

**В.П. СЕВЕРИН, Е.Н. НИКУЛИНА, Н.В. ТРУБЧАНОВА**

## ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬЮ ПАРОГЕНЕРАТОРА ЭНЕРГОБЛОКА АЭС

Рассмотрена система автоматического управления производительностью парогенератора АЭС. Разработана ее математическая модель и вычислены значения постоянных параметров. Задача идентификации параметров модели системы по экспериментальным данным процессов отклонения уровня и давления в парогенераторе сведена к задаче оптимизации векторной целевой функции, учитывающей ограничения параметров, ограничения устойчивости, функцию невязки. Векторным методом оптимизации вычислены значения параметров системы управления. Построены динамические процессы изменения переменных состояния системы, отражающие колебательный затухающий характер процессов управления.

**Ключевые слова:** идентификация параметров, парогенератор, производительность, система автоматического управления, регулятор, оптимизация.

**Введение.** На четырех атомных электростанциях (АЭС) Украины эксплуатируются 13 энергоблоков с реакторами ВВЭР-1000, которые нуждаются в модернизации. В состав каждого энергоблока входят 4 парогенератора ПГВ-1000. Системы автоматического управления (САУ) парогенераторов АЭС должны стабилизировать уровень воды в парогенераторе и его производительность с высокой точностью [1–4]. Для обеспечения устойчивости САУ, ограничения максимального отклонения уровня воды и производительности, для обеспечения максимального быстродействия и надежности САУ необходимы адекватные математические модели [5]. Такие модели можно получить только путем идентификации параметров теоретических моделей САУ на основании экспериментальных данных о переходных процессах, происходящих в реальных генераторах [4]. Целью статьи является представление методов и результатов идентификации параметров моделей систем автоматического управления уровнем и производительностью парогенератора ПГВ-1000 энергоблока АЭС.

Для достижения намеченной цели разрабатывается математическая модель САУ производительностью (САУП) парогенератора (ПГ) ПГВ-1000 на основе САУ уровня (САУУ) [3]. Создается модель САУП с пропорционально-интегральным регулятором. Проводится идентификация параметров модели САУП ПГ по экспериментальным данным переходных процессов изменения уровня воды и давления в ПГ.

**Система управления производительностью.** В состав энергоблока ВВЭР-1000 входят четыре парогенератора ПГВ-1000. Каждый ПГВ-1000 имеет горизонтальный цилиндрический корпус, поверхность теплообмена образуют 11000 трубок, над верхним рядом трубного пучка расположен погруженный дырчатый лист для гашения кинетической энергии пароводяной смеси. Через 10 патрубков пар из парогенератора отводится в общий коллектор [1]. В технологическую систему питания парогенератора входят два ПТН, паровые конденсационные турбины, ПВД, трубопроводы и другое оборудование. Основным источником питания приводных турбин ПТН является пар, отработавший в ЦВД главной турбины энергоблока [1] Принципиальная схема САУП ПГ является трехимпульсной [2]: сигнал

ошибки  $e$ , поступающий на вход регулятора производительности, формируется сигналом задатчика частоты вращения приводной турбины  $\varpi_s$ , импульсами с датчика тепловой мощности  $Q_s$  и с датчиков давления воды  $P_w$  и пара  $P_s$ . Сигнал регулятора производительности действует на исполнительный механизм, изменяющий координату  $m_d$  регулирующего клапана подачи пара с расходом  $G_d$  на приводную турбину. Благодаря изменению частоты вращения  $\varpi$  приводной турбины изменяется производительность питательного турбонасоса (ПТН), на который подается питательная вода с расходом  $G_p$ . С ПТН вода по трубопроводам проходит подогреватель высокого давления (ПВД) и поступает на регулирующий питательный клапан (РПК). РПК управляется регулятором уровня (РУ). Сигнал ошибки, поступающий на вход РУ, формируется сигналом задатчика уровня  $H_s$ , импульсами с датчика уровня  $H$  и с датчиков расходов воды  $G_w$  и пара  $G_s$ . Сигнал регулятора питания действует на исполнительный механизм, изменяющий координату  $m_w$  РПК. Входными воздействиями САУ являются тепловая мощность теплоносителя  $Q$ , координата  $m_s$  регулирующего клапана турбины, частота вращения приводной турбины  $\varpi_s$ , расход пара  $G_d$  на приводную турбину и расход питательной воды  $G_p$ .

Структурная схема САУ парогенератором включает сумматоры, регулятор производительности, исполнительный механизм, ПТН, ПВД, модель парогенератора, цилиндр высокого давления (ЦВД) и обратные связи [2]. На вход САУ подается уставка координаты частоты вращения приводной турбины  $\varphi_s$ , выходом является координата расхода воды  $g_w$ . Возмущающими воздействиями являются координаты тепловой мощности теплоносителя  $q_t$  и входной сигнал следящего привода регулирующего клапана турбины  $u_s$ . Ошибка  $\varepsilon$  поступает на вход регулятора производительности с передаточной функцией (ПФ)  $W_C(t)$ , который по заданному закону регулирования формирует управляющее воздействие  $u$ . Управляющее воздействие подается на привод

© Северин В.П., Никулина Е.Н., Трубочанова Н.В., 2016

исполнительного механизма производительности, который перемещает клапан подачи пара в ПТН и изменяет его относительную координату  $\mu_a$ , изменяя давление питательной воды  $\pi_s$ . Эта координата поступает на ПВД, переменная давления которого  $\pi_w$  передается в модель парогенератора и изменяет вектор его состояния  $\mathbf{X}_L$ , изменяя координату расхода воды  $g_w$ . Представим сигнал ошибки в относительных координатах:

$$\varepsilon = \varphi_s - v + q_s,$$

где  $\varphi_s$  – относительное значение уставки частоты  $\omega_s$ ,  $q_s$  – относительная координата тепловой мощности,  $v$  – относительное значение  $\sqrt{\Delta P}$ :

$$v = k_w \pi_w - k_s \pi_s. \quad (1)$$

Здесь  $\pi_w$  и  $\pi_s$  – относительные значения давления воды в ПВД и пара в ПГ,  $k_w$ ,  $k_s$  – коэффициенты полученные путем линеаризации  $\sqrt{\Delta P}$  и перехода к относительным переменным.

