

С.В. Быстрова^{1*}, Б.Г. Джужбаева¹, Т.Б. Акишев¹, А.Б. Кыдырбаева¹, В.И. Чердаков¹

¹Екибастузский инженерно-технический институт имени академика К.Сатпаева,
г. Экибастуз, Казахстан

*e-mail: bystrova-s-v@eiti.edu.kz

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РЕГУЛИРОВАНИЯ ДАВЛЕНИЯ ПАРА В КОТЛОАГРЕГАТЕ

Аннотация

В работе исследуются процессы регулирования давления пара в котлоагрегате с целью повышения эффективности и надежности его работы. Основная цель исследования - разработка математической модели, позволяющей точно описывать динамические процессы в системе и определять оптимальные параметры работы регулятора давления. К задачам исследования относятся разработка модели динамических процессов, анализ существующих методов регулирования и подбор оптимальных параметров для минимизации отклонений давления. Методология исследования включает моделирование процессов настройки ПИ-регулятора (Пропорционально-интегральный регулятор) инженерными методами, сравнительный анализ и оценку результатов, полученных при синтезе САУ (Системы автоматического регулирования) с ПИ-регулятором. Проведя настройку и оценив качественные характеристики рассматриваемого регулятора, был сделан вывод о влиянии этого регулятора на эффективность системы автоматического регулирования давления в барабане. С учетом полученных численных значений критериев качества можно сделать вывод о том, что выбранные настроечные коэффициенты и структура ПИ-регулятора гарантируют необходимые свойства системы регулирования давления и соответствуют всем требованиям, предъявляемым к промышленным регуляторам. Данные результаты являются важными для повышения эффективности эксплуатации тепловых электростанций и сокращения их энергетических и эксплуатационных затрат, что имеет значение для энергетической области и автоматизированных систем управления.

Ключевые слова: математическое моделирование, автоматическое регулирование, автоматизированные системы управления, ПИ-регулятор, методы настройки, тепловые электростанции.

С.В. Быстрова^{1*}, Б.Г. Джужбаева¹, Т.Б. Акишев¹, А.Б. Кыдырбаева¹, В.И. Чердаков¹

¹Қ.И. Сәтбаев атындағы Екібастұз инженерлік-техникалық институты, Екібастұз қ., Қазақстан

ҚАЗАНДЫҚ ҚОНДЫРҒЫСЫНДАҒЫ БУ ҚЫСЫМЫН РЕТТЕУ ПРОЦЕСІН МОДЕЛЬДЕУ

Аңдатпа

Бұл зерттеуде қазандықтың тиімділігі мен сенімділігін арттыру мақсатында бу қысымын реттеу үрдістері қарастырылған. Зерттеудің басты мақсаты – жүйедегі динамикалық процестерді дәл сипаттайтын және қысым реттегішінің оңтайлы параметрлерін анықтауға мүмкіндік беретін математикалық модель құру. Осы мақсатқа жету үшін келесі міндеттер қойылды: динамикалық процестердің моделін әзірлеу; қолданыстағы реттеу әдістерін талдау; қысымның ауытқуын азайтатын оңтайлы параметрлерді таңдау. Зерттеу барысында пропорционалды-интегралды (ПИ) реттегішті инженерлік әдістер арқылы теңшеу, модельдеу, сондай-ақ автоматты реттеу жүйесінің (АРЖ) синтезі нәтижелерін салыстырмалы талдау жүргізілді. Алынған нәтижелер негізінде қарастырылған реттегіштің сапалық сипаттамалары бағаланып, оның барабандағы қысымды автоматты реттеу жүйесіне әсері туралы қорытынды жасалды. Сапа критерийлерінің сандық көрсеткіштерін ескере отырып, тандалған реттеу коэффициенттері мен ПИ-реттегіш құрылымы қысымды реттеу жүйесінің қажетті сипаттамаларын қамтамасыз ететіні және өнеркәсіптік талаптарға сай келетіні анықталды. Бұл нәтижелер жылу электр станцияларының тиімділігін арттыруға, энергетикалық және пайдалану шығындарын азайтуға елеулі үлес қоса алады. Сонымен қатар, олар энергетикалық сектор мен автоматтандырылған басқару жүйелері үшін маңызды болып табылады.

Түйін сөздер: математикалық модельдеу, автоматты реттеу, автоматтандырылған басқару жүйелері, ПИ- реттегіш, баптау әдістері, жылу электр станциялары.

S.V. Bystrova^{1*}, B.G. Djuzbayeva¹, T.B. Akishev¹, A.B. Kydyrbayeva¹, V.I. Cherdakov¹

¹Ekibastuz Engineering and Technical Institute named after Academician K. Satpayev,
Ekibastuz, Kazakhstan

MODELING THE PROCESS OF STEAM PRESSURE CONTROL IN A BOILER UNIT

Abstract

The paper investigates the processes of steam pressure regulation in a boiler unit in order to increase the efficiency and reliability of its operation. The main purpose of the study is to develop a mathematical model that allows to describe the dynamic processes in the system accurately and determine optimal parameters of the pressure regulator. The objectives of the research include development of a model of dynamic processes, analysis of existing control methods and selection of optimal parameters to minimize pressure deviations. The research methodology includes modeling the processes of setting up a PI-controller (Proportional integral controller) by engineering methods, comparative analysis and evaluation of the results obtained during the synthesis of ACS (Automatic control systems) with a PI controller. After setting up and evaluating the qualitative characteristics of the regulator in question, it was concluded that this regulator had an effect on the effectiveness of automatic pressure control system in the drum. Taking into account the obtained numerical values of the quality criteria, it can be concluded that the selected tuning coefficients and the structure of the PI regulator guarantee the necessary properties of the pressure control system and meet all the requirements for industrial regulators. These results are important for improving the efficiency of operation of thermal power plants and reducing their energy and operating costs, which is important for energy sector and automated control systems.

