

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-1-33-49>

УДК 681.51 (075.8)

## Структурно-параметрическая оптимизация регуляторов впрысков паровых котлов

Г. Т. Кулаков<sup>1)</sup>, Н. В. Воюш<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2024  
Belarusian National Technical University, 2024

**Реферат.** Регулирование температуры пара существенно влияет на экономичность, надежность и долговечность работы паровых котлов. В статье особое внимание уделено обоснованию актуальности существенного повышения эффективности работы регуляторов впрыска паровых котлов, работающих в широком диапазоне изменения нагрузок. Отмечено, что одним из основных направлений решения указанной проблемы является использование оптимальных регуляторов с динамической компенсацией и комбинированных принципов регулирования по отклонению и возмущению одновременно. Предложена комбинированная система автоматического регулирования с полной инвариантностью по отношению к наиболее опасному измеряемому внутреннему возмущению и с частичной инвариантностью при отработке внешнего возмущения с заданными допустимыми отклонениями регулируемого параметра. При этом для повышения качества регулирования при основных воздействиях оптимизацию целесообразно осуществлять с использованием передаточных функций опережающего и главного участков объекта регулирования; внутренний контур двухконтурной системы превращать при отработке корректирующего воздействия в усилитель с единичным коэффициентом передачи. Структуру корректирующего регулятора необходимо формировать на основе принципа динамической компенсации для объектов с условным запаздыванием по каналу регулирующего воздействия, позволяющего при отработке задающего скачка обеспечить заданное качество регулирования. Таким образом достигается существенное повышение быстродействия и точности при отработке внутренних и внешних измеряемых возмущений по сравнению с типовой двухконтурной системой или инвариантной системой автоматического регулирования с внутренней моделью, что позволяет рекомендовать предлагаемую инвариантную каскадную систему автоматического регулирования для широкого внедрения в области автоматизации теплоэнергетических процессов.

**Ключевые слова:** динамическая компенсация, двухканальность, существенное повышение качества регулирования, инвариантная каскадная система автоматического регулирования

**Для цитирования:** Кулаков, Г. Т. Структурно-параметрическая оптимизация регуляторов впрысков паровых котлов / Г. Т. Кулаков, Н. В. Воюш // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2024. Т. 67, № 1. С. 33–49. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-1-33-49>

---

### Адрес для переписки

Кулаков Геннадий Тихонович  
Белорусский национальный технический университет  
просп. Независимости, 65/2,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 293-91-45  
tes@bntu.by

### Address for correspondence

Kulakov Gennady T.  
Belarusian National Technical University  
65/2, Nezavisimosty Ave.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 293-91-45  
tes@bntu.by

---

## Structural and Parametric Optimization of Steam Boiler Injection Regulators

G. T. Kulakov<sup>1)</sup>, N. V. Voyush<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** Steam temperature control significantly affects the efficiency, reliability and durability of steam boilers. In the article, special attention is paid to substantiating the relevance of a significant increase in the efficiency of steam boiler injection regulators operating in a wide range of load changes. It is indicated that one of the main directions of solving this problem is the use of optimal regulators with dynamic compensation and combined principles of regulation for deviation and perturbation at the same time. A combined automatic control system is proposed with full invariance with respect to the most dangerous measured internal disturbance and with partial invariance when working out an external disturbance with specified permissible deviations of the controlled parameter. At the same time, in order to improve the quality of regulation under the main influences, it is proposed to carry out optimization with the use of the transfer functions of the leading and main sections of the control object as well as to turn the internal contour of the two-circuit system into an amplifier with a single transmission coefficient when working out the corrective action. Also, it is proposed to form the structure of the corrective regulator on the basis of the principle of dynamic compensation for objects with a conditional delay along the channel of regulatory action, which makes it possible to ensure the specified quality of regulation when working out the control action surge. Thus, a significant increase in speed and accuracy is achieved when working out internal and external measured disturbances compared to a typical two-circuit system or an invariant automatic control system with an internal model, which makes it possible to recommend the proposed invariant cascade automatic control system for widespread implementation in the field of automation of thermal power processes.

**Keywords:** dynamic compensation, dual channel, significant improvement in the quality of regulation, invariant cascade automatic control system

**For citation:** Kulakov G. T., Voyush N. V. (2024) Structural and Parametric Optimization of Steam Boiler Injection Regulators. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 67 (1), 33–49. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-1-33-49> (in Russian)

### Введение

Создание систем автоматического регулирования (САР) высокой динамической точности паровых котлов, работающих в широком диапазоне изменения нагрузки, является актуальной технической задачей. Температура перегретого пара на выходе котла относится к основным параметрам, определяющим экономичность и надежность работы теплоэнергетического оборудования [1, 2].

Центральная задача теории автоматического управления – синтез систем, в результате которого определяют состав, структуру системы автоматического управления (САУ) и параметров всех ее регулирующих устройств из условия удовлетворения заданным техническим требованиям: обеспечение устойчивости и качества переходных процессов за счет увеличения быстродействия и повышения точности управления.

Одним из основных направлений решения указанной задачи является использование принципа динамической компенсации, позволяющего определять пути обеспечения заданного качества работы САУ и на этой основе

найти математическую модель и структурную схему оптимального регулятора, места его включения, а также его динамические параметры. При этом задача синтеза оптимальных регуляторов с динамической компенсацией решается в два этапа:

- определение эталонной передаточной функции САУ при обработке задания по исходной передаточной функции объекта по каналу регулирующего воздействия;

- структурно-параметрический синтез оптимального регулятора, обеспечивающего приближение заданной и реальной переходных характеристик замкнутой системы при обработке лишь задания [3].

Передаточная функция оптимального регулятора для обработки задания содержит две части: компенсирующую динамику объекта и эталонную передаточную функцию разомкнутой системы. В [3] отмечается, что реализация обратной передаточной функции объекта физически трудна, особенно для объектов с запаздыванием. Применение принципа динамической компенсации интересно, поскольку формально приводит к решению задачи приближения реальной переходной характеристики замкнутой системы к заданной, хотя и является чрезвычайно сложной задачей, решение которой возможно лишь в исключительно простых случаях [3].

