

**В. П. СЕВЕРИН**, канд. техн. наук, **А.В. ЛЫМАРЬ**

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРОГЕНЕРАТОРА КАК ОБЪЕКТА РЕГУЛИРОВАНИЯ

Получена модель парогенератора в пространстве состояний в относительных координатах. Представлены принципиальная схема системы автоматического регулирования уровня парогенератора, в которой реализованы принципы регулирования по возмущению расхода пара и по отклонению регулируемого параметра уровня воды в парогенераторе.

The model of steam generator in conditions space in relative coordinates is. The basic scheme of system of automatic control of a level of a steam and gas generator in which principles of regulation on indignation steam consumption and on a deviation of adjustable parameter water level in steam generator are realized.

Отримана модель парогенератора у просторі станів у відносних координатах. Представлені принципова схема системи автоматичного регулювання рівня парогенератора, у якій реалізовані принципи регулювання по збурюванню витрат пару та по відхиленню регульованого параметра рівня води у парогенераторі.

**Введение.** Парогенератор (ПГ) ПГВ-1000 применяется в энергоблоках АЭС с реактором ВВЭР-1000 для производства водяного насыщенного пара. Актуальна задача оптимизации системы регулирования парогенератора. В существующих работах по моделированию паровых котлов, в которых ПГ рассматривается как динамический объект [1] отсутствуют значения параметров динамических моделей и не приводятся модели регуляторов.

**Постановка задачи.** Для исследования динамики ПГ и его системы регулирования необходимо построить их математические модели.

**Построение математической модели.** Математическая модель парогенератора должна включать кроме самого ПГ те звенья, через которые на ПГ подаются возмущающие и управляющие воздействия. Построим математическую модель ПГ как объекта регулирования.

Процессы теплопередачи [1, 2], материального и теплового баланса [3] и циркуляции пароводяной смеси [4] в ПГ представлены уравнениями:

$$\frac{d\theta_t}{dt} = a_n\theta_t + a_m\theta_m + b_{iq}q \quad (1)$$

$$\frac{d\theta_m}{dt} = a_m\theta_t + a_{mm}\theta_m + b_{mv}\theta_w \quad (2)$$

$$T_{ww} \frac{d\xi_w}{dt} + T_{wp} \frac{d\pi_p}{dt} = \beta_{wp}\pi_p + \alpha_{sk}\pi_k + \mu_w, \quad (3)$$

$$T_{pw} \frac{d\xi_w}{dt} + T_{pp} \frac{d\pi_p}{dt} = K_{pm}\theta_m + K_{pp}\pi_p - \mu_w, \quad (4)$$

$$T_{cp} \frac{d\pi_p}{dt} + T_{cc} \frac{d\xi_c}{dt} = g_a - \alpha_{sp}\pi_p + \alpha_{sk}\pi_k, \quad (5)$$

$$T_{aw} \frac{d\xi_w}{dt} + T_{ap} \frac{d\pi_p}{dt} + T_{ac} \frac{d\xi_c}{dt} + T_{aa} \frac{dg_a}{dt} = K_{aw}\xi_w + K_{ap}\pi_p + K_{ac}\xi_c - g_a \quad (6)$$

где (1) и (2) – уравнения теплопередачи, (3), (4) и (5) – уравнения баланса, (6) – уравнение циркуляции.

Решая систему уравнений (3) и (4) относительно производных относительных координат объема воды и давления по правилу Крамера, получим:

$$\frac{d\xi_w}{dt} = a_{wm}\theta_m + a_{wp}\pi_p + a_{wk}\pi_k + a_{wd}\mu_w, \quad (7)$$

$$\frac{d\pi_p}{dt} = a_{pm}\theta_m + a_{pp}\pi_p + a_{pk}\pi_k + a_{pd}\mu_w, \quad (8)$$