Keywords: mathematical modeling, automatic regulation, automated control systems, PI-controller, tuning methods, thermal power plants.

Основные положения

В ходе исследования были разработаны и протестированы математическая модель и методы оптимизации для регулирования давления пара в котлоагрегате. Основная идея работы заключается в использовании численных методов для повышения точности и стабильности работы системы управления. Результаты показали, что оптимизация параметров регулятора приводит к значительному снижению отклонений давления, что повышает эффективность работы котлоагрегата и снижает энергозатраты. Выводы исследования подчеркивают важность адаптации современных технологий в области управления для повышения надежности и конкурентоспособности энергетических систем.

Введение

Эффективное и стабильное регулирование давления пара является важной задачей для обеспечения надежной и экономичной работы котлоагрегатов на тепловых электростанциях. Колебания давления пара могут приводить к снижению эффективности работы оборудования, увеличению энергозатрат и сокращению срока его службы. В связи с этим была исследована система регулирования давления пара с целью разработки методов и моделей, которые позволят повысить точность и надежность регулирования давления пара.

Цель данного исследования – создать математическую модель процессов регулирования давления пара в котлоагрегате и оптимизировать параметры системы управления, чтобы минимизировать отклонения и обеспечить стабильность работы агрегата. В рамках исследования были проверены следующие гипотезы:

1. Существующие регуляторы давления пара могут быть улучшены путем применения численных методов оптимизации.

2. Моделирование динамических процессов в котлоагрегате позволяет выявить ключевые параметры, влияющие на точность регулирования.

3. Оптимизация этих параметров приводит к повышению стабильности работы системы и снижению энергозатрат.

Данное исследование направлено на решение актуальной задачи повышения эффективности и надежности работы котлоагрегатов и автоматизированных систем управления ими, что имеет значение для развития энергетической отрасли.

Методология исследования

Для проведения исследований использовалась материально-техническая база филиала кафедры «Автоматизация и информационные системы» Екибастузского инженерно-технического института имени академика К. Сатпаева, расположенного на базе производственного предприятия ТОО «ЭГРЭС-1 имени Б. Нуржанова». В рамках исследования использовался типовой котлоагрегат, который распространен на современных тепловых электростанциях и соответствует стандартам промышленного оборудования. Это позволило обеспечить репрезентативность и практическую применимость результатов эксперимента.

Основной объект моделирования: типовой пылеугольный котлоагрегат, использующий угольную пыль в качестве топлива. В исследовании учитывались следующие процессы:

1. Подготовка топлива и сжигание угольной пыли.
2. Нагрев воды и преобразование ее в пар.
3. Регулирование давления пара в системе.

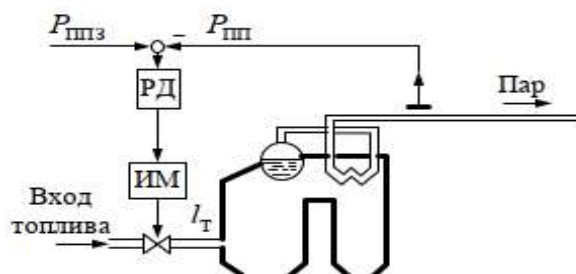
Таким образом, пылеугольный парогенератор осуществляет преобразование энергии, содержащейся в угольной пыли, в тепловую энергию, которая затем используется для производства пара и генерации электроэнергии [1].

Давление пара, вырабатываемого котлом, находится в прямой зависимости от расхода топлива, подаваемого для сжигания в топку. Чем больше расход топлива, тем более высокое давление пара можно поддерживать в котле при неизменной его паропроизводительности. И, наоборот, при постоянном давлении пара за счет изменения расхода топлива можно изменять паропроизводительность котла. Таким образом, регулирование давления пара сводится к регулированию подачи топлива в топку котла.

Для регулирования давления пара использовался замкнутый контур управления, включающий:

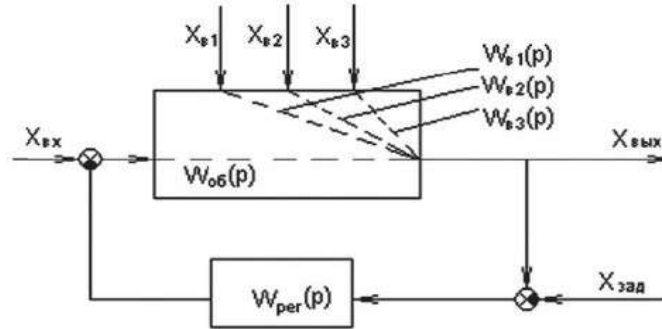
- Объект управления (топка и барабан котлоагрегата) с управляющим воздействием в виде расхода топлива и возмущением в виде расхода пара.
- Датчик давления пара.
- Пропорционально-интегральный регулятор (ПИ-регулятор).
- Исполнительный механизм и регулирующий орган [2].

Замкнутый контур управления давлением пара показан на рисунке 1.



*ИМ – Исполнительный механизм, РД – Регулятор давления,
 $P_{ПЗ}$ – Задание давления пара за барабаном, $P_{П}$ – Давление пара за барабаном,
 I_T – сигнал управления регулирующим органом
 Рисунок 1. Функциональная схема системы регулирования давлением пара*

В качестве исходных данных предлагается замкнутая одноконтурная система автоматического управления, структурная схема которой приведена на рисунке 2. Объект управления является одноканальным, передаточная функция по каналу известна.



