



МРНТИ 55.47.29

Научная статья

<https://doi.org/10.32523/2616-7263-2025-152-3-99-109>

Экспериментальное исследование бесколлекторных двигателей и МРУ6050 с применением ПИД-регулятора

К.Т.Ахметов ¹, А.Б. Болатова *¹, Е.Макажанов ²,
Г.К. Саменов ¹

¹ ЕНУ им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

² Общественный фонд "Неправительственный экологический фонд им. В.И. Вернадского в Республике Казахстан

E mail: bolatova_ainash@mail.ru

Аннотация. В данной научной статье рассматриваются аспекты практической реализации ПИД-регулятора на базе микроконтроллера Atmega328. Для его внедрения был разработан одноосевой экспериментальный стенд с соответствующей аппаратной частью. Создана методика проведения экспериментов, а также алгоритм работы программы с использованием ПИД-регулятора. В ходе экспериментов впервые были зафиксированы широтно-импульсные модуляции (ШИМ) сигналы, передаваемые микроконтроллером к двигателям в зависимости от управляющего сигнала, сформированного ПИД-регулятором. Установлено, что при отклонении штанги на -30 градусов активируется правый двигатель с ШИМ-сигналом в диапазоне 1300...1500 мкс. При наклоне в противоположную сторону аналогичным образом изменяется сигнал на другом двигателе, достигая значений от 1300 до 1500 мкс. Использование ПИД-регулятора обеспечило автоматическое выравнивание и поддержание на заданный угол 0 градусов штанги, что способствовало стабилизации системы при работе двух бесколлекторных двигателей.

Ключевые слова: ПИД-регулятор, ШИМ-сигнал, микроконтроллер Atmega328, бесколлекторный двигатель, модуль МРУ6050.

Поступила 11.03.2025. Доработана 17.03.2025. Одобрена 13.05.2025. Доступна онлайн 30.09.2025

* автор для корреспонденции

Введение

Пропорционально-интегрально-дифференциальные регуляторы (далее – ПИД-регулятор) широко используются в инженерии, в частности, для стабилизации полёта летательных аппаратов путём регулировки дроссельной заслонки, тангажа, крена и рыскания с целью исправления отклонений от желаемой ориентации [1]. ПИД-регуляторы применяются в системах круиз-контроля автомобилей для поддержания скорости транспортного средства путём регулировки входного сигнала дроссельной заслонки на основе отклонений скорости [2]. Помимо этого, ПИД-регуляторы широко используются в робототехнике для управления двигателями, приводами или роботизированными руками. Контроллер регулирует скорость двигателя для достижения заданного положения или скорости, обеспечивая точное и плавное движение [3]. В станках с ЧПУ ПИД-регуляторы управляют положением двигателей, контролирующими движение деталей машины, что гарантирует точную траекторию движения режущего инструмента и обеспечивает высокую точность производства [4]. Также ПИД-регуляторы применяются в управленческих процессах, например, при регулировании температуры в промышленных печах и системах отопления. При регулировании давления на химических заводах, электростанциях и трубопроводах эти регуляторы используются для поддержания постоянного давления путём управления потоком жидкостей или газов [5]. Кроме того, они находят применение в автоматизированных производственных линиях и конвейерах для поддержания скорости ленты. Регулируя скорость двигателя на основе входного сигнала, ПИД-регулятор обеспечивает обработку или перемещение материалов с заданной скоростью [6]. Таким образом, ПИД-регулятор играет важную роль в процессах автоматического регулирования систем, в частности, в летательных аппаратах, где рассматривается связка программного алгоритма, микроконтроллера и бесколлекторных двигателей.

Целью данной статьи является исследование стабилизации работы двух двигателей бесколлекторного типа с датчиком MPU-5060 за счет применения ПИД-регулятора. Для достижения цели решаются следующие задачи:

- 1) разработка конструкции лабораторной установки;
- 2) подключение аппаратной части, программирование микроконтроллера;
- 3) экспериментальное исследование ПИД-регулятора.

Методология.

Для того, чтобы исследовать процесс поведения работы ПИД-регулятора, необходимо, в первую очередь, сконструировать лабораторную установку, которая представлена на рисунке 1.

