

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-6-539-550>

УДК 681.51

Синтез инвариантных систем автоматического регулирования с внутренней моделью

Г. Т. Кулаков¹⁾, А. Т. Кулаков¹⁾, Н. В. Воюш¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2022
Belarusian National Technical University, 2022

Реферат. Статья посвящена модернизации типовых каскадных систем автоматического регулирования со стабилизирующим и корректирующим ПИ-регуляторами. Такие системы автоматического регулирования кроме основного сигнала (регулируемой величины) используют дополнительный опережающий сигнал, который реагирует на возмущение быстрее, чем основной. Опережающий сигнал достаточно эффективно компенсирует возникающие в системе внутренние возмущения за счет настройки стабилизирующего регулятора. Примером может служить система регулирования температуры перегретого пара котельных агрегатов тепловых электрических станций. Задача определения параметров настройки таких двухконтурных систем довольно сложна. При относительно малой инерционности внутреннего контура быстродействие стабилизирующего регулятора достаточно высоко, и переходные процессы в нем не оказывают влияния на качество регулирования во внешнем контуре с корректирующим регулятором. Это позволяет рассчитывать оптимальные параметры настройки последнего только по динамическим характеристикам инерционного участка обычными методами, разрабатываемыми для одноконтурных систем. Главный недостаток таких систем автоматического регулирования состоит в том, что они не позволяют при близких инерционностях контуров существенно улучшить качество отработки основных воздействий при скачке задания, внутреннего и внешнего возмущения. Для устранения этого недостатка предложена инвариантная каскадная система автоматического регулирования с внутренней моделью, учитывающей при выборе структуры и настройке корректирующего регулятора динамику как внутреннего, так и внешнего контура с инерционным участком объекта. При этом внутренняя модель используется для полной компенсации главной обратной связи системы при отработке сигнала задания, а также выделения эквивалентного внешнего возмущения, для компенсации которого применяется дифференциатор инвариантности. Инвариантная каскадная система автоматического регулирования позволяет существенно повысить быстродействие и точность по сравнению с типовой.

Ключевые слова: каскадная система автоматического регулирования, инвариантность, повышение быстродействия и точности, синтез оптимальных систем

Для цитирования: 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>

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

Synthesis of an Invariant Automatic Control Systems with an Internal Model

G. T. Kulakov¹⁾, A. T. Kulakov¹⁾, N. V. Voyush¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The article is devoted to the modernization of typical cascade automatic control systems with stabilizing and corrective PI controllers. Such automatic control systems, in addition to the main signal (of adjustable value), use an additional leading signal that reacts to the disturbance faster than the main one. The leading signal effectively compensates for internal disturbances arising in the system by adjusting the stabilizing controller. The temperature control system of superheated steam boiler units of thermal power plants may be taken as an example. The task of determining the configuration parameters of such dual-circuit systems is quite difficult. With a relatively low inertia of the internal circuit, the speed of the stabilizing controller is quite high, and transients in it do not affect the quality of regulation in the external circuit with a corrective controller. This makes it possible to calculate the optimal settings of the latter only by the dynamic characteristics of the inertial section using conventional methods developed for single-circuit systems. The main disadvantage of such automatic control systems is that they do not allow, with close inertia of the contours, to significantly improve the quality of working out the main impacts during the jump of the task, internal and external disturbances. To eliminate this drawback, an invariant cascade automatic control system with an internal model is proposed that takes into account the dynamics of both the internal and external contours with an inertial section of the object when choosing the structure and setting up the corrective controller. In this case, the internal model is used to fully compensate for the main feedback of the system when working out the task signal, as well as to isolate an equivalent external disturbance, for which an invariance differentiator is used to compensate. The invariant cascade automatic control system makes it possible to significantly increase the speed and accuracy compared to the standard one.

