

П. О. Качанов, М. В. Тарасенко

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

## СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ РІВНЯ ВОДИ В БАРАБАНИ КИТЛА ЕНЕРГОУСТАНОВКИ

**Вступ.** Розглянуто систему автоматичного регулювання рівня води в барабані парового котла. В контексті сучасних вимог до енергетичних установок, важливість точного та стабільного контролю рівня води в барабані стає ключовою для забезпечення безпеки та ефективності їх експлуатації. **Метою** статті є розробка та оцінка ефективної системи регулювання, яка усуває коливання рівня води в барабані, викликані змінами витрати живильної води або перегрітої пари. Проведено аналіз існуючих технічних рішень реалізації систем регулювання рівня в барабані. Запропоновано модель трьохімпульсної САР, яка набула найбільшого поширення в даному напрямку через свої характеристики. У **результаті** аналізу та моделювання системи в середовищі Simulink було підтверджено, що розроблена система відповідає всім поставленим вимогам та дозволяє прогнозувати її функціонування в реальних умовах. На основі проведених досліджень можна зробити висновок про значний потенціал запропонованої системи для підвищення надійності та ефективності енергетичних установок.

**Ключові слова:** система автоматичного регулювання, барабанний паровий котел, рівень живильної води.

### Вступ

Ефективна експлуатація енергоустановок безпосередньо залежить від точної підтримки технологічних параметрів. Це можливо завдяки якісній роботі автоматичних регуляторів, які застосовуються в системах автоматичного регулювання (САР). Одним із ключових моментів при проектуванні таких систем є вибір та налаштування автоматичних регуляторів.

Регулювання рівня води в барабані є одним з ключових контурів регулювання системи керування енергетичними котлоагрегатами. Високі вимоги до якості регулювання обумовлені кількома чинниками. Найсуттєвішим із них є те, що навіть незначні відхилення рівня можуть активувати захисні механізми, що призводять до аварійного відключення котла. Тому регулятор потребує точного налаштування для утримання рівня в невеликому діапазоні допустимих значень. Важливість точного та стабільного регулювання рівня в барабані незмінно підкреслюється у контексті забезпечення безпечної та ефективної роботи котельних установок.

Ще одним важливим моментом є відсутність самовирівнювання каналів регулювання та обурення, що є причиною відсутності рівноваги в системі. Це призводить до постійних коливань рівня барабана під впливом зовнішніх факторів. Оптимальна структура та налаштування системи регулювання допомагають зменшити ці коливання, що продовжує термін служби ключових елементів котла.

Таким чином, ключовим напрямком стає не лише вибір та налаштування автоматичних регуляторів, але й створення надійних математичних моделей, що сприяє більш точному та стабільному функціонуванню систем автоматичного регулювання в енергетичних установках.

### Огляд існуючих рішень

На сьогоднішній день актуальною темою є використання нейронних мереж у системах автоматичного регулювання.

У статті [1] описується використання штучних нейронних мереж (ANN) для моделювання термодинамічних процесів вугільних теплових електростанцій. Зокрема, вона порівнює ефективність двох видів ANN - Back Propagation Neural Network (BPNN) та Radial Basis Neural Network (RBNN) - у прогнозуванні показників ефективності та тепловіддачі котлів. Стаття підкреслює значення використання цих моделей для аналізу впливу різних параметрів на ефективність та визначення напрямку змін, які можуть покращити роботу станції.

Автори у [2] досліджують використання різних нейронних мереж, таких як Multilayer Perceptron (MLP), Nonlinear Autoregressive Exogenous (NARX) і Long Short Term (LSTM), для створення моделі. Вони роблять висновок, що LSTM має найкращу продуктивність. Також пропонується нова архітектура, яка інтегрує модель процесу у наявний контролер з використанням адаптивних ваг для підвищення ефективності контролю.

У роботі [3] запропоновано метод, що використовує сигнал парового потоку для контролю, забезпечуючи компенсацію впливу змін навантаження та уникнення феномену "фальшивого рівня води". Комбінація нейронних мереж із робастним контролером забезпечує стабільність і ефективність регулювання навіть при зміні умов експлуатації.