где

$$a_{wm} = \frac{\Delta_{wm}}{\Delta}, \quad a_{wp} = \frac{\Delta_{wp}}{\Delta}, \quad a_{wk} = \frac{\Delta_{wk}}{\Delta}, \quad a_{wd} = \frac{\Delta_{wd}}{\Delta}, \quad (9)$$

$$a_{pm} = \frac{\Delta_{pm}}{\Delta}, \quad a_{pp} = \frac{\Delta_{pp}}{\Delta}, \quad a_{pk} = \frac{\Delta_{pk}}{\Delta}, \quad a_{pd} = \frac{\Delta_{pd}}{\Delta}, \quad (10)$$

$$\Delta = T_{ww}T_{pp} - T_{wp}T_{pw}, \quad \Delta_{wm} = -T_{wp}K_{pm}, \quad \Delta_{wp} = T_{pp}\beta_{wp} - T_{wp}K_{pp}, \quad (11)$$

$$\Delta_{wk} = T_{pp}\alpha_{sk}, \quad \Delta_{wd} = T_{pp} + T_{wp}, \quad \Delta_{pm} = T_{ww}K_{pm}, \quad (12)$$

$$\Delta_{pp} = T_{ww}K_{pp} - T_{pw}\beta_{wp}, \quad \Delta_{pk} = -T_{pw}\alpha_{sk}, \quad \Delta_{pd} = -T_{ww} - T_{pw}. \quad (13)$$

Выразим производную координаты уровня из уравнения

$$T_{cp} \frac{d\pi_p}{dt} + T_{cc} \frac{d\xi_c}{dt} = g_a - \alpha_{sp}\pi_p + \alpha_{sk}\pi_k \quad (14)$$

с учетом (8):

$$\frac{d\xi_c}{dt} = a_{cm}\theta_m + a_{cp}\pi_p + a_{ca}g_a + a_{ck}\pi_k + a_{cd}\mu_w, \quad (15)$$

$$a_{cm} = -\frac{T_{cp}}{T_{cc}} a_{pm}, \quad a_{cp} = -\frac{\alpha_{sp} + T_{cp} a_{pp}}{T_{cc}}, \quad a_{ca} = \frac{1}{T_{cc}}, \quad (16)$$

$$a_{ck} = \frac{\alpha_{sk} - T_{cp} a_{pk}}{T_{cc}}, \quad a_{cd} = -\frac{T_{cp}}{T_{cc}} a_{pd}. \quad (17)$$

Выразим производную координаты расхода из уравнения

$$T_{aw} \frac{d\xi_w}{dt} + T_{ap} \frac{d\pi_p}{dt} + T_{ac} \frac{d\xi_c}{dt} + T_{aa} \frac{dg_a}{dt} = K_{aw}\xi_w + K_{ap}\pi_p + K_{ac}\xi_c - g_a \quad (18)$$

с учетом (7), (8) и (13):

$$\frac{dg_a}{dt} = a_{am}\theta_m + a_{aw}\xi_w + a_{ap}\pi_p + a_{ac}\xi_c + a_{aa}g_a + a_{ak}\pi_k + a_{ad}\mu_w, \quad (19)$$

где

$$a_{am} = -\frac{T_{aw}a_{wm} + T_{ap}a_{pm} + T_{ac}a_{cm}}{T_{aa}}, \quad a_{aw} = \frac{K_{aw}}{T_{aa}}, \quad (20)$$

$$a_{ap} = \frac{K_{ap} - T_{aw}a_{wp} - T_{ap}a_{pp} - T_{ac}a_{cp}}{T_{aa}}, \quad a_{ac} = \frac{K_{ac}}{T_{aa}}, \quad a_{aa} = -\frac{1 + T_{ac}a_{ca}}{T_{aa}}, \quad (21)$$

$$a_{ak} = -\frac{T_{aw}a_{wk} + T_{ap}a_{pk} + T_{ac}a_{ck}}{T_{aa}}, \quad a_{ad} = -\frac{T_{aw}a_{wd} + T_{ap}a_{pd} + T_{ac}a_{cd}}{T_{aa}} \quad (22)$$

Основное возмущающее воздействие подается на ПГ через следящий привод (СП), который перемещает клапан регулирования турбины (КРТ), изменяющий давление в главном паровом коллекторе (ГПК). Поэтому модель ПГ как объекта регулирования должна включать модели ГПК, СП и исполнительного механизма (ИМ) ГПК.

