

**ОСОБЛИВОСТІ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ РІВНЯ РІДИНИ В БАРАБАННОМУ ПАРОГЕНЕРАТОРІ ЯК ОБ'ЄКТИ УПРАВЛІННЯ****В.Ф. Ложечніков, С.М. Григоренко, Н.В. Ложечнікова, М.С. Авраменко**Одеський національний політехнічний університет,  
просп. Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна; e-mail: fontan.lev@gmail.com

Розглянуто особливості математичного моделювання динамічних властивостей рівня пароводяної суміші в барабанному парогенераторі. Показано, що вкрай несприятливе для автоматичних систем управління закипання рівня пароводяної суміші в барабанному парогенераторі є як наслідком протікання складних теплофізичних процесів, так і конструктивних особливостей технологічного ділянки. Тому використання для моделювання динаміки рівня рідини математичних моделей, в яких не враховується вплив акумулюючої і дроселюючої властивостей паропроводу на витрату насиченої пари з парогенератора, а основне рівноваги вплив (витрата пара) розглядається як незалежна змінна, не є коректним. Запропонована лінійна математична модель ділянки живлення барабанного парогенератора, яка враховує динамічні властивості паропроводу, що з'єднує парогенератор з споживачем. Аналіз структурної схеми запропонованої математичної моделі показав, що між барабанним парогенератором і паропроводом існує зворотній взаємозв'язок по витраті пари. Негативний характер зв'язку пояснює самовирівнювання рівня, пов'язане зі зміною положення регулюючого клапана витрати пари або виділенням тепла в котельній камері. Відповідно зміна площі прохідного перетину регулюючого клапана турбіни без зміни регулятором теплового навантаження тепловиділення в котельній камері або ядерному реакторі призводить до тимчасової зміни витрати пари. Це призводить до менш інтенсивного закипання рівня і його переходу до нового сталого значення. Стабілізація рівня відбувається нижче вихідного значення внаслідок короткочасного порушення балансу між подачею живильної води в парогенератор і відбором пари. Виявлені в результаті рішення системи диференціальних рівнянь особливості поведінки рівня пароводяної суміші дозволяють більш адекватно моделювати роботу існуючих та перспективних систем управління живленням барабанних парогенераторів.

**Ключові слова:** барабанний парогенератор, енергетичний барабанний котел, автоматична система регулювання рівня пароводяної суміші, математична модель, технологічна ділянка живлення парогенератора.

**Актуальність теми**

Промислові барабанні парогенератори виконують перетворення хімічної енергії рідкого або газоподібного палива в іншу її форму, яка зручна для транспортування і промислового використання, тобто в електричний струм, пар, або просто гарячу воду для обігріву житлових і виробничих приміщень. Вони можуть відрізнятися від номінальної парової потужністю і експлуатаційними режимами. Однак, якісні властивості динаміки рівня  $h$  пароводяної суміші різних барабанних парогенераторів однакові.

Управління рівнем пароводяної суміші в парогенераторі зводиться до підтримки матеріального балансу між відводом пари  $D$  і подачею живильної води  $G_{pv}$ . Відхилення рівня  $\Delta h$  в парогенераторі від заданого значення пов'язано з наявністю небалансу між припливом живильної води і витратою пара. Воно відбувається також внаслідок зміни змісту пара в пароводяної суміші в результаті коливань тиску перегрітої пари в паропроводі  $P_m$  чи зміни теплосприю випарних поверхонь нагріву.

До стабілізації рівня пред'являються досить жорсткі вимоги, оскільки по відхиленню рівня води в парогенераторі від номінального значення передбачені технологічні та аварійні системи захисту котла або всього енергоблоку. Зниження рівня до місця приєднання опускних труб циркуляційного контуру промислового парогенератора може привести до порушення живлення та охолодження водою екранних труб. Наслідком цього може бути порушення міцності труб в місцях стикування з корпусом барабана, а в найбільш важкому випадку – переповнення живильною водою. Надмірне підвищення рівня може призвести до зниження ефективності роботи сепараційних пристроїв всередині парогенератора і відкладенням солей жорсткості в пароперегрівачі. Попадання частинок води з барабана в паропровід знижує температуру перегрітої пари і може стати причиною важких механічних пошкоджень ротора і лопаток турбіни. Зміна рівня води всередині деяких допустимих меж практично не впливає на роботу парогенератора. Разом з тим механічна втома металу барабана, а також споживання енергії насосами залежать від якості регулювання витрати живильної води. Різкі коливання витрати сприяють появі втомних явищ в металі, знижують надійність і економічність роботи живильних насосів. Тому поряд з регулюванням рівня бажано підтримувати баланс між виробництвом пара і подачею живильної води з мінімальними коливаннями її витрати.