Дослідники у [4] використовують нейронні мережі для оцінки параметрів контролера та забезпечення оптимального налаштування зворотнього зв'язку в системах автоматичного керування. Вона порівнює підхід з нейронними мережами із традиційними методами, такими як метод Циглера-Нікольса, та демонструє переваги швидкості, ефективності та безпеки, які може забезпечити використання нейронних мереж у процесі налаштування контролерів.

Нейронні мережі передбачають рівень води в барабані на основі поточних та попередніх вимірювань рівня води, витрати пари та витрати подачі води. Запропонована ідея може підвищити точність САР, оскільки нейронні мережі можуть вловлювати тонкі

закономірності в них, що дозволяє їм передбачати майбутню поведінку системи з високою точністю.

Однак, слід зауважити, що внутрішні процеси у нейронних мережах які приводять до висновків, не завжди легко інтерпретувати. Це створює проблеми при спробі зрозуміти, як нейронна мережа приймає рішення, що в свою чергу ускладнює процес обслуговування системи та підвищує вимоги до кваліфікації персоналу.

У статті [5] розглянуто налаштування різних регуляторів, включаючи PID, PD-PI, PI-PD та 2DOF регулятори для контролю рівня води в барабані котла. Чотири контролери були налаштовані за допомогою інструментів оптимізації MATLAB з індексами продуктивності ITAE/ISTSE з метою забезпечення стабільної системи керування та хороших динамічних характеристик. В цілому кожен регулятор проявив різні сильні та слабкі сторони. Виходячи з наведених даних, вибір "найкращого" регулятора залежить від конкретних критеріїв продуктивності та компромісів між перерегулюванням, часом встановлення та відкиданням дії.

У роботі [6] проведено аналіз схем регулювання рівня в барабані парового котла. Було описано принцип роботи одноімпульсної, двоімпульсної та трьохімпульсної схем, а також схеми з диференціатором. Однак недоліком трьохімпульсної схеми наведено те, що при зникненні будь-якого з трьох сигналів схема припиняє роботу. На практиці ж для таких важливих сигналів завжди використовують принцип "2оо3", коли для кожного параметра встановлюють по 3 давачі і при відмові одного з давачів система продовжує роботу спираючись на два, що залишилися.

**Метою** даної статті є розробка системи автоматичного регулювання рівня води у барабані котлоагрегата. Автоматичний регулятор повинен забезпечувати сталість середнього рівня незалежно від навантаження котла та інших збуджуючих впливів.

### **Властивості барабанного котла як об'єкта регулювання рівня**

Регулювання живлення котельних агрегатів зводиться до підтримки матеріального балансу між відведенням пари та подачі води. Параметром, що характеризує матеріальний баланс є рівень води в барабані котла.

Надійність роботи котельного агрегату багато в чому визначається якістю регулювання рівня. Зниження рівня нижче допустимих меж може призвести до порушення циркуляції в екранних трубах, в результаті нього відбудеться підвищення температури стінок труб, що обігриваються, і їх перепал. Значне підвищення рівня води в барабані також може призвести до аварійних наслідків, оскільки при підвищеному рівні можливе закидання води в пароперегрівач і турбіну, що викличе занесення пароперегрівача солями або поломку турбіни.

Зі сказаного ясно, що навіть короткочасне зниження або підвищення рівня понад задані межі неприпустимо. У зв'язку з цим до точності підтримки рівня висуваються дуже високі вимоги.

Якість регулювання живлення визначається як точністю підтримки рівня на заданому значенні, а й рівномірністю подачі поживної води. Необхідно забезпечити рівномірне живлення котла водою, оскільки часті та глибокі зміни витрати поживної води можуть спричинити значні температурні зміни у металі економайзера.

