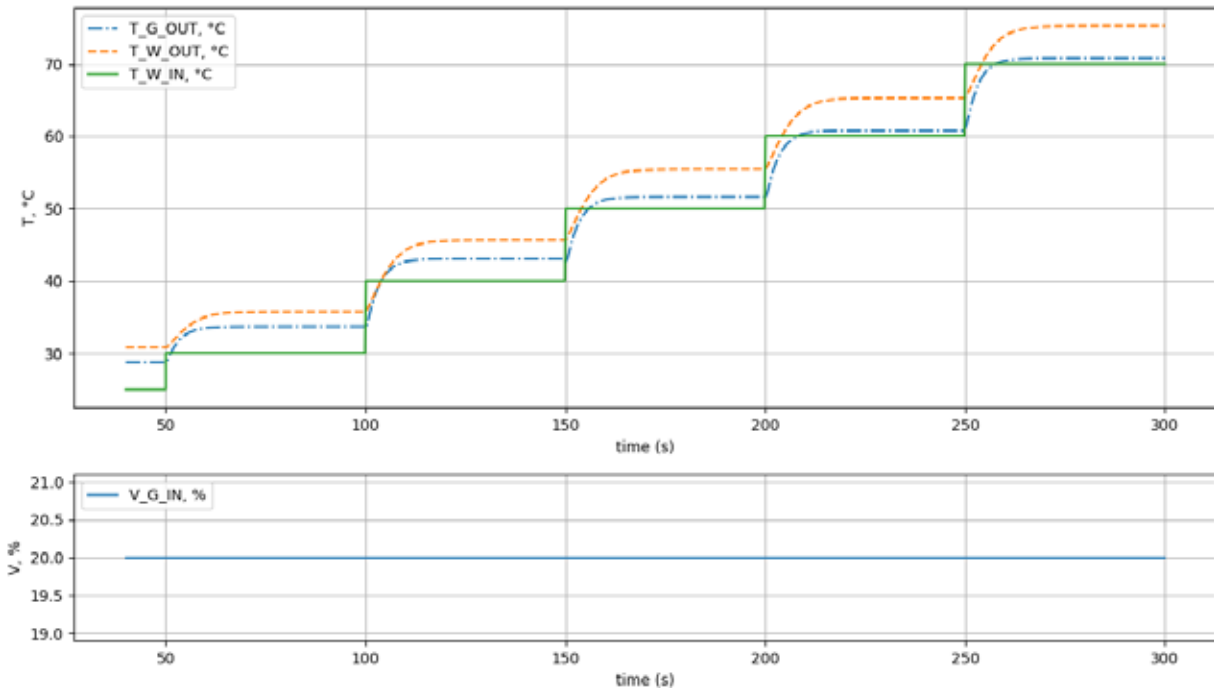


Рис. 5. Графік отриманих даних для V_G_IN дорівнює 20 % і T_W_IN змінюється від 25 °C до 70 °C

$$W_{АП1}(s) = \frac{K}{T \cdot s + 1} \cdot e^{-\tau \cdot s}, \quad (1)$$

де K – коефіцієнт підсилення; T – постійна часу в секундах; τ – часова затримка в секундах.

$$W_{АП2}(s) = \frac{K}{(T_1 \cdot s + 1) \cdot (T_2 \cdot s + 1)}, \quad (2)$$

де K – коефіцієнт підсилення; T_1 та T_2 – постійні часу в секундах.

$$W_{ІД}(s) = \frac{K \cdot (T_2 \cdot s + 1)}{T_1 \cdot s + 1}, \quad (3)$$

де K – коефіцієнт підсилення; T_1 та T_2 – постійні часу в секундах.

Критерієм для оцінки похибки між моделлю та реальними даними було обрано MSE (mean square error – середнє квадратичне відхилення), формулу розрахунку наведено у рівнянні (4).

$$MSE = \frac{\sum (y_i - p_i)^2}{n}, \quad (4)$$

де y_i – реальне значення у момент часу i ; p_i – прогнозоване значення у момент часу i ; n – кількість точок.

Таблиця 2

Оцінка похибок між реальними значеннями та моделлю конденсаційного котла

Функція передачі	Канал	Середнє значення MSE
АП2	“T_W_IN→T_W_OUT”	0,000045
АП2	“V_G_IN→T_W_OUT”	0,00000095
АП1	“T_W_IN→T_G_OUT”	0,0031
ІД	“V_G_IN→T_G_OUT”	0,001

Результати ідентифікації

На рисунках 6–8 зображено графіки зміни параметрів функції передачі у вигляді інерційної ланки другого порядку за каналом “T_W_IN→T_W_OUT”. Проаналізувавши графіки зроблено висновок, що для параметрів $T1$ та $T2$ функції передачі за каналом “T_W_IN→T_W_OUT” недоцільно виводити залежність від значень вхідних параметрів V_G_IN та T_W_IN, а доцільно взяти усереднене значення. Для коефіцієнта підсилення K функції передачі за каналом “T_W_IN→T_W_OUT” доцільно вивести залежність від значень вхідних параметрів V_G_IN та T_W_IN.