Точність підтримки рівня для більшості барабанних парогенераторів, при якій забезпечується достатня ефективність відділення вологи від пара і необхідний запас води на випадок перерви харчування, практично однакова і становить  $\pm 50$  мм [1]. Надавати рівноваги вплив на відхилення рівня води можуть витрата пари на турбіну, зміна тепловиділення в топці барабанного котла, зміна тиску і температури живильної води.

Надавати збурюючий вплив на відхилення рівня води можуть витрата пари на турбіну, зміна тепловиділення в топці барабанного котла  $Q$ , зміна тиску і температури живильної води.

Характер кривих розгону за рівнем при збуренні витратою пари і живильної води однаковий, як для парогенераторів АЕС, так і для барабанних котлів середньої потужності. Опукла форма кривої зміни рівня (рис. 1, а) [1], при ступінчастому збільшенні витрати пари пояснюється тим, що в перший момент після нанесення збурення рівень води зростає в результаті різкого зменшення тиску пара в барабані  $P_b$ . Це в свою чергу призводить до збільшення в обсязі бульбашок пари в киплячій пароводяної суміші парогенератора і зростання рівня. Після того, як тиск пари в барабані прийме нове стає значення, відповідне новому значенню витрати пари, зміна рівня буде протікати відповідно до рівняння матеріального балансу. Розглянуте явище носить назву «набухання» рівня.

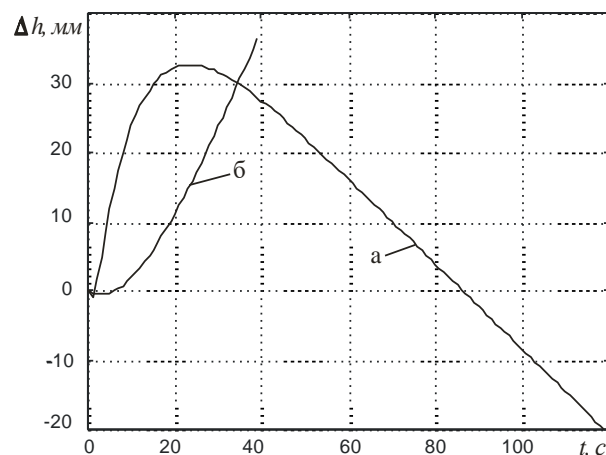


Рис. 1. Динамічна зміна рівня рідини у парогенераторі

Збільшення теплопідводу до екранних поверхонь нагріву котла також викликає «набухання» рівня за рахунок збільшення паровмісту пароводяної суміші. Однак величина відхилення рівня менше, оскільки в результаті збільшення генерації пари при незмінному положенні регулюючих клапанів турбіни або мережевих підігрівачів відбувається підвищення тиску пари в барабані, що, в свою чергу, призводить до зменшення бульбашок пари і уповільнення «набухання». Зниженню величини «набухання» також сприяє інерційність зміни теплопідводу до пароводяної суміші через радіаційні і конвективні поверхні нагрівання барабанного котла. Збільшення витрати живильної води призводить до короткочасного «просідання» рівня за рахунок зменшення паровмісту, коли температура живильної води нижче температури пароводяної суміші в парогенераторі (рис. 1, б).

Розглянуті динамічні властивості барабанних парогенераторів є вкрай несприятливими з точки зору стабілізації рівня води. Цим пояснюється той факт, що для автоматичного регулювання рівня непридатні звичайні одноконтурні системи регулювання.

### Огляд досліджень

У рішенні проблеми регулювання рівня пароводяної суміші в барабанному парогенераторі можна виділити кілька основних напрямків - підвищення точності вимірювання рівня та основних збурюючих впливів [2] і синтез нових алгоритмів управління [3].

В основі більшості рішень, щодо підвищення якості регулювання і надійності систем управління, лежить математичне моделювання, як технологічні ділянки, так і проектованої системи управління. Скипання рівня при різкому падінні тиску пари в парогенераторі є вкрай несприятливим фактором для системи управління. Первісне відхилення рівня визначається енергетичним небалансом в системі. Оскільки робота регулятора рівня заснована на підтримці матеріального балансу між припливом (витрата живильної води) і стоком (витрата пара), то це призводить до зміни регулятором рівня витрати живильної води в протилежну сторону і збільшення матеріального небалансу. Вирішити зазначену проблему дозволяє трьохімпульсна система регулювання рівня [4], в якій на вхід регулятора, крім сигналу по рівню в парогенераторі, надходять з протилежними знаками сигнали по витраті пари і живильної води (рис. 2, а).