Барабаним котлам з природною циркуляцією властива значна акумулююча здатність, яка проявляється у перехідних режимах. Якщо в стаціонарному режимі положення рівня води в барабані котла визначається станом матеріального балансу, то в перехідних режимах положення рівня впливає велика кількість збурень. Основними з них є:

- зміна витрат поживної води;
- зміна парозйому котла за зміни навантаження споживача;
- зміна паропровідності котла під час зміни навантаження топки.

У барабанних котлів відхилення рівня перехідних режимах може відповідати знаку математичного небалансу. У стаціонарних режимах барабан та екранні труби котла заповнені водою при температурі кипіння, в якій містяться бульбашки пари. Питомо вага пари в барабанних казанах значно відрізняється від питомої ваги води. Різниця питомої ваги пари і води, а, отже, і обсягів при зміні режиму, призводить до відхилення рівня в той чи інший бік. Відхилення рівня води в барабані котла при порушенні стаціонарного режиму у бік, протилежний знаку матеріального балансу, отримала назву "набухання" рівня. Так, наприклад, збільшення пароутворення в екранних трубах при матеріальному балансі призведе до витіснення деякої кількості води з екранних труб і підвищення рівня води в барабані. І, навпаки, зниження паропроодуктивності котла спричинить зменшення парового обміну в екранних трубах і, відповідно, зниження рівня.

Відмінною рисою регулювання рівня в барабані котла є те, що в цьому випадку регулюється рівень двофазного середовища. У зв'язку з цим вплив кожного фактора призводить до зміни стану двофазного середовища і як наслідок – зміни рівня.

Прийнято, що максимально допустимі відхилення води в барабані складають 100 мм від середнього значення, встановленого заводом-виробником. Середнє значення може не збігатися з геометричною віссю барабана. Зниження рівня за межі 100 мм вважається "опуском" води, а перевищення його - "переживленням".

Зниження рівня до місця приєднання опускних труб циркуляційного контуру може призвести до порушення живлення та охолодження водою підйомних труб. Наслідком цього може бути порушення міцності труб в місцях стикування з корпусом барабана, а в найбільш важких випадку - перепал. Надмірне підвищення рівня може призвести до зниження ефективності внутрішньо-барабанних сепараційних пристроїв та передчасного заносу солями пароперегрівача. Переживлення барабана та закидання частинок води в турбіну може спричинити тяжкі механічні пошкодження її ротора та лопаток. Поста-

чання барабана водою здійснюється за двома нитками трубопроводів живильної води, одна з яких служить резервною.

Відхилення рівня води в барабані від середнього значення пов'язано з наявністю небалансу між припливом живильної води та витратою пари; воно відбувається в наслідок зміни вмісту пари в пароводяній суміші підйомних труб за рахунок коливань тиску пари в барабані або зміни теплосприйняття випарних поверхонь нагріву. Зміна рівня під дією небалансу між витратою пари та води описується рівнянням:

$$F(\rho_B - \rho_{\Pi}) \frac{d\Delta H_6}{dt} = G_{\Pi B} - G_{\Pi\Pi}, \quad (1)$$

де  $F$  – площа дзеркала випаровування,  $m^2$ ;  $\rho_B, \rho_{\Pi}$  – щільність води та насиченої пари,  $kg/m^3$ ,  $G_{\Pi\Pi}$  та  $G_{\Pi B}$  – витрати пари та води,  $kg/c$ . Приймаючи, що

$$F(\rho_B - \rho_{\Pi}) \frac{H_6^0}{G_{\Pi B}^0} = \frac{1}{k_{\Pi\Pi}}; \quad (2)$$

$$(G_{\Pi B} - G_{\Pi\Pi}) \frac{1}{G_{\Pi B}^0} = x; \frac{\Delta H_6}{H_6^0} = y$$

та перейшовши до безрозмірних величин після інтегрування одержимо:

$$y(t) = k_{\Pi\Pi} \int_0^t x(t) dt. \quad (3)$$

З цього рівняння можна визначити час проходження рівня від мінімального  $H_6^{min}$  до максимального  $H_6^{max}$  допустимого значення при ступінчастому збудженні витратою води:

$$\Delta t = \frac{F(\rho_B - \rho_{\Pi})(H_6^{max} - H_6^{min})}{G_{\Pi B} - G_{\Pi\Pi}}. \quad (4)$$

Крива перехідного процесу за рівнем води в барабані та збудженні витратою живильної води приведена на рис. 1, а. Динаміка цієї ж ділянки при збудженні витратою пари, рис. 1, б [7].