Данная установка состоит из двух основных частей. Первая – это конструкционная, вторая – аппаратная часть. Конструкционная часть состоит из штанги (2), длиной 800 мм, по краям которой крепятся подставки штанги (5), то есть упоры, чтобы не повредить пропеллеры в процессе работы двигателей, установленных в раме крыла (1). В центре штанги устанавливается подставка для аппаратной части (4), выполненной из PLA-пластика. Она предназначена для установки аппаратной части, которая будет рассматриваться далее. В торцевых сторонах штанги прикрепляются цапфы, на которые насаживаются шариковые подшипники марки 608-RSH (6). Наружные стороны подшипников насаживаются на боковине (7), которые упираются на стойку (8).

Вся конструкция испытательного стенда упирается на поддоны (9).

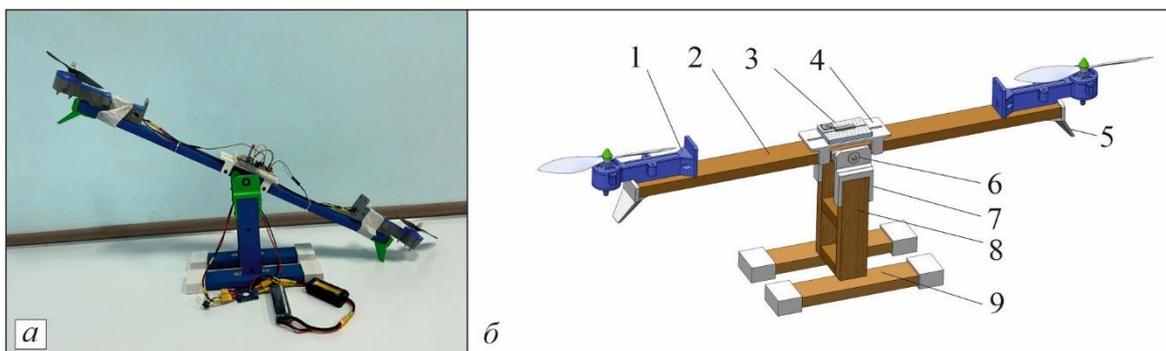


Рисунок 1. Экспериментальный стенд для настройки ПИД-регулятора: (а) – общий вид; (б) – конструкция установки: 1 – рама крыла; 2 – штанга; 3 – аппаратная часть; 4 – подставка для аппаратной части; 5 – подставка штанги; 6 – шариковый подшипник; 7 – боковина; 8 – стойка; 9 – поддон.

Аппаратная часть представляет собой комплекс силовых линий, снабжаемых от источника питания ион-полимерного аккумулятора (5), программатора FTDI (7), служащего для загрузки программы в микроконтроллер Atmega328 (10), модуля MPU-6050 (6) и исполняющих механизмов – два бесколлекторных двигателя модели A2213 (2) с регуляторами скорости (3) и пропеллерами (1) диаметром 255 мм. Подробное подключение данного типа двигателя, а также их испытания на тягу, измерение количества оборотов и потребляемой мощности было опубликовано в работе [7]. По поводу подключения модуля MPU-6050 с микроконтроллером и определения взаимосвязи модуля с бесколлекторным двигателем было исследовано в работе [8].

