

УДК 681.5:629.3

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2024-1-9>

НЕЧІТКА СУПЕРВІЗОРНА СИСТЕМА АВТОМАТИЗОВАНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТИСКУ ПАРУ КОТЛОАГРЕГАТУ

Разживін Олексій Валерійович,

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри автоматизації, електро- та робототехнічних систем
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
ORCID ID: 0000-0002-1371-2651

Олійник Ігор Олександрович,

магістр кафедри автоматизації виробничих процесів
Донбаська державна машинобудівна академія
ORCID ID: 0009-0006-3712-8659

Потоцький Сергій Вікторович,

магістр кафедри автоматизації, електро- та робототехнічних систем
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
ORCID ID: 0009-0002-8135-6991

Бобов Гліб Романович,

магістр кафедри автоматизації, електро- та робототехнічних систем
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
ORCID ID: 0009-0000-0983-0017

У статті розглянуто синтез нечіткого регулятора системи автоматичного керування тиском пари парового котла, проведено порівняльний аналіз перехідних процесів регулювання тиском пари під час застосування класичного ПІД-регулятора та із застосуванням нечіткого регулятора, підключеного паралельно в режимі супервізора. Проведено аналіз наявних систем автоматичного регулювання тиском пари, що відходить з парового котла. На початковому проведено проаналізовані недоліки наявних котельних установок та їх системи управління. На підставі проведеного аналізу окреслені шляхи усунення виявлених недоліків. Реалізовані задачі дослідження особливостей технологічного процесу пароутворення; проведено удосконалення математичної моделі і алгоритму регулювання технологічним процесом пароутворення шляхом впровадження нечіткого регулятора в режимі супервізора, який функціонує паралельно з класичним ПІД-регулятором; запропонована математична модель автоматизованої системи керування тиску подачі газоповітряної суміші на горіння; розроблено структуру та алгоритм функціонування автоматизованої системи керування котельним агрегатом з використанням нечіткого регулятора в супервізорному режимі роботи. Запропонована математична модель режиму пароутворення у котлі, яка відрізняється тим, що враховує змінні технологічні параметри, а також алгоритм роботи нечіткого регулятора в супервізорному режимі роботи витратою повітря на горіння, які відрізняються тим, що враховують показник розрідження у топці котла. Запропоновано розроблення автоматизованої системи управління пароутворенням у котлі тину ДЕ, яка містить сучасну контрольну-вимірювальну апаратуру температури, витрати й тиску пара, газу та повітря, яке підводиться до пальників. Модернізація АСУ спрямована на підвищення продуктивності котельної установки і зниження витрат енергоносіїв (газу і повітря на горіння), яке досягає у відносному значенні 18%.

Ключові слова: котел паровий, автоматизація, система управління, регулятор, нечітка логіка, супервізор.

Razhyvin Oleksii, Oleiinyk Ihor, Pototskyi Serhii, Bobov Hlib. Fuzzy supervisory system of automated regulation of steam pressure of boiler unit

The article deals with the synthesis of a fuzzy regulator of the automatic steam pressure control system of a steam boiler, a comparative analysis of the transient processes of steam pressure regulation when using a classical PID regulator and with the use of a fuzzy regulator connected in parallel to the supervisor mode is carried out. An analysis of the existing systems of automatic pressure regulation of the steam leaving the steam boiler was carried out. At the initial stage, the shortcomings of existing boiler plants and their management systems were analyzed. Based on the analysis, ways to eliminate the identified shortcomings are planned. The following tasks of the study

of the peculiarities of the technological process of vaporization were set and implemented; the improvement of the mathematical model and the algorithm of regulation of the technological process of vaporization was carried out by introducing a fuzzy controller in the supervisor mode, which functions in parallel with the classic PID controller; the proposed mathematical model of the automated control system of the gas-air mixture supply pressure for combustion; the development of the structure and algorithm of the functioning of the automated boiler unit control system using a fuzzy controller in the supervisory mode of operation was carried out. A mathematical model of the mode of steam formation in the boiler is proposed, which differs in that it takes into account variable technological parameters, as well as the algorithm of operation of the fuzzy controller in the supervisory mode of operation of air consumption for combustion, which differs in that it takes into account the rarefaction index in the boiler furnace. It is proposed to develop an automated system for controlling steam generation in a DE boiler, which includes modern control and measurement equipment for the temperature, flow and pressure of steam, gas and air supplied to the burners. The modernization of the control system is aimed at increasing the productivity of the boiler plant and reducing the consumption of energy carriers (gas and air for combustion), which reaches up to 18% in relative terms.

Key words: steam boiler, automation, control system, regulator, fuzzy logic, super-visor.

В Україні рівень енергоспоживання на одиницю валового національного продукту значно вище, ніж у передових промислово розвинених країнах, що призводить до істотного подорожчання і зниження конкурентоспроможності продукції, що виробляється. За оцінками економістів, це перевищення складає більше 45%, що свідчить про необхідність впровадження інноваційних енергозберігаючих технологій в паливно-енергетичний комплекс країни [1]. Оскільки частка вироблення теплоти в загальному енергетичному балансі України складає 55%, з яких 40% припадають на котельні господарства та підприємств [2], в умовах дорожчечі природного газу і мазуту вдосконалення, розроблення і впровадження енергозберігаючих технологій є важливими і актуальними стратегічними завданнями розвитку теплоенергетики та промисловості.