$W_{об}(p)$ – Передаточная функция объекта по управляющему воздействию,

$W_{рег}(p)$ – Передаточная функция регулятора,

$W_{в1}(p), W_{в2}(p), W_{в3}(p)$ – Передаточные функции объектов по каналам возмущающих воздействий,

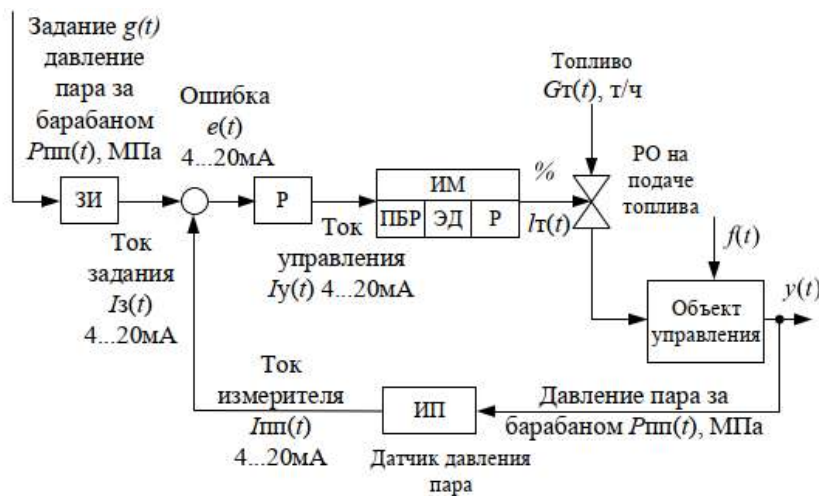
$X_{вх}$ – Входной параметр, $X_{вых}$ – Выходной параметр регулирования,

$X_{зад}$ – Заданное значение регулируемого параметра,

$X_{в1}, X_{в2}, X_{в3}$ – Входные сигналы возмущающего воздействия

Рисунок 2. Структурная схема системы автоматического управления с одноканальным объектом управления

На рисунке 3 представлена структурно-аналитическая схема регулирования по каналу «расход топлива - давление пара».



$g(t)$ – Уставочное значение давления пара, $P_{пп}(t)$ – Давление пара за барабаном котла,

$e(t)$ – Ошибка регулирования, $G_t(t)$ – Массовый расход топлива, ЗИ – Задатчик интенсивности,

P – регулятор, ИМ – Исполнительный механизм, РО – Регулирующий орган,

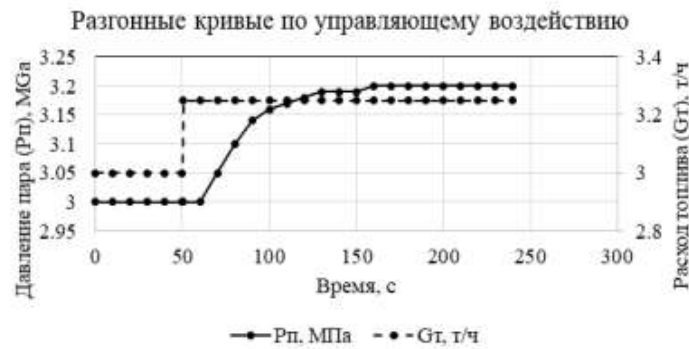
ПБР – Пускатель бесконтактный реверсивный, ЭД – Электрический двигатель, Р – Редуктор,

$I_з(t)$ – Ток задания, $I_у(t)$ – Ток управления, $I_т(t)$ – Ток управления регулирующим органом подачи топлива, $I_{пп}(t)$ – Ток измерительного преобразователя (ИП), ИП – Измерительный преобразователь,

$f(t)$ – Сигнал возмущающего воздействия, $y(t)$ – Регулируемый параметр

Рисунок 3. Алгоритмическая схема системы регулирования

Математическая модель представлена в форме передаточной функции для объекта управления, учитывающей воздействие через управляющий канал. График зависимости давления пара от изменения расхода топлива представлен на рисунке 4.



R_p – Давление пара, G_T – Расход топлива
Рисунок 4. Экспериментальная кривая объекта

Полученная по экспериментальной кривой передаточная функция статического объекта управления по каналу регулирующего воздействия, $W_{0y}(p)$, будет выглядеть следующим образом:

$$W_{0y}(p) = \frac{R_{пб}(p)}{G_T(p)} = \frac{K_{об} \cdot e^{-p \cdot \tau}}{T_{об} \cdot p + 1} = \frac{0.8 \cdot e^{-10 \cdot p}}{30 \cdot p + 1}$$

где $R_{пб}(p)$ – давление пара за барабаном,
 $G_T(p)$ – расход топлива,
 $K_{об}$ – коэффициент усиления,
 $T_{об}$ – постоянная времени,
 τ – время запаздывания.

При настройке системы автоматического управления, как при помощи приближенных инженерных методов, так и с применением точных классических методов технического анализа, необходимо учитывать два основных аспекта: обеспечение устойчивости и достижение желаемых показателей качества [3].

Перед началом определения параметров регулятора, включая его пропорциональную и интегральную составляющие, важно определить требования к качеству регулирования, учитывая особенности технологического процесса. Основными показателями, определяющими переходные процессы, являются следующие:

- максимальное динамическое отклонение регулируемой величины от заданного значения,
- перерегулирование,
- остаточное отклонение регулируемой величины от заданного значения,
- интегральная оценка качества переходного процесса регулирования [4].

В связи с тем, что критерии качества регулирования могут различаться в зависимости от конкретной задачи, существует множество разнообразных инженерных методов настройки [5].