Перепишем выражение ошибки в виде

$$\varepsilon = \varphi_s - k_w \pi_w + k_s \pi_s + k_t \theta_t, \quad (2)$$

где  $\theta_t$  – относительная координата температуры теплоносителя,  $k_t$  – коэффициент перехода от температуры к мощности.

**Модель системы управления.** Введем базовое значение времени  $t_b = 1$  с и перейдем к относительной переменной времени  $\tau = t/t_b$ . Модель САУ уровня (САУУ) ПГ с пропорционально-интегральным (ПИ) регулятором представим в виде системы дифференциальных уравнений (СДУ) в форме Коши в относительных переменных состояния [2]:

$$d\mathbf{X}_L/d\tau = \mathbf{A}_L \mathbf{X}_L + \mathbf{B}_{L\pi} \pi_w + \mathbf{B}_{Lq} q_t + \mathbf{B}_{Lu} u_s, \quad (3)$$

$$q_s = \mathbf{C}_L \mathbf{X}_L, \quad (4)$$

где  $\mathbf{A}_L =$

$$= \begin{pmatrix} a_{tt} & a_{tm} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{mt} & a_{mm} & 0 & a_{mp} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{wm} & 0 & a_{wp} & 0 & 0 & a_{wk} & 0 & a_{wd} & 0 \\ 0 & a_{pm} & 0 & a_{pp} & 0 & 0 & a_{pk} & 0 & a_{pd} & 0 \\ 0 & a_{cm} & 0 & a_{cp} & 0 & a_{ca} & a_{ck} & 0 & a_{cd} & 0 \\ 0 & a_{am} & a_{aw} & a_{ap} & a_{ac} & a_{aa} & a_{ak} & 0 & a_{ad} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{kp} & 0 & 0 & a_{kk} & a_{ks} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{ss} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\beta_{wp} b_{vu} K_L & -b_{vu} K_L & 0 & -\alpha_{sk} b_{vu} K_L & 0 & a_{dd} - b_{vu} K_L & b_{vu} \\ 0 & 0 & 0 & -\beta_{wp} \lambda_L & -\lambda_L & 0 & -\alpha_{sk} \lambda_L & 0 & -\lambda_L & 0 \end{pmatrix}$$

где  $a_{tt}$ ,  $a_{tm}$ ,  $a_{mt}$ ,  $a_{mm}$ ,  $a_{mp}$ ,  $a_{wm}$ ,  $a_{wp}$ ,  $a_{wk}$ ,  $a_{wd}$ ,  $a_{pm}$ ,  $a_{pp}$ ,  $a_{pk}$ ,  $a_{pd}$ ,  $a_{cm}$ ,  $a_{cp}$ ,  $a_{ca}$ ,  $a_{ck}$ ,  $a_{cd}$ ,  $a_{am}$ ,  $a_{aw}$ ,  $a_{ap}$ ,  $a_{ac}$ ,  $a_{aa}$ ,  $a_{ak}$ ,  $a_{ad}$ ,  $a_{kp}$ ,  $a_{kk}$ ,  $a_{ks}$ ,  $a_{ss}$ ,  $a_{dd}$ ,  $b_{vu}$ ,  $b_{wb}$ ,  $b_{pb}$ ,  $b_{cb}$ ,  $b_{ab}$ ,  $b_{tq}$ ,  $b_{ss}$  – коэффициенты матрицы реальных значений ПГ, получены на основании теории термодинамики;  $\beta_{wp}$  – коэффициент наклона статической характеристики регулирующего

питательного клапана минус единица;  $\theta_t$ ,  $\theta_m$  – относительные координаты температуры теплоносителя и металлической трубки;  $\xi_w$ ,  $\xi_c$ , – относительные координаты воды и уровня;  $g_a$  – относительная координата расхода пара над зеркалом испарения;  $\pi_k$  – относительное значение давления в главном паровом коллекторе (ГПК);  $\mu_s$  и  $\mu_w$  – относительные координаты регулирующих клапанов турбины и питательной воды в ПГ;  $u_L$  – интегральная составляющая ПИ регулятора САУУ ПГ;  $K_L$ ,  $\lambda_L$  – параметры ПИ регулятора САУУ ПГ.

Исполнительный механизм представим инерционным звеном первого порядка с ПФ:

$$W_a(s) = 1/(T_a s + 1),$$

где  $T_a$  – постоянная времени привода. Этой ПФ отвечает дифференциальное уравнение (ДУ):

$$d\mu_a/d\tau = a_a \mu_a + b_a u, \quad (5)$$

где  $\mu_a$  – относительная координата исполнительного механизма,  $u$  – входное воздействие,  $a_a = -t_b/T_a$ ,  $b_a = t_b/T_a$ .

Питательный насос представим инерционным звеном первого порядка, которому отвечает ДУ

$$d\pi_p/d\tau = a_p \pi_p + b_p \mu_a + b_v \pi_v, \quad (6)$$

где  $\pi_p$  – относительное значение давления ПТН;  $a_p = -t_b/T_p$ ,  $b_p = K_p t_b/T_p$ ;  $K_p$  и  $T_p$  – коэффициент усиления и постоянная времени насоса;  $\pi_v$  и  $b_v$  – относительная координата давления в цилиндре высокого давления (ЦВД) и коэффициент этой координаты. ПВД представим инерционным звеном первого порядка с ДУ

$$T_w d\pi_w/d\tau = -\alpha_{ws} \pi_s - k_{pw} \pi_w - \mu_w + (k_{pp} - \alpha_{wp}) \pi_p, \quad (7)$$

где  $T_w$  – постоянная времени ПВД;  $\alpha_{ws}$ ,  $\alpha_{wp}$  – коэффициенты линеаризации расхода воды;  $k_{pw}$ ,  $k_{pp}$  – коэффициенты линеаризации ПВД. Также инерционным звеном первого порядка представим ЦВД и прилегающие к нему трубопроводы

$$d\pi_v/d\tau = a_v \pi_v + b_{vk} \pi_k a, \quad (8)$$

где  $a_v = -t_b/T_v$ ,  $b_{vk} = K_v t_b/T_v$ ;  $K_v$ ,  $T_v$  – коэффициент усиления и постоянная времени ЦВД.