Keywords: cascade automatic control system, invariance, increase in speed and accuracy, synthesis of optimal systems

For citation: Kulakov G. T., Kulakov A. T., Voyush N. V. (2022) Synthesis of an Invariant Automatic Control Systems with an Internal Model. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 65 (6), 539–550. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-6-539-550> (in Russian)

Введение

Новые условия функционирования электроэнергетики обусловлены планируемым вводом в эксплуатацию второго энергоблока Белорусской АЭС, суммарная мощность которой 2400 МВт. Оба энергоблока будут работать в базовой части графика электрических нагрузок. В связи с этим приобретает актуальность повышение энергоэффективности теплоэнергетического оборудования на органическом топливе в широком диапазоне изменения нагрузок. Одним из основных показателей решения указанной проблемы является создание систем автоматического управления, обладающих высоким быстродействием и точностью в рабочем диапазоне изменения нагрузок. Этому вопросу посвящено значительное количество публикаций [1–16], из анализа которых следует, что в настоящее время большинство систем автоматического регулирования (САР) теплоэнергетических процессов реализовано на базе двухконтурных САР (каскадных систем с корректирующими и стабилизирующими регуляторами и систем с опережающим скоростным сигналом) [1, 2]. В обычных САР используются типовые линейные законы регулирования. Широкое распространение в теплоэнергетике получили методы расчета настройки типовых регулято-

ров [2–10]. Вместе с тем во всех двухконтурных САР невозможно достичь полной ликвидации отклонений регулируемой величины от ее заданного значения. Это связано с тем, что, например, стабилизирующий регулятор каскадной САР входит в замкнутый внутренний контур передачи воздействий, а попытка увеличить его коэффициент передачи с целью повышения быстродействия и точности системы приводит к ухудшению или потере устойчивости системы. Введение промежуточной регулируемой величины повышает точность работы системы, но, как правило, не может полностью устранить ошибку регулирования.

С этой точки зрения значительным преимуществом обладают инвариантные САР с компенсацией как внутренних, так и внешних возмущений [2, 10]. В [11, 12] изложены основы методов структурно-параметрической оптимизации теплоэнергетических процессов, которые позволяют существенно повысить быстродействие и точность регулирования за счет использования вместо типовых линейных законов управления регулятора, основанные на принципе динамической компенсации динамики объекта. Это дает точное решение задачи синтеза регулятора при отработке скачка задания. В [13] для повышения быстродействия и точности предложено использовать аналитические самонастраивающиеся системы с эталонными методами. Для сохранения хорошего качества регулирования в широком диапазоне изменения нагрузок в [14] предложено добавить устройство коррекции параметров динамической настройки регулятора и дифференциатора типовой САР с опережающим скоростным сигналом в функции от расхода перегретого пара котла. Однако в этом случае существенного повышения быстродействия и точности во всем диапазоне изменения нагрузок достигнуть не удастся без использования инвариантных САР. В [15, 16] на базе аналитических экспресс-методов параметрической оптимизации динамических систем разработана высококачественная система автоматического управления мощностью энергоблока 300 МВт в режиме постоянного и переменного давления пара перед турбиной.

Цель статьи – поиск путей существенного повышения качества работы комбинированных систем регулирования при основных воздействиях за счет использования передаточных функций оптимальных регуляторов с применением внутренних моделей и выделением эквивалентного внешнего возмущения и его компенсации, а также автоматической коррекции параметров динамической настройки регулирующих устройств и внутренних моделей в функции нагрузки паровых котлов.

Структурная схема и математическая модель инвариантной системы автоматического регулирования с внутренней моделью

Возможности существенного повышения качества регулирования технологических параметров теплоэнергетических процессов с использованием аналитических экспресс-методов структурно-параметрической оптимизации покажем на примере синтеза инвариантной каскадной системы автоматического регулирования (ИКСАР) с внутренней моделью эквивалентной передаточной функции объекта с запаздыванием, учитывающей динамику внутреннего контура со стабилизирующим регулятором

при выборе структуры корректирующего регулятора. Схема моделирования ИКСАР и типовой каскадной САР (ТКСАР) в пакете Simulink приведена на рис. 1.