Из всего многообразия различных методов регулирования температуры перегретого пара барабанных паровых котлов в СНГ наиболее широко применяют метод регулирования впрыском собственного конденсата [2], а для прямоточных котлов – впрыском питательной воды.

В зарубежной практике нашли применение двухконтурные системы автоматического регулирования температуры перегретого пара с корректирующим и стабилизирующим регуляторами, которые в некоторых случаях имеют значительные преимущества перед типовыми системами автоматического регулирования (САР) с дифференциаторами промежуточного сигнала (САР с дифференциатором), используемыми в СНГ. Методы расчета параметров динамических настроек типовых двухконтурных замкнутых САР приведены в [4–12]. Вместе с тем в типовых САР практически невозможно достичь полной ликвидации отклонений даже температуры пара за местом впрыска от ее заданного значения, так как попытка увеличить коэффициент передачи системы с целью повышения точности системы приводит к ухудшению или даже потере системой устойчивости [12]. В работах [4–8] предложено использовать комбинированные САР с разомкнутыми контурами и устройствами компенсации (УК) дополнительно измеряемых возмущений, в которых не имеется условий для появления неустойчивой работы, как в замкнутых контурах. В этих случаях выбор параметров УК совершенно не лимитируется соображениями устойчивости, так как введение добавочного информационного канала не приводит к появлению нового замкнутого контура передачи воздействия и не влияет на устойчивость [5]. Также комбинированные системы позволяют принципиально получать системы регулирования, частично инвариантные относительно тех возмущений, дополнительное воздействие от которых вводится

в систему. Вместе с тем известно, что выполнение условий абсолютной инвариантности регулируемых величин от указанных возмущений возможно далеко не всегда либо их реализация технически очень сложна [3].

В [9–11] приведены аналитические методы структурно-параметрической оптимизации САР теплоэнергетических процессов на основе принципов динамической компенсации и инвариантности к возмущающим воздействиям, позволяющие повысить качество регулирования при основных воздействиях, а также устранить ряд указанных выше недостатков. Так, инвариантная каскадная система автоматического регулирования (ИКСАР) с внутренней моделью, предложенная в работе [11], позволяет уменьшить при отработке наиболее опасного крайнего внешнего возмущения модуля площади ошибки регулирования в 1,8 раза по сравнению с типовой каскадной системой автоматического регулирования. В [13–16] методы структурно-параметрической оптимизации САР использовались для выбора и обоснования рациональной структуры систем автоматического управления мощностью энергоблоков.

Таким образом, устранение ряда известных недостатков синтеза оптимальных САР с использованием принципов динамической компенсации и инвариантности относительно внутренних и внешних возмущений с целью дальнейшего существенного повышения быстродействия и точности регулирования представляется актуальной задачей.

### **Общие принципы динамической компенсации в задачах структурно-параметрического синтеза оптимальных регуляторов теплоэнергетических процессов**

Первый этап синтеза оптимального регулятора с динамической компенсацией включает задачу выбора и обоснования заданной передаточной функции замкнутой системы при отработке задания. В [3] отмечено, что построение заданной передаточной функции критерия оптимальной отработки задания в классе оптимизированных задач с минимизацией интеграла от суммы квадратов ошибки и регулируемого воздействия не удовлетворяет условию физической реализуемости, а решение этой задачи в классе низкочастотных фильтров Баттерворта с использованием амплитудно-частотных характеристик идеального фильтра приводит к появлению перерегулирования при отработке скачка задания, величина которого увеличивается с ростом порядка ряда Тейлора для функции ошибки. В этой же работе указано, что можно получить переходный процесс без перерегулирования для случая вещественных корней знаменателя заданной передаточной функции критерия оптимальной отработки системой скачка задания. Вместе с тем известно, что минимального времени регулирования можно добиться при одинаковых значениях постоянных времени ряда последовательно соединенных аperiодических звеньев. При этом общее время отработки скачка задания будет тем меньше, чем меньше величина запаздывания по каналу управляющего воздействия, а также количество

последовательно соединенных звеньев и численное заданное значение постоянных времени передаточной функции критерия оптимальной отработки задания [9–11]. В этом случае структура заданной передаточной функции системы при отработке задания должна полностью соответствовать структуре передаточной функции объекта по каналу управляющего воздействия [10].

Динамические характеристики по температуре перегретого пара за местом впрыска можно получить расчетным или экспериментальным путем в виде соответствующих переходных характеристик, аппроксимируемых передаточными функциями апериодических звеньев второго порядка, которые часто заменяют реальным пропорциональным звеном [2]

$$W_{\text{оп}}(s) = \frac{K_{\text{оп}}}{T_{\text{оп}}s + 1}, \quad (1)$$

где  $K_{\text{оп}}$  – коэффициент усиления опережающего участка, °C/Т/ч;  $T_{\text{оп}}$  – большая постоянная времени, равная сумме постоянных времени знаменателя апериодического звена второго порядка с различными постоянными времени, с;  $s$  – оператор Лапласа.

При этом экспериментные переходные характеристики главного участка пароперегревателя представляют собой монотонные кривые, которые целесообразно представить в виде инерционного звена второго порядка с условным запаздыванием [10]:

$$W_{\text{гл}}(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{K_{\text{гл}} e^{-\tau_y s}}{(T_{\text{гл}}s + 1)(\sigma_{\text{гл}}s + 1)}, \quad (2)$$

где  $K_{\text{гл}}$  – коэффициент усиления главного участка, °C/°C;  $T_{\text{гл}}$ ,  $\sigma_{\text{гл}}$  – соответственно большая и меньшая постоянные времени, с;  $\tau_y$  – условное запаздывание по каналу управляющего воздействия, с;  $Y(s)$  – изображение выходной переменной (температура пара за котлом);  $X(s)$  – то же входной переменной (расход воды на впрыск).