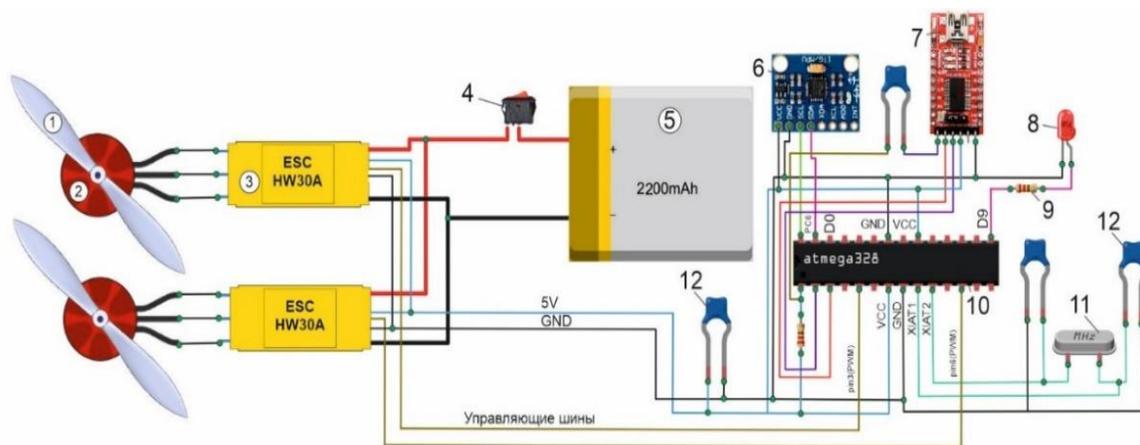


Рисунок 2. Аппаратная часть реализации ПИД-регулятора: 1 – пропеллер; 2 – бесколлекторный двигатель; 3 – регулятор скорости; 4 – выключатель; 5 – аккумулятор; 6 – датчик MPU-6050; 7 – программатор FTDI; 8 – светодиод; 9 – резистор; 10 – микроконтроллер Atmega328; 11 – кварцевый резонатор; 12 – конденсатор.

В данной работе подробно рассмотрен способ подключения модуля и выявлены зависимости широтно-импульсной модуляции, исходящей от микроконтроллера от угла поворота модуля. В этой связи ограничимся описанием данной схемы.

Отличительной особенностью данной схемы, представленной на рисунке 2, является дополнение еще одного бесколлекторного двигателя, расположенных друг против друга и вращающихся в противоположных направлениях – правый двигатель по часовой стрелки, левый против часовой. Также данная схема позволяет применить ПИД-регулятор.

Для выявления процесса автоматического контроля и поддержки уровня штанги равновесия применяется специальный алгоритм, написанный на языке программирования, называемым ПИД-регулятор. Главным его назначением является формирование управляющего сигнала, состоящего из трех составляющих: пропорциональная, интегральная и дифференциальная [9,10].

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

В данной формуле пропорциональная составляющая Р представляет собой произведение коэффициента усиления пропорциональной составляющей K_p на текущую ошибку между текущим значением и желаемым значением $e(t)$. Чем больше будет ошибка, тем сильнее реагирует регулятор.

Интегральная составляющая I состоит из коэффициента усиления пропорциональной составляющей K_i , умноженной на интеграл $e(t)dt$. Она используется для учета накопленного опыта работы регулятора, что со временем делает управление все более точным. Регулятор суммирует предыдущие значения ошибки регулирования и вносит соответствующие коррективы. Когда система достигает заданного состояния, ошибка регулирования становится минимальной, и влияние интегральной части постепенно снижается. Проще говоря, интегральная составляющая корректирует ошибки, возникшие в предыдущие моменты времени.

Дифференциальная составляющая D состоит из коэффициента усиления дифференциальной составляющей K_d , умноженная на производную от ошибки (учет скорости изменения ошибки) de/dt . Эта составляющая вычисляет производную от измеряемой величины. Производная отражает скорость изменения физической величины. Например, чем быстрее растёт или падает давление в системе, тем выше соответствующее значение производной. Дифференциальная составляющая позволяет регулятору по-разному реагировать на резкие и плавные изменения регулируемой величины, что позволяет устранять резкие колебательные процессы в системе.

Сумма всех трех составляющих представляет собой управляющую переменную $u(t)$, которая характеризуется как ПИД-регулятор. Таким образом, основная задача ПИД-регулятора заключается в автоматическом поддержании заданного уровня параметров системы, таких, как температура в резервуаре или давление в цистерне, без вмешательства человека. В данном случае ПИД-регулятор используется для управления двумя двигателями, что позволяет стабилизировать полет винтового БПЛА.

В автоматизированных системах любой ПИД-регулятор функционирует на основе принципа обратной связи (рис. 3, а). В данном случае обратная связь обеспечивается тягой, создаваемой обоими двигателями. Если возникает разница в тяге между двигателями, ось штанги наклоняется в одну из сторон. Акселерометр-гироскоп измеряет текущий угол и передает его в регулятор (точнее, в микроконтроллер для обработки данных). Регулятор

сравнивает полученное значение с заданным и вносит корректировки, стремясь минимизировать ошибку. По мере изменения ошибки изменяется и выходной ШИМ-сигнал от микроконтроллера, который управляет двигателями. Угол наклона будет равен 0 градусам, если ШИМ-сигналы, подаваемые на оба двигателя, будут одинаковыми, что обеспечит равные обороты двигателей и, соответственно, одинаковую тягу пропеллеров.