Параметри моделі перехідного процесу за каналом “T_W_IN→T_W_OUT” у вигляді інерційної ланки другого порядку наведено у формулі (5):

$$K = f(V_G_IN, T_W_IN) \quad (5)$$

$$T_1 = 4.1s$$

$$T_2 = 1.6s.$$

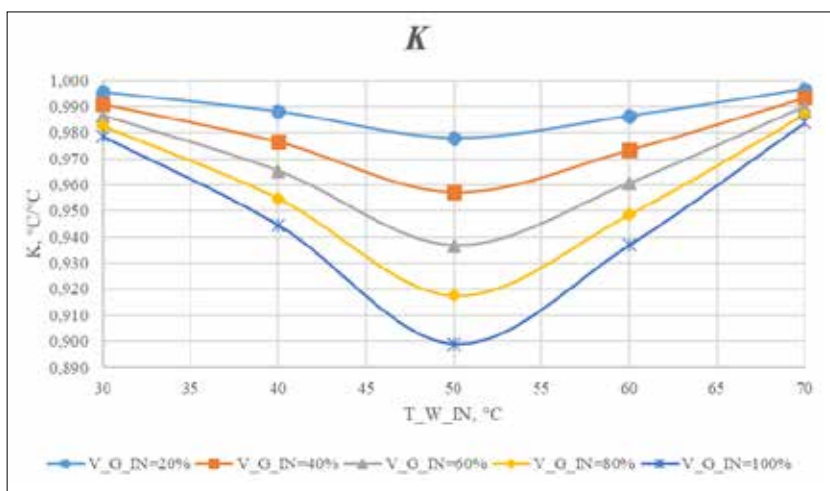


Рис. 6. Зміна коефіцієнта підсилення K у функції передачі за каналом “ $T_{W_IN} \rightarrow T_{W_OUT}$ ” в залежності від значень V_{G_IN} та T_{W_IN}

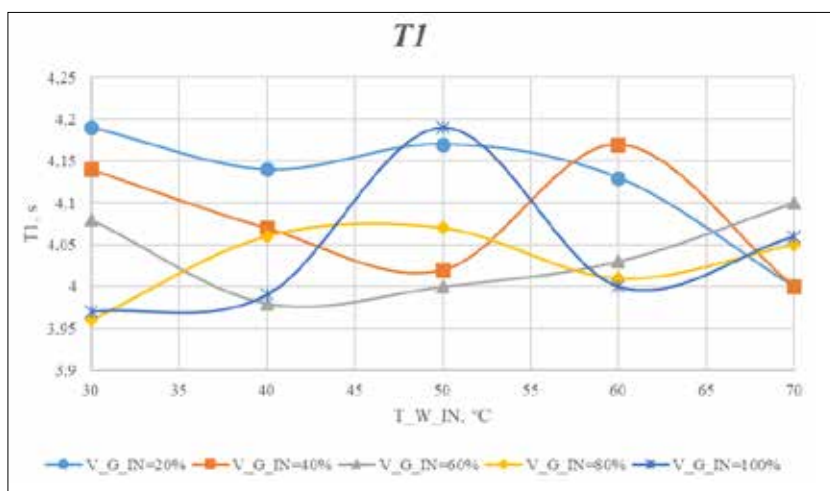


Рис. 7. Зміна сталої часу T_1 у функції передачі за каналом “ $T_{W_IN} \rightarrow T_{W_OUT}$ ” в залежності від значень V_{G_IN} та T_{W_IN}

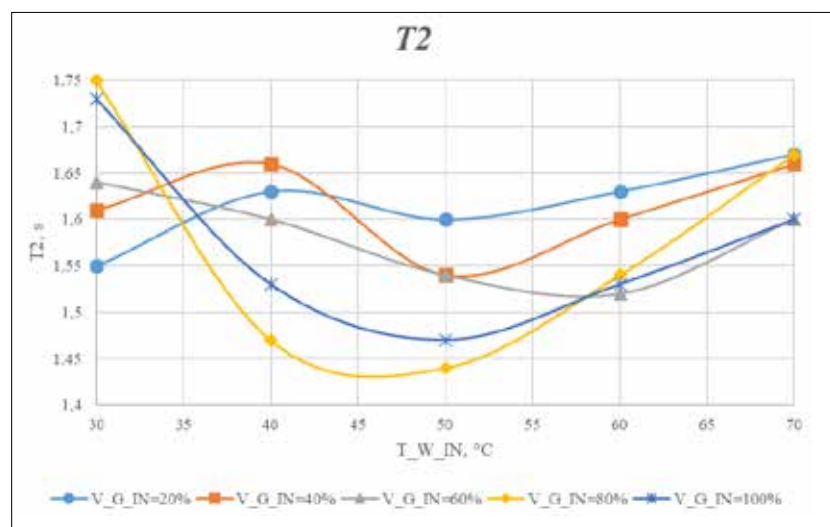


Рис. 8. Зміна сталої часу T_2 у функції передачі за каналом “ $T_{W_IN} \rightarrow T_{W_OUT}$ ” в залежності від значень V_{G_IN} та T_{W_IN}

На рисунках 9–11 зображено графіки зміни параметрів функції передачі у вигляді інерційної ланки першого порядку за каналом “T_W_IN→T_G_OUT”. Проаналізувавши графіки зроблено висновок, що для сталої часу T функції передачі за каналом “T_W_IN→T_G_OUT” недоцільно виводити залежність від значень вхідних параметрів V_G_IN та T_W_IN , а доцільно взяти усереднене значення. Для параметрів K та τ функції передачі за каналом “T_W_IN→T_G_OUT” доцільно вивести залежність від значень вхідних параметрів V_G_IN та T_W_IN .

На рисунках 12–14 зображено графіки зміни параметрів функції передачі у вигляді інерційної ланки другого порядку за каналом “V_G_IN→T_W_OUT”.