В этом случае расчетная переходная характеристика объекта, полученная из передаточной функции (2), точнее совпадает с экспериментальной кривой разгона.

Для двухконтурной каскадной системы автоматического регулирования (КСАР) температуры перегретого пара парового котла необходимо выбрать две заданные передаточные функции оптимальной отработки скачка задания по промежуточной регулируемой величине и основной регулируемой величине с использованием следующего алгоритма: в числителе заданной передаточной функции замкнутого контура для участков без запаздывания появляется единица, для участков с запаздыванием – передаточная функция условного запаздывания, а в знаменателе критерия оптимальной отработки скачка задания – столько апериодических звеньев с одинаковой заданной постоянной времени, каков порядок знаменателя

передаточной функции участка. Для опережающего участка пароперегревателя со стабилизирующим регулятором КСАР заданная передаточная функция оптимальной отработки задания промежуточной регулируемой величины с учетом (1) примет вид реального пропорционального звена

$$W_{зд1}(s) = \frac{1}{T_{зд1}s + 1}. \quad (3)$$

Здесь  $T_{зд1}$  – расчетный параметр динамической настройки стабилизирующего регулятора;  $T_{зд1} = \gamma_1 T_{оп}$ ;  $\gamma_1$  – весовой коэффициент из ряда чисел пропорции золотого сечения, где за целое принято численное значение  $T_{оп}$  [10]:

$$\gamma_1 \in [0,09; 0,146; 0,236; 0,382; 0,618]. \quad (4)$$

Для главного участка пароперегревателя внешнего контура КСАР с корректирующим регулятором заданная передаточная функция оптимальной отработки скачка задания основной регулируемой величины с учетом передаточной функции главного участка (2) примет следующий вид:

$$W_{зд2}(s) = \frac{e^{-\tau_y s}}{(T_{зд2}s + 1)^2}. \quad (5)$$

Здесь  $T_{зд2}$  – расчетный параметр оптимальной динамической настройки корректирующего регулятора, равный

$$T_{зд2} = \gamma \tau_y, \quad (6)$$

где  $\gamma$  – весовой коэффициент из ряда чисел пропорции золотого сечения, когда за целое принята величина условного запаздывания  $\tau_y$  [10].

Такой способ выбора заданной передаточной функции оптимальной отработки скачка задания регулируемой величины позволяет осуществить физическую реализацию регулятора с динамической компенсацией, а также достигнуть равенства реальной переходной характеристики замкнутой системы, заданной (5), вместо их приближения друг к другу.

Представим передаточную функцию объектов регулирования с условным запаздыванием в общем виде

$$W_{об}(s) = W_{об}^o(s) e^{-\tau_y s}, \quad (7)$$

где  $W_{об}^o(s)$  – часть передаточной функции (7), которая не содержит условного запаздывания.

Этой передаточной функции объекта соответствует заданная передаточная функция оптимальной отработки скачка задания замкнутой системы

$$W_{зд}(s) = W_{зд}^o(s) e^{-\tau_{зд} s}. \quad (8)$$

Здесь  $W_{зд}^o(s)$  – часть передаточной функции (8), которая не содержит запаздывания, а структура соответствует структуре  $W_{об}^o(s)$ ;  $\tau_{зд}$  – заданное значение запаздывания, равное условному запаздыванию передаточной функции объекта [10],

$$\tau_{зд} = \tau_y. \quad (9)$$

Выполнение равенства (9) позволяет достигнуть выполнения условия физической реализуемости оптимального корректирующего регулятора.

Передаточную функцию оптимального регулятора с динамической компенсацией с учетом (7)–(9) находим из условия выполнения равенства

$$W_{зд}(s) = \frac{W_p^{opt}(s)W_{об}^o(s)}{1 + W_p^{opt}(s)W_{об}^o(s)}. \quad (10)$$

Отсюда получаем передаточную функцию оптимального регулятора

$$W_p^{opt}(s) = \frac{W_{зд}(s)}{W_{об}^o(s)[1 - W_{зд}(s)]} = [W_{об}^o(s)]^{-1}W_{зд}^{PC}(s). \quad (11)$$

Здесь  $W_{зд}^{PC}(s)$  – заданная передаточная функция разомкнутой системы, равная [3]

$$W_{зд}^{PC}(s) = \frac{W_{зд}(s)}{1 - W_{зд}(s)}. \quad (12)$$

Передаточную функцию оптимального регулятора в виде правой части равенства (11) целесообразно применять для объектов регулирования без запаздывания, передаточные функции разомкнутых систем которых могут быть представлены в виде идеальных или реальных интегрирующих звеньев с инерционностью первого, второго или  $n$ -го порядка [10]. При этом заданную передаточную функцию разомкнутой системы для объектов без запаздывания определяют по передаточной функции (12).

Для объектов регулирования с условным запаздыванием с использованием передаточных функций (7), (8) и равенства (9) передаточная функция оптимального регулятора (11) примет следующий вид [10]:

$$W_p^{opt}(s) = W_\phi(s) \frac{1}{1 - W_{зд}^o(s)e^{-\tau_y s}}, \quad (13)$$

где передаточная функция фильтра будет физически реализуема и равна

$$W_\phi(s) = \frac{W_{зд}^o(s)}{W_{об}^o(s)}, \quad (14)$$

где  $W_{зд}^o(s)$  – часть передаточной функции (8), которая не имеет условного запаздывания и содержит один параметр динамической настройки оптимального регулятора  $T_{зд}$ :

$$W_{зд}^o(s) = \frac{1}{(T_{зд}s + 1)^n}, \quad (15)$$

где  $n$  – порядок передаточной функции объекта регулирования (7). Выбор численного значения  $T_{зд}$  осуществляют с использованием ряда чисел пропорции золотого сечения, приняв за целое численное значение условного запаздывания передаточной функции объекта по каналу управляющего воздействия с учетом максимально допустимой величины регулирующего воздействия:

$$T_{зд} = \gamma\tau_y. \quad (16)$$

### **Структурные схемы, математические модели типовой и дважды инвариантной систем автоматического регулирования и заданной передаточной функции замкнутой системы**