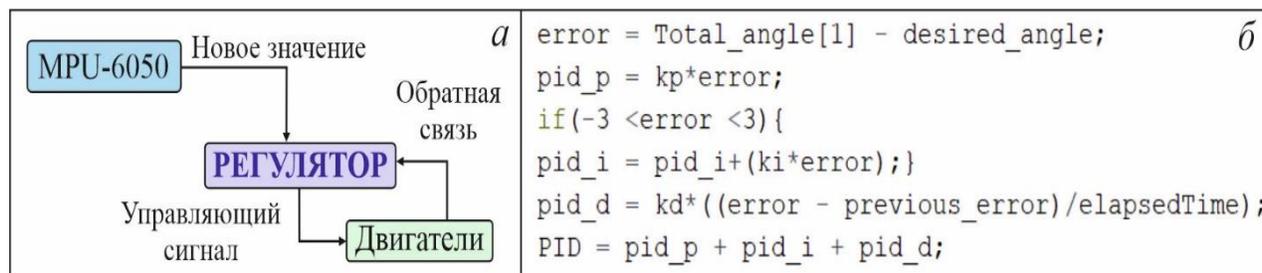


Рисунок 3. Схема действия ПИД-регулятора (а) и его код программы (б).

Процесс работы ПИД-регулятора в программном коде включает несколько этапов (рис. 3, б). На первом этапе происходит считывание данных с модуля MPU-6050, которые представляют собой углы, измеренные по всем трём осям в декартовой системе координат [8]. В данном случае используется только угол Y, так как в испытательном стенде наклоняется штанга только по одной оси (см. рис. 1). После получения данных об угле на втором этапе выполняется расчет ПИД-регулятора, включающий поэтапное вычисление всех трёх составляющих.

Сначала определяется ошибка (error) измерения, которая представляет собой разницу между желаемым значением (desired_angle), равным 0 градусам, и фактическим измеренным значением (total_angle[1]), полученным с модуля MPU-6050. В данном случае угол Y хранится в массиве под индексом 1. Затем значение ошибки умножается на коэффициент усиления пропорциональной составляющей (kp). Этот коэффициент подбирается вручную при настройке регулятора: чем больше его значение, тем сильнее управляющий сигнал на выходе, и наоборот. Когда ошибка пропорциональной составляющей приближается к заданному диапазону от -3 до 3, начинает обрабатываться интегральная составляющая: $pid_i = pid_i + (k_i \times error)$. Она накапливает ошибки во времени, способствуя устранению статического отклонения.

Дифференциальная составляющая вычисляется как произведение коэффициента kd на разницу между текущей и предыдущей ошибками, деленную на промежуток времени: $kd \times (error - previous) / elapsedTime$. Благодаря этому дифференциальная составляющая сглаживает резкие изменения управления, учитывая скорость изменения ошибки. В результате объединения трех составляющих формируется управляющий сигнал ПИД-регулятора, который представлен в виде ШИМ-сигнала. На третьем этапе процесса после формирования управляющего сигнала необходимо задать диапазон ограничений для ПИД-регулятора, чтобы компенсировать возможные случайные колебания процесса, вызванные внешними факторами.

Этот диапазон устанавливается в пределах -1000...1000 мкс (рис. 4, а). Бесколлекторные двигатели типа A2213 работают в интервале от 800 до 2300 мкс. В этой связи в программном коде задается диапазон ограничений начальных и конечных

значений, в случае их выхода за пределы (рис.4, б). Переменная throttle, которая задается значением 1000, служит для равномерной работы обеих двигателей при $PID \rightarrow 0$. Равномерность работы двигателей характеризуется формулами $pwmLeft = throttle + PID$ и $pwmRight = throttle - PID$. Даже при $PID \sim 0$, $pwmLeft = 1000$ и $pwmRight = 1000$, что способствуют работе двигателей на умеренном ходу.