Для исследования были выбраны три метода настройки ПИ-регулятора:

1. Аналитический метод Копеловича - применяется для получения приближенных решений и расчета параметров ПИ-регулятора на основе аналитических формул. Этот метод позволяет быстро определить начальные значения настроек регулятора.

2. Метод Циглера-Никольса - основан на экспериментальном подходе с использованием метода незатухающих колебаний. Он был выбран, так как широко используется для настройки ПИ-регуляторов в промышленности и позволяет получить значения параметров с учетом динамических характеристик системы.

3. Автоматизированный метод с использованием пакета Simulink Design Optimization - применяется для оптимизации настроек регулятора с использованием численных методов и инструментального пакета MATLAB/Simulink. Данный метод обеспечивает точные значения параметров регулятора на основе имитационного моделирования [6,7].

Каждый из методов был протестирован на замкнутой системе управления котлоагрегатом, моделирующей реальную работу оборудования. Для каждой настройки ПИ-регулятора оценивались показатели качества регулирования, такие как время переходного процесса, динамическое отклонение, степень перерегулирования и статическая ошибка.

Основные критерии оценки качества регулирования:

- Время переходного процесса ($t_{рег}$).
- Максимальное динамическое отклонение ($X_{дин}$).
- Установившееся значение ($X_{ст}$).
- Колебательность и степень перерегулирования (ψ).

Приведем ключевые результаты каждого из методов и их влияние на показатели качества регулирования системы.

Аналитический метод Копеловича предполагает использование математических формул и расчетов для настройки ПИ-регулятора. В нашей работе этот метод используется с помощью программного обеспечения Mathcad, что позволяет автоматизировать и упростить вычислительные процессы, а также уменьшить вероятность ошибок. Такой подход обеспечивает более точное и быстрое определение оптимальных настроек регулятора, что выгодно отличает его от методов, требующих ручных расчетов или экспериментального подбора параметров.

На рисунке 5 показаны расчеты настройки ПИ-регулятора (среда Mathcad) для двух видов переходных процессов (апериодического и колебательного) и полученные переходные характеристики системы.

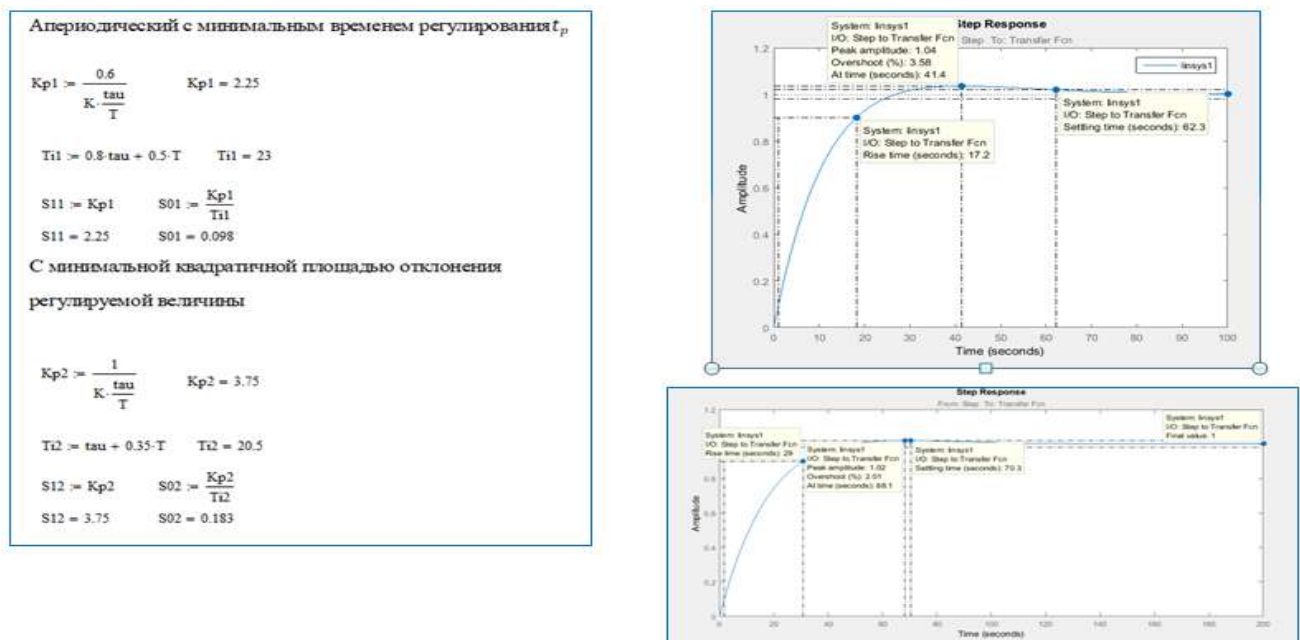


Рисунок 5. Расчет настроек ПИ-регулятора и переходные характеристики системы при методе Копеловича

Сравнительный анализ полученных характеристик переходного процесса количественным значениям показателей качества регулирования сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Показатели регулирования при аналитическом методе Колеловича

Регулятор	τ, c	$t_{рег}$	$X_{ст}$	$X_{дин}$	ψ
ПИ (Апериодич.)	0	70.3	0	0.02	не определяется
ПИ (Кол)	0	62.3	0	0.04	не определяется

Метод Циглера-Никольса (метод незатухающих колебаний) заключается в том, чтобы привести систему автоматического управления к колебательной границе устойчивости с использованием пропорционального регулятора. Затем, опираясь на найденные критические настройки и период колебаний, вычисляются параметры настройки ПИ-регулятора. Для вывода объекта на колебательную границу используется имитационное моделирование в среде Simulink.

На рисунке 6 представлена схема замкнутой системы в среде Simulink для вывода системы на колебательную границу устойчивости.