Опукла форма кривої зміни рівня при збудженні збільшенням витрати пари пояснюється тим, що в перший момент після збудження, рівень води в барабані зростає в результаті різкого зменшення тиску пари. Це в свою чергу призводить до збільшення вмісту пари в підйомних трубах циркуляційного контуру та зростання рівня.

Після того, як тиск пари в барабані прийме нове стале значення, відповідне новому значенню витрати пари, зміна рівня буде протікати у відповідності з рівнянням матеріального балансу. Дане явище носить назву "збудження" рівня.

При математичному моделюванні динаміки ділянки за рівнем при збудженні витратою пари, описується різницею аперіодичної та інтегруючої ланок.

### Синтез САР

Виходячи з вимог до регулювання рівня води у барабані, автоматичний регулятор повинен забезпечувати сталість середнього рівня незалежно від навантаження котла та інших збуджуючих впливів.

У перехідних режимах зміна рівня може відбуватися досить швидко, тому регулятор живлення для забезпечення малих відхилень рівня повинен підтримувати сталість витрат живильної води та пари.

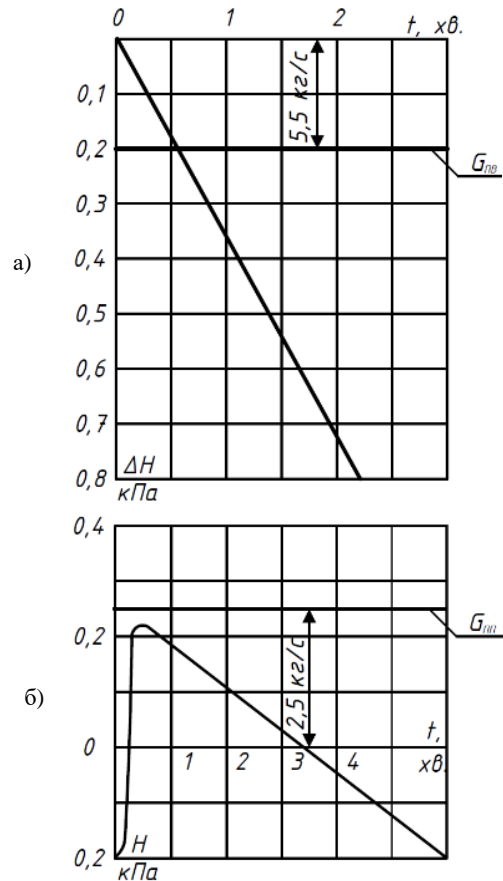


Рис. 1. Динамічні характеристики котла за рівнем води в барабані при збудженнях

Це завдання виконує трьохімпульсний ПІД-регулятор, принципова схема якого зображена на рис. 2. Регулятор переміщує клапан при появі сигналу небалансу між витратою живильної води  $G_{\Pi B}$  та пари  $G_{\Pi\Pi}$ .

Модель парового котла як об'єкту регулювання має наступну передавальну функцію (далі ПФ) з входом - витратою живильної води і виходом - рівнем води в барабані

$$W_B(s) = \frac{1}{T_1 s} - \frac{K}{T_2 s + 1}, \quad (5)$$

У процесі синтезу САР прийемо, що передавальні функції об'єкту регулювання по витраті води та пари протилежні за знаком, а рівні за величиною, тобто  $W_{\Pi}(s) = -W_B(s)$ .