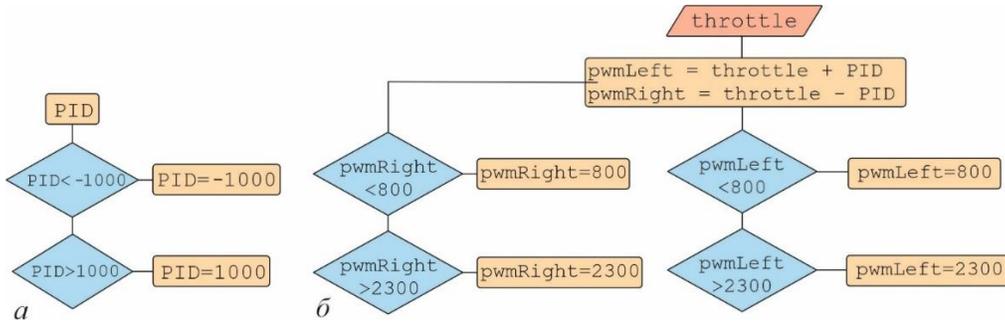


Рисунок 4. Программная реализация PID-регулятора: (а) – граничное ограничение ШИМ-сигнала управления $u(t)$; (б) – верхние и нижние пределы ШИМ правого и левого двигателей с учетом ПИД-контроля.

Результаты и обсуждение.

Графики, полученные в режиме реального времени при считывании данных с COM-порта, отображают линии ШИМ-сигнала, передаваемого микроконтроллером к правому (1) и левому (2) двигателям, заданный угол (3), а также управляющий сигнал (4). По полученным результатам экспериментальных данных следует, что при ручном отклонении штанги на угол -30 градусов уменьшается управляющий сигнал (4).

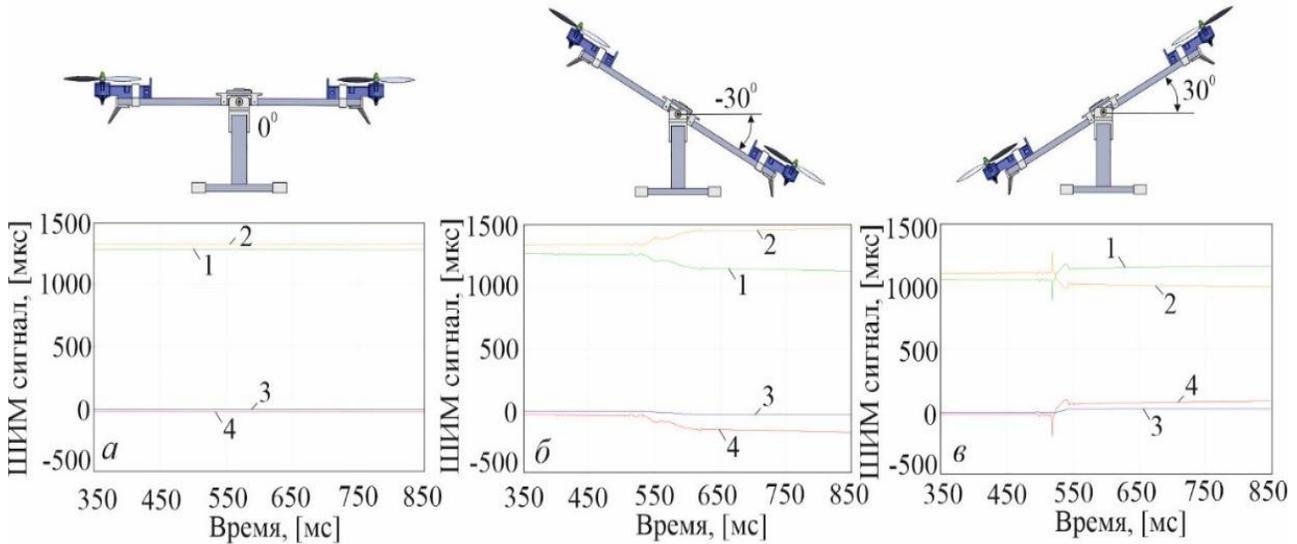


Рисунок 5. Результаты измерения PID-регулятора: (1) – ШИМ-сигнал правого двигателя; (2) – ШИМ-сигнал левого двигателя; (3) – желаемый угол, на которую будет стремиться сигнал управления; (4) – сигнал управления (ПИД-регулятор).