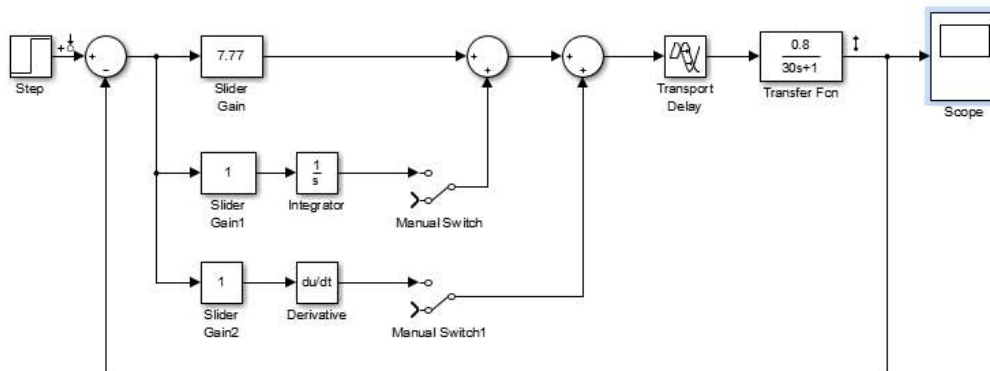


Рисунок 6. Схема замкнутой системы в среде Simulink

На рисунке 7 показаны расчеты настроек ПИ-регулятора и полученные переходные характеристики системы при методе Циглера-Никольса.

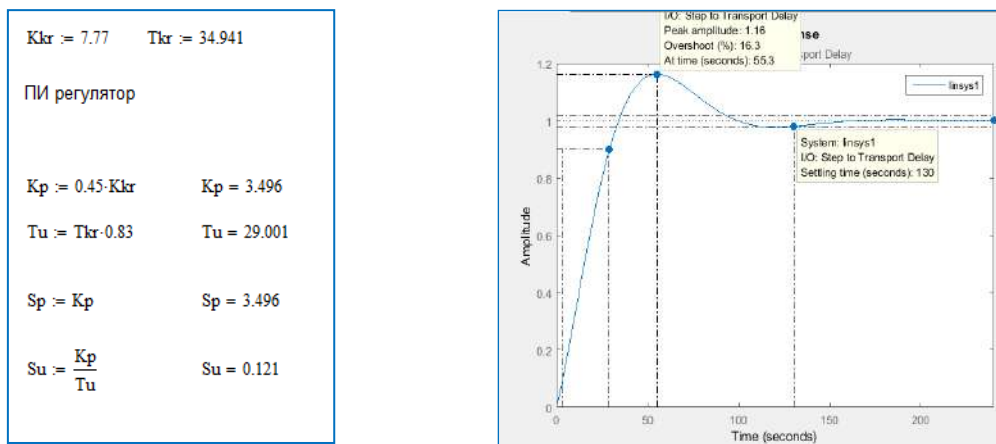


Рисунок 7. Расчет настроек ПИ-регулятора и переходные характеристики системы при методе Циглера-Никольса

Значения полученных показателей качества сведены в таблицу 2.

Таблица 2. Показатели качества САУ с ПИ – регулятором по методу Циглера-Никольса

Канал управления					
Регулятор	τ, c	$t_{рег}$	$X_{ст}$	$X_{дин}$	ψ
ПИ	0	130	0	0.16	не определяется

Анализируя таблицу, можно сделать следующие выводы. Настройка, методом Циглера - Никольса в системе с ПИ-регулятором по рассмотренному результату исследования показала, что время регулирования и динамическая ошибка стали больше, перерегулирование увеличилось в четыре раза, а длительность процесса в два раза.

Автоматизированный метод с использованием пакета Simulink Design Optimization позволяет найти оптимальные параметры настройки для нелинейной модели системы в Simulink, которые обеспечат требуемый переходной процесс по заданным графически ограничениям в окне временной области. Ход оптимизации контролируется на экране с помощью отображения графика контролируемого процесса и текущих значений минимизируемой функции.

На рисунке 8 показана схема одноконтурной САР (Система автоматического регулирования), составленная из стандартных блоков. Одноконтурная САР в исследовании применяется для разработки и тестирования методов регулирования, что позволяет минимизировать колебания давления и повысить надежность работы тепловых электростанций.

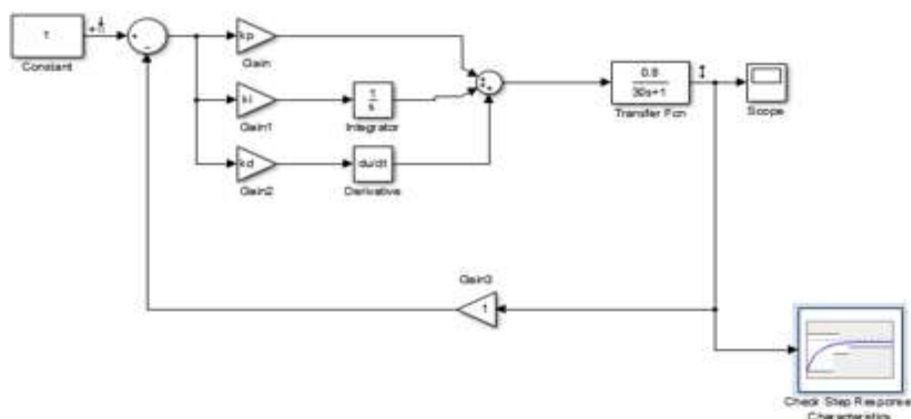


Рисунок 8. Блок-схема одноконтурной САР

Оптимизация переходных процессов и оптимальная переходная характеристика представлены на рисунке 9.