За експериментальними даними отримана ПФ об'єкта регулювання по каналу витрати води:

$$W_B(s) = \frac{1}{60s} - \frac{2}{22.4s + 1}, \quad (6)$$

По каналу керуючого впливу є два контури регулювання. Перший контур складається з регулятора  $W_P(s)$ , трубопроводу  $W_{TP}(s)$ , датчика витрати води та підсилювальної ланки  $K_2$ . Цей контур призначений для стабілізації витрати живильної води при збудженні  $v$ , що характеризує зміну тиску в трубопроводі. Еквівалентна передавальна функція першого контуру має наступний вигляд:

$$W_{P*}(s) = \frac{W_K(s) * W_{TP}(s)}{1 + K_2 * W_P(s) * W_{TP}(s)} \quad (7)$$

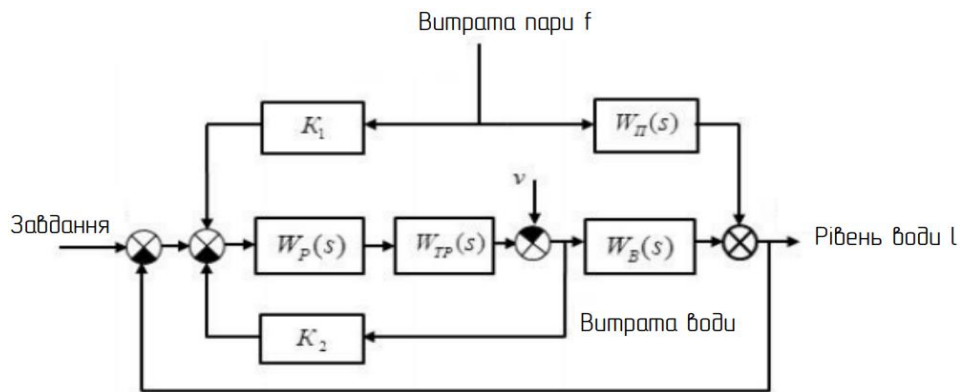


Рис. 2. Структурна схема трьохімпульсної САР:

$W_{II}(s), W_B(s)$  - ПФ об'єкта регулювання по каналах витрати води та витрати пари;  
 $W_{TP}(s)$  - ПФ трубопроводу;  $W_P(s)$  - ПФ регуляторів;  $W_K(s)$  - ПФ коригувального пристрою

Другий контур містить об'єкт регулювання  $W_{P*}(s)$  та датчик рівня  $W_B(s)$ . Оскільки інерційність елементів в першому контурі незначна порівняно з інерційністю об'єкта регулювання, то перехідні процеси в першому контурі завершаться раніше, ніж у другому контурі. Перший контур стабілізує витрату води, де застосовуються ПІ або ПІД регулятори. Після завершення перехідного процесу в першому контурі, його передавальну функцію можна розглядати як передавальну функцію деякого умовного регулятора для другого контуру.

Маємо:

$$W_{P*}(s) = \frac{W_P(s) \cdot W_{TP}(s)}{1 + K_2 \cdot W_P(s) \cdot W_{TP}(s)} = \frac{1}{\frac{1}{W_P(s) \cdot W_{TP}(s)} + K_2}, \quad (8)$$

Оскільки:

$$K_2 = \frac{1}{W_P(s) \cdot W_{TP}(s)}, \quad (9)$$

то

$$W_{P*}(s) \approx \frac{1}{K_2} = K_{P*}, \quad (10)$$

Таким чином при охопленні ПІ або ПІД регулятора глибоким зворотнім зв'язком у вигляді підсилювальної ланки, це з'єднання можна розглядати як деякий наведений П-регулятор.

Розрахунок зовнішнього контуру полягає в виборі параметру цього умовного П-регулятора. Користуючись методом Циглера - Нікольса для зовнішнього контуру САР, отримуємо:

$$K_P = 0,307 = \frac{1}{K_2}, \quad (11)$$

Відповідно:

$$K_2 \frac{1}{0,307} \approx 3,257 \frac{1}{K_2}, \quad (12)$$

Використовуємо ПІ-регулятор з параметрами настройки  $K_{II}=0,1$ ;  $T_I=4$  сек.

