

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ МЕТОДОВ НАСТРОЙКИ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ ПИД-РЕГУЛЯТОРОВ

НАЗАРМАМатов Шавкатжон Мамасоли угли

аспирант

АБДУЛПРАХИМ Камаль Кайоде

аспирант

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

г. Москва, Россия

В данной статье, на основе системы замкнутого контура, используются четыре показателя производительности: время нарастания, время пика, время регулирования и перерегулирование, чтобы проанализировать и сравнить производительность существующих основных методов настройки параметров PID. В конечном итоге, цель статьи – определить оптимальный метод настройки параметров PID-регулятора.

Ключевые слова: система закрытого контроля; контроллер ПИД; настройка параметров; производительность.

В настоящее время существует различные типы ПИД-контроллеров, и учебные заведения и крупные предприятия также разработали интеллектуальные контроллеры на основе алгоритмов искусственного интеллекта. ПИД-контроллер, используемый в этой системе, определяет свои параметры через классические методы настройки ПИД и отладку на месте, чтобы достичь лучшего эффекта управления. Поэтому в данной статье определяется оптимальный метод настройки параметров для ПИД-контроллеров на основе замкнутой системы управления. В первую очередь строится модель замкнутой системы управления на основе MATLAB/Simulink, затем параметры ПИД-контроллера определяются на основе

существующих методов настройки параметров ПИД, и, наконец, оптимальный метод настройки параметров дается на основе динамических показателей оценки эффективности управления, а эффективность метода проверяется.

1. Построение модели замкнутой системы управления. Для построения модели замкнутой контурной системы необходимо учитывать, что изменение сигнала выходного процесса $y(t)$ в нормальном режиме работы приводит к ответу управляющего сигнала $u(t)$, и правильно настроенный ПИД-контроллер может обеспечить точный и быстрый ответ управляющего сигнала $u(t)$ на изменение сигнала выходного процесса $y(t)$, тем самым достигая нужной производительности системы.

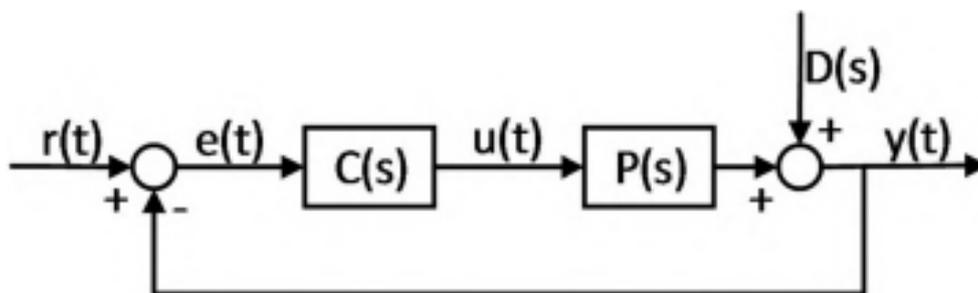


Рисунок 1. Структурная схема системы замкнутого контура.

В данной работе, на основе структурной схемы замкнутой системы управления, пред-

ставленной на рисунке 1, была создана модель симуляции замкнутой системы управ-

ления с помощью MATLAB/Simulink. Также была задана передаточная функция управляемого объекта:

$$G(s) = \frac{3}{16s+1} e^{-9s} \quad (1)$$

2. Метод настройки параметров ПИД-регулятора. ПИД-регулятор является одним из наиболее эффективных типов регуляторов. Благодаря сочетанию преимуществ различных типов регуляторов, он обеспечивает более высокое качество управления системой. Его передаточная функция выглядит следующим образом:

$$G_c(s) = K_c \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (2)$$

Настройка параметров контроллера – это процесс установки регулируемых параметров контроллера таким образом, чтобы входные и выходные характеристики контроля оптимально соответствовали требованиям и улучшили динамическую и статическую производительность системы, достигнув наилучших результатов контроля [5]. Для ПИД-регулятора настраиваемые параметры включают коэффициент пропорциональности K_c , интегральное время T_i и дифференциальное время T_d . Методы настройки параметров ПИД-регулятора могут быть аналитическими, эвристическими, на основе частотной характеристики, оптимизации и адаптивной настройки.

