

УДК 681.51.01

КОМБИНИРОВАННАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ УРОВНЕМ ВОДЫ В БАРАБАНЕ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ С ВОДО-ВОДЯНЫМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ РЕАКТОРОМ

Г.Т. КУЛАКОВ¹, С.М. САЦУК², А.Н. КУХОРЕНКО³

¹Белорусский национальный технический университет, Республика Беларусь

²Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

³Научно-исследовательский институт пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций,
Республика Беларусь

Поступила в редакцию 9 января 2018

Аннотация. Приведена методика формирования структуры и динамической настройки комбинированной системой автоматического управления (САУ) уровнем воды в барабане парогенераторов атомной электростанции (АЭС) с водо-водяным энергетическим реактором на базе передаточных функций оптимальных регуляторов с использованием принципов теории инвариантности. Проведено сравнение прямых показателей качества трех САУ (типовой и трехимпульсной, цифровой системы с наблюдателем состояния и предлагаемой комбинированной САУ). Результаты моделирования переходных процессов при 10 % изменении расхода пара при плановом изменении нагрузки энергоблока подтвердили преимущества предлагаемой комбинированной системы.

Ключевые слова: уровень воды, комбинированная система автоматического управления, барабан парового котла, парогенератор.

Abstract. The structure forming method and dynamic configuration of combined system of automatic control of water level in drum of steam generators of nuclear power stations with water-water power reactor on the basis of the transfer functions of optimal controllers using the principles of the theory of invariance is given. Comparison of direct quality indicators of three automatic control systems (standard and three-shots, digital system with the state observer and proposed combined automatic control system) is realized. The simulation results of transients, when change of steam flow rate is 10 % and power unit load changes plannedly, have confirmed advantages of the proposed combined system.

Keywords: water level, combined system with automatic control, boiler drum, steam generator.

Doklady BGUIR. 2018, Vol. 112, No. 2, pp. 106-112

Combined system of automatic control of water level

in drum of steam generators of nuclear power plants with water-water power reactor

G.T. Kulakov, S.M. Satcuk, A.N. Kuhorenko

Введение

Парогенераторы АЭС с водо-водяным энергетическим реактором (ВВЭР) являются сложными объектами управления, от надежной работы которых зависит безопасность и надежность всей энергетической установки. Основным управляемым параметром в парогенераторе (ПГ) является уровень воды, к стабилизации которого предъявляют жесткие требования. Неточное поддержание уровня воды в барабане ПГ приводит к повышению влажности пара, повышает износ лопаточного аппарата турбины и снижает мощность

энергоблока. Управление уровнем воды в барабанах котлов ТЭС и ПГ АЭС осуществляется трехимпульсной САУ (рис. 1) [1].

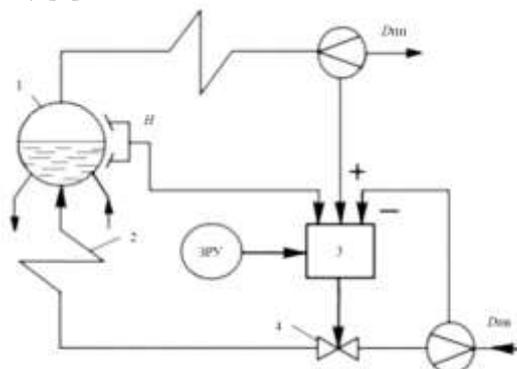


Рис. 1. Типовая трехимпульсная САУ уровнем воды в барабане: 1 – барабан котла; 2 – водяной экономайзер; 3 – регулятор; 4 – регулирующий питательный клапан; ЗРУ – датчик ручного управления; H – уровень воды; $D_{пв}$ – расход питательной воды; $D_{пн}$ – расход пара

Типовая трехимпульсная САУ уровнем воды в барабане котла обладает следующими недостатками:

- наличие статической ошибки регулирования в конце переходного процесса в первую очередь при внешнем возмущении расходом пара с явлением «набухания уровня»;
- наличие трех датчиков измерения (уровня, расходов пара и питательной воды);
- большие отклонения уровня воды в барабане котла за установленные пределы при больших изменениях нагрузки, что приводит к отключению котла защитой при упуске или перепитке.

Указанные САУ при глубоких возмущениях в системе не обеспечивают требуемого качества регулирования, что приводит к разгрузке или останову энергоблока и экономическим потерям [2].

