

НАСТРОЙКА ПИД РЕГУЛЯТОРА СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Новосибирский Государственный Технический Университет

В статье рассмотрены методы настройки ПИД – регулятора. Выполнен расчет настроек ПИД регулятора из условий принятых в теплоэнергетике критериев качества, на основе которой получены зависимости компромиссных параметров настройки. Алгоритмы оптимизации позволяют анализировать устойчивость работы САР с ПИД – законом регулирования в зависимости от варьирования динамики объекта регулирования. Произведён расчет настроек ПИД регулятора инерционного контура системы автоматического регулирования (САР) температуры пара промежуточного перегрева по экспериментальным данным, полученным на Новосибирской ТЭЦ – 5.

Ключевые слова: ПИД – регулятор, методы настройки, эффективность ПИД - алгоритма.

ВВЕДЕНИЕ

ПИД – регулятор относится к наиболее распространённому типу регуляторов. Порядка 90 – 95 % регуляторов, находящихся в настоящее время в эксплуатации, используют ПИД – алгоритм. Причинами столь высокой популярности являются простота построения и промышленного использования, ясность функционирования, пригодность для решения большинства практических задач и низкая стоимость [1].

Использование ПИД – закона в теплоэнергетике ведёт к повышению качества регулирования. Применительно к САР температуры пара использование ПИД – закона регулирования позволяет поддерживать колебания температуры более точно во всем диапазоне паропроизводительности котлоагрегата, что является первоочередной задачей. Использование ПИД – алгоритма ограничено сложностью его настройки. Это

объясняется особенностью работы САР с ПИД – регуляторами: высокая чувствительность к отклонению оптимума их настроек и невозможность применения шагового метода для получения вида переходного процесса, как при эксплуатации САР с ПИ – регулятором.

Для получения:

- наибольшего выигрыша от ПИД – закона регулирования;
- сокращения трудозатрат на ввод в действие САР с ПИД – регулятором;
- оценки эффективности ПИД – закона регулирования на стадии проектирования, в том числе более сложных схем САР (трех-, и более контуров САР температуры, схемы со сложным дифференциатором)

проведён сравнительный анализ методик настройки САР с ПИД – регулятором, на основе которого выбраны наиболее пригодные для практического использования. Для определения возможностей ПИД - закона выполнен расчет настроек ПИД – регулятора с учётом принятых в теплоэнергетике критериев качества переходного процесса, получены зависимости параметров настройки ПИД - регулятора. Разработан алгоритм коррекции настроек.

ПРАВИЛА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ НАСТРОЙКИ

Процесс настройки ПИД – регулятора тепловых объектов по экспериментальным правилам интуитивен и попытки настроить регулятор без начального приближённого расчёта коэффициентов могут оказаться безуспешными. Основываясь на обзоре существующих методик настройки [7,8,12] можно заключить, что методы Циглера – Никольса и Чина, Хронса, Ресвика наиболее оправданы для эксплуатации в промышленных условиях. Существует много модификаций формул Циглера – Никольса, для объектов теплоэнергетического оборудования следует использовать приведённые в таблице:

Таблица 1

Расчётные формулы. Отклик на ступенчатое воздействие

Формулы	$a \cdot k_p$	T_i	T_d
Циглер – Никольс (ZN)	1,2	$2L$	$L/2$
Чин, Хронс , Ресвик 0% (CHR0%)	0,6	L	$L/2$
Чин, Хронс, Ресвик 20% (CHR20%)	0,95	$1,4L$	$0,47L$

$$a = \frac{K}{T_o} L$$

где параметр a выражается через параметры переходной характеристики объекта регулирования

После получения переходной характеристики определяют следующие параметры:

- 1) Коэффициент усиления объекта регулирования K ;
- 2) Время разгона T_o ;
- 3) Условное запаздывание L ;

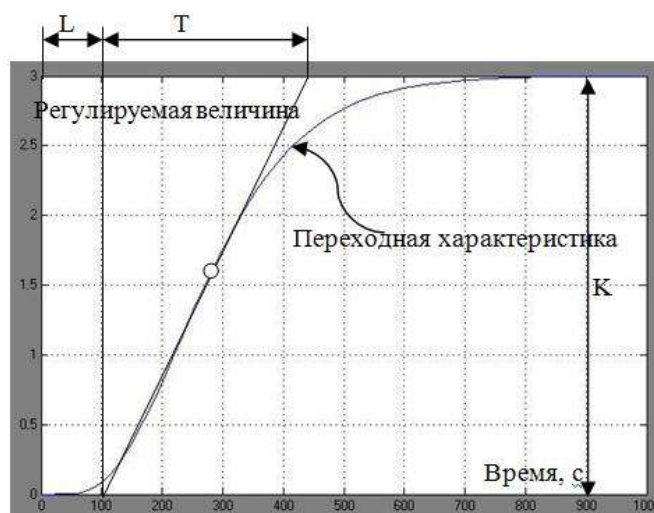


Рисунок 1 Обработка экспериментальных данных

Структурная схема САР с ПИД - регулятором представлена на рисунке:

