

Многокритериальный синтез систем управления реакторной установки путем минимизации интегральных квадратичных оценок

Рассматривается математическое моделирование систем автоматического управления реакторной установки ВВЭР-1000 с различными типами регуляторов. Разработаны линейные модели систем управления тепловой мощностью ядерного реактора ВВЭР-1000. Приведены результаты многокритериального синтеза систем управления тепловой мощностью ядерного реактора ВВЭР-1000 путем минимизации улучшенных интегральных квадратичных оценок. Разработаны линейные модели систем управления производительностью парогенератора ПГВ-1000. Проведены идентификация и многокритериальная оптимизация систем управления производительностью парогенератора ПГВ-1000 с различными типами регуляторов.

О. М. Нікуліна, В. П. Северин

Багатокритеріальний синтез систем управління реакторної установки шляхом мінімізації інтегральних квадратичних оцінок

Розглядається математичне моделювання систем автоматичного управління реакторної установки ВВЕР-1000 з різними типами регуляторів. Розроблено лінійні моделі систем управління тепловою потужністю ядерного реактора ВВЕР-1000. Наведено результати багатокритеріального синтезу систем управління тепловою потужністю ядерного реактора ВВЕР-1000 шляхом мінімізації покращених інтегральних квадратичних оцінок. Розроблено лінійні моделі систем управління продуктивністю парогенератора ПГВ-1000. Виконано ідентифікацію і багатокритеріальну оптимізацію систем управління продуктивністю парогенератора ПГВ-1000 з різними типами регуляторів.

Системы управления реакторной установки должны удовлетворять многочисленным требованиям по безопасности, надежности и качеству процессов [1–4]. Одна из основных научных задач создания систем автоматического управления (САУ) установки — задача многокритериального параметрического синтеза систем. Особенности этой задачи являются влияние на показатели качества систем управления реакторной установки многих конструктивных параметров, математические модели высокого порядка в виде систем дифференциальных уравнений (СДУ), сложность определения значений параметров с учетом условий физической и практической реализуемости процессов [5–7].

Обычно методы параметрического синтеза систем управления основаны на существенном снижении порядка моделей систем и использовании упрощенных критериев качества [8, 9]. При этом теоретически полученные значения параметров модели, как правило, не обеспечивают желаемых процессов в реальной системе. Целесообразно для идентификации моделей использовать данные экспериментов по исследованию динамики процессов управления [10–12]. Узким местом параметрического синтеза систем управления является недостаточное применение численных методов для оптимизации показателей качества, обусловленное ограниченной областью определения показателей. Существенного повышения качества многокритериального синтеза систем можно достичь векторной оптимизацией показателей на основании пошагового подхода последовательного выполнения требований к системе [13, 14]. Такой подход показал свою эффективность при параметрическом синтезе систем управления нейтронной мощностью реактора и уровнем воды в парогенераторе [15, 16]. В связи с этим возникает необходимость в разработке моделей и методов многокритериального параметрического синтеза САУ реакторной установки, основанных на методах оптимизации показателей качества систем управления, которая и определяет актуальность данной работы.

Динамические свойства реакторной установки ВВЭР зависят от ее локальных САУ — перспективной САУ тепловой мощностью (САУТМ) ядерного реактора, САУ производительностью (САУП) парогенератора и др. [3]. Для улучшения динамических свойств САУ реакторной установки предлагается оптимизировать улучшенные интегральные квадратичные оценки (ИКО) математических моделей САУ.

Цель статьи состоит в математическом моделировании САУТМ и САУП реакторной установки ВВЭР-1000, а также оптимизации их ИКО. Рассматривается многокритериальный принцип формирования улучшенных ИКО; приводятся векторные целевые функции для синтеза систем управления путем минимизации ИКО, математическое моделирование элементов реакторной установки ВВЭР-1000, ее САУТМ и САУП с различными типами регуляторов, а также результаты синтеза САУТМ. Выполняется идентификация САУП по экспериментальным данным [10] и ее синтез.

Улучшенные интегральные квадратичные оценки

Пусть $y(x, t)$ — переходная функция САУ, зависящая от вектора переменных параметров $x \in R^P$ и масштабированная: $y(x, 0) = 0$, $y(x, \infty) = 1$. По отклонению $z(x, t) = y(x, \infty) - y(x, t)$ сформируем простейшую ИКО отклонения

$$J_0(x) = \int_0^{\infty} [z(x, t)]^2 dt. \quad (1)$$

Минимизация этой ИКО приводит к переходным процессам с большими значениями перерегулирования и показателей колебательности [8]. Для уменьшения этих значений используют ИКО производных отклонения

$$J_k(x) = \int_0^{\infty} \left[\frac{\partial^k z(x, t)}{\partial t^k} \right]^2 dt. \quad (2)$$

Минимизация таких ИКО приводит к переходным процессам с большим значением времени регулирования [8]. Таким образом, частные критерии качества САУ (1) и (2) противоречивы. Решение многокритериальной задачи оптимизации критериев качества (1) и (2) в виде компромисса их применения может быть достигнуто использованием свертки этих критериев и переходом к минимизации улучшенной ИКО:

$$J(x) = \sum_{k=0}^l c_k J_k(x), \quad (3)$$

где c_k — весовые коэффициенты свертки, от выбора которых зависит качество оптимального переходного процесса, полученного минимизацией оценки (3). Эту оценку можно записать в таком виде [9]:

$$J(x) = I(x) + C, \quad (4)$$

где

$$I(x) = \int_0^{\infty} \left[\sum_{k=0}^l w_k z_t^{(k)}(x, t) \right]^2 dt, \quad (5)$$

C — постоянная; w_k ($k = \overline{0, l}$) — весовые коэффициенты этой оценки, которые однозначно определяются коэффициентами оценки (3); $z_t^{(k)}(x, t)$ — производные отклонения по времени.

Улучшенная ИКО (5) также представляет косвенный показатель качества переходных процессов в САУ, но имеющий преимущество перед оценкой (3), поскольку его весовые коэффициенты можно напрямую связать с желаемым качеством оптимального процесса. Разработаны алгоритмы вычисления ИКО (5) [14].

Рассмотрим стандартную передаточную функцию $W_0(s) = 1/(s+1)$, которой соответствует экспоненциальная переходная функция $y_0(t)$ с известным временем регулирования $t_0 = 3\text{ с}$ при зоне установившегося значения 0,05. Зададим желаемое время регулирования t_e , вычислим коэффициент изменения масштаба времени $w = t_e/t_0$ и определим передаточную функцию $W_e(s) = 1/(ws+1)$, которой отвечает эталонная переходная функция $y_e(t) = y_0(t/w)$ с желаемым временем регулирования t_e . Близость масштабированной и эталонной переходных функций определяет ИКО (5) первого порядка с $l = 1$:

$$I(x) = \int_0^{\infty} \left[z(x, t) + w \frac{\partial z(x, t)}{\partial t} \right]^2 dt. \quad (6)$$

Аналогично зададим ИКО второго порядка по формуле (5) при $l = 2$:

$$I(x) = \int_0^{\infty} \left[z(x, t) + w_1 \frac{\partial z(x, t)}{\partial t} + w_2 \frac{\partial^2 z(x, t)}{\partial t^2} \right]^2 dt, \quad (7)$$

где весовые коэффициенты w_1 и w_2 определяются по известной стандартной передаточной функции второго порядка.

Улучшенная ИКО (5) определена в области устойчивости САУ, заданной неравенствами

$$\alpha_i(x) > 0, \quad i = \overline{0, n}; \quad \rho_k(x) > 0, \quad k = \overline{2, n-1}, \quad (8)$$

где $\alpha_i(x)$ — коэффициенты характеристического уравнения САУ; $\rho_k(x)$ — элементы первого столбца таблицы Рауса; n — порядок САУ.