Параметри моделі перехідного процесу за каналом “T_W_IN→T_G_OUT” у вигляді інерційної ланки першого порядку з транспортним запізненням наведено у формулі (6):

$$K = f(V_G_IN, T_W_IN)$$

$$T = 3.11s$$

$$\tau = f(V_G_IN, T_W_IN).$$
(6)

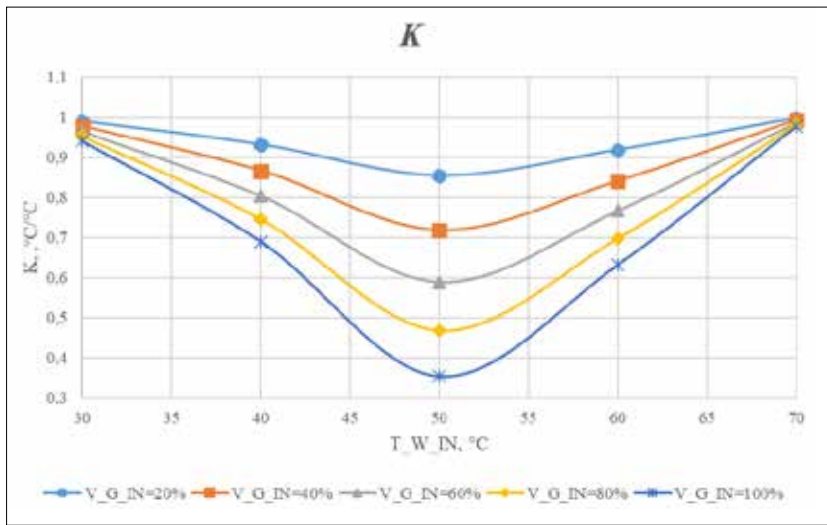


Рис. 9. Зміна коефіцієнта підсилення K у функції передачі за каналом “T_W_IN→T_G_OUT” в залежності від значень V_G_IN та T_W_IN

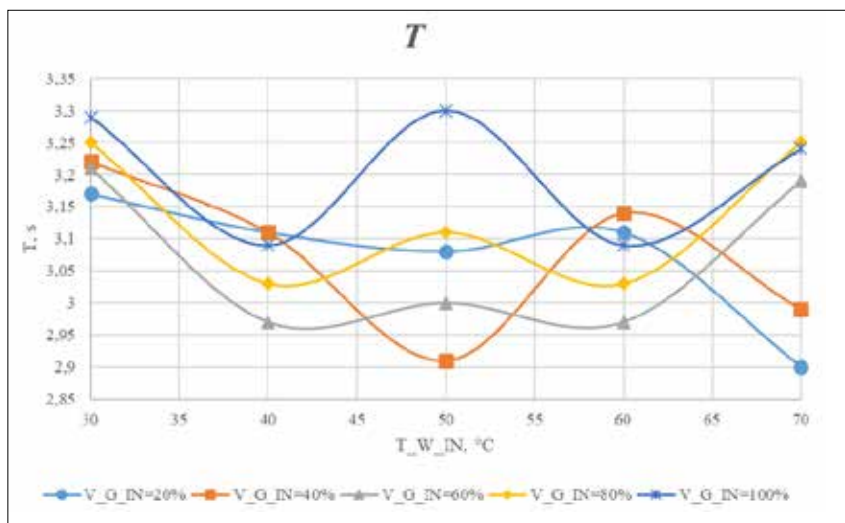


Рис. 10. Зміна сталої часу T у функції передачі за каналом “T_W_IN→T_G_OUT” в залежності від значень V_G_IN та T_W_IN

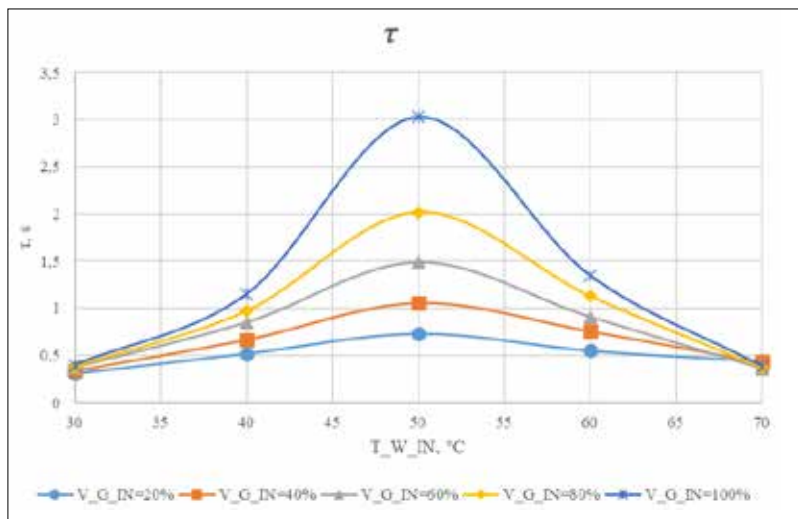


Рис. 11. Зміна часової затримки τ у функції передачі за каналом “ $T_{W_IN} \rightarrow T_{G_OUT}$ ” в залежності від значень V_{G_IN} та T_{W_IN}

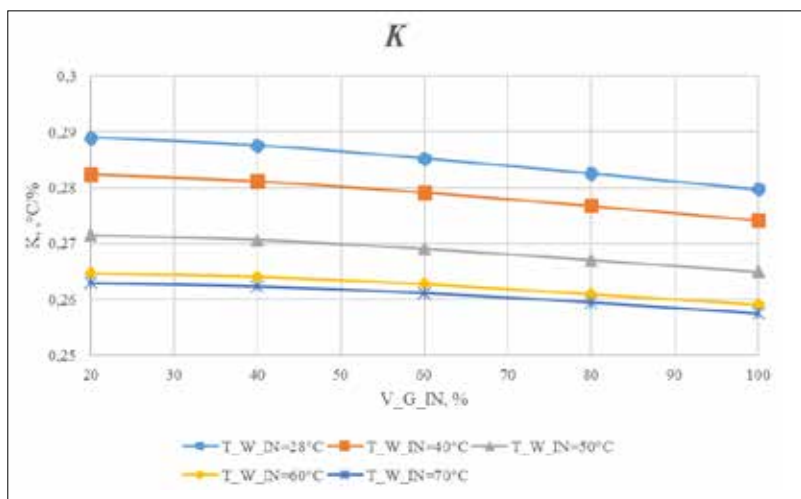


Рис. 12. Зміна коефіцієнта підсилення K у функції передачі за каналом “ $V_{G_IN} \rightarrow T_{W_OUT}$ ” в залежності від значень V_{G_IN} та T_{W_IN}