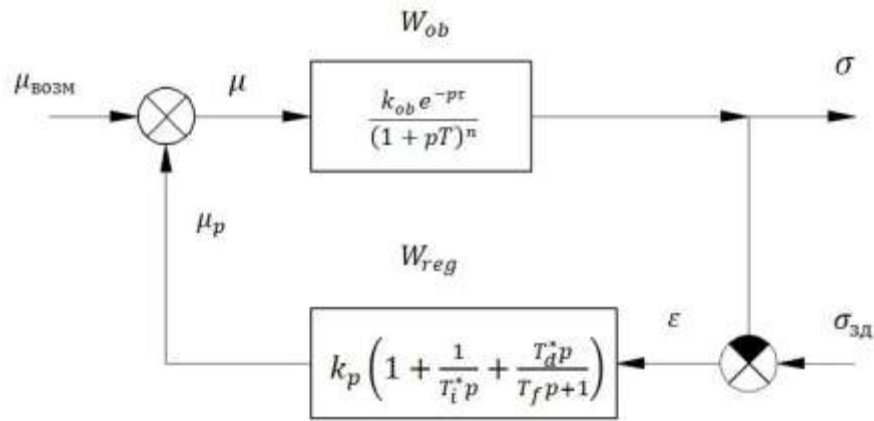


Рисунок 2 Структурная схема САУ

$\mu_{\text{возм}}$ – возмущающее воздействие, σ – регулируемая величина, $\sigma_{\text{зд}}$ – сигнал задания регулятору, μ_p – сигнал с выхода регулятора

Передаточная функция объекта управления

$$W_{ob} = \frac{ke^{-p\tau}}{(Tp+1)^n} \quad (1)$$

Передаточная функция ПИД – регулятора

$$W_{reg}(p) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_i p} + \frac{T_d p}{T_f p + 1} \right) \quad (2)$$

где:

k_p – пропорциональная часть,

T_i – постоянная интегрирования,

T_d – постоянная дифференцирования,

$T_f = \frac{T_d}{10}$ – постоянная фильтра;

Начальная приближённая настройка по формулам Циглера - Никольса всегда обеспечивает несколько большее оптимального значение коэффициента пропорциональной части, это упрощает процесс дальнейшей настройки. По

методу Циглера – Никольса определяются настройки исходя из декремента затухания δ , это приводит к медленному затуханию колебаний, а как следствие длительный процесс подстройки параметров. Методы Чина, Хронса, Ресвика позволяет получить больший запас устойчивости (сократить время настройки), чем в методе Циглера – Никольса, но пропорциональный коэффициент в этих методах меньше, чем у Циглера – Никольса. Это следует учитывать при дальнейшей подстройке параметров: чрезмерное уменьшение пропорциональной части приведёт к виду переходного процесса с меньшей точностью регулирования. Настройки, полученные по методу Чина, Хронса, Ресвика 0% требуют подстройки преимущественно дифференциальной составляющей (по формулам дифференциальная часть меньше оптимальной).

Для приведения переходного процесса к оптимальному виду (подстройки параметров) следует руководствоваться следующими правилами:

- увеличение пропорционального коэффициента увеличивает быстродействие и снижает запас устойчивости;
- с уменьшением интегральной составляющей ошибка регулирования с течением времени уменьшается быстрее;
- уменьшение постоянной интегрирования уменьшает запас устойчивости;
- увеличение дифференциальной составляющей увеличивает запас устойчивости и быстродействие.

Указанный порядок действий позволяет выйти на процесс с нужными показателями качества. Если полученные настройки не удовлетворяют требованиям технологического процесса (это может быть в случае варьирования динамики объекта регулирования, выбег исполнительного механизма) то найденные настройки необходимо ослабить, как это сделать, рассмотрено далее.

Недостатком всех экспериментальных методик является неполнота информации о запасе устойчивости системы и робастности. Запас устойчивости и робастность определяет надёжность работы регулятора. Для рассмотрения

этих факторов необходим анализ по изменению динамики объекта регулирования и в этом случае лучше получить переходную характеристику объекта регулирования, смоделировать объект регулирования с учётом диапазона изменения динамических характеристик и выйти на настройки, близкие к оптимальным, не нуждающиеся в дополнительной значительной подстройке.

