

Жанибек Назарбекұлы Исабеков – PhD, ассоциированный профессор кафедры «Робототехники и технических средств автоматики», Satbayev University, г. Алматы, Казахстан; e-mail: z.issabekov@satbayev.university. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2900-8025>.

Авторлар туралы мәліметтер

Айнұр Тоқтарғалиқызы Бекбай* – постдокторант, Роботты техника және автоматиканың техникалық құралдары кафедрасының аға оқытушысы, Satbayev University, Алматы қ., Қазақстан; e-mail: a.bekbay@satbayev.university. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7963-7439>.

Жанар Серикхановна Бигалиева – Роботты техника және автоматиканың техникалық құралдары кафедрасының аға оқытушысы, Satbayev University, Алматы қ., Қазақстан; e-mail: zh.bigaliyeva@satbayev.university. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7440-5591>.

Винера Канапияевна Байтурганова – Роботты техника және автоматиканың техникалық құралдары кафедрасының аға оқытушысы, Satbayev University, Алматы қ., Қазақстан; e-mail: v.baituraganova@satbayev.university. ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-1717-5041>.

Жадыра Нурдаулетовна Алимбаева – PhD докторы, Фарыштық техника және технологиялар бойынша ақпараттық технологиялар және кітапханатану кафедрасының оқытушысы, Қазақ Ұлттық Қыздар Педагогикалық Университеті, Алматы қ., Қазақстан; e-mail: alimbayeva.zhadyra@qyzpu.edu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2628-2515>.

Жанібек Назарбекұлы Исабеков – PhD, Роботты техника және автоматиканың техникалық құралдары кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Satbayev University, Алматы қ., Қазақстан; e-mail: z.issabekov@satbayev.university. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2900-8025>.

Information about the authors

Ainur Bekbay* – postdoctoral researcher, Senior Lecturer of the Department of Robotics and Engineering Tools of Automation, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan, Қазақстан; e-mail: a.bekbay@satbayev.university. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7963-7439>.

Zhanar Bigaliyeva – Senior Lecturer of the Department of Robotics and Engineering Tools of Automation, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: zh.bigaliyeva@satbayev.university. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7440-5591>.

Vinera Baituraganova – Senior Lecturer of the Department of Robotics and Engineering Tools of Automation, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: v.baituraganova@satbayev.university. ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-1717-5041>.

Zhadyra Alimbayeva – PhD, Lecturer of the Department of Information Technologies and Library Science in Space Engineering and Technology, Kazakh National Women's Teacher Training University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: alimbayeva.zhadyra@qyzpu.edu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2628-2515>.

Zhanibek Issabekov – PhD, Associate Professor of the Department of Robotics and Engineering Tools of Automation, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: z.issabekov@satbayev.university. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2900-8025>.

Received 19.09.2025

Revised 05.10.2025

Accepted 07.10.2025

[https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-4\(20\)-2](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-4(20)-2)

МРНТИ: 50.43.19



Check for updates

С.С. Жусупбеков¹, Л.К. Абжанова¹, А.Сабырова¹, Е.С. Ким¹, Е.А. Оспанов^{2*}

¹Алматинский университет энергетики и связи имени Г. Даукеева,
050013, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Байтурсынова, 126/1.

²Шекерим университет,
071404, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20а
*e-mail: y.ospanov@shakarim.kz

ТРЕХКОНТУРНАЯ КАСКАДНАЯ СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКОЙ С АДАПТИВНОЙ НАСТРОЙКОЙ КОЭФФИЦИЕНТОВ PID РЕГУЛЯТОРА

Аннотация: В статье рассматривается трёхконтурная каскадная система автоматического регулирования уровня воды в паровом котле с использованием адаптивной настройки коэффициентов PID-регулятора. Особенностью предлагаемой системы является использование нечеткой логики для адаптивной коррекции параметров регуляторов, что

обеспечивает устойчивую и надёжную работу теплоэнергетического оборудования при различных внешних и внутренних возмущениях. Разработанная структура управления включает три взаимосвязанных контура: регулирование уровня воды через расход питательной воды, регулирование через расход пара и регулирование расхода пара через подачу топлива. Применение моделей второго порядка с учётом теплофизических характеристик позволяет повысить точность управления и снизить энергетические потери. Система адаптивной настройки обеспечивает автоматическую подстройку коэффициентов PID-регулятора в зависимости от текущего состояния объекта управления. Показано, что адаптивная система эффективно компенсирует нестационарные колебания уровня воды, вызванные особенностями двухфазной среды и переходными режимами, повышая надёжность и устойчивость теплотехнического процесса. Результаты численного моделирования и анализа подтверждают эффективность предложенного подхода в условиях изменяющихся характеристик объекта, шумов, запаздываний и ограниченной информации о параметрах среды, что особенно важно для сложных многосвязных систем.

Ключевые слова: каскадная система, нечеткий регулятор, устойчивость, управление, переходной процесс, PID регулятор.

Введение

Многие технологические процессы в теплоэнергетических, металлургических и нефтеперерабатывающих комплексах относятся к классу многомерных, многосвязных объектов из-за большого периода функционирования в условиях неопределенности, неполноты и нечеткости информации [1-3]. Наличие внутренних и внешних возмущений, обусловлено множеством факторов, а наличие значительного числа параметров, которое прямо или косвенно влияет на функционирование технологических процессов исключает использование классических методов моделирования для управления такими объектами.

Для адекватного управления сложными технологическими процессами необходимо разработать новые модели и алгоритмы, основанные на современных интеллектуальных подходах. Одним из наиболее перспективных подходов к управлению технологическими процессами является модель, основанная на нечеткой логике и нечетких множествах [3].

Котельные агрегаты являются сложными объектами автоматического регулирования с большим числом регулируемых параметров и регулирующих воздействий [4].

