



МРНТИ 55.47.29

Научная статья

<https://doi.org/10.32523/2616-7263-2024-149-4-244-255>

Экспериментальное исследование управления бесколлекторным двигателем с помощью MPU6050

К.Т.Ахметов¹, К.М.Байжуман², А.Б.Болатова*¹, У.Т.Касымов¹

¹Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

²Центр военно-стратегических исследований, Астана, Казахстан

(E-mail: *kairat.telektsovich@gmail.com)

Аннотация. В данной статье рассмотрены вопросы управления бес-коллекторного двигателя марки A2212/13T модулем MPU6050, служащее для стабилизации полета малоразмерного беспилотного летательного аппарата. Приведено краткое сведение конструкции данного типа летательного аппарата, а также размещение в нем аппаратной части и двигательных установок. Для реализации аппаратной части с двигателями бесколлекторного типа проведены экспериментальные исследования. Для реализации управления двигателя изначально была создана схема подключения микро-контроллера Atmega328 к модулю MPU6050, которая представляет собой датчик акселерометр-гироскоп и прошивка программы с помощью про-грамматора FDTI. Кратко описаны принцип действия данного модуля и его подключения. Получены сырые данные, снятые с акселерометра и гироскопа в режиме реального времени, применены к этим данным фильтр Калмана для их обработки, составлен алгоритм управления двигателя в зависимости от угла поворота модуля. По полученным результатам впервые определены зависимости угла поворота модуля от ширины импульса, исходящего из микро-контроллера. Выявились, что при наклонении модуля на угол от 0 до 40 градусов, ширина импульса изменяется от 300 до ~750 мкс.

Ключевые слова: бесколлекторный двигатель, модуль MPU6050, беспилотный летальный аппарат, микроконтроллер Atmega328, ШИМ-сигнал.

Поступила 02.12.2024. Доработана 03.12.2024. Одобрена 05.12.2024. Доступна онлайн 31.12.2024

¹*автор корреспонденции

Введение

Модуль MPU6050 является шестиосевым устройством, служащее для стабилизации полета, объединяющее в себе два основных измерительных устройства – гироскоп и акселерометр [1]. Его компактная конструкция, низкое энергопотребление и способность измерять как угловую скорость, так и линейное ускорение делают его популярным выбором для различных приложений, особенно в беспилотных летательных аппаратах (далее МБПЛА) и робототехнике. На практике модуль в основном используется с бесщеточными двигателями различного типа для стабилизации и управления БПЛА с целью измерения угловой скорости по гироскопу и линейного ускорения по акселерометру [2]. Эти данные используются в системах управления, таких, как ПИД-регуляторы, для поддержания устойчивости и ориентации системы летательных аппаратов и в других устройствах [3-5]. Главной особенностью ПИД-регулятора является работа с обратной связью. Наряду с MPU6050 он непрерывно отслеживает движение и ориентацию системы, сравнивая их с желаемым состоянием и помогая вносить корректировки в работу двигателя в реальном времени. Также модуль используется для анализа и компенсации вибрации. Бесщеточные двигатели часто создают вибрации, особенно на высоких скоростях. Акселерометр в MPU6050 обнаруживает эти вибрации, позволяя системе компенсировать их, повышая производительность в чувствительных приложениях, таких, как подвесах камер. В основу всех вышеперечисленных назначений данный модуль взаимодействует с микроконтроллерами различного типа через протоколы связи I²C или SPI [6,7]. Микроконтроллер обрабатывает данные датчика и использует алгоритмы для получения параметров движения. На основе этих параметров микроконтроллер регулирует скорость и направление бесщеточного двигателя с помощью электронного регулятора скорости (ESC) для достижения желаемого поведения [8].

Целью данной статьи является экспериментальное исследование синхронного управления двигателем (плавного регулирования числа оборотов) в зависимости от угла поворота датчика и выявление механизма обработки данных. Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:

- 1) конструирование малоразмерного МБПЛА;
- 2) создание аппаратной части для регулировки бесколлекторного двигателя;
- 3) тестирование аппаратной части с получением данных и обработки их.

Методология

Методами исследования является обработка сырых данных по методу Калмана и использование этих данных для управления двигателями. Для расположения четырех бесколлекторных двигателей и самой аппаратной части предложена конструкция малоразмерного беспилотного летающего аппарата (далее, МБПЛА) винтообразного типа. Он состоит из корпуса (4) и четырех несущих элементов с двигателями – рама крыла (рис.1.). В корпусе размещаются ион-литиевый аккумулятор 2200 мАч (5), в нижней подставке (3) размещается плата распределения, в верхней подставке (2)

устанавливается аппаратная часть. Корпус изолируется от внешних климатических воздействий верхними (1) и нижними крышками (6).