РАСЧЕТ НАСТРОЕК ПИД-РЕГУЛЯТОРА

Высокая чувствительность САР с ПИД - регуляторами к отклонению оптимума их настроек требует выбора оптимальных параметров настроек регулятора с учётом возможного изменения динамики объекта регулирования, а полученные настройки должны гарантировать заданный запас устойчивости и робастность. Зависимости «компромиссных» параметров настройки ПИД – регулятора для теплоэнергетических объектов были получены проведением расчета с использованием критерия точности и критерия надежности. Расчет включает в себя два этапа:

1. Моделирование в MatLab Simulink с учётом выбранного критерия точности.
2. Ослабление настроек в MathCAD с учётом критерия надежности настроек.

Выбор критерия точности регулирования

В теплоэнергетике приняты следующие критерии качества переходного процесса[16]:

- Динамическая ошибка должна быть меньше заданной σ_d , - регулируемая величина системы;

- Степень колебательности переходного процесса
$$\psi = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_1} = 0,90 \div 0,95$$

•Площадь под кривой переходного процесса $\int_0^{\infty} \sigma^2 dt$ (квадратичная интегральная оценка). Критерий должен быть минимален, при условии равенства степени затухания $\psi = 0,90 \div 0,95$

Точность регулирования достигается минимизацией интегрального квадратичного критерия при заданной степени затухания.

$$\int_0^{\infty} \sigma^2 dt \rightarrow \min \quad \text{при } \psi = 0,90 \div 0,95 \quad (3)$$

Интегральный квадратичный критерий пропорционален $\frac{T_i}{k_p}$. Большему значению k_p при постоянном T_d всегда соответствует меньшее T_i . Только в этом случае можно поддерживать $\psi = 0,90 \div 0,95$

Выбор критерия надежности ПИД-регулятора

Критерий надёжности настроек отражает запас устойчивости и робастность настроек к варьированию динамических характеристик объекта регулирования. Рассмотрены следующие методы учёта изменения динамики объекта регулирования:

- По распределению корней характеристического уравнения (критерий Е. Г. Дудникова) [10,11];
- Из вида импульсной переходной характеристики замкнутого контура (M - частотный показатель колебательности)[11];
- H_{∞} оптимизация и μ анализ[8,13];
- Ограничением на функции чувствительности M_s, M_T [3,12];

•Варьируя передаточную функцию замкнутой системы, анализируя индекс робастности[12];

У каждого из методов есть свои преимущества, надёжность настроек получена из ограничений на функцию чувствительности M_S и комплементарной чувствительности M_T . Описание этих функций и условия их использования приведены в [3, 12, 17].

Возможности этого критерия наиболее точно отражают цели расчета. Функции чувствительности имеют привязку к АФХ контуров, позволяя наглядно видеть влияние составляющих ПИД – закона регулирования на запас устойчивости и робастность.

Оценка запаса по усилению и по фазе, выраженная через максимум функции чувствительности:

$$g_m \geq \frac{M_S}{M_S - 1}$$

$$\varphi_m \geq 2 \arcsin\left(\frac{1}{2M_S}\right)$$

На практике считаются приемлемыми значения $M_S = 1,4..2$ [3].

Компромиссные настройки получены для условия $M_S = M_T = 2$. Это соответствует $g_m \geq 2$ и $\varphi_m \geq 29^\circ$.

Оценка робастности: при $M_T = 2$ возможно изменение фазы объекта до 60° и коэффициента усиления в диапазоне от 0,5 до 1,5.

Функция позволяет оценить поведение системы после введения в контур нелинейности[12]. Недостатком является некоторое возможное ухудшение качества регулирования при наличии в контуре случайных недетерминированных возмущений.

Динамические характеристики объектов регулирования

Динамика объектов регулирования приведена в таблице 2. Часть динамики взята из источника [9].