Описание технологического объекта. Рассмотрим технологический процесс в теплоэнергетической установке (рис. 1) [5]. За счет температурного режима в топочной камере в подъемных 2 и опускных 3 водяных трубах образуется пар. Температурный режим в топочной камере зависит от расхода топлива W_t и расхода воздуха подогреваемого в воздухоподогревателе 9, подаваемого в топку с помощью вентилятора Дв. Дымовые газы Q_g , удаляются с помощью дымососа Дс. Расход Q_p пара проходя через пароперегреватель 5 достигает требуемой температуры $T_{пп}$. Питательная вода W_b направляется в барабанный котел предварительно подогретая в водяном экономайзере 8.

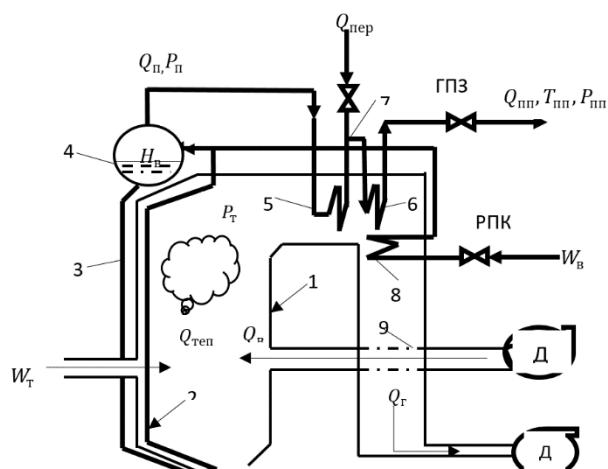


Рисунок 1 – Технологическая схема барабанного парогенератора

Рисунок 1 – Технологическая схема барабанного парогенератора
 ГПЗ – газовая паровая задвижка; РПК – регулировочный питательный клапан; Дв-дутьевой вентилятор; Дс-дымосос;
 1 – топка; 2 – подъемные трубы; 3 – опускные трубы; 4 – барабан котла;
 5,6 – первая и вторая ступени пароперегревателя; 7 – пароохладитель; 8 – экономайзер;
 9 – воздухоподогреватель

Таким образом, из технологического режима работы котла следует, что для поддержания требуемого значения расхода $Q_{пп}$, температуры $T_{пп}$ и давления $P_{пп}$ перегретого пара необходимо поддерживать в заданных пределах значение уровня воды H_B барабанном котле, разрежение в верхней части топки P_t и оптимальный расход топлива с соблюдением соотношений расхода воздуха Q_v для обеспечения полного сгорания топлива [6, 7].

В целом, паровой котел можно рассматривать как объект управления тепловой нагрузкой, поступающей к потребителю в виде расхода $Q_{пп}$, температуры $T_{пп}$ и давлении $P_{пп}$ пара.

В динамическом режиме работы основные переменные $Q_{пп}, P_{пп}$ изменяются в заданных пределах. Изменение этих переменных приводит к изменению уровня воды H_B в паровом котле и соответственно, для поддержания уровня воды необходимо подача расхода W_B питательной воды на паровой котел [7, 8].

Однако, стабилизация уровня воды в барабанном котле на заданном значении по контуру регулирования «расход питательной воды W_B - уровень воды H_B » в барабанном котле является сложной задачей. Дело в том, что в рассматриваемом случае приходится регулировать уровень двухфазной среды, состоящей из кипящей воды и содержащихся в ней пузырьков пара. Для двухфазной среды постоянство уровня в барабане наблюдается лишь при стационарном режиме работы парогенератора. В переходных режимах значение уровня изменяется и характерной особенностью уровня воды в барабане котла являются пульсации, то есть колебания уровня с определенной амплитудой и частотой. Эти пульсации возникают из-за нестационарных процессов на границе раздела паровой и двухфазной сред при непрерывном перемещении больших масс воды и пара.

К числу основных возмущений, приводящих к отклонению уровня, можно отнести следующие воздействия:

- 1) изменение расхода питательной воды;
- 2) изменение расхода топлива;
- 3) изменение расхода пара при изменении нагрузки потребителя.

Из вышеприведенного следует, что паровой котел как объект управления представляет собой сложную динамическую систему с множеством взаимосвязанных входных и выходных величин [9].

Материалы и методы исследования

На основе анализа существующих систем управления теплоэнергетическими установками и с учетом технологических особенностей процесса предлагается трехконтурная каскадная система регулирования, включающая в себя два внутренних контура регулирования: «расход питательной воды – уровень», «расход пара – уровень» и третий внешний контур «расход топлива – расход пара». На рисунке 2 приведена структурная схема трехконтурной каскадной системы регулирования уровня воды в барабанном котле [8, 9].

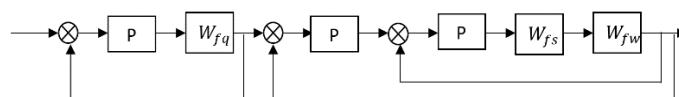


Рисунок 2 – Структурная схема трехконтурной каскадной системы регулирования

Первый контур описывает влияние расхода топлива на расход пара. Для точного описания инерционных свойств барабанного котла при построении математической модели использована система уравнений второго порядка, учитывающая влияние таких параметров как теплоемкость и время теплопередачи на технологический процесс.

Рассмотрим динамическую систему второго порядка для описания инерционных свойств котла.

Система будет описана уравнением:

$$(T_{1.1}s + 1)(T_{1.2} + 1)y_1(t) = K_1 u_1(t) \quad (1)$$

где $u_1(t)$ – входная величина, расход топлива;

$y_1(t)$ – выходная величина, расход пара;

K_1 – коэффициент передачи.

$T_{1.1}, T_{1.2}$ – постоянные времени системы.