В данной статье в отличие от инвариантной каскадной системы автоматического регулирования с внутренней моделью [11] предложен следующий подход к формированию оптимальной структуры и настройке инвариантной САР, позволяющий существенно повысить качество регулирования: при отработке скачка задания достигнуть полного равенства реальной передаточной функции замкнутой системы и заданной передаточной функции систем с требуемыми прямыми показателями качества; для наиболее опасных внутренних возмущений получить полную инвариантность; при отработке внешних возмущений существенно уменьшить площадь модуля ошибки регулирования, т. е. обеспечить частичную инвариантность с заданными допустимыми отклонениями регулируемого параметра.

Возможности существенного повышения быстродействия и точности регулирования теплоэнергетических параметров с использованием предлагаемых оптимальных регуляторов с динамической компенсацией и комбинированных принципов регулирования покажем на примере дважды инвариантной системы автоматического регулирования температуры перегретого пара паровых котлов.

Для расчета настройки типовых двухконтурных САР температуры перегретого пара обычно используют переходные характеристики по температуре пара за впрыском (опережающий участок) и переходные характеристики инерционного участка пароперегревателя [4]. При экспериментальном определении динамических характеристик объекта регулирования нахождение параметров передаточной функции опережающего участка не возникает трудностей, так как на вход опережающего участка подается скачок впрыска. Однако экспериментально невозможно получить переходную характеристику инерционного участка, поскольку на вход подается не скачок, а переходная характеристика опережающего участка в виде апериодического звена первого или второго порядка. При этом переходную характеристику инерционного участка пароперегревателя, необходимую для расчета параметров динамической настройки САР температуры перегретого



го пара, по большинству из известных методов параметрической оптимизации, находят графическим путем [2], что снижает точность идентификации динамики инерционного участка и ухудшает качество регулирования. Поэтому целесообразно структурно-параметрический синтез инвариантной КСАР осуществить на основе передаточных функций опережающего и главного участков пароперегревателя (вход – скачок управляющего воздействия, выход – температура пара за котлом).

Схемы моделирования переходных процессов типовой САР с дифференциатором, предлагаемой КСАР и заданной передаточной функции замкнутой системы при отработке скачка задания в пакете Simulink, приведены на рис. 1.

Динамика опережающего участка объекта представлена передаточной функцией инерционного звена первого порядка (1).

Структуру стабилизирующего регулятора (СР) находим на базе передаточной функции оптимального регулятора с динамической компенсацией с учетом динамики опережающего участка [10]

$$W_{\text{р1}}^{\text{opt}}(s) = [W_{\text{оп}}(s)]^{-1} W_{\text{зд1}}^{\text{PC}(n=1)}(s), \quad (17)$$

где  $[W_{\text{оп}}(s)]^{-1}$  – компенсатор динамики опережающего участка, т/ч/°С;  $W_{\text{зд1}}^{\text{PC}(n=1)}(s)$  – заданная передаточная функция разомкнутой системы регулирования в виде идеального интегрирующего звена [12],

$$W_{\text{зд1}}^{\text{PC}(n=1)}(s) = \frac{1}{T_{\text{зд1}}s}, \quad (18)$$

$T_{\text{зд1}}$  – расчетный параметр динамической настройки СР, равный постоянной времени передаточной функции опережающего участка (1):

$$T_{\text{зд1}} = T_{\text{оп}}. \quad (19)$$

Подставив в передаточную функцию стабилизирующего регулятора (17) передаточные функции опережающего участка (1) и разомкнутой системы (18), с учетом (19) получим передаточную функцию СР

$$W_{\text{р1}}^{\text{opt}}(s) = \frac{\kappa_{\text{р1}}(T_{\text{и1}}s + 1)}{T_{\text{и1}}s}, \quad (20)$$

где  $T_{\text{и1}} = T_{\text{оп}}$  – время интегрирования, с;  $\kappa_{\text{р1}}$  – коэффициент передачи регулятора,

$$\kappa_{\text{р1}} = \frac{T_{\text{оп}}}{\kappa_{\text{оп}}T_{\text{зд1}}}, \quad (21)$$

с учетом равенства (19) находим

$$\kappa_{\text{р1}} = \frac{1}{\kappa_{\text{оп}}} \left( \frac{\text{т/ч}}{\text{°С}} \right). \quad (22)$$

