

Сравнительное моделирование дискретных регуляторов для терморегулирования в Python.

Кочетков Алексей Алексеевич

*студент, кафедра информационных технологий и систем,
Владивостокский государственный университет,
РФ, г.Владивосток
email: alexseykochetkov23@gmail.com*

Резюме: В современной техносфере системы с обратной связью играют роль «центральной нервной системы», обеспечивая точность там, где человеческая реакция или простые алгоритмы бессильны. От стабилизации дронов в турбулентном потоке до управления химическими реакторами — везде работают алгоритмы регулирования. Среди них безусловным промышленным стандартом остается ПИД-регулятор. Согласно данным Honeywell, более 97% регуляторов в таких отраслях, как нефтепереработка и целлюлозно-бумажная промышленность, используют именно ПИД-алгоритм.

Данная статья представляет собой комплексный анализ механизмов управления — фундаментальной логики обратной связи. Ключевая цель — раскрыть синергию Р, И и Д компонентов как инструментов работы с настоящим, прошлым и будущим состоянием системы.

Ключевые слова: ПИД-регулятор, обратная связь, замкнутый контур, уставка, переменная процесса, ошибка управления, пропорциональный коэффициент, интегральный коэффициент, дифференциальный коэффициент, установившаяся ошибка, перерегулирование, интегральное насыщение (windup), время нарастания, время установления, подавление возмущений, робастность, терморегулирование, фильтрация сигнала.

Comparative modeling of discrete regulators for thermal control in Python.

Kochetkov Alexsey Alekseevich

student, Department of Information Technologies and Systems,

Vladivostok State University,

Russian Federation, Vladivostok

email: alexseykochetkov23@gmail.com

Abstract: In the modern technosphere, feedback systems act as the "central nervous system," ensuring precision where human reactions or simple algorithms fall short. From stabilizing drones in turbulent flows to controlling chemical reactors—regulation algorithms are at work everywhere. Among them, the PID controller remains the unconditional industrial standard. According to Honeywell data, over 97% of controllers in industries such as oil refining and pulp and paper use the PID algorithm precisely.

This article presents a comprehensive analysis of control mechanisms—the fundamental logic of feedback. The key goal is to reveal the synergy of the P, I, and D components as tools for working with the system's present, past, and future states.

Keywords: PID controller, feedback, closed loop, setpoint, process variable, control error, proportional gain, integral gain, derivative gain, steady-state error, overshoot, integral windup, rise time, settling time, disturbance rejection, robustness, temperature control, signal filtering.

Введение

Основа стабильности системы — концепция «замкнутого контура». В отличие от разомкнутых систем, которые действуют «вслепую», замкнутый контур постоянно анализирует результат действий. Для описания этого процесса мы используем четыре базовых термина:

- **Уставка (Setpoint, SP):** Целевое значение, которого мы хотим достичь (например, давление в 5 бар);
- **Процессная переменная (Process Variable, PV):** Реальный сигнал с датчика в текущий момент;
- **Ошибка (Error, $e(t)$):** Математическая разница между целью и реальностью: $e(t) = r(t) - y(t)$, где $r(t)$ — это цель, а $y(t)$ — сигнал в текущий момент времени;
- **Управляющее воздействие ($u(t)$):** Команда, посылаемая регулятором на исполнительный механизм (мотор, клапан).

Представьте, что вы стоите на гироскутере. Глаза и вестибулярный аппарат — это датчики (PV), фиксирующие отклонение от вертикали (SP). Мозг — это регулятор, который вычисляет ошибку $e(t)$ и мгновенно дает команду мышцам ног ($u(t)$) скорректировать положение. Это и есть живой пример обратной связи: действие —> замер результата —> мгновенная коррекция.

П-регулятор: Реакция на «Сейчас»

Пропорциональный коэффициент (K_p) — это первая линия обороны. Его работа описывается уравнением:

$$u(t) = K_p \cdot e(t)$$

где: $u(t)$ — управляющий сигнал (actuator output), подаваемый на исполнительный механизм в момент времени t ; $e(t)$ — ошибка управления (control error), которая рассчитывается как разность между уставкой и текущим значением; K_p — пропорциональный коэффициент (proportional gain), определяющий реакцию системы на текущую ошибку.

Здесь сила воздействия прямо зависит от величины текущей ошибки.

- Высокий K_p делает систему «агрессивной» и быстрой, но провоцирует опасные колебания. Низкий K_p гарантирует стабильность, но делает систему вялой.