Таблица 2

Динамика объектов регулирования

n	T	τ
2,3,4,5,6	100	0,90,180,300
	50	0,10,20,30,50,90
	30	0,5,10,15,30,60
	10	0,2,4,6,10,20

Расчет настроек ПИД - регулятора

Порядок оптимизации проиллюстрируем на конкретном примере из испытательного пакета:

$$W_{ob}(j\omega) = \frac{3,0e^{-23,81j\omega}}{(67,26j\omega + 1)^4}$$

Для модели объекта управления

с ПИД-регулятором (2)

получены настройки исходя из выбранного критерия точности (3):

$k_p = 0,55$; $T_i = 105$; $T_d = 110$ АФХ разомкнутого контура и график переходного процесса приведены на рисунке 3

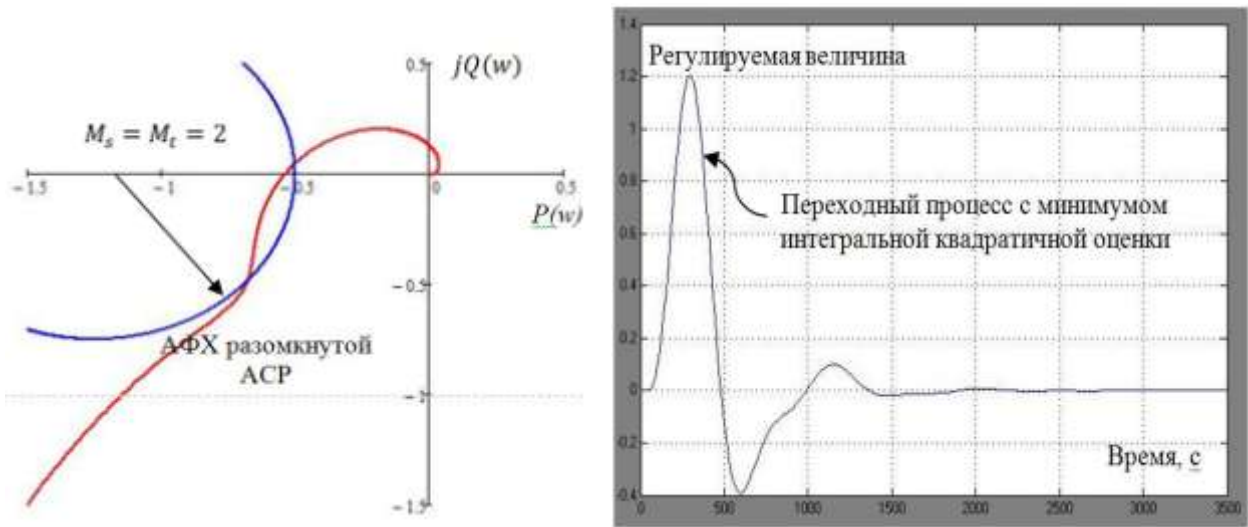


Рис. 3 АФХ разомкнутого контура и переходный процесс в замкнутой САР полученные из условий (1)

Меняем параметры таким образом, чтобы АФХ разомкнутой системы оказалось вне окружности (рис. 4), соответствующей $M_S = M_T = 2$, это условие ограничения на чувствительность САР. При этом степень должно сохраняться $\psi = 0,90 \div 0,95$ (рис. 4) переходный процесс.

