

О. М. НИКУЛІНА, В. П. СЕВЕРИН, А. І. БУБНОВ, О. М. КОНДРАТОВ

РОЗРОБКА НЕЛІНІЙНОЇ МОДЕЛІ ПАРОГЕНЕРАТОРА АЕС ДЛЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ОПТИМІЗАЦІЇ УПРАВЛІННЯ

Парогенератори сучасних енергоблоків атомних електричних станцій є критичними елементами енергоблоків та підлягають модернізації. Ідентифікація моделі парогенератора для оптимізації керування парогенератором є актуальним завданням. Мета даної статті полягає у розробці нелінійної математичної моделі парогенератора у відносних змінних для її використання в інформаційній технології оптимізації управління. Наведено математичні моделі процесів теплопередачі та пароутворення у парогенераторі у вигляді систем диференціальних рівнянь у відносних змінних. Ці моделі призначені для імітаційного моделювання теплових процесів у парогенераторі. Теплові процеси пов'язані з підведенням до парогенератора живильної води від системи водної підготовки та теплоносія від ядерного реактора, а також з відведенням пари з парогенератора до головного парового колектору. За законом збереження кількості руху робочого середовища у циркуляційному контурі парогенератора під дзеркалом випаровування отримано нелінійне диференціальне рівняння процесу циркуляції пароводяної суміші. Розроблено нелінійне диференціальне рівняння для обчислення похідної витрати пари через дзеркало випаровування у відносних змінних. Рівняння допоміжного обладнання – головного парового колектору, приводу клапана парової турбіни та виконавчого механізму регулюючого живильного клапана приведено до відносних змінних. З використанням рівнянь теплопередачі, пароутворення, циркуляції та допоміжного обладнання побудовано нелінійну модель парогенератора у просторі станів як об'єкта управління у відносних змінних. Наведено формули для обчислення значень постійних параметрів моделі парогенератора за значеннями конструктивних і технологічних параметрів. Розроблено програму для нелінійної математичної моделі парогенератора ПГВ-1000, яка включена в модуль моделей парогенераторів інформаційної технології. Це дозволить вирішити завдання ідентифікації та оптимізації інформаційної керуючої системи рівня води у парогенераторі ПГВ-1000 енергоблоку з ядерним реактором ВВЕР-1000.

Ключові слова: математична модель, парогенератор, атомна електрична станція, диференціальні рівняння, оптимізація, управління, інформаційна технологія.

O. M. NIKULINA, V. P. SEVERYN, A. I. BUBNOV, O. M. KONDRATOV

DEVELOPMENT OF NONLINEAR MODEL OF NPP STEAM GENERATOR FOR INFORMATION TECHNOLOGY OF CONTROL OPTIMIZATION

Steam generators of modern power units of nuclear power plants are critical elements of power units and are subject to modernization. Identification of the steam generator model for optimizing the control of the steam generator is an urgent task. The purpose of this article is to develop a nonlinear mathematical model of a steam generator in relative variables for its use in information technology for optimizing control. Mathematical models of heat transfer and steam formation processes in a steam generator are presented in the form of systems of differential equations in relative variables. These models are intended for simulation modeling of thermal processes in a steam generator. Thermal processes are associated with the supply of feed water to the steam generator from the water treatment system and coolant from the nuclear reactor, as well as with the removal of steam from the steam generator to the main steam collector. According to the law of conservation of the momentum of the working medium in the circulation circuit of the steam generator under the evaporation mirror, a nonlinear differential equation for the process of circulation of the steam-water mixture is obtained. A nonlinear differential equation has been developed to calculate the derivative of the steam flow through the evaporation mirror in relative variables. The equations for the auxiliary equipment – the main steam header, the steam turbine valve actuator and the control feed valve actuator – are reduced to relative variables. Using the equations of heat transfer, steam formation, circulation and auxiliary equipment, a nonlinear model of the steam generator in the state space as a control object in relative variables is constructed. Formulas are given for calculating the values of the constant parameters of the steam generator model from the values of its design and technological parameters. A program for a nonlinear mathematical model of the PGV-1000 steam generator has been developed, which is included in the information technology steam generator model module. This will make it possible to solve the problems of identifying and optimizing the information control system of the water level in the steam generator PGV-1000 of the power unit with a nuclear reactor VVER-1000.

Keywords: mathematical model, steam generator, nuclear power plant, differential equations, optimization, control, information technology.

Вступ. Для підвищення безпеки атомних електричних станцій (АЕС) України необхідна модернізація систем управління [1]. Розвиток сучасних математичних методів та передових інформаційних технологій дає можливість підвищити точність моделювання процесів управління. Парогенератори АЕС є складними теплотехнічними об'єктами і функціонують при високих температурах та тиску робочого середовища. Тому дослідження, присвячені удосконаленню моделей парогенераторів, є актуальними.

