

УДК 681.511

DOI: [10.26102/2310-6018/2021.32.1.015](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2021.32.1.015)

## Контроль высоты и управление траекторным движением автономного миниатюрного летательного аппарата

Хтет Сое Паинг, Хан Мью Хтун, Чжо Сое Вин, Зо Мью Наин

*Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,  
Москва, Российская Федерация*

**Резюме.** В данной статье представлены результаты исследования миниатюрного летательного аппарата (МЛА), являющегося автономным в условиях внешней среды. Основными достижениями в области данных исследований являются как новые схемы слежения за траекторией, так и схемы управления ориентацией в реальном режиме полета. Этот МЛА создан на основе традиционного квадрокоптера. Для стабилизации положения квадрокоптера используется ПИД-регулятор. Предлагаемый регулятор сконструирован таким образом, чтобы иметь возможность ослаблять влияние внешних ветровых воздействий и гарантировать устойчивость в этом состоянии. Для автономного отслеживания траектории необходимо иметь фиксированную высоту полета. Кроме того, микроконтроллер ARM cortex M4 выполняет обработку данных. Траектория определяется при помощи GPS в программном обеспечении планировщика миссий для внешней среды. Для связи в реальном времени между роботом и наземной станцией используется модуль HMTR. Полетные данные сохраняются в памяти SD-карты и преобразуются в код MATLAB для воспроизведения в режиме реального времени. Экспериментальные результаты использования предложенного регулятора на автономном Квадрокоптере в реальных условиях показывают эффективность нашего подхода.

**Ключевые слова:** контроль высоты, квадрокоптер, автономный, ПИД-регулятор, траекторное движение, стабилизация.

**Для цитирования:** Хтет Сое Паинг, Хан Мью Хтун, Чжо Сое Вин, Зо Мью Наин. Контроль высоты и управление траекторным движением автономного миниатюрного летательного аппарата. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2021;9(1). Доступно по: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=933> DOI: 10.26102/2310-6018/2021.32.1.015

## Altitude and trajectory control of an autonomous quadcopter

Htet Soe Paing, Han Myo Htun, Kyaw Soe Win, Zaw Myo Naing

*National Research University "MIET", Zelenograd,  
Moscow, Russian Federation*

**Abstract:** This article presents a miniature aircraft (MLA), which is autonomous in the environment. The major acc in these studies are both new trajectory tracking schemes and attitude control schemes in real flight mode. This MLA is based on a traditional quadcopter. A PID controller is used to stabilize the position of the quadcopter. The proposed regulator is designed in such a way as to be able to weaken the influence of external wind influences and to guarantee stability in this state. For autonomous trajectory tracking, you must have a fixed flight altitude. Besides, the ARM Cortex M4 microcontroller performs data processing. The track is determined using GPS in the mission planner software for the external environment. The HMTR module is used for real-time communication between the robot and the ground station. Flight data is saved to SD card memory and converted to MATLAB code for real-time playback. The experimental results of using the proposed regulator on an autonomous Quadcopter in real conditions show the effectiveness of our approach.

**Keywords:** altitude control, quadcopter, autonomous, PID controller, trajectory, stability

**For citation:** Htet Soe Paing, Han Myo Htun, Kyaw Soe Win, Zaw Myo Naing. Altitude and trajectory control of an autonomous quadcopter. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2021;9(1). Available from: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=933> DOI: 10.26102/2310-6018/2021.32.1.015 (In Russ).

## Введение

С недавнего времени квадрокоптер является популярной роботизированной системой, ставшей широко распространенной среди исследователей [1]. Также беспилотные летательные аппараты (БПЛА), одним из видов которых является квадрокоптер, вызвали растущий интерес благодаря последним технологическим прорывам, связанным по большей части, с приборостроением [2]. Эти транспортные средства (БПЛА) все больше набирают популярность благодаря значительным технологическим достижениям в области микроэлектроники и МЭМС (микроэлектромеханических систем), обеспечивающих огромный ассортимент высокопроизводительных микроконтроллеров и датчиков нескольких типов, элементов, которые необходимы для БПЛА. В течение времени, были введены производные аппараты, созданные на базе квадрокоптера. Так, в 1907 году квадрокоптер (гироплан № 1), который был изготовлен компанией Vreguet-Richet, осуществил свой первый подъем. [3]. Управление квадрокоптером осуществляется путем независимого регулирования частоты вращения каждого ротора. Такая конструкция системы БПЛА особенно подходит для небольших помещений, поскольку это уменьшает механическую раскрутку ротора и упрощает алгоритмы управления.

Как правило, эти беспилотные летательные аппараты (БПЛА) используются для военных и гражданских целей, таких как мониторинг дорожного движения, патрулирование при лесных пожарах, оползнях и иных спасательных работах, при которых риски пилота часто высоки. Кроме того, приложения для использования в военных целях в настоящее время составляют львиную долю рынка беспилотных летательных аппаратов, и этот промышленный сектор значительно растет. Также, беспилотники могут быть полезны во внутренних и наружных местах использования. Более того, они могут быть использованы для работы в опасных зонах, которые представляют собой единственно возможный для человека вариант наблюдения. По этим причинам БПЛА в последнее время вызывают большой интерес в научных и академических кругах, и они используются в качестве платформы для многих приложений, таких как фундаментальные академические исследования. Квадрокоптер также можно рассматривать как стандартную платформу для исследований воздушной робототехники, таких как реализации сложных и нелинейных контроллеров, исследования аппаратной и программной схем, а также одновременной локализации и картографирования [4-7].