Далее расскрываем скобки и преобразуем в дифференциальное уравнение.

$$(T_{1.1}T_{1.2}s^2 + (T_{1.1}T_{1.2})s + 1)y_3(t) = K_1u_1(t) \quad (2)$$

$$T_{1.1}T_{1.2}\frac{d^2y_3(t)}{dt^2} + (T_{1.1}+T_{1.2})\frac{dy_3(t)}{dt} + y_3(t) = K_1u_1(t) \quad (3)$$

Преобразуя левую часть уравнения (3) получим:

$$\frac{d^2y_3(t)}{dt^2} = s^2Y_3(s) - sy_3(0) - \frac{dy_3(0)}{dt} \quad (4)$$

$$\frac{dy_3(t)}{dt} = sY_3(s) - y_3(0) \quad (5)$$

$$y_3(t) = Y_3(t) \quad (6)$$

Преобразовав правую часть уравнения: $u_1(t) = U_1(t)$ и принимая начальные условия $y_3(0)$ и $\frac{dy_3(0)}{dt}$ равным нулю, получим следующее уравнение:

$$T_{1.1}T_{1.2}s^2Y_3(s) + (T_{1.1}+T_{1.2})sY_3(s) + Y_3(s) = K_1U_1(s) \quad (7)$$

Из уравнения (7) определяем выражение передаточной функции по контуру «расход топлива – расход пара»:

$$W_{fq}(s) = \frac{Y_3(s)}{U_1(s)} = \frac{K_1}{(T_{1.1}T_{1.2}s^2 + (T_{1.1}T_{1.2})s + 1)}. \quad (8)$$

Определим передаточную функцию второго контура «расход пара – уровень». Влияние расхода пара на уровень воды описывается уравнением интегрирующей модели с запаздыванием и имеет вид:

$$y_2(t) = K_2 \int u_2(t - \tau_2) dt$$

где $u_2(t)$ – входная величина, расход пара;

$y_2(t)$ – выходная величина, уровень воды;

K_2 – коэффициент передачи;

τ_2 – время запаздывания.

Дифференцируем уравнение по времени

$$\frac{dy_2(t)}{dt} = K_2u_2(t - \tau_2). \quad (9)$$

Проводим преобразование левой части уравнения, с условием, что $y_2(0)$ равен нулю:

$$\frac{dy_2(t)}{dt} = sY_2(s).$$

Преобразовав правой части уравнения с учетом запаздывания:

$$u_2(t - \tau_2) = e^{-\tau_2 s}U_2(s)$$

$$sY_2(s) = K_2e^{-\tau_2 s}U_2(s)$$

Получим выражение для передаточной функции по контуру регулирования «расход пара – уровень»:

$$W_{fs}(s) = \frac{Y_2(s)}{U_2(s)} = \frac{K_2e^{-\tau_2 s}}{s}. \quad (10)$$

Для третьего контура выбрана модель второго порядка. Это позволит учесть разные временные характеристики подачи воды и динамическое изменение уровня воды. Опишем его следующим уравнением:

$$(T_{3.1}s + 1)(T_{3.2}s + 1)y_3(t) = K_3(T_{3.3}s + 1)u_3(t) \quad (11)$$

где $u_3(t)$ – входная величина, расход топлива;

$y_3(t)$ – выходная величина, расход пара;

K_3 – коэффициент передачи;

$T_{3.1}, T_{3.2}, T_{3.3}$ – постоянные времени системы.

Расскрыв скобки из (11) уравнении получим:

$$(T_{3.1}T_{3.2}s^2 + (T_{3.1} + T_{3.2})s + 1)y_3(t) = K_3(T_{3.3}s + 1)u_3(t)$$

$$T_{3.1}T_{3.2}\frac{d^2y_3(t)}{dt^2} + (T_{3.1}+T_{3.2})\frac{dy_3(t)}{dt} + y_3(t) = K_3T_{3.3}\frac{du_3(t)}{dt} + K_3u_3(t) \quad (12)$$

Произведя преобразование левой части уравнения (12) получим:

$$\frac{d^2y_3(t)}{dt^2} = s^2Y_3(s) - sy_3(0) - \frac{dy_3(0)}{dt}$$

$$\frac{dy_3(t)}{dt} = sY_3(s) - y_3(0)$$

$$y_3(t) = Y_3(t)$$

Преобразуем правую часть уравнения (12):

$$\frac{du_3(t)}{dt} = sU_3(t) - u_3(0)$$

Принимая начальные условия $y_3(0)$, $\frac{dy_3(0)}{dt}$, $u_3(0)$ равным нулю, уравнение преобразуется в:

$$T_{3.1}T_{3.2}s^2Y_3(s) + (T_{3.1} + T_{3.2})sY_3(s) + Y_3(s) = K_3T_{3.3}sU_3(s) + K_3U_3(s).$$

Тогда выражение передаточной функции:

$$Y_3(s)(T_{3.1}T_{3.2}s^2 + (T_{3.1} + T_{3.2})s + 1) = U_3(s)(K_3T_{3.3}s + K_3)$$

$$W_{fw}(s) = \frac{Y_3(s)}{U_3(s)} = \frac{K_3(T_{3.3}s + 1)}{(T_{3.1}T_{3.2}s^2 + (T_{3.1} + T_{3.2})s + 1)} \quad (13)$$

Рассмотрим трехконтурную каскадную систему регулирования в среде Matlab, схема которой приведена на рисунке 3. График переходного процесса приведен на рисунке 4.

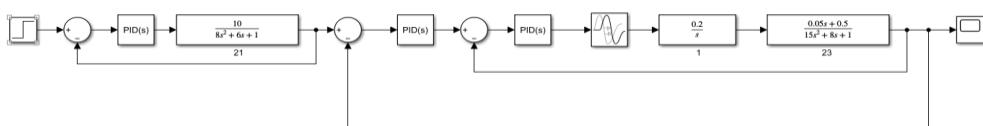


Рисунок 3 – Трехконтурная каскадная система регулирования

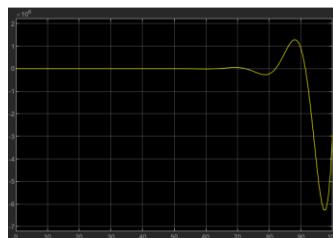


Рисунок 4 – Переходная характеристика системы регулирования
без адаптивной системы регулирования

На основе графика переходной характеристики (рис. 4) можно сделать вывод о том, что предложенная каскадная система регулирования является неустойчивой. Для того, чтобы вывести каскадную систему регулирования в область устойчивости требуется настройки коэффициентов регулятора, что занимает немало времени при пуско-наладочных работах на предприятиях. Кроме того, при неустойчивой работе системы регулирования могут возникнуть опасные для жизни ситуации, такие как перегрев котлов, взрывы, что в свою очередь, может вызвать аварийные ситуации и угрожать жизни работников предприятия.