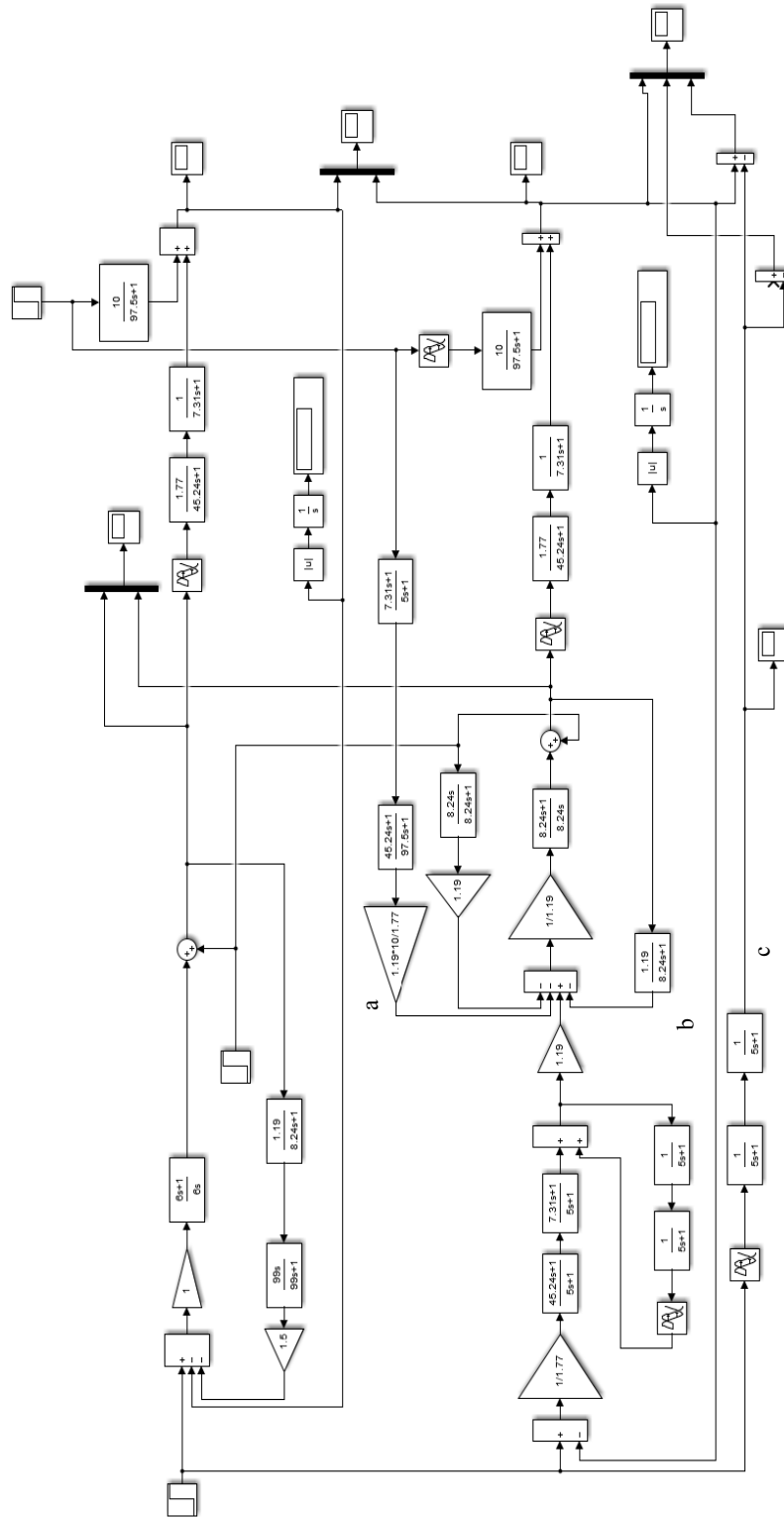


Рис. 1. Схемы моделирования систем автоматического регулирования в пакете Simulink: а – типовой системы автоматического регулирования с дифференциатором; б – дважды инвариантной системы автоматического регулирования при плановом изменении нагрузки; с – заданной передаточной функции замкнутой системы при отработке скачка задания

Fig. 1. Schemes for modeling automatic control systems in the Simulink package: а – a typical automatic control system with a differentiator; б – a doubly invariant automatic control system at a planned load change; с – a given transfer function of a closed system when working out

Для устранения влияния характера переходных процессов внутреннего контура КСАР со стабилизирующим регулятором на качество регулирования внешнего контура с корректирующим регулятором (КР) запишем передаточную функцию по регулируемому воздействию  $x_p$  при изменении скачка корректирующего воздействия  $x_k$  на входе в СР

$$W_{x_p, x_k}(s) = \frac{W_{pl}^{opt}(s)}{1 + W_{pl}^{opt}(s)W_{op}(s)}. \quad (23)$$

Умножив числитель и знаменатель (23) на передаточную функцию опережающего участка (1), получим

$$W_{x_p, x_k}(s) = \frac{W_{pl}^{opt}(s)W_{op}(s)}{[1 + W_{pl}^{opt}(s)W_{op}(s)]W_{op}(s)} = \frac{W_{3д1}^{3C}(s)}{W_{op}(s)}. \quad (24)$$

Здесь  $W_{3д1}^{3C}(s)$  – заданная передаточная функция по промежуточной регулируемой величине  $y_1(t)$  при скачкообразном изменении задания на входе в СР, равная с учетом (1)

$$W_{3д1}^{3C}(s) = \frac{1}{T_{3д1}s + 1}, \quad (25)$$

где  $T_{3д1} = T_{op}$ .

Подставив (1) и (25) в (24), с учетом (19) получим

$$W_{x_p, x_k}(s) = \frac{T_{op}s + 1}{K_{op}(T_{3д1}s + 1)} = \frac{1}{K_{op}}. \quad (26)$$

Из равенства (26) следует, что при установке усилителя с коэффициентом передачи  $K_{op}$  между входом КР и выходом СР внутренний контур с СР превращается в усилитель с коэффициентом передачи, равным единице, и структуру КР можно определить только по передаточной функции главного участка пароперегревателя (2), которой соответствует заданная передаточная функция замкнутой системы при обработке задания:

$$W_{3д2}(s) = W_{3д2}^o(s)e^{-\tau_y s} = \frac{e^{-\tau_y s}}{(T_{3д2}s + 1)^2}, \quad (27)$$

где  $T_{3д2} = \gamma\tau_y$  – параметр динамической настройки КР.

С учетом (26), (27) передаточная функция корректирующего оптимального регулятора примет следующий вид:

$$W_{p2}^{opt}(s) = W_{\phi}(s) \frac{1}{1 - W_{зд2}^o(s) e^{-\tau_y s}}. \quad (28)$$

Здесь передаточная функция (28) физического реализуемого фильтра будет равна

$$W_{\phi}(s) = \frac{W_{зд2}^o(s)}{W_{гл}^o(s)} = \frac{(T_{гл}s + 1)(\sigma_{гл}s + 1)}{\kappa_{гл}(T_{зд2}s + 1)^2}. \quad (29)$$

Для достижения полной инвариантности по отношению к наиболее опасному внутреннему возмущению (температуре перегретого пара до места впрыска), измеряемому дополнительным датчиком, выход которого с минусом подают на вход СР через дифференциатор инвариантности внутреннего возмущения с передаточной функцией, которая обратна передаточной функции СР:

$$W_d(s) = \frac{1}{W_{p1}^{opt}(s)} = \frac{T_{и1}s}{\kappa_{p1}(T_{и1}s + 1)} = \frac{\kappa_d T_d s}{T_d s + 1}, \quad (30)$$

откуда с учетом (22) находим коэффициент усиления дифференциатора и время дифференцирования.