Следовательно, задачи многокритериального параметрического синтеза САУ сводятся к задачам векторной оптимизации улучшенной ИКО (5), которая определена только в области устойчивости САУ. На основе пошагового подхода для последовательного учета ограничений области устойчивости формируются векторные целевые функции критериев качества систем управления в виде двумерной функции $F(x) = (F_1(x); F_2(x))$: первая проекция функции определяет уровень ограничения, а вторая проекция составляется по принципу лексикографической задачи оптимизации [13, 14]. Таким образом, для минимизации ИКО формируется векторная функция:

$$F(x) = \begin{cases} (0; P(x)), & x \in H_0, \\ (k; -\rho_{k+1}(x)), & x \in H_k, \quad k = \overline{1, n-2}, \\ (n-1; I(x)), & x \in H_{n-1}, \end{cases} \quad (9)$$

где $P(x)$ — внешняя штрафная функция необходимых условий устойчивости; H_k — область уровня ограничения, для любой точки которой выполнено k первых ограничений, а следующее ограничение с номером $k+1$ нарушено. Составляющие этой функции: $F_1(x)$ — функция уровня (количество выполненных ограничений), $F_2(x)$ — функция штрафа.

В случае САУ с одним переменным параметром параметрический синтез будем выполнять эффективными векторными методами одномерного поиска — адаптации шага (АШ), делением отрезка пополам (Д2) и золотым сечением (ЗС) [17, 18], а в случае нескольких переменных — векторным методом Нелдера—Мида (НМ), векторным методом Бройдена—Флетчера—Гольдфарба—Шанно (БФГШ) с адаптацией шага и векторным методом Ньютона—Рафсона (НР) с адаптацией шага [19].

Модели систем управления тепловой мощностью реактора

Нейтронная мощность ядерного реактора, входящего в САУ тепловой мощности, регулируется регулятором нейтронной мощности с помощью привода поглощающих стержней. Тепловая мощность регулируется регулятором тепловой мощности, на вход которого поступает сигнал ошибки, формирующийся сигналами с датчиков температур. Структурная схема линейной системы управления тепловой мощностью реактора представлена на рис. 1.

Структурная схема включает сумматор, регулятор тепловой мощности (РТМ), модель системы автоматического управления нейтронной мощностью реактора и отрицательную обратную связь. На вход САУ подается уставка мощности q_{rs} , выходом является координата тепловой мощности q_r . Текущее значение тепловой мощности измеряется датчиком и отрицательной обратной связью подается на сумматор, формируя сигнал ошибки:

$$\varepsilon = q_{rs} - q_r. \quad (10)$$

Ошибка поступает на вход РТМ с передаточной функцией $W_C(t)$, который по заданному закону регулирования

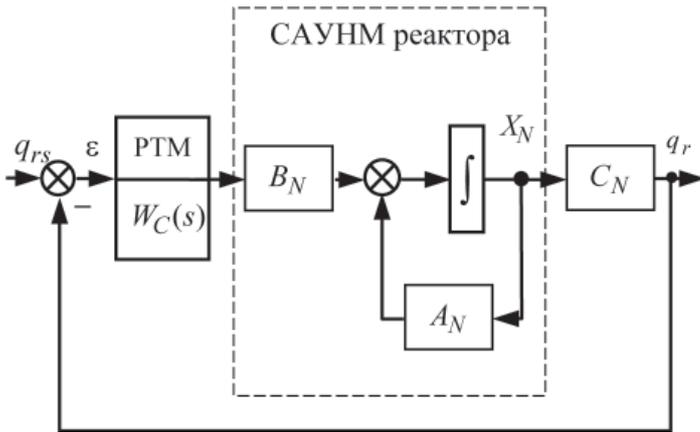


Рис. 1. Структурная схема САУТМ

формирует управляющее воздействие, соответствующее уставке нейтронной мощности v_s . Управляющее воздействие подается на регулятор нейтронной мощности, изменяет вектор его состояния, изменяя тепловую мощность реактора q_r .

Найдем коэффициент перехода k_r от относительной температуры теплоносителя θ_r к относительной тепловой мощности q_r : $q_r = k_r \theta_r$. Из формулы относительной тепловой мощности [7]

$$q_r = \frac{Q_r}{Q_0},$$

где Q_r — тепловая нагрузка активной зоны; Q_0 — мощность реактора в номинальном режиме.

Определим тепловую нагрузку Q_r как

$$Q_r = c_r G_r t_{r0} \theta_r,$$

где c_r — удельная теплоемкость теплоносителя в активной зоне; G_r — массовый расход теплоносителя через реактор; t_{r0} — значение средней температуры теплоносителя в номинальном режиме. Отсюда

$$k_r = \frac{c_r G_r t_{r0}}{Q_0}.$$

Построим математические модели САУ тепловой мощности реактора на основе линейной САУ нейтронной мощностью реактора с двумя группами запаздывающих нейтронов [16] с различными регуляторами в виде

$$\frac{dX_{Hc}}{dt} = A_{Hc} X_{Hc} + B_{Hc} q_{rs}, \quad q_r = C_{Hc} X_{Hc}, \quad (11)$$

где индекс c соответствует типу регулятора.

Модели САУ с ПИ регулятором построим по моделям САУ нейтронной мощностью [16] и ПИ регулятора при $v_s = u_p + u_I$:

$$\begin{cases} \frac{dX_N}{dt} = A_N X_N + B_N K_{HP} (q_{rs} - C_N X_N) + B_N u_{HI}, \\ \frac{du_{HI}}{dt} = \lambda_{HI} (q_{rs} - C_N X_N), \\ q_r = C_N X_N. \end{cases} \quad (12)$$

Объединив переменные состояния, получим:

$$\begin{aligned} X_{Hpi} &= (X_N \quad u_{HI})^T, \quad C_{Hpi} = (C_N \quad 0), \\ A_{Hpi} &= \begin{pmatrix} A_N - K_{HP} B_N C_N & B_N \\ -\lambda_{HI} C_N & 0 \end{pmatrix}, \quad B_{Hpi} = \begin{pmatrix} K_{HP} B_N \\ \lambda_{HI} \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (13)$$

Исследовав установившийся режим, определим $q_r(\infty) = q_{rs}$, т. е. САУ с ПИ регулятором является астатической системой. Аналогично построены модели САУ с другими типами регуляторов.

Синтез систем управления тепловой мощностью реактора

В моделях САУТМ реактора (11) — (13) значения параметров регуляторов являются неизвестными величинами. Найдем их путем оптимизации векторной целевой функции (9) с ИКО первого порядка $l=1$ (6). В серии предварительных вычислительных экспериментов по минимизации ИКО определим значение времени эталонного процесса t_e для САУТМ с различными регуляторами, соответствующее монотонным переходным процессам без перерегулирования с минимальным временем регулирования: для П и ПД регуляторов $t_e = 30$ с, для И и ИД регуляторов $t_e = 100$ с, для ПИ и ПИД регуляторов $t_e = 50$ с. Результаты минимизации ИКО САУ тепловой мощностью реактора с П, И, ПИ, ПД, ИД, ПИД регуляторами представлены в табл. 1 с указанием метода оптимизации, количества вычислений функции N_f , минимального значения ИКО I^* , оптимальных значений параметров регуляторов K_{HP}^* , λ_{HI}^* , λ_{HD}^* и соответствующего им времени регулирования t_c^* . Время наблюдения $T_f = 500$, начальная точка поиска $x^{(0)} = 1$.

На рис. 2 представлен процесс оптимизации первой проекции F_1 векторной функции (9) для ИКО САУ с ПИ регулятором векторным методом БФГШ.

На рис. 3 приведен график второй проекции F_2 векторной функции (9). Переменными параметрами являются $x_1 = K_{HP}$ и $x_2 = \lambda_{HI}$. На этих графиках показаны все точки поиска: начальная точка отмечена кругом, конечная — ромбом. На рис. 4 представлены переходные процессы: штриховой линией — эталонный процесс, сплошными тонкой и жирной линиями — процессы в начальной и конечной точках. Графики эталонного и конечного процессов практически совпадают.