Поэтому необходимо разработать более надежные и адаптивные методы управления, которые будут автоматически подстраиваться под разные изменения в системе, обеспечивая стабильную работу теплоэнергетических установок [10-13].

Для управления нестационарным режимом работы теплоэнергетических установок объектам предлагается использовать адаптивный нечеткий ПИД-регулятор в контуре каскадной системы регулирования [14-16].

Входными воздействиями для нечеткого блока ПИД-регулятора являются ошибка регулирования, а также производная от нее, исходя из которого регулятор сможет менять коэффициент усиления в звеньях ПИД-регулятора [16].

Выходными параметрами являются параметры ПИД-регулятора K_p , K_i , K_d . Схема управления Matlab Simulink представлена на рисунке 5.

В качестве терм-множества входных ЛП e – «ошибка регулирования» и $delta\ e$ – «изменение ошибки регулирования» используются соответствующие множества А и В имеющие терм-множество {«отрицательный Большой», «отрицательный Средний», «отрицательный Малый», «ноль», «положительный Малый», «положительный Средний», «положительный Большой»} которое записывается в символическом виде { NL , NM , NS , Z , PS , PM , PL } (рис. 6) [14, 15].

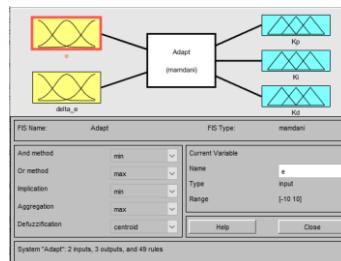


Рисунок 5 – Определение входных и выходных переменных



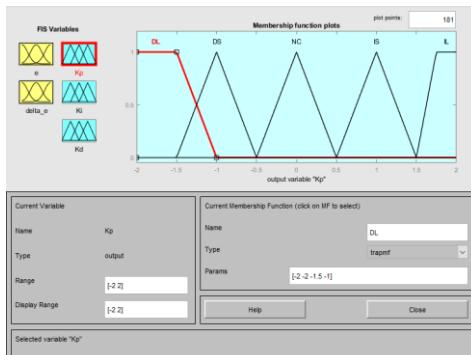
а

б

Рисунок 6 – Графики функций принадлежности
а) ошибка регулирования; б) изменение ошибки регулирования

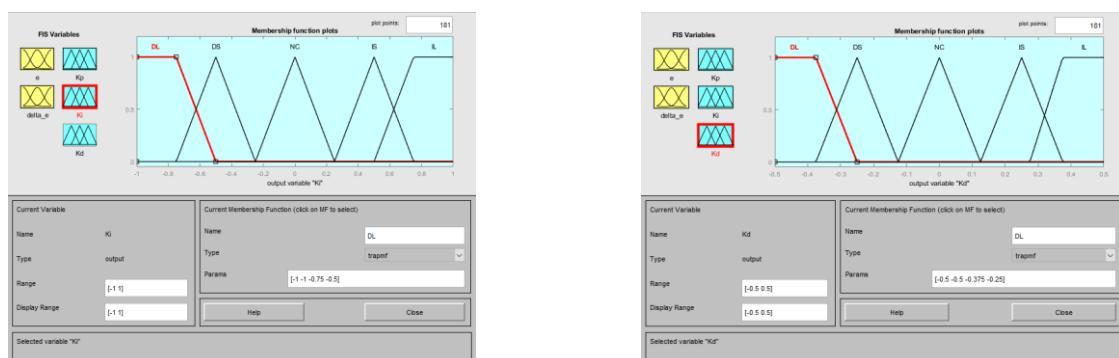
Перейдем к построению функций принадлежности (ФП) выходной переменной K_p . Диапазон значений переменной устанавливается от -2 до 2 и терм-множество ЛП разделено на 5 термов {«уменьшение Большое», «уменьшение Малое», «без изменений», «увеличение Малое», «увеличение Большое»}, которое записывается в символическом виде $\{DL, DS, NC, IS, IL\}$. ФП для выходной переменной K_p имеют вид, показанный на рисунке 7.

Повторим аналогичные действия с выходными блоками K_i и K_d . ФП будут иметь вид, представленный на рисунке 8 а) и б).



6

Рисунок 7 – ФП для коэффициента K_p .



а

б

Рисунок 8 – ФП для коэффициентов а) K_i и б) K_d .

Следующий шаг заключается в создании базы правил вида «IF...THEN». Исходя из проведенных экспериментов в редакторе FLT, предлагаются следующие правила: IF «e is NL» and « Δe is NL» then « K_p is IL», « K_i is DL», « K_d is IL» и т.д. База правил приведена на рисунке 9 и в таблице 1 [12].