Аналіз літератури. Система управління парогенератором є критично важливою для безпеки АЕС [2]. Моделювання парогенератора враховує теплові, гідравлічні, парові та механічні процеси [3, 4]. Отримані передатні функції ділянки живлення парогенератора ПГВ-1000 [5]. Для управління парогенератором виконане імітаційне моделювання за системою диференціальних рівнянь [6], використана стохастична апро-

ксимація [7], проведена оптимізація параметрів [8–10], розроблені математичні моделі теплових процесів у відносних змінних [11]. Запропонована інформаційна технологія моделювання та оптимізації складних динамічних систем [12]. У роботах з моделювання парогенераторів використані лінійні моделі в абсолютних змінних з великою кількістю розмірних параметрів, які є погано обумовленими. Усе це обґрунтовує доцільність розробки нелінійної математичної моделі парогенератора у відносних змінних.

Мета та задачі дослідження. Мета статті полягає в розробці нелінійної математичної моделі парогенератора у відносних змінних для її використання в інформаційній технології оптимізації управління. Для досягнення мети поставлено задачі.

1. Розглянути моделі теплових процесів парогенератора з відносними змінними.

2. Вивести рівняння витрати пари через дзеркало

випаровування у відносних змінних.

3. Розробити моделі допоміжного обладнання енергоблоку для управління парогенератором.

4. Розробити модель парогенератора як об'єкта управління у вигляді нелінійної системи диференціальних рівнянь з відносними змінними.

Моделі теплових процесів. Модель теплопередачі від теплоносія до живильної води, що подаються в парогенератор (ПГ), у відносних змінних є системою диференціальних рівнянь (СДР) другого порядку [11]:

$$\begin{cases} d\theta_t/d\tau = b_{tq}q - a_{tm}(\theta_t - \theta_m), \\ d\theta_m/d\tau = a_{mt}(\theta_t - \theta_m) - a_{mw}(\theta_m - \theta_w), \end{cases} \quad (1)$$

де $\theta_t, \theta_m, \theta_w$ – середні температури води в ПГ, теплоносія і металу трубок теплообміну;

τ – змінна часу;

$b_{tq}, a_{tm}, a_{mt}, a_{mw}$ – постійні параметри рівнянь;

q – теплова потужність теплоносія.

Вхідною величиною є теплова потужність теплоносія, вихідною – середня температура води в ПГ та теплова потужність, передана від трубок теплообміну до живильної води,

$$q_m = a_{qm}(\theta_m - \theta_w), \quad (2)$$

де a_{qm} – постійний параметр рівняння.

З рівнянь матеріального і теплового балансів робочого середовища в парогенераторі отримана модель пароутворення у відносних змінних [11]:

$$\begin{cases} \pi_{pt} = \frac{b_{pw}g_w + b_{ps}g_s + q_m}{a_{pw}\xi_w + a_{ps}\xi_s}, \quad \frac{d\pi_p}{d\tau} = \pi_{pt}, \\ g_g = b_{gq}q_m - (a_{gw}\xi_w + a_{gs}\xi_s)\pi_{pt} - b_{gg}g_w, \\ d\xi_w/d\tau = b_{wg}(g_w - g_g) - a_{wp}\xi_w\pi_{pt}, \\ d\xi_s/d\tau = b_{sg}(g_g - g_s) - a_{sp}\xi_s\pi_{pt}, \\ d\xi_c/d\tau = (c_c - a_{cc}\xi_c)\pi_{pt} + b_{cg}(g_s - g_a), \end{cases} \quad (3)$$

де π_{pt} – швидкість зміни тиску пароводяної суміші в ПГ;

$b_{pw}, b_{ps}, a_{pw}, a_{ps}$ – постійні параметри рівняння швидкості зміни тиску пароводяної суміші в ПГ;

g_w і g_s – витрати живильної води і пари;

ξ_w і ξ_s – об'єми води і пари в ПГ;

π_p – тиск пароводяної суміші в ПГ;

g_g – допоміжна змінна рівнянь швидкостей зміни об'ємів води і пари в ПГ;

$b_{gq}, a_{gw}, a_{gs}, b_{gg}$ – постійні параметри рівняння допоміжної змінної;

$b_{wg}, a_{wp}, b_{sg}, a_{sp}$ – постійні параметри рівнянь швидкостей зміни об'ємів води і пари в ПГ;

ξ_c – рівень води в ПГ;

c_c, a_{cc}, b_{cg} – постійні параметри рівняння швидкості зміни рівня води в ПГ;

g_a – витрата пари через дзеркало випаровування (ДВ).

Цій СДР відповідають початкові умови номінального режиму:

$$\pi_p(0) = 1, \xi_w(0) = 1, \xi_s(0) = 1, \xi_c(0) = 0.$$

Рівняння (1)–(3) і визначають модель теплових процесів в ПГ.

