

УДК 519.711.3:629.5

## ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ PID-РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ СИМУЛЯЦИИ ДВИЖЕНИЯ СУДОМОДЕЛИ

Шульга К.В., студент гр.851003, Деменковец Д.В., ст. преподаватель  
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь

Деменковец Д.В. – ст. преподаватель

**Аннотация.** В работе рассматривается применение PID-регулятора для реализации автоматического управления судомоделью. Описывается принцип работы регулятора и его основные составляющие. Представлена схема автоматического управления судомоделью на базе PID-регулятора. Описывается программное средство, моделирующее движение судомодели на основе математической модели PID-регулятора.

**Ключевые слова.** ПИД, ПИД-регулятор, регулятор, автопилот, судомодель.

В последние годы все больше внимания уделяется автономным транспортным средствам: наземным, морским и воздушным. Примерами этого являются автомобили и суда с автопилотами, различные беспилотные аппараты и эта тенденция продолжается по мере совершенствования технологий и применений в различных сферах. Автономность снижает многие категории риска и по определению исключает человеческий фактор, подверженный ошибкам [1]. Исходя из вышеперечисленного было принято решение спроектировать и реализовать математическую модель автоматического управления для модели судна.

Автоматическое управление судомоделями применяется для решения широкого спектра задач: охрана и патрулирование водоемов на территории заповедников, определение рельефа дна водоема, любительская рыбалка, исследование миграции рыб, поиск скоплений рыбы с помощью эхолота. Все эти задачи сводятся к необходимости построения маршрута движения судомодели и следования ему вне зависимости от воздействия внешних факторов: воздействие ветра, подводные течения, волны и другие. Общая схема автоматического управления судомоделью представлена на рисунке 1.

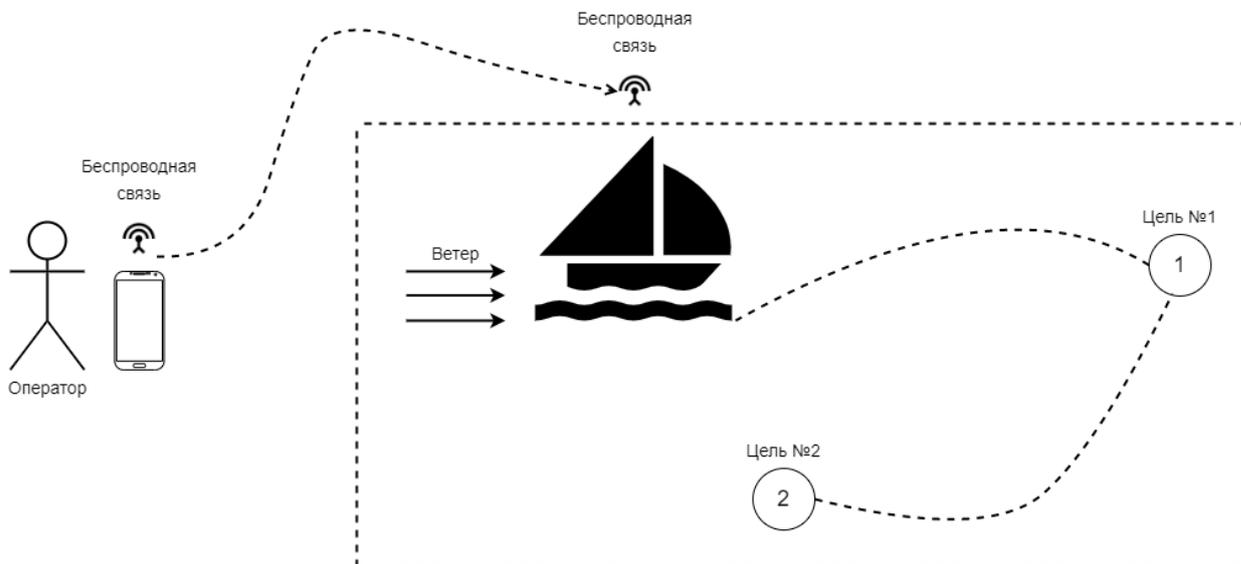


Рисунок 1 – Общая схема автоматического управления судомоделью

Для того чтобы судомодель достигла конечной точки маршрута необходимо реализовать автоматическое управление и корректировку движения модели судна. Для решения этой задачи было использовано устройство – регулятор. Регулятор воздействует на движение модели с помощью управляющих сигналов, которые влияют на скорость движения и угол поворота руля (изменяются в диапазоне от -1 до 1) [2]. Для расчета управляющих сигналов на вход регулятора подаются данные об расстоянии до точки маршрута (цель) и отклонение от курса в градусах.