Автоматичні системи управління технологічними процесами котлів являють собою функціонально закінчену систему, призначену для виконання всіх функцій управління котлом як в автономному режимі, так і в складі MES-систем.

Паровий котел є енергетичною установкою, в процесі експлуатації якої з високою динамічною змінюються пов'язані між собою технологічні параметри. АСУТП дає змогу оптимізувати ці параметри з економічних, екологічних, ергономічних та інших показників [8].

Котельна установка є складним взаємопов'язаним об'єктом. Функціональна схема установки наведена рис. 1. Рівень автоматизації, представлений на рисунку, відповідає базовому рівню. Усі незадіяні в цій моделі параметри установки не показані.

Тиск пари в барабані котла контролюється датчиком (PICAS 01). Природний газ як паливо у топку котлу подається під невеликим надлишковим тиском. Тиск безпосередньо перед топкою контролюється датчиком (PICAS 02),

подача газу регулюється клапаном з електричним приводом V1. Повітря в топку котла подається повітропроводом і нагнітається вентилятором для дуття. Тиск безпосередньо перед топкою контролюється датчиком (PICAS 03), регулює подачу повітря шибера з електричним приводом V2. Розрідження в топці котла контролюється датчиком (PICAS 04), яке регулюється шибером з електричним приводом V3. Рівень води в барабані котла контролюється датчиком (LICAS 10). подача живильної води регулюється через клапан з електричним приводом V4.

Як електричний привід (виконавчий механізм – V) у всіх випадках використовуються МЕО – механізми електричні однообертові, що забезпечують переміщення регулюючого органу з положення «відкрито» в положення «закрито» і назад за один оборот ВМ.

Для ідентифікації технологічних параметрів котельної установки як об'єкта керування розглянуто контури регулювання, взаємозв'язку між ними і виконано ідентифікацію об'єкта за кожним контуром. Ідентифікацію виконано за перехідними характеристиками (кривими розгону), які отримано на реальному об'єкті та наведено у паспорті котлоагрегату.

На рис. 2 представлено структурну схему системи управління паровим котлом за каналами управління.

Аналіз динаміки об'єкта показує, що по всіх каналах регулювання об'єкт може бути ідентифікований як аперіодична ланка першого порядку з чистим запізненням, тобто об'єкт, що описується диференціальним рівнянням першого порядку із запізненням [3; 4].

$$T \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = K_0 u(t - \tau), \quad y(0) = 0. \quad (1)$$

Реакція такого об'єкта на вхідне ступеневе збурення:

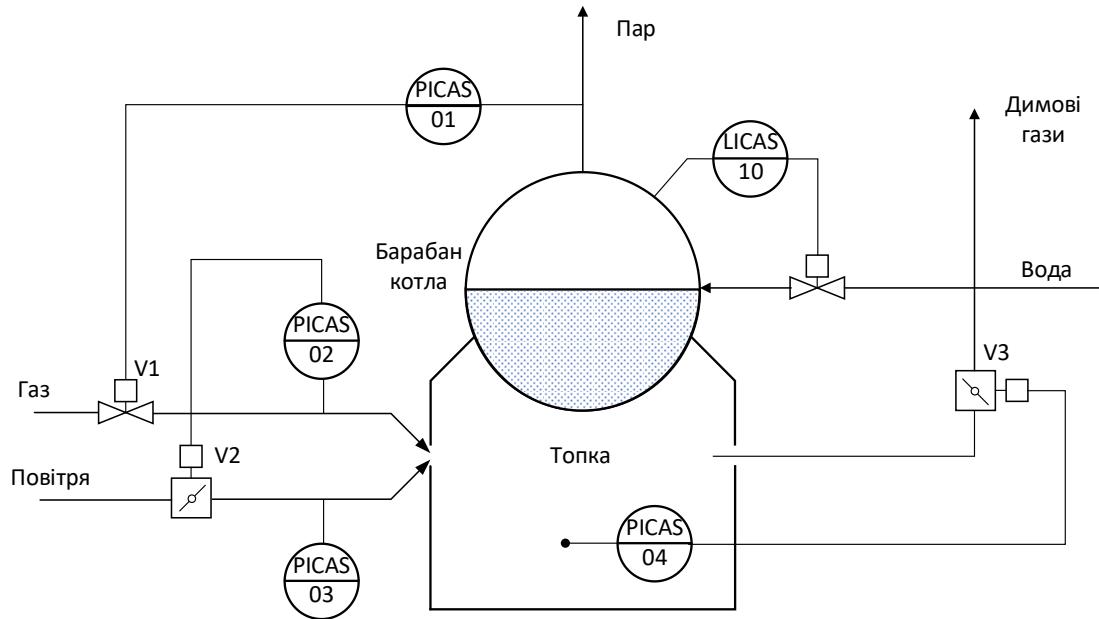


Рис. 1. Функціональна схема автоматизації котельної установки

$$u(t) = U^* 1, (t)$$

де U – амплітуда одиничного ступінчастого впливу.

Потрібно визначити параметри транспортного запізнення τ , коефіцієнта передачі K_0 , постійного часу T об'єкта.