Метод эвристической настройки параметров разработан на основе практического опыта и обладает широкой применимостью и адаптивностью. В данной работе проведено детальное исследование этого метода на основе имеющихся исследований, и на основе системы обратной связи контроля определен оптимальный метод настройки параметров ПИД-регулятора.

2.1. Метод запаса устойчивости. Установили интегральное время $T_i = \infty$ и дифференциальное время $T_d = 0$, чтобы контроллер работал в режиме чистой пропорции. Установили начальное значение коэффициента пропорциональности малым и постепенно увеличили его, чтобы выходной отклик системы проявлял амплитудные колебания [4].

Исходя из модели замкнутой системы управления, без интегрального действия, си-

стема вводится в автоматический режим и постепенно увеличивается значение коэффициента пропорциональности K_c . До тех пор, пока отклик системы не достигнет состояния равномерных колебаний, коэффициент пропорциональности K_c будет являться критическим коэффициентом пропорциональности K_m . Соответствующий период колебаний T_m является критическим периодом колебаний, записываемым как K_m, T_m .

$$K_m = 1.387 \quad T_m = 30 \text{ сек} \quad (3)$$

На основе эмпирической формулы для настройки параметров ПИД-контроллера с использованием метода запаса устойчивости, который основан на цели получения кривой затухания 4:1, ПИД-параметры контроллера могут быть вычислены с помощью эмпирической формулы, приведенной в формуле (3):

$$\begin{aligned} K_c &= 0.6K_m = 0.8322 \\ T_i &= 0.5T_m = 15 \text{ сек} \\ T_d &= 0.125T_m = 3.75 \end{aligned} \quad (4)$$

Согласно результатам, полученным из формулы (4), установите параметры ПИД-контроллера в модели симуляции системы с обратной связью, и получите график отклика метода запаса устойчивости, как показано на рисунке 2.

Метод запаса устойчивости прост и удобен в применении, однако у этого метода есть ограничения в использовании. С точки зрения технологического процесса, во-первых, алгоритм требует, чтобы управляемая величина могла выдержать равномерные колебания. Во-вторых, объект управления должен иметь второй порядок или более высокий порядок, или иметь чисто запаздывающее звено, иначе при управлении только пропорциональным регулятором система не сможет достичь состояния равномерных колебаний, и результаты настройки параметров ПИД-регулятора не будут получены.

2.2 Метод затухающих колебаний. В замкнутой системе управления, под действием чистого пропорционального контроллера, постоянно регулируется пропорциональное усиление K_c от большего к меньшему, и добавляется скачкообразный помеховой сигнал для наблюдения процесса затухания выходного отклика до появления кривой затухания

4:1. В этот момент пропорциональное усиление K_c называется усилением затухания 4:1, обозначается символом K_s , а расстояние между двумя соседними пиками называется периодом затухания 4:1 и обозначается символом T_s . Исходя из модели замкнутой системы управления, пропорциональное усиление K_c постоянно регулируется до получения кривой затухания 4:1 [2].

$$K_s = 0.7 \quad T_s = 34.63 \text{ сек} \quad (5)$$

Согласно формуле (5), получаем значение K при L , используя метод затухающих кривых для настройки параметров ПИД контроллера.

$$\begin{aligned} K_c &= 0.8K_s = 0.56 \\ T_i &= 0.5T_s = 10.92 \text{ сек} \\ T_d &= 0.1T_s = 3.64 \text{ сек} \end{aligned} \quad (6)$$

Согласно результатам, показанным в фор-

муле (6), устанавливаем параметры ПИД-контроллера в модели имитации замкнутой системы управления, и получаем кривую отклика метода затухающих кривых, как показано на рисунке 2.

2.3 Метод Коэна-Куна. Метод реакционных кривых чувствителен к сравнительному значению τ/T . Джон Г. Коэном и Генрих Ф. Кун провели дополнительное исследование на основе одной и той же модели и предложили еще один набор формул настройки, связанных с сравнительным значением τ/T [3]. Формулы настройки приведены в таблице 1 и называются методом реакционных кривых Коэна-Куна. Эта формула обеспечивает хорошую согласованность для разных значений отношения τ/T .