Новые настройки: $k_p = 0,45$; $T_i = 100$; $T_d = 110$

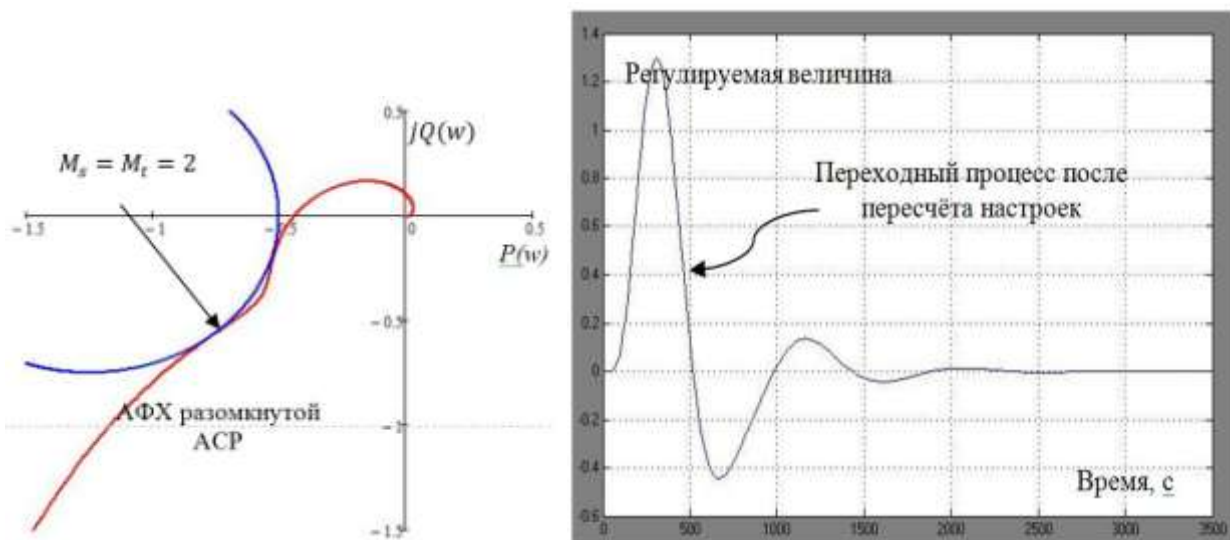
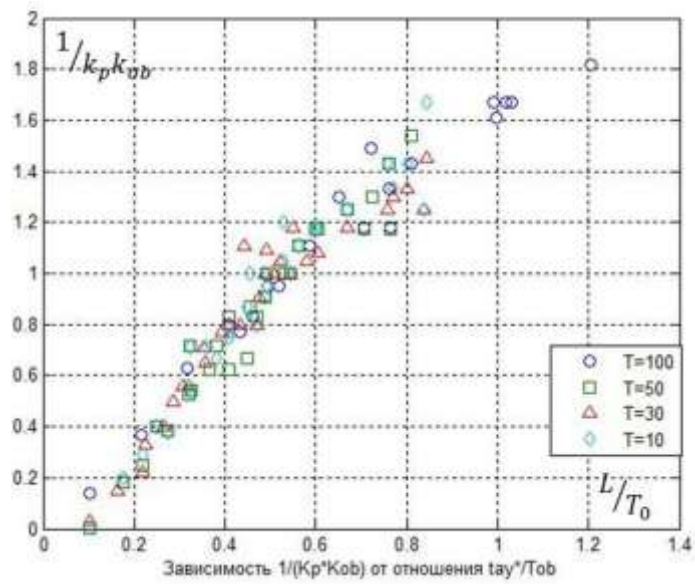
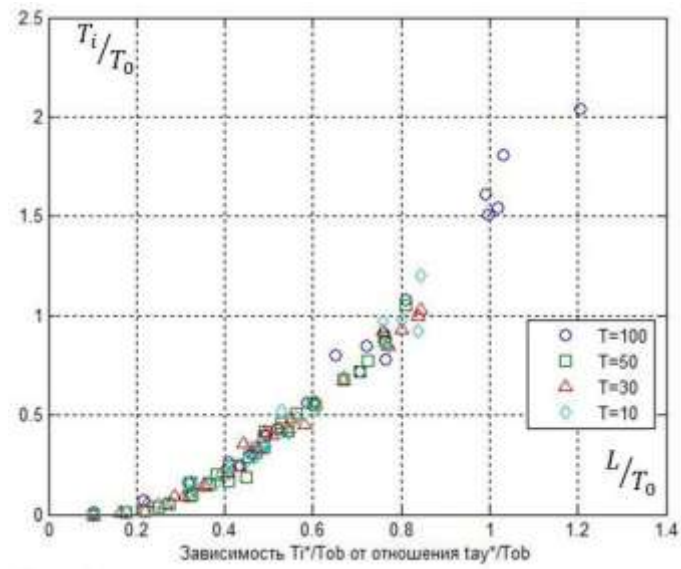


Рис. 4 АФХ разомкнутого контура и переходный процесс в замкнутой САР после пересчёта настроек с учетом функции чувствительности

Для устойчивой работы САР с ПИД - регулятором необходим баланс точностью регулирования и надёжностью настроек (запас устойчивости и робастность). Приоритет точности или надёжности определяется из условий работы САР. Расчет проведен для $M_S = M_T = 2$, что соответствует наибольшей производительности с учётом минимального ограничения на чувствительность. Полученные в результате расчета настройки ПИД - регулятора будем называть «компромиссными». Для возможности увеличения надёжности настроек их необходимо «ослабить», т. е. изменить таким образом, чтобы уменьшить чувствительность САР при меньших потерях в точности регулирования.

Результаты расчета



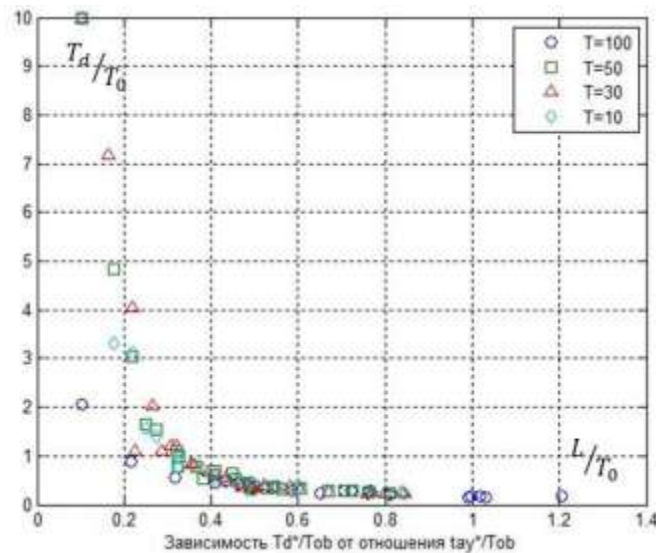


Рисунок 5. Параметры компромиссной настройки ПИД – регулятора в зависимости от параметров переходной характеристики объекта регулирования