Моделювання процесу циркуляції. В систему диференціальних рівнянь (3) входить відносна змінна стану g_a , що відповідає витраті пари G_a через ДВ. Для її визначення розглянуто процес циркуляції пароводяної суміші під дзеркалом випаровування. При моделюванні циркуляції пароводяної суміші припущено, що швидкість зміни тиску у всіх точках циркуляційного контуру парогенератора практично однакова та знехтувано розподілом тиску по контуру циркуляції. Робоче середовище, яке рухається в контурі, замінено наведеною матеріальною точкою, що рухається зі швидкістю, яка дорівнює напівсумі швидкостей на початку і в кінці відповідної ділянки контуру [4].

Рівняння руху робочого середовища в циркуляційному контурі прийнято в формі закону збереження кількості руху [6]:

$$dK/dt = \Delta P = P_b - P_r, \quad P_r = P_w + P_c, \quad (4)$$

де K – кількість руху робочого середовища в циркуляційному контурі;

P_b – сумарна рушійна сила;

P_r – сумарна сила гідравлічного опору руху робочого середовища;

P_w – сила гідравлічного опору опускного руху води;

P_c – сила гідравлічного опору підйомного руху пароводяної суміші.

Представимо K у вигляді суми кількості руху води та пари під ДВ:

$$K = M_w w_w + M_b w_b / 2, \quad (5)$$

де M_w – маса води в ПГ;

w_w – середня швидкість циркуляції маси води;

M_b – маса пари під ДВ;

w_b – швидкість пари безпосередньо під ДВ;

$w_b/2$ – середня швидкість пари.

Визначено ці швидкості через наведену середню швидкість пари над ДВ w_a :

$$w_b = w_a / \alpha_b,$$

$$w_w = w_a / (\alpha_b \beta_b),$$

$$w_a = G_a / (F_c \rho_s),$$

$$\alpha_b = \sqrt[3]{\varphi_b^2},$$

де α_b – частка пари на ДВ;

β_b – відношення швидкостей пари і води під ДВ;

F_c – площа ДВ;

ρ_s – щільність пари;

φ_b – об’ємний вміст пари під ДВ.
З позначеннями

$$\alpha_{cw} = 1/(\alpha_b \beta_b),$$

$$\alpha_{cb} = 1/(2\alpha_b),$$

$$M_e = \alpha_{cw} M_w + \alpha_{cb} M_b,$$

$$V_e = M_e / \rho_s = \alpha_{cw} V_w \rho_w / \rho_s + \alpha_{cb} V_b,$$

$$H_e = V_e / F_c,$$

де ρ_w – щільність води в ПГ;
 V_w – об’єм води в ПГ;
 V_{wb} – об’єм пари під ДВ, за формулою (5) отримано

$$K = V_e G_a / F_c = H_e G_a.$$

Звідси слідує, що

$$dK/dt = (G_a dV_e/dt + V_e dG_a/dt) / F_c. \quad (6)$$

З уведеними позначеннями отримана похідна

$$\frac{dV_e}{dt} = \alpha_{cw} \left[\frac{\rho_w}{\rho_s} \frac{dV_w}{dt} + \frac{V_w}{\rho_s} \left(\frac{d\rho_w}{dt} - \frac{\rho_w}{\rho_s} \frac{d\rho_s}{dt} \right) \right] + \alpha_{cb} \left(\frac{dV_c}{dt} - \frac{dV_w}{dt} \right).$$

Ця похідна спрощена до виразу

$$dV_e/dt = \alpha_{dw} dV_w/dt + \alpha_{dp} V_w dp/dt + \alpha_{cb} dV_c/dt,$$

де

$$\alpha_{dw} = \alpha_{cw} \alpha_\rho - \alpha_{cb},$$

$$\alpha_\rho = \rho_w / \rho_s,$$

$$\alpha_{dp} = \alpha_{cw} (\rho_{wp} - \alpha_\rho \rho_{sp}) / \rho_s,$$

$$\rho_{wp} = d\rho_w / dp,$$

$$\rho_{sp} = d\rho_s / dp.$$

Тут p – тиск пароводяної суміші в парогенераторі.

Уведено такі позначення:

$$\beta_{aw} = \alpha_{dw} / F_c,$$

$$\beta_{ap} = \alpha_{dp} / F_c,$$

$$\beta_{ac} = \alpha_{cb} / F_c,$$

$$H_{et} = \frac{dH_e}{dt} = \beta_{aw} \frac{dV_w}{dt} + \beta_{ap} V_w \frac{dp}{dt} + \beta_{ac} \frac{dV_c}{dt}.$$

З цими позначеннями перетворена похідна (6)

$$\frac{dK}{dt} = G_a H_{et} + (\beta_{aw} V_w + \beta_{ac} V_c) \frac{dG_a}{dt}. \quad (7)$$

Сили у формулах (4) представлено у вигляді [6]:

$$P_b = gV_b(\rho_w - \rho_s),$$

$$P_w = k_w g \rho_w w_w^2,$$

$$P_c = k_c g w_w [w_w \rho_w + 0,5 w_b (\rho_w - \rho_s)],$$

де k_w і k_c – коефіцієнти гідравлічних опорів опускного і підйомного рухів.