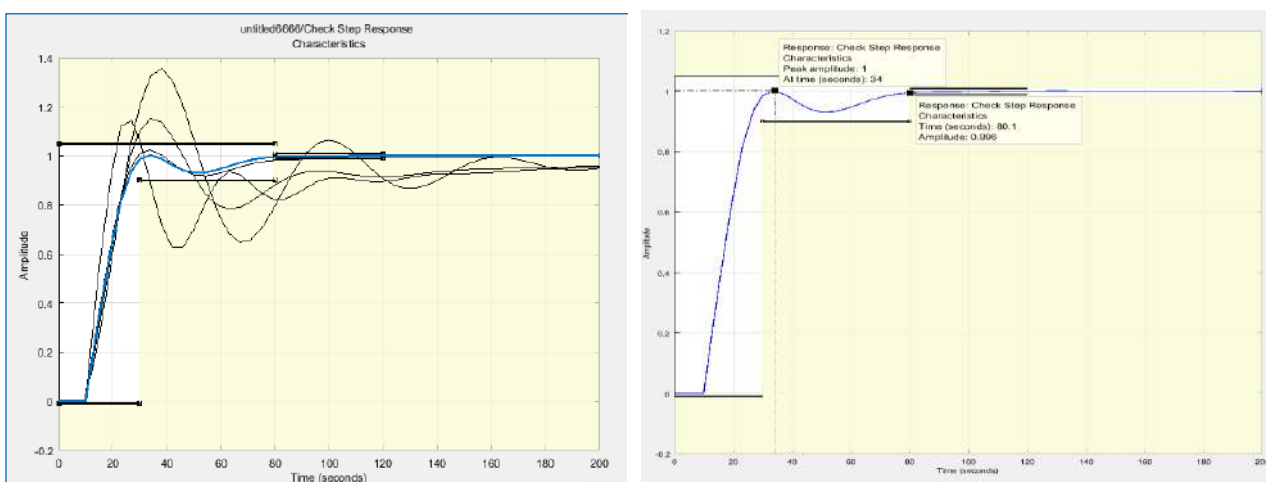


Рисунок 9. Оптимизация переходных процессов и оптимальная переходная характеристика с использованием пакета Simulink Design Optimization

Значения полученных показателей качества сведены в таблицу 3.

Таблица 3. Показатели качества САУ с ПИ – регулятором

Канал управления					
Регулятор	τ, c	$t_{рег}$	$X_{ст}$	$X_{дин}$	ψ
ПИ	10	80	0	0	не определяется

На основе проведенных исследований в результате введения в систему ПИ регулятора и расчета оптимальных значений параметров по различным методикам (приближенная аналитическая, экспериментальная и с помощью автоматизированного расчёта в специализированном программном приложении System Identification Toolbox пакета MATLAB) были получены следующие показатели качества системы:

- время переходного процесса (Setting time) уменьшилось с 130 до 70,3 с;
- установившееся значение выходной величины (Final value) -1;
- перерегулирование (Overshoot) уменьшилось с 16,3 до 0 %.

Результаты исследования

В результате проведенного исследования мы выполнили все поставленные задачи, а именно: провели моделирование процессов настройки ПИ-регулятора с использованием инженерных методов: формульного подхода Копеловича, и экспериментального метода незатухающих колебаний через имитационное моделирование системы автоматического управления в среде MATLAB, а так же с привлечением инструментального пакета Simulink Design Optimization из библиотеки Simulink. Выполнили анализ переходных процессов в замкнутой системе и оценили показатели качества.

Полученные показатели качества регулирования с ПИ-регулятором, настроенного инженерными методами представлены в сводной таблице 4.

Таблица 4. Сводная таблица показателей регулирования

Метод	Вид переходного процесса	Параметры настройки регуляторов			Показатели качества регулирования			
		P	I	D	$t_{рег}$	$X_{ст}$	$X_{дин}$	ψ
Аналитический	Апериодический	2,25	0,098	-	70.3	0	0.02	не определяется
	$\min \int_0^{\infty} e_p^2 dt$	3,75	0,183	-	62.3	0	0.04	
Циглера-Никольса		3,496	0,121	-	130	0	0.16	
Автоматизированный расчет инструментальным пакетом Simulink		2,01184	0,0641	-	80	0	0	

Разные методы настройки регулятора привели к похожим результатам, что подтверждает их надежность и применимость для регулирования давления пара в котлоагрегате. Особенно хорошо совпали результаты аналитического метода и автоматизированного моделирования, что говорит о высокой точности этих подходов. С учетом полученных численных значений критериев качества можно сделать вывод о том, что выбранные настроечные коэффициенты и структура ПИ регулятора гарантируют необходимые свойства системы регулирования давления и соответствуют всем требованиям, предъявляемым к промышленным регуляторам:

- система обеспечивает заданное качество процессов управления вблизи рабочей точки (время переходного процесса, перерегулирование и колебательность),

- обеспечена заданная точность регулирования в установившемся режиме,
- в процессе настройки параметров регулятора получена нулевая статическая ошибка регулирования.

Анализируя все изложенное, можно сделать вывод, что при работе замкнутых САУ с ПИ регулятором показатели качества переходных процессов в системе улучшаются по каналу управления. Из рассмотренных характеристик контура автоматического регулирования давления, видно, что система имеет оптимальную структуру регулятора, которая позволяет формировать определенный заданный вид динамических процессов.

Проведя настройку и оценив качественные характеристики рассматриваемого регулятора, можно сделать вывод о влиянии этого регулятора на эффективность системы автоматического регулирования давления в барабане.