Дифференциальное уравнение ГПК после необходимых преобразований и ввода новых обозначений примем в виде

$$\frac{d\pi_k}{dt} = a_{kp}\pi_p + a_{kk}\pi_k + a_{ks}\mu_s, \quad (23)$$

где

$$a_{kp} = \frac{\alpha_{sp}}{T_{kk}}, \quad a_{kk} = \frac{\beta_{sk}}{T_{kk}}, \quad a_{ks} = -\frac{1}{T_{kk}}. \quad (24)$$

Модель привода КРТ примем в виде передаточной функции

$$W_s(s) = \frac{1}{T_{ss}s + 1}, \quad (25)$$

которой отвечает дифференциальное уравнение

$$\frac{d\mu_s}{dt} = a_{ss}\mu_s + b_{ss}u_s, \quad (26)$$

где  $u_s$  — управляющее воздействие на КРТ.

Исполнительный механизм РПК представим инерционным звеном первого порядка с передаточной функцией:

$$W_d(s) = \frac{1}{T_d s + 1}, \quad (27)$$

где  $T_d$  — постоянная времени привода. Передаточной функции отвечает дифференциальное уравнение

$$\frac{d\mu_w}{dt} = a_{dd}\mu_w + b_{dd}u, \quad (28)$$

где  $u$  — управляющее воздействие на РПК.

По уравнениям (7), (8), (7), (8), (15), (19), (23), (26) и (28) представим модель ПГ в пространстве состояний:

$$\frac{dX_G}{dt} = A_G X_G + B_{Gw}u + B_{Gq}q + B_{Gs}u_s, \quad \xi_c = C_G X_G, \quad (29)$$

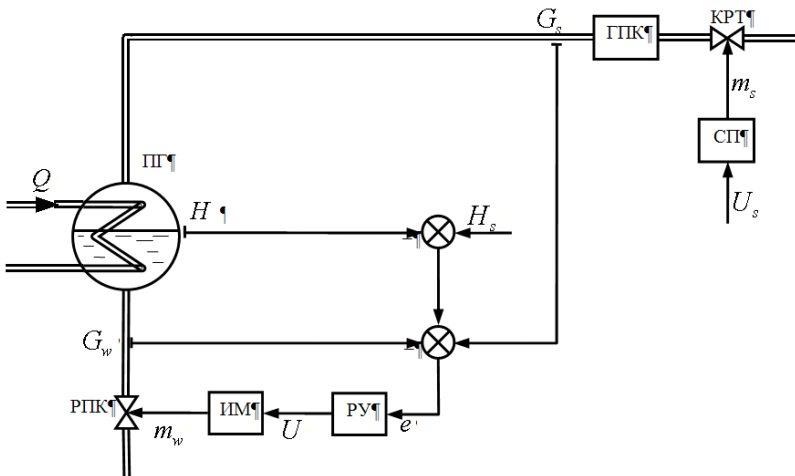
где

$$X_G = \begin{pmatrix} \theta_l \\ \theta_m \\ \xi_w \\ \pi_p \\ \xi_c \\ g_a \\ \pi_k \\ \mu_s \\ \mu_w \end{pmatrix}, \quad A_G = \begin{pmatrix} a_{ll} & a_{lm} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{ml} & a_{mm} & 0 & a_{mp} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{wm} & 0 & a_{wp} & 0 & 0 & a_{wk} & 0 & a_{wd} \\ 0 & a_{pm} & 0 & a_{pp} & 0 & 0 & a_{pk} & 0 & a_{pd} \\ 0 & a_{cm} & 0 & a_{cp} & 0 & a_{ca} & a_{ck} & 0 & a_{cd} \\ 0 & a_{am} & a_{aw} & a_{ap} & a_{ac} & a_{aa} & a_{ak} & 0 & a_{ad} \\ 0 & 0 & 0 & a_{kp} & 0 & 0 & a_{kk} & a_{ks} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{ss} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{dd} \end{pmatrix}, \quad (30)$$

$$B_{G_w} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ b_{du} \end{pmatrix}, \quad B_{G_q} = \begin{pmatrix} b_{1q} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad B_{G_s} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ b_{ss} \\ 0 \end{pmatrix}, \quad C_G = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}^T \quad (31)$$