Для сил отримано:

$$P_w = K_w \rho_w w_a^2, \quad P_c = K_c (\alpha_{cwb} \rho_w - \alpha_{cb} \rho_s) w_a^2,$$

де $K_w = k_w g \alpha_{cw}^2$;

$$K_c = k_c g \alpha_{cw};$$

$$\alpha_{cwb} = \alpha_{cw} + \alpha_{cb}.$$

Обчислено значення сил у номінальному режимі:

$$P_{0b} = gV_{0b}(\rho_{0w} - \rho_{0s}),$$

$$P_{0c} = \alpha_{mc} F_c \Delta p_{0m},$$

$$P_{0w} = P_{0b} - P_{0c},$$

де α_{mc} – частка трубного пучка в горизонтальному перетині парогенератора;

Δp_{0m} – гідравлічний опір трубного пучка.

За цими величинами визначено значення коефіцієнтів гідравлічних сил опору:

$$K_w = \frac{P_{0w}}{\rho_{0w} w_{0a}^2},$$

$$K_c = \frac{P_{0c}}{(\alpha_{cwb} \rho_{0w} - \alpha_{cb} \rho_{0s}) w_{0a}^2}.$$

За цими формулами сумарну силу гідравлічного опору представлено виразом

$$P_r = (\gamma_w \rho_w / \rho_s^2 - \gamma_s / \rho_s) G_a^2,$$

де $\gamma_w = (K_w - K_c \alpha_{cwb}) / F_c^2$; $\gamma_s = K_c \alpha_{cb} / F_c^2$.

З урахуванням (7) рівняння закону збереження кількості руху (4) зведено до вигляду

$$G_a H_{et} + (\beta_{aw} V_w + \beta_{ac} V_c) \frac{dG_a}{dt} = P_b - P_r, \quad (8)$$

де сили P_b і P_r визначаються виразами:

$$P_b = K_{PV} (V_c - V_w),$$

$$K_{PV} = g(\rho_w - \rho_s),$$

$$P_r = K_{PG} G_a^2,$$

$$K_{PG} = \gamma_w \rho_w / \rho_s^2 - \gamma_s / \rho_s.$$

Рівняння (8) розв’язано відносно похідної витрати пара через дзеркало випаровування

$$\frac{dG_a}{dt} = \frac{\Delta P - G_a H_{et}}{\beta_{aw} V_w + \beta_{ac} V_c}, \quad (9)$$

де $\Delta P = K_{PV} (V_c - V_w) - K_{PG} G_a^2$.

Визначено змінні цього рівняння та його елементів через відносні змінні:

$$p = \pi_p p_0,$$

$$V_w = \xi_w V_{0w},$$

$$V_s = \xi_s V_{0s},$$

$$h_c = (1 + \xi_c) h_{0c},$$

$$G_w = g_w G_0,$$

$$G_s = g_s G_0,$$

$$G_g = g_g G_0,$$

$$G_a = g_a G_0,$$

де $p_0, V_{0w}, V_{0s}, h_{0c}$ і G_0 – значення тиску, об'ємів води та пари, допустимого рівня води в ПГ, а також масової витрати пари з парогенератора у номінальному режимі.

Після переходу до відносних змінних в рівнянні (9) та алгебраїчних перетворень отримано рівняння похідної відносної змінної витрати пара через дзеркало випаровування:

$$\begin{cases} \frac{dg_a}{d\tau} = \frac{\delta p + g_a h_{ct}}{1 + a_{aw} \xi_w + a_{ac} \xi_c}, \\ \delta p = c_a + b_{ac} \xi_c - b_{aw} \xi_w - b_{aa} g_a^2, \\ h_{ct} = d_{ap} \xi_w \pi_{pt} + d_{aw} \xi_{wt} + d_{ac} \xi_{ct}, \end{cases} \quad (10)$$

де позначені постійні безрозмірні параметри та похідні відносних змінних:

$$c_a = K_a K_{PV} V_{0c},$$

$$b_{ac} = K_a K_{PV} F_c h_{0c},$$

$$b_{aw} = K_a K_{PV} V_{0w},$$

$$b_{aa} = K_a K_{PG} G_0^2,$$

$$d_{ap} = K_a G_0 \beta_{ap} V_{0w} p_0 / t_b,$$

$$d_{aw} = K_a G_0 \beta_{aw} V_{0w} / t_b,$$

$$d_{ac} = K_a G_0 \beta_{ac} F_c h_{0c} / t_b,$$

$$a_{aw} = \beta_{aw} V_{0w} / (\beta_{ac} V_{0c}),$$

$$a_{ac} = F_c h_{0c} / V_{0c},$$

$$K_a = t_b / (G_0 \beta_{ac} V_{0c}),$$

$$\xi_{wt} = d\xi_w / d\tau,$$

$$\xi_{ct} = d\xi_c / d\tau.$$

Для створення математичної моделі парогенератора необхідно об'єднати рівняння теплопередачі (1), балансу (3) і циркуляції (9), а також моделі допоміжного обладнання енергоблоку АЕС.

