

СЕЙЕД МОДЖАБА ДЖАФАРИ ХЕНДЖАНИ, аспирант НТУ «ХПИ»,
В. П. СЕВЕРИН, д-р техн. наук, профессор НТУ «ХПИ»

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ УРОВНЕМ ВОДЫ В ПАРОГЕНЕРАТОРАХ АЭС С РЕАКТОРАМИ ВВЭР-1000

В статті розглядаються задачі управління парогенератором в нормальному режимі роботи, і наводиться математичне моделювання систем автоматичного управління рівнем води в парогенераторі з різними типами регуляторів. Розроблені лінійні й нелінійні моделі систем, і приведені результати оптимізації прямих показників якості систем управління рівнем води в парогенераторі.

В статье рассматриваются задачи управления парогенератором в нормальном режиме работы, и приводится математическое моделирование систем автоматического управления уровнем воды в парогенераторе с различными типами регуляторов. Разработаны линейные и нелинейные модели систем, и приведены результаты оптимизации прямых показателей качества систем управления уровнем воды в парогенераторе.

The tasks of steam generator control are considered in the article, related to the normal duty, and the mathematical design of the automatic control of steam generator water level is conducted with the different types of regulators. The linear and nonlinear models of steam generator are developed and the results of direct indexes quality optimization of the water level control systems of steam generator are resulted.

Введение. К настоящему времени существенно изменились схемные решения АЭС с реакторами ВВЭР-1000, конструкция оборудования которых существенно отличается от серийных блоков отечественных АЭС. Выполнение новых проектов невозможно без серьезного расчетного анализа технологических параметров основного и вспомогательного оборудования с учетом систем автоматического управления (САУ). В этой связи в последнее время уделяется много внимания разработке математической модели энергоблока, которая охватывает все основное оборудование, парогенератор (ПГ) ПГВ-1000 и его регуляторы. Создание динамической модели расчета технологических параметров ПГ позволяет проверить принятые решения по тепловой схеме и конструкции установки, изучить свойства ПГ как объекта управления и отработать оптимальные алгоритмы управления в нормальных режимах. Для улучшения динамических свойств САУ реакторной установки предлагается оптимизировать прямые показатели качества (ППК) САУ — перерегулирование, показатель колебательности и время регулирования.

В моделях ПГВ-1000 учитывают системы дифференциальных уравнений (СДУ) материального и теплового балансов, дифференциальное уравнение (ДУ) циркуляции [1, 2]. Добавляя к объектам регулирования ДУ регуляторов, получают модели САУ уровнем (САУУ) [2, 3]. Модели САУ для

оптимизации ППК должны быть простыми, поскольку они многократно используются методами оптимизации при вычислении целевой функции [3]. Алгоритмы вычисления ППК САУ рассмотрены в [4], алгоритмы векторных методов оптимизации САУ с учетом условий устойчивости приведены в [5].

Цель статьи состоит в математическом моделировании САУУ реакторной установки ВВЭР-1000 и оптимизации ее ППК. Проводится идентификация САУУ по экспериментальным данным [6] и оптимизация ее ППК.

Математическое моделирование систем стабилизации уровня. Технологическую систему питания ПГ обеспечивают системы управления уровнем воды в ПГ и производительностью. САУУ включает в себя ПГ, датчик уровня, датчики расходов питательной воды и пара, регулятор уровня (РУ) и регулирующий питательный клапан (РПК). Важнейшей задачей управления ПГ является стабилизация уровня воды в нем при нагрузках 10–110% номинальной, которая выполняется САУУ. В соответствии с требованиями технического задания к РУ в стационарных режимах работы отклонение уровня не должно превышать 5 см, а в динамических режимах это отклонение должно быть не более 15 см.