- Стратегическое ограничение: Главный враг П-регулятора — статическая ошибка (Steady-State Error). Он принципиально не может довести систему до идеального нуля, если на объект действует постоянная нагрузка.

П-регулятор подобен жесткости пружины. Чем сильнее ошибка сжимает пружину, тем сильнее она толкает в ответ. Но если на пружину постоянно давит груз, она никогда не вернется в истинную точку «ноль». Именно поэтому круиз-контроль, использующий только П-звено, никогда не удержит ровно 100 км/ч на крутом подъеме — скорость всегда будет чуть ниже.

Заметка инженера: Увеличение K_p снижает статическую ошибку, но повышает чувствительность к шумам датчиков, что может привести к «дребезгу» клапанов.

И-регулятор: Память о «Прошлом»

Чтобы устранить статическую ошибку, нам нужно научить систему «помнить» свои неудачи. Интегральная составляющая накапливает ошибку во времени:

$$u(t) = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau$$

Где:

$u(t)$ — управляющий сигнал (actuator output), подаваемый на исполнительный механизм в момент времени t ;

K_i — интегральный коэффициент (integral gain), определяющий скорость устранения накопленной статической ошибки;

$\int_0^t e(\tau) d\tau$ — интегральный терм, представляющий собой накопленную сумму (интеграл) прошлых ошибок за всё время работы системы;

Даже если текущее отклонение мизерное, за минуты накопленная сумма станет огромной и заставит регулятор дожать систему до идеала.

Критический риск: Интегральное насыщение (Windup). Если клапан уже открыт на 100%, а ошибка сохраняется (например, затор в трубе), интеграл продолжает расти «в уме». Когда затор исчезнет, регулятор не сразу закроет клапан, так как ему нужно время, чтобы «сбросить» накопленный груз. В химическом производстве это часто приводит к порче целых партий продукта или срабатыванию предохранительных клапанов.

Представьте интеграл как «терпеливого, но злопамятного наставника». Он суммирует каждую секунду вашего опоздания. Чем дольше вы не исправляете маленькую ошибку, тем сильнее растет его давление, пока вы не придете в норму.

Д-регулятор: Предсказание «Будущего»

Дифференциальное звено — это тормозная система, работающая на опережение. Она реагирует не на саму ошибку, а на скорость её изменения:

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

Где:

$u(t)$ — управляющий сигнал (actuator output), подаваемый на исполнительный механизм в момент времени t ;

K_d — дифференциальный коэффициент (derivative gain), отвечающий за реакцию на скорость изменения ошибки;

$\frac{de(t)}{dt}$ — дифференциальный терм, представляющий собой скорость изменения ошибки и позволяющий предсказать её будущее поведение.

Принцип: Если ошибка стремительно сокращается, Д-звено понимает, что мы летим к цели слишком быстро, и начинает тормозить заранее, предотвращая перелет (перерегулирование).

Риски: Главная проблема — шум. Любой «дребезг» в сигнале датчика дифференциал воспринимает как бешеную скорость изменения и выдает хаотичные удары по исполнительным механизмам.

Д-звено — это опытный вратарь. Он не ждет, пока мяч пересечет линию ворот. Он анализирует траекторию и скорость полета, перемещаясь в точку будущего соприкосновения еще до того, как мяч там окажется.

ПИД-регулятор: Симфония управления

Когда три компонента работают вместе, мы получаем «золотой стандарт» автоматизации:

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

Где:

$u(t)$ — управляющий сигнал (actuator output), подаваемый на исполнительный механизм в момент времени t ;

$e(t)$ — ошибка управления (control error), которая рассчитывается как разность между уставкой и текущим значением;

K_p — пропорциональный коэффициент (proportional gain), определяющий реакцию системы на текущую ошибку;

K_i — интегральный коэффициент (integral gain), определяющий скорость устранения накопленной статической ошибки;

K_d — дифференциальный коэффициент (derivative gain), отвечающий за реакцию на скорость изменения ошибки;

$\int_0^t e(\tau) d\tau$ — интегральный терм, представляющий собой накопленную сумму (интеграл) прошлых ошибок за всё время работы системы;

$\frac{de(t)}{dt}$ — дифференциальный терм, представляющий собой скорость изменения ошибки и позволяющий предсказать её будущее поведение.

Это синергия трех сил: Р отвечает за настоящее, I исправляет ошибки прошлого, а D прогнозирует будущее.

ПИ-регулятор: Достаточен для 90% задач, таких как управление уровнем в баке или медленные тепловые процессы.

