

# ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫМИ ПРОЦЕССАМИ ПАРОНАГРЕВАТЕЛЯ

**Ядрышников Олег Дмитриевич**

Старший преподаватель, соискатель,  
Новосибирский государственный технический  
университет (НГТУ)  
yadryshnikov@corp.nstu.ru

## MAIN PROBLEMS OF STEAM HEATER THERMAL PROCESS CONTROL

**О. Yadryshnikov**

*Summary.* The problems faced by designers of control systems for a heat engineering object such as a steam heater are discussed in this article. The peculiarity of this class of objects is the change of its parameters during operation and the presence of a delay, which makes it difficult to choose a regulator and ensure the required quality of the system. The paper proposes a plan for the formation of knowledge about the object, which includes splitting the set of parameters of the object into groups in order to further synthesize the regulator for each specific group. Two possible variants of such splitting of parameters are distinguished: the simplest and analytical. Using the example of a steam heater, the parameters of which vary depending on temperature, the division into three main groups of parameters is shown and the corresponding object models are presented in the form of transfer functions of various orders.

*Keywords:* thermal processes, steam heater, control problems, robust control, adaptive control.

*Аннотация.* В статье обсуждаются проблемы, с которыми сталкивается проектировщик систем управления теплотехническим объектом типа паронагревателя. Особенностью данного класса объектов является изменение его параметров во время функционирования и наличие запаздывания, что затрудняет выбор регулятора и обеспечение требуемого качества работы системы. В работе предлагается план формирования знаний об объекте, который включает в себя разбиения множества параметров объекта на группы с целью дальнейшего синтеза регулятора для каждой конкретной группы. Выделяются два возможных варианта такого разбиения параметров: простейший и аналитический. На примере паронагревателя, параметры которого меняются в зависимости от температуры, показано разбиение на три основных группы параметров и представлены соответствующие им модели объекта в виде передаточных функций различного порядка.

*Ключевые слова:* тепловые процессы, паронагреватель, проблемы управления, робастное управление, адаптивное управление.

## Введение

Управление тепловыми процессами паронагревателя является актуальной и трудоемкой задачей, так как такие объекты относятся к устройствам, обеспечивающим комфортные условия проживания людей в областях с холодным климатом. Особенностью паронагревателя является наличие запаздывания в канале управления. Следует отметить, что большинство технических объектов имеет задержку, и если ее не учитывать, то это, как правило, приводит к значительному отличию практических результатов от полученных теоретически или при моделировании.

Усложняет задачу управления объектами с запаздыванием наличие неопределенности или изменение параметров объекта во время их функционирования [1, 5, 7]. Существенное изменение этих параметров может привести к нарушению работы системы с рассчитанным регулятором, а также к нештатным ситуациям на предприятии.

При проектировании регуляторов для подобного типа устройств необходимо применять методы робастного управления [2–6], обеспечивающие успешное управление объектом при всех возможных вариантах изменения его параметров. Робастный регулятор дол-

жен обеспечить устойчивую работу системы с приемлемым качеством при условии, что параметры модели объекта изменяются, или известны недостаточно точно. Однако робастный подход не позволяет сформировать универсальный регулятор, который обеспечивал бы решение поставленной задачи при любых возможных сочетаниях параметров модели объекта. В отличие от робастного управления адаптивные регуляторы [7–8] могут изменять свои параметры в зависимости от текущих параметров модели объекта. Класс задач, которые могут быть решены таким путем, существенно шире [8–12], а результаты могут быть значительно лучше. Основная трудность реализации адаптивных систем состоит, во-первых, в определении текущей модели объекта, а во-вторых, в расчёте для этой текущей модели наилучшего (или приемлемого) регулятора.

Упрощение решения подобной задачи может быть достигнуто путем разбиения возможных математических моделей объекта на счетное множество с последующим использованием робастного управления в пределах этого множества. В этом случае частная подзадача робастного управления решается значительно проще по сравнению с попыткой обеспечения требуемых свойств системы с помощью единственного робастного регулятора. Детальная идентификация всех параметров объекта в этом случае уже не требуется, поскольку достаточно обеспечить лишь распознавание характерных признаков модели объекта для отнесения ее к одному из предварительно выделенных классов.

Перспективным решением такой задачи является использование численных методов оптимизации [13–14]. В данной работе исследуется этот подход для формирования регулятора системы управления температурой пара паронагревателя в ситуации, когда параметры изменяются в зависимости от режима работы теплоэнергетической установки.