Рішення рівняння 1 має такий вигляд:

$$y(t) = h(t) = K_0 \left(1 - e^{-\frac{t-\tau}{T}} \right), t \geq \tau. \quad (2)$$

Під час проведення моделювання залежності тиску пари від тиску газу та тиску повітря від тиску газу використано методику досліджень з роботи [2]. Щоб встановити зв'язок $P_z = f(P_{пара})$ виконано низку досліджень, сенс яких полягає у визначенні реакції тиску пари на зміну тиску газу. За відносно постійного оптимального навантаження, що визначається витратою пари, та постійного тиску пари ($P_{пара} = \text{const}$) змінюється тиск газу. Усі системи регулювання, пов'язані з витратою газу, працюють штатно.

Визначено, що зв'язок між тиском описується лінійним виразом:

$$P_{пара} = A + B P_z = 7,55 + 0,12 P_z.$$

Для узагальненої моделі потрібен зворотний вираз, який пов'яже тиск пари з тиском газу:

$$P_z = 83,33(P_{пара} - 7,55).$$

Залежність співвідношення повітря/газ наведено у паспорті котла й може бути з доволі високою точністю апроксимованою залежністю:

$$P_n = -1,625 + 0,1875 P_z.$$

Модель об'єкта по каналу регулювання тиску пари:

$$W_{пара}(p) = \frac{0.533}{180p + 1} e^{-100p}. \quad (3)$$

Модель об'єкта по каналу регулювання тиску повітря:

$$W_n(p) = \frac{0.1875}{4,3p + 1} e^{-2,4p}. \quad (4)$$

Модель об'єкта каналу регулювання розрідження:

$$W_p(p) = \frac{0,4}{10p + 1} e^{-5p}. \quad (5)$$

Модель об'єкта по каналу регулювання рівня.

Модель барабана (Об'єкт 4-1) представлена у вигляді аперіодичної ланки із запізненням:

$$W_{4-1}(p) = \frac{12}{100p + 1} e^{-3p}. \quad (6)$$

Модель також включає ланку, що імітує явище «розширення» рівня (Об'єкт 4-2):

$$W_{4-2}(p) = \frac{0,046}{p + 1}, \quad (7)$$

де K_n – швидкість «розширення»; T_n – постійна часу «розширення».

За результатами ідентифікації параметрів математичної моделі котла (рис. 2) проведено дослідження системи управління котельною установкою та параметрів управління на математичній моделі АСУ котельною установкою за ПІД-законом регулювання й застосування нечіткого регулятора супервізором у режимі

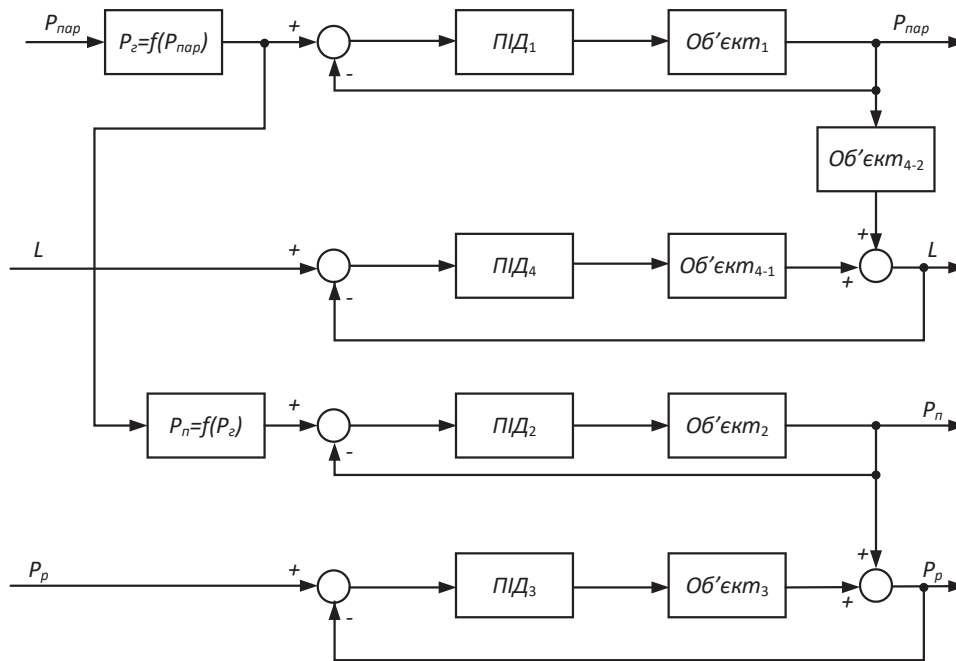


Рис. 2. Структурна схема математичної моделі системи управління котлом

$P_{\text{пара}}$ – тиск пара; L – рівень води в барабані котла; $P_{\text{г}}$ – тиск газу; $P_{\text{п}}$ – тиск повітря; $P_{\text{р}}$ – розрядження в топці котла; ПІД1, 2, 3, 4 – ПІД-регулятори; $P_2 = f(P_{\text{пара}})$ – залежність тиску пара від тиску газу; $P_{\text{п}} = f(P_{\text{г}})$ – залежність тиску повітря від тиску газу (крива співвідношення «газ/повітря»)