На основании уравнений (3)–(8) модель парогенератора, как объекта регулирования производительности ПТН, в общем виде запишем:

$$d\mathbf{X}_C/d\tau = \mathbf{A}_C \mathbf{X}_C + \mathbf{B}_C u + \mathbf{B}_{Cq} q + \mathbf{B}_{Cu} u_s, \quad (9)$$

$$g_w = \mathbf{C}_{Cg} \mathbf{X}_C, \quad (10)$$

где

$$\mathbf{A}_C = \begin{pmatrix} \mathbf{A}_L & \mathbf{B}_{L\pi} & 0 & 0 & 0 \\ z_1 & -k_{pw}a_w & b_w a_w & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_p & b_p & b_v \\ 0 & 0 & 0 & a_a & 0 \\ z_2 & 0 & 0 & 0 & a_v \end{pmatrix}, \quad \mathbf{X}_C = \begin{pmatrix} \mathbf{X}_L \\ \pi_w \\ \pi_p \\ \mu_a \\ \pi_v \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{B}_C = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ b_a \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{B}_{Cq} = \begin{pmatrix} \mathbf{B}_{Lq} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{B}_{Cu} = \begin{pmatrix} \mathbf{B}_{Lu} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{C}_{Cg} = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ \alpha_{ws} \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ \alpha_{wp} \ 0 \ 0 \ 0),$$

$$a_w = t_b/T_w, \quad b_w = (k_{pp} - \alpha_{wp})t_b,$$

$$z_1 = (0 \ 0 \ 0 \ -\alpha_{ws} a_w \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ -a_w \ 0),$$

$$z_2 = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ b_{vk} \ 0 \ 0 \ 0).$$

С учетом формул (9), (10) вычисление погрешности (2) имеет вид:

$$\varepsilon = \varphi_s - \mathbf{D}_g \mathbf{X}_C, \tag{11}$$

где

$$\mathbf{D}_g = (-k_t \ 0 \ 0 \ -k_s \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ k_w \ 0 \ 0 \ 0).$$

Модели САУ с ПИ регулятором построим по уравнениям (9)–(11) при  $u = u_P + u_I$ :

$$\begin{cases} \frac{d\mathbf{X}_C}{d\tau} = \mathbf{A}_C \mathbf{X}_C + \mathbf{B}_C u_{CI} + \mathbf{B}_C K_{CP} (\varphi_s - \mathbf{D}_g \mathbf{X}_C) + \mathbf{B}_{Cq} q + \mathbf{B}_{Cu} u_s, \\ \frac{du_{CI}}{d\tau} = \lambda_{CI} (\varphi_s - \mathbf{D}_g \mathbf{X}_C). \end{cases}$$

Объединив переменные состояния, имеем:

$$\mathbf{X}_{Cpi} = \begin{pmatrix} \mathbf{X}_C \\ u_{CI} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{A}_{Cpi} = \begin{pmatrix} \mathbf{A}_C - \mathbf{B}_C K_{CP} \mathbf{D}_g & \mathbf{B}_C \\ -\lambda_{CI} \mathbf{D}_g & 0 \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{B}_{C\varphi pi} = \begin{pmatrix} \mathbf{B}_C K_{CP} \\ \lambda_{CI} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{B}_{Cq pi} = \begin{pmatrix} \mathbf{B}_{Cq} \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{B}_{Cu pi} = \begin{pmatrix} \mathbf{B}_{Cu} \\ 0 \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{C}_{Cg pi} = (\mathbf{C}_{Cg} \ 0),$$

$$d\mathbf{X}_{Cpi}/d\tau = \mathbf{A}_{Cpi} \mathbf{X}_{Cpi} + \mathbf{B}_{C\varphi pi} \varphi_s + \mathbf{B}_{Cq pi} q + \mathbf{B}_{Cu pi} u_s, \tag{12}$$

$$g_w = \mathbf{C}_{Cg pi} \mathbf{X}_{Cpi}. \tag{13}$$

**Методика идентификации системы.** Значения конструктивных и технологических параметров парогенератора ПГВ-1000, взятые из различных источников, могут содержать погрешности различной величины. Значения параметров выведенной модели САУП (3)–(13) приведены в табл. 1 и содержат погрешности исходных значений параметров ПГ, а также погрешности моделирования. Поэтому выполним идентификацию параметров моделей ПГ и его САУ по экспериментальным динамическим характеристикам.

Таблица 1 – Значения параметров модели парогенератора

Параметр	Значение	Параметр	Значение	Параметр	Значение
$a_{tt}$	-0,779	$a_{pd}$	-0,004	$a_{ad}$	-0,014
$a_{tm}$	0,741	$a_{cm}$	19,9	$a_{kp}$	0,179
$a_{mt}$	1,414	$a_{cp}$	5,22	$a_{kk}$	-0,199
$a_{mm}$	-4,048	$a_{ca}$	-2,55	$a_{ks}$	-0,039
$a_{mp}$	0,627	$a_{ck}$	-8,53	$a_{ss}$	-0,2
$a_{wm}$	0,093	$a_{cd}$	-0,063	$a_{dd}$	-0,12
$a_{wp}$	-0,117	$a_{am}$	1,49	$b_{tq}$	0,039
$a_{wk}$	0,050	$a_{aw}$	-44,2	$b_{vu}$	0,12
$a_{wd}$	0,001	$a_{ap}$	80,9	$b_{wb}$	0,044
$a_{pm}$	1,420	$a_{ac}$	3,83	$b_{pb}$	-0,02
$a_{pp}$	-0,457	$a_{aa}$	-75,3	$b_{cb}$	-0,282
$a_{pk}$	0,131	$a_{ak}$	0,161	$b_{ab}$	-0,061
$b_a$	0,120	$a_w$	0,667	$\alpha_{ws}$	-4
$a_p$	-1	$k_w$	2,4	$\alpha_{sk}$	4,07
$b_p$	1	$k_s$	1,9	$k_{pp}$	5
$b_v$	1	$k_t$	42,08	$k_{pw}$	4,5
$a_v$	1	$\beta_{wp}$	-8,57	—	—
$b_{vk}$	1	$\alpha_{wp}$	4,5	—	—