Проведемо розрахунок коефіцієнта  $K_1$  коригувального пристрою по каналу витрати води. Передаточна функція системи по каналу витрати пара має вигляд:

$$W_{If}(s) = \left( K_1 + W_{II}(s) * \frac{1}{W_P(s)} * \frac{1}{W_B(s)} \right) * W_{Ig}(s), \quad (13)$$

де

$$W_{Ig}(s) = \frac{W_P(s) \cdot W_B(s)}{1 + W_{P*}(s) \cdot W_B(s)} \quad (14)$$

передавальна функція системи по заданому впливу. Беручи  $W_{II}(s) \approx -W_B(s)$  та  $W_{P*}(s) = K_{P*}(s)$ , отримуємо  $W_{If}(s) \approx \left( K_1 * -\frac{1}{K_{P*}} \right) * W_{Ig}(s)$ . Для забезпечення умови інваріантності беремо  $W_{If}(s) = 0$ , тобто  $K_1 = \frac{1}{K_{P*}} = K_2 = 3,257$ .

### Моделювання САР

Моделювання САР проводилось в середовищі Simulink. Схема САР представлена на рис. 3. Результати моделювання наведені у табл. 1 та 2.

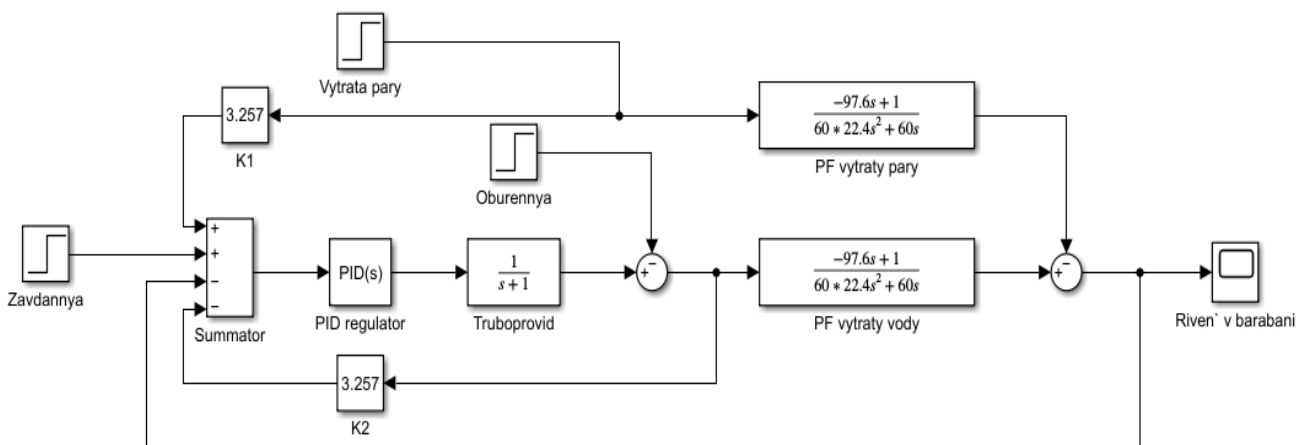


Рис. 3. Схема САР у середовищі Simulink

Таблиця 1 – Показники якості перехідного процесу САР

Час регулювання (сек)	Перерегулювання (%)
438	5,09

Таблиця 2 – Зміни рівня при ступінчастому збільшенні витрати пари на 1 тон/годину та при ступінчастому зменшенні витрати води через зміну тиску в трубопроводі на 1 тон/годину

Вид збуджування	Максимальне відхилення рівня (мм)
Збільшення витрати пари на 1 тон/год	0,065
Зменшення витрати пари на 1 тон/год	0,07

### Висновки

Отримана САР з показником перерегулювання у 5,09% та часом регулювання 438 секунд. При ступінчастому впливі відхилення рівня становить

0,065мм при збільшенні витрати пари на 1 тон/год та 0,07мм при зменшенні на 1 тон/год. Одержані результати задовольняють вимогам до САР рівня води у барабані.