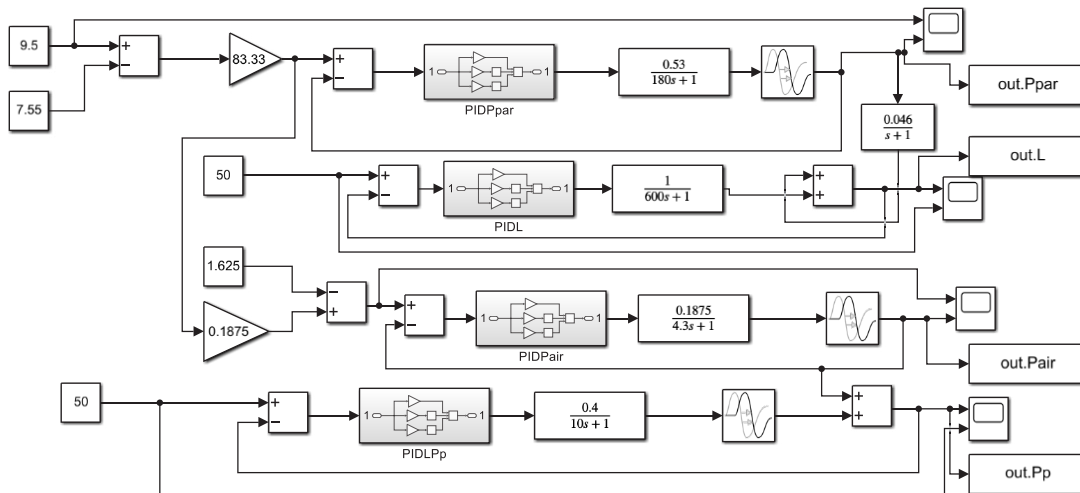


Рис. 3. Математична модель АСУ котельною установкою

коригування коефіцієнтів передачі ПІД-регулятора.

Моделювання системи керування котельною установкою виконано у пакеті програм MATLAB Simulink. Налаштування ПІД-регуляторів виконується методом Циглера – Нікольса [3; 4].

На рис. 3 представлено математична модель системи керування котельною установкою з ПІД-регуляторами, яка побудована відповідно до структурної схеми, наведеної на рис. 2, та ідентифікованих передаточних функцій за каналами управління (4...7).

У класичній теорії автоматичного управління структура регулятора вибирається з моделі об'єкта управління. Складні об'єкти управління вимагають застосування складних регуляторів. Однак на практиці переважно регулювання зводиться до використання ПІД-регуляторів, що мають такий вигляд [3; 4]:

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(t) dt + k_d \frac{de(t)}{dt}, \quad (8)$$

де k_p – пропорційний коефіцієнт підсилення регулятора; k_i – інтегральний коефіцієнт

підсилення регулятора; k_d – диференціальний коефіцієнт підсилення регулятора.

Налаштування параметрів ПІД-регулятора контурів, тиску пару, газоповітряної суміші, розрідження у топці котлу та рівня рідини у барабані котлу виконано методом Циглера – Нікольса [3; 7] для розімкненої системи. Результати розрахунку коефіцієнтів регуляторів наведені у табл. 1.

Після визначення параметрів регуляторів промодельовані перехідні процеси для замкнутої системи, які показано на рис. 4–7.

Проведене математичне моделювання технологічних параметрів котельного агрегату показало, що використання класичного ПІД-регулятора потребує корегування коефіцієнтів передачі.

1) Для перехідного процесу регулювання тиску пару потрібно зменшити коливання перехідної характеристики та збільшити швидкодію процесу, що потребує корегування інтегрального коефіцієнта ПІД-регулятора.

2) Для перехідного процесу регулювання рівня в барабані котла потрібно зменшити коливання перехідної характеристики та зменшити динамічну похибку, що потребує корегування інтегрального коефіцієнта ПІД-регулятора.

3) Для перехідного процесу тиску повітря ГПС та розрідження в топці котла потрібно зменшити коливання перехідної характеристики та зменшити динамічну похибку, що потребує корегування інтегрального коефіцієнта ПІД-регулятора.

Для реалізації зазначених корегувань застосуємо нечіткий регулятор, який буде включено паралельного класичному ПІД-регулятору. Вихідними значеннями нечіткого регулятора повинні буди коригуючі параметри коефіцієнтів ПІД-регулятора.

Ідея нечіткого супервізора полягає в організації дворівневої системи, в якій на нижньому

рівні розташовано звичайний ПІД-регулятор, а на верхньому – нечіткий регулятор (НЛР) (рис. 8) [6; 7].

Призначення нечіткого регулятора, який функціонує в режимі супервізора, полягає в тому, щоб автоматично змінювати коефіцієнти ПІД-регулятора на різних стадіях перехідного процесу. У ПІД-регуляторі є три вхідні змінні, тому вважатиметься, що його коефіцієнт посилення складається з трьох складників [3; 5].

$$K_{PID} = K_p + K_i + K_d.$$

Лінгвістичні значення нормалізованих коефіцієнтів ПІД-регулятора можна описати за допомогою семи термів з найменуваннями «нульовий (Н)», «малий 1 (M1)», «малий 2 (M2)», «середній 1 (C1)», «середній 2 (C2)», «Великий 1 (B1)», «Великий 2 (B2)» Лінгвістичні правила для нечіткого регулятора в режимі супервізора наведені у табл. 2.

Для опису нечіткого регулятора задається FIS editor із системою нечіткого логічного висновку Mamdani. Для створюваної системи вибирається вид логічного зв'язку (And method – min) та (Or method – max), вид імплікації (Implication – min), спосіб агрегування висновків правил (Aggregation – max) та метод дефазифікації (Defuzzification – centroid).