Анализ результатов синтеза САУТМ реактора позволяет сделать следующие выводы. При П регуляторе установившееся значение ошибки регулирования (10) близко к единице, поэтому данный регулятор неприменим. При И регуляторе большое время регулирования. При ПД регуляторе, как и при П регуляторе, установившееся значение ошибки регулирования близко к единице, а также имеет место большой разброс значений параметра дифференциальной составляющей, что говорит о слабой зависимости ИКО от его значений. При ИД регуляторе время регулирования меньше, чем при И регуляторе, но существенно больше, чем при ПИ регуляторе. Время регулирования при ПИД регуляторе немного меньше, чем при ПИ, но он реализуется сложнее. Целесообразно использовать ПИ регулятор, позволяющий получить процессы с высоким быстродействием. Одномерные методы позволяют успешно справиться с поставленной задачей. Методы второго порядка иногда застревали, не доходя до оптимальной точки из-за овражности оптимизируемой функции.

Таблица 1. Минимизация ИКО САУТМ реактора

Метод	N_f	$K_{НР}^*$	$\lambda_{ш}^*$	λ_{HD}^*	Γ^*	t_c^*
АШ	45	0,06	—	—	0,46	34,5
ЗС	65	0,06	—	—	0,46	34,5
Д2	78	0,06	—	—	0,46	34,5
АШ	51	—	0,03	—	5,63	76
ЗС	65	—	0,03	—	5,63	76
Д2	77	—	0,03	—	5,63	76
НМ	213	0,62	0,06	—	0,45	53
БФГШ	118	0,62	0,06	—	0,45	53
НР	135	0,62	0,06	—	0,45	53
НМ	500	0,00	—	29648	0,1	34,6
БФГШ	500	0,02	—	722	0,1	33,8
НР	355	0,01	—	1634	0,1	34,3
НМ	292	—	0,03	36,48	5,13	73,6
БФГШ	339	—	0,03	36,48	5,13	73,6
НР	293	—	0,03	36,48	5,13	73,6
НМ	422	0,61	0,06	23,31	0,11	50
БФГШ	497	0,61	0,06	23,31	0,11	50
НР	337	0,61	0,06	23,31	0,11	50

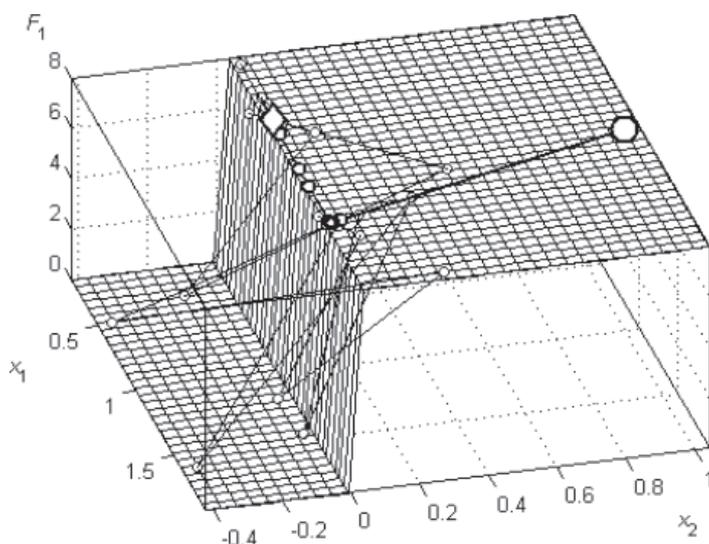


Рис. 2. Функция уровня и траектория синтеза САУТМ

Модели систем управления производительностью парогенератора

Для регулирования расхода питательной воды в парогенераторе, поддержания баланса между давлениями питательной воды и пара, подаваемого в турбину, предназначена САУ производительностью парогенератора (рис. 5).

Структурная схема САУП включает сумматоры, регулятор производительности (РП), исполнительный механизм (ИМ), питательный турбонасос (ПТН), подогреватель высокого давления (ПВД), модель парогенератора, цилиндр высокого давления (ЦВД) и обратные связи. На вход САУ подается уставка координаты частоты вращения приводной турбины φ_s , выходом является координата расхода

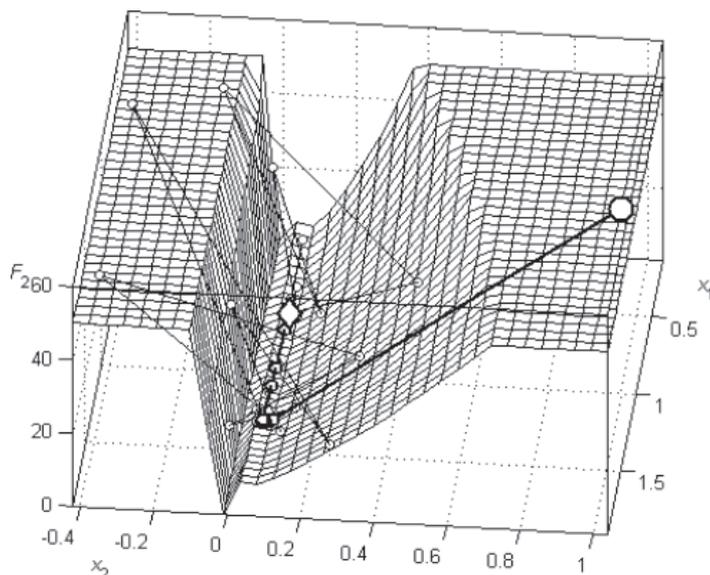


Рис. 3. Функция штрафа и траектория синтеза САУТМ

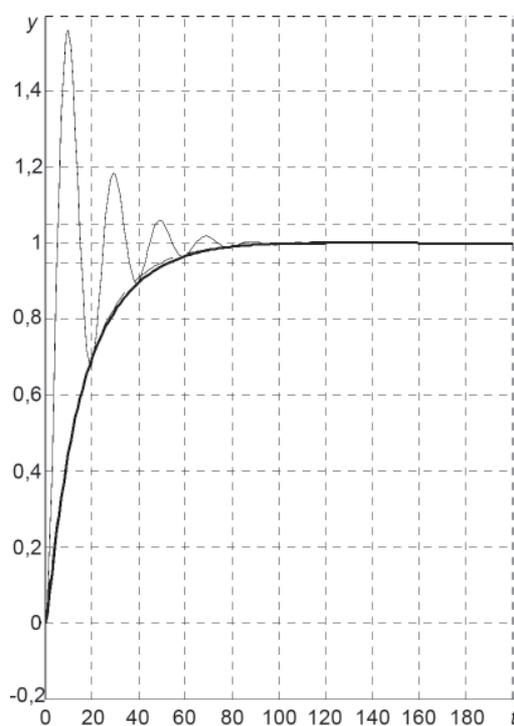


Рис. 4. Переходные процессы в САУТМ

воды g_w . Возмущающими воздействиями являются координаты тепловой мощности теплоносителя q_t и вход следящего привода (СП) регулирующего клапана турбины u_s . Ошибка ε поступает на вход регулятора производительности с передаточной функцией $W_C(s)$, который по заданному закону регулирования формирует управляющее воздействие u . Управляющее воздействие подается на привод исполнительного механизма. Исполнительный механизм перемещает клапан подачи пара в ПТН и изменяет его относительную координату μ_a , которая изменяет давление питательной воды π_s . Эта координата поступает на ПВД, координата которого π_w передается в модель парогенератора и изменяет вектор его состояния X_L , изменяя координату расхода воды g_w .