Для постановки задачи идентификации параметров сформируем вектор  $\mathbf{x}$  из 54 варьируемых параметров. Для начального вектора варьируемых параметров  $\mathbf{x}^{(0)}$  значения 50 известных параметров зададим из табл. 1. В реальной САУ ПГВ-1000 применяются ПИ регуляторы [4], поэтому неизвестные начальные значения параметров ПИ регуляторов уровня и производительности положим равными 1. Перейдем к относительным значениям варьируемых параметров  $y_i = x_i/x_i^{(0)} - 1, \quad y_i^{(0)} = 0, \quad i = \overline{1, 54}$ . К значениям исходных варьируемых параметров от их относительных значений можно перейти по формуле

$$x_i = x_i^{(0)}(y_i + 1), \quad i = \overline{1, 54}. \tag{14}$$

Поскольку заранее неизвестны знаки и величины погрешностей варьируемых параметров, наложим на их относительные значения двусторонние ограничения  $a_i \leq y_i \leq b_i, \quad i = \overline{1, 54}$ . Для параметров модели ПГ зададим симметричные ограничения, полагая  $a_i = -d, \quad b_i = d, \quad i = \overline{1, 32, 35, 38, 44, 47, 50, 54}$ , где постоянный положительный параметр  $d$  задает предельно допустимое относительное отклонение варьируемого параметра. Для ограничений относительных параметров регуляторов положим  $a_i = -0,99, \quad b_i = 99, \quad i = \overline{33, 34, 45, 46}$ , что соответствует изменению исходных варьируемых параметров регуляторов  $K_L, K_{CP}, \lambda_L$  и  $\lambda_{CI}$  в

реализуемых пределах от 0,01 до 100. На неизвестные параметры  $a_v$ ,  $b_p$  и  $a_p$  наложим относительные ограничения  $a_i = 0$ ,  $b_i = 99$ ,  $i = 36, 37, 52$ , поскольку они заранее не найдены численно и их начальные значения приняты равными 1. Неизвестные коэффициенты  $b_v$  и  $b_{vk}$  ограничены значениями  $a_i = -101$ ,  $b_i = 100$ ,  $i = 51, 53$ , иначе вместо инерционных звеньев получаются интегрирующие. При  $p = 54$  сформируем штрафную функцию нарушения двусторонних ограничений с помощью операции срезки  $\lfloor y \rfloor = \max\{y, 0\}$  отобразим штрафной функцией:

$$S(\mathbf{y}) = \sum_{i=1}^{54} [\lfloor a_i - y_i \rfloor + \lfloor y_i - b_i \rfloor]. \quad (15)$$

Выразим через вектор  $\mathbf{y}$  матрицы модели САУП ПГ (12) и (13) с включенным регулятором уровня:  $\mathbf{A}_{Cpi} = \mathbf{A}_{Cpi}(\mathbf{y})$ ,  $\mathbf{B}_{Cphi} = \mathbf{B}_{Cphi}(\mathbf{y})$ ,  $\mathbf{B}_{Cpsi} = \mathbf{B}_{Cpsi}(\mathbf{y})$ ,  $\mathbf{B}_{Cupi} = \mathbf{B}_{Cupi}(\mathbf{y})$ ,  $\mathbf{C}_{Cpsi} = \mathbf{C}_{Cpsi}(\mathbf{y})$ ,  $\mathbf{C}_{Cphi} = \mathbf{C}_{Cphi}(\mathbf{y})$ ; модели САУП ПГ с отключенным регулятором уровня:  $\mathbf{A}_{Lpi} = \mathbf{A}_{Lpi}(\mathbf{y})$ ,  $\mathbf{B}_{Lphi} = \mathbf{B}_{Lphi}(\mathbf{y})$ ,  $\mathbf{B}_{Lpsi} = \mathbf{B}_{Lpsi}(\mathbf{y})$ ,  $\mathbf{B}_{Lupi} = \mathbf{B}_{Lupi}(\mathbf{y})$ ,  $\mathbf{C}_{Lpsi} = \mathbf{C}_{Lpsi}(\mathbf{y})$ . Определим модели САУП ПГ с отключенным и включенным регулятором уровня при одном входном возмущающем воздействии  $u_s = -0,25$  и выходным координатам приращения уровня и давления в ГПК:

$$\begin{aligned} d\mathbf{X}_{Cpi}(\mathbf{y}, \tau)/d\tau &= \mathbf{A}_{Cpi}(\mathbf{y})\mathbf{X}_{Cpi}(\mathbf{y}, \tau) + \\ &+ \mathbf{B}_{Cphi}(\mathbf{y})\varphi_s + \mathbf{B}_{Cpsi}(\mathbf{y})q + \mathbf{B}_{Cuc}(\mathbf{y})u_s, \\ H_{Cpi}(\mathbf{y}, \tau) &= h_c \mathbf{C}_{Cpsi} \mathbf{X}_{Cpi}(\mathbf{y}, \tau), \\ P_{Cpi}(\mathbf{y}, \tau) &= p_{k0} \mathbf{C}_{Cphi} \mathbf{X}_{Cpi}(\mathbf{y}, \tau); \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} d\mathbf{X}_{Lpi}(\mathbf{y}, \tau)/d\tau &= \mathbf{A}_{Lpi}(\mathbf{y})\mathbf{X}_{Lpi}(\mathbf{y}, \tau) + \mathbf{B}_{Lphi}(\mathbf{y})\varphi_s + \\ &+ \mathbf{B}_{Lpsi}(\mathbf{y})q + \mathbf{B}_{Luc}(\mathbf{y})u_s, \\ H_{Lpi}(\mathbf{y}, \tau) &= h_c \mathbf{C}_{Lpsi} \mathbf{X}_{Lpi}(\mathbf{y}, \tau), \end{aligned} \quad (17)$$