У меню Edit послідовно додано 2 вхідні змінні з розміром базової шкали (Range = [-300 200] – для «похідної помилки управління», Range = [-800 800] – для «помилки управління») та три вихідні змінні з розміром базової шкали (Range = [0 1]).

На рис. 9 показано схему моделювання АСУ з нечітким супервізором ПІД-регуляторів з контурами регулювання технологічних параметрів.

Для опису вхідних логічних змінних у редакторі функцій приналежності задано для кожної

Таблиця 1

Результати розрахунку коефіцієнтів регуляторів

Контур регулювання	Передаточна функція	k_p	k_i	k_d
Тиску пару	$W(p) = \frac{0,53}{180p + 1} e^{-100\tau p}$	$1.2T/(K_0 t)$	$0.9T/(K_0 t)$	$0,5T/K_0=169,8$
Рівня в барабані котла	$W(p) = \frac{1}{600p + 1}$	$1.2T/(K_0 t)$	$0.9T/(K_0 t)$	$0,5T/K_0=4,2$
ГПС	$W(p) = \frac{0,1875}{4,3p + 1} e^{-2,4\tau p}$	$1.2T/(K_0 t)$	$0.9T/(K_0 t)$	$0,5T/K_0=11,5$
Розрідження в топці	$W(p) = \frac{0,4}{10p + 1} e^{-5\tau p}$	$1.2T/(K_0 t)$	$0.9T/(K_0 t)$	$0,5T/K_0=12,5$

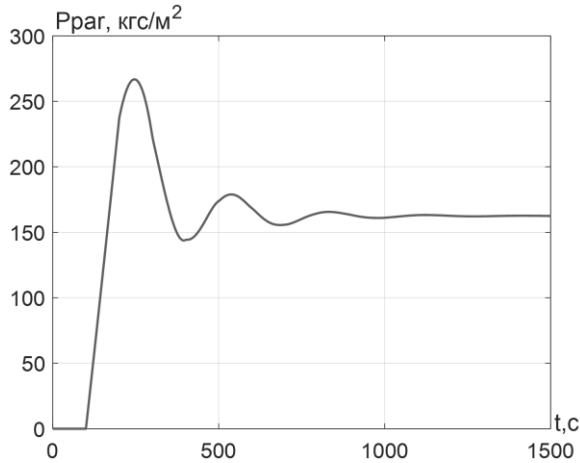


Рис. 4. Графік перехідного процесу в замкненій системі контуру регулювання тиску пару з ПІД-регулятором

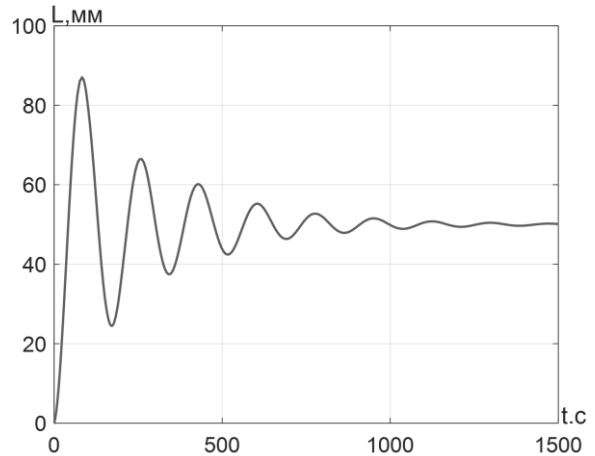


Рис. 5. Графік перехідного процесу в замкненій системі контуру регулювання рівня в барабані котла з ПІД-регулятором

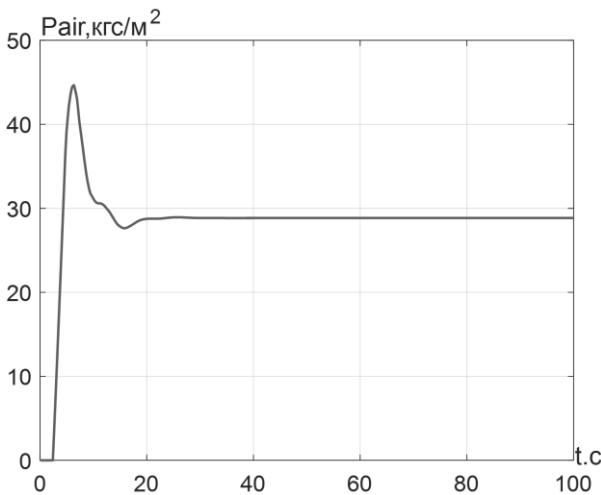


Рис. 6. Графік перехідного процесу в замкненій системі контуру регулювання тиску повітря ГПС з ПІД-регулятором

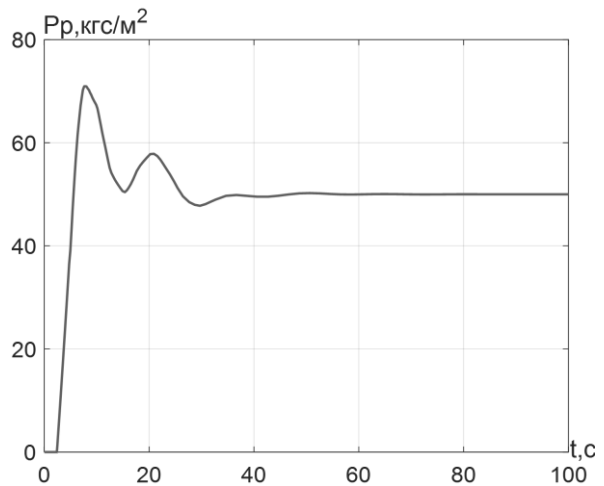


Рис. 7. Графік перехідного процесу в замкненій системі контуру регулювання тиску розрідження в топці котла з ПІД-регулятором