Квадрокоптерный летающий робот состоит из четырех роторов, которые должны быть соответствующим образом управляемы для поддержания устойчивости полета и управления ориентацией по трем осям. Эти роторы закреплены по краям крестообразной конструкцией [6]. Для обеспечения безопасности и наилучшего результата полета, а также для достижения успешного выполнения миссии необходим стабильный полет.

Квадрокоптер рассматривается как малоприводная система с шестью степенями свободы (три поступательных и три вращательных) и только четырьмя независимыми входами (частоты вращения ротора), в которых состояния активно связаны. Поскольку

Квадрокоптер обладает нелинейной динамикой, для управления его положением и движением было разработано множество контроллеров [8]. Однако исследование открытых исходных источников и коммерческих роботов показывает, что пропорционально интегральные производные (ПИД) контроллеры используются более чем в 90 процентах случаев. По этой причине регуляторы стабилизации положения размещены на традиционном ПИД-контроллере. Как было показано на примере четырехроторного летательного аппарата [9], для управления положением системы внедрены и применяются ПИД - регулятор и линейный квадратичный регулятор (ЛКР). Однако, эти сконструированные регуляторы располагаются на линеаризованной динамической модели беспилотников. Контроллеры эффективно достигают стабильности системы, если транспортное средство находится в конфигурации, близкой к точке линеаризации модели вокруг него. Однако производительность резко ухудшается, если состояние транспортного средства значительно отличается от желаемого равновесия. Таким образом, эти контроллеры испытывают трудности в процессе обработки помех и, по-видимому, вряд ли позволяют отслеживать траекторию. Так, на Рисунке (1) показан квадрокоптер, представленный в этой статье.



Рисунок 1- Рассматриваемый квадрокоптер  
Figure 1- Considered quadcopter

В данной работе основное внимание уделяется разработке автономного летательного аппарата на базе проектируемого квадрокоптера с возможностью достижения целей ведения разведки и картографирования. С этой целью изучается конфигурация общей платформы. Далее описывается динамическое моделирование квадрокоптера. Затем выводится алгоритм управления высотой и его необходимый проектируемый контроллер на реальном автономном винтокрылом летательном аппарате. Наконец, полученные результаты показываются с помощью MATLAB/Simulink.

### Динамическое моделирование квадрокоптера

Первым этапом перед разработкой контроллера системы является динамическое моделирование системы [10]. Принцип такого квадрокоптера практически совпадает с известной ранее концепцией квадрокоптера [12]. Все четыре винта сразу же монтируются в двигатель без каких-либо зубчатых передач. Также

отдельно фиксируются оси вращения гребного винта. Кроме того, на Рисунке (2) показана теория полета квадрокоптера.

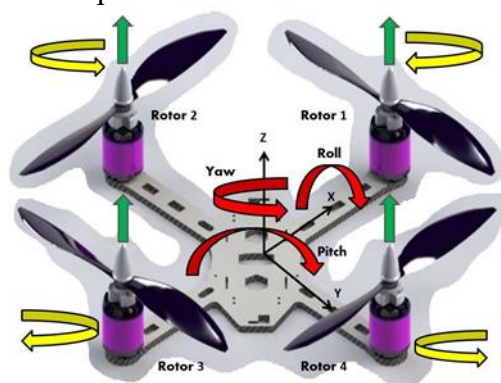


Рисунок 2- Теория полета квадрокоптера  
Figure 2 - Theory of flight quadcopter

Согласно этому Рисунку, скорость винтов прямого направления равна  $\omega_1$  и  $\omega_2$ , скорость винтов правого направления равна это  $\omega_3$  и  $\omega_4$ , скорость винтов обратного направления- $\omega_5$  и  $\omega_6$ , а скорость винтов левого направления- $\omega_7$  и  $\omega_8$ . По сути, квадрокоптер представляет собой 6-степеней свободы твердого тела и его дросселя обеспечиваются четырьмя двигателями постоянного тока. Таким образом, Квадрокоптер представляет собой четырехходовую систему управления. С учетом эффекта гироскопа можно рассчитать гравитационный вектор и вектор движения Квадрокоптера. Отсюда, динамические уравнения Квадрокоптерной системы могут быть расширены.

Тем самым можно описать кинематику Квадрокоптера:

$$\Theta = R\Omega \quad (1)$$

$$\Omega = T\omega \quad (2)$$

где  $\Theta$  и  $\Omega$  -вектор положения и вектор угловой скорости в неподвижной раме тела соответственно, а R-матрица вращения и T-матрица переноса. Кроме того, матрица вращения и матрица переноса могут быть сформулированы как [ 7 ]:

$$R = \begin{pmatrix} c_\psi c_\theta & c_\psi s_\theta s_\phi - s_\psi c_\phi & c_\phi s_\theta c_\psi + s_\phi s_\psi \\ c_\phi s_\psi & s_\phi s_\theta s_\psi - c_\phi c_\psi & s_\psi s_\theta c_\phi - c_\psi s_\phi \\ -s_\theta & c_\theta s_\psi & c_\theta c_\phi \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$T = \begin{pmatrix} 1 & \sin \phi \tan \theta & \cos \phi \tan \theta \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi \cos \theta & \cos \phi \cos \theta \end{pmatrix} \quad (4)$$