Для повышения качества управления уровнем парогенератора ПГВ-1000 АЭС с ВВЭР был предложен цифровой оптимальный с наблюдателем состояния ПИ-регулятор с одним датчиком по уровню воды вместо трех в штатной САУ, обеспечивающий повышение качества управления при внешних и внутренних возмущениях по сравнению с типовой системой [2]. В связи с этим актуальной становится задача дальнейшего повышения качества управления по сравнению с оптимальной САУ с наблюдателем состояния на основе экспресс-методов структурно-параметрической оптимизации динамических систем теплоэнергетических процессов АЭС и ТЭС с использованием принципов теории инвариантности [3, 4]. Один из вариантов реализации таких систем представлен на рис. 2 [5].



Рис. 2. Схема реализации комбинированной САУ уровнем воды в барабане котла (Патент на изобретение Евразийской патентной организации от 31.08.2017 № 027537 «Регулятор уровня воды в барабане парогенератора»)

Указанная комбинированная САУ с выделением эквивалентного внешнего возмущения обеспечивает уменьшение максимальной динамической ошибки регулирования по уровню воды в барабане при внешнем возмущении расходом пара на 36 % по сравнению с типовой САУ с дифференциатором. При этом время отработки возмущения расходом пара составляет 200 с.

Математическое описание структуры и параметрическая оптимизация предлагаемой САУ

Для уменьшения времени регулирования и улучшения других показателей качества переходных процессов при отработке внешних возмущений расходом пара предлагается использовать комбинированную САУ уровнем воды в парогенераторах ПГВ-1000 с ВВЭР на базе передаточных функций оптимальных регуляторов с компенсацией внешнего возмущения при плановом изменении нагрузки (рис. 3). Обозначения, принятые на рис. 3: $y(t)$, $y_1(t)$ – соответственно основная (уровень воды в барабане) и промежуточная (расход питательной воды) управляемые величины; $x_{зд1}$, $x_{зд2}$ – задание промежуточной и основной управляемым величинам; $x_k(t)$, $x_p(t)$ – корректирующее и регулирующее воздействия; f_1 , f_2 – внутреннее и внешнее возмущения; $e^{-\tau_1 p}$, $e^{-\tau_2 p}$ – соответственно запаздывание по каналу регулирующего воздействия и его модель; $k_{оп}$ – коэффициент передачи опережающего участка объекта; передаточные функции: $W_{оп}(p)$ – опережающего участка объекта; $W_1(p)$ – инерционного участка объекта; $W_b^*(p)$ – крайнего внешнего возмущения; $W_1^0(p)$ – той части объекта, которая не содержит запаздывания; $W_{p1}(p)$ – стабилизирующего регулятора; $W_{p2}(p)$ – корректирующего регулятора; $W_{зд2}(p)$ – критерия качества отработки $x_{зд2}$; $W_\phi(p)$ – фильтра в структуре корректирующего регулятора; $W_{yk}^{f_1}(p)$, $W_{yk}^{f_2}(p)$ – устройств компенсации внутреннего и внешнего возмущений.

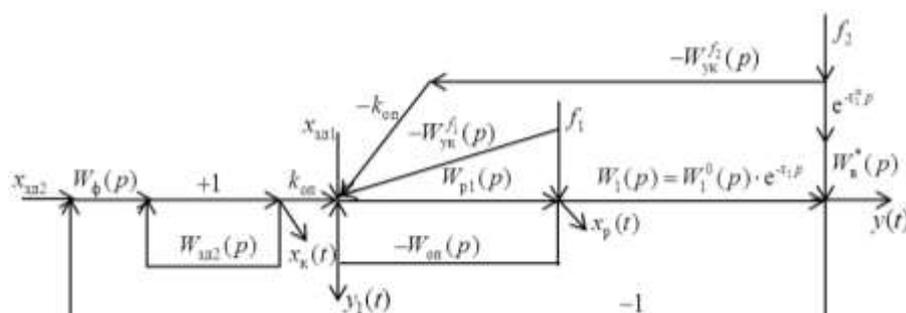


Рис. 3. Структурная схема САУ уровнем воды в барабане ПГВ-1000 АЭС на базе передаточных функций оптимальных регуляторов

Динамика объекта по основной регулируемой величине задана передаточной функцией идеального интегрирующего звена с запаздыванием:

$$W_1(p) = W_{y, x_p}(p) = W_1^0(p) \cdot e^{-\tau_1 p} = \frac{e^{-\tau_1 p}}{T_1 p}, \quad (1)$$

$$\text{где } W_1^0(p) = \frac{1}{T_1 p}, \quad (2)$$

та часть передаточной функции (1), которая не содержит запаздывания; τ_1 – время запаздывания по каналу регулирующего воздействия; T_1 – постоянная времени интегрирующего звена.

