

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра физики открытых систем

**Математическое моделирование и синтез контура
автоматического управления квадрокоптером в задаче захвата
неподвижного предмета бортовым манипулятором**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

студентки 2 курса 2241 группы

направления

09.04.02 «Информационные системы и технологии»

института физики

Саломатовой Елены Ивановны

Научный руководитель
доцент кафедры физики
открытых систем, к.ф.-м.н.

подпись, дата

А.В. Садовников

Заведующий кафедрой
физики открытых систем,
д.ф.-м.н., профессор

подпись, дата

А.А. Короновский

Саратов 2024 г.

Введение. В последнее время исследование и использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) получает все большее распространение и актуальность [1, 2]. Особый интерес из группы таких летательных аппаратов вызывают квадрокоптеры – это летательные аппараты, имеющие четыре несущих винта для поддержания полета [3].

Квадрокоптеры с каждым годом занимают новую нишу в деятельности человека, область их применения растет. Они используются в сельском хозяйстве, военном деле, картографии и доставке. Эти летательные аппараты могут обладать такими свойствами как быстродействие, высокая маневренность и точность движения. Также они могут легко преодолевать препятствия и использоваться в труднодоступных местах.

Тем не менее существуют ряд технологических проблем, из-за которых развитие БПЛА замедляется. К ним относятся такие программные и алгоритмические проблемы как обработка больших данных и их оптимизация, стабилизация при непрогнозируемых внешних воздействиях, системы машинного зрения, а также системы автоматического управления и наведения для полета к заданным целям или по заданным маршрутам.

Актуальной задачей является разработка такой системы управления для квадрокоптера, которая позволит совершать автономный полет в заданную точку и удерживать его по спланированному маршруту.

Целью настоящей работы является создание математической модели и синтез контура автоматического управления квадрокоптером в задаче захвата неподвижного предмета бортовым манипулятором.

Научная новизна данной работы заключается в создании контура автоматического управления для квадрокоптера «Clover» в задаче наведения и захвата предмета бортовым манипулятором для сбора урожая.

Работа состоит из введения, включает в себя три главы, заключение и список литературы.

Основное содержание работы. Основная часть работы состоит из трех глав. В первой главе описана теоретико-механическая модель квадрокоптера.

Описана используемая модель квадрокоптера и поставлена формулировка задачи. А также описаны основные методы теории наведения летательных аппаратов.

Квадрокоптер – это БПЛА, имеющий четыре несущих винта, расположенных в одной плоскости. При этом первый и третий вращаются по часовой стрелке, а второй и четвёртый – против. Это сделано для компенсации вращательного момента. В качестве модели для исследования в данной работе используется квадрокоптер «Clover», продемонстрированный на рисунке 1. Исследуемый квадрокоптер имеет следующие размеры: длина 0,355 м, ширина 0,355 м и высота 0,125 м. Расстояние от двигателя до центра квадрокоптера $l = 0,117$ м, максимальный взлетный вес 1 кг, максимальная высота полета 500 м, максимальное время полета 15 мин и диапазон рабочих температур от 0 °С до +40 °С.



Рисунок 1. Квадрокоптер «Clover»

В данном исследовании предполагается, что квадрокоптер должен осуществить наведение на цель, определенной с помощью бортовой камеры высокого разрешения, и захватить ее бортовым манипулятором. В математическом моделировании цель является точкой с известными относительными координатами.

Задача наведения летательного аппарата состоит в выведение на заданную траекторию, проходящую через заданную точку пространства, и обеспечение устойчивого полета на всем участке наведения. Исходя из известных принципов управления движением, задача управлением полета

летательным аппаратом складывается их двух взаимосвязанных задач. А именно первой составляющей является задача наведения, которая заключается в формировании системой наведения программ управления движением для обеспечения вывода на заданную траекторию. Второй частью является задача стабилизации, которая состоит из отработки сформированных системой наведения программ управления на каналах системы стабилизации [4, 5].