Дискуссия

Результаты проведенного исследования продемонстрировали значительное улучшение точности и стабильности регулирования давления пара в котлоагрегате благодаря внедрению разработанной математической модели и оптимизированных параметров регулятора. Достигнутая минимизация отклонений давления подтверждает гипотезу о том, что оптимизация настроек регулятора с использованием численных методов приводит к более эффективной работе котлоагрегата. Эти результаты имеют значение для энергетической отрасли, так как они способствуют снижению энергозатрат и увеличению срока службы оборудования.

Тематика регулирования давления пара в котлоагрегатах и разработка методов оптимизации этих процессов является актуальной. Интерес к этой тематике обусловлен стремлением повысить эффективность работы котлоагрегатов, снизить энергетические и эксплуатационные затраты и улучшить устойчивость работы систем. Анализ существующих публикаций позволил нам выделить основные направления в проводимых исследованиях:

1. Адаптивные и интеллектуальные системы управления: Исследования направлены на разработку и внедрение алгоритмов адаптивного управления, которые позволяют регулировать параметры системы в реальном времени на основе данных, поступающих с датчиков (Апсеметов, А. Т. Разработка адаптивной системы регулирования давления пара на выходе парового котла) [8].

2. Моделирование и оптимизация процессов с использованием специализированного ПО: Множество исследований посвящены моделированию процессов котлоагрегатов в программных средах, таких как MATLAB/Simulink, CoDeSys и других. Это позволяет исследовать динамические процессы, разрабатывать и тестировать регуляторы до их внедрения в реальные системы (Чжан Шухэ Моделирование системы регулирования парокотельной установки в среде MATLAB) [9].

3. Инженерные и экспериментальные методы настройки регуляторов: Разработаны и широко используются различные инженерные методики для настройки регуляторов (методы Циглера-Никольса, аналитический метод Копеловича и т.д.). Эти методы продолжают улучшаться и адаптироваться для применения в современных энергетических системах (Воробьев, В.Ю., Саблина, Г.В. Расчет и оптимизация параметров дискретного ПИД-регулятора методом Циглера-Николса) [10].

В отличие от других исследований, приведенных по данной тематике, наша работа не ограничивается использованием только одного метода настройки ПИ-регулятора, как это делается в других исследованиях (например, только метод Циглера-Никольса). Вместо этого, исследование применяет и сравнивает несколько методов, включая аналитический метод Копеловича и инструментальный пакет Simulink Design Optimization. Это позволяет детально оценить каждый метод и подобрать наиболее эффективные параметры регулятора. Сравнение с работами других исследователей показало, что наша методология и результаты согласуются

с современными тенденциями в области автоматизации и оптимизации процессов управления. В частности, многие исследователи также подчеркивают необходимость адаптации и модернизации систем регулирования для повышения их эффективности. Однако наша работа добавляет новый аспект, связанный с применением конкретных моделей динамических процессов в котлоагрегате, что может служить основой для дальнейших разработок и исследований.

Перспективы для будущих исследований включают дальнейшую адаптацию модели для различных типов котлоагрегатов, а также изучение влияния других факторов, таких как качество топлива и эксплуатационные условия, на работу систем регулирования. Это позволит создать более универсальные и надежные системы управления, что особенно актуально в условиях повышения требований к экологии и эффективности энергопроизводства.

Заключение (выводы)

В результате проведенного исследования были достигнуты значительные успехи в области моделирования и оптимизации процессов регулирования давления пара в котлоагрегате. Разработанная математическая модель позволила не только улучшить точность регулирования, но и повысить стабильность работы системы в условиях изменяющихся параметров.

Основные выводы исследования заключаются в следующем:

1. Оптимизация параметров регулятора давления пара с использованием численных методов значительно снижает отклонения от заданных значений, что положительно сказывается на эффективности работы котлоагрегата.

2. Моделирование динамических процессов в котлоагрегате позволяет более точно учитывать влияние различных факторов, что способствует улучшению системы управления.

3. Внедрение разработанных подходов может привести к снижению энергозатрат и повышению надежности оборудования, что имеет большое значение для повышения конкурентоспособности и устойчивости энергетической отрасли.

Данное исследование подчеркивает важность интеграции современных методов моделирования и оптимизации в практику управления котлоагрегатами. В будущем планируется расширение работы, включая изучение новых технологий и методов, направленных на дальнейшее улучшение процессов регулирования в энергетике.

Полученные результаты проведенных исследований по настройке регуляторов и определению оптимальных значений параметров по различным методикам позволяют обеспечить стабильную работу системы, снизить переходные процессы и достичь необходимого уровня давления пара. Результаты проведенных исследований рекомендуется внедрить в учебный процесс в рамках изучения таких дисциплин, как: «Линейные системы автоматического регулирования», «Автоматизация и управление объектов тепловых электрических станций», «Проектирование автоматизированных систем управления», «Автоматизированные информационно-управляющие системы».

Список использованных источников

[1] Кулаков Г.Т., Кулаков А.Т., Артёменко К.И. Параметрическая оптимизация системы автоматического управления мощностью энергоблоков 300 МВт в режиме переменного давления пара перед турбиной. // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2018. № 61(6). С.539-551. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-6-539-551>

[2] Christian Dufour, Jean Mahseredjian, Jean Bélanger. A Combined State-Space Nodal Method for the Simulation of Power System Transients. // IEEE Transactions on Power Delivery. 2011. №26(2). С. 928 – 935 DOI:10.1109/TPWRD.2010.2090364

[3] Ковалев Д.А., Шаряков В.А., Шарякова О.Л., Труханова И.А. Теория автоматического управления: учебно-методическое пособие по курсовому проектированию // ВШТЭ СПбГУПТД. – СПб., 2020. – 65 с.