Обоснованы допущения моделирования ПГ. На основании уравнений теплового баланса получена модель процесса теплопередачи от теплоносителя к воде. По уравнениям материального и теплового балансов рабочей среды в ПГ разработана модель процесса парообразования. По закону сохранения количества движения рабочей среды в циркуляционном контуре ПГ получено уравнение циркуляции. Модели главного парового коллектора (ГПК), привода клапана регулирования турбины (КРТ) и исполнительного механизма РПК приняты в виде дифференциальных уравнений первого порядка. Модель ПГ как объекта управления имеет вид:

$$dX_G/dt = A_G X_G + B_{Gq} q + B_{Gw} u + B_{Gs} u_s, \quad \xi_c = C_G X_G, \quad (1)$$

где вектор X_G состоит из координат средних температур теплоносителя и металла теплообменных трубок, объема воды в ПГ, давлений рабочей среды в ПГ и пара в ГПК, уровня воды и расхода пара через зеркало испарения, перемещений РПК и КРТ; q — координата мощности теплоносителя; u и u_s — управляющие воздействия на РПК и КРТ; ξ_c — координата уровня воды, при $\xi_c = 1$ отклонение уровня $\Delta H = 15$ см; A_G , B_{Gq} , B_{Gw} , B_{Gs} , C_G — матрица и векторы параметров модели ПГ.

Пропорциональный (П), интегральный (И) и дифференциальный (Д) регуляторы формируют по ошибке ε управляющее воздействие u на объект управления согласно уравнениям:

$$u_p = K_p \varepsilon; \quad du_i/dt = \lambda_i \varepsilon; \quad dv_D/dt = -\lambda_D (v_D + 10\varepsilon), \quad u_D = v_D + 10\varepsilon, \quad (2)$$

где K_p , λ_I , λ_D — параметры регуляторов. На вход САУУ подается уставка уровня ξ_{cs} , выходом является ξ_c . На регулятор уровня поступает ошибка $\varepsilon = \xi_{cs} - \xi_c + g_s - g_w$, где g_s и g_w — координаты расходов пара и воды. Выражая эти координаты через переменные состояния ПГ, получим ошибку $\varepsilon = \xi_{cs} - D_G X_G$, где D_G — постоянный вектор. Возмущающими воздействиями являются координата тепловой мощности q и действие на КРТ u_s . Регулятор формирует воздействие u , которое подается в модель ПГ и изменяет вектор его состояния X_G . По модели ПГ (1) и уравнениям регуляторов (2) построены модели систем управления уровнем с различными типами регуляторов вида:

$$dX_L/dt = A_L X_L + B_{Lc} \xi_{cs} + B_{Lq} q + B_{Ls} u_s, \quad \xi_c = C_L X_L. \quad (3)$$

Порядок n модели (3) для П регулятора равен порядку модели ПГ $n = 9$, для И, Д, ПИ и ПД регуляторов $n = 10$, для ИД и ПИД регуляторов $n = 11$.

Для модели системы управления уровнем с ПИ регулятором

$$X_L = \begin{pmatrix} X_G \\ u_I \end{pmatrix}, \quad A_L = \begin{pmatrix} A_G - B_{Gw} K_P D_G & B_{Gw} \\ -\lambda_I D_G & 0 \end{pmatrix},$$

$$B_{Lc} = \begin{pmatrix} B_{Gw} K_P \\ \lambda_I \end{pmatrix}, \quad B_{Lq} = \begin{pmatrix} B_{Gq} \\ 0 \end{pmatrix}, \quad B_{Ls} = \begin{pmatrix} B_{Gs} \\ 0 \end{pmatrix}, \quad C_L = (C_G \quad 0),$$

где K_p и λ_I — переменные параметры регулятора уровня.

Идентификация параметров системы стабилизации уровня. Решена задача идентификации параметров для модели системы управления уровнем ПГВ-1000 по экспериментальным данным процессов отклонения уровня с отключенным и включенным регулятором уровня. Для этого сформирован вектор ξ относительных переменных $\xi_i = (x_i - x_i^{(0)})/x_i^{(0)}$, $i = \overline{1, 34}$, где x_i — переменные параметры, $x_i^{(0)}$ — ненулевые элементы матриц модели (3), вычисленные по конструктивным и технологическим параметрам ПГВ-1000. По вектору ξ сформирована векторная целевая функция (ВЦФ) задачи идентификации, включающая функцию невязки теоретических процессов отклонения уровня от экспериментальных процессов по 140 точкам. Комбинированным применением векторных методов Вейля, Хука-Дживса и Нелдера-Мида вычислены значения параметров моделей ПГ и его системы управления. На рис. 1, 2 представлены процессы отклонения уровня воды в ПГ для возмущения $u_s = -0,25$ при отключенном и включенном регуляторе: точками обозначены экспериментальные данные, $d = 0$ обозначает процессы