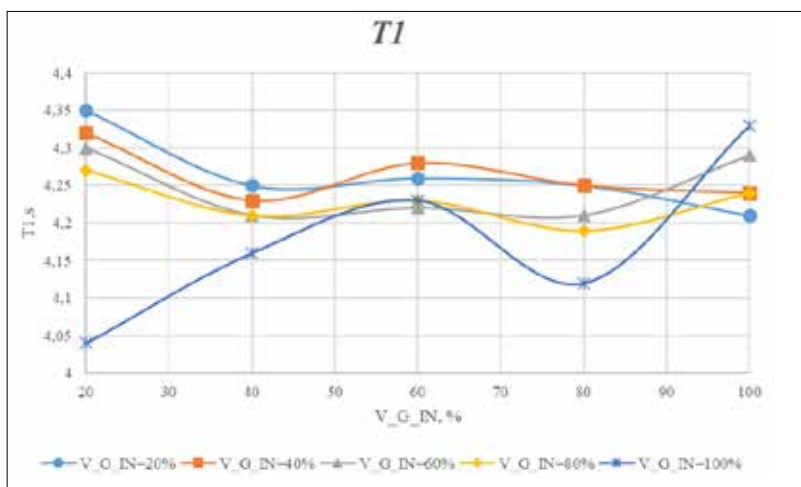


Рис. 13. Зміна сталої часу Tl у функції передачі за каналом “ $V_{G_IN} \rightarrow T_{W_OUT}$ ” в залежності від значень V_{G_IN} та T_{W_IN}

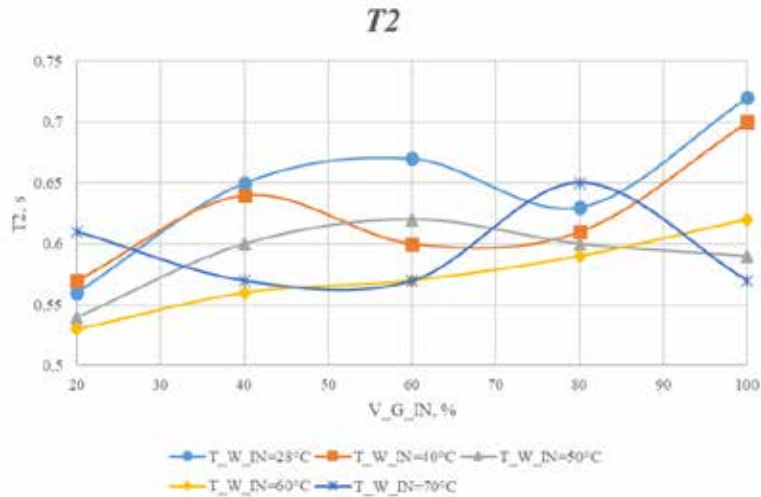


Рис. 14. Зміна сталої часу T_2 у функції передачі за каналом “V_G_IN→T_W_OUT” в залежності від значень V_G_IN та T_W_IN

Проаналізувавши графіки на рисунках 12–14 зроблено висновок, що для сталої часу усіх параметрів функції передачі за каналом “V_G_IN→T_W_OUT” недоцільно виводити залежність від значень вхідних параметрів V_G_IN та T_W_IN, а доцільно взяти усереднене значення.

Параметри моделі перехідного процесу за каналом “V_G_IN→T_W_OUT” у вигляді інерційної ланки другого порядку наведено у формулі (7):

$$\begin{aligned}
 K &= 0,2711^\circ\text{C} / \% \\
 T_1 &= 4,24\text{ s} \\
 T_2 &= 0,61\text{ s.}
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

На рисунках 15–17 зображено графіки зміни параметрів функції передачі у вигляді інтегро-диференціовальної ланки за каналом “V_G_IN→T_G_OUT”. Проаналізувавши графіки зроблено висновок, що для параметрів T_1 та T_2 функції передачі за каналом “V_G_IN→T_G_OUT” недоцільно виводити залежність від значень вхідних параметрів V_G_IN та T_W_IN, а доцільно взяти усереднене значення. Для коефіцієнту підсилення K функції передачі за каналом “V_G_IN→T_G_OUT” доцільно вивести залежність від значень вхідних параметрів V_G_IN та T_W_IN.

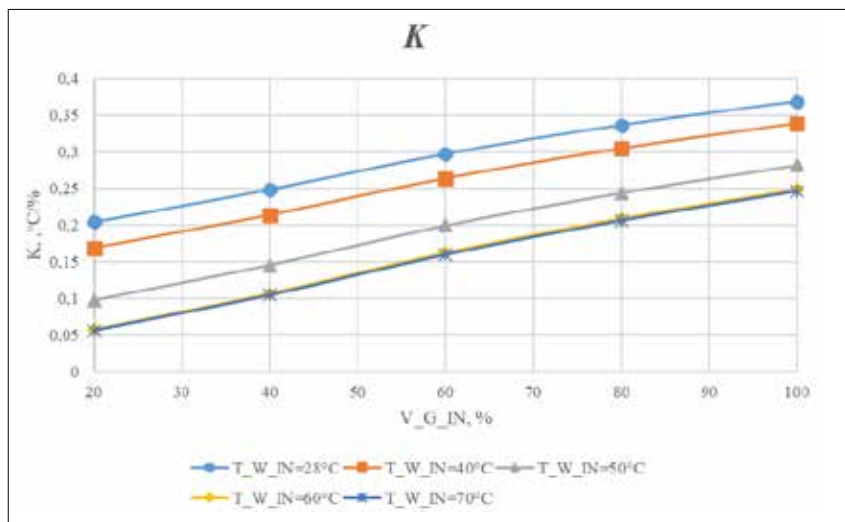


Рис. 15. Зміна коефіцієнта підсилення K у функції передачі за каналом “V_G_IN→T_G_OUT” в залежності від значень V_G_IN та T_W_IN