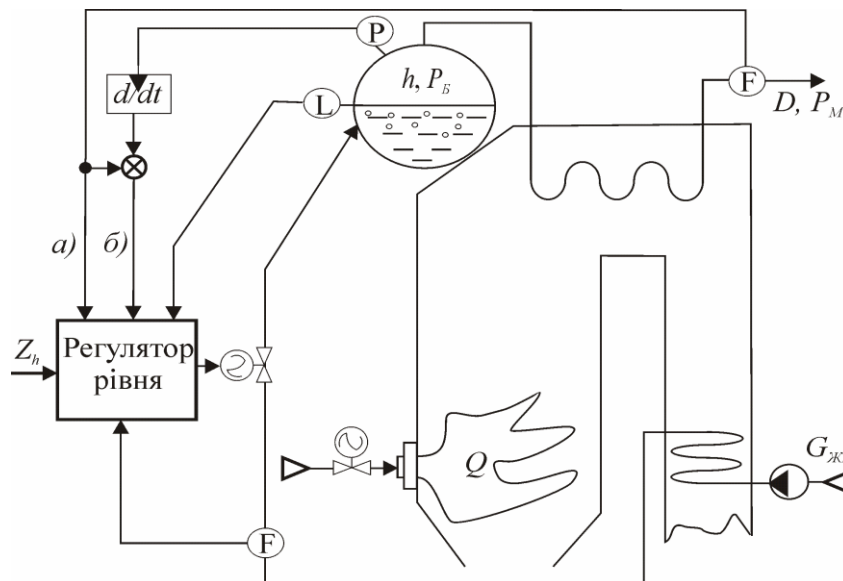
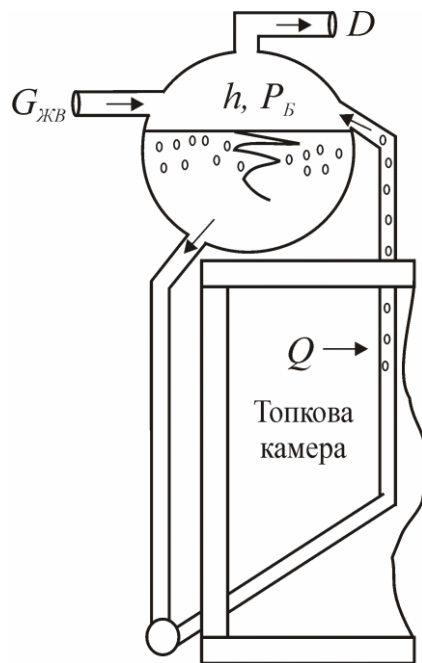


Рис. 2. АСУ рівня у барабанному парогенераторі

Інший підхід пов'язаний з синтезом багаторежимних систем управління живленням барабаних парогенераторів. Оскільки інтенсивність закипання рівня залежить від теплового навантаження парогенератора і режимів його роботи (базовий або регулюючий), тиск пари в барабані, процентний вміст насиченої пари в барабані нижче рівня рідини, котельній воді і екранних трубах впливають на тривалість перехідного процесу, динамічне відхилення регульованої величини і статичну помилку. Науково-технічна задача з розширення діапазону роботи систем управління живильною водою є актуальною і для електростанцій з комбінованим циклом для плавної інтеграції відновлюваної енергії [5]. Діапазон роботи таких установок включає стан гарячого і холодного пуску, в яких щільність пароводяної суміші може істотно змінюватись. Нелінійна динаміка рівня барабана котла в цьому випадку моделюється в термінах лінійних моделей з параметричними варіаціями. Такий підхід дозволяє зменшити помилки управління на 77% [6].

Однак, при математичному моделюванні системи управління живленням парогенератора основний збурюючий вплив - витрата пари - розглядається як незалежна змінна (рис. 3).



**Рис. 3.** Барабанный парогенератор

Таке припущення справедливе при визначенні передавальної функції пристрою зв'язку за основним впливом по збуренню в трьохімпульсній системі управління живлення парогенератора. Насправді витрата пари залежить від тепловиділення в котельній камері барабанного котла та гідравлічного опору паропроводу між парогенератором і споживачем пари (електрична турбіна, мережевий підігрівач, технологічне виробництво та ін.), тобто  $D = f(Q, \xi_{pp})$ .

### Мета роботи

*Метою* статті є включення в математичну модель динаміки рівня рідини в барабанному парогенераторі моделі паропроводу. Удосконалена математична модель дозволить перевірити працездатність АСУ на скидання навантаження і встановити максимальні відхилення рівня води без проведення натурних випробувань і спрацьовування технологічних захистів за рівнем води в барабані.

## Основна частина

Барабанний парогенератор, як об'єкт регулювання рівня, уявляє систему ємностей, що складається з власне барабана, опускний трубної системи і екранної трубної системи (підйомні труби). Ці ємності заповнені двофазним середовищем (вода і насичена пара (рис. 3)).

Живильна вода, підігріта в економайзері, подається в барабан котла і впливає одночасно на матеріальний і енергетичний баланс (регулюючий вплив). Теплова енергія димових газів передається екранним трубам, фестону і котельному пучку, і впливає тільки на енергетичний баланс (збурюючий вплив). У математичній моделі ці параметри будуть розглядатися як незалежні змінні.

Зміна рівня в такій схемі відбувається через зміни регулюючим клапаном витрати живильної води або відхилення тиску перегрітої пари з боку споживача  $P_p$ .