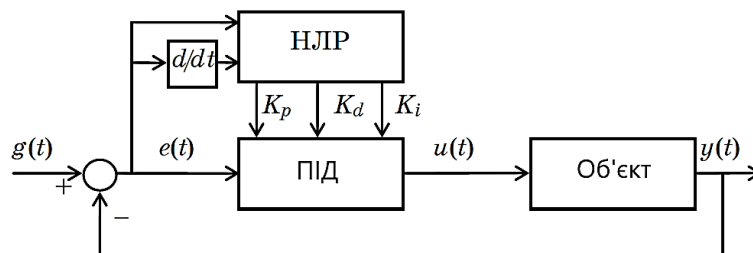


Рис. 8. Структурна схема нечіткого супервізора

змінної трикутну функцію приналежності. За результатами функціонування нечіткого регулятора побудовано графічне подання закону управління (рис. 10).

На рис. 11–14 показано перехідний процес у системі управління з нечітким супервізором.

Проведене математичне моделювання технологічних параметрів котельного агрегату показало, що використання нечіткого регулятора в супервізорному режимі дало змогу скоригувати коефіцієнт передачі класичного ПІД-регулятора.

Таблиця 2

Правила корегування коефіцієнтів ПІД-регулятора нечітким супервізором

№	e	$deldt$	K_p	K_D	K_I	№	e	$deldt$	K_p	K_D	K_I
1	НВ	НВ	В2	Н	С1	14	Н	ПМ	М1	В2	М2
2	НВ	НМ	В2	М1	С1	15	Н	ПВ	М1	В2	М2
3	НВ	Н	В2	С1	С1	16	ПМ	НВ	В1	В2	М1
4	НВ	ПМ	В2	С2	С1	17	ПМ	НМ	В1	В2	М1
5	НВ	ПВ	В2	В2	С1	18	ПМ	Н	В1	В2	М1
6	НМ	НВ	В1	М1	М1	19	ПМ	ПМ	С2	В2	М1
7	НМ	НМ	В1	В1	М1	20	ПМ	ПВ	В2	В2	М1
8	НМ	Н	В1	С2	М1	21	ПВ	НВ	В2	В2	С1
9	НМ	ПМ	С2	В2	М1	22	ПВ	НМ	В2	В2	С1
10	НМ	ПВ	В2	В2	М1	23	ПВ	Н	В2	В2	С1
11	Н	НВ	Н	В1	М2	24	ПВ	ПМ	В2	В2	С1
12	Н	НМ	Н	В2	М2	25	ПВ	ПВ	В2	В2	С1
13	Н	Н	М2	В2	Н						

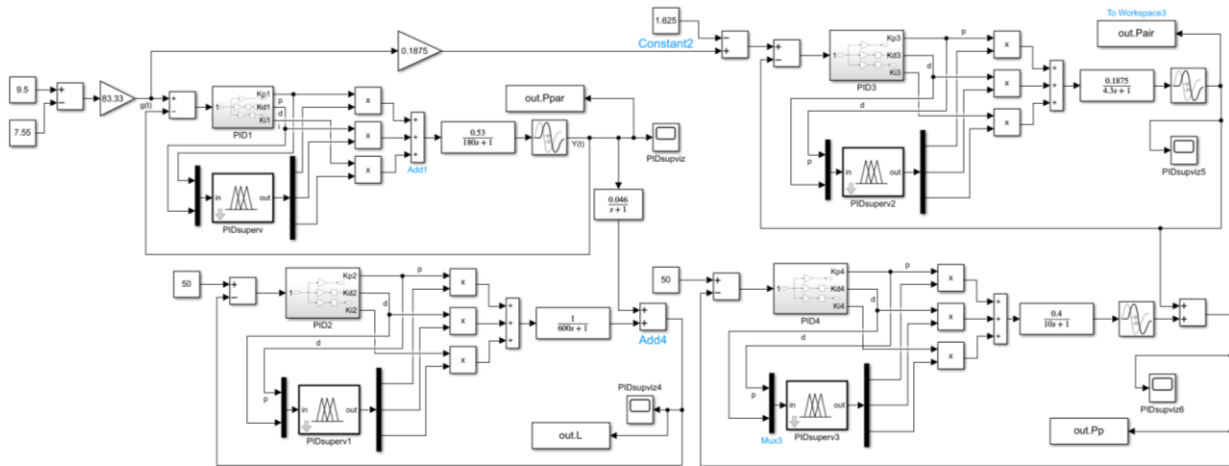


Рис. 9. Математичне моделювання системи управління з нечітким супервізором ПІД регулятора