где c и s обозначают соответственно функции cos и sin, а g-гравитационную постоянную. Основываясь на Ньютоновском Уравнения Эйлера, динамические уравнения движения Квадрокоптера можно описать как:

$$m(\dot{v}_B + \omega_B \times v_B) = F_B \quad (5)$$

$$I \dot{\omega}_B + \omega_B + \omega_B \times (I \omega_B) = \tau_B$$

Так как распределение массы квадрокоптера симметрично, то и матрица инерции диагональна. Следовательно, это может привести к упрощенной динамической модели. Модель определена для полета при наведении, поэтому в этом случае может быть:

$$\begin{aligned} x'' &= (\cos \phi \sin \theta \cos \psi + \sin \phi \sin \psi) \frac{1}{m} U_1 \\ y'' &= (\cos \phi \sin \theta \sin \psi - \sin \phi \cos \psi) \frac{1}{m} U_1 \\ z'' &= -g + (\cos \phi \cos \theta) \frac{1}{m} U_1 - D_z \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \phi'' &= \theta' \psi' \left( \frac{I_y - I_z}{I_x} \right) + \left( \frac{J_{TP}}{I_x} \right) \theta' \omega_r + \frac{1}{I_x} U_2 \\ \theta'' &= \psi' \phi' \left( \frac{I_z - I_x}{I_y} \right) - \left( \frac{J_{TP}}{I_y} \right) \phi' \omega_r + \frac{1}{I_y} U_3 \\ \psi'' &= \theta' \phi' \left( \frac{I_x - I_y}{I_z} \right) + \left( \frac{1}{I_z} \right) U_4 \end{aligned}$$

$$\omega_r = -\omega_1 + \omega_2 - \omega_3 + \omega_4 \quad (7)$$

Кроме того, системные входные компоненты определяются как:

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= b(\omega_1^2 + \omega_2^2 + \omega_3^2 + \omega_4^2) \\ U_2 &= bl(-\omega_2^2 + \omega_4^2) \\ U_3 &= bl(-\omega_1^2 + \omega_3^2) \\ U_4 &= d(-\omega_1^2 + \omega_2^2 - \omega_3^2 + \omega_4^2) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где  $\omega_i$  угловая скорость винта, b-коэффициент тяги, A d-коэффициент лобового сопротивления. Каждый ротор расположен на конце стержней, где l-длина от центра до ротора [11]. Кроме того, измерения уровня шума рассматриваются как помехи во вращательном режиме.

### Управление квадрокоптером

Схема управления квадрокоптером может быть представлена как на Рис.3, она состоит из двух контуров: контура управления ориентацией и внутреннего контура, который выдает управляющие команды для перемещения квадрокоптера. Кроме того, контур управления положением и внешний контур создают ссылки для внутреннего контура.

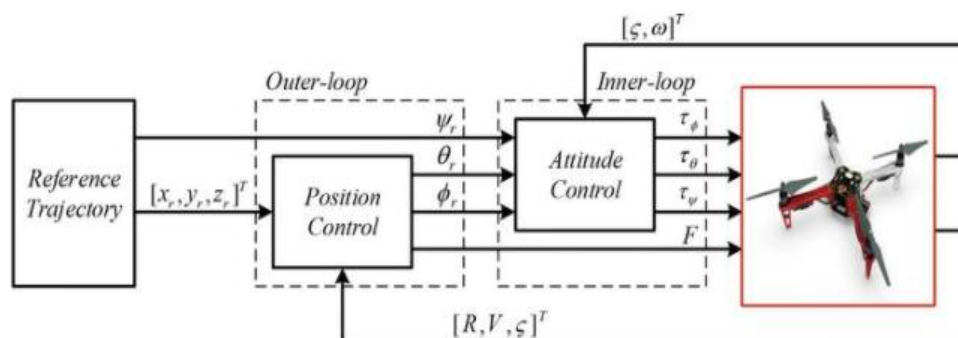


Рисунок 3- Предполагаемая схема алгоритма управления  
Figure 3- Proposed diagram of the control algorithm

### Конструкция контроллера

В этом разделе описана процедура проектирования контроллера, который состоит из внутреннего контура контроллера и внешнего контура контроллера. Также в этом разделе рассматривается аппаратная конфигурация для реализации проектируемого контроллера на квадрокоптере. Известно, что пид - контроллер- это всем известный контроллер, который может также использоваться в различных приложениях.

Этот классический ПИД-регулятор используется для стабилизации квадрокоптера. Квадрокоптер-это система с недостаточным приводом. Таким образом, он должен управляться замкнутым контуром контроллера, чтобы обеспечить его стабилизацию и иметь возможность автономно следовать заданной траектории.

**А. Внутренний Контур Управления.** Есть два типа движений, которые происходят на квадрокоптере, которые имеют шесть степеней свободы; три степени - для вращательного и три для возвратного. Как видно из примера (6), вращательное движение не зависит от локального движения, в то время как обратное не верно. Таким образом, схема двухконтурного управления предназначена для управления ориентацией летающего робота, как показано на Рисунке (3). Внутренний контур управления предназначен для обеспечения устойчивости и трассировки расчетных углов Эйлера, в то время как внешний контур управления является предназначенным для регулирования высоты полета робота.