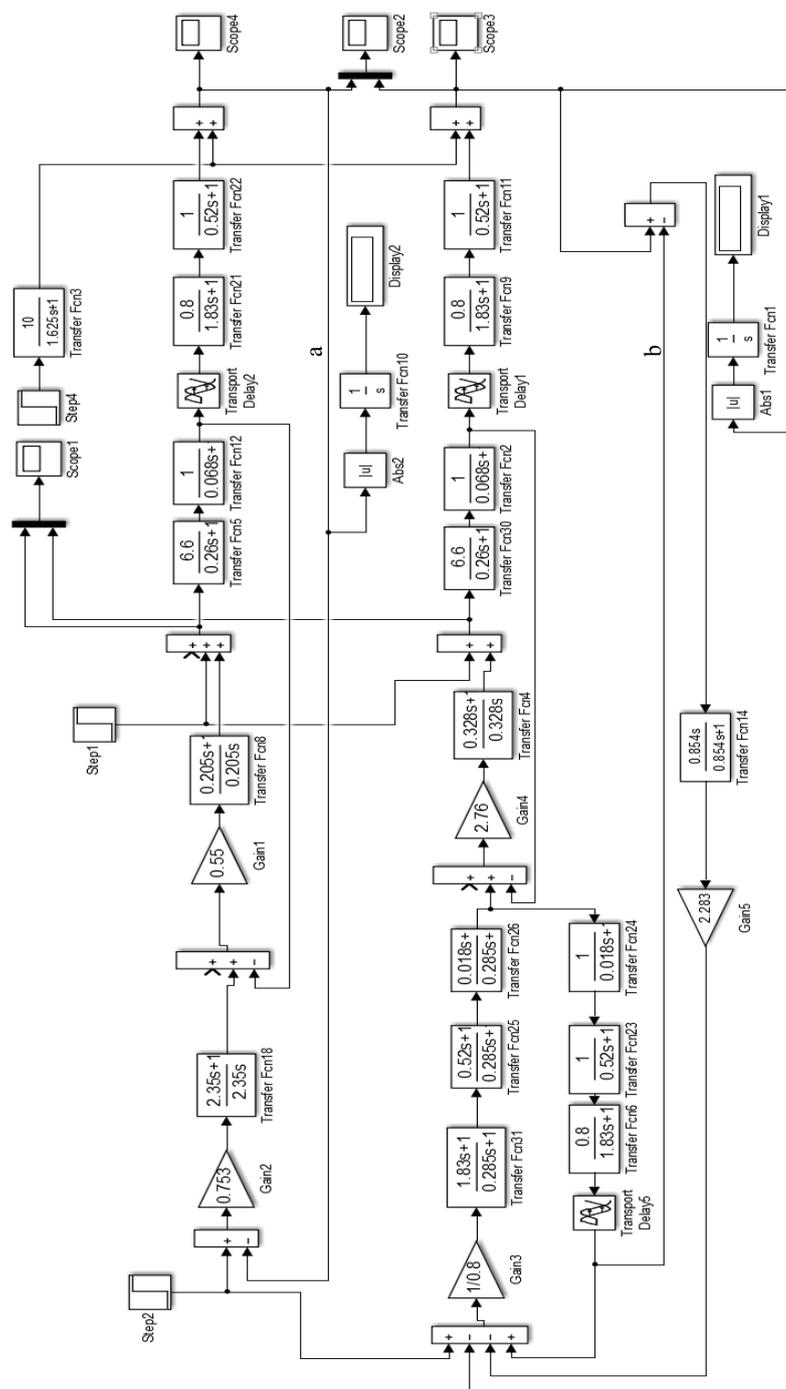


Рис. 1. Схема моделирования каскадной системы автоматического регулирования в пакете Simulink:
 а – типовой; б – инвариантной с внутренней моделью
 Fig. 1. The simulation scheme of cascade automatic control system with the use of the Simulink package:
 а – the standard one; б – the invariant one with an internal model

Динамика опережающего участка объекта представлена передаточной функцией инерционного звена второго порядка

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

где $k_{\text{оп}}$ – коэффициент передачи опережающего участка объекта, °C/(т/ч); $T_{\text{оп}}$, $\sigma_{\text{оп}}$ – соответственно большая и меньшая постоянные времени, мин.

Структуру стабилизирующего регулятора определим на основе передаточной функции оптимального регулятора с динамической компенсацией для объекта без запаздывания [3]

$$W_{\text{pl}}^{\text{opt}}(s) = [W_{\text{оп}}^*(s)]^{-1} W_{\text{зд1}}^{\text{PC}(n=1)}(s), \quad (2)$$

где $W_{\text{оп}}^*(s)$ – расчетная передаточная функция опережающего участка, определяется как