### Описание объекта управления

В качестве объекта управления рассмотрим систему автоматического регулирования (САР) тепловыми процессами паронагревателя, в которой ключевым параметром регулирования является температура пара на выходе из энергетического котла или из цилиндра высокого давления турбины [15]. Регулирование температуры пара относится к важнейшим задачам автоматизации теплоэнергетических процессов, поскольку ее решение обеспечивает более долгий срок эффективной эксплуатации оборудования и увеличивает КПД теплоэнергетической установки. В зависимости от типа котла, конструктивных особенностей поверхностей нагрева, способа регулирования температуры и технологических режимов работы применяются различ-

ные схемы построения автоматических регуляторов температуры. К ним относятся каскадные (двух-, трех- и более контуров регулирования), схемы с опережающим скоростным сигналом (одно-, двух-, со сложным дифференциатором) и их гибриды. Общей особенностью этих схем является значительное преимущество при использовании ПИД закона регулирования. Вместе с тем, указанные САР температуры пара с ПИД регуляторами более чувствительны к отклонению от оптимума их настройки и поэтому предъявляют более жесткие требования к правильности выбора этих параметров. Высокая чувствительность настроек вызвана возможными изменениями динамики объекта регулирования.

Вариации параметров объекта регулирования (пароперегревателя) в широких пределах при изменении нагрузки (расход пара на турбину) котла (в динамике) объясняются изменением тепловосприятия конвективной и радиационной частей нагрева металла пароперегревателя. Кроме того, изменения параметров объекта возможны и в статике при длительной эксплуатации вследствие загрязнения поверхностей нагрева, изменения свойств металла со временем. Регулятор температуры пара должен поддерживать температуру с максимально возможной точностью во всех возможных режимах работы энергетического оборудования с указанными особенностями объекта регулирования.

Полагаем, что в общем случае математическая модель паронагревателя имеет вид

$$W_O(s) = \frac{k}{(T_1s + 1)(T_2s + 1) \dots (T_ns + 1)} \exp\{-s\tau\}, \quad (1)$$

где  $k$  — коэффициент усиления;  $T_i$  — постоянные времени,  $i = \overline{1, n}$ ;  $n$  — порядок модели;  $\tau$  — постоянная времени звена запаздывания. Параметры модели объекта известны не точно и могут произвольным образом изменяться в некоторых ограниченных диапазонах:  $0 \leq k_{\min} \leq k \leq k_{\max}$ ,  $0 \leq T_{i\min} \leq T_i \leq T_{i\max}$ ,  $0 \leq \tau_{i\min} \leq \tau_i \leq \tau_{i\max}$ . Темп изменения этих параметров относительно медленный по сравнению с темпом переходных процессов в объекте.

### Постановка задачи управления

Цель управления заключается в обеспечении на выходе системы предписанного значения температуры, т.е. выходной сигнал  $Y(t)$  должен с требуемой точностью соответствовать заданию  $V(t)$ . Отметим, что в теплоэнергетических установках возмущения часто носят случайный и недетерминированный характер, а также не всегда доступны для контроля. В случае САР температуры пара такие возмущения возникают со стороны топочной камеры: аэродинамика потоков сгораемого

газа, организация сжигания топлива и его качественный состав. В этой ситуации выходной сигнал содержит возмущение и может быть представлен в виде

$$Y(t) = X(t) + H(t), \quad (2)$$

где  $H(t)$  — неизвестное возмущение,  $X(t)$  — управляемая компонента выходного сигнала, которую запишем в операторной форме

$$X(s) = W_O(s)U(s), \quad (3)$$

где  $W_O(s)$  — передаточная функция объекта (1);  $U(s)$  — управление.

Разработка устройства, формирующего сигнал управления  $U(t)$  на основе задания  $V(t)$  и выходного сигнала  $Y(t)$ , является задачей синтеза регулятора. Как правило, модель регулятора представляется в виде линейной передаточной функции  $W_R(s)$ , на вход которой подается разница между предписанным сигналом и выходным сигналом, называемая ошибкой управления

$$E(t) = V(t) - Y(t). \quad (4)$$

Если параметры передаточной функции (1) изменяются во времени, то робастный регулятор остается неизменным, тогда как адаптивный регулятор должен изменяться в зависимости от этих изменений, т.е.

$$W_R(s) = W_R(s, n, k, T, \tau). \quad (5)$$

Кусочно-робастный регулятор в нашей концепции — это регулятор, математическая модель которого зависит от одного параметра — номера подмножества, к которому отнесено текущее состояние модели объекта. Наиболее распространенным является типовой ПИД регулятор

$$W_R(s) = k_p + k_i / s + k_d s, \quad (6)$$

где  $k_p, k_i, k_d$  — коэффициенты его соответствующих составляющих. В случае кусочно-робастного регулятора эти коэффициенты могут быть фиксированными для наперед заданного подмножества параметров объекта.