Из графиков зависимостей видно, что для большой группы объектов существует общая зависимость компромиссных параметров настроек от

отношения $\frac{L}{T_o}$. Полученные зависимости можно использовать для начальной

настройки только при $\frac{L}{T_o} > 0,4$.

При $\frac{L}{T_o} < 0,4$ Д-составляющая в зависимости от динамики объекта

меняется значительно. При увеличении $\frac{L}{T_o}$ разброс на графике пропорциональной части объясняется увеличением влияния Д-составляющей чувствительность работы САР. Это приводит к необходимости ослабления всех настроек регулятора для приведения АФХ к виду на рисунке 4.

В диапазоне $0,4 < \frac{L}{T_o} < 0,7$ Д - составляющая слабо влияет на надёжность работы САР, поэтому её можно оставить без изменения. Если динамика объекта регулирования находится вне этого интервала, влияние Д - составляющей усиливается, в этом случае её следует уменьшить.

Для интервала $0,4 < \frac{L}{T_o} < 0,7$ эффективен алгоритм «ослабления» настроек:

- 1) Уменьшаем пропорциональную часть;
- 2) Уменьшаем интегральную часть для компенсации степени затухания.

Заключение

Эффективность ПИД – алгоритма увеличивается с уменьшением отношения $\frac{L}{T_o}$. Д – составляющая ПИД – регулятора очень чувствительна к изменению запаздывания объекта регулирования. Получены зависимости позволяют наглядно оценить эффект от введения Д составляющей

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ПИД-РЕГУЛЯТОРА ИНЕРЦИОННОГО КОНТУРА САР ТЕМПЕРАТУРЫ ВТОРИЧНОГО ПАРА НОВОСИБИРСКОЙ ТЭЦ -5

Таблица 3

Динамические характеристики объекта регулирования - параопровода

Контрольная точка парового тракта	Параметры динамических характеристик при нагрузках котла – D, т\ч (%Dном)			
		700 (104%)	530 (80%)	420 (60%)
Впрыск 4 (Вторичный пар)	Время запаздывания, τ (с)	70	120	160
	Постоянная времени, T(с)	240	300	350
	Коэффициент передачи,	2,8	3,0	3,2

	K(оС/Т/ч)			
--	-----------	--	--	--

Структурная схема моделируемой САР приведена на рисунке 2. Структура регулятора соответствует (2).

Используем модель объекта регулирования по В. Стрейцу:

$$D = 104\% , \quad W_{ob}(j\omega) = \frac{2,8e^{-17,46j\omega}}{(64,86j\omega + 1)^3}$$

$$D = 80\% , \quad W_{ob}(j\omega) = \frac{3,0e^{-23,81j\omega}}{(67,26j\omega + 1)^4}$$

$$D = 60\% , \quad W_{ob}(j\omega) = \frac{3,2e^{-16j\omega}}{(68j\omega + 1)^5}$$

Изменение динамики объекта регулирования предсказуемо, поэтому используем ПИД – регулятор с табличным управлением с настройками для 3 нагрузок котла.

Таблица 4

Параметры настройки по выбранным методикам:

Формулы	D, %	k_p	T_i	T_d	T_f
ZN	104	1,47	140	35	3,5
	80	1,00	240	60	6,0
	60	0,82	320	80	8,0
CHR0%	104	0,74	70	35	3,5
	80	0,50	120	60	6,0
	60	0,41	160	80	8,0
CHR20%	104	1,16	98	32,9	3,3
	80	0,79	168	56,4	5,6
	60	0,65	224	75,2	7,5
Зависимости параметров	104	-	-	-	-
	80	0,44	65	164	16

	60	0,36	106	152	15
Алгоритм настройки	104	0,70	70	90	9
	80	0,45	100	110	11
	60	0,35	125	145	14,5

Переходные процессы для каждого случая представлены на рисунках б:

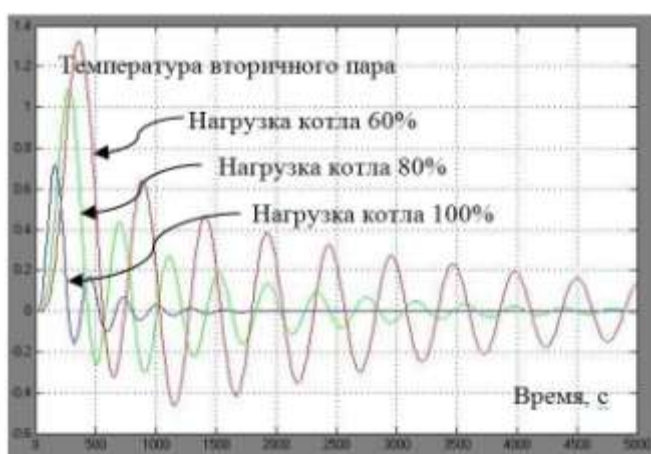


Рисунок 6.а Циглер - Никольс

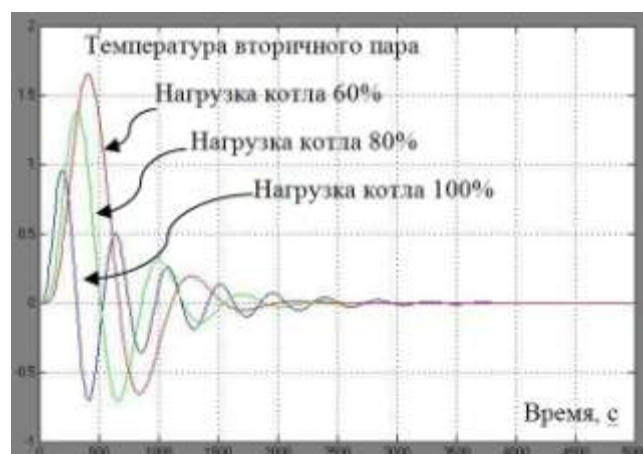


Рисунок 6. Б Чин, Хронс, Ресвик 0%

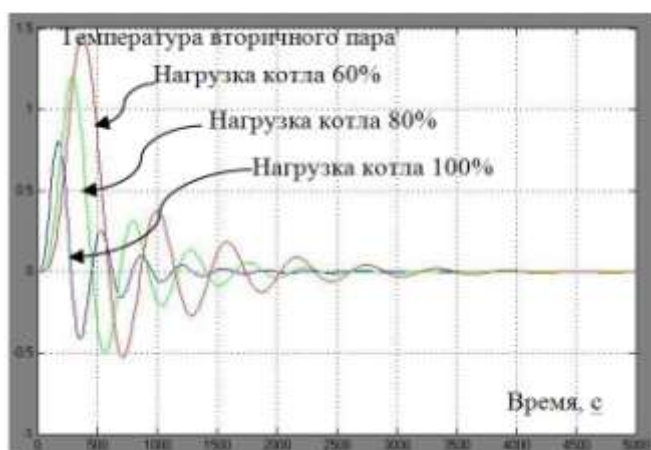


Рисунок 6.в Чин, Хронс, Ресвик 20%

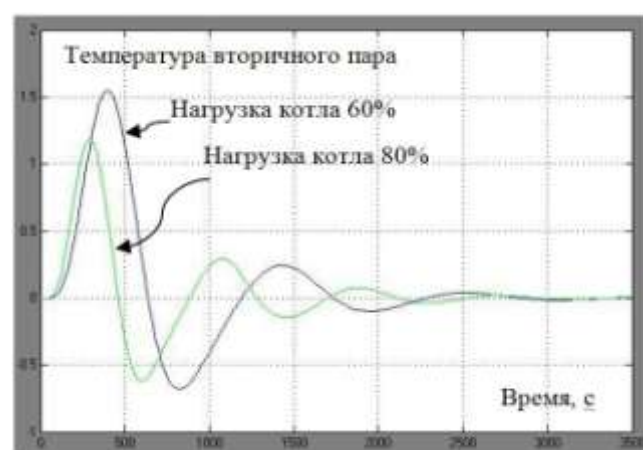


Рисунок 6.г Полученные зависимости

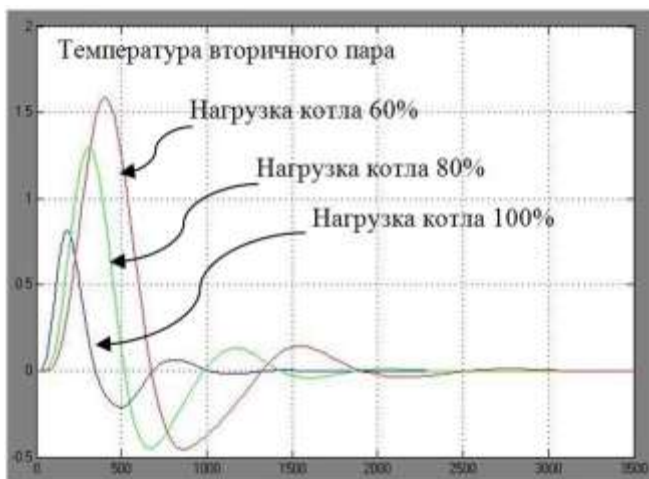


Рисунок 6.д Оптимальные настройки

Литература

1. Денисенко, В. ПИД – регуляторы: принципы построения и модификации. Ч. 1.//Современные технологии автоматизации. – 2006. - №4. – с. 66-74.
2. Денисенко, В. ПИД – регуляторы: принципы построения и модификации. Ч. 2.//Современные технологии автоматизации. – 2007. - №1. – с. 78-88.
3. Денисенко, В. ПИД – регуляторы: вопросы реализации. Ч. 1.//Современные технологии автоматизации. – 2007. - №4. – с. 86-97.
4. Денисенко, В. ПИД – регуляторы: вопросы реализации. Ч. 2.//Современные технологии автоматизации. – 2008. - №1. – с. 86-97.
5. Increasing Customer Value of Industrial Control Performance Monitoring – Honeywell’s Experience/ Lane Desborough1 and Randy Miller, Honeywell Hi-Spec Solutions - Thousand Oaks, CA 91320
6. Штейнберг, Ш. Е. Проблемы создания и эксплуатации эффективных систем регулирования/ Ш. Е. Штейнберг и др. // АСУ для промышленных предприятий. – 2007. - №7 – С. 1-5.
7. Писарев, А. В. Сравнительные исследования расчётных методов определения параметров настроек промышленных ПИД – регуляторов/ А. В. Писарев, С. И. Новиков //Энергетика и теплотехника. Сборник научных трудов. Вып. 11. - НГТУ, 2007. - с. 191-200.

8. Wen. Tan. Comparison of some well-known PID tuning formulas/ Wen. Tan. Jizhen Liu, Tongwen Chen, Horacio. J. Marquez // Computers and Chemical Engineering. -2006. - № 30. –р. 1416-1423.