Динамічні характеристики рівня в барабанному парогенераторі описуються лінійним диференціальним рівнянням

$$T_2 \Delta \ddot{h} + T_1 \Delta \dot{h} = k_1 \Delta \dot{G}_{pv} + k_2 \Delta G_{pv} + k_3 \Delta \dot{D} + k_4 \Delta D + k_5 \Delta \dot{Q} + k_6 \Delta Q, \quad (1)$$

яке передбачає, що температура води в опускних трубах близька до температури насичення, а потоки маси і енергії з продувкою дуже малі в порівнянні з іншими потоками; температура металевих поверхонь барабана і труб в динаміці і статиці дорівнює температурі насичення [7]. Коефіцієнти рівняння (1) визначаються алгебраїчними залежностями:

$$T_2 = a_6 b_7 (a_1 a_4 - a_2 a_3); \quad T_1 = \left( \frac{1}{b_4} - b_8 \right) (a_1 a_4 - a_2 a_3);$$

$$k_1 = a_5 b_7 (a_4 b_1 - a_2); \quad k_2 = a_1 - a_3 b_1 + a_4 b_1 b_6 - a_2 b_6; \quad k_3 = b_7 (a_1 a_4 - a_2 a_3 - a_3 a_4 b_3 + a_2 a_5);$$

$$k_4 = a_3 b_3 - a_4 b_3 b_6 - a_1 + a_2 b_6; \quad k_5 = a_4 a_5 b_7; \quad k_6 = a_4 b_6 - a_3, \quad a_2 = \bar{\rho}' \bar{i}' - \bar{\rho}'' \bar{i}'', \quad a_4 = \bar{\rho}' - \bar{\rho}'',$$

$$a_6 = F \bar{\rho}'', \quad b_4 = b_5 = \frac{1}{F}, \quad b_1 = \bar{i}_{жв}, \quad b_3 = \bar{i}'', \quad \text{звичайними} \quad -$$

$$a_1 = \bar{V} \left[ \frac{d(\rho'' \bar{i}'')}{dP} \right]_0 + \bar{V}_w \left[ \frac{d(\rho' \bar{i}' - \rho'' \bar{i}'')}{dP} \right]_0 + c_m m_m \left( \frac{d\theta'}{dP} \right)_0, \quad a_3 = \bar{V} \left[ \frac{d(\rho'')}{dP} \right]_0 + \bar{V}_w \left[ \frac{d(\rho' - \rho'')}{dP} \right]_0,$$

$$a_5 = \bar{V}_{Db} \left( \frac{d\rho''}{dP} \right)_0, \quad \text{та приватними похідними} \quad b_2 = \bar{G}_{pv} \left( \frac{\partial i_{pv}}{\partial \theta_{pv}} \right)_0, \quad b_6 = \left( \frac{\partial V_{Dk}}{\partial P} \right)_0,$$

$$b_7 = \left( \frac{\partial V_{Dk}}{\partial G_{Dh}} \right)_0, \quad b_8 = \left( \frac{\partial V_{Dk}}{\partial h} \right)_0. \quad \text{У цих співвідношеннях: } \bar{V} - \text{сумарний обсяг барабана,}$$

опускних і екранних труб,  $\bar{V}_w$  - сумарний обсяг води в барабані, опускних і екранних трубах,  $c_m$  - теплоємність металу труб і барабана при температурі насичення,  $m_m$  - маса металу труб і барабана,  $\bar{\rho}'$ ,  $\bar{\rho}''$ ,  $\bar{i}'$ ,  $\bar{i}''$  - щільність і ентальпія води при температурі насичення і насиченої пари;  $\bar{P}$  - тиск пари в барабані,  $\bar{\theta}'$  - температура насичення,  $\bar{i}_{pv}$ ,  $\bar{\theta}_{pv}$  - ентальпія і температура живильної води;  $\bar{V}_{Db}$  - обсяг насиченої пари в барабані над дзеркалом випаровування,  $F$  - площа дзеркала випаровування,  $\bar{V}_{Dk}$  - обсяг парових каналів в пароводяної суміші,  $\bar{h}$  - номінальний рівень води в барабані. Чисельні значення коефіцієнтів розраховуються за масогабаритними розмірами і теплотехнічними параметрами для будь-якого барабанного парогенератора.

