

УДК 62-529

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ЦИГЛЕРА-НИКОЛЬСА,
CHR И КОЭНА-КУНА ДЛЯ НАСТРОЙКИ ПИД-РЕГУЛЯТОРА
COMPARATIVE ANALYSIS OF ZIEGLER-NICHOLS, CHR AND
COHEN-KUHN METHODS FOR PID CONTROLLER TUNING**

В.А. Макогон, Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,
г. Москва, г. Зеленоград

Аннотация: В данной работе сравниваются 3 метода настройки ПИД-регулятора: настройка с использованием Чина-Хронеса-Ресвика, настройка с использованием метода Циглера-Никольса и настройка с использованием метода Чина-Коэна-Куна. Целью работы является выявление наиболее оптимального метода настройки с наименьшим перерегулированием.

Ключевые слова: ПИД-регулятор, автоматизация, метод Коэна-Куна, метод Циглера-Никольса, метод Чина-Хронеса-Ресвика, метод CHR, коллекторный электродвигатель, датчик.

Abstract: In this work, 3 methods of tuning the PID controller are used: tuning using the Chin-Hrones-Reswick method, tuning using the Ziegler-Nichols method and tuning using the Chin-Cohen-Kuhn method. The goal of the work is to identify the most optimal tuning method with the least overshoot.

Keywords: PID controller, automation, Cohen-Kuhn method, Ziegler-Nichols method, Chin-Hrones-Resvik method, CHR method, commutator electric motor, sensor.

Электродвигатели и приводы играют ключевую роль в современной технике, обеспечивая вращательное движение при подаче напряжения. Благодаря механизмам преобразования вращения в поступательное движение, становятся возможны системы с управляемым перемещением объекта вдоль одной оси.

Для точного контроля таких систем используется датчик положения, регулирующий скорость двигателя. Высокая точность исполнения необходима во многих приложениях, связанных с этой установкой, поэтому в подобных устройствах широко применяется ПИД-регулятор — алгоритм, обеспечивающий стабильность и минимизацию отклонений за счёт пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих.

Общая информация.

ПИД-регулятор — это алгоритм, который управляет системой, минимизируя её отклонение от заданного значения. Он работает на основе

ошибки, вычисляемой как разница между текущим выходным значением системы ($e_{\text{тек}}$) и целевым значением ($e_{\text{уст}}$):

$$e(t) = e_{\text{уст}} - e_{\text{тек}}$$

Когда ошибка вычислена, она проходит через три звена: **пропорциональное (P)**, **интегральное (I)** и **дифференциальное (D)**.

Пропорциональное (P) звено реагирует на текущую ошибку, обеспечивая быструю реакцию системы. Его передаточная функция зависит от коэффициента K_p . Однако этот компонент не устраняет статическую ошибку. П-звено имеет следующее уравнение:

$$u_p(t) = K_p e(t)$$

Интегральное (I) звено учитывает накопленную ошибку, что позволяет системе в установившемся режиме достичь нулевого отклонения. Влияние интегратора определяется коэффициентом K_i , но его чрезмерное увеличение может замедлить реакцию и вызвать перерегулирование. И-звено имеет следующее уравнение:

$$u_i(t) = K_i \int_0^t e(t) dt$$

Дифференциальное (D) звено реагирует на скорость изменения ошибки, снижая колебания и ускоряя стабилизацию системы. Его влияние определяется коэффициентом K_d , но слишком высокая дифференциальная составляющая может сделать систему чувствительной к шумам и вызвать неустойчивость. Д-звено имеет следующее уравнение:

$$u_d(t) = K_d \frac{de}{dt}$$

Сложив все три звена, получаем итоговую функцию ПИД-регулятора, определяющую реакцию системы на ошибку во времени по уравнению:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de}{dt}$$