Чтобы получить вышеупомянутые данные используется GPS-приемник и электронный компас. Схема работы регулятора представлена на рисунке 2.

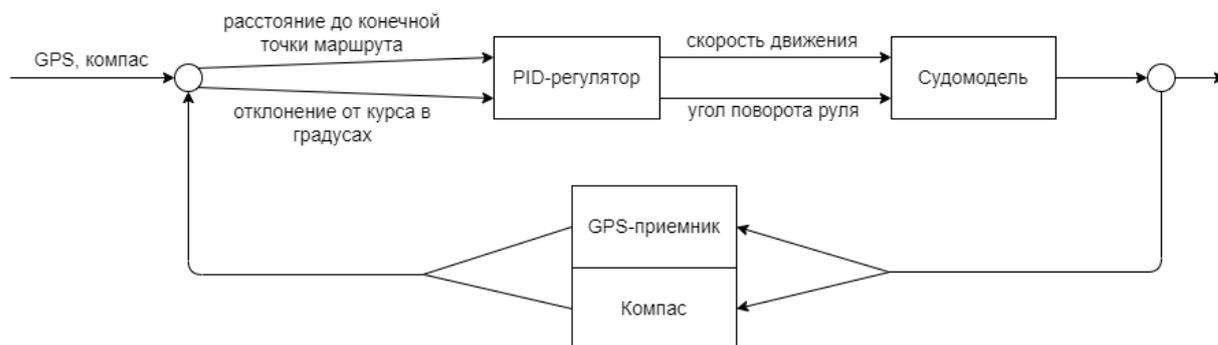


Рисунок 2 – Схема работы регулятора

Одним из способов получения точных и качественных управляющих сигналов воздействия является PID-регулятор. Общая схема цикла обратной связи PID-регулятора представлена на рисунке 3.

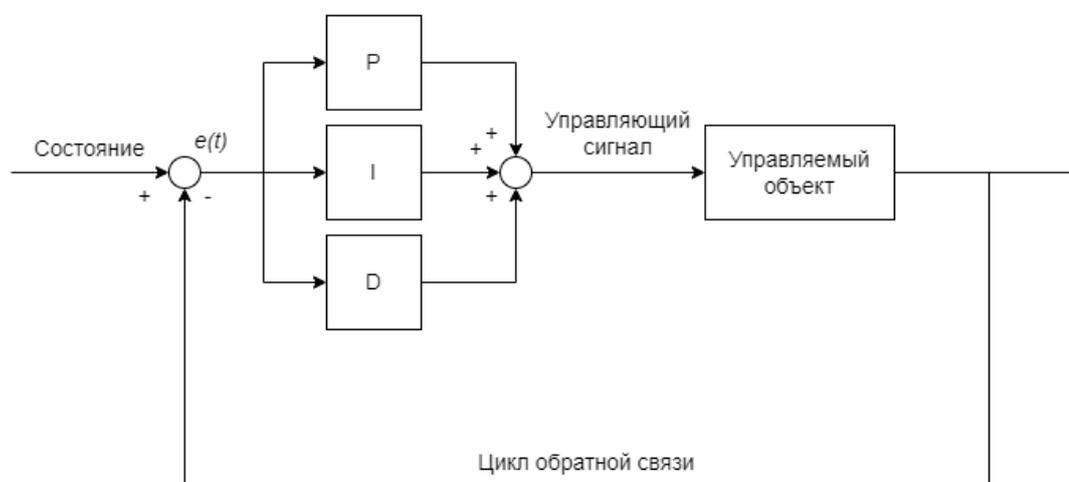


Рисунок 3 – Общая схема цикла обратной связи PID-регулятора

Управляющий сигнал PID-регулятора рассчитывается по формуле [2]:

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

где  $P$  – пропорциональная составляющая;  $I$  – интегральная составляющая;  $D$  – дифференциальная составляющая;  $K_p$  – коэффициент усиления пропорциональной составляющей;  $K_i$  – коэффициент усиления интегральной составляющей;  $K_d$  – коэффициент усиления дифференцирующей составляющей;  $e$  – рассогласование (отклонение величины от заданной).

Как видно из формулы, управляющий сигнал является суммой трех составляющих: пропорциональной (1-е слагаемое), интегральной (2-е слагаемое) и дифференциальной (3-е слагаемое).