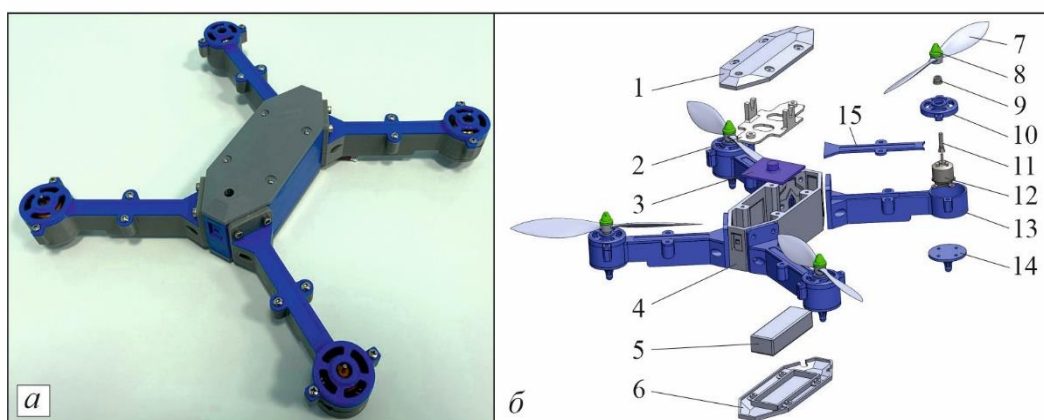


Рисунок 1. Малоразмерный БПЛА: (а) – Общий вид; (б) – Кон-струкция: 1 – верхняя крышка, 2 – верхняя подставка; 3 – нижняя подставка; 4 – корпус; 5 – аккумулятор; 6 – нижняя крышка; 7 – про-пеллер; 8 – колпак двигателя; 9 – втулка; 10 – крышка двигателя; 11 – накидной болт; 12 – бесколлекторный двигатель; 13 – рама крыла; 14 – подставка двигателя.

Четыре бесколлекторных (бесщеточных) двигателя (12) марки A2212/13T с числом оборотов 1000 об/вольт без нагрузок (без пропеллера) устанавливаются в рамах крыла (13). Регуляторы скоростей помещаются в средних частях рамы крыла и закрываются крышкой (15). Для фиксации пропеллеров (7) диаметром 255 мм на валы двигателей используются накидные валы (11) со встроенными втулками двигателей (12) и зажимаются колпаками двигателей (8). Вся данная конструкция крыльев опирается на подставках (14), служащих опорой для всей конструкции МБПЛА.

Получение сырых данных с датчика MPU6050. Для достижения данной цели проведены отдельные эксперименты только с датчиком MPU6050 и совместно датчик с двигателями. Рассмотрим первый случай. Для исследования стабилизации работы двигательных установок применяется датчик MPU6050, подключаемый к микроконтроллеру Atmega328. Принципиальная схема подключения датчика с микроконтроллером представлена на рисунке 2. В данной схеме источником питания служит ионлитиевый аккумулятор 2200 мА·ч, напряжением 11,1 В (2). Для преобразования в 5 В используется стабилизатор напряжения LM7805 (4) с конденсаторами (3) либо специальный модуль-стабилизатор на 5В, питаемое с блокпитания 12 В. Данные стабилизаторы снабжают питанием всю аппаратную систему. Данные ускорения с акселерометра по всем трем осям и угловой скорости с гироскопа (10) поступают в микроконтроллер (6), по которому обрабатывается заданный алгоритм. Алгоритм, созданный на персональном компьютере, представляет собой код программы, который загружается в микроконтроллер программатором (5). Для функционирования микроконтроллера дополнительно подключается кварцевый резонатор (9), служащий для стабилизации частоты сигналов в 16 МГц, и светодиод (8), использующий в качестве индикатора работы.

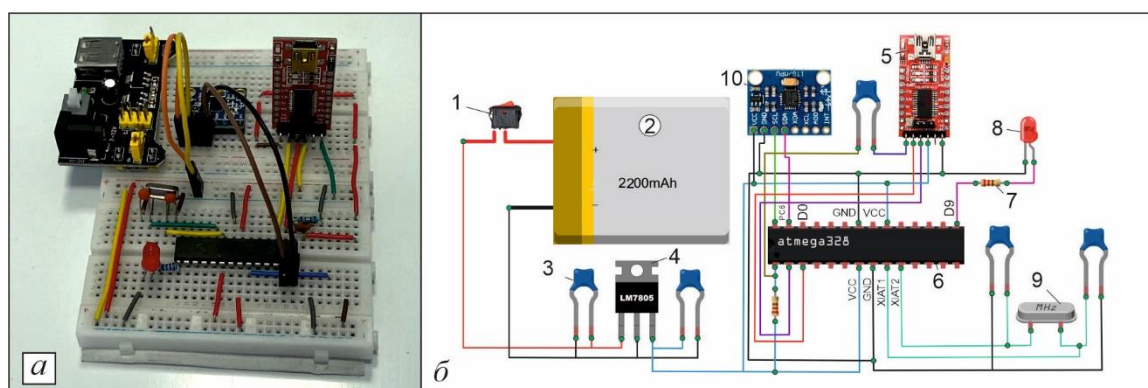


Рисунок 2. Схема подключения датчика MPU6050 к микро-контроллеру: (а) – общий вид; (б) – принципиальная схема: 1 – вы-ключатель, 2 – аккумулятор, 3 – конденсаторы, 4 – стабилизатор напряжания, 5 – программатор, 6 – микроконтроллер, 7 – резисторы, 8 – светодиод, 9 – кварцевый резонатор, 10 – акселерометр-гироскоп MPU6050.