Правильный подбор коэффициентов K_p , K_i , K_d критически важен для стабильной и точной работы системы. Завышенные значения могут привести к колебаниям и неустойчивости, заниженные — к медленной реакции и остаточной ошибке. Оптимальная настройка позволяет достичь точности, устойчивости и быстрого переходного процесса без лишних отклонений. Для случаев, где метод не позволяет найти K_i и K_d напрямую, а только лишь T_i и T_d будем считать, что:

$$K_i = 1/T_i, K_d = T_d.$$

Вручную настраивать коэффициенты очень сложно и времязатратно, поэтому был разработан ряд методов для их вычисления. Самыми популярными из них являются метод Циглера-Никольса, метод Чина-Хронеса-Ресвика, или CHR, и метод Козна-Куна. Рассмотрим каждый из них на примере апериодического звена 1-го порядка с запаздыванием,

$$W(p) = \frac{Ke^{-Lp}}{Tp + 1}$$

L — время запаздывания системы

График реакции системы с $K \approx 3$. Показывает выход $y(t)$ в зависимости от времени t . Кривая начинается в точке $(0, -0.5)$, проходит через точку $(1, 0)$ и асимптотически приближается к значению 3. Отмечены время запаздывания L и время регулирования T . Горизонтальная линия на уровне 1.936% (63.2%) и вертикальная линия в момент времени T определяют точку на кривой. Также показана касательная к началу кривой, пересекающая горизонтальную линию.

Метод Циглера-Никольса.

$$K_p = \frac{1.2}{a}, T_i = \frac{0.9L}{K_p}, T_d = \frac{0.5L}{K_p} \quad [1]$$

Подставив значения, полученные с рис.1, получаем:

$$K_p = 2.420, T_i = 0.372, T_d = 0.207$$

На рис. 2. Представлен результат работы системы с ПИД-регулятором, имеющим такие значения параметров, вычисленные с помощью формул [1].

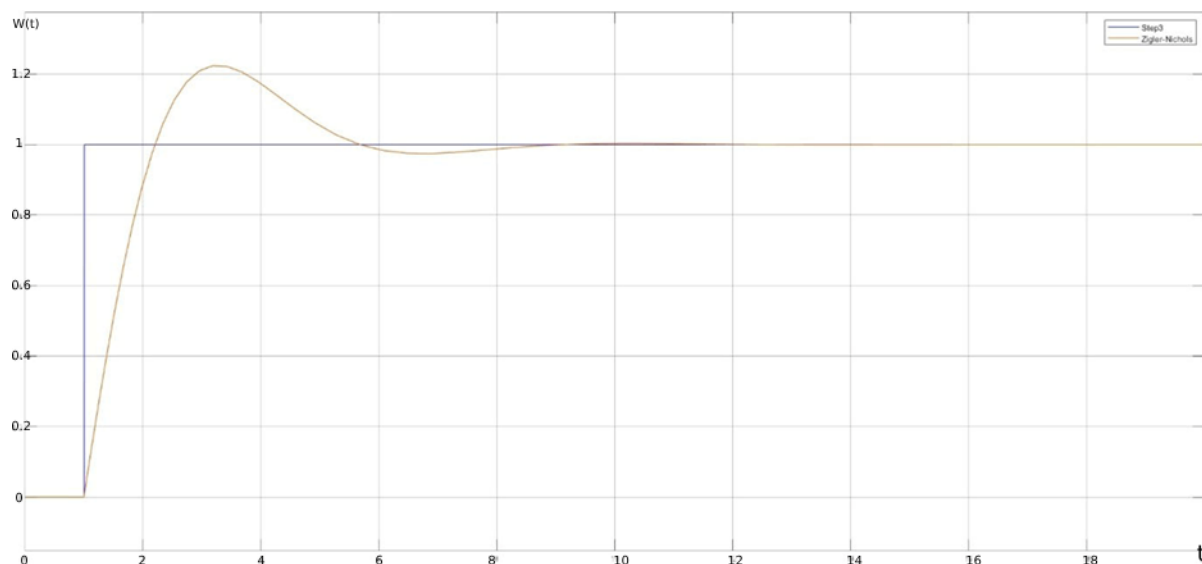


Рис. 2. Результат работы системы с ПИД-регулятором, имеющим значения, полученные с применением метода Зиглера-Никольса.

Метод CHR.