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

$T_{\text{оп}}^*$ – постоянная времени, равная сумме постоянных времени знаменателя передаточной функции (1),

$$T_{\text{оп}}^* = T_{\text{оп}} + \sigma_{\text{оп}}. \quad (4)$$

При этом заданная передаточная функция разомкнутой системы представляет собой идеальное интегрирующее звено [13]

$$W_{\text{зд1}}^{\text{PC}(n=1)}(s) = \frac{1}{T_{\text{зд1}}s}, \quad (5)$$

где $T_{\text{зд1}}$ – единственный расчетный параметр динамической настройки стабилизирующего регулятора, численное значение которого рассчитывают по формуле

$$T_{\text{зд1}} = \gamma_1 T_{\text{оп}}^*, \quad (6)$$

где $\gamma_1 \in [0,618; 0,382; 0,236; \dots; 0,09; 0,056]$ – весовой коэффициент из ряда чисел пропорции золотого сечения, где за целое принято численное значение $T_{\text{оп}}^*$ [13].

Подставив в передаточную функцию стабилизирующего регулятора (2) передаточные функции (3) и (5), получим

$$W_{зд1}^{opt}(s) = \frac{k_{p1}(T_{и1}s + 1)}{T_{и1}s}, \quad (7)$$

где $T_{и1}$ – время интегрирования, $T_{и1} = T_{оп}^* = 0,328$ мин; k_{p1} – коэффициент передачи стабилизирующего регулятора, $k_{p1} = \frac{T_{оп}^*}{k_{оп}T_{зд1}}$, т/ч/°С.

При $\gamma_1 = 0,056$, исходя из максимально допустимой величины регулируемого воздействия при обработке скачка задания, численное значение коэффициента передачи стабилизирующего регулятора $k_{p1} = 2,76$ т/ч/°С. В результате чего внутренний контур системы со стабилизирующим регулятором может быть заменен на передаточную функцию инерционного звена первого порядка:

$$W_{зд1}(s) = \frac{1}{T_{зд1}s + 1}; \quad (8)$$

$$T_{зд1} = \gamma_1 T_{оп}^* = 0,018 \text{ мин.} \quad (9)$$

Динамика инерционного участка объекта представлена инерционным звеном второго порядка с условным запаздыванием по каналу регулирующего воздействия [13]:

$$W_{ин}(s) = \frac{k_{ин}e^{-\tau_y s}}{(T_{ин}s + 1)(\sigma_{ин}s + 1)}, \quad (10)$$

где $k_{ин}$ – коэффициент передачи инерционного участка объекта; $T_{ин}$, $\sigma_{ин}$ – соответственно большая и меньшая постоянные времени, мин; τ_y – условное запаздывание, мин.

С учетом (8) и (10) эквивалентная передаточная функция объекта для формирования структуры корректирующего регулятора примет вид

$$W_{эkv}(s) = W_{зд1}(s)W_{ин}(s) = \frac{k_{ин}e^{-\tau_y s}}{(T_{ин}s + 1)(\sigma_{ин}s + 1)(T_{зд1}s + 1)}. \quad (11)$$

Для устранения технического противоречия между быстродействием и устойчивостью системы выход корректирующего регулятора подключаем с плюсом к его входу с использованием полной модели эквивалентного объекта

$$W_{эkv}^{mod}(s) = \frac{k_{ин}e^{-\tau_y s}}{(T_{ин}s + 1)(\sigma_{ин}s + 1)(T_{зд1}s + 1)}. \quad (12)$$

В результате полная модель при обработке задания корректирующим регулятором целиком компенсирует сигнал главной обратной связи за-

мкнутой системы. При этом замкнутая система превращается в разомкнуто-замкнутую: замкнутую по промежуточной регулируемой величине на выходе опережающего участка и разомкнутую по основной регулируемой величине. Это позволяет на корректирующий регулятор возложить функцию компенсатора той части передаточной функции полной модели (12), которая не содержит запаздывания:

$$W_{\text{КР}}^{\text{opt}}(s) = W_{\text{р2}}^{\text{opt}}(s) = \frac{1}{W_{\text{ЭКВ}}^{\text{o}}(s)}. \quad (13)$$

Для физической реализации корректирующего регулятора передаточную функцию (13) умножаем на заданную передаточную функцию

$$W_{\text{зд}}^{\text{o}}(s) = \frac{1}{(T_{\text{зд2}}s + 1)^3}, \quad (14)$$

где $T_{\text{зд2}} = \gamma_2 \tau_y = 0,146 \cdot 1,95 = 0,285$ мин, так как за целое в данном случае принята величина условного запаздывания τ_y [13].