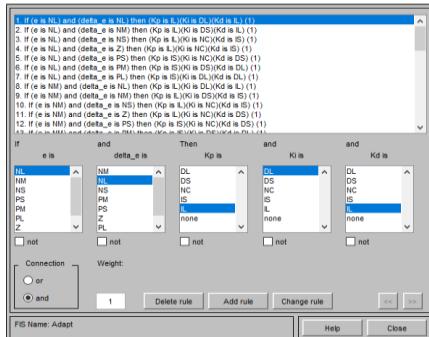


Рисунок 9 – База правил

Таблица 1 – База правил нечеткого регулятора

№	Входные параметры		Выходные параметры			№	Входные параметры			Выходные параметры			№	Входные параметры		Выходные параметры		
	e	Δe	K_p	K_i	K_d		e	Δe	K_p	K_i	K_d	e	Δe	K_p	K_i	K_d		
1	NL	NL	IL	DL	IL	18	NS	Z	IL	NC	NC	35	PS	PL	DL	DL	IL	
2	NL	NM	IL	DS	IL	19	NS	PS	IS	NC	DS	36	PM	NL	IS	DS	DS	
3	NL	NS	IL	NC	IS	20	NS	PM	IS	DS	DS	37	PM	NM	IS	DS	DS	
4	NL	Z	IL	NC	IS	21	NS	PL	IS	DL	DL	38	PM	NS	IS	NC	NC	
5	NL	PS	IS	NC	DS	22	Z	NL	IL	DS	IS	39	PM	Z	NC	NC	NC	
6	NL	PM	IS	DS	DL	23	Z	NM	IL	NC	IS	40	PM	NM	IS	DS	DS	
7	NL	PL	IS	DL	DL	24	Z	NS	IL	NC	IS	41	PM	NS	IS	NC	NC	
8	NM	NL	IL	DL	IL	25	Z	Z	NC	NC	NC	42	PM	PL	DL	DL	IL	
9	NM	NM	IL	DS	IS	26	Z	PS	IS	NC	DS	43	PL	NL	IS	DL	DL	
10	NM	NS	IL	NC	IS	27	Z	PM	IS	DS	DS	44	PL	NM	IS	DL	DL	
11	NM	Z	IL	NC	NC	28	Z	PL	IS	DL	IL	45	PL	NS	IS	DS	DL	
12	NM	PS	IS	NC	DS	29	PS	NL	IS	NC	DS	46	PL	Z	NC	NC	NC	
13	NM	PM	IS	DS	DL	30	PS	NM	IS	NC	DS	47	PL	PS	DS	NC	IL	
14	NM	PL	IS	DL	DL	31	PS	NS	IS	NC	NC	48	PL	PM	DL	DS	IL	
15	NS	NL	IL	DS	IL	32	PS	Z	NC	NC	NC	49	PL	PL	DL	DL	IL	
16	NS	NM	IL	NC	IS	33	PS	PS	DS	NC	IS							
17	NS	NS	IL	NC	IS	34	PS	PM	DL	DS	IL							

Результаты исследования

После синтеза параметров ПИД-регулятора, коэффициенты были автоматически подобраны и введены в соответствующие блоки. На рисунке 10 приведена схема трехконтурной каскадной системы регулирования с самонастраивающимся адаптивным регулятором, модель подсистемы управления (PID) приведена на рисунке 11 [17].

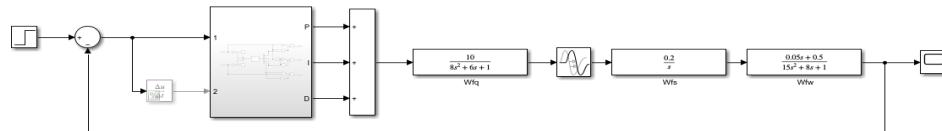


Рисунок 10 – Схема трехконтурной каскадной системы регулирования с нечетким адаптивным регулятором

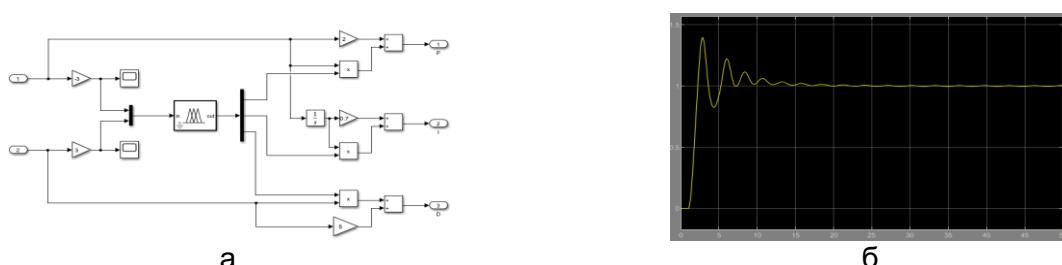


Рисунок 11 – а) модель подсистемы управления (PID) б) график переходной функции

После запуска программы были сгенерированы параметры регулятора и построен график (рис. 11 б) каскадной системы регулирования.

По полученной переходной характеристике (рис. 11 б) можем наблюдать, что система является устойчивой с временем регулирования в 20 секунд и перерегулированием в 35%.

Для анализа частотных свойств рассматриваемой системы на рисунках 12а, б приведены диаграмма Найквиста, а также графики логарифмической амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) и фазочастотной характеристики (ФЧХ). Эти графики предоставляют важную информацию о том, как система реагирует на сигналы различных частот, тем самым, помогая оценить её быстродействие, устойчивость и качество регулирования. Плавное снижение амплитудной характеристики с увеличением частоты, указывает на фильтрующие свойства системы, которые значительно уменьшают влияние высокочастотных помех и шумов, а плавное снижение фазы, говорит о том, что система имеет предсказуемое запаздывание и определенную инерцию [18].