Микроконтроллер Atmega328 является основным компонентом в данной схеме. Его можно отнести к своего рода миниатюрному компьютеру, на котором осуществляют вычисленные процессы. Atmega328 является 8-битным микроконтроллером фирмы Atmel [9], который объединяет в од-ном корпусе Flash-память, память EEPROM, оперативно-запоминающее устройство – SRAM память, порты ввода-вывода, таймеры и счетчики, программируемые USART, SPI, I2C интерфейсы, аналогово-цифровые преобразователи и сторожевой таймер. Связь MPU6050 с микроконтроллером Atmega328 осуществляется при помощи интерфейса I2C. Для того, чтобы считать показания с датчика, необходимо задать команды считывания из регистров датчика, то есть осуществить отправку данных команд с микроконтроллера. Со стороны датчика параллельно происходит следующий процесс. В нем загружаются данные в соответствующие регистры путем оцифровки значений из показаний гироскопа и акселерометра по всем трем расположенным осям. Эти оцифрованные значения, хранящихся в регистрах, считываются микроконтроллером по каналу I2C. Таким обра-зом осуществляется непрерывное передача данных в режиме реального времени.

Рассмотрим принцип работы датчика MPU6050. Он состоит из двух функциональных составляющих – акселерометра и гироскопа. Акселерометр используется для определения ориентации относительно силы тяжести, что дает представление о наклонах МБПЛА в трех направлениях – тангаж, рыскание и крен. Согласно технической докумен-тации [10,11], датчик функционирует по трем осевым значениям x, y и z (рис.3, а). Для пояснения работы условно выберем гирию в равномерном вертикальном положении по оси z (рис.3, б). В случае отклонении данной гири один из осей изменяет угол. Положение гири в плоскости или в пространстве описываются по углам Эйлера. При повороте датчика относительно оси ox и при условии, что $a_x = 0$ будет изменяться угол α (рис.3, в). Этот угол соответствует первому выражению из формулы (1). При поворо-те датчика относительно оси oy и при условии $a_y = 0$ изменяется угол β (рис.3, б). Этот

угол соответствует второму выражению. В случае отклонения угла относительно оси z, будет изменяться угол γ по третьему выражению из формулы (1).

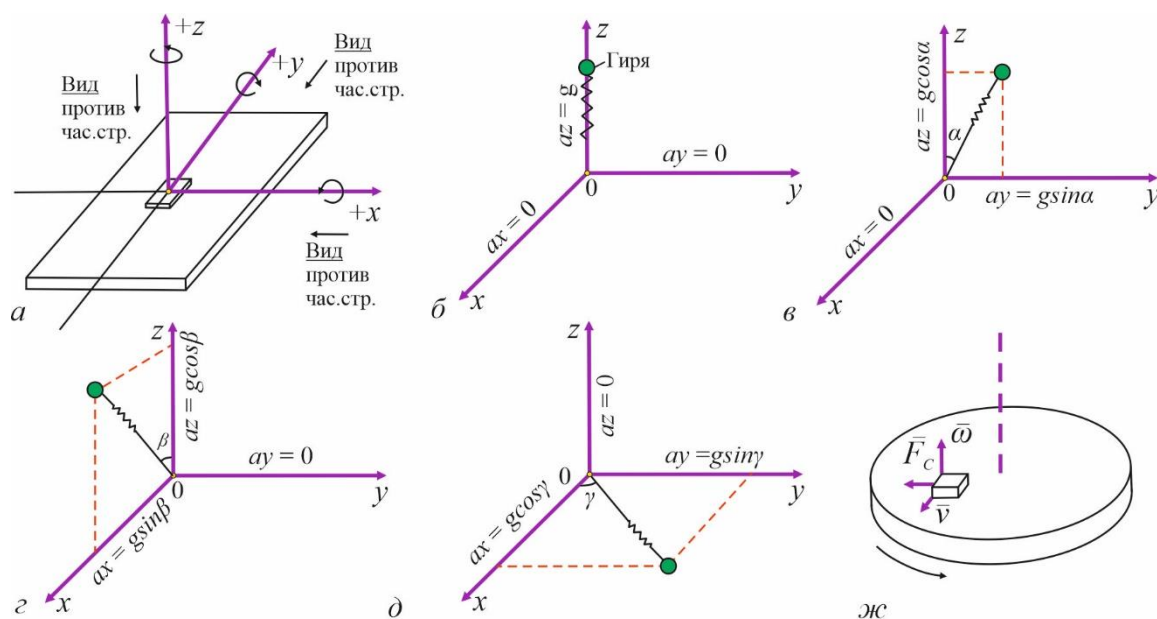


Рисунок 3. Ориентация осей в датчике MPU6050 (а); расположение гири в трехмерной координате (б); поворот датчика по оси x (в); по оси y (г); по оси z (д); функционирование силы Кориолиса: ω – угловая скорость, F_c – сила Кориолиса, v – линейная скорость.