при начальных значениях переменных параметров моделей ПГ, остальные процессы получены оптимизацией векторной функции при различных значениях d . При начальных значениях переменных параметров моделей и отключенном регуляторе уровень быстро неограниченно понижается (рис. 1), а при включенном регуляторе процесс изменения уровня неустойчивый колебательный (рис. 2). При $d = 0,25$ процессы в моделях и экспериментальные процессы существенно отличаются. При $d = 0,5$ и отключенном регуляторе процесс в модели ПГ хорошо совпадает с экспериментальным процессом (рис. 1), но при включенном регуляторе процесс в модели не отражает колебательного характера экспериментального процесса (рис. 2). При $d = 0,75$ и $d = 1$ наблюдается лучшее совпадение процессов в моделях с экспериментальными процессами, обеспечивающее среднеквадратичное отклонение менее 1% (рис. 1, рис. 2). Для дальнейшего исследования системы управления уровнем принята ее модель, соответствующая результатам идентификации с $d = 0,75$. Анализ процессов изменения состояния системы показал, что переменные уровня и РПК имеют большую степень колебательности.

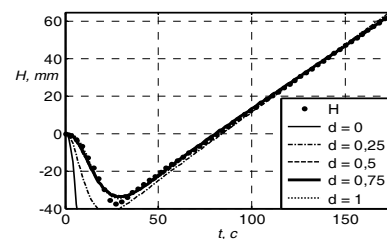


Рис. 1. Отклонение уровня без РУ

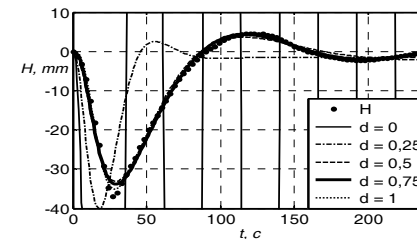


Рис. 2. Отклонение уровня с РУ

Оптимизация прямых показателей качества. Для получения оптимальных процессов отклонения уровня без колебаний с минимальным временем регулирования при возмущении $u_s = 1$ заданы ограничения критериев задачи оптимизации: соответствующее допустимому приращению уровня $h_c = 15$ см значение максимального отклонения координаты уровня $\sigma_m = 1$, соответствующее процессам без колебаний допустимое значение размаха колебаний $\zeta_m = 0$, параметр зоны установления уровня $\delta_z = 0,05$, предельное время процесса $T_f = 500$ с. Сформированы вектор x из переменных параметров регулятора K_p , λ_I , λ_D , ППК — перерегулирование $\sigma(x)$, размах колебаний $\zeta(x)$, время регулирования $t_c(x)$ и его

относительная величина $\tau(x) = t_c(x)/T_f$. Для реализации пошагового принципа оптимизации САУ по областям уровней сформирована ВЦФ

$$F(x) = \begin{cases} (0; P(x)), & x \in H_0; \\ (k; -\rho_{k+1}(x)), & x \in H_k, \quad k = \overline{1, n-2}; \\ (n-1; \sigma(x) - \sigma_m), & x \in H_{n-1}; \\ (n; \zeta(x) - \zeta_m), & x \in H_n; \\ (n+2; \tau(x)), & x \in H_{n+1}, \end{cases}$$

где $P(x)$ — штрафная функция, $\rho_k(x)$ — элементы первого столбца таблицы Рауса, H_k — области уровней. Первая составляющая этой функции — функция уровня $F_1(x)$ имеет приоритет и является счетчиком выполненных ограничений, а вторая — функция штрафа $F_2(x)$ определяет штраф за невыполнение первого нарушенного ограничения. Для различных регуляторов получены оптимальные значения параметров K_p^* , λ_I^* , λ_D^* , проекций векторной функции F_1^* , F_2^* и времени регулирования t_c^* . На рис. 3 представлены переходные процессы изменения уровня ПГ при различных РУ.