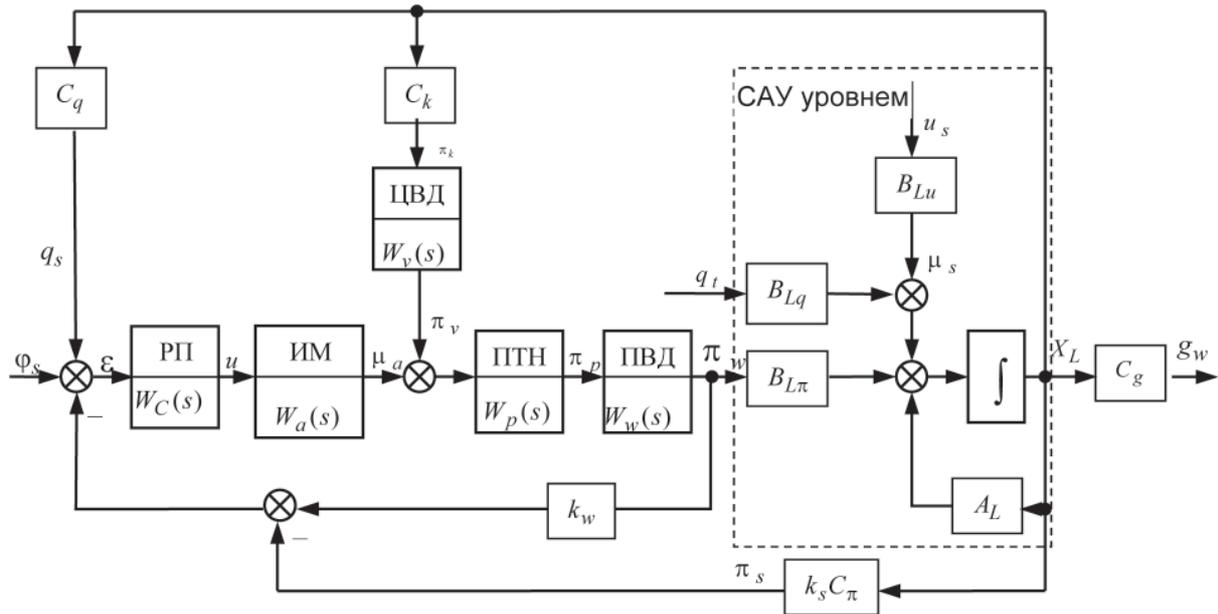


Рис. 5. Структурная схема САУП

Представим сигнал ошибки в относительных координатах:

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

где φ_s — относительное значение уставки частоты вращения ω_s ; q_s — относительная координата тепловой мощности; v — относительное значение разности давления воды в ПВД и пара в парогенераторе:

$$v = k_w \pi_w - k_s \pi_s. \quad (14)$$

Здесь π_w и π_s — относительные значения давления воды в ПВД и пара в парогенераторе; k_w , k_s — коэффициенты, полученные путем линеаризации и перехода к относительным переменным.

Перепишем выражение ошибки в виде

$$\varepsilon = \varphi_s - k_w \pi_w + k_s \pi_s + k_t \theta_t, \quad (15)$$

где θ_t — относительная координата температуры теплоносителя; k_t — коэффициент перехода от температуры к мощности.

Модель САУ уровнем парогенератора с ПИ регулятором представим в виде системы дифференциальных уравнений [6, 16]:

$$\frac{dX_L}{dt} = A_L X_L + B_{L\pi} \pi_w + B_{Lq} q_t + B_{Lu} u_s, \quad q_s = C_L X_L.$$

Исполнительный механизм представим инерционным звеном первого порядка с передаточной функцией

$$W_a(s) = \frac{1}{T_a s + 1}, \quad (16)$$

где T_a — постоянная времени привода.

Передаточной функции (16) отвечает дифференциальное уравнение

$$\frac{d\mu_a}{dt} = a_a \mu_a + b_a u, \quad (17)$$

где μ_a — относительная координата исполнительного механизма; u — входное воздействие; $a_a = -1/T_a$; $b_a = 1/T_a$.

Питательный турбонасос представим инерционным звеном первого порядка с передаточной функцией $W_p(s)$, которой отвечает дифференциальное уравнение

$$\frac{d\pi_p}{dt} = a_p \pi_p + b_p \mu_a + b_v \pi_v, \quad (18)$$

где π_p — относительное значение давления ПТН; $a_p = -1/T_p$; $b_p = K_p/T_p$; K_p и T_p — коэффициент усиления и постоянная времени насоса; π_v и b_v — относительная координата давления в цилиндре высокого давления и коэффициент этой координаты.

Модель ПВД $W_w(s)$ представим инерционным звеном первого порядка с дифференциальным уравнением

$$T_w \frac{d\pi_w}{dt} = -\alpha_{ws} \pi_s - k_{pw} \pi_w - \mu_w + (k_{pp} - \alpha_{wp}) \pi_p, \quad (19)$$

где T_w — постоянная времени ПВД; α_{ws} , α_{wp} — коэффициенты линеаризации расхода воды; k_{pw} , k_{pp} — коэффициенты линеаризации ПВД.

Также инерционным звеном первого порядка с передаточной функцией $W_v(s)$ представим ЦВД и прилегающие к нему трубопроводы:

$$\frac{d\pi_v}{dt} = a_v \pi_v + b_{vk} \pi_k, \quad (20)$$

где $a_v = -1/T_v$; $b_{vk} = K_v/T_v$; K_v , T_v — коэффициент усиления и постоянная времени ЦВД.

На основании уравнений (14) — (20) запишем в общем виде модель парогенератора как объекта управления производительностью ПТН:

$$\frac{dX_C}{dt} = A_C X_C + B_C u + B_{Cq} q + B_{Cu} u_s, \quad (21)$$

$$g_w = C_{Cg} X_C, \quad (22)$$

где

$$A_C = \begin{pmatrix} A_L & B_{L\pi} & 0 & 0 & 0 \\ z_1 & -k_{pw} a_w & b_w a_w & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_p & b_p & b_v \\ 0 & 0 & 0 & a_a & 0 \\ z_2 & 0 & 0 & 0 & a_v \end{pmatrix}, \quad X_C = \begin{pmatrix} X_L \\ \pi_w \\ \pi_p \\ \mu_a \\ \pi_v \end{pmatrix}, \quad (23)$$

$$B_C = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ b_a \\ 0 \end{pmatrix}, \quad B_{Cq} = \begin{pmatrix} B_{Lq} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad B_{Cu} = \begin{pmatrix} B_{Lu} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (24)$$

$$C_{Cg} = (0 \ 0 \ 0 \ \alpha_{ws} \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ \alpha_{wp} \ 0 \ 0 \ 0), \quad (25)$$

$$a_w = 1/T_w, \quad b_w = k_{pp} - \alpha_{wp},$$

$$z_1 = (0 \ 0 \ 0 \ -\alpha_{ws} a_w \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ -a_w \ 0), \quad z_2 = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ b_{vk} \ 0 \ 0 \ 0).$$

С учетом формулы (23) выражение ошибки (15) примет вид

$$\varepsilon = \varphi_s - D_g X_C, \quad (26)$$

где

$$D_g = (-k_t \ 0 \ 0 \ -k_s \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ k_w \ 0 \ 0 \ 0). \quad (27)$$

Модель САУ с ПИ регулятором построим по уравнениям законов управления [16] и формулам (21) — (27) при $u = u_p + u_I$:

$$\begin{cases} \frac{dX_C}{dt} = A_C X_C + B_C u_{CI} + B_C K_{CP} (\varphi_s - D_g X_C) + B_{Cq} q + B_{Cu} u_s, \\ \frac{du_{CI}}{dt} = \lambda_{CI} (\varphi_s - D_g X_C). \end{cases} \quad (28)$$