С учетом (12), (13) и (14) передаточная функция корректирующего регулятора примет вид

$$W_{\text{р2}}^{\text{opt}}(s) = \frac{(T_{\text{ин}}s + 1)(\sigma_{\text{ин}}s + 1)(T_{\text{зд1}}s + 1)}{k_{\text{ин}}(T_{\text{зд2}}s + 1)^3}. \quad (15)$$

Для существенного улучшения качества отработки внешнего возмущения второй выход полной эквивалентной модели объекта с минусом подключаем к входу дополнительного элемента сравнения (ЭС), на второй вход которого подаем сигнал основной регулируемой величины, а выход ЭС подаем на вход устройства компенсации (УК) внешнего возмущения. При этом выход УК с минусом подаем на вход корректирующего регулятора, а УК реализуем в виде реального дифференциатора с передаточной функцией

$$W_{\text{УК}}^{f_2}(s) = \frac{k_{\text{д}}T_{\text{д}}s}{T_{\text{д}}s + 1}, \quad (16)$$

где $k_{\text{д}}$ – коэффициент передачи дифференциатора инвариантности; $T_{\text{д}}$ – время дифференцирования, мин.

Структура передаточной функции устройства компенсации внешнего возмущения получена следующим образом. Так как при отработке скачка задания корректирующего регулятора структурная схема инвариантной САР (рис. 1б) становится разомкнуто-замкнутой, то передаточная функция основной регулируемой величины примет вид

$$W_{y, x_{\text{зд2}}}(s) = W_{\text{зд2}}(s) = \frac{e^{-\tau_y s}}{(T_{\text{зд2}}s + 1)^3}. \quad (17)$$

С учетом передаточной функции (17) условие инвариантности основной регулируемой величины при отработке скачка внешнего возмущения будет соответствовать равенству

$$W_{\text{УК}}^{f_2}(s)W_{\text{ЗЛ2}}(s) = 1. \quad (18)$$

Если в одном канале со звеном с запаздыванием последовательно включено инерционное звено первого порядка с намного большей постоянной времени, то звено с запаздыванием приближенно можно заменить инерционным звеном первого порядка, а так как на начальном участке переходная характеристика звена с большей инерционностью напоминает интегрирующее звено, то передаточную функцию инерционного звена можно заменить на идеальное интегрирующее звено [11]. С учетом этих факторов, возведя знаменатель передаточной функции (17) в куб и ограничившись первой и второй производной, заданную передаточную функцию $W_{\text{ЗЛ2}}(s)$ можно представить в виде реального интегрирующего звена

$$W_{\text{ЗЛ2}}(s) = \frac{1}{\tau_y s (3T_{\text{ЗЛ2}}s + 1)}, \quad (19)$$

где $T_{\text{ЗЛ2}} = \gamma_2 \tau_y$ согласно (14).

Подставив (19) в (18), находим передаточную функцию устройства компенсации внешнего возмущения

$$W_{\text{УК}}^{f_2}(s) = \frac{1}{W_{\text{ЗЛ2}}(s)} = \tau_y s (3T_{\text{ЗЛ2}}s + 1). \quad (20)$$

Для физической реализуемости передаточную функцию (20) умножим на передаточную функцию инерционного звена второго порядка

$$W_{\text{УК}}^{f_2}(s) = \frac{1}{(T_{\text{ЗЛ2}}s + 1)^2} \quad (21)$$

и получим приближенную передаточную функцию устройства компенсации

$$W_{\text{УК}}^{f_2}(s) = \frac{\tau_y s}{T_{\text{ЗЛ3}}s + 1} \frac{3T_{\text{ЗЛ2}}s + 1}{T_{\text{ЗЛ3}}s + 1}. \quad (22)$$

Приняв $T_{\text{ЗЛ3}} = 3T_{\text{ЗЛ2}}$, окончательно получим с учетом (16) упрощенную передаточную функцию устройства компенсации эквивалентного внешнего возмущения в виде передаточной функции реального дифференциатора

$$W_{\text{УК}}^{f_2}(s) = \frac{\tau_y s}{3T_{\text{ЗЛ2}}s + 1} = \frac{k_d T_d s}{T_d s + 1}, \quad (23)$$

где $T_d = 3T_{\text{ЗЛ2}} = 3\gamma_2 \tau_y$; $k_d = \frac{\tau_y}{3T_{\text{ЗЛ2}}} = \frac{\tau_y}{3\gamma_2 \tau_y} = \frac{1}{3\gamma_2}$.