Пропорциональная составляющая зависит от рассогласования и отвечает за реакцию на мгновенную ошибку регулирования. Однако при использовании только пропорциональной составляющей значение регулируемой величины никогда не стабилизируется на заданном значении. Существует так называемая статическая ошибка, которая равна такому отклонению регулируемой величины, которое обеспечивает выходной сигнал, стабилизирующий выходную величину именно на этом значении [3,4].

Интегральная составляющая содержит в себе накопленную ошибку регулирования, которая является дополнительным источником выходной мощности и позволяет добиться максимальной

скорости достижения цели при отсутствии перерегулирования. Интегральная составляющая позволяет регулятору со временем учесть статическую ошибку, то есть учитывать то, что происходило в прошлом [3,4].

Дифференциальная составляющая зависит от скорости изменения параметра, вызывающей реакцию регулятора на резкое изменение измеряемого параметра, возникшее, например, в результате внешнего возмущающего воздействия [3,4].

Влияние каждой отдельной составляющей очень существенно и в значительной степени зависят от подбора коэффициентов. Если коэффициенты усиления подобраны неверно, то результирующая модель будет неточной или некорректно работать.

На рисунке 4 представлены графики достижения целей в зависимости от коэффициентов усиления [2].

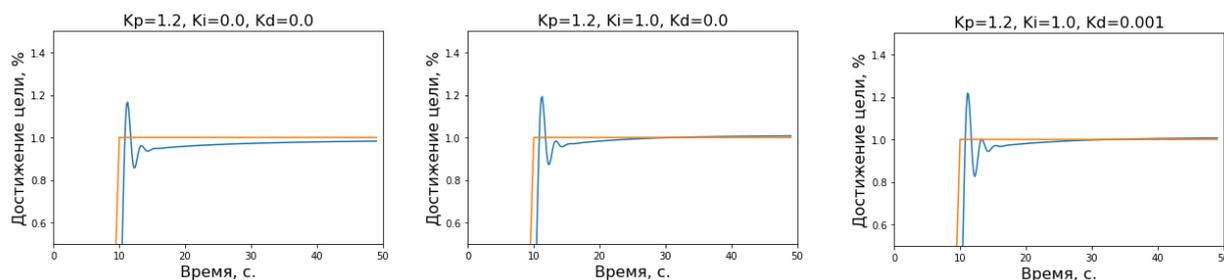


Рисунок 4 – Графики достижения целей в зависимости от коэффициентов усиления

Проанализировав данные графики, можно сделать вывод, что, подобрав правильные коэффициенты можно увеличить точность и тем самым сократить время достижения целей.

Для программной реализации необходимо выполнить дискретизацию стандартной модели PID-регулятора. Дискретная формула имеет следующий вид [4]:

$$Y_i = \frac{1}{X_p} \cdot \left[ E_i + \tau_D \cdot \frac{\Delta E_i}{\Delta t_{изм}} + \frac{1}{\tau_u} \sum_{i=0}^n E_i \Delta t_{изм} \right] \cdot 100\% , \quad (2)$$

где  $X_p$  – полоса пропорциональности;  $E_i$  – рассогласование;  $T_D$  – постоянная времени дифференцирования;  $\Delta E_i$  – разность между двумя соседними измерениями  $E_i$  и  $E_{i-1}$ ;  $\Delta t_{изм}$  – время между двумя соседними измерениями  $T_i$  и  $T_{i-1}$ ;  $\tau_u$  – постоянная времени интегрирования;  $\sum E_i$  – накопленная в  $i$ -й момент времени сумма рассогласований (интегральная сумма).

С целью апробации математической модели PID-регулятора на примере автоматизированного управления судомodelью было разработано программное средство на языке программирования Python со следующими функциями:

1. Возможность установки нескольких точек маршрута (целей).
2. Возможность выполнить автоматизированное управление моделью судна для достижения заданных целей.
3. Возможность перехода в ручной режим управления с визуализацией управляющих сигналов (режим симулятора).
4. Возможность добавить воздействие внешней силы на судомodelь (эмуляция течения или воздействие ветра).
5. Отображение показателей судомodelи: скорость, угол поворота руля, данные с компаса.

В результате выполненной работы была спроектирована математическая модель PID-регулятора, на основе которой было построено программное средство.