Таким образом, динамическая модель ПГ как объекта регулирования представляет собой линейную систему динамических уравнений (СДУ) (29)–(31) в относительных переменных. Для номинального режима начальные условия СДУ нулевые. Входными величинами служат значение относительной координаты тепловой мощности теплоносителя  $q$  и значения управляющих воздействий на положения питательного  $u$  и расходного  $u_s$  регулирующих клапанов.

**Построение модели регулятора.** На основании модели ПГ построим математическую модель системы автоматического регулирования (САР) ПГ при различных законах регулирования.



Принципиальная схема САР уровня парогенератора

Принципиальная схема САР ПГ [2, 5] представлена на рисунке. Сигнал ошибки  $e$ , поступающий на вход регулятора уровня (РУ), формируется сигналом задатчика уровня  $H_s$  и импульсами с датчика уровня  $H$  и с датчиков расходов воды  $G_w$  и пара  $G_s$ . Сигнал РУ  $U$  действует на исполнительный механизм (ИМ), изменяющий координату  $m_w$  регулирующего клапана (РК). В установившемся режиме расход пара  $G_s$  равен расходу воды  $G_w$ , а уровень  $H$  равен заданному значению  $H_s$ . В САР реализованы принципы регулирования по возмущению  $G_s$  и по отклонению регулируемого параметра  $H$ . Входными возмущениями САР являются тепловая мощность теплоносителя  $Q$  и воздействие  $U_s$  на следящий привод.

Представим сигнал ошибки в относительных координатах:

$$\varepsilon = \xi_{cs} - \xi_c + g_s - g_w,$$

где  $\xi_c$  и  $\xi_{cs}$  — координата уровня и ее уставка,  $g_s$  и  $g_w$  — координаты расходов пара и воды. Перепишем выражение ошибки в виде

$$\varepsilon = \xi_{cs} - \xi_c - \beta_{wp}\pi_p - \alpha_{sk}\pi_k - \mu_w.$$

С использованием (30) имеем:

$$\varepsilon = \xi_{cs} - D_G X_G, \quad (32)$$

где

$$D_G = (0 \ 0 \ 0 \ \beta_{wp} \ 1 \ 0 \ \alpha_{sk} \ 0 \ 1). \quad (33)$$

**Выводы.** Построена модель парогенератора в пространстве состояний в относительных координатах. Представлены принципиальная схема системы автоматического регулирования уровня парогенератора, в которой реализованы принципы регулирования по возмущению расходом пара и по отклонению регулируемого параметра уровня воды в парогенераторе.

**Список литературы:** 1. Шифрин М. Ш. Автоматическое регулирование судовых паросиловых установок. — Л.: Судпромгиз, 1963. — 587 с. 2. Иванов В. А. Регулирование энергоблоков. — Л.: Машиностроение, 1982. — 312 с. 3. Парогенераторы реакторных установок ВВЭР для атомных электростанций / Б. И. Лукасевич, Н. Б. Трунов, Ю. Г. Драгунов, Давиденко С. Е. — М.: ИКЦ Академкнига, 2004. — 391 с. 4. Ривкин С. Л., Александров А. А. Термодинамические свойства воды и водяного пара. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 79 с. 5. Северин В. П., Никулина Е. Н. Математическое моделирование парогенератора атомного энергоблока // Вестник НТУ «ХПИ» «Системный анализ, управление и информационные технологии». — Харьков: НТУ «ХПИ». — 2006. — №. 5 — С. 25–30

Поступила в редколлегию 05.03.01