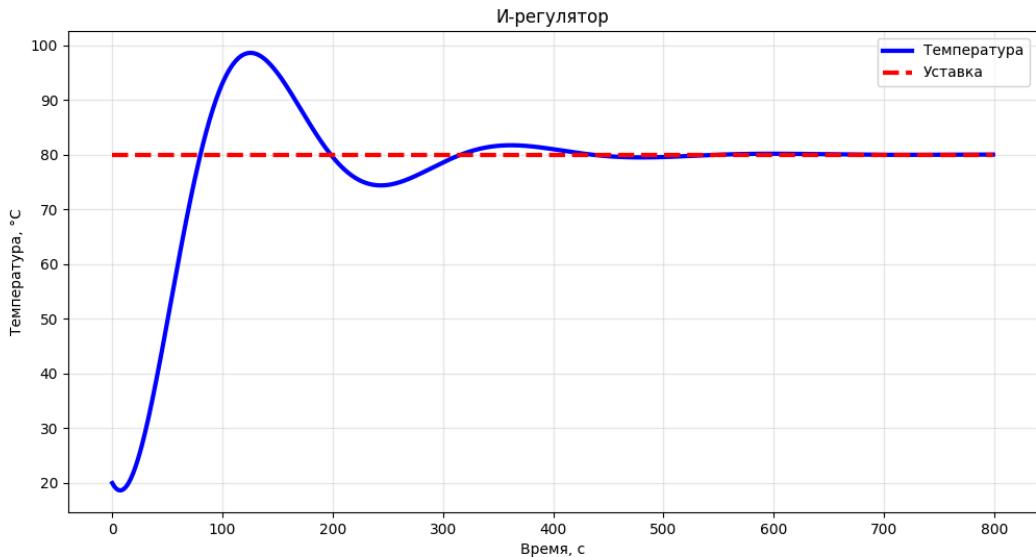
ПИД-регулятор: Необходим в динамичных системах второго порядка (прецисионное движение, стабилизация давления), где важно исключить перерегулирование при сохранении высокой скорости.

Результаты

В данном разделе представлены результаты численного моделирования работы трех типов регуляторов — интегрирующего (И), пропорционально-интегрирующего (ПИ) и пропорционально-интегрально-дифференцирующего (ПИД) — в задаче поддержания целевой температуры объекта на уровне 80 °C. Основное внимание удалено анализу таких характеристик переходного процесса, как время нарастания, величина перерегулирования и точность в установившемся режиме.

1. Интегрирующий регулятор (И)

Интегрирующий компонент формирует управляющее воздействие на основе накопленной ошибки за прошедшее время. Его основной задачей является **полное устранение установившейся ошибки**, поскольку воздействие будет расти до тех пор, пока разница между уставкой и текущей температурой не станет равной нулю. Как видно на графике, система достигает заданной температуры, однако процесс характеризуется медленным нарастанием и склонностью к возникновению колебаний при приближении к цели.

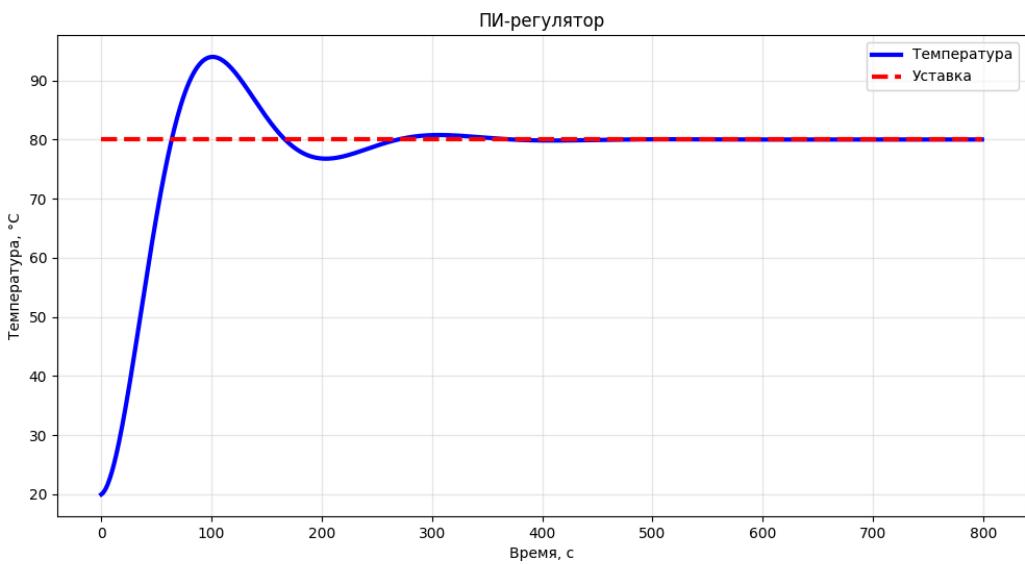


[Место для изображения 1: График работы И-регулятора]