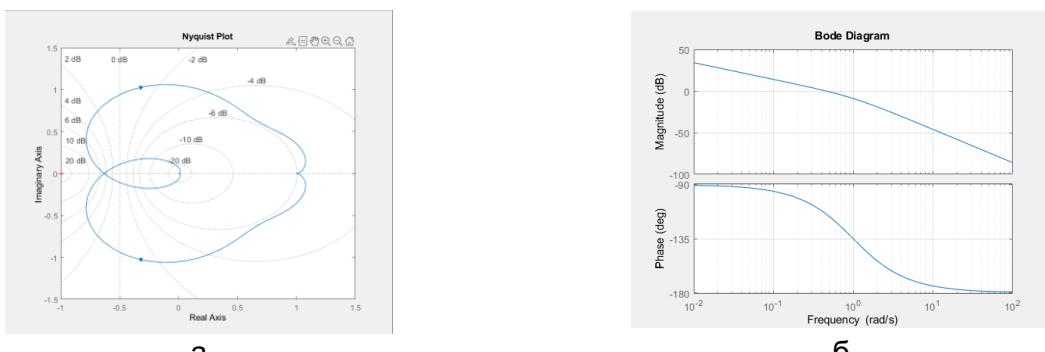


Рисунок 12 – а) диаграмма Найквиста б) логарифмическая АЧХ и ФЧХ

Заключение

В данной статье рассмотрена система автоматического управления уровнем воды в барабанном кotle теплоэнергетического комплекса. Объектом регулирования в данной системе является барабанный котел, а регулируемой величиной – уровень воды в кotle. В статье предлагается к рассмотрению трехконтурная каскадная система управления с нечетким адаптивным ПИД регулятором для управления нестационарным режимом работы теплоэнергетической установки. Средствами MATLAB-SIMULINK определены оптимальные значения параметров ПИД-регулятора и коэффициентов блока нечеткой адаптации, обеспечивающие требуемое качество переходного процесса замкнутой системы управления.

Список литературы

- Петров П.А. Моделирование процесса каталитического риформинга // Фундаментальные исследования. – 2007. – № 12-2. – С. 308-309.
- Шура И.А., Сотников В.В., Сибаров Д.А. Математическая модель для управления процессом каталитического риформинга // Информационные системы и технологии. – 2008. – № 1-3. – С. 307-311.
- Щербатов И.А. Система поддержки принятия решений для операторов слабоформализуемых ТП / И.А. Щербатов, О.М. Проталинский // Автоматизация в промышленности. – 2009. – № 7. – С. 41.
- Галашов Н.Н. Режимы работы и эксплуатации ТЭС: учебное пособие / Н.Н. Галашов. – Томский политехнический университет. – 2013. – 252 с.
- Голдобин Ю.М. Автоматизация теплоэнергетических установок: учебное пособие для студентов вуза / Ю.М. Голдобин. – Екатеринбург, УрФУ. – 2017. – 185 с.
- Система автоматического регулирования температуры перегретого пара барабанного котла / А.А. Журавлев и др. // Проблемы региональной энергетики. Область наук Механика и машиностроение. – 2006. – С. 16-29.
- Цветков А.А. Система автоматического регулирования температуры перегретого пара барабанного котла / А.А. Цветков // Актуальные проблемы энергетики. – 2016 [Электронный ресурс]: материалы научно-технической конференции студентов и аспирантов. – Минск: БНТУ, 2017. – С. 332-338.

8. Кулаков Г.Т. Математическое моделирование переходных процессов трехимпульсной системы автоматического регулирования питания водой парогенератора на сброс нагрузки / Г.Т. Кулаков, А.Т. Кулаков, А.Н. Кухоренко // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ), 2014 – С. 57-64.
9. Кулаков Г.Т. Оптимизация переходных процессов изменения уровня воды в барабане паровых котлов / Г.Т. Кулаков, А.Н. Кухоренко // Энергетик (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ), 2014 – С. 63-74.
10. Чернов А.С. Модели адаптивного управления пароперегревателем котлоагрегата с помощью искусственных нейронных сетей / А.С. Чернов. – 2013 – 6 с.
11. Гаскаров Г.А. Интеллектуальные информационные системы. Учебник для вузов / Г.А. Гаскаров. – М.: Высш. шк., 2003. – 431 с.
12. Микони С.В. Модели и базы знаний. Учебное пособие / С.В. Микони. – СПб.: СПГУТТС, 2000. – 155 с.
13. Заде Л.А. Понятие лингвистической переменной, его применение к принятию приближенных решений / Л.А. Заде. – М.: Мир, 1976. – 77 с.
14. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzTECH / А.В. Леоненков. – СПб.: БХВ-Петербург, 2003. – 736 с.
15. Рутковский Л. Методы и технологии искусственного интеллекта / Л. Рутковский. – М.: Горячая линия-Телеком, 2010. – С. 202-279.
16. Построение и настройка нечеткого адаптивного ПИД-регулятора. Информатика и системы управления, Интеллектуальные системы / Ю.И. Кудинов и др. – 2016. – № 3(49). – С. 86-96.
17. Куколев А.А. Применении нечеткого адаптивного регулятора в системе управления уровнем воды в судовом вспомогательном котле / А.А. Куколев, Д.Л. Пиотровский // Научные труды КубГТУ. – 2018. – № 3. – С. 295-303.
18. Ротач В.Я. Автоматизация настройки систем управления / В.Я. Ротач, В.Ф. Кузищин, А.С. Клюев. – Москва: Энергоатомиздат, 1984. – 272 с.