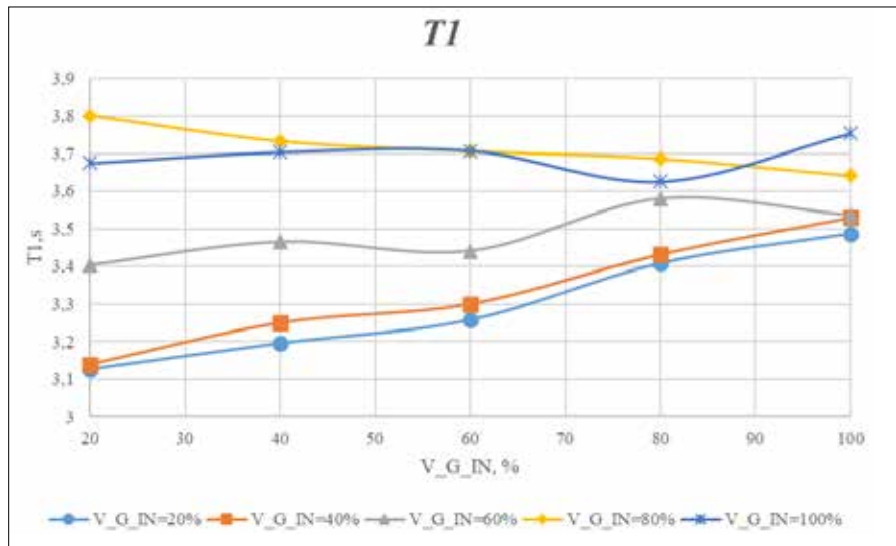


Рис. 16. Зміна сталої часу $T1$ у функції передачі за каналом “ $V_G_IN \rightarrow T_G_OUT$ ” в залежності від значень V_G_IN та T_W_IN

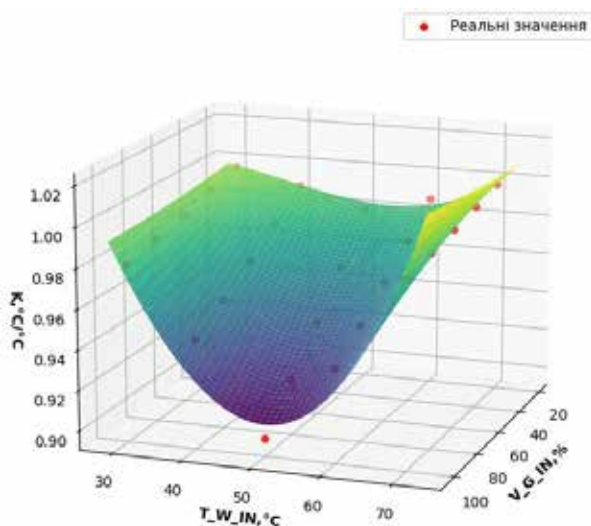


Рис. 17. Зміна сталої часу $T2$ у функції передачі за каналом “ $V_G_IN \rightarrow T_G_OUT$ ” в залежності від значень V_G_IN та T_W_IN

Параметри моделі перехідного процесу за каналом “ $V_G_IN \rightarrow T_G_OUT$ ” у вигляді інтегродиференціальної ланки наведено у формулі (8):

$$K = f(V_G_IN, T_W_IN) \quad (8)$$

$$T_1 = 3,5s$$

$$T_2 = 2,1s.$$

Після аналізу параметрів об’єкта управління на нелінійність можна зробити висновок, що деякі параметри функцій передачі, що описують динаміку конденсаційного котла, є нелінійними. Тому вони мають бути змінними в залежності від режи-

мів роботи котла, а саме від температури теплоносія на вході у агрегат та витрати газу у топці.

Визначення залежностей для параметрів функцій передачі об’єкта керування

За каналом “ $T_W_IN \rightarrow T_W_OUT$ ”, де коефіцієнт підсилення K змінюється в залежності від V_G_IN та T_W_IN , було отримано залежність (9). На рисунку 18 наведено вигляд отриманої залежності.

$$K_{\langle T_{W_{IN}} \rightarrow T_{W_{OUT}} \rangle} = 0.003 \cdot V_{G_{IN}} + 0.007 \cdot y +$$

$$+ 0.000001 \cdot V_{G_{IN}}^2 - 0.0002 \cdot V_{G_{IN}} \cdot T_{W_{IN}} -$$

$$- 0.0002 \cdot T_{W_{IN}}^2 - 0.000000001 \cdot V_{G_{IN}}^3 -$$

$$- 0.000000003 \cdot V_{G_{IN}}^2 \cdot T_{W_{IN}} +$$

$$+ 0.000002 \cdot V_{G_{IN}} \cdot T_{W_{IN}}^2 + 0.000001 \cdot T_{W_{IN}}^3 +$$

$$+ 0.901. \quad (9)$$

За каналом “ $T_W_IN \rightarrow T_G_OUT$ ”, де коефіцієнт підсилення K та час чистого транспортного запізнення τ змінюються в залежності від V_G_IN та T_W_IN , було отримано залежності (10) та (11) відповідно, на рисунках 19 та 20 наведено відповідні залежності.