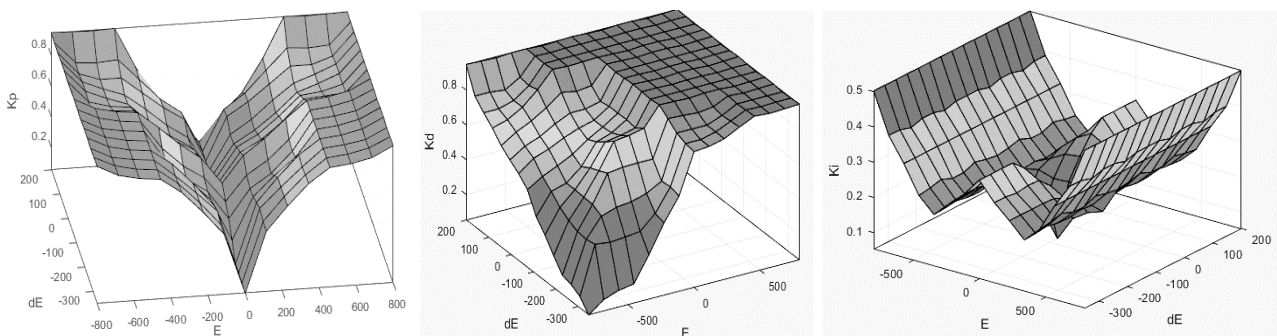


Рис. 10. Поверхні управління системою нечіткого висновку

В результаті використання нечіткого регулятора в супервізорному режимі покращено такі показники АСУ:

- для перехідного процесу регулювання тиску пару треба зменшити коливання перехідної характеристики та збільшити швидкодію процесу;

- для перехідного процесу регулювання рівня в барабані котла треба зменшити коливання перехідної характеристики та зменшити динамічну похибку;
- для перехідного процесу тиску повітря ГПС та розрідження в топці котла треба зменшити коливання перехідної характеристики та зменшити динамічну похибку.

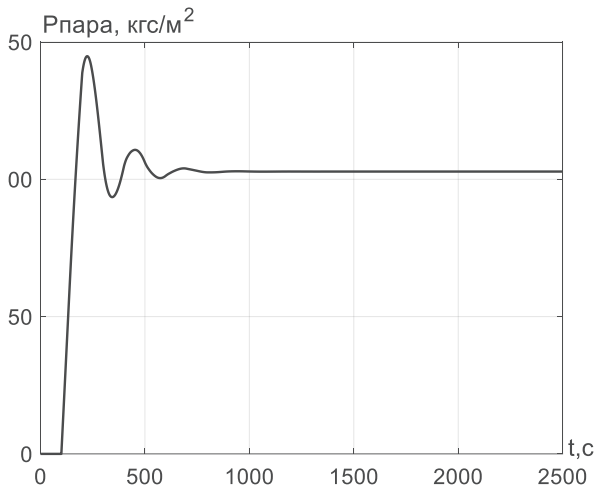


Рис. 11. Графік перехідного процесу в замкненій системі контуру регулювання тиску пару з нечітким супервізором ПІД-регулятора

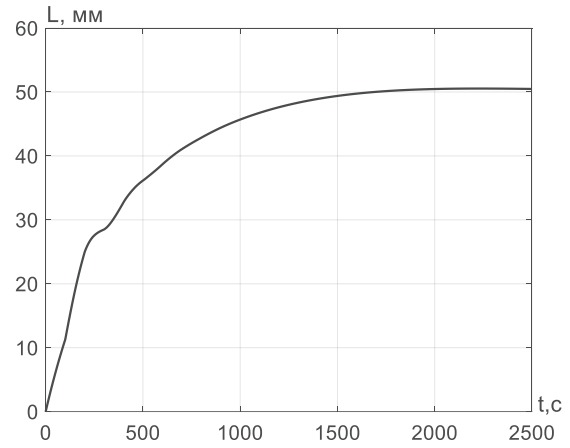


Рис. 12. Графік перехідного процесу в замкненій системі контуру регулювання рівня в барабані котла з нечітким супервізором ПІД-регулятора

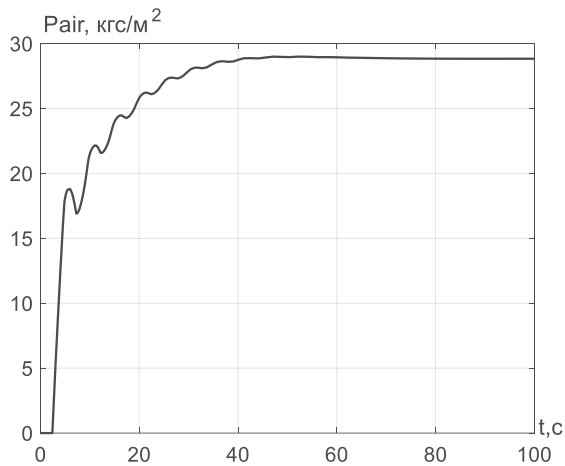


Рис. 13. Графік перехідного процесу в замкненій системі контуру регулювання тиску повітря ГПС з нечітким супервізором ПІД-регулятора

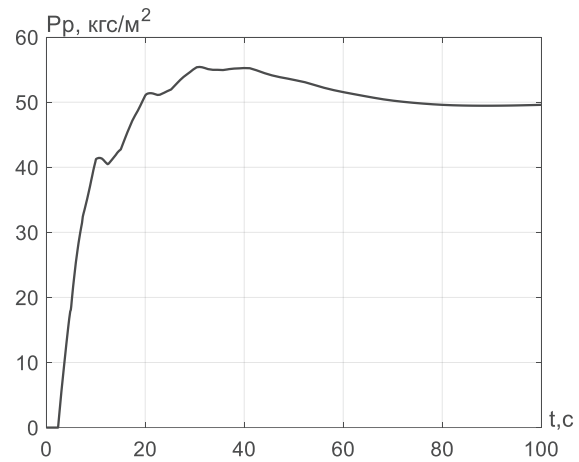


Рис. 14. Графік перехідного процесу в замкненій системі контуру регулювання тиску розрідження в топці котла з нечітким супервізором ПІД-регулятора