### Разбиение параметров объекта на подмножества

В данном разделе рассмотрим один из возможных вариантов разбиения диапазона значений параметров объекта управления на подмножества, что необходимо для определения коэффициентов робастного регулятора для каждой подобласти. Один из простейших вариантов разбиения заключается в разбиении

области допустимых значений каждого из изменяющихся параметров. Например, если в (1)  $n$  — целое число в диапазоне от 3 до 5, то автоматически получаем разбиение на три подмножества по этому параметру. Непрерывно изменяющиеся параметры  $T, k$  и  $\tau$  могут быть разбиты на произвольное количество интервалов. Для простоты сначала можно рекомендовать разбиение интервалов на два при отсутствии весомых оснований для другого выбора. Если в результате решения задачи окажется, что такого разбиения недостаточно, то следует применить более мелкое дробление интервалов по одному или нескольким из выбранных параметров.

Более точный подход заключается в отыскании закономерностей совместного влияния параметров на качество системы и, соответственно, на выбор регулятора. С этой целью может быть использован аналитический анализ влияния этих параметров или объединение получаемых регуляторов по результатам их численной оптимизации. Заметим, что аналитический метод в общем виде разработать затруднительно, а объединение по результатам оптимизации может быть достаточно просто формализовано.

Для выполнения разбиения параметров объекта управления на группы можно предложить следующие поэтапные действия.

1. Если интервал содержит небольшое количество параметров, то применяется простейшее дробления на подынтервалы.
2. Для обработки оставшихся параметров после простого дробления используется аналитический метод разбиения.
3. Пример разбиения параметров объекта при отсутствии запаздывания.

Будем полагать, что объект (1) имеет первый порядок и отсутствует запаздывание, т.е.  $n = 1, \tau = 0$ . Для такого объекта увеличение постоянной времени  $T$  в  $m$  раз приводит к такому же смещению высокочастотной части амплитудно-частотной характеристики, как уменьшение его коэффициента  $k$  в  $m$  раз. В этой ситуации можно всю область допустимых значений  $T$  и  $k$  разбить по значениям произведения  $G = Tk$  на определенное количество интервалов (желательно, равных в логарифмическом масштабе). Обозначим через  $G_1$  минимальное значение произведения ( $G_1 = k_{\min} T_{\min}$ ), а через  $G_4$  — максимальное значение ( $G_4 = k_{\max} T_{\max}$ ) и разобьем область параметров на три интервала. В этом случае целесообразно выбрать два внутренних граничных значения интервала  $G_2$  и  $G_3$ , удовлетворяющих условию

$$G_2 / G_1 = G_3 / G_2 = G_4 / G_3. \quad (7)$$

Аналогичный результат получается, если как интервал допустимых значений коэффициентов, так и интервал допустимых значений постоянных времени разбить на два ( $k_{min}, k_{max}$  и  $T_{min}, T_{max}$ ). Это дает четыре области, соответствующие четырем разным парам сочетаний значений регуляторов:  $Q_1 = \{k_{min}, T_{min}\}$ ,  $Q_2 = \{k_{min}, T_{max}\}$ ,  $Q_3 = \{k_{max}, T_{min}\}$ ,  $Q_4 = \{k_{max}, T_{max}\}$ .

Пример разбиения на подмножества параметров паронагревателя

Рассмотрим теперь модель паронагревателя (1). В зависимости от температуры пара порядок объекта (1) изменяется от 3 до 5, при этом постоянная времени  $T$  изменяется в диапазоне от 63,5 до 68,5, запаздывание  $t$

$$W_{O1}(s) = \frac{2,8}{(63,5s + 1)(64s + 1)(64,5s + 1)} \exp\{-s16\}. \quad (8)$$

Для режима  $Q_2$  получим следующую передаточную функцию объекта:

$$W_{O2}(s) = \frac{3,2}{(66,5s + 1)(67s + 1)(67,5s + 1)(67s + 1)} \exp\{-s17\}, \quad (9)$$

а для  $Q_3$  имеем

$$W_{O3}(s) = \frac{3,4}{(67,5s + 1)(68s + 1)(68,5s + 1)(67,5s + 1)(68,5s + 1)} \exp\{-s19\}. \quad (10)$$

Следующим этапом является расчет регулятора для каждого из вариантов моделей (8), (9) или (10).

Дальнейшие исследования предполагают идентификацию параметров объекта (отнесение к одной из трех выделенных групп) и переключение на один из рассчитанных регуляторов. Таким образом, может быть сформирован кусочно-робастный регулятор, обеспечивающий требуемое качество работы системы при изменении параметров объекта.