Зміна тиску пари в барабані без урахування впливу гідравлічного опору паропроводу описується диференціальним рівнянням

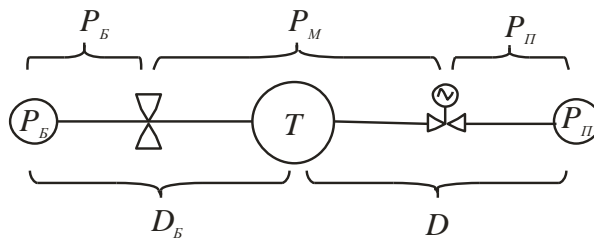
$$\Delta \dot{P}_b = k_7 \Delta G_{pv} + k_8 \Delta D + k_9 \Delta Q, \quad (2)$$

де  $k_7 = \frac{a_2 - a_4 b_1}{a_2 a_3 - a_4 a_1}$ ,  $k_8 = \frac{a_4 b_3 - a_2}{a_2 a_3 - a_4 a_1}$ ;  $k_9 = -\frac{a_4}{a_2 a_3 - a_4 a_1}$ . Після нанесення будь-якого

збурення тиск в барабані буде змінюватися за інтегральним законом, оскільки в рівняння (1) і (2) входить незалежна змінна по витраті пари  $\Delta D$ . Таким чином, якщо не враховувати в математичній моделі залежність витрати пари від підведення тепла до пароводяної суміші і від площі прохідного перетину регулюючого клапана по витраті пари  $S_{rk}$ , результати моделювання динаміки рівня не будуть адекватні реальним перехідним процесам. Тобто зміна рівня буде визначатися тільки енергетичним небалансом і зміною обсягу бульбашок пари (рис. 1, а). Для вирішення даної проблеми необхідно доповнити рівняння (1) і (2) моделлю паропроводу, яка зв'яже зміну тиску в барабані  $\Delta P_b$  зі зміною витрати пари через паропровід  $\Delta D$ .

Оскільки перегрітий пар є стискуваним середовищем, то структурно паропровід, для спрощення аналітичного виведення, можна уявити складеним з трьох елементів: дроселя, ємності і змінного гідравлічного опору (рис. 4), які описуються системою рівнянь [8]

$$\begin{cases} \Delta P_b - \Delta P_m = a_L \Delta D_b; \\ T_p \frac{\bar{D}}{\bar{P}_m} \frac{d \Delta P_m}{dt} = \Delta D_b - \Delta D; \\ \Delta P_m - \Delta P_p = a_{rk} \Delta D - b_{rk} \Delta S_{rk}. \end{cases} \quad (3)$$



**Рис. 4.** Структурна схема математичної моделі паропроводу

Дросельний елемент враховує втрати тиску на тертя і стаціонарне прискорення в паропроводі, акумулюючий елемент  $T$  - кількість пара в паропроводі ( $D_b$  - витрата пари з парогенератора в паропровід). Регулюючий орган враховує зміну площі прохідного перетину на витрату пари  $\Delta S_{rk}$ . Зміна тиску пари на вході  $\Delta P_b$  і виході  $\Delta P_p$  паропроводу, також впливають на витрату пари. Рішення системи рівнянь (3) щодо змінних  $\Delta P_m$  і  $\Delta D$ , дозволяє записати рівняння

$$T_3 \Delta \dot{D} + \Delta D = T_4 \Delta \dot{P}_p + k_{13} \Delta P_p + T_5 \Delta \dot{S}_{rk} + k_{14} \Delta S_{rk} + k_{15} \Delta P_b, \quad (4)$$

$$T_3 \Delta \dot{P}_m + \Delta P_m = k_{10} \Delta P_b + k_{11} \Delta P_p + k_{12} \Delta S_{rk}, \quad (5)$$

$$\text{де } T_3 = \frac{a_{rk} a_L}{a_{rk} + a_L} T_p \frac{\bar{D}}{\bar{P}_m}, \quad T_4 = -\frac{a_L}{a_{rk} + a_L} T_p \frac{\bar{D}}{\bar{P}_m}, \quad T_5 = \frac{b_{rk} a_L}{a_{rk} + a_L} T_p \frac{\bar{D}}{\bar{P}_m}, \quad k_{10} = \frac{a_{rk}}{a_{rk} + a_L},$$

$$k_{11} = \frac{a_L}{a_{rk} + a_L}, \quad k_{12} = -\frac{a_L b_{rk}}{a_{rk} + a_L}, \quad k_{13} = -\frac{1}{a_{rk} + a_L}, \quad k_{14} = \frac{b_{rk}}{a_{rk} + a_L}, \quad k_{15} = \frac{1}{a_{rk} + a_L},$$

$$T_p = \frac{m}{\bar{M}} \left( \frac{\chi + 1}{2\chi} \right), \quad a_L = \left( \frac{\lambda L}{D_{in}} + \sum_{i=1}^n \xi_i \right) \frac{\bar{M}}{\rho S_{pr}^2}; \quad a_{rk} = \frac{\xi_{rk} \bar{M}}{\rho S_{rk}^2}; \quad b_{rk} = \frac{\xi_{rk} \bar{M}^2}{\rho S_{rk}^3}.$$

Аналіз структурної схеми математичної моделі (рис. 5) показує, що між барабанним парогенератором і паропроводом існує зворотний взаємозв'язок по витраті пари. Негативний характер зв'язку пояснює саморівновагу рівня, пов'язану зі зміною положення регулюючого клапана витрати пари або виділенням тепла в котельній камері.