Наведение БПЛА можно осуществить различными методами [6] в зависимости от характера задачи. К методам наведения относятся: прямое сближение, погоня, трехточечный и маневр. Для рассматриваемой задачи был выбран метод «Прямое сближение». Метод был изменен с учетом особенностей движения квадрокоптера и его конструкции. В задаче предполагается, что квадрокоптер знает относительные координаты цели с помощью бортовой камеры. Как и в методе «Прямое сближение» летательному аппарату задается курс в точку наведения, а вместо дальности – координаты. При этом из-за того, что манипулятор находится вдоль оси ОХ необходимо дополнительно совершить поворот квадрокоптера на цель. Из-за разворота возникает потребность в небольшом движении по крену, чего нет в стандартном методе. Также выбранный метод позволяет осуществить перехват цели в минимальное время за счет прямолинейности траектории.

Во второй главе описывается модель движения квадрокоптера, а также аэродинамических сил и силовой установки. Для составления алгоритмов автоматического управления необходимо определить уравнения, описывающие движение квадрокоптера. Квадрокоптер обладает 6 степенями свободы: три линейные координаты центра масс и три угла. Движение будет определяться с помощью 12 параметров: $(\vartheta, \gamma, \psi)$ – углы ориентации, $(\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ – скорости вращательного движения, (X, Y, Z) – координаты центра масс и (V_x, V_y, V_z) – скорости поступательного движения.

$$\left\{ \begin{array}{l}
\vartheta = \omega_Z \cos(\gamma) + \omega_X \cdot \sin(\gamma), \\
\gamma = \omega_X - \operatorname{tg}(\vartheta) \cdot (\omega_Y \cos(\gamma) - \omega_Z \sin(\gamma)), \\
\psi = \frac{\omega_Y \cos(\gamma) - \omega_Z \sin(\gamma)}{\cos(\vartheta)}, \\
\omega_X = \frac{M_X - (I_Z - I_Y) \omega_Y \omega_Z}{I_X}, \\
\omega_Y = \frac{M_Y - (I_X - I_Z) \omega_Z \omega_X}{I_Y}, \\
\omega_Z = \frac{M_Z - (I_Y - I_X) \omega_Y \omega_X}{I_Z}, \\
X_g = V_X e_{11} + V_Y e_{12} + V_Z e_{13}, \\
Y_g = V_X e_{21} + V_Y e_{22} + V_Z e_{23}, \\
Z_g = V_X e_{31} + V_Y e_{32} + V_Z e_{33}, \\
V_X = -\frac{F_X \cdot \operatorname{sign}(V_X)}{m} - \omega_Y V_Z + \omega_Z V_Y - g e_{21}, \\
V_Y = \frac{P - F_Y \cdot \operatorname{sign}(V_Y)}{m} - \omega_Z V_X + \omega_X V_Z - g e_{22}, \\
V_Z = -\frac{F_Z \cdot \operatorname{sign}(V_Z)}{m} - \omega_X V_Y + \omega_Y V_X - g e_{23}.
\end{array} \right. \quad (1)$$

Также в математической модели квадрокоптера были учтены влияющие на него аэродинамические силы и силовая установка, благодаря которой происходит изменение силы тяги. Сила тяги – это сила, за счет которой можно обеспечить поддержание постоянного движения летательного аппарата. Она вырабатывается за счет двигателей и толкает квадрокоптер сквозь воздушную среду. В установившемся прямолинейном полете сила тяги компенсирует силу лобового сопротивления. При увеличении тяги, путем увеличения количества оборотов двигателя, квадрокоптер движется в положительном направлении.

Управление квадрокоптером осуществляется за счет подачи управляющих напряжений на двигатели, которые в свою очередь приводят в движение пропеллеры, вращающиеся с частотой n_1, n_2, n_3, n_4 , в следствии чего формируются силы тяги P_1, P_2, P_3, P_4 . Можно записать выражения для определения заданных оборотов:

$$\begin{aligned}
n_1 &= w_0 + \frac{U_Y}{4} - \frac{U_v}{2} - \frac{U_\psi}{2}, \\
n_2 &= w_0 + \frac{U_Y}{4} + \frac{U_Y}{2} + \frac{U_\psi}{2}, \\
n_3 &= w_0 + \frac{U_Y}{4} + \frac{U_v}{2} - \frac{U_\psi}{2},
\end{aligned} \quad (2)$$

$$n_4 = w_0 + \frac{U_Y}{4} - \frac{U_Y}{2} + \frac{U_\psi}{2},$$

В третьей главе описаны алгоритмы автоматического управления. Сначала созданы алгоритмы для каждого из каналов.