где

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_{Cpsi} &= (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0), \\ \mathbf{C}_{Cphi} &= (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0), \\ \mathbf{C}_{Lpsi} &= (\mathbf{C}_{Cpsi} \ 0). \end{aligned}$$

Здесь  $H_{Cpi}(\mathbf{y}, \tau)$  и  $H_{Lpi}(\mathbf{y}, \tau)$  – приращения уровня в ПГ в миллиметрах;  $h_c = 150$  мм – коэффициент перехода от относительной безразмерной координаты уровня  $\xi_c$  к размерной координате приращения уровня  $H = \Delta h_c$ ;  $P_{Cpi}(\mathbf{y}, \tau)$  – давление в ГПК;  $p_{k0} = 57$  МПа – коэффициент перехода от

относительной безразмерной координаты давления  $\pi_k$  к размерной координате давления [3].

Для учета устойчивости реальной САУП ПГ по матрице модели САУУ  $\mathbf{A}_{Cpi}(\mathbf{y})$  сформируем ее характеристический многочлен  $\alpha(\mathbf{y}, s)$ , определим для него штрафную функцию  $P(\mathbf{y})$

$$P(\mathbf{y}) = \sum_{i=0}^{15} \lfloor -\alpha_i(\mathbf{y}) \rfloor, \quad (18)$$

нарушения необходимых условий устойчивости и коэффициенты первого столбца таблицы Рауса  $\rho_k(\mathbf{y})$ ,  $k = \overline{0, 15}$  [5]. Обозначим экспериментальные процессы приращения уровня в ПГВ-1000 при возмущении нагрузкой турбины 25%  $N_{ном}$ :  $H_S(\tau)$  – процесс при включенном РУ,  $H(\tau)$  – процесс при отключенном РУ [4]. Экспериментальные процессы приращения давления в ГПК при включенном регуляторе уровня обозначим  $P_S$ . Определим дискретные точки процессов с шагом  $h = 3$  с в моменты времени  $t_1 = 0$ ,  $t_k = \overline{t_{k-1} + h}$ ,  $k = 2, 3, \dots$ :  $H_{Sk} = H_S(t_k)$ ,  $P_{Sk} = P_S(t_k)$ ,  $k = \overline{1, N_S}$ ,  $N_S = 81$ ,  $H_{Ek} = H(t_k)$ ,  $k = \overline{1, N_G}$ ,  $N_G = 59$ . Экспериментальные данные процессов приращения уровня и давления в ГПК приведены на рис. 1 [4]. Интегрируя СДУ (12) при нулевых начальных условиях с шагом  $h$  методом матричной экспоненты и ее интеграла [5], вычислим  $H_{Cpiik}(\mathbf{y}) = H_{Cpi}(\mathbf{y}, t_k)$ ,  $P_{Cpiik}(\mathbf{y}) = P_{Cpi}(\mathbf{y}, t_k)$ ,  $k = \overline{1, N_S}$ ,  $H_{Lpiik}(\mathbf{y}) = H_{Lpi}(\mathbf{y}, t_k)$ ,  $k = \overline{1, N_G}$ . Составим функцию невязки

$$\begin{aligned} f(\mathbf{y}) &= \sum_{k=1}^{N_S} [H_{Sk} - H_{Cpiik}(\mathbf{y})]^2 + \sum_{k=1}^{N_G} [H_{Ek} - H_{Lpiik}(\mathbf{y})]^2 + \\ &+ \sum_{k=1}^{N_S} [P_{Sk} - P_{Cpiik}(\mathbf{y})]^2, \end{aligned} \quad (19)$$

где первая сумма определяет ошибку изменения уровня в модели САУП с включенным регулятором уровня, вторая – в модели САУП с отключенным регулятором уровня, третья – изменения давления в ГПК в модели САУП с включенным РУ.

Определим области уровней ограничений  $H_k$ ,  $k = \overline{0, n}$ , где  $n = 15$  – порядок САУП [1]. На основании функций (15), (18) и (19) сформируем векторную целевую функцию

$$\mathbf{F}(\mathbf{y}) = \begin{cases} (0; S(\mathbf{y})), & \mathbf{y} \in H_0; \\ (1; P(\mathbf{y})), & \mathbf{y} \in H_1; \\ (k; -\rho_k(\mathbf{y})), & \mathbf{y} \in H_k, \quad k = \overline{2, n-1}; \\ (n; f(\mathbf{y})), & \mathbf{y} \in H_n. \end{cases} \quad (20)$$

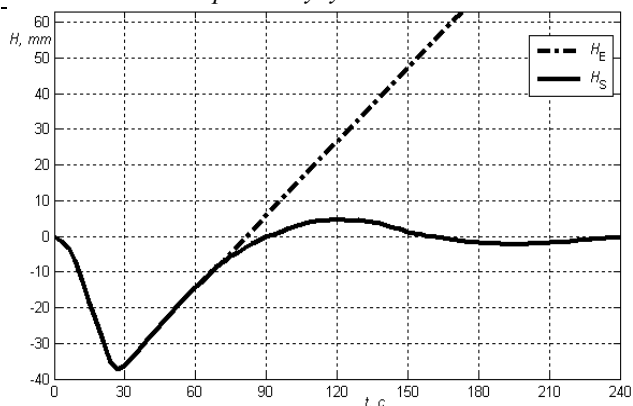


Рис. 1 – Графики числовых значений экспериментальных характеристик парогенератора

Для решения задачи идентификации параметров САУП ПГ векторную функцию (20) будем оптимизировать с использованием операции векторного сравнения векторными методом Хука-Дживса со значением параметра  $d = 0,5$  для допустимых отклонений ограничений от проекций начального вектора [5].