Данный сигнал способствует увеличению правого двигателя (2) на величину 1500 мкс и выше. Это приводит к увеличению мощности двигателя, а следовательно, и число оборотов двигателя, способствуя поднятию правой части штанги (рис.5, б).

При отклонении левой части штанги на 30 градусов вручную, где расположен второй двигатель, управляющий сигнал (4) увеличивается в положительном направлении (рис. 5, в). В результате этого возрастает ШИМ-сигнал правого двигателя (1), что приводит к увеличению его тяги. Повышенная тяга способствует подъему правой стороны, сопровождающемуся снижением ШИМ-сигнала. В конечном итоге система приходит в состояние равновесия (рис. 5, а). Данный диапазон, как показаны на двух графиках, не конечны (рис. 5, а и б), они с истечением времени достигаются в конечные значения до 2300 мкс при максимальном угле поворота до 90 градусов. В связи с тем, что данный стенд является экспериментальным и имеет ограничение по наклону, измерить ШИМ-сигналы с обоих двигателей не удавалось.

Таким образом, для винтообразного БПЛА с четырьмя винтами и тремя степенями свободы вращения относительно собственного центра масс необходим принципиально иной подход к разработке алгоритмов управления и применению ПИД-регулятора для стабилизации полета. На наш взгляд, эта задача является достаточно сложной и будет рассмотрена в дальнейших исследованиях.

Заключение.

В соответствии с поставленной целью были решены следующие задачи: разработана конструкция испытательного стенда с аппаратной частью; проведено исследование работы ПИД-регулятора в режиме реального времени в зависимости от угла наклона установки, что позволило выявить изменения величин ШИМ-сигнала, потребляемых обоими двигателями.

Таким образом, данное экспериментальное исследование создаёт основу для дальнейшей разработки ПИД-регулятора для трёхосевой установки с четырьмя бесколлекторными двигателями, что позволит глубже изучить процессы стабилизации полёта БПЛА.

Работа выполняется при поддержке грантового финансирования Комитета науки Министерства и высшего образования Республики Казахстан (проект №AP195077/0225).

Вклад авторов:

К.Т. Ахметов: разработал концепцию исследования, методологию статьи.

А.Б. Болатова: провела алгоритмизацию и программирование данных.

Е.Макажанов- провел литературный обзор, исследовал состояние проблемы.

Г.К. Саменов: провел эксперименты и снятия показаний с данных.

Список литературы

1. Ang K.H. PID control system analysis, design, and technology // IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2005. Vol.13. No.4. p. 559-576. – материалы конференции на англ. языке.
2. Karl J. Pid Controllers /- Pub: Isa, 1995. – p.343. – книга на англ. языке.

3. Wen Yu. PID Control with Intelligent Compensation for Exoskeleton Robots // – Publisher: Academic Press, 2018. – p. 219. – книга на англ. языке.
4. Зыкин П.В. Синтез следящей ПИД-системы управления шероховатостью при токарной обработке / Известия Тульского государственного университета. Технические науки, – №4. – 2023. – С.507-510. – научная статья.
5. Karl J. Automatic Tuning of Pid Controllers/ Pub: Isa, 1988. – p.141. – книга на англ. языке
6. He, Y., Ma, A., Wang, Y. et al. FOPID controller design for pneumatic control valves with ultra-low overshoot, rapid response and enhanced robustness. Sci Rep 15, 4541 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-89316-2> – статья на англ. языке.
7. Ахметов К.Т., Болатова А.Б., Байжуман К.М., Саги А.А. Проблемы машиностроения: современные технологии обработки, материалы, машины, агрегаты. Сборник статей по материалам Всероссийской научно-практической конференции. 11-12 октября 2024 г., г. Махачкала: ДГТУ, 2024. - 223 с. – материалы конференции.
8. К.Т. Ахметов, К.М. Байжуман, А.Б. Болатова, У.Т. Касымов. Экспериментальное исследование управления бесколлекторным двигателем с помощью MPU6050 / Вестник ЕНУ. – № 4 (2024) – С.244-255. – Научный журнал.
9. ПИД-регулятор [Электронный ресурс]. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/ ПИД-регулятор](https://ru.wikipedia.org/wiki/ПИД-регулятор). (Дата обращения: 03.03.2024). - электронный ресурс.
10. ПИД-регулятор: принцип работы и схема подключения [Электронный ресурс]. URL: <https://drives.ru/stati/pid-regulyator>. (Дата обращения: 03.03.2024). - электронный ресурс.