В алгоритме стабилизации продольного канала необходимо сформировать управляющее воздействие таким образом, чтобы происходило наведение в координату X , при этом должна быть стабилизация таких параметров как угловая скорость ω_Z , поступательная скорость V_X . Алгоритмы для продольного канала при работе по отдельности выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned} U_v &= k_{\omega Z} \cdot (\omega_Z - \omega_{Z\text{зад}}), \\ \omega_{Z\text{зад}} &= k_v \cdot (v - v_{\text{зад}}), \\ v_{\text{зад}} &= k_{V_X} \cdot (V_X - V_{X\text{зад}}) - k_{v_d} \cdot v + k_{v_i} \cdot \int_{-9}^9 (V_X - V_{X\text{зад}}), \\ V_{X\text{зад}} &= k_x \cdot (X - X_{\text{зад}}), \end{aligned} \quad (3)$$

где $k_{\omega Z} = 36 \text{ рад}^{-1}$, $k_v = -0,4 \text{ с}^{-1}$, $k_{V_X} = -0,15 \text{ с}^{-1}$ и $k_x = -0,1 \text{ с}^{-1}$ – передаточные коэффициенты, $k_{v_d} = 1,2 \text{ рад}^{-1}$ – коэффициент демпфирующей составляющей и $k_{v_i} = 0,03 \text{ рад} \cdot \text{с/м}$ – коэффициент интегральной составляющей.

В алгоритме стабилизации бокового канала необходимо сформировать управляющее воздействие таким образом, чтобы происходило наведение в координату Z , при этом должна быть стабилизация таких параметров как угловая скорость ω_x , поступательная скорость V_Z . Алгоритмы для бокового канала при работе по отдельности выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned} U_\gamma &= k_{\omega x} \cdot (\omega_x - \omega_{x\text{зад}}), \\ \omega_{x\text{зад}} &= k_\gamma \cdot (\gamma - \gamma_{\text{зад}}), \\ \gamma_{\text{зад}} &= k_{V_Z} \cdot (V_Z - V_{Z\text{зад}}) - k_{\gamma_d} \cdot \gamma + k_{\gamma_i} \cdot \int_{-9}^9 (V_Z - V_{Z\text{зад}}), \\ V_{Z\text{зад}} &= k_z \cdot (Z_g - Z_{\text{зад}}), \end{aligned} \quad (4)$$

где $k_{\omega x} = 30 \text{ рад}^{-1}$, $k_\gamma = -0,4 \text{ с}^{-1}$, $k_{V_Z} = -0,97 \text{ с}^{-1}$ и $k_z = -0,12 \text{ с}^{-1}$ – передаточные коэффициенты, $k_{\gamma_d} = 1,22 \text{ рад}^{-1}$ – коэффициент демпфирующей составляющей и $k_{\gamma_i} = 0,03 \text{ рад} \cdot \text{с/м}$ – коэффициент интегральной составляющей.

В вертикальном канале происходит стабилизация таких параметров как

поступательная скорость V_Y и координата Y для вывода квадрокоптера на необходимую высоту.

$$\begin{aligned} U_Y &= k_{vy} \cdot (V_Y - V_{Yзад}), \\ V_{Yзад} &= k_H \cdot (H - H_{зад}), \end{aligned} \quad (5)$$

где $k_{vy} = -198 \text{ м}^{-1}$, $k_H = -0,5 \text{ с}^{-1}$ – передаточные коэффициенты.

В канале курса происходит стабилизация угла курса, на который поворачивается квадрокоптер ψ . Алгоритмы для канала курса при работе по отдельности выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned} U_\gamma &= k_{\omega\psi} \cdot (\omega_Y - \omega_{Yзад}), \\ \psi_{Yзад} &= k_\psi \cdot (\psi - \psi_{зад}), \end{aligned} \quad (6)$$

где $k_{\omega\psi} = -150 \text{ рад}^{-1}$, $k_\psi = -0,23 \text{ с}^{-1}$ – передаточные коэффициенты.