**Результаты идентификации.** Полученные оптимизацией векторной функции (20) результаты идентификации параметров САУП приведены в табл. 2. Им отвечают значения  $F_1 = 15$  и  $F_2 = 171$  для векторной функции (20), значения  $f = 171$  функции невязки (19) и  $\delta = 1,1$  среднеквадратического отклонения (СКО):  $\delta = \sqrt{f(y)/(N_G + N_S)}$ . В начальной точке ( $d = 0$ ) не выполняются условия устойчивости САУП:  $F_1 = 13 < 15$ , значение  $F_2$  соответствует штрафу нарушенного условия. Оптимизация функции (20) позволила перейти в область устойчивости САУП ( $F_1 = 15$ ) и существенно уменьшить значение функции невязки. СКО составило около 1 мм при диапазоне изменения экспериментальных данных 101 мм, то есть относительное значение СКО стало около 1 %.

На рис. 2 представлен процесс отклонения уровня в САУП ПГ при отключенном РУ, а на рис. 3 представлены процессы отклонения уровня и давления в САУП ПГ при включенном РУ. Точками обозначены экспериментальные данные, тонкими линиями – процессы при начальных значениях варьируемых параметров модели САУП ПГ из табл. 1, толстыми линиями – процессы, соответствующие оптимизации функции (20) при  $d = 0,5$ . При начальных значениях варьируемых параметров модели САУП ПГ и отключенном регуляторе уровня уровень быстро неограниченно понижается (рис. 2), а при включенном РУ процесс изменения уровня – неустойчивый колебательный (рис. 3).

Также неустойчивый колебательный процесс характеризует давление при начальных значениях параметров и включенном РУ (рис. 3). При  $d = 0,5$  наблюдается совпадение процессов в модели с экспериментальными процессами как при отключенном, так и при включенном РУ (рис. 2 и 3).

Таблица 2 – Значения параметров модели САУП после идентификации

Параметр	Относ. значение	Значение	Параметр	Относ. значение	Значение
$a_{tt}$	0,051	-0,819	$a_{pk}$	0,500	0,197
$a_{tm}$	-0,206	0,589	$a_{pd}$	-0,456	-0,002
$a_{mt}$	-0,355	0,909	$a_{cm}$	0,500	29,850
$a_{mm}$	0,111	-4,500	$a_{cp}$	0,500	7,83
$a_{mp}$	-0,317	0,428	$a_{ca}$	-0,082	-2,342
$a_{wm}$	0,225	0,114	$a_{ck}$	-0,500	-4,265
$a_{wp}$	-0,123	-0,103	$a_{cd}$	-0,500	-0,031
$a_{wk}$	-0,303	0,035	$a_{am}$	-0,500	0,745
$a_{wd}$	-0,498	0,005	$a_{aw}$	-0,500	-22,10
$a_{pm}$	-0,492	0,722	$a_{ap}$	-0,500	40,450
$a_{pp}$	0,446	-0,661	$a_{ac}$	0,500	5,745
$a_{aa}$	-0,309	-52,030	$b_{cb}$	0,467	-0,414
$a_{ak}$	-0,500	0,081	$b_{ab}$	-0,477	-0,032
$a_{ad}$	0,500	-0,020	$k_w$	-0,117	2,119
$a_{kp}$	0,413	0,253	$k_s$	-0,296	1,338
$a_{kk}$	-0,132	-0,173	$k_t$	-0,085	38,489
$a_{ks}$	-0,500	-0,020	$k_{pp}$	-0,113	4,434
$a_{ss}$	-0,500	-0,1	$k_{pw}$	0,315	5,920
$a_{dd}$	0,500	-0,18	$b_a$	0,383	0,166
$\beta_{wp}$	-0,500	-4,285	$a_p$	0,000	-1
$\alpha_{wp}$	-0,223	3,496	$b_p$	0,071	1,071
$\alpha_{ws}$	-0,500	-2	$b_v$	2,595	3,595
$\alpha_{sk}$	0,500	6,105	$a_v$	0,000	-1
$b_{wb}$	-0,437	0,025	$b_{vk}$	2,189	3,189
$b_{pb}$	0,500	-0,030	$a_w$	-0,500	0,333