Метод Чина-Хронеса-Ресвика, предложенный в 1952 году, служит альтернативой методу Циглера-Никольса [3]. Его основное преимущество заключается в том, что для настройки регулятора нет необходимости знать точную математическую модель управляемой системы. В отличие от метода Циглера-Никольса, данный подход считается более безопасным, поскольку не требует доведения системы до предела устойчивости.

Процесс настройки параметров регулятора во многом схож с методом Циглера-Никольса: сначала строится переходная характеристика разомкнутой системы. Затем на графике определяется точка перегиба, через которую проводится касательная. Эта линия пересекает как горизонтальную ось, так и уровень установившегося значения, как это показано на рисунке 1. Для расчета коэффициентов регулятора используются специальные формулы [4], характерные для этого метода:

$$K_p = \frac{0.6T}{KL}, T_i = 2.4L, T_d = 0.42L \quad [2]$$

Подставив заданные для системы значения в эти формулы, получим следующие значения:

$$K_p = 1.2, T_i = 0.417, T_d = 0.420.$$

Подставив значения, полученные из формул [2], получаем график реакции системы, представленный на рис. 3.

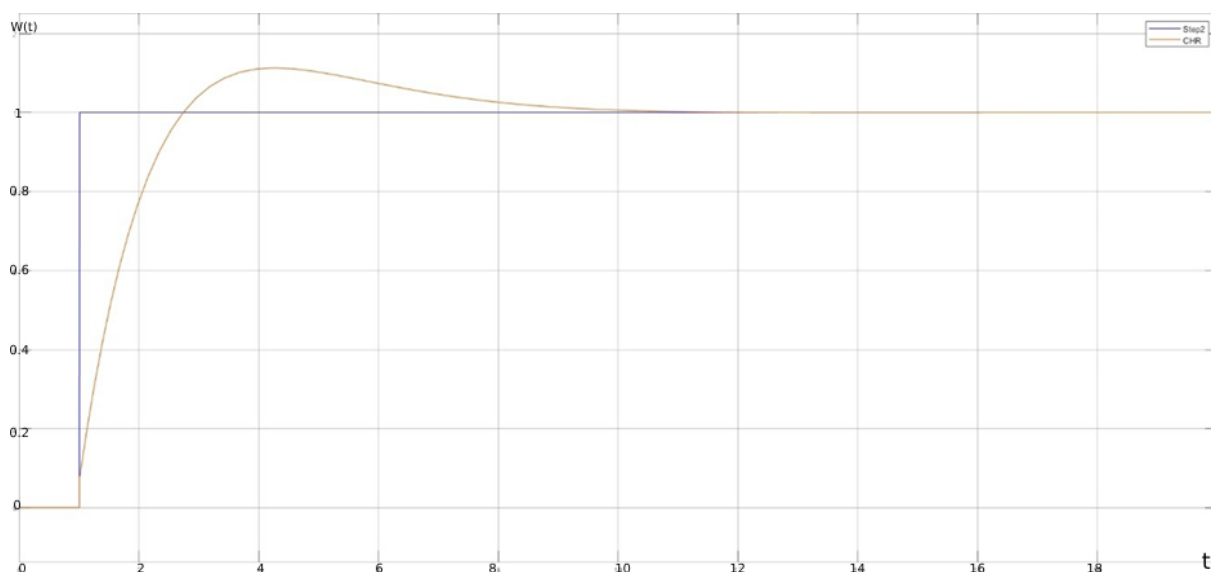


Рис. 3. Результат работы системы с ПИД-регулятором, имеющим значения, полученные с применением метода CHR.

Метод Козна-Куна.

В методе Козна-Куна для настройки ПИД-регулятора задаются три полюса обратной связи: два комплексных и один вещественный, расположенные на одинаковом расстоянии от начала координат. Полюса выбираются так, чтобы обеспечить декремент затухания $d = 4$, а их расположение корректируется для минимизации интеграла ошибки [5]. Джон Г. Козном и Генрих Ф. Куном был проведён ряд дополнительных исследований на основе одной и той же модели и ими был предложен новый набор формул, связанный с отношением $\tau=L/T$ [6]. Формулы расчёта коэффициентов регулятора основаны на аналитических и численных методах и представлены ниже:

$$K_p = KL \left(\frac{3}{4} + \frac{L}{4T} \right), T_i = L \left(\frac{32 + \frac{6L}{T}}{13 + \frac{8L}{T}} \right), T_d = \frac{L}{11 + \frac{2L}{T}} \quad [3]$$

Подставив заданные для системы значения в эти формулы, получим следующие коэффициенты:

$$K_p = 4.125, T_i = 2.302, T_d = 0.529$$

График реакции системы с ПИД-регулятором, имеющим коэффициенты, полученные с использованием метода-Козна-Куна, представлен на рис.4.