Переходные процессы типовой и инвариантной КСАР при обработке основных воздействий

Графики переходных процессов типовой и инвариантной КСАР при основных воздействиях приведены на рис. 2, где $\Delta y/y$ – относительное значение основной регулируемой величины.

При обработке скачка задания (рис. 2а) время регулирования ИКСАР (пунктирная линия) в 3,7 раза меньше, чем ТКСАР (сплошная линия). При этом максимальная величина перерегулирования ТКСАР составляет 12,5 %, а у ИКСАР она отсутствует. При обработке внутреннего возмущения (рис. 2б) максимальная динамическая ошибка регулирования ИКСАР в 3,6 раза меньше, чем у ТКСАР. Причем время регулирования уменьшается в 1,6 раза, а площадь модуля ошибки регулирования сокращается в 3,2 раза. При обработке внешнего возмущения (рис. 2с) быстродействие ИКСАР повысилось в 2,1 раза по сравнению с ТКСАР, а площадь модуля ошибки регулирования уменьшилась в 1,8 раза.

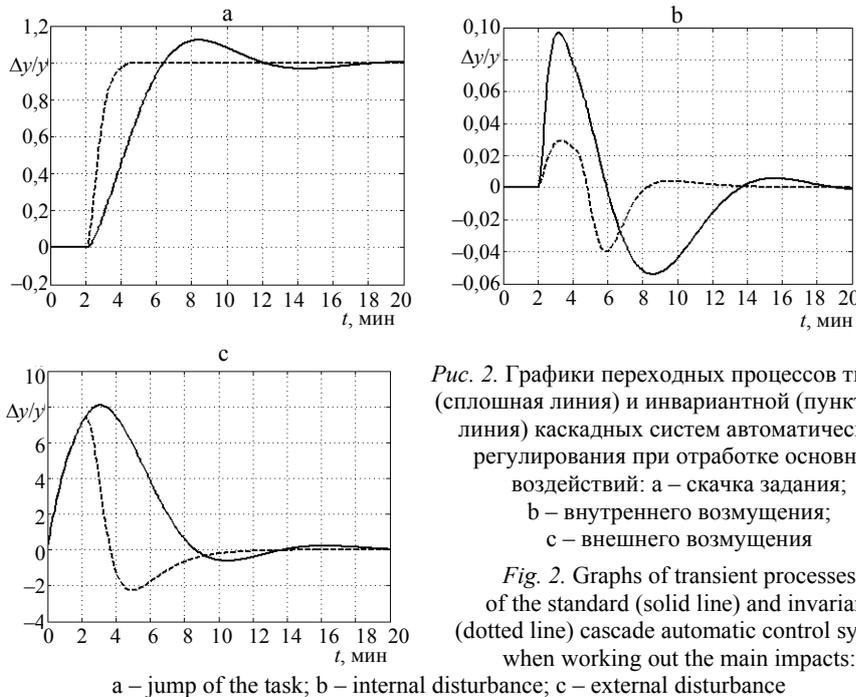


Рис. 2. Графики переходных процессов типовой (сплошная линия) и инвариантной (пунктирная линия) каскадных систем автоматического регулирования при обработке основных воздействий: а – скачка задания; б – внутреннего возмущения; с – внешнего возмущения

Fig. 2. Graphs of transient processes of the standard (solid line) and invariant (dotted line) cascade automatic control system when working out the main impacts:

a – jump of the task; b – internal disturbance; c – external disturbance

Докажем, что компенсатор динамики модели эквивалентного объекта регулирования ИКСАР, охваченный положительной обратной связью внутренней модели, представляет собой в модифицированном виде классический оптимальный регулятор с передаточной функцией вида [13]

$$W_p^{opt}(s) = W_\phi(s) \frac{1}{1 - W_{зд}(s)}, \quad (24)$$

где $W_\phi(s)$ – передаточная функция фильтра; $W_{зд}(s)$ – заданная передаточная функция САР при обработке скачка задания.