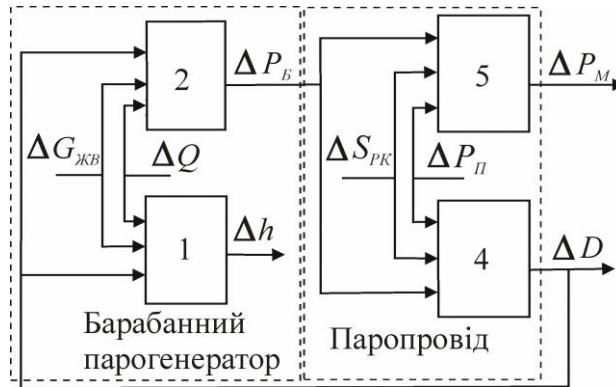


Рис. 5. Структурна схема удосконаленої математичної моделі

Згідно з отриманими співвідношенням, інерційність процесів в паропроводі і коефіцієнт передачі по каналу „тиск пари в барабані - витрата пара до споживача” залежить від довжини паропроводу  $L$ , його внутрішнього діаметра  $D_{in}$ , площі внутрішнього перетину  $S_{pr}$ , коефіцієнтів тертя  $\lambda$  і місцевих опорів  $\xi_i$ . А також, маси пари в паропроводі  $m$ , витрати пари в сталому режимі  $\bar{M}$ , показника ступеня адиабати  $\chi$ , щільності пари  $\rho$ , коефіцієнта опору  $\xi_{rk}$  і площі прохідного перетину регулюючого клапана  $\bar{S}_{rk}$  в сталому режимі.

Спільне рішення рівнянь (1), (2), (3), (4), стосовно газо-мазутного котла ГМ-50, дозволяє досліджувати динамічні характеристики рівня в барабанному парогенераторі, коли витрата пари залежить від тепловиділення в котельній камері і положення регулюючого органу по витраті пари (рис. 6). Витрата пари до споживача, згідно (5), впливає на зміну тиску перегрітої пари в головній паровій магістралі  $\Delta P_m$ . Тиск перегрітої пари визначає баланс між генерацією пари в парогенераторі і його витратою через парову турбину на ТЕС або на мережеві підігрівачі гарячої води. Тому зміна площі прохідного перетину регулюючого клапана  $\Delta S_{rk}$ , без зміни регулятором теплового навантаження тепловиділення в котельній камері, призводить до тимчасової зміни витрати пари, що обумовлено, в основному, акумулюючою здатністю паропроводу. Це призводить до менш інтенсивного закипання рівня (якщо прохідний перетин регулюючого клапана  $\Delta S_{rk}$  збільшується) і його переходу до нового сталого значення (рис. 6, б). Стабілізація рівня відбувається нижче вихідного значення внаслідок короткочасного порушення балансу між подачею живильної води в парогенератор і відбором пари. Якщо при математичному моделюванні не враховується

принципова залежність витрати пари від гідравлічного опору паропроводу, який з'єднує парогенератор з споживачем пари, то результати моделювання не будуть адекватно описувати властивості реального об'єкта (рис. 6, а).

Оцінка якості регулювання перехідних процесів в трьохімпульсній системі регулювання рівня без урахування визначеної залежності  $D = f(Q, \xi_{pp})$ , дає в чотири рази більше динамічне відхилення (рис. 7, а), що при стрибкоподібному збільшенні на 30% витрати пари споживачем призводить до спрацювання сигналізації і аварійної зупинки котла.

Отримана математична модель дозволяє досліджувати можливість використання додаткового сигналу зі зміни тиску пари в барабані для поліпшення якості перехідних процесів.

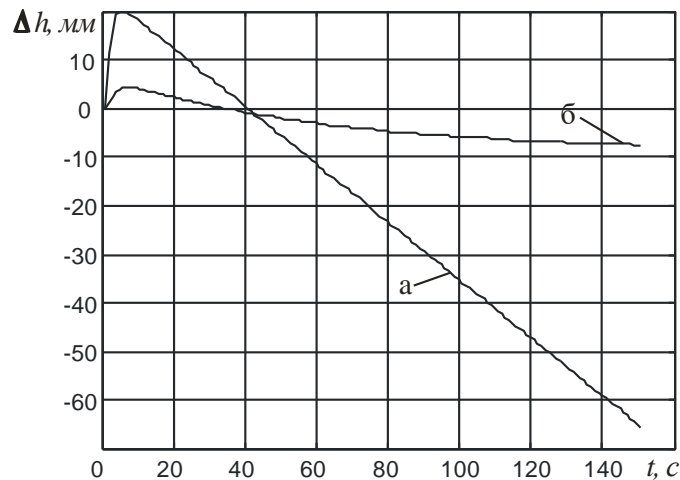


Рис. 6. Зміна рівня рідини в парогенераторі

Традиційно, сигнал по тепловиділенню в котельній камері  $Q = C_p \frac{dP_b}{dt} + D$  ( $C_p$  - постійний коефіцієнт, що характеризує масову акумулюючу здатність пароводяної суміші, барабана і екранних труб котла) застосовується в системі регулювання теплового навантаження, коли використання сигналу по витраті палива не ефективно [9-11].