Следующим этапом была настройка алгоритмов для совместной работы. В математическом моделировании предполагается, что координаты квадрокоптера в начальный момент времени $X = Y = Z = 0$, углы ориентации $\vartheta = 0$, $\gamma = 0$, $\psi = 0$. После включения квадрокоптера, расположенная на нем камера должна найти цель и определить относительные координаты. В описываемом моделировании предполагаем, что цель находится в поле видимости камеры и координаты цели известны $X_{зад} = 3 \text{ м}$, $Y_{зад} = 2 \text{ м}$, $Z_{зад} = 2 \text{ м}$. Также, летательный аппарат в процессе движения необходимо повернуть к цели для захвата бортовым манипулятором, для этого нужно перейти из связанной системы координат в горизонтированную.

Для перехода в горизонтированную систему координат следует осуществить поворот на заданный угол $\psi_{зад}$, вычисляемый по формуле:

$$\psi_{зад} = -\arctg\left(\frac{X_{зад}}{Z_{зад}}\right), \quad (7)$$

где знак минус означает поворот против часовой стрелки. Были совершены следующие преобразования координат и скоростей:

$$\begin{aligned} X_h &= X_g * \cos(\psi_{зад}) - Z_g * \sin(\psi_{зад}), \\ Z_h &= X_g * \sin(\psi_{зад}) + Z_g * \cos(\psi_{зад}), \\ V_{Xh} &= V_X * \cos(\psi_{зад}) - V_Z * \sin(\psi_{зад}), \end{aligned} \quad (8)$$

$$V_{Zh} = V_X * \sin(\psi_{зад}) + V_Z * \cos(\psi_{зад}),$$

где X_h, Z_h – координаты центра масса квадрокоптера в горизонтированной системе координат, V_{Xh}, V_{Zh} – скорости поступательного движения в горизонтированной системе координат.

Также необходимо пересчитать заданные координаты из земной системы координат в горизонтированную:

$$X_{hзад} = X_{зад} * \cos(\psi_{зад}) - Z_{зад} * \sin(\psi_{зад}) \quad (9)$$

$$X_{hзад} = X_{зад} * \cos(\psi_{зад}) - Z_{зад} * \sin(\psi_{зад}).$$

С учетом перехода в новую систему координат, поворота квадрокоптера и появления перекрестных связей в математической модели в продольном канале необходимо изменить алгоритмы следующим образом:

$$\begin{aligned} \omega_{Zзад} &= k_v \cdot (v - v_{зад}) - k_{\omega zd} \cdot \omega_Z, \\ v_{зад} &= k_{vx} \cdot (V_{Xh} - V_{Xзад}) - k_{vd} \cdot v, \end{aligned} \quad (10)$$

$$V_{Xзад} = k_x \cdot (X_h - X_{hзад}),$$

где $k_{\omega zd} = -0,8$ – демпфирующий коэффициент, безразмерный.

Для бокового канала алгоритмы запишем в следующем виде:

$$\begin{aligned} \omega_{Xзад} &= k_\gamma \cdot (\gamma - \gamma_{зад}) - k_{\omega xd} \cdot \omega_X, \\ \gamma_{зад} &= k_{vz} * (V_{Zh} - V_{Zзад}) - k_\gamma \cdot \gamma, \end{aligned} \quad (11)$$

$$V_{Zзад} = k_z \cdot (Z_h - Z_{hзад}).$$

где $k_{\omega xd} = -0,8$ – демпфирующий коэффициент, безразмерный.

Тогда совместная работа алгоритмов, продемонстрированная на рисунке 2, позволяет осуществить наведение в заданную точку. Как видно из графиков алгоритмы создают такое управляющее воздействие, что летательный аппарат платно изменяется по всем координатам и стабилизируется с точностью 0,01% в заданной точке.