$$K_{\langle T_{W_{IN}} \rightarrow T_{G_{OUT}} \rangle} = 0.025 \cdot V_{G_{IN}} + 0.05 \cdot T_{W_{IN}}$$

$$+ 0.000002 \cdot V_{G_{IN}}^2 - 0.0012 \cdot V_{G_{IN}} \cdot T_{W_{IN}} -$$

$$- 0.001 \cdot T_{W_{IN}}^2 - 0.000000009 \cdot V_{G_{IN}}^3 -$$

$$- 0.000000004 \cdot V_{G_{IN}}^2 \cdot T_{W_{IN}} + 0.00001 \cdot V_{G_{IN}} \cdot T_{W_{IN}}^2 +$$

$$+ 0.000008 \cdot T_{W_{IN}}^3 + 0.29263. \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \tau_{\langle T_{W_IN} \rightarrow T_{G_OUT} \rangle} = & 0.037 \cdot V_{G_IN} - 6.8 \cdot T_{W_IN} - 0.0006 \cdot V_{G_IN}^2 - \\ & - 0.0027 \cdot V_{G_IN} \cdot T_{W_IN} + 0.22 \cdot T_{W_IN}^2 - 0.000003 \cdot V_{G_IN}^3 + \\ & + 0.00003 \cdot V_{G_IN} \cdot T_{W_IN} + 0.00007 \cdot V_{G_IN} \cdot T_{W_IN}^2 - 0.003 \cdot T_{W_IN}^3 + \\ & + 0.00000001 \cdot V_{G_IN}^4 + 0.00000002 \cdot V_{G_IN}^3 \cdot T_{W_IN} - \\ & - 0.0000004 \cdot V_{G_IN}^2 \cdot T_{W_IN}^2 - 0.0000005 \cdot V_{G_IN} \cdot T_{W_IN}^3 + \\ & + 0.00002 \cdot T_{W_IN}^4 + 76.42. \end{aligned} \quad (11)$$

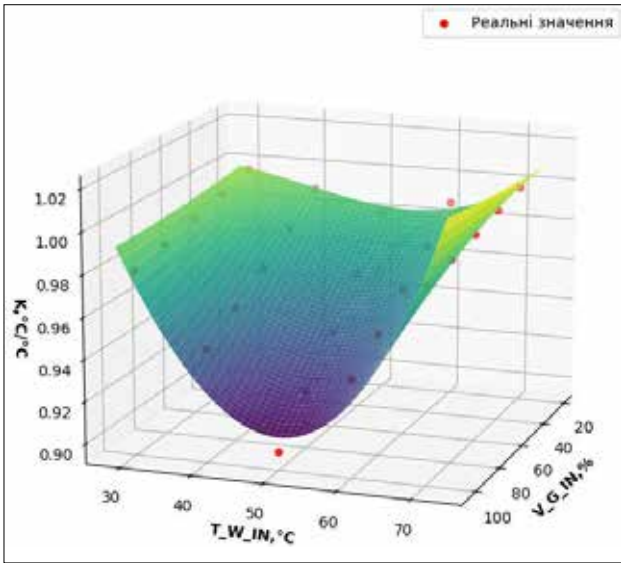


Рис. 18. Залежність коефіцієнт підсилення К функції передачі за каналом “T_W_IN→T_W_OUT” від V_G_IN та T_W_IN

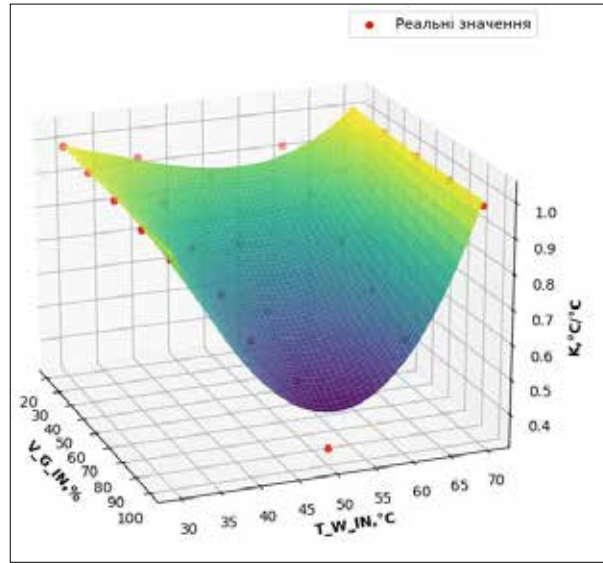


Рис. 19. Залежність коефіцієнт підсилення К функції передачі за каналом “T_W_IN→T_G_OUT” від V_G_IN та T_W_IN

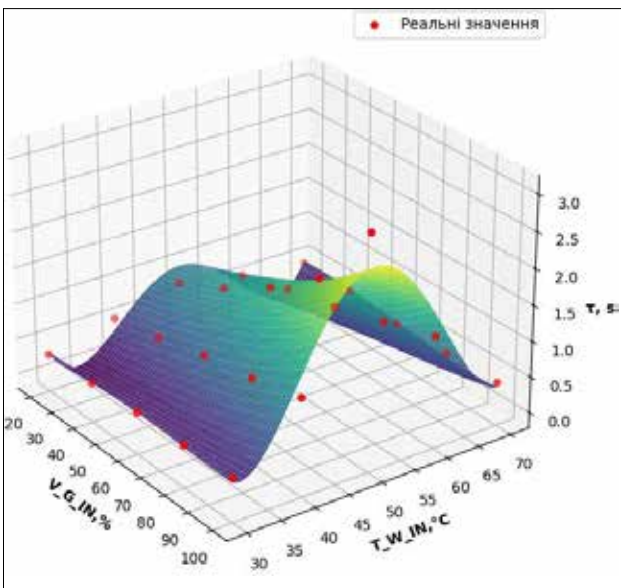


Рис. 20. Залежність часу чистого транспортного запізнення τ функції передачі за каналом “T_W_IN→T_G_OUT” від V_G_IN та T_W_IN