Внутренний контур управления - это регулятор положения, который управляет эйлеровыми углами системы. Кроме того, внешний контур управления является ответом на медленную динамику. То есть для стабилизации угла крена, поворота и отклонения, система ориентирования, содержит три отдельных ПИД-регулятора, которые индуцируют состояние системы до покоя в точке равновесия, которую она может выбрать в качестве исходной. Итак, закон управления можно описать следующим образом:

$$U = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (9)$$

Где  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  прирост контроля и погрешность сигнал представляет собой разность расчетного значения углов ориентации и измеренного выхода сенаторов на каждом временном шаге в виде:

$$\begin{aligned} e_\varphi(t) &= \varphi_d(t) - \varphi(t) \\ e_\theta(t) &= \theta_d(t) - \theta(t) \\ e_\psi(t) &= \psi_d(t) - \psi(t) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} U &= K_{p\varphi} e_\varphi(t) + K_{i\varphi} \int_0^t e_\varphi(\tau) d\tau + K_{d\varphi} \frac{de_\varphi(t)}{dt} \\ U &= K_{p\theta} e_\theta(t) + K_{i\theta} \int_0^t e_\theta(\tau) d\tau + K_{d\theta} \frac{de_\theta(t)}{dt} \\ U &= K_{p\psi} e_\psi(t) + K_{i\psi} \int_0^t e_\psi(\tau) d\tau + K_{d\psi} \frac{de_\psi(t)}{dt} \end{aligned} \quad (11)$$

**В. Внешний контрольный контур.** Регулятор высоты выполнен в виде внешней петли для удержания квадрокоптера в режиме стабилизации полета и удержания



высоты в расчетном положении по оси Z. Так как он имеет более низкий приоритет от управления положением, регулирование высоты проектируется как второй контур управления с простым законом регулирования, а именно:

$$T_z = k_p(z_d - z) + k_d(z'_d - z') - mg$$

$$T = \frac{-T_z}{\cos \varphi \cos \theta} \quad (12)$$

Тогда закон регулирования высоты может быть представлен в виде

$$U_1 = \frac{-1}{\cos \theta \cos \varphi} (k_p(z_d - z) + k_d(z'_d - z') - mg) \quad (13)$$

### Конфигурация аппаратного обеспечения контроллера

На квадрокоптере реализован классический пид-контроллер, полетные данные которого отслеживаются в программном обеспечении планировщика полетов в режиме онлайн. Поскольку полетные данные сохраняются в памяти micro SD, которая находится на микропроцессоре, сохраненные данные преобразуются в файл данных MATLAB, а затем эти данные экспортируются в MATLAB/SIMULINK после завершения полета. Для обработки данных используется процессор ARM Cortex M4, который является основным контроллером. Кроме того, существует датчик MPU6000 Gyro-Accel, который сочетает в себе 3-осевой гироскоп и 3-осевой акселерометр на одной кремниевой матрице вместе. Этот датчик gyro-Accel имеет встроенный цифровой процессор движения (DMP) с возможностью обработки сложных 9-осевых алгоритмов слияния движений. Кроме того, на Квадрокоптере установлен компас HMC5883L для определения изменения направления движения. Кроме того, на рассматриваемом Квадрокоптере размещены приемник RX R710 DSM2 с 7 каналами и 2,4 ггерц, четыре Pentium 30A, четыре двигателя постоянного тока и 11,1-вольтовая батарея емкостью 2200 мАч. Также на входе регулятора квадрокоптера имеется приемник R710 исполнения. dsm2 приемник. Разработанная электронная плата показана на Рисунке (4).

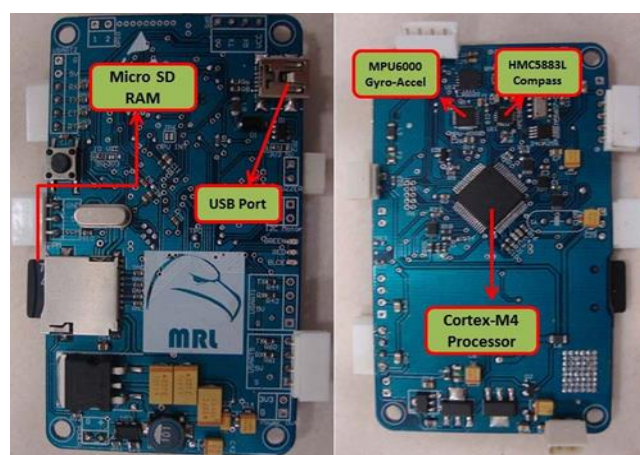


Рисунок 4- Спроектированная электронная плата  
 Figure 4- Designed electronic Board

В дополнение к этому, приемник RX R710 DSM2 будет генерировать PWM-сигнал, а датчик MPU6000 будет генерировать данные в качестве цифрового входа. Эти данные поступают в управляемый процессор, который передаст все данные главному

процессору через универсальную асинхронную передачу от TX ведомого процессора к RX мачтовому процессору. Когда квадрокоптер полетит в нужную область, гироскоп автоматически стабилизирует его, так как выход PWM влияет на стабилизацию системы Квадрокоптера.