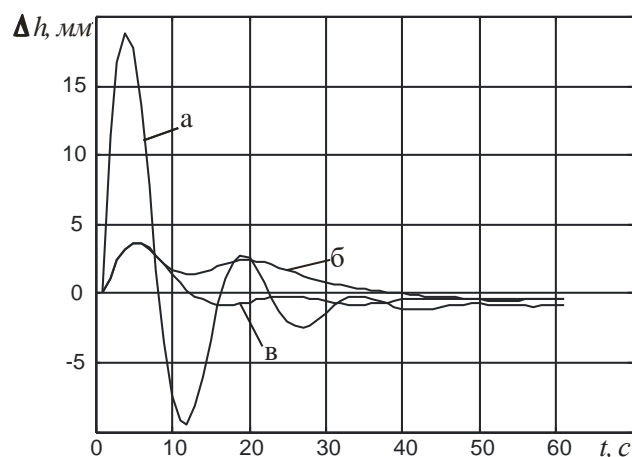


Рис. 7. Перехідні процеси регулювання рівня рідини

Дослідження, проведене на отриманій математичній моделі, показало, що введення в класичну трьохімпульсну систему управління рівнем (рис. 7, б) додаткового сигналу за швидкістю зміни тиску пара в парогенераторі з негативним коефіцієнтом дозволяє скоротити час регулювання більш ніж в два рази (рис. 7, в).



## Висновки

У даній роботі для парогенераторів барабанного типу отримана математична модель, що дозволяє підвищити точність моделювання перехідних процесів в автоматичних системах регулювання рівня пароводяної суміші. Показано, що урахування в математичній моделі зворотного впливу витрати пари через паропровід на його тиск в самому парогенераторі, призводить до самовирівнювання об'єкта управління по каналу «зміна площі прохідного перетину регулюючого клапана  $\Delta S_{rk}$  - рівень води в парогенераторі».

Таким чином, стрибкоподібні зміни витрати пари споживачем (до 50% від номінальної витрати) не призводять до аварійного перевищення або зниження рівня. Використання сигналу по тиску пари в барабанному парогенераторі дозволяє не тільки поліпшити динамічні показники якості регулювання рівня, а й зменшити статичну помилку, оскільки в класичній трьохімпульсній системі регулювання щільність пара вважається постійною.

## Список літератури

1. Демченко В.А. Автоматизация и моделирование процессов АЭС и ТЭС. Одесса: «Астропринт», 2001. 305с.
2. Авраменко С.В., Тарасюк В.П. Математическая модель системы мониторинга уровня жидкости в барабане котла. *Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ»*. 2012. № 41. С. 100-110.
3. Дегтяренко В.Н., Зимин В.В., Костенко А.И. Организация перевозок грузов. М: «Издательство Приор», 1997. 448 с.
4. Ablay G. A robust estimator-based optimal algebraic approach to steam generator feedwater control system. *Turk. J. Electr. Eng. Comput. Sci.* 2016. №24. Pp. 206-218.
5. Кулаков Г.Т., Кулаков А.Т., Кухоренко А.Н. Математическое моделирование переходных процессов трехимпульсной системы автоматического регулирования питания водой парогенератора на сброс нагрузки. *Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*. 2014. № 1. С. 57-64.
6. Mazurenko A., Denysova A., Balasarian G., Klymchuk A. , Borisenko K. Improving the operation modes efficiency in heat pump systems of hot water supply with the two-stage heat accumulation. *Eastern-european journal of enterprise technologies*. 2017. 1/8. Pp.27-34.
7. Sunil P.U., Barve J., Natara P.S.V. A robust heat recovery steam generator drum level control for wide range operation flexibility considering renewable energy integration. *Energy*. 2018. V.163. Pp. 873-893.
8. Ложечников В.Ф., Стопакевич А.А. Структура многомерной математической модели динамики барабанного котла средней мощности. *Оптимизация управления, информационные системы и компьютерные технологии: Труды Украинской академии экономической кибернетики (Южный научный центр)*. Киев-Одесса: ИСЦ, 1999. Вып.1. Ч.2. С. 167-176.
9. Профос П. Регулирование паросиловых установок. М.: Энергия, 1967. 368с.
10. Maksymov M., Lozhechnikov V., Maksymova O., Lysiuk O. Improvement of the control system over drum boilers for burning combustible artificial gases. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. V.4, №8(88). Pp. 10-16.
11. Михайленко В.С., Харченко Р.Ю. Синтез нейромережевої системи автоматичного регулювання рівня води в барабані котла енергоблоку ТЕС. *Наукові вісти НТУУ «КПІ»*. 2012. № 5. С. 45-51.
12. Mikhaïlenko V.S., Kharchenko R.Yu. Analysis of Traditional and Neuro\_Fuzzy Adaptive System of Controlling the Primary Steam Temperature in the Direct Flow Steam Generators in Thermal Power Stations. *Automatic Control and Computer Sciences*. 2014. Vol.48, №6. Pp. 334-344.

## ОСОБЕННОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ УРОВНЯ ЖИДКОСТИ В БАРАБАННОМ ПАРОГЕНЕРАТОРЕ КАК ОБЪЕКТЕ УПРАВЛЕНИЯ

В.Ф. Ложечников, С.Н. Григоренко, Н.В. Ложечникова, М.С. Авраменко

Одесский национальный политехнический университет,  
просп. Шевченко, 1, Одесса, 65044, Украина; e-mail: fontan.lev@gmail.com

Рассмотрены особенности математического моделирования динамических свойств уровня пароводяной смеси в барабанном парогенераторе. Показано, что крайне неблагоприятное для автоматических систем управления вскипание уровня пароводяной смеси в барабанном парогенераторе, является как следствием протекания сложных теплофизических процессов, так и конструктивных особенностей технологического участка. Поэтому, использование для моделирования динамики уровня математических моделей, в которых не учитывается влияние аккумулирующего и дросселирующего свойства паропровода на расход насыщенного пара из парогенератора, а основное возмущающее воздействие (расход пара) рассматривается как независимая переменная, является некорректным. Предложена линейная математическая модель участка питания барабанного парогенератора, которая учитывает динамические свойства паропровода, соединяющего парогенератор с потребителем. Анализ структурной схемы предложенной математической модели показал, что между барабанным парогенератором и паропроводом существует обратная взаимосвязь по расходу пара. Отрицательный характер этой связи объясняет самовывравнивание уровня, связанное с изменением положения регулирующего клапана расхода пара или тепловыделением в топочной камере. Соответственно, изменение площади проходного сечения регулирующего клапана турбины, без изменения регулятором тепловой нагрузки тепловыделения в топочной камере или ядерном реакторе, приводит к временному изменению расхода пара. Это приводит к менее интенсивному вскипанию уровня и его переходу к новому установившемуся значению. Стабилизация уровня происходит ниже исходного значения вследствие кратковременного нарушения баланса между подачей питательной воды в парогенератор и отбором пара. Выявленные, в результате решения системы дифференциальных уравнений, особенности поведения уровня пароводяной смеси позволяют более адекватно моделировать работу существующих и перспективных систем управления питанием барабанных парогенераторов.

**Ключевые слова:** барабанный парогенератор, энергетический барабанный котел, автоматическая система регулирования уровня пароводяной смеси, математическая модель, технологический участок питания парогенератора.

**FEATURES OF MATHEMATICAL MODELING OF LIQUID LEVEL'S DYNAMIC IN DRUM STEAM GENERATOR AS A CONTROLLED OBJECT**

V.F. Lozhechnikov, S.N. Grigorenko, N.V. Lozhechnikova, M.S. Avramenko

Odessa National Polytechnic University

1, Shevchenko Ave., Odessa, 65044, Ukraine; e-mail: fontan.lev@gmail.com

The article discusses the features of mathematical modeling of the dynamic properties of the level of a steam-water mixture in a drum-type steam generator. It is shown that the boiling up of the level of the steam-water mixture in the drum-type steam generator, which is extremely unfavorable for automatic control systems, is a consequence of the occurrence of complex thermophysical processes and the design features of the technological section. Therefore, the use of mathematical models for modeling the level dynamics, which do not take into account the effect of the accumulating and throttling properties of the steam line on the flow of saturated steam from the steam generator, and the main disturbing effect (steam consumption) is considered as an independent variable, is not correct. The article proposes a linear mathematical model of the power supply section of the drum steam generator, which takes into account the dynamic properties of the steam line connecting the steam generator with the consumer. Analysis of the structural scheme of the proposed mathematical model showed that between the drum-type steam generator and the steam line there is an inverse relationship with steam consumption. The negative nature of this connection explains the self-leveling associated with a change in the position of the steam flow control valve or heat generation in the combustion chamber. Accordingly, a change in the flow area of the turbine control valve, without changing the heat release by the heat load regulator in the combustion chamber or nuclear reactor, leads to a temporary change in steam consumption. This leads to less intense boiling up of the level and its transition to a new steady-state value. Stabilization of the level occurs below the initial value due to a brief disruption of the balance between the feedwater supply to the steam generator and the extraction of steam. Identified, as a result of solving a system of differential equations, the peculiarities of the behavior of the steam-water mixture level make it possible to more adequately simulate the operation of existing and prospective power management systems for drum-type steam generators.

**Keywords:** drum steam generator, energy drum boiler, automatic system for regulating the level of steam-water mixture, mathematical model, technological feeding section of steam generator.