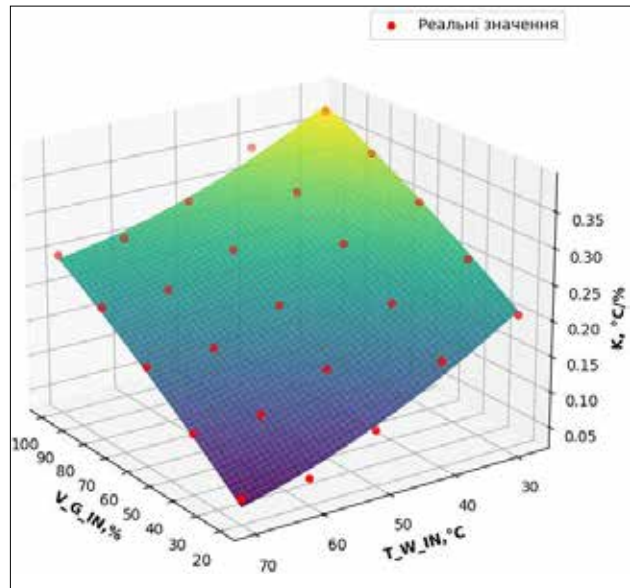


Рис. 21. Залежність коефіцієнт підсилення К функції передачі за каналом “V_G_IN→T_G_OUT” від V_G_IN та T_W_IN

За каналом “V_G_IN→T_G_OUT”, де коефіцієнт підсилення K змінюється в залежності від V_G_IN та T_W_IN, було отримано залежність (12). На рисунку 21 наведено вигляд отриманої залежності.

$$K_{\text{«V}_{G_{IN}} \rightarrow T_{G_{OUT}}\text{»}} = 0.0025 \cdot V_{G_{IN}} - 0.008 \cdot T_{W_{IN}} - 0.000005 \cdot V_{G_{IN}}^2 + 0.000009 \cdot V_{G_{IN}} \cdot T_{W_{IN}} + 0.00004 \cdot T_{W_{IN}}^2 + 0.362. \quad (12)$$

Подальші перспективи отриманих наукових результатів

Багато дослідників сходяться на думці, що призначення цифрових двійників – відобразити фізичний компонент кібер-фізичної системи, отримуючи від нього дані, обробляючи їх та формуючи зворотний зв’язок для оптимізації роботи об’єкта. Це визначає моделювання та обробку даних як ключові технології, необхідні для побудови та супроводу цифрового двійника.

Концепція цифрового двійника в контексті оцінювання якості функціонування обладнання по ключових показниках ефективності застосована для моніторингу та аналізу даних у реальному часі, забезпечуючи прогнозне обслуговування та адаптацію системи керування до умов роботи кожного екземпляра. Цифровий двійник системи теплозабезпечення (рис. 22) об’єднує історичні дані та дані в реальному часі, використовуючи моделювання для покращення процесу прийняття рішень. Також цифровий двійник забезпечує моніторинг, аналіз ефективності,

моделювання сценаріїв, виявлення несправностей і діагностику.

Для того, щоб представляти об’єкти реального світу в динаміці, екземпляри цифрового двійника повинні бути з’єднані з їхніми фізичними оригіналами, інколи в режимі реального часу, для збирання та упорядкування даних відповідних об’єктів реального світу. Для аналізу цих даних у цифровому двійнику мають бути розрахункові та аналітичні моделі, щоб описувати, діагностувати, прогнозувати та симулювати стани та поведінку реальних об’єктів і систем. Висновки, отримані в результаті такого аналізу, можуть бути поєднані із бізнес-логікою та цілями для оптимізації виробничих процесів.

Висновки. Розроблено експериментальну математичну модель конденсаційного котла у вигляді функції передачі. Отримана математична модель охоплює усі режими роботи котлоагрегату. Проаналізовано параметри моделі на нелінійність в залежності від діапазону вхідних значень. В основному нелінійними є коефіцієнти підсилення передатних функцій, які змінюються в залежності від значень вхідних параметрів на 10 %–80 %, що продемонстровано на відповідних графіках. Для нелінійних параметрів моделі було знайдено залежності, за допомогою яких можна визначити їх значення при різних вхідних параметрах конденсаційного котла. Отримані залежності це поліноми 2-го, 3-го та 4-го порядку від двох змінних: температури води на вході до котлоагрегату та витрати палива у конденсаційному котлі. Отримана експериментальна математична модель є основою для побудови цифрового двійника конденсаційного котла.