**К.Т.Ахметов¹, А.Б. Болатова¹, Е. Макажанов²,
Г.К. Саменов¹.**

¹Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті

²«Қазақстан Республикасындағы В. И. Вернадский атындағы үкіметтік емес экологиялық қоғамдық қоры»

PID реттегішін қолдана отырып, коллекторсыз қозғалтқыштар мен MPU6050 эксперименттік зерттеу

Аңдатпа. Бұл ғылыми мақалада Atmega328 микроконтроллері негізінде жүзеге асырылған PID-регулятордың практикалық іске асырылу аспектілері қарастырылды. Оны енгізу үшін сәйкес аппараттық бөлігі бар бір осьті эксперименттік стенд әзірленді. Эксперименттерді жүргізу әдістемесі және PID-регуляторды қолданатын бағдарламаның жұмыс алгоритмі жасалды. Эксперименттер барысында микроконтроллерден қозғалтқыштарға жіберілетін басқарушы сигналға байланысты алғаш рет ені-импульстік модуляция (ЕИМ) сигналдары тіркелді. Зерттеулер нәтижесінде штанганың -30 градусқа ауытқуы кезінде оң жақ қозғалтқыштың 1300...1500 мкс диапазонында ЕИМ-сигналы іске қосылатыны анықталды. Қарсы бағытқа еңкею кезінде екінші қозғалтқыштағы сигнал ұқсас түрде өзгеріп, 1300-ден 1500 мкс-қа дейін жетті. PID-регуляторды қолдану штанганың 0 градус бұрышта автоматты түрде теңестірілуін және ұстап тұруын қамтамасыз етті. Бұл екі коллекторсыз қозғалтқышпен жұмыс істеу кезінде жүйенің

тұрақтануына ықпал етті.

Түйін сөздер: PID-регулятор, ЕИМ сигналі, Atmega328 микроконтроллері, коллекторсыз қозғалтқыш, MPU6050 модулі.

**К.Т.Аkhmetov¹, А.В.Boлатова^{1*}, Y. Makazhanov²,
G.K. Samenov¹**

¹*L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan*

²*"Non-governmental Environmental Public Foundation named after V. I. Vernadsky in the Republic of Kazakhstan"*

Experimental study of brushless motors and MPU6050 using a PID controller

Abstract. This scientific article discusses aspects of the practical implementation of a PID controller based on the Atmega328 microcontroller. For its implementation, a single-axis experimental stand with the appropriate hardware was developed. A methodology for conducting experiments has been created, as well as an algorithm for the program using a PID controller. During the experiments, pulse width modulation (PWM) signals transmitted by the microcontroller to the motors were recorded for the first time, depending on the control signal generated by the PID controller. It was found that when the rod is deflected by -30 degrees, the right motor is activated with a PWM signal in the range of 1300...1500 microseconds. When tilted in the opposite direction, the signal on the other engine changes in a similar way, reaching values from 1300 to 1500 microseconds. The use of a PID controller ensured automatic alignment and maintenance of the rod at a set angle of 0 degrees, which contributed to the stabilization of the system when operating two brushless motors.

Keywords: PID controller, PWM signal, Atmega328 microcontroller, brushless motor, MPU6050 module.