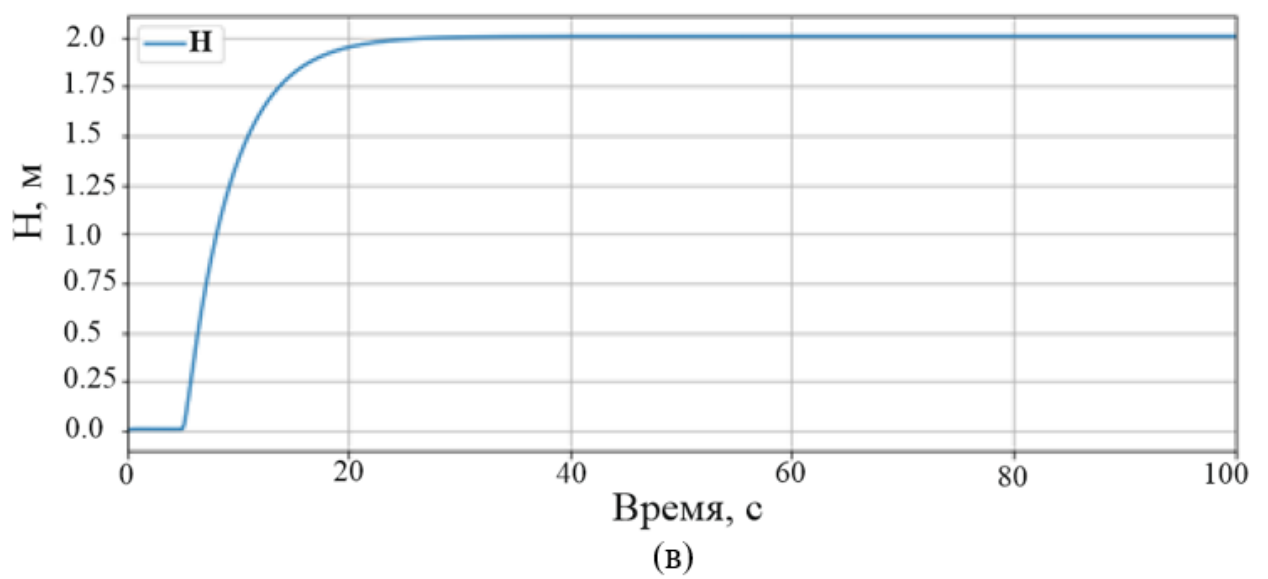
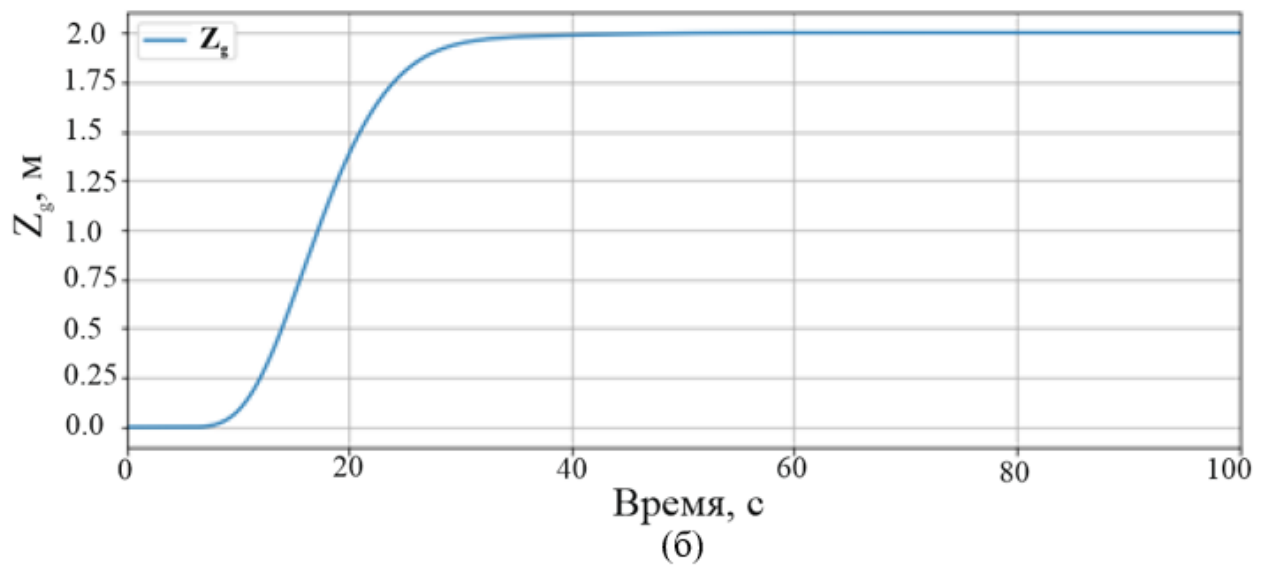
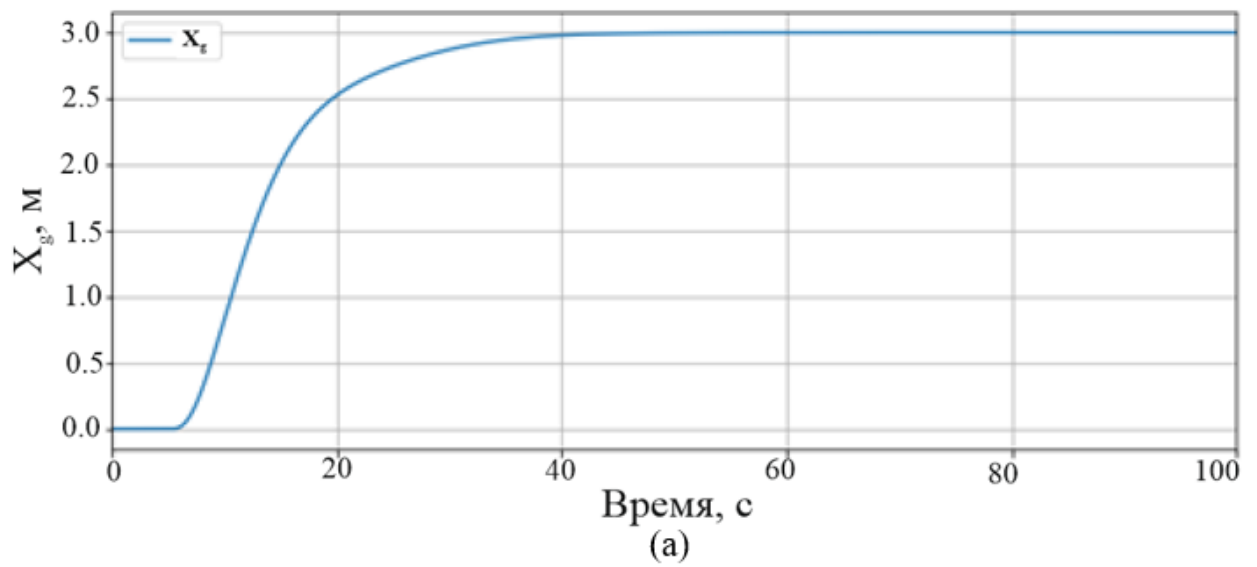