Заключение

В работе рассмотрен класс объектов с переменными параметрами, которые изменяются относительно медленно в ограниченном диапазоне. С целью упрощения последующего расчета робастного регулятора предложено множество параметров объекта разделить на отдельные подгруппы, соответствующие характерным режимам работы. Такое разделение рекомендуется проводить в два этапа: сначала применяется простейшее дробления на подынтервалы, а затем используется аналитический метод обработки параметров.

Разделение на группы показано на примере паронагревателя, параметры которого меняются в зависимости от температуры. В результате для него получены три модели в виде передаточных функций различного порядка, соответствующих выделенным группам параметров объекта. Это позволит в дальнейшем осуществлять синтез робастных регуляторов для каждой области и обеспечить эффективное управление тепловыми процессами паронагревателя.

ЛИТЕРАТУРА

- Zhmud V.A., Yadrishnikov O.D., Roth H. Comparison of tabular and numerical methods of designing regulators for control of objects with delay // Journal of Physics: Conference Series — 2019. — Vol. 1210. — Art. 012169 (7 p.).
- Gogol I.V., Zhukov I.V., Remizova O.A., Fokin A.L. Robust control objects with delayed admission by the extended model // Studies in Systems, Decision and Control. 2022. T. 418. C. 189–197.
- Ядрышников О.Д. Сравнение наиболее цитируемых методов проектирования регуляторов для управления объектами с запаздыванием // Автоматика и программная инженерия — 2016. — № 2 (16). — С. 62–68.
- Гоголь И.В., Ремизова О.А., Сыровкашин В.В., Фокин А.Л. Синтез робастных регуляторов для объекта с запаздыванием с использованием традиционных законов регулирования // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2019. Т. 62. № 3. С. 199–207.
- Zhmud V.A., Reva I.L. and Dimitrov L.V. Design of robust systems by means of the numerical optimization with harmonic changing of the model parameters // В сборнике: Journal of Physics: Conference Series. 2017. С. 012185.
- Frantsuzova G.A., Vostrikov A.S. PID controller design for a second-order nonlinear plant // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. — 2019. — Vol. 55, iss. 4. — P. 364–370
- Жмудь В.А., Полищук А.В., Заворин А.Н., Ядрышников О.Д. Адаптивная система для регулирования и стабилизации физических величин // Патент на изобретение RU 2522899 С1, 20.07.2014. Заявка № 2012152697/08 от 06.12.2012.
- Khalid A., Zeb K., Haider A. Conventional PID, adaptive PID, and sliding mode controllers design for aircraft pitch control // В сборнике: 2019 International Conference on Engineering and Emerging Technologies, ICEET 2019. 2019. С. 8711871.
- Ермолаев А.И., Плехов А.С., Стрелков В.Ф., Титов Д.Ю. Адаптивная система управления виброзащитными гидропорамы с магнитореологическим трансформатором // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2017. № 3 (118). С. 71–80.

10. Колбасин А.М., Марсов В.И., Айсина Л.Р., Селезнев В.С. Адаптивная система управления дозаторами непрерывного действия на основе информации о текущем расходе сыпучего материала // Автоматизация и управление в технических системах. 2015. № 4–1 (16). С. 3.
11. Абакумов А.М., Степашкин И.П. Адаптивная система автоматического управления технологическим процессом охлаждения природного газа // Проблемы и перспективы студенческой науки. 2018. № 1 (3). С. 57–59.
12. Zhmud V.A., Pyakillya B.I., Semibalamut V.M., Trubin M.V. and Yadrishnikov O.D. The two methods of reverse overshoot suppression in automation systems // Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering — 2017. — Vol. 9, № 2–2. — P. 153–157.
13. Воевода А.А., Жмудь В.А., Заворин А.Н., Ядрышников О.Д. Сравнительный анализ методов оптимизации регуляторов с использованием программных средств VISSIM и MATLAB. // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. № 9. С. 37–43.
14. Жмудь В.А., Ядрышников О.Д. Численная оптимизация ПИД-регуляторов с использованием детектора правильности движения в целевой функции // Автоматика и программная инженерия. 2013. № 1 (3). С. 24–29.
15. Динамические характеристики энергоблока 180МВт. Котлоагрегат ТПЕ-214 (Еп-670–13,8–545КТ). Турбина паровая Т-180/210–130. ОАО «НовосибирскЭнерго», Новосибирск, 2001.

© Ядрышников Олег Дмитриевич (yadrishnikov@corp.nstu.ru).

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»



Новосибирский государственный технический университет