Таблица 1

ПАРАМЕТРЫ ПИД-КОНТРОЛЛЕРА МЕТОДА КОЭНА-КУНА

Закон управления	Параметры контроллера		
	K_c	T_i	T_d
ПИД	$K\tau \left[\frac{4}{3} + \frac{\tau}{4T} \right]$	$\tau \left[\frac{32 + 6\tau/T}{13 + 8\tau/T} \right]$	$\frac{T}{11 + 2\tau/T}$

Согласно формуле (1), известно, что усиление объекта управления K , постоянная времени T и задержка времени τ равны:

$$K = 3, T = 16, \tau = 9. \quad (7)$$

Подставляя результаты, показанные в формуле (7), в таблицу 1 с параметрами метода реакционных кривых Коэна-Куна, получаем параметры настройки ПИД-контроллера K_c , T_i и T_d , то есть:

$$K_c = 0.8735, T_i = 18.2 \text{ сек}, T_d = 2.969. \quad (8)$$

Согласно результатам, показанным в формуле (8), устанавливаем параметры ПИД-контроллера в модели имитации замкнутой системы управления и получаем кривую отклика метода реакционных кривых Коэна-Куна, как показано на рисунке 2.

2.4. Метод проб и ошибок на месте. Метод проб и ошибок – это метод постоянной настройки параметров ПИД-контроллера на основе наблюдений за системой и ее откликом. В процессе наблюдения за кривыми от-

клика, параметры ПИД-контроллера постоянно корректируются до тех пор, пока не будет достигнут удовлетворительный результат управления [1; 6].

В общем случае, увеличение пропорционального коэффициента K_c ускоряет скорость отклика системы и повышает ее быстродействие. Однако слишком большой пропорциональный коэффициент может привести к чрезмерному превышению установившегося значения, а иногда и к колебаниям, что снижает стабильность системы. Кроме того, слишком большой пропорциональный коэффициент может вызвать большие ошибки в системе.

Уменьшение времени интегрирования T_i усиливает интегральное действие, уменьшает статическую ошибку системы и способствует сокращению времени, необходимого для устранения статической ошибки. Однако слишком большое время интегрирования может увеличить перерегулирование и снизить стабильность системы.

Увеличение времени дифференцирования T_d ускоряет скорость отклика системы, опережает отклик и сокращает перерегулирование, но ухудшает способность системы подавлять помехи. Кроме того, неправильная настройка может привести к нестабильному состоянию системы.

Поэтому при методе проб и ошибок обычно следует использовать характеристики пропорционального коэффициента K_c , времени интегрирования T_i и времени дифференцирования T_d , и проводить настройку системы сначала по пропорциональному коэффициенту, затем по интегральному и, наконец, по дифференциальному.

2.4.1. Настройка пропорциональной составляющей. Устанавливаем время интегрирования T_i на бесконечность, а время дифференцирования T_d на ноль, чтобы устранить интегральное и дифференциальное действия, заставив систему работать под управлением чистого пропорционального контроллера. Регулируем пропорциональный коэффициент K_c , изменяя его от меньшего к большему, и наблюдайте за откликом системы до тех пор, пока скорость отклика не станет достаточно быстрой и перерегулирование не будет в пределах определенного диапазона.

2.4.2. Настройка интегральной составляющей. Чисто пропорциональная система управления не может достичь нулевой статической погрешности, поэтому необходимо добавить интегрирующее звено. В процессе настройки время интегрирования T_i постепенно уменьшается от большего к меньшему, наблюдая изменение выходного сигнала системы, пока не достигнет нулевой погрешности. В этот момент перерегулирование увеличивается на основе исходных данных, поэтому необходимо немного снизить пропорциональный коэффициент K_c .

2.4.3. Настройка дифференциальной составляющей. Если система после настройки пропорциональной и интегральной составляющих все еще не может достичь удовлетворительного результата отклика, следует добавить дифференциальное звено. Во время настройки время дифференцирования T_d постепенно увеличивается с меньшего значе-

ния, наблюдая за перерегулированием и стабильностью системы. В то же время соответствующим образом микрорегулируются пропорциональный коэффициент K_c и время интегрирования T_i , пока статическая погрешность и скорость отклика системы не удовлетворят требованиям управления.