Динамика объекта по промежуточной регулируемой величине y_1 , т. е. опережающего участка, имеет вид инерционного звена:

$$W_{\text{оп}}(p) = \frac{k_{\text{оп}}}{T_{\text{оп}}p + 1}, \quad (3)$$

где $T_{\text{оп}}$ – время разгона; $k_{\text{оп}}$ – коэффициент передачи.

Передаточная функция крайнего внешнего возмущения расходом пара описывается разностью инерционного звена первого порядка и идеального интегрирующего звена:

$$W_{\text{в}}(p) = \frac{k_2}{T_2p + 1} - \frac{1}{T_3p}, \quad (4)$$

где k_2 – коэффициент усиления инерционного звена; T_2 – постоянная времени инерционного звена; T_3 – постоянная времени идеального интегрирующего звена.

Структуру стабилизирующего регулятора выбирают по передаточной функции опережающего участка (3) на основе передаточной функции оптимального регулятора [4]:

$$W_{\text{р1}}(p) = [W_{\text{оп}}(p)]^{-1} \cdot W_{\text{з1}}^{\text{PC}(n=1)}(p), \quad (5)$$

где $[W_{\text{оп}}(p)]^{-1}$ – обратная передаточная функция опережающего участка объекта; $W_{\text{з1}}^{\text{EN}(n=1)}$ – заданная передаточная функция разомкнутой системы для объекта первого порядка в виде идеального интегрирующего звена:

$$W_{\text{з1}}^{\text{PC}(n=1)}(p) = \frac{1}{T_{\text{з1}}p}. \quad (6)$$

Здесь $T_{\text{з1}}$ – единственный параметр динамической настройки стабилизирующего регулятора.

Подставляя передаточные функции (3) и (6) в (5), получим следующую передаточную функцию стабилизирующего регулятора:

$$W_{\text{р1}}(p) = \frac{T_{\text{оп}}p + 1}{k_{\text{оп}}T_{\text{з1}}p}. \quad (7)$$

В соответствии с методом полной компенсации численное значение $T_{\text{з1}}$ принимаем равным постоянной времени опережающего участка:

$$T_{\text{з1}} = T_{\text{оп}}. \quad (8)$$

Затем находим передаточную функцию регулирующего воздействия при изменении скачка задания:

$$W_{x_p, x_{\text{з1}}}(p) = \frac{W_{\text{р1}}(p)}{1 + W_{\text{р1}}(p)W_{\text{оп}}(p)}. \quad (9)$$

При этом передаточная функция промежуточной регулируемой величины по задающему воздействию имеет следующий вид:

$$W_{\text{з1}}(p) = W_{y_1, x_{\text{з1}}}(p) = \frac{W_{\text{р1}}(p)W_{\text{оп}}(p)}{1 + W_{\text{р1}}(p)W_{\text{оп}}(p)}, \quad (10)$$

где $W_{\text{з1}}$ – заданная передаточная функция внутреннего контура, которая для объекта с передаточной функцией (3) будет равна

$$W_{\text{з1}}(p) = \frac{1}{T_{\text{з1}}p + 1}. \quad (11)$$

Умножив числитель и знаменатель передаточной функции (9) на $W_{\text{оп}}(p)$, с учетом (8) и (11) получим:

$$W_{y_1, x_{\text{з1}}}(p) = \frac{W_{\text{з1}}(p)}{W_{\text{оп}}(p)} = \frac{T_{\text{оп}}p + 1}{k_{\text{оп}}(T_{\text{оп}}p + 1)} = \frac{1}{k_{\text{оп}}}. \quad (12)$$

Для того, чтобы выбор структуры корректирующего регулятора (КР) осуществлялся только по передаточной функции объекта $W_1(p)$, между выходом КР ($x_{\text{э}}$) и входом

в стабилизирующий регулятор добавляем усилительное звено с коэффициентом передачи $k_{оп}$, так как при этом корректирующее воздействие $x_э$ становится равным регулируемому воздействию x_p .