Объединив переменные состояния, получим

$$X_{Cpi} = \begin{pmatrix} X_C \\ u_{CI} \end{pmatrix}, \quad A_{Cpi} = \begin{pmatrix} A_C - B_C K_{CP} D_g & B_C \\ -\lambda_{CI} D_g & 0 \end{pmatrix}, \quad (29)$$

$$B_{C\varphi pi} = \begin{pmatrix} B_C K_{CP} \\ \lambda_{CI} \end{pmatrix}, \quad B_{Cq pi} = \begin{pmatrix} B_{Cq} \\ 0 \end{pmatrix}, \quad B_{Cu pi} = \begin{pmatrix} B_{Cu} \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (30)$$

$$C_{Cg pi} = (C_{Cg} \ 0). \quad (31)$$

Идентификация параметров системы управления парогенератором

Для постановки задачи идентификации параметров сформируем вектор x из 54 варьируемых параметров. Для начального вектора варьируемых параметров $x^{(0)}$ значения 50 известных проекций зададим по значениям реальных параметров, взятых из научно-технической литературы [4]. В реальной САУ ПГВ-1000 применяются ПИ регуляторы [10]. Неизвестные проекции для параметров регуляторов уровня и производительности положим равными 1. Перейдем к относительным значениям варьируемых параметров: $y_i = x_i/x_i^{(0)} - 1$, $y_i^{(0)} = 0$, $i = \overline{1, 54}$. К значениям исходных варьируемых параметров от их относительных значений можно перейти по формуле

$$x_i = x_i^{(0)} (y_i + 1), \quad i = \overline{1, 54}. \quad (32)$$

Поскольку заранее неизвестны знаки и величины погрешностей варьируемых параметров, наложим на их относительные значения двусторонние ограничения $a_i \leq y_i \leq b_i$,

$i = \overline{1, 54}$. Для параметров модели парогенератора зададим симметричные ограничения, полагая $a_i = -d$, $b_i = d$, $i = 1, 32, 35, 38, 44, 47, 50, 54$, где постоянный положительный параметр d задает предельно допустимое относительное отклонение варьируемого параметра. Для ограничений относительных параметров регуляторов положим $a_i = -0,99$, $b_i = 99$, $i = 33, 34, 45, 46$, что соответствует изменению исходных варьируемых параметров регуляторов K_L , K_{CP} , λ_L и λ_{CI} в реализуемых пределах от 0,01 до 100. На неизвестные параметры a_v , b_p , a_p наложим относительные ограничения $a_i = 0$, $b_i = 99$, $i = 36, 37, 52$, поскольку они приняты равными 1. Неизвестные коэффициенты b_v , b_{vk} ограничены значениями $a_i = -101$, $b_i = 100$, $i = 51, 53$, для получения моделей инерционных звеньев, а не интегрирующих. При $p = 54$ сформируем штрафную функцию нарушения двусторонних ограничений

$$S(y) = \sum_{i=1}^{54} [|a_i - y_i| + |y_i - b_i|]. \quad (33)$$

Выразим через вектор y матрицы (29) — (31), модели САУП парогенератора с включенным регулятором уровня: $A_{Cpi} = A_{Cpi}(y)$, $B_{C\varphi pi} = B_{C\varphi pi}(y)$, $B_{Cq pi} = B_{Cq pi}(y)$, $B_{Cu pi} = B_{Cu pi}(y)$, $C_{Cg pi} = C_{Cg pi}(y)$, $C_{Cppi} = C_{Cppi}(y)$; модели САУП с отключенным регулятором уровня: $A_{Lpi} = A_{Lpi}(y)$, $B_{L\varphi pi} = B_{L\varphi pi}(y)$, $B_{Lq pi} = B_{Lq pi}(y)$, $B_{Lup i} = B_{Lup i}(y)$, $C_{Lc pi} = C_{Lc pi}(y)$. Определим модели САУП с отключенным и включенным регулятором уровня при одном входном возмущающем воздействии $u_s = -0,25$ и выходных координатах приращения уровня и давления в ГПК:

$$\begin{aligned} \frac{dX_{Cpi}(y, t)}{dt} &= A_{Cpi}(y) X_{Cpi}(y, t) + B_{Cq pi}(y) q + B_{Cuc}(y) u_s, \\ H_{Cpi}(y, t) &= h_c C_{Cppi} X_{Cpi}(y, t), \\ P_{Cpi}(y, t) &= p_{k0} C_{Cppi} X_{Cpi}(y, t), \end{aligned} \quad (34)$$

где

$$C_{Cppi} = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0),$$

$$C_{Cppi} = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0).$$

$$\begin{aligned} \frac{dX_{Lpi}(y, t)}{dt} &= A_{Lpi}(y) X_{Lpi}(y, t) + B_{Lq pi}(y) q + B_{Luc}(y) u_s, \\ H_{Lpi}(y, t) &= h_c C_{Lc pi} X_{Lpi}(y, t). \end{aligned} \quad (35)$$

Здесь $H_{Cpi}(y, t)$ и $H_{Lpi}(y, t)$ — приращения уровня в парогенераторе в миллиметрах; $h_c = 150$ мм — коэффициент перехода от относительной безразмерной координаты уровня ξ_c к размерной координате приращения уровня $H = \Delta h_c$ [16]; $P_{Cpi}(y, t)$ — давление в ГПК; $p_{k0} = 57$ МПа — коэффициент перехода от относительной безразмерной координаты давления π_k к размерной координате давления [6].

Для учета устойчивости реальной САУП парогенератора по матрице модели САУ уровня $A_{Cpi}(y)$ сформируем характеристический многочлен $\alpha(y, s)$, определим для него штрафную функцию $P(y)$ нарушения необходимых условий устойчивости и коэффициенты Рауса—Гурвица $\rho_k(y)$, $k = \overline{0, 15}$ [13].

Обозначим экспериментальные процессы приращения уровня в ПГВ-1000 при возмущении нагрузкой турбины 25% $N_{ном}$: $H_S(t)$ — процесс при включенном регуляторе уровня, $H(t)$ — процесс при отключенном регуляторе уровня [11].

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 $t_1 = 0, t_k = t_{k-1} + h, k = 2, 3, \dots$: $H_{Sk} = H_S(t_k), P_{Sk} = P_S(t_k) k = \overline{1, N_S}, N_S = 81, H_{Ek} = H(t_k), k = \overline{1, N_G}, N_G = 59$. Интегрируя СДУ (34) и (35) при нулевых начальных условиях с шагом h методом матричной экспоненты и ее интеграла [20], вычислим $H_{Cpi}(y) = H_{Cpi}(y, t_k), P_{Cpi}(y) = P_{Cpi}(y, t_k), k = \overline{1, N_S}, H_{Lpi}(y) = H_{Lpi}(y, t_k), k = \overline{1, N_G}$. Составим функцию невязки

$$f(y) = \sum_{k=1}^{N_S} [H_{Sk} - H_{Cpi}(y)]^2 + \sum_{k=1}^{N_G} [H_{Ek} - H_{Lpi}(y)]^2 + \sum_{k=1}^{N_S} [P_{Sk} - P_{Cpi}(y)]^2, \quad (36)$$

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

Определим области уровней ограничений $H_k, k = \overline{0, n}$, где $n = 15$ — порядок САУ уровнем. По аналогии с функцией (9) на основании функций (33) и (36) сформируем векторную целевую функцию

$$F(y) = \begin{cases} (0; S(y)), & y \in H_0, \\ (1; P(y)), & y \in H_1, \\ (k; -\rho_k(y)), & y \in H_k, k = \overline{2, n-1}, \\ (n; f(y)), & y \in H_n. \end{cases} \quad (37)$$

Для решения задачи идентификации параметров САУП парогенератора векторную функцию (37) будем оптимизировать векторным методом Хука-Дживса со значением параметра $d = 0,5$ для допустимых отклонений ограничений от проекций начального вектора [14, 16].

Путем оптимизации векторной функции (37) получены результаты идентификации параметров САУП парогенератора: $F_1 = 15$ и $F_2 = 171$, значение $f = 171$ функции невязки (36) и значение $\delta = 1,1$ 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 (37) позволила перейти в область устойчивости САУ производительностью ($F_1 = 15$) и существенно уменьшить значение функции невязки. СКО составило около 1 мм при диапазоне изменения экспериментальных данных 101 мм, т. е. относительное значение СКО стало около 1 %.

На рис. 6 представлен процесс отклонения уровня в САУ производительностью парогенератора при отключенном регуляторе уровня, а на рис. 7 показаны процессы отклонения уровня и давления в САУП при включенном регуляторе уровня.