References

1. Ang K.H. PID control system analysis, design, and technology / IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2005. Vol.13. No.4. p. 559-576. [in english]
2. Karl J. Pid Controllers /- Pub: Isa, 1995. – p.343. [in english].
3. Wen Yu. PID Control with Intelligent Compensation for Exoskeleton Robots // – Publisher: Academic Press, 2018. – p. 219. – [in english].
4. Zykin P.V. Sintez sledyashchei PID-sistemy upravleniya serohovatostyu pri tokar-noi obrabotke / – jurnal Izvestiya Tuskogo gosudarstvennogo universiteta. Tehnich-eskie nauki, – №4. – 2023. – 507-510 s. [in russian].
5. Karl J. Automatic Tuning of Pid Controllers/ Pub: Isa, 1988. – p.141. [in english].
6. He, Y., Ma, A., Wang, Y. et al. FOPID controller design for pneumatic control valves with ultra-low overshoot, rapid response and enhanced robustness. Sci Rep 15, 4541 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-89316-2> [in english].
7. Ahmetov K.T., Bolatova A.B., Baijuman K.M., Sagi A.A. Problemy ma-şinostroeniya: sovremennye tehnologii obrabotki, materialy, maşiny, agre-gaty. Sbornik statei po

- materialam Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi kon-ferentsii. 11-12 oktyabrya 2024, g. Mahachkala: DGTU, 2024. -223 s. – materialy konferentsii. [in ressian].
8. K.T. Ahmetov, K.M. Baijuman, A.B. Bolatova, U.T. Kasymov. Eksperimentalnoe issledovanie upravleniya beskollektornym dvigatelem s pomoshchyu MPU6050 / Vestnik ENU. – № 4 (2024) – 244-255 s. – Nauchnyi jurnal [in ressian].
 9. PID-regulyator [Elektronnyi resurs]. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/ PID-regulyator](https://ru.wikipedia.org/wiki/PID-regulyator). (Data obrasheniya: 03.03.2024). - elektronnyi resurs [in ressian].
 10. PID regulyator eto: printsip raboty i shema podklyucheniya [Elektronnyi resurs]. URL: <https://drives.ru/stati/pid-regulyator>. (Data obrasheniya: 03.03.2024). - elektronnyi resurs [in ressian].

Сведения об авторах

Ахметов К.Т. – автор для корреспонденции, кандидат технических наук, доктор философии (PhD), старший преподаватель кафедры космической техники и технологии Евразийского национального университета им. Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 11, 010000, Астана, Казахстан.

Болатова А.Б. – кандидат технических наук, доцент кафедры «Транспортная техника и технологии» Евразийского национального университета им. Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, 010000, Астана, Казахстан.

Макажанов Е - Общественный фонд "Неправительственный экологический фонд им. В.И. Вернадского в Республике Казахстан", научный руководитель Саменов Г.К. – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Транспортная техника и технологии» Евразийского национального университета им. Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, 010000, Астана, Казахстан.

Akhmetov K.T. – corresponding author, candidate of technical sciences, doctor of PhD, senior lecturer of the department of space engineering and technology, L.N. Gumilyov Eurasian national university, Kazymukan street 11, 010000, Astana, Kazakhstan.

Bolatova A.B. – candidate of technical sciences, associate professor of the department of transport engineering and technology, L.N. Gumilyov Eurasian national university, Kazymukan street 13, 010000, Astana, Kazakhstan.

Makazhanov Y. - "Public Foundation 'Non-governmental Environmental Foundation named after V. I. Vernadsky in the Republic of Kazakhstan', Scientific Supervisor"

Samenov G.K. - Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer, Eurasian National University named after L.N. Gomilev, Kazymukan street 11, 010000, Astana, Kazakhstan.

Ахметов К.Т. – хат-хабар авторы, техника ғылымдарының кандидаты, PhD докторы, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің ғарыш техникасы және технологиялары кафедрасының аға оқытушысы, Қажымұқан көшесі, 11, 010000, Астана, Қазақстан.

Болатова. А.Б. – техника ғылымдарының кандидаты, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің көлік техникасы және технологиялары кафедрасының доценті, Қажымұқан көшесі, 13, 010000, Астана, Қазақстан.

Макажанов Е. – «Қазақстан Республикасындағы В. И. Вернадский атындағы үкіметтік емес экологиялық қоғамдық қоры», ғылыми жетекші

Сәменов Г.Қ. – техника ғылымдарының кандидаты, аға оқытушы, Л.Н.Гумилев атындағы

Еуразия ұлттық университеті, Сәтпаев көшесі, 2, 10000, Қажымұқан көшесі, 13, 010000,
Астана, Қазақстан.



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).