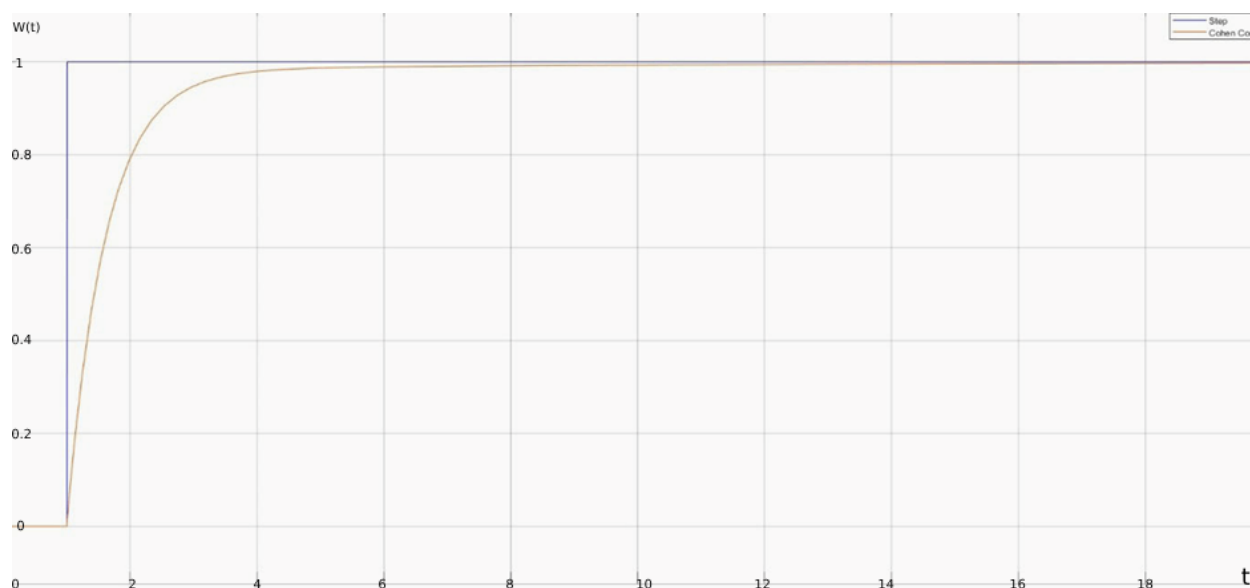


Рис. 4. Результат работы системы с ПИД-регулятором, имеющим значения, полученные с применением метода Козна-Куна.

Сравнение методов.

Для выявления наиболее оптимального метода из представленных, на рис. 5 были объединены и сопоставлены реакции всех трёх систем с ПИД-регуляторами, настроенными по всем трём методам. Проанализировав результаты, можно прийти к следующим выводам относительно каждой из систем:

- Метод Циглера-Никольса даёт неудовлетворительные результаты ввиду большого перерегулирования. Тем не менее, метод даёт наибольшую скорость реагирования системы;

- Метод CHR даёт меньший показатель перерегулирования, чем метод Циглера-Никольса, а также быстрее достигает значения K , для компенсации перерегулирования необходима дополнительная настройка;

- Метод Козна-Куна даёт значения с минимальным перерегулированием и является наиболее оптимальным среди представленных трёх, однако ввиду очень длительного времени достижения точного значения K требуется дополнительная настройка D -звена.