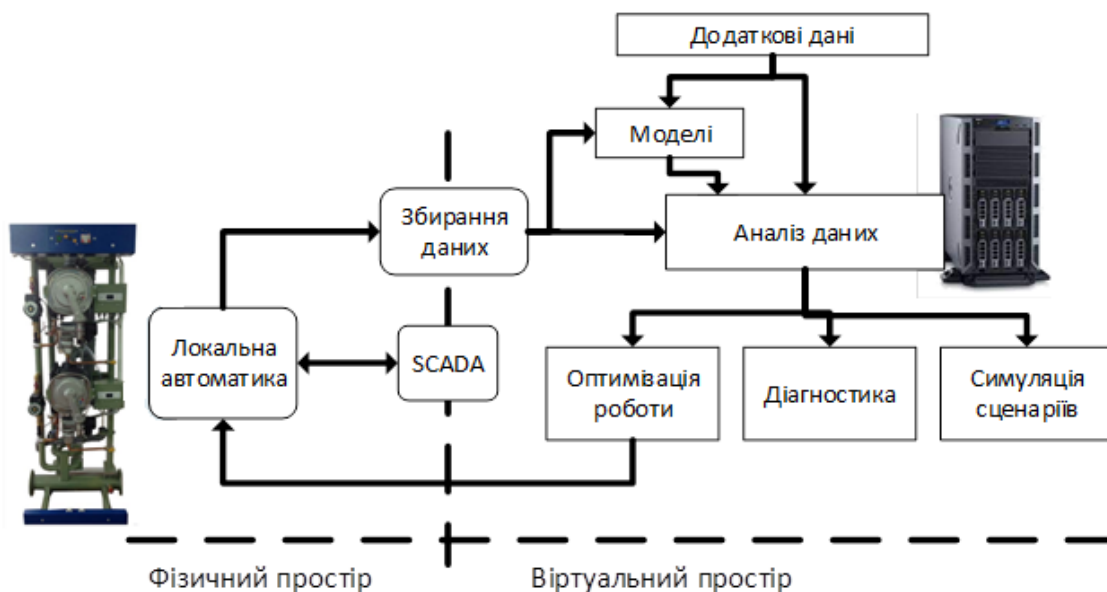


Рис. 22. Структурна схема цифрового двійника конденсаційного котла

Список літератури:

1. Патон Б. Є., Долінський А. А., Геєць В. М., Кухар В. П., Басок Б. І., Базєєв Є. Т., Подолець Р. З. Пріоритети Національної стратегії теплозабезпечення населених пунктів України. *Вісник НАН України*. 2014. № 9. С. 29–47.
2. Harish Satyavada, Simone Baldi. Monitoring energy efficiency of condensing boilers via hybrid first-principle modelling and estimation. *Energy*, Volume 142, 2018, p. 121-129 <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.09.124>
3. João Barros, Condenser boiler modeling. URL: <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395144950949/resumo.pdf> (Дата звернення: 22.04.2024).
4. Куделя П. П., Барабаш П. А. Тепловой баланс конденсационных котлов. *Енергетика*. 2014. № 1. С. 51–59. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/eete_2014_1_9 (Дата звернення: 22.04.2024)
5. Malakuti Somayeh, Van Schalkwyk Pieter, Boss Birgit, Sastry Chellury, Runkana Venkataramana, Lin Shi-Wan, Rix Simon, Green Gavin, Baechle Kilian, Nath Shyam. Digital Twins for Industrial Applications. Definition, Business Values, Design Aspects, Standards and Use Cases. *An Industrial Internet Consortium White Paper*. Version 1.0. 2020.
6. Harish Satyavada, Simone Baldi. A Novel Modelling Approach for Condensing Boilers Based on Hybrid Dynamical Systems. Delft Center for Systems and Control. *Delft University of Technology*. 2016.
7. Dan Teodor Bălănescu, Vlad Mario. Homutescu Experimental investigation on performance of a condensing boiler and economic evaluation in real operating conditions. *Applied Thermal Engineering*. 2018. Volume 143. P. 48–58. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.07.082>
8. Hanby, V. I. Modelling the performance of condensing boilers. *Journal of the Energy Inst.* 2007. № 80. p. 229–231.
9. Дубовой В. М. Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів і систем керування : навчальний посібник. Вінниця : ВНТУ, 2012. 308 с.
10. Кубрак А. І., Жученко А. І., Кваско М. З. Комп'ютерне моделювання та ідентифікація автоматичних систем. Київ: Політехніка, 2004. 424 с.
11. Жученко А. І. Ідентифікація динамічних характеристик. Комп'ютерні методи. Київ, 2000. 182 с. URL: http://opac.kpi.ua/F/?func=direct&doc_number=000066839&local_base=KPI01 (дата звернення: 22.04.2024).
12. Юзвак С.В., Шемчук В.В., Самарін С.В., Косулько А.Г., Ляхно В.Г. Модульні котельні установки системи «УКРІНТЕРМ». Довідковий посібник (12-е вид.). УКРІНТЕРМ. Біла Церква, 2019. 171 с.

Kuchynska K.A., Novikov P.V., Voloshchuk V.A., Stepanets O.V.
EXPERIMENTAL MATHEMATICAL MODEL OF A CONDENSING BOILER FOR DIGITAL TWIN DEVELOPMENT

The article presents an analysis of the dynamic characteristics of a condensing boiler during operation under all possible operating modes. The objective of the article is to obtain a mathematical model of the condensing boiler as a control object, which takes into account parameter variations depending on the operating mode. The obtained model is planned to be used for the construction of a digital twin of the condensing boiler in the control system and for analysing the equipment's performance efficiency. The article provides a structural diagram of the components of the investigated condensing boiler's digital twin. The article includes an analysis of recent research and publications related to the development of mathematical models for condensing boilers. A description of the technological scheme of the modular condensing boiler is provided. Furthermore, a diagram illustrating the input-output relationships of the technological control object is constructed. Mathematical models in the form of transfer functions have been developed based on experimental data that reflect the boiler's operation across its entire operating range. The accuracy of the obtained models has been assessed using the root mean square criterion. An analysis of the model parameters for nonlinearity has been conducted with respect to the operating mode of the research object. It has been observed that certain parameters of the model, such as gain coefficients and time delays, exhibit significant variations depending on the boiler's operating mode, while other parameters are practically independent of the operating mode. Mathematical dependencies describing the variation of these parameters based on the input variables have been determined for the parameters of the model that depend on the operating mode of the condensing boiler. These dependencies are presented in the form of equations and spatial surfaces for graphical representation. The developed condensing boiler model will be used for the development of a digital twin of the condensing boiler. The structure of the digital twin of the investigated condensing boiler is provided, along with the functions of its components within the system.

Key words: condensing boiler, dynamic characteristics, analysis of parameter nonlinearity, digital twin, modelling, mathematical model.