References

1. Petrov P.A. Modelirovanie protsessa kataliticheskogo riforminga // Fundamental'nye issledovaniya. – 2007. – № 12-2. – S. 308-309. (In Russian).
2. Shura I.A., Sotnikov V. V., Sibarov D. A. Matematicheskaya model' dlya upravleniya protsessom kataliticheskogo riforminga // Informatsionnye sistemy i tekhnologii. – 2008. – № 1-3. – S. 307-311. (In Russian).
3. Shcherbatov I.A. Sistema podderzhki prinyatiya reshenii dlya operatorov slaboformalizuemymkh TP / I.A. Shcherbatov, O.M. Protalinskii // Avtomatizatsiya v promyshlennosti. – 2009. – № 7. – S. 41. (In Russian).
4. Galashov N.N. Rezhimy raboty i ehkspluatatsii TEHS: uchebnoe posobie / N.N. Galashov. – Tomskii politekhnicheskii universitet. – 2013. – 252 s. (In Russian).
5. Goldobin YU.M. Avtomatizatsiya teploehnergeticheskikh ustyanovok: uchebnoe posobie dlya studentov vuza / YU.M. Goldobin. – Ekaterinburg, URFU. – 2017. – 185 s. (In Russian).
6. Sistema avtomaticheskogo regulirovaniya temperatury peregretogo para barabannogo kotla / A.A. Zhuravlev i dr. // Problemy regional'noi ehnergetiki. Oblast' nauk Mekhanika i mashinostroenie. – 2006. – S.16-29. (In Russian).
7. Tsvetkov A.A. Sistema avtomaticheskogo regulirovaniya temperatury peregretogo para barabannogo kotla / A.A. Tsvetkov // Aktual'nye problemy ehnergetiki. – 2016 [Ehlektronnyi resurs]: materialy nauchno-tehnicheskoi konferentsii studentov i aspirantov. – Minsk: BNTU, 2017. – S. 332-338. (In Russian).
8. Kulakov G.T. Matematicheskoe modelirovanie perekhodnykh protsessov trekhimpul'snoi sistemy avtomaticheskogo regulirovaniya pitaniya vodoi parogeneratora na sbros nagruzki / G.T. Kulakov, A.T. Kulakov, A.N. Kukhorenko // EhnergetikA... (Izv. vyssh. ucheb. zavedenii i energ. ob"edinenii SNG), 2014 – S. 57-64. (In Russian).
9. Kulakov G.T. Optimizatsiya perekhodnykh protsessov izmeneniya urovnya vody v barabane parovykh kotlov / G.T. Kulakov, A.N. Kukhorenko // Ehnergetik (Izv. vyssh. ucheb. zavedenii i energ. obedinenii SNG), 2014 – S. 63-74. (In Russian).
10. Chernov A.S. Modeli adaptivnogo upravleniya paroperegrevatelem kotoagregata s pomoshch'yu iskusstvennykh neironnykh setei / A.S. Chernov. – 2013 – 6 s. (In Russian).

11. Gaskarov G.A. Intellektual'nye informatsionnye sistemy. Uchebnik dlya vuzov / G.A. Gaskarov. – M.: Vyssh. shk., 2003. – 431 s. (In Russian).
12. Mikoni S.V. Modeli i bazy znanii. Uchebnoe posobie / S.V. Mikoni. – SPb.: SPGUTTS, 2000. – 155 s. (In Russian).
13. Zade L.A. Ponyatie lingvisticheskoi peremennoi, ego primenenie k prinyatiyu priblizhennykh reshenii / L.A. Zade. – M.: Mir, 1976. – 77 s. (In Russian).
14. Leonenkov A.V. Nechetkoe modelirovanie v srede MATLAB i fuzzTECH / A.V. Lenonenkov. – SPb.: BKHV-Peterburg, 2003. – 736 s. (In Russian).
15. Rutkovskii L. Metody i tekhnologii iskusstvennogo intellekta / L. Rutkovskii. – M.: Goryachaya liniya-Telekom, 2010. – S. 202-279. (In Russian).
16. Postroenie i nastroika nechetkogo adaptivnogo PID-regulyatora. Informatika i sistemy upravleniya, Intellektual'nye sistemy / YU.I. Kudinov i dr. – 2016. – № 3(49). – S. 86-96. (In Russian).
17. Kukolev A.A. Primenenii nechetkogo adaptivnogo regulyatora v sisteme upravleniya urovнем vody v sudovom vspomogatel'nom kotle / A.A. Kukolev, D.L. Piotrovskii // Nauchnye trudy KuBGTU. – 2018. – № 3. – S. 295-303. (In Russian).
18. RoTach V.YA. AvtomAtizatsiya nasTroiki siStem upravleniya / V.YA. RoTach, V.F. Kuzlshchin, A.S. KIYU'ev. – MoSkva: EhnergoaTomizdat, 1984. – 272 s. (In Russian).

С.С. Жусупбеков¹, Л.К. Абжанова¹, А. Сабырова¹, Е.С. Ким¹, Е.А. Оспанов^{2*}

¹Ф. Даукеев атындағы Алматы Энергетика және Байланыс Университеті,
050013, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Байтұрсынов к-си, 126/1

²Шәкәрім университет,
071404, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинки к-си, 20а
*e-mail: y.ospanov@shakarim.kz

PID РЕТТЕГІШ КОЭФИЦИЕНТТЕРІ ӘДАПТИВТИПТІ ТҮЗЕЛЕТІН ЖЫЛУЭНЕРГЕТИКА ҚОНДЫРҒЫСЫН ҮШ ТІЗБЕКТІ КАСКАДТЫ БАСҚАРУ ЖҮЙЕСІ

Мақалада PID реттегіш коэффициенттерінің адаптивіті параметрін қолдана отырып, бу қазандығындағы су деңгейін автоматты түрде реттедің үш тізбекті каскадты жүйесін қарастырылады. Ұсынылған жүйенің ерекшелігі-әртүрлі сыртқы және ішкі бұзылуларда жылу энергетикалық жабдықтың тұрақты және сенімді жұмысын қамтамасыз ететін реттегіштердің параметрлерін адаптивіті түзету үшін анық емес логиканы қолдану. Әзірленген басқару құрылымы өзара байланысты үш тізбекті қамтиды: қоректік су ағыны арқылы су деңгейін реттей, бу ағыны арқылы реттей және отын беру арқылы бу ағынын реттей. Термофизикалық сипаттамаларды ескере отырып, екінші ретті модельдерді қолдану басқару дәлдігін арттыруға және энергия шығынын азайтуға мүмкіндік береді. Адаптивіті баптау жүйесі басқару обьектісінің ағымдағы күйіне байланысты PID реттегішінің коэффициенттерін автоматты түрде реттеді қамтамасыз етеді. Адаптивіті жүйе жылу процесінің сенімділігі мен тұрақтылығын арттыра отырып, екі фазалы ортандың ерекшеліктері мен өтпелі режимдерден туындаған су деңгейінің тұрақсыз ауытқуларын тиімді өтейтіні көрсетілген. Сандақ модельдеу және талдау нәтижелері обьектінің өзгеретін сипаттамалары, Шу, кідіріс және қоршаган орта параметрлері туралы шектеулі Ақпарат жағдайында ұсынылған тәсілдің тиімділігін растайды, бұл өсіресе күрделі көп байланысқан жүйелер үшін етеп маңызды...