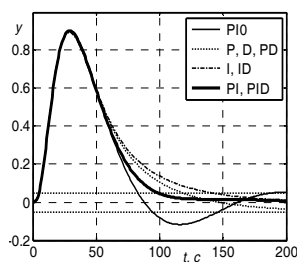


Рис. 3. Изменение уровня воды

Оптимизация параметров РУ

РУ	K_p^*	λ_I^*	λ_D^*	F_1^*	F_2^*	t_c^* , с
П	20,5	—	—	11	0,235	118
И	—	5,34	—	12	0,280	140
Д	—	—	95,0	12	1,051	526
ПИ	2,55	0,14	—	12	0,197	98
ПД	20,5	—	100,0	12	0,235	118
ИД	—	9,67	100,0	13	0,281	140
ПИД	2,55	0,14	100,0	13	0,197	98

Процесс с обозначением Р10 отвечает ПИ регулятору с идентифицированными значениями параметров. Остальные процессы отвечают регуляторам с оптимальными значениями параметров из табл. 1.

Рис. 4, 5 отображают лучшие точки процесса оптимизации параметров ПИ регулятора с вектором варьируемых параметров $x = (K_p, \lambda_I)$. В начальной точке, взятой из решения задачи идентификации, из двенадцати ограничений задачи оптимизации не выполняется только одно последнее ограничение показателя размаха колебаний (рис. 4). По сравнению с

начальной точкой в конечной точке помимо исчезновения колебательности время регулирования уменьшилось в 2,1 раза.

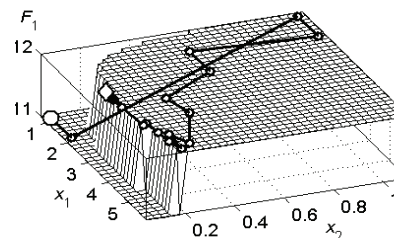


Рис. 4. Оптимизация САУ на F_1

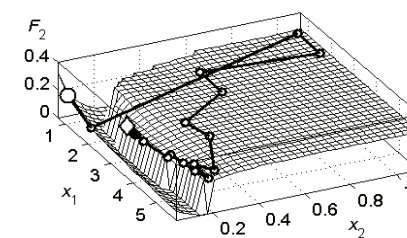


Рис. 5. Оптимизация САУ на F_2

Сопоставление процессов в оптимальной системе управления уровнем с процессами в ней до оптимизации показало, что помимо исчезновения колебаний координаты уровня исчезли перерегулирование и колебания координаты объема воды, уменьшились колебания разности расходов воды и пара, снизились максимальное отклонение и колебания ошибки, практически исчезли перерегулирование и колебания координаты РПК.

Выводы. Из проведенных исследований вытекают следующие выводы.

1. Для оптимизации параметров регуляторов уровня воды в парогенераторе ПГВ-1000 разработаны математические модели систем управления с различными регуляторами.

2. По экспериментальным данным процессов отклонения уровня воды в парогенераторе идентифицированы параметры системы управления уровнем.

3. Результаты оптимизации показателей качества для систем управления ПГВ-1000 с различными регуляторами позволяют сделать вывод, что самым эффективным типом регулятора уровня является ПИ регулятор с оптимальными значениями параметров, который обеспечивает наиболее быстрый переходный процесс без колебаний.

Список литературы: 1. Денисов В. П., Драгунов Ю. Г. Реакторные установки ВВЭР для атомных электростанций. — М.: ИздАТ, 2002. — 480 с. 2. Иванов В. А. Регулирование энергоблоков. — Л.: Машиностроение, 1982. — 311 с. 3. Шифрин М. Ш. Автоматическое регулирование судовых паросиловых установок. — Л.: Судпромгиз, 1963. — 587 с. 4. Северин В. П., Никулина Е. Н. Алгоритмы вычисления прямых показателей качества функций веса систем автоматического управления // Радиоэлектроника и информатика. — 2004. — № 1. — С. 52-59. 5. Северин В. П. Векторная оптимизация интегральных квадратичных оценок систем автоматического управления // Известия РАН. Теория и системы управления. — 2005. — № 2. — С. 52-61. 6. Павлыш О. М., Реуков Ю. М. Динамические характеристики парогенераторов энергоблока с реактором ВВЭР-1000 как объекта регулирования уровня // Электрические станции. — 1986. — №2. — С. 9-11.

Поступила в редколлегию 23.03.09