2. Пропорционально-интегрирующий регулятор (ПИ)

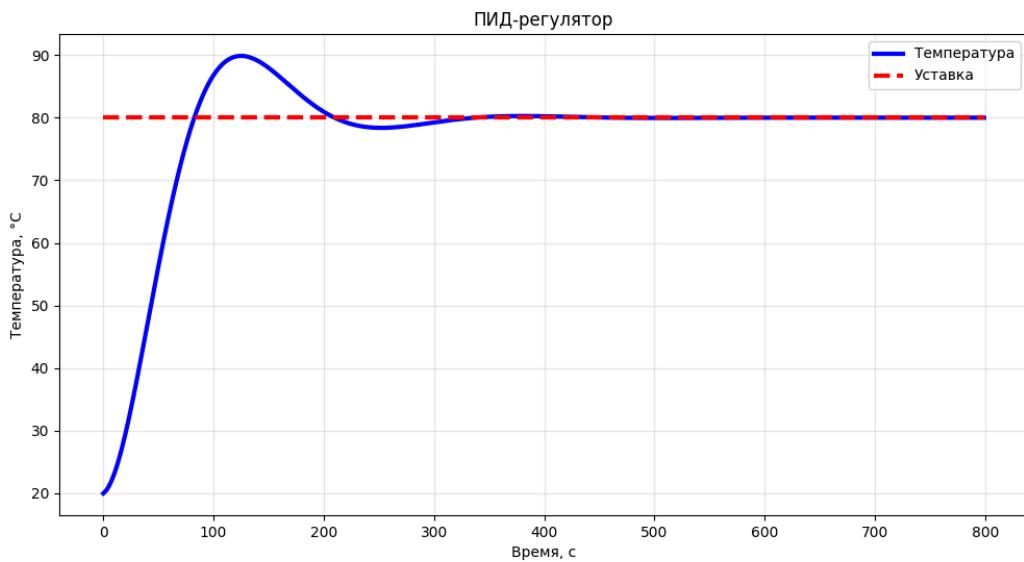
ПИ-регулятор объединяет реакцию на текущую ошибку (пропорциональная часть) и накопленный опыт (интегральная часть). Данный тип устройства является наиболее распространенным в промышленности, обеспечивая надежное управление более чем в 95% контуров регулирования.

Пропорциональная составляющая значительно **ускоряет реакцию системы**, заставляя температуру быстрее стремиться к 80 °C. Однако, согласно теоретическим данным, сочетание этих компонентов часто приводит к **перерегулированию (overshoot)** — временному превышению целевого значения перед окончательной стабилизацией.



[Место для изображения 2: График работы ПИД-регулятора]

3. Пропорционально-интегрально-дифференцирующий регулятор (ПИД) Полный ПИД-регулятор дополнен дифференциальной составляющей, которая прогнозирует будущее поведение системы на основе скорости изменения ошибки. В задачах терморегулирования, обладающих значительной инерцией, дифференциальный компонент действует как «тормоз» или амортизатор, предотвращая резкие скачки. Моделирование показывает, что ПИД-регулятор обеспечивает наиболее качественный переходный процесс: он позволяет использовать более высокие коэффициенты усиления для быстрого прогрева, одновременно **демпфируя колебания** и минимизируя перерегулирование.