Для существенного уменьшения площади модуля ошибки регулирования при обработке наиболее опасного внешнего возмущения дополнительно измеряют расход перегретого пара, который воздействует на температуру перегретого пара за пароперегревателем в соответствии с передаточной функцией вида

$$W_b(s) = \frac{\kappa_b}{T_b s + 1} = \frac{10}{97,5s + 1}, \quad (31)$$

где  $\kappa_b$  – коэффициент передачи при изменении нагрузки энергоблока на 10 %;  $T_b$  – постоянная времени, с.

Передаточную функцию второго устройства инвариантности основной регулируемой величины по отношению к крайнему внешнему возмущению находим из условий компенсации той части передаточной функции главного участка пароперегревателя (2), которая не содержит условного запаздывания и превращения внутреннего контура СР в усилительное звено с единичным коэффициентом передачи также со стороны выхода устройства инвариантности, подключенного с минусом к входу СР. Компенсация условного запаздывания главного участка пароперегревателя достигается введением такого же запаздывания в автоматический задатчик нагрузки парового котла или автоматического задатчика мощности энергоблока. Это позволяет при переходе на другую нагрузку сперва скорректировать задание внутреннему контуру КСАР, а затем в момент времени  $t = \tau_y$  перейти на новый уровень нагрузки, превращая систему в инвариантную при плано-

вом изменении нагрузки. Это дает возможность существенно повысить точность отработки внешнего возмущения [10]

$$W_{\text{ук}}(s) = \frac{\kappa_{\text{оп}}\kappa_{\text{в}}(T_{\text{гл}}s + 1)(\sigma_{\text{гл}}s + 1)}{\kappa_{\text{гл}}(T_{\text{в}}s + 1)(T_{\text{зд3}}s + 1)} = \frac{1,19 \cdot 10(45,24s + 1)(7,31s + 1)}{1,77 \cdot (97,5s + 1)(5s + 1)}, \quad (32)$$

где  $T_{\text{зд3}} = 5$  с – дополнительная постоянная времени, введенная в знаменатель для физической реализуемости устройства инвариантности внешнего возмущения.

При этом штатные параметры динамической настройки типовой системы автоматического регулирования с дифференцированием (САРД) промежуточной регулируемой величины (рис. 1а) представлены передаточной функцией дифференциатора

$$W_{\text{д}}(s) = \frac{\kappa_{\text{д}}T_{\text{д}}s}{T_{\text{д}}s + 1} = \frac{1,5 \cdot 99s}{99s + 1}, \quad (33)$$

где  $\kappa_{\text{д}} = 1,5$  – коэффициент усиления дифференциатора;  $T_{\text{д}} = 99$  с – время дифференцирования.

Штатные настройки ПИ-регулятора типовой САР с дифференциатором составляют (рис. 1а)

$$W_{\text{р}}(s) = \frac{\kappa_{\text{р}}(T_{\text{и}}s + 1)}{T_{\text{и}}s} = \frac{1,0(6s + 1)}{6s}, \quad (36)$$

где  $\kappa_{\text{р}} = 1,0$  т/ч/°С – коэффициент усиления;  $T_{\text{и}} = 6$  с – время интегрирования ПИ-регулятора.

### **Переходные процессы типовой САР с дифференциатором и ИКСАР с использованием оптимальных регуляторов с динамической компенсацией при плановом изменении нагрузки**

Графики переходных процессов типовых САРД и ИКСАР при основных воздействиях приведены на рис. 2, где  $\frac{\Delta y}{y}$  – относительное значение основной регулируемой величины.

При отработке задания (рис. 2а) время регулирования ИКСАР с оптимальным регулятором (пунктирная линия) в восемь раз меньше, чем время регулирования типовой САР с дифференциатором (сплошная линия), и в 2,6 раза – по сравнению со временем регулирования ИКСАР с внутренней моделью [11]. При этом окончание переходного процесса (рис. 3) наступает через минимальное время, равное  $2\tau_{\text{у}}$ . Кроме того, при отработке скачка задания переходные характеристики реальной ИКСАР и заданной передаточной функции системы (27) полностью совпадают, а не приближаются друг к другу, как в [3], так как разница между ними равна нулю (рис. 3).

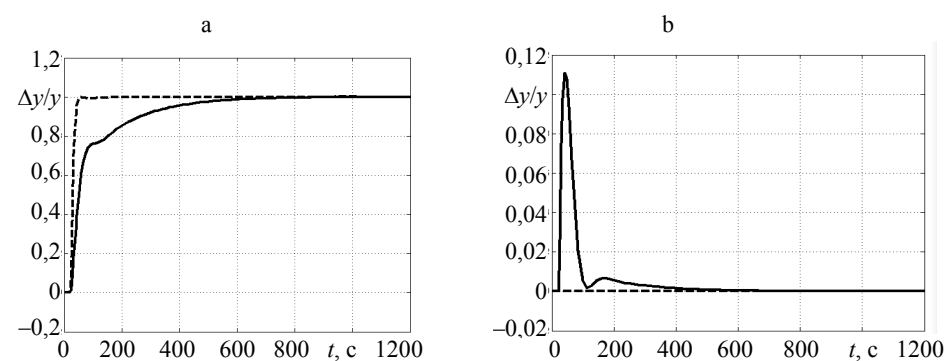


Рис. 2. Графики переходных процессов типовой (сплошные линии) и инвариантной (пунктирные линии) систем автоматического регулирования при отработке основных воздействий: а – скачка задания; б – внутреннего возмущения; в – внешнего возмущения