Моделі допоміжного обладнання. Математична модель парогенератора, як об'єкта автоматичного управління повинна включати крім самого ПГ й допоміжне обладнання – ті ланки, через які на ПГ подаються збудуючі та управляючі дії.

В систему диференціальних рівнянь (3) входять зовнішні дії g_w, g_s, q_m . Витрата живильної води визначена рівнянням регулюючого живильного клапана (РЖК), що витікає з формули гідравліки [3]

$$G_w = \mu_p F_p \sqrt{2\rho_w(p_w - p)},$$

де μ_p – коефіцієнт витрати;

F_p – площа прохідного перетину клапана;

p_w – тиск перед живильним клапаном.

З допущеннями, що μ_p і ρ_w постійні в околиці номінального режиму та що площа F_p пропорційна координаті переміщення регулюючого живильного клапана m_w , після переходу до відносних змінних $\mu_w = m_w / m_{0w}, \pi_w = p_w / p_{0w}$ отримано рівняння

$$g_w = \alpha_{gw} \mu_w \sqrt{\pi_w - \pi_p}, \quad (11)$$

де $\alpha_{gw} = 1 / \sqrt{\pi_{0w} - 1}$;

π_{0w} – значення відносної змінної тиску перед живильним клапаном у номінальному режимі.

Витрата пари з парогенератора визначена за формулою Флюгеля – Стодоли [3]

$$G_s = G_0 \sqrt{(p^2 - p_m^2) / (p_0^2 - p_{0m}^2)},$$

де p_m і p_{0m} – змінне та номінальне значення тиску пари в головному паровому колекторі (ГПК).

Після переходу до відносних значень з позначенням $\pi_m = p_m / p_0$ отримано:

$$g_s = \alpha_{gs} \sqrt{\pi_p^2 - \pi_m^2}, \quad (12)$$

$$\alpha_{gs} = 1 / \sqrt{\pi_{0p}^2 - \pi_{0m}^2}.$$

Для ГПК визначено рівняння матеріального балансу у відносних змінних [3]

$$\tau_m d\pi_m / d\tau = g_s - g_m,$$

де π_m і g_m – відносні значення тиску в ГПК та витрати пари з ГПК.

Відповідні абсолютні змінне та номінальне значення витрати пари [3]:

$$G_m = \mu_s \beta_m F \chi \sqrt{g p_m / \nu},$$

$$G_0 = \beta_{0m} F \chi \sqrt{g p_b \pi_{0m} / \nu},$$

де μ_s – відносне значення положення клапана регулювання турбіни (КРТ);

F – площа перетину КРТ;

χ – постійний коефіцієнт;

g – прискорення вільного падіння;

ν – теоретичний питомий об'єм пари в КРТ;

β_m визначається за формулою Бендемана [3]

$$\beta_m = \sqrt{1 - [(\varepsilon_m - \varepsilon_c)/(1 - \varepsilon_c)]^2}, \quad (13)$$

де $\varepsilon_m = \pi_t/\pi_m$;
 π_t – відносне значення тиску за КРТ;
 ε_c – постійне значення.
 Звідси визначено

$$g_m = \alpha_{gm}\mu_s\beta_m\sqrt{\pi_m}, \quad (14)$$

де $\alpha_{gm} = 1/(\beta_{0m}\sqrt{\pi_{0m}})$.

Після перетворення рівняння ГПК та позначення $a_{mg} = 1/\tau_m$ отримано диференціальне рівняння ГПК

$$d\pi_m/d\tau = a_{mg}(g_s - g_m). \quad (15)$$

Приріст температури живильної води в парогенераторі пропорційний приросту тиску

$$t_w - t_{0w} = t_{0wp}(p - p_0),$$

де t_{0wp} – похідна температури за тиском на лінії насичення.

Після переходу до відносних змінних отримано рівняння

$$\theta_w = b_{wp}\pi_p - c_{wp}, \quad (16)$$

де $b_{wp} = t_{0wp}p_0/T_b$;
 $c_{wp} = b_{wp}\pi_{0p} - \theta_{0w}$;
 T_b – базове значення температури.
 Теплова потужність поверхні теплопередачі трубок теплообміну визначена рівнянням

$$Q_m = \alpha_w F_m (t_m - t_w),$$

де α_w – коефіцієнт тепловіддачі від трубки до живильної води в парогенераторі;

F_m – загальна площа трубок теплообміну;
 t_m і t_w – середні температури металу і води.