Передаточную функцию инерционного участка объекта (1) представим в виде

$$W_1(p) = W_1^0(p) \cdot e^{-\tau_1 p}, \quad (13)$$

а заданную передаточную функцию критерия качества САУ при отработке $x_{зд2}$:

$$W_{зд2}(p) = W_{зд2}^0(p) \cdot e^{-\tau_1 p} = \frac{e^{-\tau_1 p}}{T_{зд2} p + 1}, \quad (14)$$

где $W_{зд2}^0(p) = \frac{1}{T_{зд2} p + 1}$ – та часть заданной передаточной функции, которая не содержит запаздывания, а $T_{зд2}$ – параметр динамической настройки корректирующего регулятора.

Передаточной функции инерционного участка объекта (1) соответствует передаточная функция оптимального корректирующего регулятора [4]:

$$W_{р2}^{opt}(p) = W_{ф2}(p) \cdot \frac{1}{1 - W_{зд2}(p)}, \quad (15)$$

где передаточная функция фильтра будет, с учетом (13) и (14), равна

$$W_{ф2}(p) = \frac{W_{зд2}(p)}{W_1(p)} = \frac{W_{зд2}^0(p)}{W_1^0(p)}. \quad (16)$$

Так как передаточная функция корректирующего воздействия x_k при отработке скачка задания $x_{зд2}$ равна передаточной функции фильтра (16), то с учетом (2) и (14) получим:

$$W_{x_k, x_{зд2}}(p) = W_{ф2}(p) = \frac{T_1 p}{T_{зд2} p + 1}, \quad (17)$$

поэтому численное значение параметра динамической настройки корректирующего регулятора $T_{зд2}$ можно рассчитать с учетом максимальной допустимой величины корректирующего x_k и регулирующего x_p^M воздействий.

Умножив числитель и знаменатель передаточной функции (17) на $T_{зд2}$, получим:

$$W_{ф2}(p) = \frac{T_1}{T_{зд2}} \cdot \frac{T_{зд2} p}{T_{зд2} p + 1}. \quad (18)$$

При этом максимальное значение регулирующего воздействия реального дифференциатора в момент времени $t=0$ будет равно

$$x_p^M = \frac{T_1}{T_{зд2}}. \quad (19)$$

Отсюда находим численное значение $T_{зд2}$ с учетом x_p^M :

$$T_{зд2} = \frac{T_1}{x_p^M}. \quad (20)$$

Для определения структуры передаточной функции устройства компенсации внешнего возмущения расходом пара при плановом изменении нагрузки запишем условие инвариантности с учетом двух каналов воздействия f_2 на основную регулируемую величину:

$$W_{ук}^{f_2}(p) \cdot W_1^0(p) \cdot e^{-\tau_1 p} = W_B(p) \cdot e^{-\tau_1 p}, \quad (21)$$

в правой части которого добавлено звено запаздывания, реализуемое в автоматическом задатчике нагрузки энергоблока и равное запаздыванию объекта по каналу регулирующего воздействия (рис. 1).

С учетом передаточной функции внешнего возмущения расходом пара (4) передаточная функция устройства компенсации f_2 примет следующий вид:

$$W_{ук}^{f_2}(p) = [W_2(p) - W_3(p)] \cdot [W_1^0(p)]^{-1}. \quad (22)$$

Так как обратная передаточная функция $[W_1^0(p)]^{-1}$ с учетом (2) физически не реализуема, то передаточную функцию устройства компенсации (22) необходимо умножить на передаточную функцию инерционного звена первого порядка со временем разгона $T_{зд3}$:

$$W_{фз}(p) = \frac{1}{T_{зд3}p + 1}, \quad (23)$$

где $T_{зд3}$ – параметр динамической настройки устройства компенсации внешнего возмущения расходом пара, численное значение которого можно принять равным $T_{зд2}$ или рассчитать по формуле

$$T_{зд3} = \gamma \tau_1. \quad (24)$$

Здесь γ – весовой коэффициент, численные значения которого выбирают из ряда чисел правила золотого сечения $[0,618; 0,382; 0,236...0,09]$, приняв за целое величину запаздывания объекта по каналу регулирующего воздействия τ_1 с учетом максимальной допустимой величины регулирующего воздействия.