Здесь передаточная функция фильтра представляет собой последовательное соединение обратной передаточной функции эквивалентного объекта (11) и заданной передаточной функции САР при обработке скачка задания:

$$W_{\phi}(s) = \frac{W_{зд}(s)}{W_{экр}(s)}. \quad (25)$$

Запишем с учетом (11) и (25) передаточную функцию корректирующего регулятора, охваченного положительной обратной связью (рис. 1b):

$$W_p(s) = \frac{W_{\phi}(s)}{1 - W_{\phi}(s)W_{экр}(s)}. \quad (26)$$

Подставив передаточную функцию фильтра (25) в (26), окончательно получим $W_p(s) = W_{\phi}(s) \frac{1}{1 - \frac{W_{зд}(s)}{W_{экр}(s)}W_{экр}(s)} = \frac{W_{\phi}(s)}{1 - W_{зд}(s)}$, которая адекватна

передаточной функции оптимального регулятора (24).

ВЫВОДЫ

1. Вместо традиционных методов параметрической оптимизации типовых каскадных систем автоматического регулирования для повышения быстродействия и точности при основных воздействиях предложено использовать принцип динамической компенсации, в соответствии с которым в результате решения задачи синтеза регуляторов определяют как их структуру, так и параметры динамической настройки. При этом задача синтеза регуляторов разделена на два этапа: нахождение передаточных функций обоих контуров каскадной системы и расчет параметров динамической настройки регуляторов с использованием внутренней модели для реализации корректирующего регулятора.

2. Структура заданных передаточных функций контуров каскадных систем автоматического регулирования должна полностью соответствовать структуре передаточных функций объектов или эквивалентных объектов регулирования, выполняя функции критериев оптимальной отработки задания. При этом для объектов с запаздыванием необходимо запаздывание заданий передаточной функции критерия оптимальности принимать равным запаздыванию объекта по каналу регулирующего воздействия.

3. Вместо классической формы передаточной функции оптимального корректирующего регулятора предложено использовать модифицированный вариант, представляющий собой компенсатор динамики объекта, учитывающий динамику внутреннего контура, охваченный положительной обратной связью внутренней модели эквивалентного объекта, который используется также для выделения эквивалентного внешнего возмущения. Это позволяет упростить техническую реализацию инвариантной каскадной системы автоматического регулирования и устройство компенсации

эквивалентного внешнего возмущения, а также расчет численных значений параметров системы. При этом инвариантная каскадная система автоматического регулирования имеет всего два расчетных параметра оптимальной динамической настройки, численные значения которых определяют как произведение одного из ряда чисел пропорции золотого сечения, принимая за целые во внутреннем контуре постоянную времени расчетной передаточной функции опережающего участка, а во внешнем – условное запаздывание по каналу регулирующего воздействия с учетом максимально допустимой величины регулирующего воздействия.

4. Результаты моделирования переходных процессов показали, что инвариантная каскадная система автоматического регулирования с внутренней моделью позволяет существенно повысить быстродействие и точность при обработке основных воздействий по сравнению с типовой и может быть рекомендована для широкого внедрения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Клюев, А. С. Наладка систем автоматического регулирования паровых котлов / А. С. Клюев, А. Т. Лебедев, С. И. Новоселов. М.: Энергоатомиздат, 1985. 280 с.
2. Стефани, Е. П. Основы расчета настройки регуляторов теплоэнергетических процессов / Е. П. Стефани. 2-е изд. перераб. М.: Энергия, 1972. 376 с.
3. Солодовников, В. В. Расчет и проектирование аналитических самонастраивающихся систем с эталонными моделями / В. В. Солодовников, Л. С. Шрамко. М.: Машиностроение, 1972. 270 с.
4. Ротач, В. Я. Теория автоматического управления / В. Я. Ротач. М.: МЭИ, 2004. 396 с.
5. Широкий, Д. К. Расчет настроек промышленных систем регулирования / Д. К. Широкий, О. Д. Куриленко. Киев: Техника, 1972. 232 с.
6. Рубашкин, А. С. Методы определения параметров настройки регуляторов топлива прямоточных котлов / А. С. Рубашкин. М. – Л.: Энергия, 1964. 112 с.
7. Aidan, O'Dwyer. Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules / O'Dwyer Aidan. 3rd ed. Dublin: Institute of Technology; Ireland, Imperial College Press, 2006. 599 p. <https://doi.org/10.1142/p424>.
8. Кулаков, Г. Т. Инженерные экспресс-методы расчета промышленных систем регулирования: справ. пособие / Г. Т. Кулаков. Минск: Выш. шк., 1984. 192 с.
9. Кулаков, Г. Т. Теоретические основы экспресс-методов структурно-параметрической оптимизации систем автоматического управления для повышения эффективности использования теплоэлектростанций в переменных режимах: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.13.07 и 05.14.14. Киев: КПИ, 1992. 36 с.
10. Кузьмицкий, И. Ф. Теория автоматического управления / И. Ф. Кузьмицкий, Г. Т. Кулаков. Минск: БГТУ, 2010. 574 с.
11. Фрер, Ф. Введение в электронную технику регулирования / Ф. Фрер, Ф. Ортгенбургер; пер. с нем. М.: Энергия, 1973. 192 с.
12. Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами / Г. Т. Кулаков [и др.]; под ред. Г. Т. Кулакова. Минск: Выш. шк., 2017. 238 с.
13. Кулаков, Г. Т. Теория автоматического управления / Г. Т. Кулаков. Минск: БНТУ, 2017. 135 с.
14. Хутский, Г. И. Система автоматического регулирования температуры перегретого пара с устройством коррекции параметров динамической настройки / Г. И. Хутский, Г. Т. Кулаков // Теплоэнергетика. 1968. № 3. С. 64–67.
15. 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. Артёмов // 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>.