За цією формулою отримано рівняння (2) для відносної змінної теплової потужності q_m , де $a_{qm} = \alpha_w F_m T_b / Q_0$.

Моделі виконавчого механізму регулюючого живильного клапану і приводу клапану регулювання турбіни представлені передатними функціями:

$$W_w(s) = 1/(T_{ww}s + 1), \quad W_s(s) = 1/(T_{ss}s + 1),$$

де T_{ww} і T_{ss} – постійні часу.

Цим передатним функціям відповідають диференціальні рівняння:

$$\frac{d\mu_w}{d\tau} = a_{ww}(u_w - \mu_w), \quad (17)$$

$$\frac{d\mu_s}{d\tau} = a_{ss}(u_s - \mu_s), \quad (18)$$

де u_w – керуючий вплив на РЖК;
 u_s – керуючий вплив на КРТ;
 $a_{ww} = t_b/T_{ww}$; $a_{ss} = t_b/T_{ss}$.

Модель парогенератора. За рівняннями (1)–(3), (10)–(18) представлено модель ПГ як об'єкта управління в просторі станів з відносними змінними у вигляді нелінійної СДР десятого порядку:

$$\left\{ \begin{aligned} \theta_w &= b_{wp}\pi_p - c_{wp}, \\ q_m &= a_{qm}(\theta_m - \theta_w), \\ d\theta_t/d\tau &= b_{tq}q - a_{tm}(\theta_t - \theta_m), \\ d\theta_m/d\tau &= a_{mt}(\theta_t - \theta_m) - a_{mw}(\theta_m - \theta_w), \\ g_w &= \alpha_{gw}\mu_w\sqrt{\pi_w - \pi_p}, \\ g_s &= \alpha_{gs}\sqrt{\pi_p^2 - \pi_m^2}, \\ \pi_{pt} &= \frac{b_{pw}g_w + b_{ps}g_s + q_m}{a_{pw}\xi_w + a_{ps}\xi_s}, \\ d\pi_p/d\tau &= \pi_{pt}, \\ g_g &= b_{gq}q_m - (a_{gw}\xi_w + a_{gs}\xi_s)\pi_{pt} - b_{gg}g_w, \\ \xi_{wt} &= b_{wg}(g_w - g_g) - a_{wp}\xi_w\pi_{pt}, \\ d\xi_w/d\tau &= \xi_{wt}, \\ d\xi_s/d\tau &= b_{sg}(g_g - g_s) - a_{sp}\xi_s\pi_{pt}, \\ \xi_{ct} &= (c_c - a_{cc}\xi_c)\pi_{pt} + b_{cg}(g_s - g_a), \\ d\xi_c/d\tau &= \xi_{ct}, \\ \varepsilon_m &= \pi_t/\pi_m, \\ \beta_m &= \sqrt{1 - [(\varepsilon_m - \varepsilon_c)/(1 - \varepsilon_c)]^2}, \\ g_m &= \alpha_{gm}\mu_s\beta_m\sqrt{\pi_m}, \\ \frac{d\pi_m}{d\tau} &= a_{mg}(g_s - g_m), \\ \delta p &= c_a + b_{ac}\xi_c - b_{aw}\xi_w - b_{aa}g_a^2, \\ h_{ct} &= d_{ap}\xi_w\pi_{pt} + d_{aw}\xi_{wt} + d_{ac}\xi_{ct}, \\ \frac{dg_a}{d\tau} &= \frac{\delta p + g_a h_{ct}}{1 + a_{aw}\xi_w + a_{ac}\xi_c}, \\ d\mu_w/d\tau &= a_{ww}(u_w - \mu_w), \\ d\mu_s/d\tau &= a_{ss}(u_s - \mu_s). \end{aligned} \right.$$

Цю модель представлено у векторному вигляді:

$$d\mathbf{X}/d\tau = \mathbf{f}(\mathbf{X}, \mathbf{x}, \mathbf{c}, \mathbf{g}), \quad \mathbf{X}_0 = \mathbf{X}(0), \quad \xi_c = C(\mathbf{X}),$$

де $\mathbf{X} = \mathbf{X}(\tau)$ і \mathbf{X}_0 – вектори стану та початкових умов моделі ПГ;

$\mathbf{f}(\mathbf{X}, \mathbf{x}, \mathbf{c}, \mathbf{g})$ – векторна функція правих частин СДР ПГ;

\mathbf{x} і \mathbf{c} – вектори змінних та постійних параметрів ПГ;

$\mathbf{g} = (q, \pi_t, u_w, u_s)^t$ – вектор зовнішніх дій,
 $C(\mathbf{X})$ – оператор визначення вихідної змінної ПГ,

$$\mathbf{X} = (\theta_t, \theta_m, \pi_p, \xi_w, \xi_s, \xi_c, \pi_m, g_a, \mu_w, \mu_s)^t,$$

$$\mathbf{X}_0 = (\theta_{0t}, \theta_{0m}, 1, 1, 1, 0, \pi_{0m}, 1, 1, 1)^t.$$

Розроблена програма для моделі парогенератора ПГВ-1000, яка включена до інформаційної технології оптимізації управління та дозволяє виконувати імітаційне моделювання процесів у парогенераторі [12].