[4] Abdygali Jandigulov, Korgaubek Rauan, Svetlana Bystrova. Simplified topological algorithm for forming a steady mode of electric power system. // E3S Web of Conferences 461, 01025 (2023), RSES 2023.

<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202346101025>

[5] Демин И.О., Саблина Г.В. Исследование методов настройки параметров ПИД-регулятора. // Автоматика и программная инженерия, 2020, №1 (31), с.174-176.

[6] Bokizhanova Alina, Bokizhanov Gasis, Taranov Alexandr, Dvuzhilova Svetlana, Almussin Gali. Using the State Space Method for Calculating Electromechanical Transients. // Труды университета.2024. №1 (94). С.530-534. https://doi.org/10.52209/1609-1825_2024_1_530

[7] Воронцов Е. Ю., Лисиенко В.Г., Пономарев Н. Н. Исследование методов настройки ПИД-регулятора на примере моделирования объекта второго порядка с запаздыванием // Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве: сборник докладов II Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных с международным участием, 2013, с. 37-41.

[8] Ансметов А. Т. Разработка адаптивной системы регулирования давления пара на выходе парового котла // Технические науки в России и за рубежом: материалы II Междунар. науч. конф. (г. Москва, ноябрь 2012 г.). Москва: Буки-Веди, 2012. С. 41-43. URL: <https://moluch.ru/conf/tech/archive/55/2660/>

[9] Чжан Шухэ. Моделирование системы регулирования парокотельной установки в среде MATLAB // Магистерская диссертация. Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2021

[10] Воробьев В.Ю., Саблина Г.В. Расчет и оптимизация параметров дискретного ПИД-регулятора методом Циглера-Николса. // Автоматика и программная инженерия, 2019, №1 (27), с.9-13.

References

[1] Kulakov G.T., Kulakov A.T., Artsiomenka K.I. (2018) Parametrizatsionnaya optimizatsiya tsistemy avtomaticheskogo upravleniya moshnoct'ju jenergeblokov 300 MWt v rezhime peremennogo dawlenija para pered turbinoj [Parametric Optimization for Automatic Control System of Power Units of 300 MW for the Mode of Variable Pressure of Turbine Inlet Steam]. ENERGETIKA. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations. №61(6):539-551. (In Russian) <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-6-539-551>

[2] Christian Dufour, Jean Mahseredjian, Jean Bélanger. A Combined State-Space Nodal Method for the Simulation of Power System Transients. // IEEE Transactions on Power Delivery. 2011. №26(2), 928 – 935 DOI:10.1109/TPWRD.2010.2090364

[3] Kowalew D.A., Scharjakow W.A., Scharjakowa O.L., Truchanowa I.A. (2020) Teorija awtomaticheskogo upravlenija: utshebno-metoditschekoe pocobie po kurcowomu proektirowaniju [The theory of automatic control: an educational and methodological guide to course design] // WSchTJe CPbGUPTD. – CPb., 65. (In Russian)

[4] Abdygali Jandigulov, Korgaubek Rauan, Svetlana Bystrova. Simplified topological algorithm for forming a steady mode of electric power system. // E3S Web of Conferences 461, 01025 (2023), RSES 2023.

<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202346101025>

[5] Demin I.O., Cablina G.W. (2020) Icledowanie metodow nactrojki parametrow PID-reguljatora [Investigation of methods for setting the parameters of the PID controller]. Awtomatika i programnaja inzhenerija, №1 (31), 174-176. (In Russian)

[6] Bokizhanova Alina, Bokizhanov Gasis, Taranov Alexandr, Dvuzhilova Svetlana, Almussin Gali. Using the State Space Method for Calculating Electromechanical Transients. // Trudy uniwersiteta.2024. №1 (94), 530-534. https://doi.org/10.52209/1609-1825_2024_1_530

[7] Woronzow E. Ju., Licienko W.G., Ponomarew N. N. (2013) Icledowanie metodow nactrojki PID-reguljatora na primere modelirowanija ob#ekta wtorgo porjadka c sapasdywanjem [Investigation of PID controller tuning methods using the example of modeling a second-order object with a delay]. Teplotechnika i inwomatika w obrasowanii, nauke i proiswodctwe: cbornik dokladow II Wceroccijckoj nautschno-praktitschekoj konwercenzii ctudentow, acpirantow i molodych utschjonych c mezhdunarodnym utschactiem, 37-41. (In Russian)

[8] Apcemetow A. T. (2012) Rasrabortka adaptiwnoj cistemy regulirowanija dawlenija para na wychode parowogo kotla [Development of an adaptive steam pressure control system at the steam boiler outlet]. Technitschekie nauki w Roccii i sa rubezhom: materialy II Mezhdunar. nautsch. konv. (g. Mockwa, nojabr' 2012 g.). — Mockwa: Buki-Wedi, 41-43. — URL: <https://moluch.ru/conf/tech/archive/55/2660/> (In Russian)

[9] Tschzhan Schuchje (2021) Modelirowanie cistemy regulirowanija parokotel'noj uctanowki w crede MATLAB [Simulation of the steam boiler control system in the MATLAB environment]. Magicterckaja diccertazija. Nazional'nyj icledowatel'ckij Tomckij politechnitschekij uniwerscite (In Russian)

[10] Worob'ew W.Ju., Cablina G.W. (2019) Ractschet i optimizatsija parametrow dickretnogo PID-reguljatora metodom Ziglera-Nikolca [Calculation and optimization of parameters of a discrete PID controller by the Ziegler-Nichols method]. Awtomatika i programnaja inzhenerija, , №1 (27), 9-13. (In Russian)