9. Давыдов, Н. И. Определение параметров настройки ПИД – регулятора по переходной характеристике объекта управления/ Н. И. Давыдов, О. М. Идзон, О. В. Симонова // Теплоэнергетика. - 1995. - №10. - с. 17-22.

10. Дудников, Е. Г. Основы автоматического регулирования тепловых процессов / Е. Г. Дудников - М.: госэнергоиздат., 1956. – 264 с.

11. Ротач, В. Я. Теория автоматического управления: Учебник для вузов. – 3-е изд., М.: Издательство МЭИ, 2005. – 400 с.

12. Astrom K. J. Advanced PID control/ K. J. Astrom, T. Hagglund – ISA (The instrumentation, Systems, and Automation Society), 2006 – 460 p.

13. Balas, G.L. μ analysis and Synthesis Toolbox – for use with MATLAB / Balas, G.L. [and oth.] - MUSEN and The MathWorks, Inc..

14. Бараксанов, Ю. П. ПИД - регуляторы в системах автоматического регулирования/ Ю. П. Бараксанов, Н. Н. Попов // пособие для курсов.

15. Новиков, С. И. Практическая идентификация динамических характеристик объектов управления теплоэнергетического оборудования: Учеб. пособие – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – 64 с.

16. Новиков, С. И. Оптимизация автоматических систем регулирования теплоэнергетического оборудования: учеб. пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. Ч.1. – 108 с.

17. Astrom K. J. Revisiting the Ziegler-Nichols step response method for PID control/ K. J. Astrom, T. Hagglund // Journal of Process Control - 2004. - №4 - p.635-650.

18. Смирнов, Н. И. О корректности настройки ПИД - регулятора при аппроксимации переходной характеристики объекта регулирования апериодическим звеном с транспортным запаздыванием./ Н. И. Смирнов, В. Р. Сабанин, А. И. Репин // Промышленные АСУ и контроллеры – 2007. - № 1 – С. 35-39.

19. Yaniv, O. Design of PID controller satisfying gain margin and sensitivity constraints on a set of plants/ O. Yaniv, M. Nagurka // Automatica – 2004. – №40 –p. 111-1