Висновки. Дана стаття присвячена розробці нелінійної математичної моделі парогенератора у відносних змінних для використання в інформаційній технології оптимізації управління. За отриманими результатами зроблені наступні висновки.

1. Наведені моделі процесів теплопередачі та пароутворення в парогенераторі у вигляді систем диференціальних рівнянь з відносними змінними.

2. Розроблено нелінійне диференціальне рівняння для обчислення похідної витрати пари через дзеркало випаровування у відносних змінних стану і наведені формули для обчислення постійних параметрів.

3. Рівняння допоміжного обладнання – головного парового колектору, приводу клапана парової турбіни і виконавчого механізму регулюючого живильного клапана приведені до відносних змінних.

4. Побудована математична модель парогенератора як об'єкта управління у вигляді нелінійної системи диференціальних рівнянь десятого порядку у відносних змінних і наведені формули для обчислення значень постійних параметрів. Розроблена програма для моделі парогенератора ПГВ-1000, яка включена до інформаційної технології оптимізації управління.

Список літератури

1. Yastrebenetsky M., Kharchenko V. *Cyber Security and Safety of Nuclear Power Plant Instrumentation and Control Systems*. Hershey, Pennsylvania, United States of America: IGI Global, 2020. 501 p.
2. Kumar V., Mishra K. C., Singh P. et al. Reliability analysis and safety model checking of safety-critical and control systems: A case study of NPP control system. *Annals of Nuclear Energy*. England, 2022. Vol. 166.
3. Иванов В. А. *Эксплуатация АЭС: учебник для вузов*. Санкт-Петербург: Энергоатомиздат, 1994. 384 с.
4. Демченко В. А. *Автоматизация и моделирование технологических процессов АЭС и ТЭС*. Одесса: Астропринт, 2001. 305 с.
5. Демченко В. А., Тодорцев Ю. К., Ложечников В. Ф. Математическая модель участка питания парогенератора ПГВ-1000. *Вестник Харьковского государственного политехнического университета. Сер.: Системный анализ, управление и информационные технологии*. Харьков: ХГПУ, 1999. Вып. 73. С. 133–138.
6. Zou H., Li L., Zheng Y. Modeling and simulation of the water control system of natural circulation vertical steam generators. *Proceedings of 2019 14th IEEE International Conference on Electronic Measurement and Instruments (ICEMI)*. 2019. P. 1215-1220.
7. Kong X. S., Zhang J., Xiao Y. N. et al. Performance optimization for steam generator level control based on a revised simultaneous perturbation stochastic approximation algorithm. *Proceedings of 2018 3rd International conference on intelligent green building and smart grid (IGBSG 2018)*. 2018.
8. Salehi A., Safarzadeh O., Kazemi M. H. Fractional order PID control of steam generator water level for nuclear steam supply systems. *Nuclear Engineering and Design*. 2019. Vol. 342. P. 45-59.

9. Xu Z. H., Fan Q. L., Zhao J. Gain-Scheduled Equivalent-Cascade IMC Tuning Method for Water Level Control System of Nuclear Steam Generator. *PROCESSES*. 2020. Vol. 8, no. 1160.
10. Nikulina O., Severin V., Kotsuba N. Parametric synthesis of control systems for the steam generator of a nuclear power plant. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. Vol 1, no. 2 (115). P. 77–84.
11. Нікуліна О. М., Северин В. П., Коцюба Н. В., Бубнов А. І. Моделювання теплових процесів парогенератора АЕС для інформаційної технології оптимізації управління. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»: сб. наук. пр. Темат. вип.: Системний аналіз, управління та інформаційні технології*. Харків: НТУ «ХПІ», 2021, № 1 (5). С. 56–61.
12. Нікуліна О. М., Северин В. П., Коцюба Н. В. Розробка інформаційної технології оптимізації управління складними динамічними системами. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»: сб. наук. пр. Темат. вип.: Системний аналіз, управління та інформаційні технології*. Харків: НТУ «ХПІ», 2020, № 2 (4). С. 63–69.