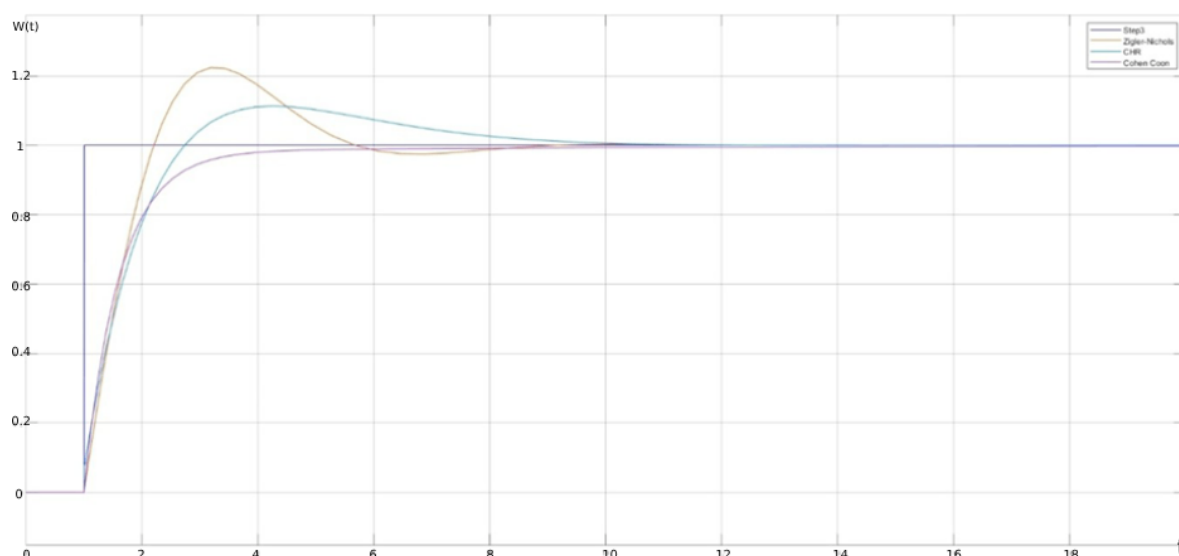


Рис. 5. Сравнение результатов работы систем с ПИД-регуляторами, имеющими значения, полученные с применением трёх методов.

Сравнив все 3 графика, можно прийти к выводу, что метод Коэна-Куна обеспечивает наименьшее перерегулирование, тогда как метод CHR имеет большие колебания, но сходится к К быстрее.

Метод Коэна-Куна можно считать наиболее оптимальным среди всех трёх, однако для увеличения скорости схождения к значению К требуется дополнительная ручная настройка.

Список литературы

1. Баканов М. В. Исследование модального способа построения Simulink-моделей ПИД-регуляторов для динамических систем первого порядка с транспортным запаздыванием / Баканов М.В., Данеев А.В, Сизых В.Н. – Текст: непосредственный // Известия Самарского научного центра российской академии наук. 2022. – №2. – Т. 24 – С. 90-96.
2. А. С. Востриков Основы теории непрерывных и дискретных систем регулирования / А. С. Востриков, Г. А. Французова, Е. Б. Гаврилов. – Текст: непосредственный // Новосибирский государственный технический университет. 2008. – 294 С.
3. Н.П. Сухарькова Анализ методов определения настроечных параметров ПИД-регулятора для энергетической системы / Н.П. Сухарькова, Т.А. Григорьева. – Текст: непосредственный // Труды Братского государственного университета. 2024. – Т. 1. – С. 56-60.
4. F. Owen Control Systems Engineering A Practical Approach / F. Owen. – Текст: непосредственный // California Polytechnic State University. 2013.
5. Д. М. Гамков Настройка пропорционально-интегрально-дифференциальных регуляторов системы обеспечения тепловым режимом астрофизического телескопа ART-XC обсерватории «Спектр-РГ» /

Д.М. Гамков, М. В. Бунтов. – Текст: непосредственный // – XIV конференция молодых учёных "Фундаментальные и прикладные космические исследования". 2017. – С. 5-24.

6. Ш.М. Назармаматов Исследование оптимальных методов настройки параметров для ПИД-регуляторов / Ш.М. Назарматов, К.К. Абдулрахим. – Текст: непосредственный // – ОБЩЕСТВО. 2023. – №2. – 24-29.