Согласно процессу настройки параметров методом проб и ошибок на месте, изложенному выше, настройте параметры ПИД-контроллера в замкнутой системе управления. Когда пропорциональный коэффициент K_c , время интегрирования T_i и время дифференцирования T_d равны значениям, показанным в формуле (9), система дает наилучший результат отклика. Полученная графика отклика метода проб и ошибок на месте представлена на рисунке 2.

$$K_c = 0.55 \quad T_i = 22 \text{ сек} \quad T_d = 3 \text{ сек} \quad (9)$$

3. Динамические показатели производительности. Динамические показатели производительности являются важным критерием для оценки качества замкнутой системы управления. Динамические показатели включают время нарастания, время пика, время регулирования и перерегулирование. Время нарастания t_r – это время, необходимое для того, чтобы отклик впервые поднялся от нуля до конечного значения. Время пика t_p – это время, необходимое для достижения первого пика отклика после превышения его конечного значения. Время регулирования t_s – это минимальное время, за которое отклик достигает и сохраняет значения в пределах $\pm 5\%$ или $\pm 2\%$ ошибки от конечного значения. Перерегулирование $\sigma\%$ – это процентное отношение максимального отклонения отклика $y(t_p)$ от конечного значения $y(\infty)$ к разности σ_p и конечному значению $y(\infty)$.

$$\sigma\% = \frac{y(t_p) - y(\infty)}{y(\infty)} \times 100\% \quad (10)$$

Затухающее соотношение – это соотношение между двумя последовательными максимальными ошибками. Установившаяся ошибка – это разница между установившимся значением системы и заданным входным значением.

На основе динамических показателей про-

изводительности замкнутой системы управления производится сравнительный анализ результатов отклика, полученных с использованием различных методов настройки пара-

метров ПИД-регулятора. Кривые отклика системы, полученные с использованием разных методов настройки параметров, представлены на рисунке 2.

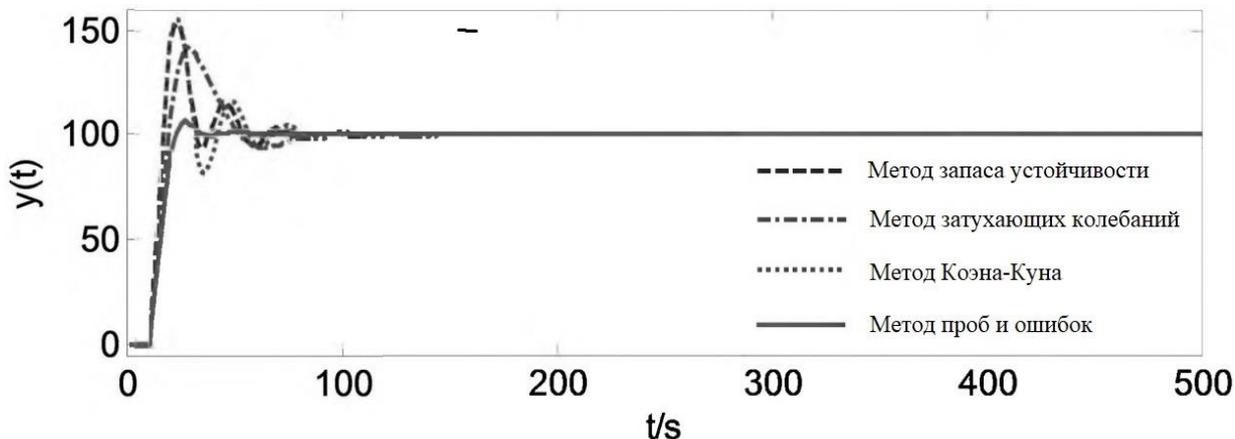


Рисунок 2. Сравнительный график кривых отклика с использованием оптимальных методов настройки параметров

