

Д. А. Гринюк, доц., канд. техн. наук;  
 Н. М. Олиферович, ст. преп.;  
 М. А. Карабань, студ.; Д. О. Новицкая, студ.  
 (БГТУ, г. Минск)

## ПРАКТИКА НАСТРОЙКИ ПИД-РЕГУЛЯТОРОВ

Элмер Сперри разработал первый ПИД-регулятор в 1911 году для ВМС США [1]. Окончательно ПИД регулирование, близкое к нынешнему виду, было предложено компаниями Taylor Instrument Company и Foxboro Instrument Company концу 40-х. Первые простые алгоритмы настройки регуляторов были сформулированы в 1942 году Циглером и Николсом. Уже со второй половины прошлого века простой настройки ПИД-регулятора оказалась недостаточно. Началось бурное развитие как методов настройки с целью достижения конкретных целей (автонастройка [2], робастная и оптимальная настройка), так и модификации классических форм ПИД-регуляторов [3] с целью улучшения функционирования: интеллектуальный ПИД-регулятор, нечеткий ПИД, ПИД дробного порядка [4], нелинейный регулятор [5].

Классическими методами настройки ПИД-регулятора считаются метод «проб и ошибок», замкнутый и разомкнутый методы Циглера-Николса, метод настройки реле, метод Коэна-Куна, частотные методы настройки через диаграмму Боде или Найквиста путем формирования запаса по устойчивости. С развитием вычислительной мощности компьютеров появилась возможность оптимизировать настройки регулятора с помощью интегральных критериев: интеграл абсолютной ошибки (*IAE*); интеграл квадратичной ошибки (*ISE*); интеграл времени и абсолютной ошибки (*ITAE*):

$$IAE = I_1 = \int_0^{\infty} |x| dt ; \quad (1)$$

$$ISE = I_2 = \int_0^{\infty} x^2 dt ; \quad (2)$$

$$ITAE = I_3 = \int_0^{\infty} |x| t dt . \quad (3)$$

Здесь приведены самые популярные, но есть и другие решения [5]. Использование интегральных критериев является универсальным решением и применим как для линейных, так и нелинейных вариантов ПИД-регулирования. Сложные системы и требования к производительности разработчика контроллера требуют внедрения новых методов проектирования настройки после появления классических мето-

дов настройки ПИД-регуляторов. В 1988 году Fong-Chwee и др. представили самонастраивающиеся ПИД-регуляторы с помощью метода назначения полюсов. В нем обсуждались три типа самонастраивающихся ПИД-регуляторов, которые могут обеспечить лучший контроль над процессами мертвого времени различной природы. Аналогично, A. Besharati Rad и др. был предложен новый метод самонастройки. Koivo и Tanttou провели обзор различных методов настройки ПИД-регулятора для технологий SISO (один вход, один выход) и MIMO (несколько входов, несколько выходов). Алгоритм, разработанный для проектирования контроллера Л.А. Агирре, выполнен на основе сопоставления коэффициентов заполнения и марковских параметров. Нечеткие, генетические алгоритмы и нейронные сети тоже нашли широкое применение для разработки методов настройки ПИД-регуляторов.

Л. Агирре предложил простую структуру регулятора, которую можно найти из передаточной функции объекта  $G(s)$  и  $H(s)$  в качестве эталонной модели. Этот тип представления можно использовать при настройке следящего ПИД-регулятора. Брайан Портер и А. Х. Джонс предложили методы генетических алгоритмов в качестве альтернативного способа настройки цифрового ПИД-регуляторы. Этот алгоритм очень привлекателен, поскольку даже для цифровых ПИД-регуляторов для сложных многопараметрических объектов с высокоинтерактивной динамикой можно легко применять базовый подход. Кроме того, Дж. К. Шен предложил новый метод настройки и оценки производительности. Руано и др. предложили коннекционистский подход к автонастройке ПИД-регулятора, который заключается в определении требуемых значений параметров ПИД с использованием интегральных показателей переходного процесса в качестве входных данных для нейронных сетей.

Альберто Лева в 1993 году предложил релейный алгоритм для автоматической настройки ПИД-регулятора, который предполагает структуру модели процесса и обеспечивает настройку регулятора путем определения одной точки частотной характеристики процесса. В 1993 году Чжуан и Атертон оценили метод, необходимый для достижения оптимальных настроек их ПИД-регулятора. Кроме того, они описали процедуру автонастройки для определения диагонального ПИД-регулятора для системы MIMO. В этом методе рассматриваются два релейных регулятора, используемые для достижения критической частоты и коэффициента усиления процесса, используемого в формулах настройки. Пулен и Померло представили системный метод настройки ПИ и ПИД. Этот метод настройки основан на специфика-

ции максимального пикового резонанса, которая приводит к простым выражениям параметров настройки и графически иллюстрируется диаграммой Николса. В 1998 г. W. Tan et al. представили метод настройки ПИД-регулятора путем формирования контура и управления  $N_{\infty}$  для стабильных и интегрирующих процессов. Большое применение находит метод на адаптации частотной характеристики процесса к конкретной структуре. В структуре адаптивного управления, представленной Хаунгом и др., рассмотрены два адаптивных контура.

Чтобы гарантировать надежную стабильность системы, первый контур оценивает и настраивает контроллер в режиме онлайн, не делая ставки на номинальные расчетные характеристики. Вторым контуром выполняется периодическое оперативное обнаружение при возникновении ошибок моделирования и перенастраивает контроллер.

В целом, несмотря на разработку альтернативных ПИД-регулируемых решений, использование данного типа регуляторов в промышленности скорее увеличивается, чем уменьшается. Исследования в области настройки ПИД-регуляторов остаются весьма актуальными.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Bennett S. The past of PID controllers. // Ann. Rev. Control. 2000 V. 25, p.43–53.
2. Åström K.J., Hägglund T., Hang C.C., Ho W.K. Automatic tuning and adaptation for PID controllers-a survey // Contr. Eng. Pract. 1(4), p.699–714
3. Анализ эффективности ПИД-регуляторов с двумя степенями свободы с помощью интегральных критериев / Д. А. Гринюк [и др.] // Труды БГТУ. Сер. 3, Физ.-мат. науки и информатика. 2018. № 2. С. 82–88.
4. Zhenbin W., Zhenlei W., Guangyi C., Xinjian Z. Digital implementation of fractional order PID controller and its application. // J Syst Eng Electr 2005, 16(1), p. 116–122
5. Сухорукова И. Г., Гринюк Д. А., Орбей И. О. Применение в ПИД-законе регулирования нелинейных функций преобразования ошибки // Труды БГТУ. 2013. № 6: Физ.-мат. науки и информатика. С. 95–98.