Точками обозначены экспериментальные данные, тонкими линиями — процессы при начальных значениях варьируемых параметров модели САУП парогенератора, толстыми линиями — процессы, соответствующие оптимизации функции (37) при $d = 0,5$. При начальных значениях

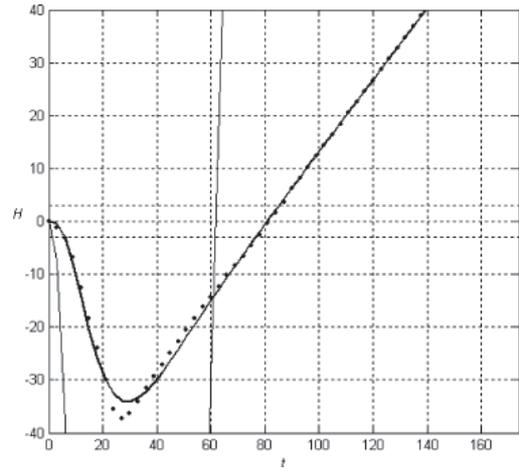


Рис. 6. Отклонение уровня в САУП при отключенном регуляторе уровня

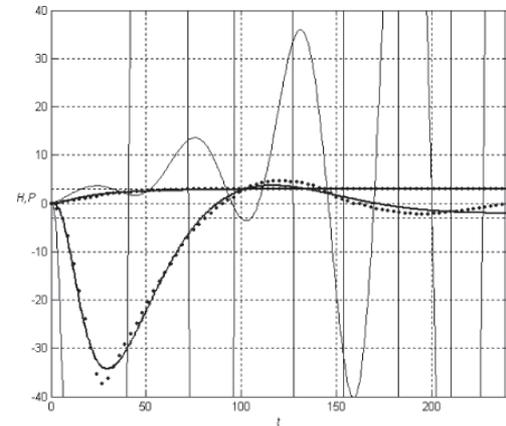


Рис. 7. Отклонение уровня и давления в САУП при включенном регуляторе уровня

варьируемых параметров модели САУП парогенератора и отключенном регуляторе уровня уровень быстро неограниченно понижается (см. рис. 6), а при включенном регуляторе уровня процесс изменения уровня — неустойчивый колебательный (см. рис. 7). Также неустойчивый колебательный процесс характеризует давление при начальных значениях параметров и включенном регуляторе уровня (см. рис. 7). При $d = 0,5$ наблюдается хорошее совпадение процессов в модели с экспериментальными процессами как при отключенном, так и при включенном регуляторе уровня (см. рис. 6, рис. 7).

На основании проведенного анализа графиков примем для дальнейшего исследования САУП парогенератора результаты идентификации параметров парогенератора при $d = 0,5$. Исследуем динамику САУП парогенератора с отключенным и включенным регулятором уровня при входном возмущающем воздействии $u_s = 1(t)$. На рис. 8 представлены изменения переменных состояния САУП парогенератора, полученные интегрированием СДУ (21) при отключенном регуляторе уровня. Клапан регулирования турбины открывается, его относительная координата μ_s увеличивается до единичного значения. С запаздыванием увеличивается относительная координата исполнительного механизма μ_a . Давления в ГПК и парогенераторе падают, их относительные координаты π_k и π_s уменьшаются.

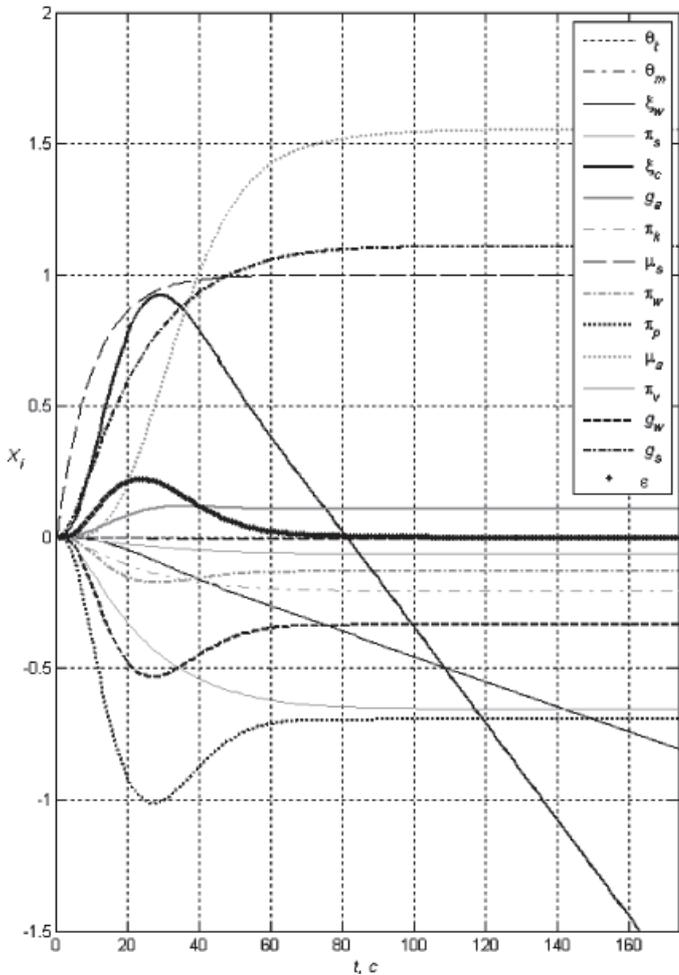


Рис. 8. Изменение переменных состояния САУП при отключенном регуляторе уровня

Уменьшаются давления в ЦВД π_v и ПВД π_w . Давление в ПТН π_p вначале уменьшается, а затем увеличивается. Процесс парообразования под зеркалом испарения усиливается, часть воды в парогенераторе вскипает, объем пара под зеркалом испарения увеличивается, повышается уровень пароводяной смеси ξ_c и проявляется эффект «вскипания» уровня [2]. Координата объема воды ξ_w уменьшается. Снижение давления в парогенераторе приводит к уменьшению температур пароводяной смеси θ_w , металла теплообменных трубок θ_m и теплоносителя θ_t . Координаты расхода пара увеличиваются, а координата расхода воды падает [12].

На рис. 9 представлены изменения переменных состояния САУ производительностью парогенератора, полученные интегрированием СДУ (28) с матрицами (29) – (31), для которых значения параметров ПИ регуляторов $K_L = 32,587$, $K_{CP} = 0$, $\lambda_L = 100 \text{ c}^{-1}$ и $\lambda_{CI} = 0,2153 \text{ c}^{-1}$ получены в результате идентификации.

Координата клапана регулирования турбины μ_s увеличивается, с запаздыванием увеличивается относительная координата исполнительного механизма μ_a , координаты давлений в ГПК π_k , парогенератора π_s , в ЦВД π_v и ПВД π_w уменьшаются. Происходит «вскипание» уровня с повышением ξ_c , объем воды ξ_w снижается. Координаты расхода пара увеличиваются. Координата расхода воды падает,

