

Плясунов Кирилл Андреевич, магистрант,  
ФГБОУ ВО «Поволжский государственный университет  
телекоммуникаций и информатики», г. Самара

Гуленков Максимилиан Олегович, магистрант,  
ФГБОУ ВО «Поволжский государственный университет  
телекоммуникаций и информатики», г. Самара

## РЕАЛИЗАЦИЯ И ПРИМЕНЕНИЕ PID-КОНТРОЛЛЕРА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ АВТОМОБИЛЕМ

**Аннотация:** В данной статье рассмотрен PID-контроллер как универсальный инструмент для управления динамическими системами. Для демонстрации возможностей контроллера была разработана симуляция управления автомобилем в виртуальной среде Unreal Engine. Приведены результаты тестирования, демонстрирующие устойчивость, точность и гибкость предложенного подхода.

**Ключевые слова:** PID-контроллер, управление автомобилем, автопилот, симуляция, Unreal Engine, динамические системы.

PID-контроллер (Proportional-Integral-Derivative controller) является одним из наиболее популярных инструментов управления в автоматизации. Это универсальное устройство, способное адаптироваться к изменениям входных данных и внешних условий (механизм управления на основе обратной связи). Используется в широком спектре задач: от стабилизации полета дронов и поддержания скорости автомобиля до управления робототехникой и игровыми симуляциями. Помимо этого применяется в промышленных системах управления и различных других приложениях, где необходим постоянный контроль посредством модуляции без вмешательства человека [1].

Чтобы с легкостью понять PID-контроллер рассмотрим понятным для большинства пример с термостатом (контроллер «Вкл-Выкл»). Термостат оснащен датчиком, который измеряет температуру в доме и сравнивает полученное значение с регулируемым заданным значением. Если температура в помещении ниже заданного значения, обогреватель включается. При этом допускается небольшая погрешность, ведь человек врядли почувствует что обогреватель нагрел воздух на 2-3 градуса больше желаемого значения. Но если мы будем рассматривать круиз-контроль в автомобиле, то нам нужно что-то более точное чем контроллер подобного типа (иначе бы мы получили небезопасную и дерганную поездку). Существует два типа стратегий управления: управление с открытым и закрытым контуром, как показано на рисунке 1.



Рис. 1 Два типа стратегий управления



Контроллер с открытым контуром не измеряет фактический выходной сигнал в качестве эталона и поэтому не может подстраиваться под воздействие окружающей среды. Напротив, замкнутый контур берет выходное значение ( $Y$ ) и возвращает его на вход, где оно вычитается из требуемого целевого значения ( $R$ ). Затем это значение ошибки ( $e$ ) используется контроллером.

Существует четыре ключевые характеристики замкнутого контура управления, проявляющиеся в ответ на скачкообразное изменение заданного значения  $R$ :

- **Время нарастания (Rise time):** время, за которое выход системы достигает 90% от заданного значения  $R$ ;
- **Перерегулирование (Overshoot):** максимальное превышение выходным сигналом значения  $R$ , если оно имеет место;
- **Время успокоения (Settling time):** время, за которое система достигает устойчивого состояния;
- **Установившаяся ошибка (Steady-state error):** разница между заданным значением  $R$  и выходом системы  $Y$  после того, как система достигла устойчивого состояния.

В настоящее время PID-контроллер используют в области автоматического управления транспортным средством для поддержания полосы движения, удержание дистанции до других автомобилей. Они обеспечивают плавные повороты и устойчивое движение автомобиля по заданному маршруту. Мы используем PID-контроллер потому что он “достаточно хорош”, чтобы его можно было использовать в большинстве ситуаций, когда мы пытаемся управлять единой системой входных и выходных значений, и абсолютная точность не требуется [2].