Для управления ориентацией все данные берутся из IMU с частотой 100 Гц. Кроме того, для эффективного привода четырех двигателей постоянного тока (BDC) выбираются регуляторы скорости i2c. Помимо этого, модуль HMTR с беспроводными данными 414 МГц используется для связи между наземными станциями и летательным роботом. На Рисунке (5) показана заявленная аппаратная схема системы управления полетом.

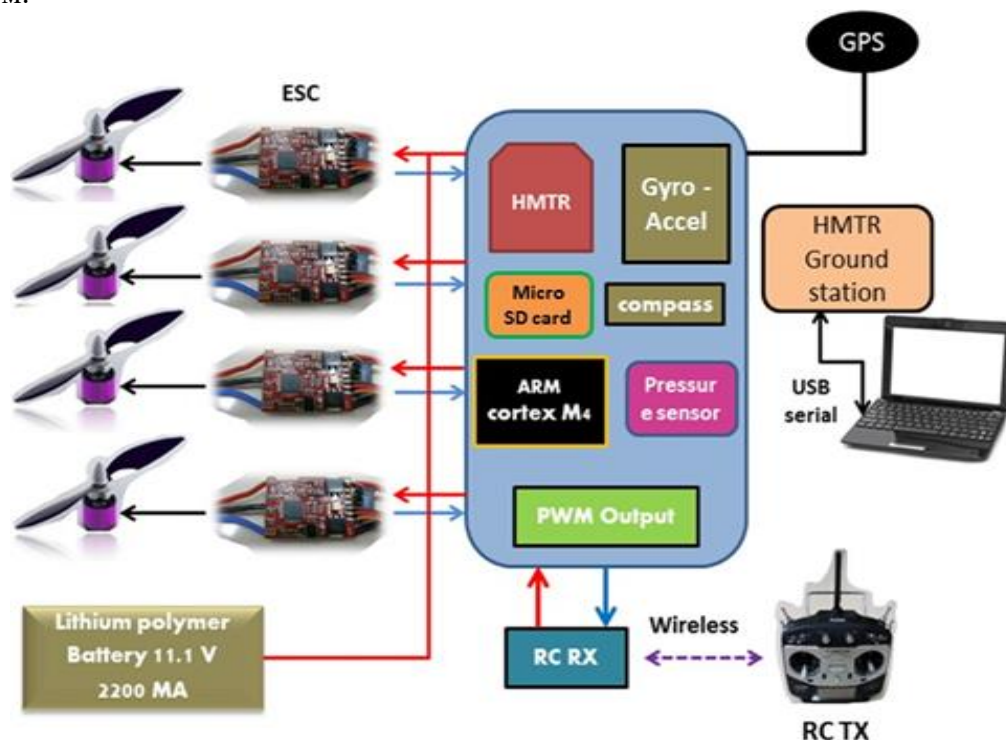


Рисунок 5- Аппаратная схема контроллера  
 Figure 5: Hardware diagram of the controller

### Полученные результаты и их обсуждение

В данной главе приведены результаты реализации разработанного контроллера на рассматриваемом квадрокоптере. Кроме того, предложенная стратегия управления сначала тестируется путем моделирования в среде MATLAB, а затем реализуется на реальной системе [ 7 ].



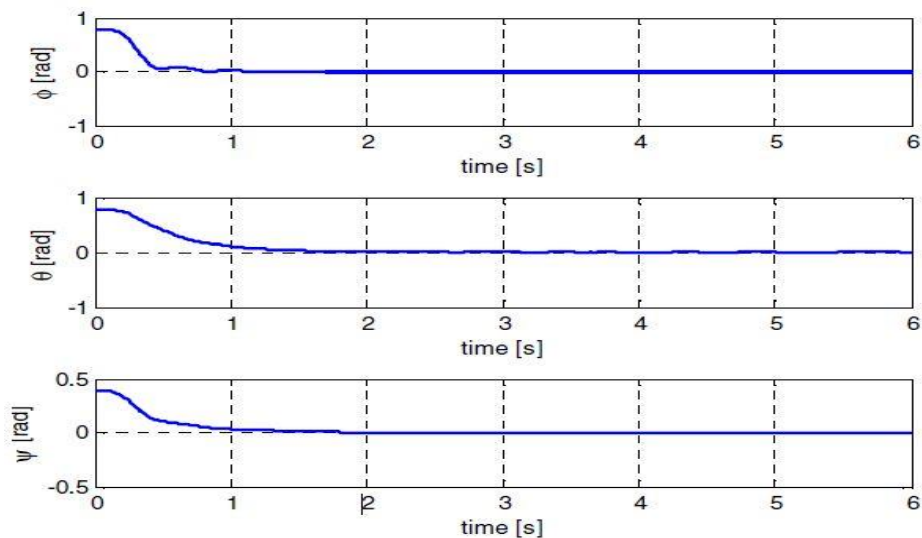


Рисунок 6- Углы установки квадрокоптера для пид-контроллера  
 Figure 6- Quadcopter mounting angles for the pid controller

Как показано на Рисунке (6), разработанный ПИД-регулятор увеличивает скорость регулирования. Следует отметить, что рассматриваемый контроллер старается устранить измерительные шумы и помехи. В результате реализации входные и выходные углы ориентации квадрокоптера или углы крена и поворота аналогичны (рис. 7).