ЛІТЕРАТУРА:

1. Халатов А.А. Энергетика Украины: сучасний стан і найближчі перспективи. *Вісник НАН України*. 2016. № 6. С. 53–61.
2. Баган Т.Г. Робастне керування інерційними контурами котлоагрегату зі змінними параметрами на базі внутрішньої моделі: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.07; Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут». Київ, 2016. 152 с.
3. Taiwo O. Comparison of four methods of on-line identification and controller tuning. *IEE Proc., Control Theory Appl.* 2006. № 140 (5). P. 323–327.
4. Ковриго Ю.М., Баган Т.Г., Бунке О.С. Методи забезпечення стійкості систем регулювання на базі ПІ та ПІД регуляторів. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2013. № 3/3 (63). С. 58–63.
5. Штіфзон О.Й., Новіков П.В., Баган Т.Г. Розробка адаптуючого fuzzy-logic пристрою для керування в умовах параметричної нестационарності. *Східно-європейський журнал передових технологій*. 2018. Т. 1. № 2.
6. Новіков П.В., Бунке О.С. Інтелектуальна система керування інерційними технологічними параметрами на базі fuzzy-регулятора. *Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики: XV міжнар. наук.-прак. конф. асп., маг. і студ.* Київ, 2017.

7. Нейронні мережі в системах автоматизації: курс лекцій з дисципліни «Нейронні мережі в системах автоматизації» / уклад. О.В. Разживін. Запоріжжя: ТОВ «Технічний Університет «Метінвест Політехніка»», 2023. 296 с.

8. Разживін О.В., Бережна О.В., Сахацький С.О., Мурат В.М. Синтез систем управління динамічними процесами у котлі із застосуванням нейронної мережі прямого поширення. *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету*. 2023. Т. 3. № 103. С. 13–21.

REFERENCES:

1. Khalatov A.A. (2016). Enerhetyka Ukrainy: suchasnyy stan i nayblyzhchi perspektyvy [Energy of Ukraine: current state and nearest prospects]. *Visnyk NAN Ukrainy*. № 6, pp. 53–61. [in Ukrainian]

2. Bahan T.H. (2016). Robastne keruvannya inertsynymy konturamy kotloahrehatu zi zminnymy parametramy na bazi vnutrishn'oyi modeli: dys. ... kand. tekhn. nauk: 05.13.07 [Robust control of inertial circuits of the boiler unit with variable parameters based on the internal model: dissertation. ... candidate technical Sciences: 05.13.07]. Natsionalnyi tekhnichnyi universytet Ukrainy "Kyivskiy politekhnichnyi instytut". Kyiv. 152 s. [in Ukrainian]

3. Taiwo O. (2006). Comparison of four methods of on-line identification and controller tuning. *IEE Proc., Control Theory Appl.* № 140 (5), pp. 323–327.

4. Kovryho Yu.M., Bahan T.H., Bunke O.S. (2013). Metody zabezpechennya stiykosti system rehulyuvannya na bazi PI ta PID rehulyatoriv [Methods of ensuring the stability of regulation systems based on PI and PID regulators]. *Skhidno-yevropeyskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii*. № 3/3 (63), pp. 58–63. [in Ukrainian]

5. Shtifzon O.Y., Novikov P.V., Bahan T.H. (2018). Rozrobka adaptuyuchoho fuzzy-logic prystroyu dlya keruvannya v umovakh parametrychnoyi nestatsionarnosti [Development of an adaptive fuzzy-logic device for control in conditions of parametric non-stationarity]. *Skhidno-yevropeyskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii*. Т. 1. № 2. [in Ukrainian]

6. Novikov P.V., Bunke O.S. (2017). Intelektualna systema keruvannya inertsynymy tekhnolohichnymy parametramy na bazi fuzzy-rehulyatora [An intelligent system for controlling inertial technological parameters based on a fuzzy controller]. *Suchasni problemy naukovooho zabezpechennya enerhetyky: XV mizhnar. nauk.-prak. konf. asp., mah. i stud. K.* [in Ukrainian]

7. Razzhyvin O.V. (uklad.) (2023). Neyronni merezhy v systemakh avtomatyzatsiyi: kurs lektsiy z dystsypliny "Neyronni merezhy v systemakh avtomatyzatsiyi" [Neural networks in automation systems: a course of lectures on the discipline "Neural networks in automation systems"]. Zaporizhzhya: TOV "Tekhnichnyy Universytet "Metinvest Politekhnik". 296 s. [in Ukrainian]

8. Razzhyvin O.V., Berezhna O.V., Sakhatskyi S.O., Murat V.M. (2023). Syntez system upravlinnya dynamichnymy protsesamy u kotli iz zastosuvannyam neyronnoyi merezhi pryamoho poshyrennya [Synthesis of control systems for dynamic processes in a boiler using a forward propagation neural network]. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho avtomobilno-dorozhnoho universytetu*. Т. 3. № 103, pp. 13–21. [in Ukrainian]