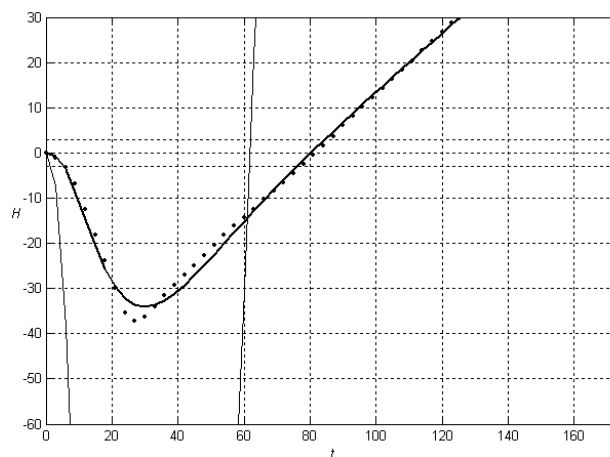


Рис. 2 – Отклонение уровня при отключенном РУ

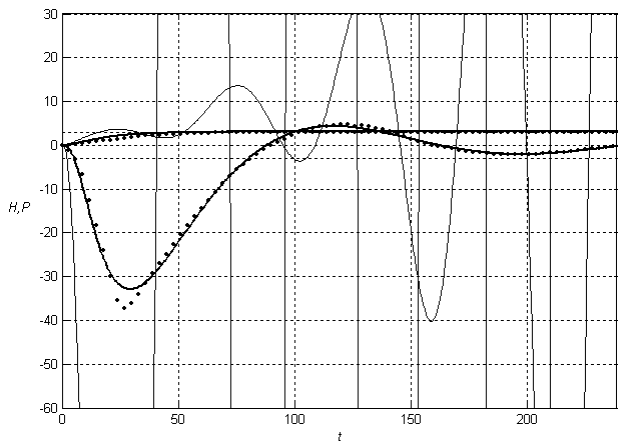


Рис. 3 – Отклонение уровня и давления при включенном РУ

На основании проведенного анализа таблиц и графиков примем для дальнейшего исследования САУП ПГ результаты идентификации параметров ПГ при  $d = 0,5$ . Проведем исследование динамики САУП ПГ с отключенным и включенным РУ при входном возмущающем воздействии  $u_s = 1(t)$ .

На рис. 4 представлены изменения переменных состояния САУП ПГ, полученные интегрированием СДУ (16) при отключенном РУ. Клапан регулирования турбины открывается, его относительная координата  $\mu_s$  увеличивается до единичного значения. С запаздыванием увеличивается относительная координата исполнительного механизма  $\mu_a$ . Давления в ГПК и ПГ падают, их относительные координаты  $\pi_k$  и  $\pi_s$  уменьшаются. Уменьшаются давления в ЦВД  $\pi_v$  и ПВД  $\pi_w$ . Давление в ПТН  $\pi_p$  вначале уменьшается, а затем увеличивается. Процесс парообразования под зеркалом испарения усиливается, часть воды в ПГ вскипает, объем пара под зеркалом испарения увеличивается, повышается уровень пароводяной смеси  $\xi_c$  и проявляется эффект «вскипания» уровня [4]. Координата объема воды  $\xi_w$  уменьшается. Снижение давления в ПГ приводит к уменьшению температур пароводяной смеси  $\theta_w$ , металла теплообменных трубок  $\theta_m$  и теплоносителя  $\theta_t$ . Координаты расхода пара увеличиваются, а координата расхода воды падает.

На рис. 5 представлены изменения переменных состояния САУП ПГ с включенным РУ, полученные интегрированием СДУ (17), для которой идентифицированы значения параметров ПИ регуляторов:  $K_L = 32,587$ ,  $K_{CP} = 0$ ,  $\lambda_L = 100\text{c}^{-1}$ ,  $\lambda_{CI} = 0,2153\text{c}^{-1}$ . Координата клапана регулирования турбины  $\mu_s$  увеличивается, с запаздыванием увеличивается относительная координата исполнительного механизма  $\mu_a$ , а координаты давлений в ГПК  $\pi_k$ , ПГ  $\pi_s$ , в ЦВД  $\pi_v$  и ПВД  $\pi_w$  уменьшаются.

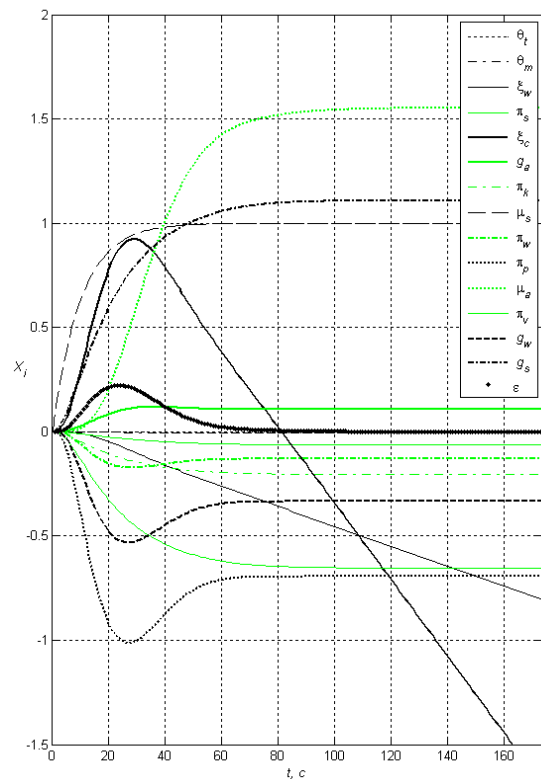


Рис. 4 – Изменение переменных состояния САУП ПГ при отключенном РУ

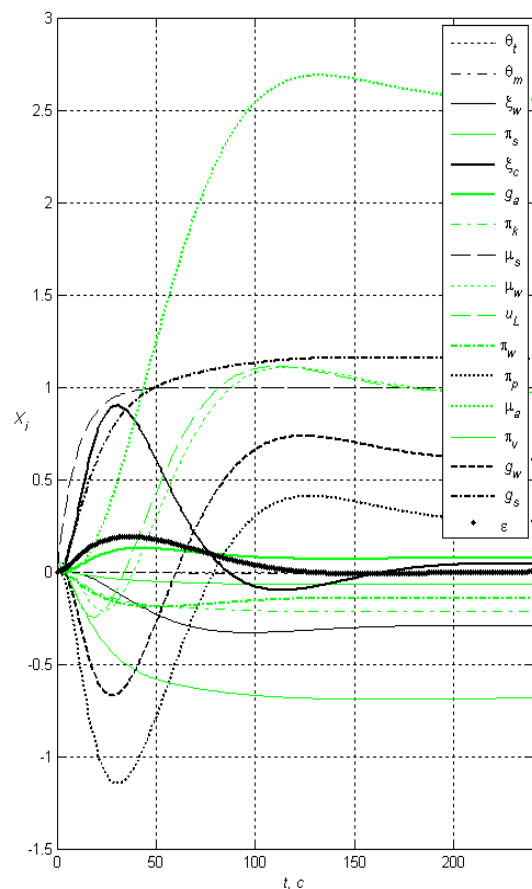


Рис. 5 – Изменение переменных состояния САУП ПГ при включенном РУ

Происходит «вскипание» уровня с повышением  $\xi_c$ ,

объем воды  $\xi_w$  снижается. Координаты расхода пара увеличивается. Координата расхода воды падает, а затем увеличивается. С течением времени все координаты приходят к своим установившимся значениям, причем процессы изменения  $\mu_s, \pi_k, \pi_s, \pi_v, g_a, \theta_m, \theta_t, g_s$  монотонные, а изменения  $\xi_c, \xi_w, \mu_w, \mu_a, u_L, \pi_p, \pi_w, g_w$  и  $\varepsilon$  – колебательные, ошибка  $\varepsilon$  с течением времени стремится к нулю. Таким образом, САУП выполняет задачу стабилизации расхода воды.