Түйін сөздер: каскадты жүйе, анық емес реттегіш, тұрақтылық, басқару, өтпелі процесс, PID реттегіши.

S.S. Zhussupbekov¹, L.K. Abzhanova¹, A. Sabyrova¹, Y.S. Kim¹, Y.A. Ospanov^{2*}

¹Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after G. Daukeev,
050013, Republic of Kazakhstan, Almaty, Baytursynov St., 126/1.

²Shakarim University,
071404, Republic of Kazakhstan, Semey, Glinki St., 20a.
*e-mail: y.ospanov@shakarim.kz

THREE-CIRCUIT CASCADE CONTROL SYSTEM OF A HEAT AND POWER PLANT WITH ADAPTIVE ADJUSTMENT OF PID REGULATOR COEFFICIENTS

The article discusses a three-circuit cascade system for automatic control of the water level in a steam boiler using adaptive adjustment of the coefficients of the PID controller. A feature of the proposed system is the use of fuzzy logic for adaptive correction of regulator parameters, which ensures stable and reliable operation of thermal power equipment under various external and internal disturbances. The developed control structure includes three interconnected circuits: water level control through feed water flow, steam flow control,

and steam flow control through fuel supply. The use of second-order models, taking into account thermophysical characteristics, makes it possible to increase control accuracy and reduce energy losses. The adaptive adjustment system provides automatic adjustment of the coefficients of the PID controller depending on the current state of the control object. It is shown that the adaptive system effectively compensates for unsteady fluctuations in the water level caused by the characteristics of a two-phase medium and transient conditions, increasing the reliability and stability of the thermal engineering process. The results of numerical modeling and analysis confirm the effectiveness of the proposed approach in conditions of changing object characteristics, noise, delays, and limited information about environmental parameters, which is especially important for complex multiconnected systems..

Key words: cascade system, fuzzy regulator, stability, control, transition process, PID controller.

Сведения об авторах

Сарсенбек Сейтбекович Жусупbekов – к.т.н., профессор кафедры «Автоматизация и управление»; Университет энергетики и связи имени Г. Даукеева, Казахстан; e-mail: s.zhussupbekov@aues.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3220-713X>.

Лауласын Косялгановна Абжанова – PhD, ассоциированный профессор кафедры «Автоматизации и управления»; Университет энергетики и связи имени Г. Даукеева, Казахстан; e-mail: l.abzhanova@aues.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1781-269X>.

Аружан Бағытжанқызы Сабырова – магистр, преподаватель кафедры «Автоматизация и управление», Университет энергетики и связи имени Г. Даукеева, Казахстан; e-mail: a.sabyrova@aues.kz.

Елена Ким – магистр, старший преподаватель кафедры «Автоматизации и управления», Университет энергетики и связи имени Г. Даукеева, Казахстан; e-mail: e.kim@aues.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5711-0062>.

Ербол Амангазович Оспанов* – PhD, ассоц. профессор кафедры «IT технологии», Университет Шакарима, Казахстан; e-mail: y.ospanov@shakarim.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5342-274X>.

Авторлар туралы мәліметтер

Сарсенбек Сейтбекович Жусупbekов – т.ғ.к., «Автоматтандыру және басқару» кафедрасының профессоры; Гүмарбек Даукеев атындағы Алматы Энергетика және Байланыс Университеті, Қазақстан; e-mail: s.zhussupbekov@aues.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3220-713X>.

Лауласын Косялгановна Абжанова – PhD, «Автоматтандыру және басқару» кафедрасының қауымдас. профессор, Гүмарбек Даукеев атындағы Алматы Энергетика және Байланыс Университеті, Қазақстан; e-mail: l.abzhanova@aues.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1781-269X>.

Аружан Бағытжанқызы Сабырова – Магистр, «Автоматтандыру және басқару» кафедрасының оқытушысы; Гүмарбек Даукеев атындағы Алматы Энергетика және Байланыс Университеті, Қазақстан; e-mail: a.sabyrova@aues.kz.

Елена Ким – магистр, «Автоматтандыру және басқару» кафедрасының аға оқытушысы; Гүмарбек Даукеев атындағы Алматы Энергетика және Байланыс Университеті, Қазақстан; e-mail: e.kim@aues.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5711-0062>.

Ербол Амангазович Оспанов* – PhD, қауымд. профессор (доцент) «IT технологиялар» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Шекерім университет, Қазақстан; e-mail: y.ospanov@shakarim.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5342-274X>.

Information about the authors

Sarsenbek Zhussupbekov – Candidate of Technical Sciences, professor of the Department of «Automation and Control», Gumarbek Daukeev University of Energy and Telecommunications, Kazakhstan; e-mail: s.zhussupbekov@aues.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3220-713X>.

Laulasyn Abzhanova – PhD, Associate Professor of the Department of «Automation and Control», Gumarbek Daukeev University of Energy and Telecommunications, Kazakhstan; e-mail: l.abzhanova@aues.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1781-269X>.

Aruzhan Sabyrova – Senior Lecturer of the Department of «Automation and Control», Gumarbek Daukeev University of Energy and Telecommunications, Kazakhstan; e-mail: a.sabyrova@aues.kz.

Yelena Kim – Master of Technical Sciences, Senior Lecturer of the Department of «Automation and Control», Gumarbek Daukeev University of Energy and Telecommunications, Kazakhstan; e-mail: e.kim@aues.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5711-0062>.

Yerbol Ospanov* – PhD, Associate Professor, Shakarim University, Kazakhstan; e-mail: y.ospanov@shakarim.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5342-274X>.

Поступила в редакцию 02.10.2025

Поступила после доработки 20.10.2025

Принята к публикации 22.10.2025