Все описанные положения углов выражаются по формуле (1):

$$\begin{aligned}
 AccX &= \arctg\left(\frac{ay}{\sqrt{ax^2 + az^2}}\right), \text{ при } ax = 0, \quad AccX = \arctg\left(\frac{ay}{az}\right) \\
 AccY &= \arctg\left(\frac{ax}{\sqrt{ay^2 + az^2}}\right), \text{ при } ay = 0, \quad AccY = \arctg\left(\frac{ax}{az}\right) \\
 AccZ &= \arctg\left(\frac{ay}{\sqrt{ax^2 + az^2}}\right), \text{ при } az = 0, \quad AccZ = \arctg\left(\frac{ay}{ax}\right)
 \end{aligned} \tag{1}$$

В состав архитектуры MPU6050 входит специальное устройство, называемое гироскопом. Это встроенное устройство работает по изменению угловой скорости, выраженных град/с. Оно работает по принципу силы Кориолиса [12]. Например, если материальную точку (рабочее тело) установить на некую поверхность и заставить эту поверхность вращать относительно собственной оси, то на это рабочее тело будет действовать сила Кориолиса (рис.3, ж). Она возникает за счет силы инерции и направлена перпендикулярно оси вращения, а также направлению линейной скорости. По известным величинам сил Кориолиса и линейной скорости определяется угловая скорость.

Таким образом, датчик MPU6050 выдает шесть значений, измеренных по своим осям: три по акселерометру и три по гироскопу. Данные, снятые с акселерометра, по всем трем осям представляют собой сырые данные, с различными колебательными значениями. Эти колебания с различными амплитудными значениями на практике называют «шумом». Он возникает внутри модуля из-за высокой чувствительности датчика к окружающей среде. Таким образом, используя формулу (1) с применением входных сырых данных с датчика, получаем расчетный не отфильтрованный угол. На практике для получения минимальных шумов с минимальными колебаниями применяются различные методы фильтрации данных. Наиболее надежным способом сглаживания сигналов является фильтр Калмана [13-15]. Фильтрованные значения углов представлены на рисунке красной линией (рис.4).

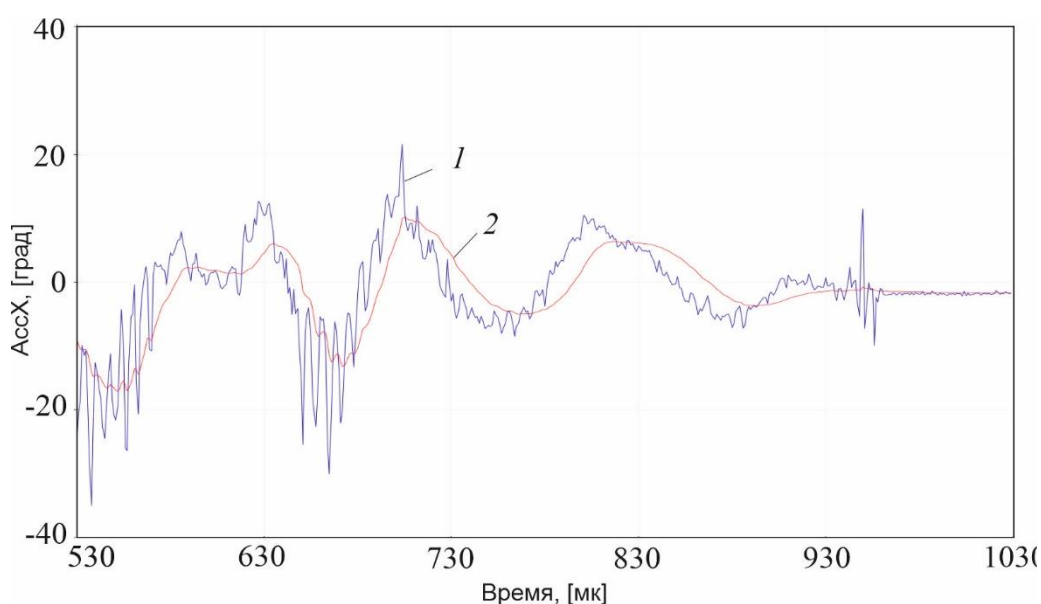


Рисунок 4. Получение сырых данных с MPU6050:
(1) – сырые данные до фильтрации; (2) – после фильтрации.