Fig. 2. Graphs of transients of typical (solid lines) and invariant (dotted lines) automatic control systems when working out the main effects: а – a control action surge; б – internal perturbation; в – external perturbation

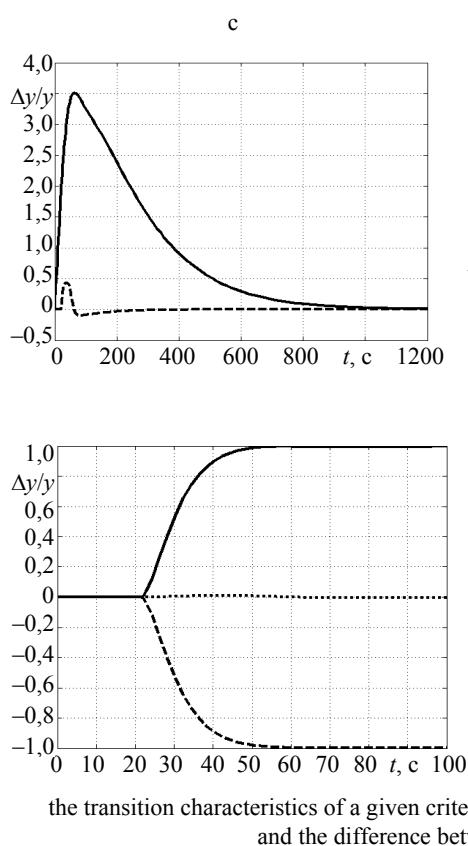


Рис. 3. Графики переходных процессов при отработке задания предлагаемой инвариантной системы автоматического регулирования (сплошная линия), переходной характеристики заданного критерия оптимальной отработки задания (пунктирная линия) и разница между ними (точечная линия)

Fig. 3. Graphs of transients when working out a task of the proposed invariant automatic control system (solid line), the transition characteristics of a given criterion for optimal task processing (dashed line) and the difference between them (dotted line)

При отработке внутреннего возмущения максимальная относительная динамическая ошибка регулирования типовой САРД составляет 0,11 (рис. 1б), а ИКСАР равна нулю за счет полной инвариантности относительно наиболее опасного внутреннего возмущения.

При отработке крайнего внешнего возмущения расходом перегретого пара время регулирования уменьшается в пять раз, максимальная динамическая ошибка регулирования сокращается в 7,3 раза, а модуль площади ошибки регулирования уменьшается в 43 раза по сравнению с типовой САР с дифференциатором, что в 23,8 раза меньше, чем ИКСАР с внутренней моделью [10].

## ВЫВОДЫ

1. Установлено, что для повышения точности идентификации объектов и существенного улучшения качества регулирования ИКСАР при основных воздействиях следует проводить структурно-параметрический синтез систем регулирования на базе передаточных функций опережающего и главного участков пароперегревателя вместо инерционного.

2. Целесообразно внутренний контур КСАР превращать в усилительное звено с единичным коэффициентом передачи для выбора структуры корректирующего регулятора с динамической компенсацией по передаточной функции главного участка пароперегревателя.

3. Передаточная функция стабилизирующего регулятора КСАР должна быть равна произведению обратной передаточной функции опережающего участка, умноженной на заданную передаточную функцию разомкнутой системы в виде идеального интегрирующего звена. При этом время интегрирования стабилизирующего регулятора должно полностью компенсировать постоянную времени апериодического звена первого порядка опережающего участка, а коэффициент передачи должен быть обратно пропорционален коэффициенту передачи опережающего участка.

4. Чтобы устранить влияние переходных процессов внутреннего контура на качество регулирования внешнего контура с корректирующим регулятором, необходимо между выходом последнего и входом стабилизирующего регулятора установить дополнительно усилитель с единичным коэффициентом передачи.

5. Передаточную функцию корректирующего регулятора определяют как произведение обратной передаточной функции главного участка объекта, которая умножена на заданную передаточную функцию замкнутой системы при отработке задания и обратную разность между единицей и заданной передаточной функцией замкнутой системы при отработке задания. При этом КР имеет один расчетный параметр динамической настройки  $T_{зд2}$ , численные значения которого определяет быстродействие ИКСАР с учетом допустимой величины корректирующего воздействия с выхода КР.

6. Полная инвариантность по отношению к наиболее опасному внутреннему возмущению достигается при условии, что передаточная функция первого дифференциатора инвариантности обратна передаточной функции стабилизирующего регулятора.