Результати моделювання показали, що САР з синтезованим трьохімпульсним регулятором забезпечує необхідну якість регулювання. САР забезпечує швидкодію перехідного процесу та точність регулювання, крім цього вона ефективно усуває впливи зміни витрати живильної води та пари, які часто відбуваються в процесі роботи котельного агрегату.

Серед майбутніх напрямків досліджень у сфері САР слід виділити технології машинного навчання. Сучасні котли оснащені датчиками, які записують інформацію про численні робочі параметри, включаючи температуру, тиск і витрати. Після цього ці дані можуть бути відправлені на платформу обробки та аналізу в реальному часі. Оператори можуть передбачати такі проблеми та вживати запобіжних заходів, використовуючи алгоритми машинного навчання для виявлення тенденцій і відхилень у даних.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Deshpande Purva, Nilima Warke, Prakash Khandare, Vijay Deshpande. "Thermal power plant analysis using artificial neural network." In 2012 Nirma University International Conference on Engineering (NUiCONE), pp. 1-6. IEEE, 2012, DOI:10.1109/NUiCONE.2012.6493290
- Douglas T. Mugweni, Hadi Harb, "Neural Networks-based Process Model and its Integration with Conventional Drum Level PID Control in a Steam Boiler Plant ", International Journal of Engineering and Manufacturing (IJEM), Vol.11, No.5, pp. 1-13, 2021, DOI:10.5815/ijem.2021.05.01
- Yang P., Peng D.G., Yang Y.H., Wang Z.P. "Neural networks internal model control for water level of boiler drum in power station" – Proceedings of 2004 International Conference 302 on Machine Learning and Cybernetics, vol. 5, 26-29 Aug. 2004, p.3300 – 3303, DOI:10.1109/ICMLC.2004.1378607
- S. Surendran and V. Kumar, "Neural network based pi controller parameter calculation on a boiler drum level system" Procedia Technology, ICETES, vol. 24, pp. 1616–1622, 2016 DOI:10.1016/j.protcy.2016.05.164
- G. A. Hassaan, "Control of Boiler-drum water level using PID, PD-PI, PI-PD and 2DOF controllers", International Journal of Engineering and Techniques, vol.10, issue 1, 10 pages, 2024
- Пура А.С., Тарахтій О.С. "Аналіз існуючих схем регулювання рівня в барабані парового котла." Молодий вчений. 2019. No 11(75). С. 163–166.
- Попович М.Г., Ковальчук О.В. Теорія автоматичного керування – К.: Либідь. 2007. – 655 с.
- Zak S.H. Systems and Control. Oxford University Press, 2003. – 770 p
- Александров Е.Е., Голуб О.П., Костенко Ю.Т. Теорія автоматичного керування. Т1.- Харків: ХДПУ, 2000. -154с.
- Александров С.Є., Козлов С.П., Кузнецов Б.І. Автоматичне керування рухомими об'єктами і технологічними процесами: Підручник у 3-х томах. Т.1 Теорія автоматичного керування. – Харків: НТУ „ХПІ”, 2002. - 490 с.

Received (Надійшла) 27.05.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 24.07.2024

### System of automatic regulation of the water level in the boiler drum of the power plant

P. Kachanov, M. Tarasenko

**Abstract. Introduction.** The article discusses the automatic water level control system in the drum of a steam boiler. In the context of modern requirements for energy installations, the importance of precise and stable control of water level in the drum becomes crucial for ensuring safety and efficiency of their operation. The **aim** of the article is to develop and evaluate an effective regulation system that eliminates water level fluctuations in the drum caused by changes in feed water flow or superheated steam. An analysis of existing technical solutions for implementing water level control systems in the drum has been conducted. A model of a three-element control system has been proposed, which has gained the most popularity in this direction due to its characteristics. **Through analysis** and simulation of the system in the Simulink environment, it has been confirmed that the developed system meets all specified requirements and allows for predicting its performance under real conditions. Based on the conducted research, it can be concluded that the proposed system has significant potential for increasing the reliability and efficiency of thermal power plants.

**Keywords:** Automatic Regulation System, Drum Steam Boiler, Feed Water Level.