16. 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. 539–551. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-6-539-551>.

Поступила 08.06.2022 Подписана в печать 12.09.2022 Опубликовано онлайн 30.11.2022

REFERENCES

- Klyuev A. S., Lebedev A. T., Novoselov S. I. (1985) *Adjustment of Automatic Control Systems of Steam Boilers*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 280 (in Russian).
- Stefani E. P. (1972) *Fundamentals of Calculating the Settings of Controllers of Heat and Power Processes*. 2nd ed. Moscow, Energiya Publ. 376 (in Russian).
- Solodovnikov V. V., Shramko L. S. (1972) *Calculation and Design of Analytical Self-Adjusting Systems with Reference Models*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 270 (in Russian).
- Rotach V. Ya. (2004) *Theory of Automatic Control*. Moscow, MEI. 396 (in Russian).
- Shirokii D. K., Kurilenko O. D. (1972) *Calculation of Settings of Industrial Control Systems*. Kyiv, Tekhnika Publ. 232 (in Russian).
- Rubashkin A. S. (1964) *Methods for Determining the Settings of Fuel Controllers of Direct-Flow Boilers*. Moscow – Leningrad, Energiya Publ. 112 (in Russian).
- O'Dwyer A. (2006) *Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules*. 3rd ed. Dublin: Institute of Technology; Ireland, Imperial College Press. 599. <https://doi.org/10.1142/p424>.
- Kulakov G. T. (1984) *Engineering Express Methods of Calculation of Industrial Control Systems: Reference Manual*. Minsk, Vysheishaya Shkola Publ. 192 (in Russian).
- Kulakov G. T. (1992) *Theoretical Foundations of Express Methods of Structural-Parametric Optimization of Automatic Control Systems to Improve the Efficiency of the Use of Thermal Power Plants in Variable Modes*. Kiev, KPI. 36 (in Russian).
- Kuz'mitskii I. F., Kulakov G. T. (2010) *Theory of Automatic Control*. Minsk, BSTU. 574 (in Russian).
- Fröhr F., Orttensburger F. (1970) *Einführung in die Elektronische Regelungstechnik*. Berlin – München, Siemens A.G. (in German).
- Kulakov G. T., Kulakov A. T., Kukhorenko A. N., Kravchenko V. V. (2017) *Theory of Automatic Control of Thermal Power Processes*. Minsk, Vysheishaya Shkola Publ. 238 (in Russian).
- Kulakov G. T., Kulakov A. T., Kukhorenko A. N., Kravchenko V. V. (2017) *The Theory of Automatic Control*. Minsk, BNTU. 135 (in Russian).
- Khutskii G. I., Kulakov G. T. (1968) The System of Automatic Regulation of the Temperature of Superheated Steam with a Device for Correcting the Parameters of Dynamic Tuning. *Teploenergetika = Thermal Engineering*, (3), 64–67 (in Russian).
- 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).
- 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).

Received: 8 June 2022 Accepted: 12 September 2022 Published online: 30 November 2022