PID-контроллер регулирует систему на основе трёх компонентов:

- **Пропорциональная составляющая (P)** – уменьшает текущую ошибку системы пропорционально её величине;
- **Интегральная составляющая (I)** – учитывает накопленные ошибки для уменьшения систематического отклонения (смещения);
- **Дифференциальная составляющая (D)** – предсказывает изменения ошибки и добавляет корректирующий сигнал для сглаживания резких колебаний.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de}{dt} \quad (1)$$

При реализации PID-регулятора необходимо учитывать ряд дополнительных факторов. Поскольку интегральная ошибка накапливается со временем, если система имеет постоянную ошибку интегральная ошибка будет постоянно увеличиваться. Чтобы противостоять этому, желательно иметь возможность сбрасывать интегральную ошибку на основе внешних событий.

В реальных системах интегральная и дифференциальная составляющие PID-регулятора определяются не только коэффициентом усиления, но и так называемой временной постоянной.

Для интегральной составляющей временная постоянная влияет на то, насколько далеко в прошлое учитываются данные для расчёта интеграла. Это ограничивает объём «истории», хранящейся в интеграле, который в противном случае мог бы накапливать информацию, начиная с момента инициализации контроллера. Наиболее эффективно это реализуется с использованием скользящего среднего для вычисления интегральной ошибки. При таком подходе на каждом шаге текущая интегральная ошибка уменьшается на  $(1-T\%)$ , а  $T\%$  текущей ошибки добавляется к интегралу. Такой метод не только ограничивает «историю», но и нормализует интегральную ошибку, предотвращая её чрезмерный рост.

Для демонстрации работы PID-контроллера мы реализовали модель управления автомобилем, движущимся не только по заданным точкам пути, но и за динамической целью



(преследование другой машины). Эта задача требовала минимизации отклонения машины от траектории и обеспечения стабильного поведения даже при резких поворотах. Выход PID-контроллера влияет на входящие параметры нашей установки – машины (поворот руля, газ/тормоз).



Рис. 2 Машина управляемая PID-контроллером

При реализации PID-контроллера использовался язык программирования C++ для вычисления корректирующего угла руля. Контроллер обновлялся на каждом кадре, обеспечивая постоянное реагирование на изменения пути или скорости. Проводились симуляции на разных трассах (прямые, повороты, петли).

Ошибкой в данной симуляции является расстояние между текущей позицией автомобиля и ближайшей точкой на траектории. Каждый компонент контроллера настраивался для достижения плавного, но точного движения:

- $K_p$  регулировал поворот колес в зависимости от отклонения.
- $K_i$  компенсировал мелкие систематические ошибки, например, вызванные неточностями физического движка Chaos.
- $K_d$  снижал резкие колебания автомобиля на поворотах.

Мы удостоверились что машина точно следовала заданным точкам пути с минимальным отклонением, траектория была устойчива даже на сложных поворотах. Сглаженные движения при ускорении и торможении сделали поведение машины более реалистичным. В результате мы пришли к таким выводам: PID-контроллер остаётся мощным инструментом, необходимым для управления динамическими системами. Его применение, как в реальной жизни, так и в виртуальных симуляциях, открывает новые возможности для исследований и разработки сложных алгоритмов управления. Реализация PID-регулятора в Unreal Engine показала, что даже в виртуальной среде можно добиться высокой точности и реалистичности поведения объектов. При более глубоком изучении он может помочь решать сложные задачи, такие как потеря сцепления с дорогой. Замкнутый контур PID-контроллера облегчает работу программиста, поскольку он управляет реальными действиями автомобиля на трассе. Это освобождает разработчика от сложной задачи ручного преобразования абстрактных целей в конкретные команды управления автомобилем. Эта работа может быть полезна разработчикам игр и инженерам, желающим внедрять интеллектуальные системы управления в свои проекты.

*Список литературы:*

1. СТА «Просто о PID-регулировании» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.cta.ru/articles/cta/spravochnik/v-zapisnuyu-knizhku-inzhenera/124336/> (Дата обращения: 25.11.2024 г.)
2. К. Оката. Современная теория управления. – Нью-Джерси: Prentice Hall, 2009. – 900 с.