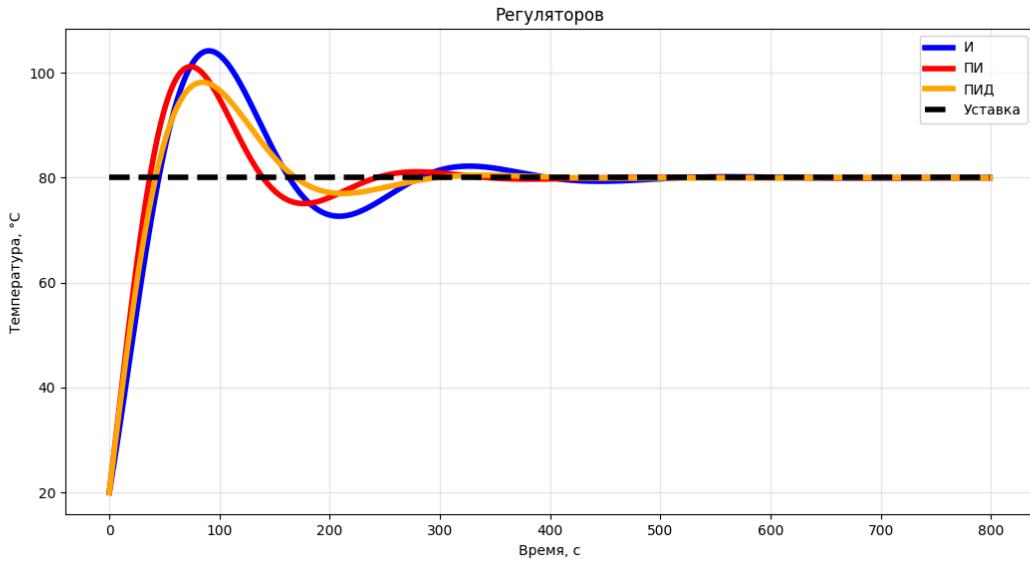


[Место для изображения 3: График работы ПИД-регулятора]

4. Сравнение эффективности алгоритмов управления

Итоговый сравнительный анализ позволяет наглядно оценить вклад каждого компонента в качество терморегулирования:

- **И-регулятор** демонстрирует инерционность, но гарантирует точность в финальной точке.
- **ПИ-регулятор** обеспечивает оптимальный баланс между скоростью достижения уставки и сложностью реализации, что подтверждает его популярность в практических приложениях.
- **ПИД-регулятор** показывает лучшие динамические характеристики, сокращая время стабилизации и обеспечивая наиболее плавный выход на заданный температурный режим.



[Место для изображения 4: Совместный график всех трех регуляторов]

Таким образом, для инерционных тепловых процессов, где критически важна скорость реакции без значительного перегрева объекта, наиболее эффективным решением является использование полной ПИД-структурь.

Обсуждение

Результаты моделирования подтверждают, что ПИД-регулятор является наиболее эффективным и универсальным алгоритмом для управления промышленными процессами, включая терморегулирование. Сравнительный анализ трех типов регуляторов выявил следующие закономерности:

1. Эффективность компонентов в управлении температурой

- И-регулятор:** Успешно устранил установившуюся ошибку, накапливая информацию о прошлых отклонениях. Однако его реакция была самой медленной, что характерно для чисто интегрального управления.
- ПИ-регулятор:** Продемонстрировал баланс, типичный для **97% промышленных контроллеров**. Пропорциональное звено ускорило реакцию на текущую ошибку, но введение интеграла привело к возникновению **перерегулирования (overshoot)** перед стабилизацией.
- ПИД-регулятор:** Показал оптимальный переходный процесс для систем с динамикой второго порядка (нагрев). Дифференциальная часть позволила «предсказать» будущую ошибку и вовремя замедлить воздействие, сработав как амортизатор и подавив колебания.

2. Ключевые компромиссы и ограничения

В ходе настройки были подтверждены классические инженерные вызовы, описанные в источниках:

- Чувствительность к шуму:** Хотя дифференциальный коэффициент (K_d) улучшает стабильность, в реальных системах он крайне чувствителен к помехам датчиков, что может потребовать дополнительной фильтрации сигнала.

- **Интегральное насыщение (Windup):** При достижении актуатором предела мощности накопление интегральной ошибки ведет к длительным переходным процессам. Это требует использования алгоритмов **anti-windup**, реализованных в профессиональном ПО, таком как LabVIEW.
- **Стабильность против скорости:** Увеличение коэффициента К_р ускоряет систему, но неизбежно снижает запас устойчивости, приводя к осцилляциям.

Заключение

Регуляторы — это не абстрактные формулы из учебника, а стратегический актив, делающий наш мир предсказуемым и безопасным. Понимание физики, стоящей за каждой переменной, превращает вас из оператора в архитектора систем. В эпоху робототехники и частной космонавтики умение «укротить» обратную связь — это базовый инженерный код.

Основная литература (цитируемая в источниках)

1. **Goodwin, G. C., Graebe, S. F., Salgado, M. E.** *Classical PID Control* (Control System Design, Prentice Hall PTR).
2. **Webb, J. W., Reis, R. A.** *PID Control of Continuous Processes* (Programmable Logic Controllers, Fourth Edition, Prentice Hall PTR).
3. **Åström, K. J., Hägglund, T.** *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning* (3rd ed., 2005). Этот источник считается одним из наиболее полных по данной теме.
4. **Mindell, D.** *Treatment of PID History* (2002). Работа посвящена истории развития и возникновения ПИД-технологий.