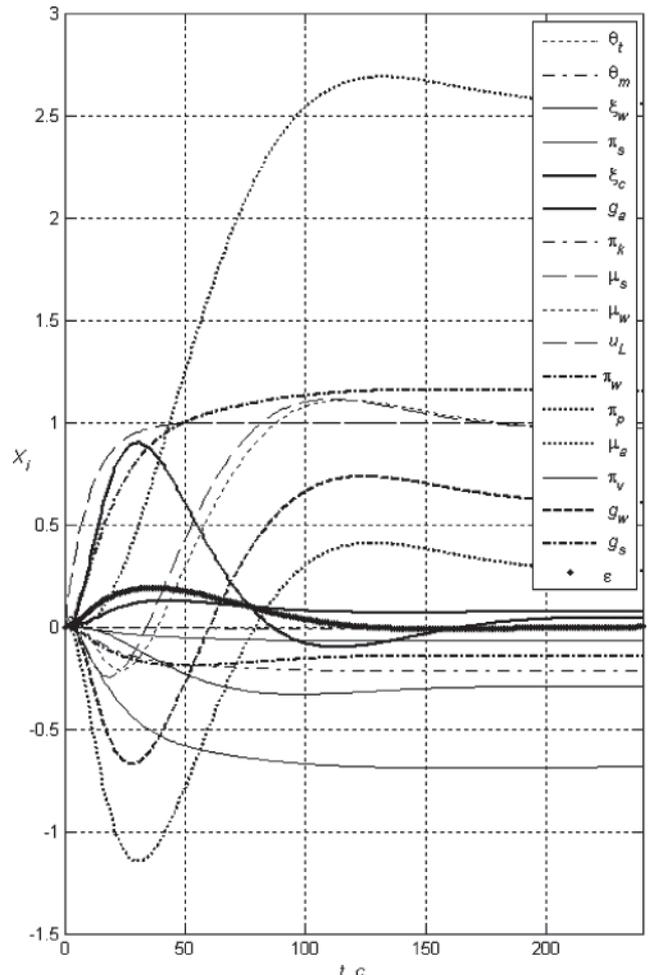


Рис. 9. Изменение переменных состояния САУП ПГ с включенным регулятором уровня

а затем увеличивается [12]. С течением времени все координаты приходят к своим установившимся значениям, причем процессы изменения μ_s , π_k , π_s , π_v , g_a , θ_m , θ_t , g_s монотонные, а изменения ξ_c , ξ_w , μ_w , μ_a , u_L , π_p , π_w , g_w и ϵ — колебательные, ошибка ϵ с течением времени стремится к нулю. Таким образом, САУП выполняет задачу стабилизации расхода воды. Проведем оптимизацию показателей качества САУП.

Синтез систем управления парогенератора

Вычислим значения параметров регуляторов САУП парогенератора путем оптимизации показателей САУП с целью выбора наиболее эффективного регулятора производительности минимальной сложности.

Для постановки задачи оптимизации параметров САУП сформируем вектор $x \in R^p$ из варьируемых параметров регулятора производительности: K_{CP} , λ_{CI} и λ_{CD} . В зависимости от типа РП $p \in \{1, 2, 3\}$: для П, И и Д регуляторов $p = 1$, для ПИ, ПД и ИД регуляторов $p = 2$, для ПИД регулятора $p = 3$. Наложим на значения варьируемых параметров двусторонние ограничения: $a_i \leq x_i \leq b_i$, $a_i = 0$, $b_i = 100$, $i = 1, p$. Сформируем штрафную функцию нарушения двусторонних ограничений

$$S(x) = \sum_{i=1}^p [|a_i - x_i| + |x_i - b_i|]. \quad (38)$$

Для параметрического синтеза РП при возмущающем воздействии $u_s = 1(t)$ и выходной координате расхода воды примем модель САУП парогенератора в виде (28), (29) с параметрами матриц, взятых после идентификации, и различными типами регуляторов.

Найдем значения параметров регуляторов САУП парогенератора путем оптимизации векторной целевой функции (9) с ИКО (8) при $l=2$ с коэффициентами $w_1 = 1$, $w_2 = 1,9755$. Значение времени регулирования эталонного процесса t_e примем равным 170. Начальная точка поиска $x^{(0)} = 0$, время наблюдения $T_f = 1000$. Результаты минимизации ИКО САУ производительностью парогенератора с П, И, ПИ, ПД, ИД, ПИД регуляторами представлены в табл. 2. В этой таблице приведены метод минимизации, количество вычислений функции N_f , минимальное значение ИКО I^* , оптимальные значения параметров регуляторов K_{CP}^* , λ_{CI}^* , λ_{CD}^* и соответствующее им время регулирования t_c^* .

На рис. 10 представлен процесс минимизации ИКО САУ производительностью парогенератора с ПИ регулятором векторным методом Ньютона–Рафсона на графике первой проекции функции (9) — функции уровня F_1 .

На рис. 11 показан график второй составляющей F_2 векторной функции (9). Варьируемые параметры $x_1 = K_{CP}$ и $x_2 = \lambda_{CI}$, все точки поиска соединены тонкой линией, толстой линией соединены лучшие точки поиска. Начальная точка отмечена кругом, конечная — ромбом.

На рис. 12 показаны переходные процессы расхода воды: штриховой линией — эталонный процесс, сплошными тонкой и жирной линиями — процессы в начальной и конечной точках поиска. Начальное отрицательное отклонение координаты расхода воды сохраняется, из-за него не удается приблизиться к эталонному процессу и уменьшить значение ИКО.

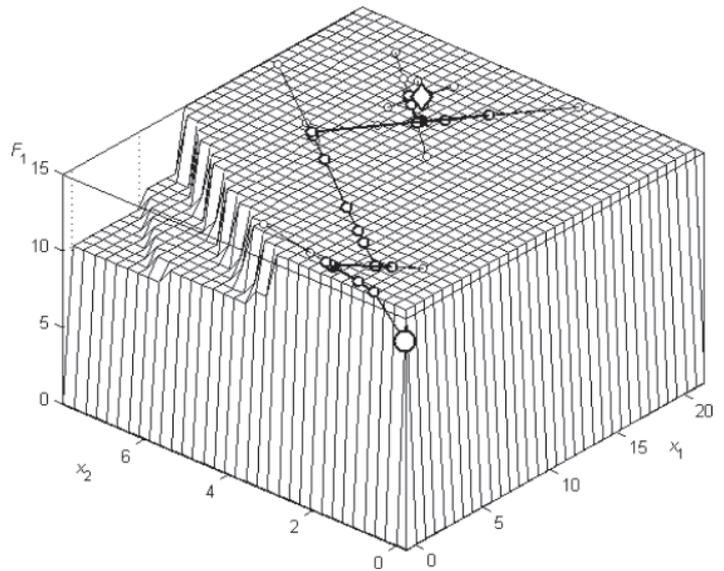


Рис. 10. Функция уровня и траектория поиска ИКО САУП парогенератора

наты расхода воды сохраняется, из-за него не удается приблизиться к эталонному процессу и уменьшить значение ИКО.

Анализ результатов минимизации ИКО САУ производительностью парогенератора позволяет сделать следующие выводы. Одномерные методы помогают успешно справиться с поставленной задачей. Лучший метод — метод адаптации шага, который за меньшее количество вычислений функции нашел минимум ИКО. Методы второго порядка иногда застревали из-за овражности оптимизируемой функции, не доходя до оптимальной точки. Для ИКО требовался повторный запуск этих методов.

Наиболее эффективен метод Нелдера–Мида, который достиг оптимальных точек за меньшее количество вычислений функции. При всех регуляторах показатель колебательности составляет порядка 0,65. При П и Д регуляторах получено наибольшее время регулирования. При И, ПИ, ИД и ПИД регуляторах значения времени регулирования соизмеримы, и наименьшее — при И регуляторе.