Результаты моделирования переходных процессов различных структур САУ уровнем воды в барабане парогенераторов АЭС с ВВЭР

Прямые показатели качества переходных процессов различных САУ уровнем воды в барабане ПГВ-1000 АЭС с ВВЭР при 10 % изменении расхода пара сведены в табл. 1, где приняты следующие обозначения: $\Delta y / y_n$ – относительное изменение уровня воды в барабане; ΔH_6 – абсолютное отклонение уровня воды в барабане ПГ; t_p – время регулирования; ΔX_p^M – максимальное изменение регулирующего воздействия.

Таблица 1. Прямые показатели качества САУ различных структур

Наименование САУ	Показатели качества			
	$\Delta y / y_n$	ΔH_6 , мм вод. ст.	t_p , с	ΔX_p^M
Типовая трехимпульсная САУ [2]	0,034	83,6	160	0,454
САУ с наблюдателем состояния [2]	0,031	76,0	130	+0,61
Комбинированная САУ на базе оптимальных регуляторов	0,024	61,5	75	+0,475

Выводы

1. Время регулирования при 10 %-м изменении расхода пара в комбинированной САУ на базе оптимальных регуляторов при плановом изменении нагрузки уменьшилось со 130 до 75 с, то есть сократилось на 42,3 % по сравнению с САУ с наблюдателем состояния.

2. Максимальное динамическое отклонение уровня в комбинированной САУ уменьшилось на 19 % по сравнению с САУ с наблюдателем состояния (с 76 до 61,5 мм вод. ст.).

3. Максимальное изменение регулирующего воздействия в комбинированной САУ уменьшилось на 22,1 % по сравнению с САУ с наблюдателем состояния.

Список литературы

1. Плетнев Г.П. Автоматизация технологических процессов и производств в теплоэнергетике. М.: Издательский дом МЭИ, 2007. 352 с.
2. Демченко В.А. Автоматизация и моделирование технологических процессов АЭС и ТЭС. Одесса: Астропринт, 2001. 308 с.

3. Кулаков Г.Т. Структурно-параметрическая оптимизация динамических систем теплоэнергетических процессов ТЭС и АЭС // Докл. БГУИР. 2015. № 2 (88). С. 144–147.
4. Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами / Под общ. ред. Г.Т. Кулакова. Минск: Выш. шк., 2017. 238 с.
5. Кулаков Г.Т., Кулаков А.Т., Кухоренко А.Н. Регулятор уровня воды в барабане парогенератора // Патент 027537. Евразийское патентное ведомство, 2017.

References

1. Pletnev G.P. Avtomatizacija tehnologicheskikh processov i proizvodstv v teplojenergetike. M.: Izdatel'skij dom MJeI, 2007. 352 s. (in Russ.)
2. Demchenko V.A. Avtomatizacija i modelirovanie tehnologicheskikh processov AJeS i TJeS. Odessa: Astroprint, 2001. 308 s. (in Russ.)
3. Kulakov G.T. Strukturno-parametricheskaja optimizacija dinamicheskikh sistem teplojenergeticheskikh processov TJeS i AJeS // Dokl. BGUIR. 2015. № 2 (88). S. 144–147. (in Russ.)
4. Teorija avtomaticheskogo upravlenija teplojenergeticheskimi processami / Pod obshh. red. G.T. Kulakova. Minsk: Vysh. shk., 2017. 238 s. (in Russ.)
5. Kulakov G.T., Kulakov A.T., Kuhorenko A.N. Reguljator urovnja vody v barabane parogeneratora // Patent 027537. Evrazijskoe patentnoe vedomstvo, 2017. (in Russ.)

Сведения об авторах

Кулаков Г.Т., д.т.н., профессор, профессор кафедры «Тепловые электрические станции» Белорусского национального технического университета.

Сацук С.М., к.т.н., доцент, заведующий кафедрой электроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Кухоренко А.Н., начальник отдела исследований в области гражданской защиты Научно-исследовательского института пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций.

Information about the authors

Kulakov G.T., D.Sci., professor, professor of the department «Thermal power stations» of Belarusian national technical university.

Satsuk S.M., PhD, associate professor, head of electronics department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Kuhorenko A.N., head of research in the field of civil protection of Research institute of fire safety and problems of emergency situations.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-17-293-85-45;
e-mail: satsuk@bsuir.by
Сацук Сергей Михайлович

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka st., 6,
Belarusian state university
of informatics and radioelectronics
tel. +375-17-293-85-45;
e-mail: satsuk@bsuir.by
Satsuk Sergey Mihailovich