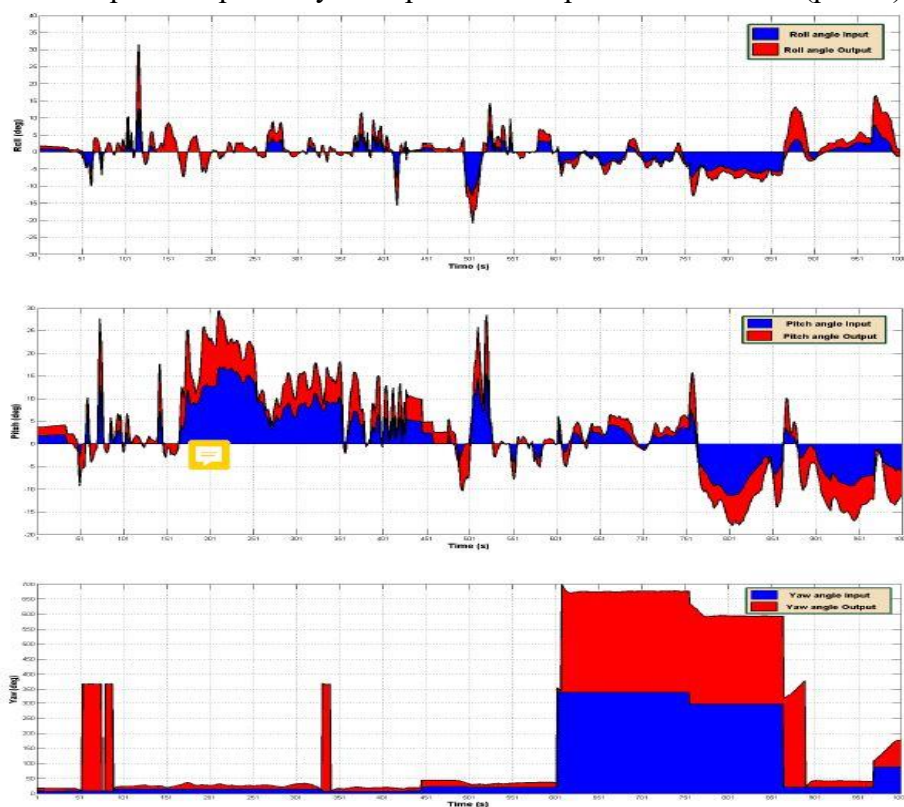


Рисунок 7- Вход и выход углов ориентации для ПИД-регулятора  
 Figure 7 - Input and output of orientation angles for the PID controller

Положение угла отклонения изменяется медленнее из-за углового входа, который стимулирует его более плавное движение.

Кроме того, данный регулятор высоты регулирует положение квадрокоптера до желаемой отметки за 2 секунды, как показано на Рисунке (8). Отклоняя силу сопротивления ветра по оси z, ПИД-регулятор выполняет свой лучший маневр для рассматриваемого квадрокоптера.

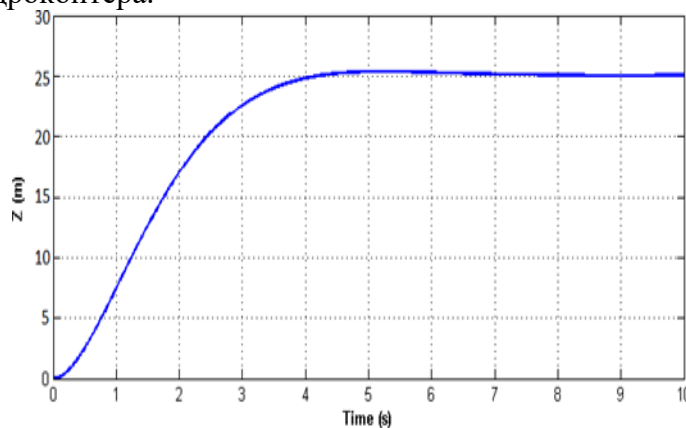


Рисунок 8- Регулировка высоты Квадрокоптера для ПИД-регулятора  
 Figure 8 - Quadcopter height adjustment for the PID controller

Как показано на Рисунке (8), система поддерживает высоту в 25 метров, хотя на датчиках существует шум [ 7 ]. Также для реализации траектории слежения в данной работе робот имеет площадь более 350 квадратных метров. Как показано на рис. 9, стабилизация и управление ориентацией осуществляются с учетом закона управления, насколько это возможно, без потери маневренности.