Таблица 2. Минимизация ИКО САУП

Метод	N_f	K_{CP}^*	λ_{CI}^*	λ_{CD}^*	I^*	t_c^*
АШ	48	0,08	—	—	314,7	970
ЗС	64	0,08	—	—	314,7	970
Д2	73	0,08	—	—	314,7	970
АШ	44	—	1,5	—	744,83	166,8
ЗС	64	—	1,5	—	744,83	166,8
Д2	80	—	1,5	—	744,83	166,8
АШ	47	—	—	0,50	310,21	1100
ЗС	64	—	—	0,50	310,21	1100
Д2	75	—	—	0,50	310,21	1100
НМ	209	16,79	4,97	—	757,83	174
БФГШ	581	16,79	4,97	—	757,83	174
НР	483	16,79	4,97	—	757,83	174
НМ	233	0,44	—	0,13	288,92	900
БФГШ	507	0,44	—	0,13	288,92	900
НР	540	0,44	—	0,13	288,92	900
НМ	188	—	5,08	0,19	774,78	174
БФГШ	267	—	5,08	0,19	774,78	174
НР	237	—	5,08	0,19	774,78	174

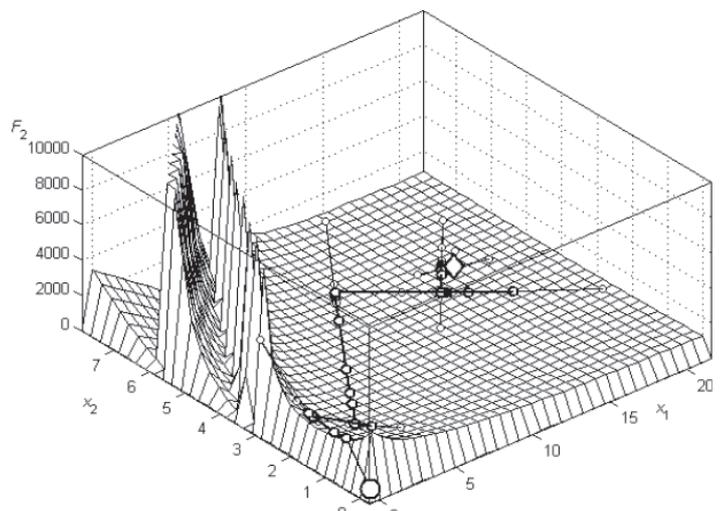


Рис. 11. Функция штрафа и траектория поиска ИКО САУП парогенератора

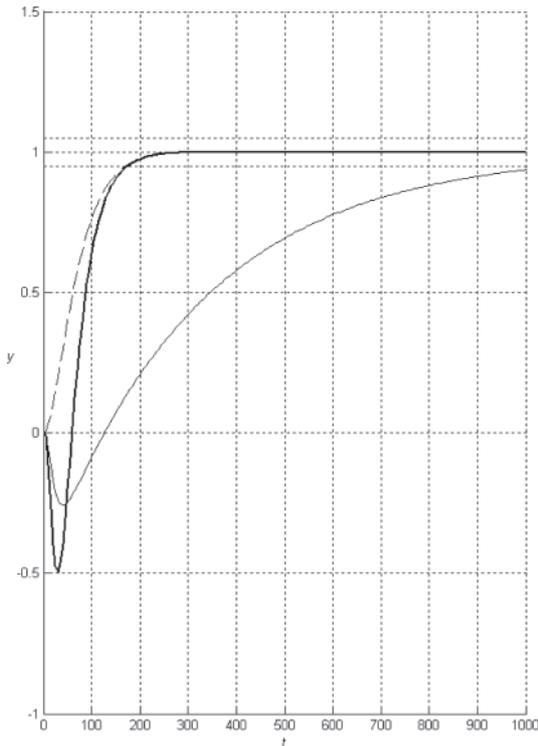


Рис. 12. Переходные процессы САУП

Заклучение

Результаты проведенных исследований позволяют сделать следующие выводы.

1. Задачи многокритериального синтеза САУ сведены к задачам векторной оптимизации улучшенной ИКО.

2. Разработаны математические модели САУ тепловой мощностью реактора ВВЭР-1000 в пространстве состояний с различными регуляторами, предназначенные для многокритериального параметрического синтеза САУ.

3. Проведен синтез САУ тепловой мощностью путем оптимизации векторных целевых функций, учитывающих ограничения области определения показателей качества и требования минимальности ИКО. Наилучшие значения показателей качества САУ тепловой мощностью обеспечиваются применением ПИ регулятора.

4. Разработаны математические модели САУ производительностью парогенератора ПГВ-1000 в пространстве состояний с различными регуляторами, предназначенные для синтеза САУ.

5. Идентифицированы значения параметров модели САУ производительностью ПГВ-1000 по экспериментальным данным процессов отклонения уровня и давления с отключенным и включенным регулятором уровня.

6. Синтезированы системы управления производительностью ПГВ-1000 с различными типами регуляторов. Показана наибольшая эффективность ПИ регулятора с оптимальными значениями параметров, обеспечивающего самый быстрый переходный процесс.

Синтез моделей САУ реакторной установки ВВЭР-1000 позволит существенно улучшить в них процессы управления.

Список литературы

1. Иванов В. А. Регулирование энергоблоков. — Л.: Машиностроение, 1982. — 311 с.
2. Ротач В. Я. Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 296 с.
3. Денисов В. П., Драгунов Ю. Г. Реакторные установки ВВЭР для атомных электростанций. — М.: ИздАТ, 2002. — 480 с.
4. Драгунов Ю. Г. Совершенствование проектов реакторных установок / Ю. Г. Драгунов, С. Б. Рыжов, В. А. Мохов // Теплоэнергетика. — 2006. — № 1. — С. 2–10.
5. Шифрин М. Ш. Автоматическое регулирование судовых паросиловых установок. — Л.: Судпромгиз, 1963. — 587 с.
6. Северин В. П., Никулина Е. Н. Математическое моделирование парогенератора атомного энергоблока // Вестник НТУ «ХПИ»: Системный анализ, управление и информационные технологии. — 2006. — № 19. — С. 145–150.
7. Северин В. П. Математическое моделирование и исследование динамики атомного реактора ВВЭР-1000 // Технічна електродинаміка. — 2005. — Ч. 4. — С. 94–99.
8. Бесекиерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического регулирования. — Изд. третье, испр. — М.: Наука, 1975. — 768 с.
9. Иващенко Н. Н. Автоматическое регулирование. — М.: Машиностроение, 1978. — 736 с.
10. Павлыш О. М., Реузов Ю. М. Динамические характеристики парогенераторов энергоблока с реактором ВВЭР-1000 как объекта регулирования уровня // Электрические станции. — 1986. — № 2. — С. 9–11.
11. Павлыш О. Н., Гарбузов И. П., Реузов Ю. М. Автоматическое регулирование производительности питательных турбонасосов моноблока 1000 МВт АЭС // Энергетик. — 1985. — № 10. — С. 12–14.
12. Испытания и эксплуатация регулирующих дисковых клапанов с внутренней разгрузкой на атомных электростанциях / В. Л. Матусяк, С. Н. Таранов, А. В. Дворецкий, В. В. Шепитчак // Электрические станции. — 2004. — № 9. — С. 6–10.
13. Северин В. П. Пошаговый метод поиска допустимых значений параметров систем автоматического управления // Радиотехника и информатика. — 2002. — № 2. — С. 39–42.
14. Северин В. П. Векторная оптимизация интегральных квадратичных оценок систем автоматического управления // Известия РАН: Теория и системы управления. — 2005. — № 2. — С. 52–61.
15. Северин В. П. Моделирование и оптимизация системы регулирования мощности ядерного реактора ВВЭР-1000 // Технічна електродинаміка: Тем. вип. «Силовая електроніка та енергоефективність». — 2006. — Ч. 4. — С. 89–94.
16. Северин В. П. Математическое моделирование и оптимизация показателей качества систем автоматического регулирования реакторной установки // Ядерная и радиационная безопасность. — 2007. — Т. 10, вып. 2. — С. 66–77.
17. Корон В. Ф. Принцип равномерного вклада и регулирования шагов по координатному случайному поиску // Численные методы нелинейного программирования. — К: Наук. думка, 1976. — С. 33–41.
18. Северин В. П., Никулина Е. Н. Одномерная минимизация функций с рекуррентной системой ограничений области определения // Вестник НТУ «ХПИ». — 2002. — Т. 1, № 8. — С. 141–145.
19. Северин В. П., Никулина Е. Н. Градиентные методы оптимизации критериев качества с ограниченной областью определения // Вестник НТУ «ХПИ». — 2002. — Т. 6, № 9. — С. 42–46.
20. Северин В. П. Исследование алгоритмов вычисления матричной экспоненты и интеграла матричной экспоненты // Вестник ХПИ, № 2: Техн. кибернетика и ее прил. — 1992. — Вып. 11. — С. 43–48.

Надійшла до редакції 23.03.2009.