**Выводы.** Рассмотрена система автоматического управления производительностью парогенератора ПГВ-1000. Разработана ее математическая модель, представленная в пространстве состояний с относительными переменными, на основе системы управления уровнем воды в парогенераторе с пропорционально-интегральными регуляторами и вычислены значения постоянных параметров. Задача идентификации параметров модели системы по экспериментальным данным процессов отклонения уровня и давления в ПГВ-1000 с отключенным и включенным регулятором уровня сведена к задаче оптимизации векторной целевой функции, учитывающей ограничения идентифицируемых параметров, ограничения устойчивости системы управления, функцию невязки экспериментальных данных и процессов моделей. Векторным методом оптимизации вычислены значения параметров системы управления при величине ограничения 0,5 для допустимого отклонения относительных значений параметров, обеспечивающие среднеквадратическое отклонение моделируемых и экспериментальных процессов 1%. Построены динамические процессы изменения переменных состояния системы, отражающие колебательный затухающий характер процессов управления.

**Список литературы:** 1. *Северин В. П.* Математическое моделирование парогенератора атомного энергоблока / *В. П. Северин, Е. Н. Никулина* // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ», 2006. – № 19. – С. 145-150. 2. *Никулина Е. Н.* Модели систем автоматического управления производительностью парогенератора / *Е. Н. Никулина* // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ», 2010. – № 23. – С. 124-130. 3. *Северин В. П.* Математическое моделирование и оптимизация показателей качества систем автоматического регулирования реакторной установки / *В. П. Северин* // Ядерная и радиационная безопасность, 2007. – Том 10. – Вып. 2. – С. 66-77. 4. *Павлыш О. Н.* Автоматическое регулирование производительности питательных турбонасосов моноблока 1000 МВт АЭС / *О. Н. Павлыш, И. П. Гарбузов, Ю. М. Реуков* // М. – Энергетик. – 1985. – №10. – С. 12-14. 5. *Никулина Е. Н.* Оптимальный синтез перспективных систем управления реакторной установки ВВЭР-1000 в нормальных режимах эксплуатации / *Е. Н. Никулина, В. П. Северин* // Проблемы обеспечения безопасности информационных и управляющих систем АЭС: сборник научных трудов. – Одесса: Астропринт, 2010. – С. 179-192.

**Bibliography (transliterated):** 1. Severin, V. P., E. N. Nikulina "Matematicheskoye modelirovaniye parogeneratora atomnogo energobloka." [Mathematical modeling of the steam generator of nuclear power] *Visnyk NTU "KhPI"*. no 19. 2006. 145-150. Print. 2. Nikulina, E. N. "Modeli sistem avtomaticheskogo upravleniya proizvoditel'nost'yu parogeneratora." [Models of automatic control systems of steam generator capacity] *Visnyk NTU "KhPI"*. no 23. 2010. P. 124-130. Print. 3. Severin, V. P. "Matematicheskoye modelirovaniye i optimizatsiya pokazatelej kachestva sistem avtomaticheskogo regulirovaniya reaktornoj ustanovki." [Mathematical modeling and optimization of quality parameters of automatic control systems of the reactor plant] *Jadernaja i radiatsionnaja bezopasnost'*. Vol. 10. 2007. 66-77. Print. 4. Pavlysh, O. N., I. N. Garbuzov and Ju. M. Reukov "Avtomaticheskoye regulirovaniye proizvoditel'nosti pitatel'nyh turbonosov monobloka 1000 MVt AES." [Automatic control of the performance of turbo feed pumps monoblock 1000 MW nuclear power plant] *Energetik*. no 10. 1985. P. 12-14. Print. 5. Nikulina, E. N., V. P. Severin "Optimal'nyj sintez perspektivnyh sistem upravleniya reaktornoj ustanovki VVER-1000 v normal'nyh rezhimakh ekspluatatsii." [Optimal synthesis of perspective control systems of the reactor plant WWER-1000 in normal operating conditions] *Problemy obespechenija bezopasnosti informatsionnyh i upravljajushih sistem AES: sbornik nauchnyh trudov*. Odessa. 2010. P. 179-192. Print.

Поступила (received) 05.03.2016

**Северин Валерій Петрович** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри системного аналізу та управління; м. Харків, Україна, тел.: (066) 847-83-70; e-mail: severinv@mail.ru.

**Severin Valeriy Petrovich** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor, Department of Systems Analysis and Control of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; tel.: (066) 847-83-70; e-mail: severinv@mail.ru.

**Никуліна Олена Миколаївна** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри радіоелектроніка; м. Харків, Україна, тел.: (050) 100-79-65; e-mail: elena78\_02@inbox.ua.

**Nikulina Elena Nikolaevna** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Associate Professor, Department of Radioelectronics of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; tel.: (050) 100-79-65; e-mail: elena78\_02@inbox.ua.

**Трубчанова Ніна Вікторівна** – інженер, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», інженер кафедри радіоелектроніка; м. Харків, Україна, тел.: (099) 92-29-312; e-mail: ninulya.av@gmail.com.

**Trubchanova Nina Victorivna** – engineer, National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", engineer of Department of Radioelectronics Kharkiv, Ukraine; tel.: (099) 92-29-312; e-mail: ninulya.av@gmail.com.