Для реализации вышеописанных функций были спроектированы и запрограммированы следующие модули:

1. `pid.py`, `feedback_loop.py` – содержат логику работы PID-регулятора и цикла обратной связи.
2. `compass.py`, `gps.py` – содержат функции для получения данных с виртуальных компаса и GPS-приемника.
3. `gui_drawer.py`, `boat_drawer.py`, `setpoint_drawer`, `dashboard_drawer.py` – содержат функционал отрисовки и визуализации.

Пример работы программного средства представлен на рисунке 5.

Были получены результаты для пяти наборов данных и построены пять графиков, которые демонстрируют работу регулятора. Каждый график показывает изменение расстояния до цели маршрута с течением времени. Полученные графики показаны на рисунке 6.



Рисунок 5 – Запущенное программное средство

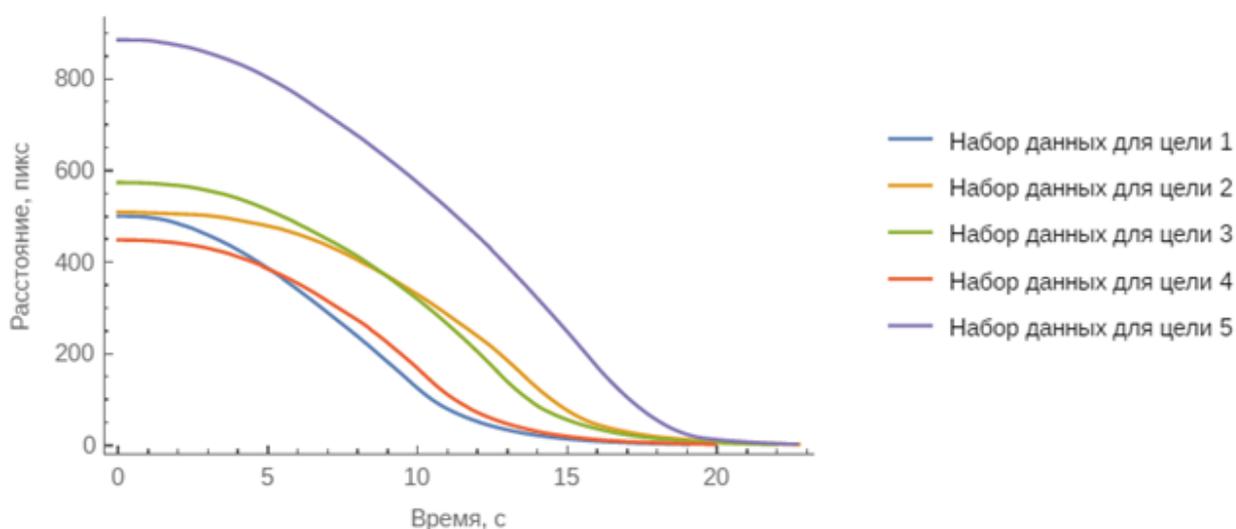


Рисунок 6 – График, демонстрирующий изменение расстояний до цели с течением времени

Тестирования полученного прототипа подтвердило возможность практического применения математической модели на реальной физической. В последующем планируется реализация программно-аппаратного модуля управления судомоделью, где будет применена математическая модель и разработанные алгоритмы для управления физической судомоделью в реальных природных условиях.

**Список использованных источников:**

1. Visioli, Antonio. *Practical PID control* / Antonio Visioli – London : Springer-Verlag London Limited, 2006. – 310 p.
2. *Handbook of Pi And Pid Controller Tuning Rules* / Aidan O'Dwyer – Imperial College Press, 2006. – 564p.
3. Astrom, Karl J. *PID controllers: theory, design, and tuning* / Karl Johan Astrom, Tore Hagglund – Research Triangle Park, NC : International Society for Measurement and Con, 1995. – 354 p.
4. Шульга, К. В. *Применение PID регулирования для управления судомоделью* / К. В. Шульга, С. И. Билалов, Д. В. Деменковец // *Компьютерные системы и сети: 57-я научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов*,

UDC 519.711.3:629.5

## APPLICATION OF A MATHEMATICAL MODEL OF THE PID CONTROLLER TO SIMULATE THE MOTION OF A SHIP MODEL

*Shulga K.V., Demenkovets D.V.*

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus*

*Demenkovets D.V. – senior lecturer*

**Annotation.** This paper discusses the application of a PID controller for the implementation of automatic control of a ship model. The principle of operation of the controller and its main components are described. The scheme of automatic control of the ship model based on PID controller is presented. The software that simulates the motion of the ship model based on the mathematical model of PID controller is described.

**Keywords.** PID, PID-controller, controller, autopilot, ship model.