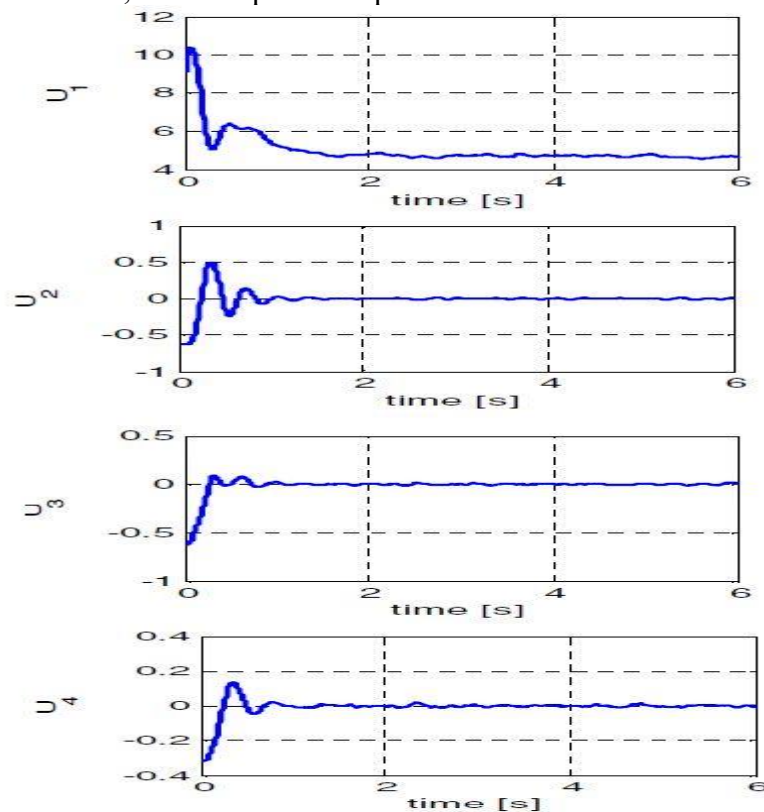


Рисунок 9- Управление усилием квадрокоптера для ПИД-регулятора  
 Figure 9- Quadcopter force control for PID controller

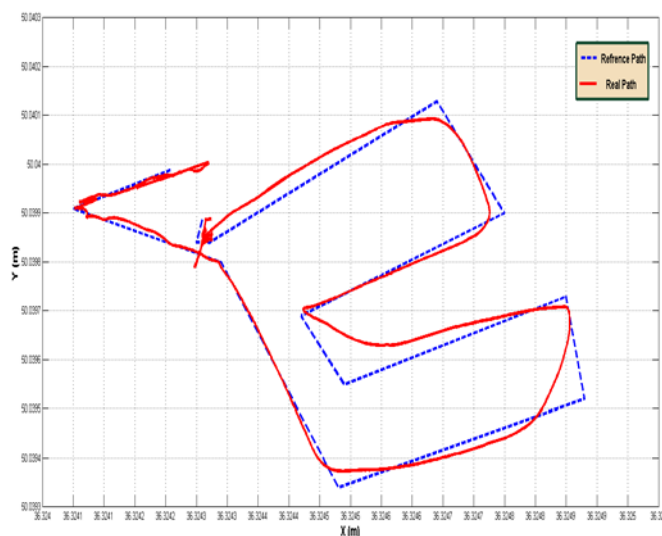


Рисунок 10- Отслеживание траектории квадрокоптера с помощью ПИД-контроллера  
 Figure 10- Tracking the quadcopter's trajectory using the PID controller

### Заключение

В данной работе был представлен автономный квадрокоптер, предназначенный для работы в открытых условиях. Кроме того, был предложен и реализован регулятор ориентации в реальном режиме полета и относительно умеренных погодных условиях. Для достижения успешного маневра был использован ПИД-регулятор для стабилизации положения и сопротивления внешнему ветровому воздействию. Кроме того, для контроля высоты использовался контроллер PD. Как было показано, необходимо было точно регулировать коэффициенты регулятора, зависящие от динамических параметров воздушного робота. Наконец, было показано, что этот контроллер правильно выполнял нужный маневр для проектируемого Квадрокоптера. Эффективность предложенной схемы управления была обоснована внедрением данного контроллера в реальный квадрокоптер и выполнением типовых испытаний траектории слежения.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Атир Л.С., М. Могаввеми Хайдер А.Ф. Мохаммед., Халаф. Конструкция полетного ПИД-регулятора для квадрокоптера. *Научные исследования и очерки*. 2010;12(4):3660-3667.
2. Целигорова Е.Н. Современные информационные технологии и их использование для исследования систем автоматического управления. *Инженерный вестник Дона*. 2010;(3).URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n3y2010/222](http://ivdon.ru/magazine/archive/n3y2010/222).
3. Павловский В.Е., Яцун С.Ф., Емельянова О.В., Савицкий А.В. Моделирование и исследование процессов управления квадрокоптером. *Робототехника и техническая кибернетика*. 2014;4(5):49-57.
4. Гэн К., Чулин Н.А. Алгоритмы стабилизации для автоматического управления траекторным движением квадрокоптера. *Наука и образование*. 2015.
5. Гурьянов А.Е. Моделирование управления квадрокоптером. *Инженерный вестник*. 2014. №8. URL: [engbul.bmstu.ru/doc/723331.html](http://engbul.bmstu.ru/doc/723331.html).