Углы, снятые по трем осям акселерометра, являются как правило неточными результатами для оценки измерения углов. Для полноценного получения углов в реальном времени дополнительно следует учитывать вторую составляющую – угловые скорости, получаемые с гироскопа. Гироскоп помогает измерить, насколько быстро МБПЛА может вращаться вокруг своих осей – тангаж, крен или рыскание. Суммируя показания обоих значений, при этом, что доля углов акселерометра должно составлять 2%, а доля от гироскопа 98%. Это позволяет определить полный угол наклона датчика относительно поверхности Земли.

$$\begin{aligned}
 TotAngX &= 0,98 \times GyrAngX + 0,02 \times AccAngX \\
 TotAngY &= 0,98 \times GyrAngY + 0,02 \times AccAngY \\
 TotAngZ &= 0,98 \times GyrAngZ + 0,02 \times AccAngZ
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Полученные данные о суммарных углах позволяют применить их в различных алгоритмических целях в зависимости от назначения. В нашем случае это управление бесколлекторного двигателя ШИМ-сигналом, исходящего из микроконтроллера Atmega328. Для подключения двигателя необходимо дополнительно подсоединить управляющий сигнал двигателя к цифровому контакту D3 (с поддержкой ШИМ-сигнала) микроконтроллера и запитать силовые линии от регулятора скорости к ионлитиевой ба-тарее.

Принцип работы управления двигателя модулем MPU6050 заключается в следующем. В зависимости от поворота модуля относительно одного из собственных осей, модуль фиксирует угол, измеренных по значениям акселерометра и гироскопа. Эти значения поступают в микроконтроллер для дальнейшей обработки. В микроконтроллере по заданному алгоритму рассчитывается общий угол. Значения общего угла связываются с командами управления двигателем по заданной библиотеке. Выходные сигналы (ШИМ-сигнал), поступающие из микроконтроллера, регулируют число оборотов двигателя в режиме реального времени.

Результаты и обсуждение. В ходе испытания модуля с двигателем были получены следующие данные (рис.5). Микроконтроллер выдает цифровые сигналы в виде прямоугольной формы. Эти прямоугольные формы представляют собой импульсы напряжения с определенной шириной. Ширина характеризуется временем, выраженным в микросекундах (мкс). Чем шире импульс, то есть чем больше промежуток времени существования импульса, тем выше будет сигнал напряжения. Именно по такой форме сигнала потребляется бесколлекторный двигатель через регулятор скорости.

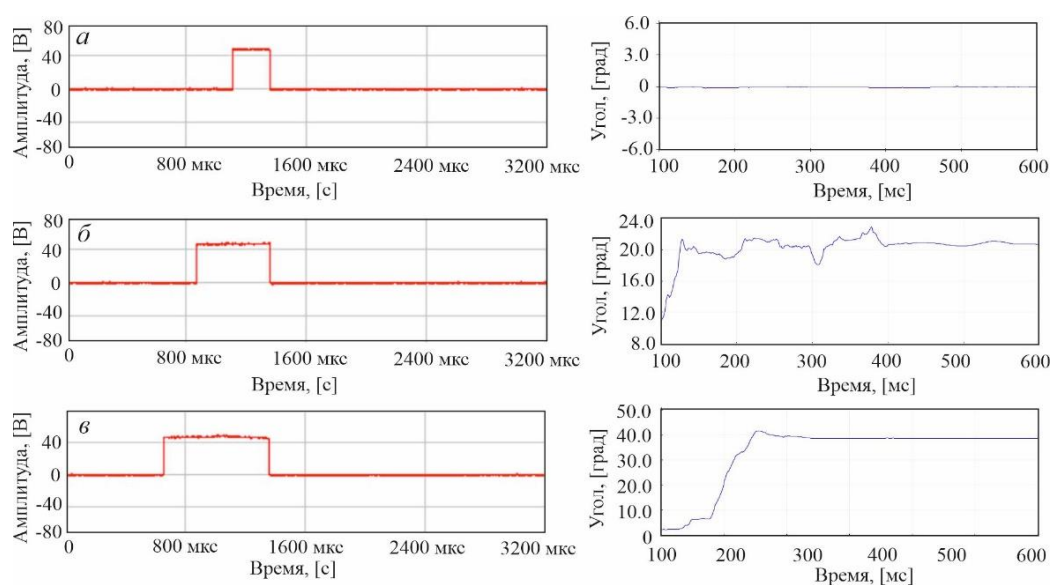


Рисунок 5. Данные, снятые с осциллографа и СОМ-порта: (а) – ширина импульса 300 мкс и угол 0°С, (б) – ширина импульса 600 мкс и угол 24°С, (в)– ширина импульса 750 мкс и угол 40°С.