Рисунок 2. Графики координат в земной системе координат. (а) – X_g ; (б) – Z_g ; (в) – H

Заключение. Таким образом, в данной работе была разработана и описана математическая модель квадрокоптера, состоящая из модели движения, силовой установки и аэродинамических сил. Были изучены теория и методы наведения и навигации, которые применены для исследуемой задачи.

На основе построенной математической модели были созданы алгоритмы автоматического управления квадрокоптером для продольного, бокового и вертикального канала и канала курса, что позволило осуществить максимальную стабилизацию летательного аппарата в пространстве и достижение заданной цели.

Также в рамках исследуемой работы был создан алгоритм для автоматического управления квадрокоптером в задаче захвата неподвижного предмета бортовым манипулятором, что подразумевает совместную работу всех каналов. В результате данной работы было реализовано наведение исследуемого квадрокоптера в заданную точку пространства и его поворот к цели для осуществления захвата.

Список литературы

- [1] Бондарев А. Н., Киричек Р. В. Обзор беспилотных летательных аппаратов общего пользования и регулирования воздушного движения БПЛА в разных странах //Информационные технологии и телекоммуникации. – 2016. – Т. 4. – №. 4. – С. 13.
- [2] Вытовтов А. В., Калач А. В., Разиньков С. Ю. Современные беспилотные летательные аппараты //Вестник Белгородского государственного технологического университета им. ВГ Шухова. – 2015. – №. 4. – С. 70-74.
- [3] Лысухо Г. В., Масленников А. Л. Квадрокоптер: динамика и управление //Политехнический молодежный журнал. – 2020. – №. 05 (46).
- [4] Зенкевич С. Л., Галустян Н. К. Разработка математической модели и синтез алгоритма угловой стабилизации движения квадрокоптера //Мехатроника, автоматизация, управление. – 2014. – №. 3. – С. 27-32.
- [5] Гэн К., Чулин Н. А. Алгоритмы стабилизации для автоматического управления траекторным движением квадрокоптера //Машиностроение и компьютерные технологии. – 2015. – №. 5. – С. 218-235.
- [6] Теория и методика управления авиацией /С.Я. Паньков, Ю.Е. Забураев, А.М. Матвеев – Ульяновск: УИ ГА им. Б.П. Бугаева, 2006. – 209 с.