6. Д.Г Сайфеддин., А.Г.Булгаков., Т.Н. Круглова. Нейросетевая система отслеживания местоположения динамического агента на базе квадрокоптера. *Инженерный вестник Дона*. 2014. №1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2014/2293](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2014/2293).
7. Абдулкадер Джухадар., Мохаммад Альчехаби., Аднан Джедже. Современные нелинейные системы управления БПЛА и их применение. 2019;(4). DOI: 10.5772/intechopen.86353.
8. Дiao, С., Сиань, Б., Инь, В., Иванов, В., Л., Ч., и Ян, Я. Нелинейный адаптивный подход управления квадрокоптер БПЛА. *8-я Азиатская Конференция (ASCC)*. 2011;223-228, Taiwan.
9. Хтет Сое Паинг. Проектирование квадрокоптера с использованием 2D модели моделирование каскадного ПИД контроллера. *2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*.2020;2370-2373.
10. П. Паундс., Р. Махони., П. Корк. Моделирование и управление большим квадаторным роботом. *Инженерная Практика Управления*. 2010;18(7):691-699.
11. С. Верлинг., Б. Вайбель, М. Boosfeld, К. Алексис, М. Бурри, Р. Зигварт, “Полный контроль отношение tailsitter СВВП БПЛА,” в прос. *IEEE Международная конференция по робототехнике и автоматизации (ICRA)*. 2016;(5): 3006-3012.
12. Зарафшан П., Моосавиан С. Али А., Бахрами М. Сравнительный анализ конструкция контроллера воздушного робота. *Аэрокосмическая наука и техника*. 2010;14(4):276-282.

## REFERENCES

1. Atheer L.S., M. Moghavvemi Haider A. F. Mohamed., Khalaf Sallom Gaeid. Flight PID controller design for a UAV quadrotor. *Scientific Research and Essays*. 2010;12(4):3660-3667.
2. Tseligorova E. N. Modern information technologies and their use for research of automatic control systems. *Engineering Bulletin of the don*. 2010;(3). URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n3y2010/222](http://ivdon.ru/magazine/archive/n3y2010/222).
3. Pavlovsky V. E., Yatsun S. F., Yemelyanova O. V., Savitsky A.V. *Robotics and technical Cybernetics*. 2014;4(5):49-57.
4. Gen K., Chulin N.A., Nauka i obrazovanie. *Science and Education*. 2015.
5. Guryanov A. E. Modeling of quadcopter control. *Engineering Bulletin*. 2014;(8). URL: [engbul.bmstu.ru/doc/723331.html](http://engbul.bmstu.ru/doc/723331.html).
6. D. Saifeddin., A. G. Bulgakov., T. N. Kruglova. *Inzhenernyj vestnik Dona*. 2014;(1). URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2014/2293](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2014/2293).
7. Abdulkader Joukhadar., Mohammad Alchehabi., Adnan Jegeh. Advanced UAVs Nonlinear Control Systems and Applications.2019;(4). DOI: 10.5772/intechopen.86353
8. Diao., С., Xian., В., Yin., Q., Zeng., W., Li., h., Yang., Y. *A nonlinear adaptive control approach for Quadrotor UAVs. 8th Asian Control Conference (ASCC)*. 2011;223-228, Taiwan.
9. Htet Soe Paing. New Designing Approaches for Quadcopter Using 2D Model Modelling a Cascaded PID Controller. *2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*. 2020;2370-2373.
10. P. Pounds., R. Mahony., P. Corke. *Simulation and control of a large square robot. Engineering Management Practice*. 2010;18(7):691-699.
11. S. Verling., B. Weibel., M. Boosfeld., K. Alexis., M. Burri., R. Siegwart. “Full attitude control of a VTOL tailsitter UAV,” in Proc. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*.2016;(5):3006–3012.

12. Zarafshan. P., Moosavian S., Ali A., Bahrami. M. Comparative Controller Design of an Aerial Robot. *Aerospace Science and Technology Journal*. 2010;14(4):276-282.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Хтет Сое Паинг**, аспирант, кафедра САУиК системы автоматизированного управления и контроля, Институт Микроприборов и Систем Управления (МПСУ), Национальный исследовательский университет МИЭТ, Москва, Российская Федерация.

*e-mail:* [htetsoepaing2@gmail.com](mailto:htetsoepaing2@gmail.com)

**Хан Мьо Хтун**, аспирант, кафедра Вычислительной Техники, Институт Микроприборов и Систем Управления (МПСУ), Национальный исследовательский университет МИЭТ, Москва, Российская Федерация.

*e-mail:* [hanmyoe123htun@gmail.com](mailto:hanmyoe123htun@gmail.com)

**Чжо Сое Вин**, аспирант, кафедра САУиК системы автоматизированного управления и контроля» Институт Микроприборов и Систем Управления (МПСУ), Национальный исследовательский университет МИЭТ, Москва, Российская Федерация.

*e-mail:* [aloveamiss@gmail.com](mailto:aloveamiss@gmail.com)

**Зо Мьо Наин**, аспирант, кафедра САУиК системы автоматизированного управления и контроля, Институт Микроприборов и Систем Управления (МПСУ), Национальный исследовательский университет МИЭТ, Москва, Российская Федерация.

*e-mail:* [zawmyo53.zm@gmail.com](mailto:zawmyo53.zm@gmail.com)

**Htet Soe Paing**, PhD Student, Automated control and monitoring systems, Department of Computer Engineering, National Research University MIET, Zelenograd, Moscow, Russian Federation.

**Han Myo Htun**, PhD Student, Вычислительной Техники, Department of Computer Engineering, National Research University MIET, Zelenograd, Moscow, Russian Federation.

**Kyaw Soe Win**, PhD Student, Automated control and monitoring systems, Department of Computer Engineering, National Research University MIET, Zelenograd, Moscow, Russian Federation.

**Zaw Myo Naing**, PhD Student, Automated control and monitoring systems, Department of Computer Engineering, National Research University MIET, Zelenograd, Moscow, Russian Federation.