References (transliterated)

1. Yastrebenetsky M., Kharchenko V. *Cyber Security and Safety of Nuclear Power Plant Instrumentation and Control Systems*. Hershey, Pennsylvania, United States of America: IGI Global, 2020. 501 p.
2. Kumar V., Mishra K. C., Singh P. et al. Reliability analysis and safety model checking of safety-critical and control systems: A case study of NPP control system. *Annals of Nuclear Energy*. England, 2022. Vol. 166.
3. Ivanov V. A. *Ekspluatatsiya AES: uchebnik dlya vuzov* [Operation of NPP: a textbook for universities]. St. Petersburg, Energoatomizdat Publ., 1994. 384 p.
4. Demchenko V. A. *Avtomatizatsiya i modelirovaniye texnologicheskikh processov AES i TES* [Automation and modeling of technological processes of NPP and TPP]. Odessa, Astroprint Publ., 2001. 305 p.
5. Demchenko V. A., Todorcev Yu. K., Lozhechnikov V. F. Matematicheskaya model' uchastka pitaniya parogeneratora PGGV-1000 [Mathematical model of power supply section of steam generator PGGV-1000]. *Vestnik Kharkovskogo gosudarstvennogo politehnicheskogo universiteta: sb. nauch. tr. Temat. vyp.: Sistemnyy analiz, upravleniye i informatsionnyye tekhnologii* [Bulletin of the Kharkov State Polytechnic University. Thematic issue: System analysis, control and information technology]. Kharkov, KhGPU Publ., 1999, issue 73, pp. 133–138.
6. Zou H., Li L., Zheng Y. Modeling and simulation of the water control system of natural circulation vertical steam generators. *Proceedings of 2019 14th IEEE International Conference on Electronic Measurement and Instruments (ICEMI)*. 2019. P. 1215-1220.
7. Kong X. S., Zhang J., Xiao Y. N. et al. Performance optimization for steam generator level control based on a revised simultaneous perturbation stochastic approximation algorithm. *Proceedings of 2018 3rd International conference on intelligent green building and smart grid (IGBSG 2018)*. 2018.
8. Salehi A., Safarzadeh O., Kazemi M. H. Fractional order PID control of steam generator water level for nuclear steam supply systems. *Nuclear Engineering and Design*. 2019. Vol. 342. P. 45-59.
9. Xu Z. H., Fan Q. L., Zhao J. Gain-Scheduled Equivalent-Cascade IMC Tuning Method for Water Level Control System of Nuclear Steam Generator. *PROCESSES*. 2020. Vol. 8, no. 1160.
10. Nikulina O., Severin V., Kotsuba N. Parametric synthesis of control systems for the steam generator of a nuclear power plant. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. Vol 1, no. 2 (115). P. 77–84.
11. Nikulina E. N., Severyn V. P., Kotsiuba N. V., Bubnov A. I. Modeluvannya teplovykh procesiv parogeneratora AES dlya informatsiynoi tekhnologii optymizatsii upravlinnya [Modeling of thermal processes of NPP steam generator for information technology of control optimization]. *Vestnik Nats. tekhn. un-ta "KhPI": sb. nauch. tr. Temat. vyp.: Sistemnyy analiz, upravlenie i informatsionnyye tekhnologii* [Bulletin of the National Technical University "KhPI": a collection of scientific papers. Thematic issue: System analysis, management and information technology]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2021, no. 1 (5), pp. 56–61.

12. Nikulina E. N., Severyn V. P., Kotsiuba N. V. Rozrobka informatsiynoi tekhnologii optymizatsii upravlinnya skladnymy dynamichnymy systemamy [Development of information technology for optimizing the control of complex dynamic systems]. *Vestnik Nats. tekhn. un-ta "KhPI": sb. nauch. tr. Temat. vyp.: Sistemnyy analiz, upravlenie i informatsionnye tekhnologii* [Bulletin of the National

Technical University "KhPI": a collection of scientific papers. Thematic issue: System analysis, management and information technology]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2020, no. 2 (4), pp. 63–69.

Надійшла (received) 10.05.2022

Відомості про авторів / About the Authors

Нікуліна Олена Миколаївна – д-р техн. наук, доцент, завідувачка кафедри інформаційних систем та технологій Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2938-4215>; e-mail: elniknik02@gmail.com

Северин Валерій Петрович – д-р техн. наук, професор, професор кафедри системного аналізу та інформаційно-аналітичних технологій Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2969-6780>; e-mail: valerii.severyn@khpi.edu.ua

Бубнов Антон Ігорович – студент кафедри комп'ютерної математики та аналізу даних Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6371-6271>; e-mail: Anton.Bubnov@cs.khpi.edu.ua

Кондратов Олексій Михайлович – інженер кафедри інформаційних систем та технологій Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6367-9944>; e-mail: kondratovolexiy@gmail.com

Nikulina Olena Mykolaivna – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Department Information Systems and Technologies National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2938-4215>; e-mail: elniknik02@gmail.com

Severyn Valerii Petrovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Department System Analysis and Information-Analytical Technologies National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2969-6780>; e-mail: valerii.severyn@khpi.edu.ua

Bubnov Anton Ihorovich – Student of Department Computer Mathematics and Data Analysis National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6371-6271>; e-mail: Anton.Bubnov@cs.khpi.edu.ua

Kondratov Oleksii Mikhailovich – Engineer of Department Information Systems and Technologies National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6367-9944>; e-mail: kondratovolexiy@gmail.com