При равномерно-параллельном положении модуля относительно Земли выходные импульсы с цифрового контакта D3 микроконтроллера выдают незначительные импульсы порядка 300 мкс (рис.5, а). Двигатель в этом положении находится в отключенном состоянии. При равномерном наклонении модуля относительно оси Oх на угол от 0 до 20° вращение вала двигателя равномерно увеличивает свою угловую скорость. Показание импульса с осциллографа составило 600 мкс (рис.5, б). В данной работе не замерялись значения числа оборотов двигателя в положении заданных углов. Эти значения были экспериментально определены в работе [16], по определению тяги винта с диаметром 255 мм, а также мощности бесколлекторного двигателя. В нем были определены, что при максимальных включенных двигателях из тринадцати однотипных образцов среднее число оборотов составило порядка 5884,46 об/мин (616,22 рад/с). При дальнейшем увеличении угла до 40° ширина импульса увеличивается до 750 мкс (рис.5, в). На нарастании импульса двигатель начинает значительно увеличивать свою угловую скорость. Это позволяет управлять МБПЛА в режиме автоматической стабилизации полета, если дополнительно применить в программном коде алгоритм ПИД-регулятора. Применение ПИД-регулятора позволит летающему аппарату равномерно и планомерно двигаться по заданной траектории пути без всяких колебаний, вызванными внешними условиями среды, автоматически выравнивать положения в пространстве относительно собственных осей – тангаж, рыскание или крен. Таким образом, исследование ПИД-регулятора, его аппаратной части и реализация в программном коде является непростой объемной задачей, которая будет исследоваться в отдельных статьях.

Заключение

На основании полученных экспериментальных данных следует, что применение данного типа модуля MPU6050 является неотъемлемой частью, входящей в состав любого типа летательного аппарата, в том числе и для МБПЛА. В данной статье определены принцип работы модуля, установлены связи программной части с модулем и бесколлекторным двигателем. Определены зависимости положений углов модуля от ширины импульса (ШИМ-сигнала), служащие для управления двигателем. Таким образом, исследование в данном направлении дает понимание о дальнейшей его научно-практической реализации для осуществления стабилизации полета.

Благодарность, конфликт интересов

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

Вклад авторов:

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

К.М. Байжуман: провел литературный обзор, исследование состояния проблемы.

А.Б. Болатова: провела алгоритмизацию и программирование данных, участвовала в редактировании статьи.

У.Т. Касымов: произвел конструирование и моделирование исследования.

Список литературы

1. Mohamed Elkhatib. Dynamic Modeling, Fuzzy control and Stabilization of Quadrotor Vehicle // – Publisher: Noor Publishing, 2017. – p.144. – книга на англ. языке.
2. B. Gautam. Multi-Purpose Flight Controller for UAV / – 3rd International Conference on Advancement in Electronics and Communication Engineering, AECE. – 2023 p.79-82. <https://doi.org/10.1109/AECE59614.2023.10428171>. – материалы конференции на англ. языке.
3. Alaa Sheta, Malik Braik, Dheeraj R. Optimization of PID Controller to Stabilize Quadcopter Movements Using Meta-Heuristic Search Algorithms / Journal: Applied Sciences, 2021, Vol. 11, p. 20-31. <https://doi.org/10.3390/app11146492> – статья на англ. языке.
4. Maddi, D, Sheta A., Davineni D. Optimization of PID Controller Gain Using Evolutionary Algorithm and Swarm Intelligence / – In Proceedings of the 2019 10th International Conference on Information and Communication Systems (ICICS), Irbid, Jordan, 11–13 June 2019, pp. 199-204. <https://doi.org/10.1109/IACS.2019.8809144> – материалы конференции на англ. языке.
5. Журман Д.А. Настройка стабилизации БПЛА на базе микроконтроллера семейства Arduino / – Сборник научных трудов V международной научной конференции. В 2-х частях. Том 1. Под редакцией О.Г. Берестневой. Изд-во: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, – Томск, 2018. – С. 258-263. – материалы конференции.
6. Жмудь В.А., Кузнецов К.А., Кондратьев Н.О. и др. Акселерометр и гироскоп MPU6050: первое включение на STM32 и исследование показаний в статике / – Автоматика и программная инженерия. – 2018. – №3 (25). – С.9-19. – научный журнал.
7. Alldatasheet.com [Электронный ресурс]. URL: <http://www.alldatasheet.com/mpu-6050>. (Дата обращения: 20.11.2024). - электронный ресурс.
8. Афанасьев П.П. Беспилотные летательные аппараты: основы устройства и функционирования // – Изд-во МАИ, 2008 г. –654 с. – книга.
9. Alldatasheet.com [Электронный ресурс]. URL: <http://www.alldatasheet.com/Atmega328PU>. (Дата обращения: 20.11.2024). - электронный ресурс.
10. Anbazhagan K. Raspberry Pi - Amazon Alexa Voice Services, Voice controlled Home computerization, DS18B20 Temperature Sensor, DHT11 Humidity Sensor, MPU6050 Gyro Sensor, Hall Sensor etc. // – Publisher: Independently Published, 2019. – p.212. – книга на англ. языке.
11. Романова И.К. Траектории полета летательных аппаратов // – Изд-во: Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, 2017. –149 с. – книга.
12. Сила Кориолиса [Электронный ресурс]. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki>. (Дата обращения: 20.11.2024). - электронный ресурс.
13. Фильтр Калмана - Введение [Электронный ресурс]. URL: <https://habr.com/ru/articles/140274> (Дата обращения: 22.11.2024). - электронный ресурс.
14. Шахтарин Б.И. Фильтры Винера и Калмана: учебное пособие для вузов. // – Изд-во: Горячая линия-Телеком, 2014 г. –408 с. – книга.
15. Алгоритмы обработки информации навигационных систем и комплексов летательных аппаратов / М. С. Селезнева, К. Шень, К. А. Неусыпин, А. В. Пролетарский. – Москва: МГТУ им. Баумана, 2018. – 234 с. – книга.
16. 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 2024г., г. Махачкала: ДГТУ, 2024. - 223 с. – материалы конференции.