7. Существенное повышение быстродействия и точности отработки внешнего возмущения достигается при реализации устройства компенсации наиболее опасного дополнительно измеренного внешнего возмущения в виде двух последовательно соединенных звеньев быстрого реагирования, компенсирующих ту часть передаточной функции главного участка пароперегревателя, которая не содержит условного запаздывания.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Плетнев, Г. П. Автоматизация технологических процессов и производств в теплоэнергетике: учеб. для вузов / Г. П. Плетнев. 4-е изд. М.: Изд-во МЭИ, 2007. 352 с.
2. Клюев, А. С. Наладка систем автоматического регулирования паровых котлов / А. С. Клюев, А. Т. Лебедев, С. И. Новоселов. М.: Энергоатомиздат, 1985. 280 с.
3. Методы классической и современной теории автоматического управления: учеб.: в 3 т. / под ред. Н. Д. Егупова. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. Т. 2: Синтез регуляторов и теория оптимизации систем автоматического управления. 736 с.
4. Ротач, В. Я. Расчет настройки промышленных систем регулирования / В. Я. Ротач. М.–Л.: Госэнергоиздат, 1961. 344 с.
5. Ротач, В. Я. Расчет динамики промышленных автоматических систем регулирования / В. Я. Ротач. М.: Энергия, 1973. 440 с.
6. Ротач, В. Я. Теория автоматического управления: учебник для вузов / В. Я. Ротач. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Изд. дом МЭИ, 2008. 396 с.
7. Широкий, Д. К. Расчет параметров промышленных систем регулирования: справ. пособие / Д. К. Широкий, О. Д. Куриленко. К.: Техніка, 1972. 232 с.
8. Анхимюк, В. Л. Теория автоматического управления: учеб. пособие / В. Л. Анхимюк, О. Ф. Опейко, Н. Н. Михеев. Минск: Дизайн ПРО, 2000. 352 с.
9. Кузьмицкий, И. Ф. Теория автоматического управления: учеб. для вузов / И. Ф. Кузьмицкий, Г. Т. Кулаков. Минск: БГТУ, 2010. 574 с.
10. Теория автоматического управления: учеб. пособие / Г. Т. Кулаков [и др.]; под ред. Г. Т. Кулакова. Минск: Вышэйшая школа, 2022. 197 с.
11. Кулаков, Г. Т. Синтез инвариантных систем автоматического регулирования с внутренней моделью / Г. Т. Кулаков, А. Т. Кулаков, Н. В. Воюш // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2022. Т. 65, № 6. С. 539–550. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-6-539-550>.
12. Коновалов, М. А. Проблемы автоматизации инерционных теплоэнергетических объектов / М. А. Коновалов. К.: Феникс, 2009. 312 с.
13. Кулаков, Г. Т. Параметрическая оптимизация системы автоматического управления мощностью энергоблоков 300 МВт в режиме постоянного давления пара перед турбиной / Г. Т. Кулаков, А. Т. Кулаков, К. И. Артёменко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 5. С. 451–462. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-5-451-462>.
14. Кулаков, Г. Т. Параметрическая оптимизация системы автоматического управления мощностью энергоблоков 300 МВт в режиме переменного давления пара перед турбиной / Г. Т. Кулаков, А. Т. Кулаков, К. И. Артёменко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 6. С. 540–551. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-6-539-551>.
15. Артёменко, К. И. Структурно-параметрическая оптимизация системы автоматического управления мощностью энергоблоков 300 МВт в широком диапазоне изменения нагрузок / К. И. Артёменко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 5. С. 469–481. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-5-469-481>.
16. Кулаков, Г. Т. Синтез котельных регуляторов системы автоматического управления мощностью энергоблоков / Г. Т. Кулаков, К. И. Артёменко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2020. Т. 63, № 3. С. 223–235. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-3-223-235>.

Поступила 17.02.2023 Подписана в печать 25.04.2023 Опубликована онлайн 31.01.2024

## REFERENCES

1. Pletnev G. P. (2007) *Automation of Technological Processes and Productions in Thermal Power Engineering*. 4<sup>th</sup> Ed. Moscow, MEI Publishing House. 352 (in Russian).



2. Klyuev A. S., Lebedev A. T., Novoselov S. I. (1985) *Adjustment of Automatic Control Systems of Steam Boilers*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 280 (in Russian).
3. Egupov N. D. (ed.) (2000) *Methods of Classical and Modern Theory of Automatic Control: Textbook in 3 Volumes. Vol. 2: Synthesis of Regulators and Theory of Optimization of Automatic Control Systems*. Moscow, Publishing House of Bauman Moscow State Technical University. 736 (in Russian).
4. Rotach V. Ya. (1961) *Calculation of the Dynamics of Industrial Automatic Control Systems*. Moscow–Leningrad, Gosenergoizdat Publ. 344 (in Russian).
5. Rotach V. Ya. (1973) *Calculation of Dynamics of Industrial Automatic Control Systems*. Moscow, Energiya Publ. 440 (in Russian).
6. Rotach V. Ya. (2008) *Theory of Automatic Control. 5<sup>th</sup> Ed.* Moscow, MEI Publishing House. 396 (in Russian).
7. Shirokii D. K., Kurylenko O. D. (1972) *Calculation of Parameters of Industrial Control Systems*. Kyiv, Tekhnika Publ. 232 (in Russian).
8. Ankhimuk V. L., Opeyko O. F., Mikheev N. N. *Theory of Automatic Control: a Textbook for University Students of Electrical Engineering Specialties*. Minsk, Dizain PRO Publ. 352 (in Russian).
9. Kuzmitskii I. F., Kulakov G. T. (2010) *Theory of Automatic Control*. Minsk, BSTU. 574 (in Russian).
10. Kulakov G. T., Kulakov A. T., Kravchenko V. V., Kukhorenko A. N., Voyush N. V. (2022) *Theory of Automatic Control*. Minsk, Vysheishaya Shkola Publ. 197 (in Russian).
11. Kulakov G. T., Kulakov A. T., Voyush N. V. (2022) Synthesis of Invariant Automatic Control Systems with an Internal Model. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 65 (6), 539–550. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-6-539-550> (in Russian).
12. Konovalov M. A. (2009) *Problems of Automation of Inertial Thermal Power Facilities*. Kyiv, Feniks Publ. 312 (in Russian).
13. Kulakov G. T., Kulakov A. T., Artsiomenka K. I. (2018) Parametric Optimization for Automatic Control System of 300 MW Power Units at a Constant Steam Pressure Upstream of the Turbine. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (5), 451–462. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-5-451-462> (in Russian).
14. Kulakov G. T., Kulakov A. T., Artsiomenka K. I. (2018) Parametric Optimization for Automatic Control System of Power Units of 300 MW for the Mode of Variable Pressure of Turbine Inlet Steam. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (6), 539–551. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-6-539-551> (in Russian).
15. Artsiomenka K. I. (2019) Structural-and-Parametric Optimization of Automatic Control System for Power Units of 300 MW in Wide Range of Load Variations. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 62 (5) 469–481. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-5-469-481> (in Russian).
16. Kulakov G. T., Artsiomenka K. I. (2020) Synthesis of Boiler Controllers of the Automatic Power Control System of Power Units. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 63 (3), 223–235. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-3-223-235> (in Russian).