На основе анализа динамических показателей производительности контрольной системы и кривых отклика четырех методов настройки параметров (см. таблицу 2) можно сделать следующие выводы: кривые отклика ПИД-замкнутой системы, полученные с использованием метода запаса устойчивости и метода Коэна-Куна, в основном совпадают. В сравнении с методом Коэна-Куна метод запас устойчивости дает меньшую перерегулировку и более высокую стабильность. Метод затухающих колебаний дает кривую отклика ПИД-замкнутой системы с большим временем за-

держки и пиковым временем отклика по сравнению с метода запаса устойчивости и методом Коэна-Куна, но степень колебаний системы снижается. В то же время, кривая отклика ПИД, полученная с использованием метода проб и ошибок на месте, имеет немного большее время нарастания и пиковое время по сравнению с другими тремя методами, но время, необходимое для достижения стабильности системы, короче, а перерегулировка меньше и стабильность выше. Таким образом, метод проб и ошибок на месте превосходит другие три метода по производительности.

Таблица 2

ДИНАМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДАХ НАСТРОЙКИ ПАРАМЕТРОВ

	Время нарастания	Пиковое время	Время регулирования	Перерегулировка
Метод запаса устойчивости	17 сек	22 сек	60 сек	53.3 %
Метод затухающих колебаний	19 сек	27 сек	70 сек	41.4 %
Метод Коэна-Куна	17 сек	22 сек	59 сек	54.9 %
Метод проб и ошибок	22 сек	26 сек	28 сек	6.6 %

Выводы. В данной статье на основе существующих исследований и замкнутой системы управления были проанализированы и сравнены четыре основных метода настройки параметров: метода запаса устойчивости, метод затухающих колебаний, метод Коэна-Куна и метод проб и ошибок на месте. На основе результатов анализа был определен наилучший метод настройки параметров для ПИД-регулятора. Метод проб и ошибок на месте превосходит по

производительности другие три метода, однако, в реальном производстве этот метод может потребовать длительного времени наладки. В этом случае можно предварительно определить параметры ПИД-регулятора с использованием Метода затухающих колебаний в качестве отправной точки, а затем корректировать производительность регулятора на основе практического опыта для достижения ожидаемых характеристик системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бутенко Ю.И., Казанцева Е.С., Сидняев Н.И. Физические основы приборостроения // Физические основы приборостроения. – 2022. – Т. 11. – № 1. – С. 48-63.
2. Быстрова С.В., Серікулы Т.Ш., Кийсанов Е.К. Методы настройки промышленных систем автоматического регулирования // Повышение качества образования, современные инновации в науке и производстве. – 2017. – С. 438-440.
3. Кошляков П.С., Медведев Е.Ю., Гусаров А.В. Исследование влияния величины приращения уставки на результаты автоматического расчета коэффициентов усиления ПИД-регулятора // XV Королевские чтения [Электронный ресурс]: междунар. молодеж. науч. конф., посвящ. 100-летию со дня рождения ДИ Козлова: сб. тр.: 8-10 окт. 201. – 2019. – С. 509-510.
4. Репин А.И., Сабанин В.Р., Смирнов Н.И. Алгоритм оптимальной настройки реальных ПИД регуляторов на заданный запас устойчивости // Современные методы и алгоритмы систем автоматизации в энергетике. – 2010. – № 4. – С. 9.
5. Сидорова А.А. Определение наиболее эффективного метода настройки ПИД-регулятора // Проблемы информатики. – 2012. – № 5. – С. 143-150.
6. Цзянин Ч. Проектирование системы контроля температуры перегретого пара для энергоблока мощностью 1000 МВт и настройка системы управления на основе многоцелевой оптимизации // 13.03. 01 Теплоэнергетика и теплотехника. – 2023.

INVESTIGATION OF OPTIMAL PARAMETER TUNING METHODS FOR PID CONTROLLERS

NAZARMAMATOV Shavkatjon Mamasoli ugli
Postgraduate Student
ABDULRAHIM Kamal Kayode
Postgraduate Student
National Research Nuclear University «MEPhI»
Moscow, Russia

In this article, based on the closed-loop system, four performance indices are used: rise time, peak time, settling time, and overshoot, to analyze and compare the performance of existing major PID parameter tuning methods. Ultimately, the goal of the article is to identify the optimal parameter tuning method for the PID controller.

Keywords: closed-loop control system; PID controller; parameter tuning; performance.