К.Т.Ахметов*¹, К.М.Байжуман², А.Б.Болатова¹, У.Т. Касымов¹

¹*Еуразия ұлттық университеті. Л.Н. Гумилева, Астана, Қазақстан*

²*Әскери-стратегиялық зерттеулер орталығы, Астана, Қазақстан*

MPU6050 көмегімен коллекторсыз қозғалтқышты басқаруды эксперименттік зерттеу

Аңдатпа. Бұл мақалада шағын көлемді ұшқышсыз ұшу аппаратының ұшуын тұрақтандыруға қызмет ететін MPU6050 модулімен А2212/13Т маркалы коллекторсыз қозғалтқышты басқару мәселелері қарастырылған. Ұшу аппаратының осы түрінің конструкциясы, сондай-ақ оған аппараттық бөлік пен қозғалтқыш қондырғыларының орналасуы туралы қысқаша ақпарат қарастырылған. Коллекторсыз типтегі қозғалтқыштары бар аппараттық бөлікті іске асыру үшін эксперименттік зерттеулер жүргізілді. Қозғалтқышты басқаруды жүзеге асыру үшін бастапқыда Atmega328 мик-роконтроллерін MPU6050 модуліне қосу схемасы жасалды, ол акселерометр-гироскоп сенсоры және FDTI бағдарламашысының көмегімен код бағдарламаны жүзеге асырылды. Бұл модульдің жұмыс принципі және оны қосу қысқаша нұсқасы сипатталған. Нақты уақыт режимінде акселе-рометр мен гироскоптан алынған шикі деректер алынды, оларды өңдеу үшін Калман сүзгісі қолданылды, модульдің айналу бұрышына байланысты қозғалтқышты басқару алгоритмі жасалды. Алынған нәтижелер бойынша модульдің айналу бұрышының микроконтроллерден шығатын импульстің еніне тәуелділігі алғаш рет анықталды. Модуль 0-ден 40 градусқа дейін қисайған кезде импульстің ені 300-ден ~750 мкс-ге дейін өзге-ретіні анықталды.

Түйін сөздер: коллекторсыз қозғалтқыш, MPU6050 модулі, ұшқышсыз ұшу аппараты, Atmega328 микроконтроллері, ЕИМ-сигналы.

К.Т.Akhmetov*¹, К.М.Baizhuman², А.В.Boлатова¹, U.T. Kasymov¹

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

²*Center for Military-Strategic Research, Astana, Kazakhstan*

Experimental Study on Brushless Motor Control Using MPU6050

Abstract. This article discusses the issues of controlling the A2212/13T brushless motor by the MPU6050 module, which serves to stabilize the flight of a small-sized unmanned aerial vehicle. A brief summary of the design of this type of aircraft is given, as well as the placement of hardware and propulsion systems in it. Experimental studies were conducted to implement the hardware with brushless motors. To implement engine control, a circuit was initially created for connecting the Atmega328 microcontroller to the MPU6050 module, which is an accelerometer-gyroscope sensor and firmware using the FDTI programmer. The operating principle of this module and its connection are briefly described. Raw data taken from the accelerometer and gyroscope in real time were obtained, a Kalman filter was applied to this data for processing them, an algorithm for controlling the engine depending on the module rotation angle was compiled. Based on the results obtained, the dependences of the module rotation angle on the pulse width emanating from the microcontroller were determined for the first time. It was found that when the module is tilted at an angle from 0 to 40 degrees, the pulse width changes from 300 to ~750 μ s.

Keywords: brushless motor, MPU6050 module, unmanned aerial vehicle, Atmega328 microcontroller, PWM signal.

References

1. Mohamed Elkhatib. Dynamic Modeling, Fuzzy control and Stabilization of Quadrotor Vehicle // – Publisher: Noor Publishing, 2017. – p.144.
2. B. Gautam. Multi-Purpose Flight Controller for UAV / – 3rd International Conference on Advancement in Electronics and Communication Engineering, AECE. – 2023 p.79-82. <https://doi.org/10.1109/AECE59614.2023.10428171>.
3. Alaa Sheta, Malik Braik, Dheeraj R. Optimization of PID Controller to Stabilize Quadcopter Movements Using Meta-Heuristic Search Algorithms / Journal: Applied Sciences, 2021, Vol. 11, p. 20-31. <https://doi.org/10.3390/app11146492>.
4. Maddi, D, Sheta A., Davineni D. Optimization of PID Controller Gain Using Evolutionary Algorithm and Swarm Intelligence / – In Proceedings of the 2019 10th International Conference on Information and Communication Systems (ICICS), Irbid, Jordan, 11–13 June 2019, pp. 199-204. <https://doi.org/10.1109/IACS.2019.8809144>.
5. D.A. Zhurman. Nastrojka stabilizacii BPLA na baze mikrokontrollera semejstva Arduino / – Sbornik nauchnyh trudov V Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii. V 2-h chastjah. Tom 1. Pod redakciej O.G. Berest-nevoj. Izd-vo: Nacional'nyj issledovatel'skij Tomskij politehnicheskij uni-versitet, – Tomsk, 2018. – str. 258-263. [in russian].
6. V.A. Zhmud', K.A. Kuznecov, N.O. Kondrat'ev i dr. Akselerometr i giroskop MPU6050: pervoe vkljuchenie na STM32 i issledovanie pokazanij v statike / – Avtomatika i programmaja inzhenerija. – 2018. – №3 (25). – str.9-19 [in russian].
7. Alldatasheet.com [Jelektronnyj resurs]. URL: <http://www.alldatasheet.com/mpu-6050>. (Data obrashhenija: 20.11.2024) [in russian].
8. Afanas'ev P.P. Bepilotnye letatel'nye apparaty: osnovy ustrojstva i funkcionirovanija // – Izd-vo MAI, 2008 g. – s. 654 [in russian].
9. Alldatasheet.com [Jelektronnyj resurs]. URL: <http://www.alldatasheet.com/Atmega328PU>. (Data obrashhenija: 20.11.2024) [in russian].
10. Anbazhagan K. Raspberry Pi - Amazon Alexa Voice Services, Voice controlled home computerization, DS18B20 Temperature Sensor, DHT11 Humidity Sensor, MPU6050 Gyro Sensor, Hall Sensor etc. // – Publisher: Independently Published, 2019. – p.212.
11. Romanova I.K. Traektorii poleta letatel'nyh apparatov // – Izd-vo: Moskovskij gosudarstvennyj tehničeskij universitet imeni N. Je. Bauman, 2017. – str. 149 [in russian].
12. Sila Koriolisa [Jelektronnyj resurs]. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki>. (Data obrashhenija: 20.11.2024) [in russian].
13. Fil'tr Kalmana - Vvedenie [Jelektronnyj resurs]. URL: <https://habr.com/ru/articles/140274> (Data obrashhenija: 22.11.2024) [in russian].
14. Shahtarin B.I. Fil'try Vinera i Kalmana. Uchebnoe posobie dlja vuzov. // – Izd-vo: Gorjachaja linija-Telekom, 2014 g. – s. 408 [in russian].
15. Algoritmy obrabotki informacii navigacionnyh sistem i kompleksov letatel'nyh apparatov / M. S. Selezneva, K. Shen', K. A. Neusypin, A. V. Proletarskij. – Moskva: MGTU im. Bauman, 2018. – 234 s [in russian].
16. Ahmetov K.T., Bolatova A.B., Bajzhuman K.M., Sagi A.A. Problemy ma-shinostroenija: sovremennye tehnologii obrabotki, materialy, mashiny, agregaty. Sbornik statej po materialam Vserossijskoj nauchno-praktičeskoj konferencii. 11-12 oktjabrja 2024g., g. Mahachkala: DGTU, 2024. – 223 s [in russian].

Сведения об авторах:

Ахметов К.Т. – автор корреспонденции, кандидат технических наук, доктор PhD, старший преподаватель кафедры космической техники и технологии, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумиле-ва, ул. Кажымукана, 11, 010000, Астана, Казахстан.

Байжуман К.М. – магистр технических наук, менеджер по проектам, Центр военно-стратегических исследований, ул. Сарайшык, 24, 010000, Астана, Казахстан.

Болатова А.Б. – кандидат технических наук, доцент кафедры «Транс-портная инженерия», Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, 010000, Астана, Казахстан.

Касымов У.Т. – кандидат технических наук, профессор кафедры космической техники и технологии, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 11, 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.

Baizhuman K.M. – master of technical sciences, project manager at the center for military-strategic research, Sarayshyk street 24, 010000, Astana, Kazakhstan.

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

Kasymov U.T. – candidate of technical sciences, professor of the department of space engineering and technology, L.N. Gumilyov Eurasian national university, Kazymukan street 11, 010000, Astana, Kazakhstan.

Ахметов К.Т. – хат-хабар үшін 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.

Байжұман Қ.М. – техника ғылымдарының магистрі, әскери-стратегиялық зерттеулер орталығындағы жобалар жөніндегі менеджер, Сарайшық к-сі, 24, 010000, Астана, Қазақстан.

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

Қасымов У.Т. – техника ғылымдарының кандидаты, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің ғарыш техникасы және технологиялары кафедрасының профессоры, Қажымұқан көшесі, 11, 010000, Астана, Қазақстан.



Copyright: © 2024 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/>).