



DOI: 10.22363/2312-8143-2025-26-2-135-143

EDN: LJDNQI

Научная статья / Research article

Угловая стабилизация мультироторного летательного аппарата в атмосфере Венеры

В.В. Рыжков

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Российская Федерация

✉ dinozavr.ru@mail.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 7 января 2025 г.

Доработана: 7 февраля 2025 г.

Принята к публикации: 1 марта 2025 г.

Заявление о конфликте интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Аннотация. Рассмотрена проблема стабилизации углового положения МРЛА (мультироторного летательного аппарата) для исследования атмосферы Венеры. Актуальность темы обусловлена необходимостью получения детальных данных о нижних слоях венерианской атмосферы, что важно для понимания климатических процессов в Солнечной системе в целом. Цель исследования — разработка системы управления на основе пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора для обеспечения устойчивости и маневренности МРЛА в условиях турбулентной атмосферы Венеры. В исследовании проведено математическое моделирование углового движения МРЛА с учетом аэродинамических воздействий и ветровых возмущений. Для стабилизации ориентации аппарата использован пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор, параметры которого оптимизировались методом Нелдера — Мида с применением численного интегрирования уравнений движения. В результате разработана система дифференциальных уравнений, описывающая динамику углового движения МРЛА. Проведена автоматизация подбора коэффициентов регулятора, обеспечивающая минимизацию отклонений ориентации аппарата при воздействии случайных ветровых возмущений. Численное моделирование подтвердило эффективность предложенного алгоритма стабилизации. Предложенный подход к автоматизированному подбору параметров пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора позволяет минимизировать интегральную ошибку ориентации и улучшить динамические характеристики системы управления летательного аппарата мультикоптерного типа. Разработанный алгоритм стабилизации может быть использован для управления летательными аппаратами в сложных атмосферных условиях, включая сильные возмущения, характерные для облачного слоя Венеры.

Ключевые слова: динамика полета, регулирование ориентации, ветровые возмущения, ПИД-регулятор, математическое моделирование, атмосферные возмущения, автоматизация подбора параметров

Для цитирования

Рыжков В.В. Угловая стабилизация мультироторного летательного аппарата в атмосфере Венеры // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2025. Т. 26. № 2. С. 135–143. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2025-26-2-135-143>

© Рыжков В.В., 2025



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Angular Stabilization of a Multirotor Aircraft in Venus' Atmosphere

Vladislav V. Ryzhkov 

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation

✉ dinozavr.ru@mail.ru

Article history

Received: January 7, 2025

Revised: February 7, 2025

Accepted: March 1, 2025

Conflicts of interest

The author declares that there is no conflict of interest.

Abstract. The study addresses the problem of attitude stabilization of a multirotor aircraft (MRAC) designed for exploring the atmosphere of Venus. The relevance of this topic is driven by the need to obtain detailed data on the lower layers of Venus' atmosphere, which is crucial for understanding climate processes in the Solar System as a whole. The objective of the study is to develop a control system based on a proportional-integral-derivative controller to ensure stability and maneuverability of the MRAC under turbulent atmospheric conditions on Venus. The research includes mathematical modeling of the angular motion of the MRAC, taking into account aerodynamic forces and wind disturbances. A PID controller is used for attitude stabilization, with its parameters optimized using the Nelder-Mead method in combination with numerical integration of the equations of motion. As a result, a system of differential equations describing the angular dynamics of the MRLA has been developed. An automated tuning approach for the controller coefficients is implemented to minimize orientation deviations under random wind disturbances. Numerical simulations confirm the effectiveness of the proposed stabilization algorithm. The suggested approach to automated PID parameter tuning minimizes the integral orientation error and improves the dynamic performance of the multirotor flight control system. The developed stabilization algorithm can be applied to aerial vehicles operating in complex atmospheric conditions, including strong disturbances typical of the Venus cloud layer.

Keywords: flight dynamics, orientation control, wind disturbances, PID controller, mathematical modeling, atmospheric disturbances, automated parameter tuning

For citation

Ryzhkov VV. Angular stabilization of a multirotor aircraft in Venus' atmosphere. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2025;26(2):135–143. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2025-26-2-135-143>

Введение

Исследование атмосферы Венеры имеет большое значение для понимания климатических процессов в масштабах Солнечной системы. Плотная углекислотная атмосфера, экстремальные температуры и мощный парниковый эффект делают ее уникальным объектом изучения, позволяя выявлять закономерности, применимые и к Земле. Орбитальные аппараты обеспечивают общий обзор, но не дают детальных данных о нижних слоях, а спускаемые зонды позволяют получить локальные данные, но их возможности ограничены из-за экстремальных условий среды (рис. 1) [1; 2].

Перспективным решением является использование мультироторного летательного аппарата (МРЛА), способного длительно функцио-

нировать в облачном слое Венеры на высотах 50–55 км, где условия относительно благоприятны. Высокая маневренность и устойчивость к турбулентности делают МРЛА эффективным инструментом для исследования динамики атмосферы [3; 4].

Настоящая работа посвящена анализу углового движения такого аппарата с учетом аэродинамических воздействий и ветровых возмущений. Разрабатывается система управления на основе пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора (ПИД-регулятора), параметры которого оптимизируются для повышения устойчивости [5; 6].

Объектом исследования является МРЛА, предметом — его динамика в условиях венерианской атмосферы. Полученные результаты

позволят улучшить управление летательными платформами и создать более эффективные автономные системы для изучения планетарных атмосфер.

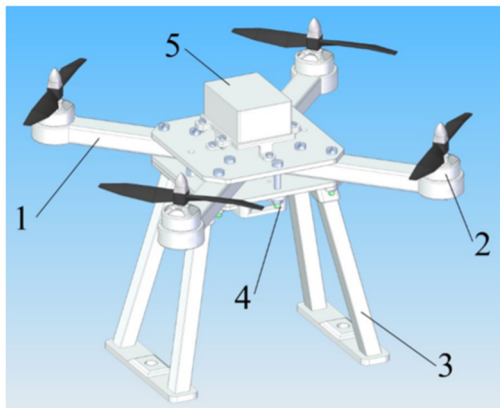


Рис. 1. Модель МРЛА:

1 — балка винтомоторной группы;
2 — винтомоторная группа; 3 — шасси; 4 — адаптер крепления полезной нагрузки; 5 — приборный отсек
Источники: выполнено В.В. Рыжковым, М.Ю. Яценко [3]

Figure 1. MRLA model:

1 — beam of the propulsion group;
2 — propulsion group; 3 — landing gear;
4 — payload mounting adapter; 5 — avionics compartment
Source: by V.V. Ryzhkov, M.Yu. Yatsenko [3]

1. Цель и постановка задачи

Цель исследования — строгое математическое описание задачи, включающее формулировку уравнений движения, разработку алгоритма управления и учет случайных атмосферных возмущений. Также необходимо представить численный метод решения с применением алгоритмов численного интегрирования. Для стабилизации ориентации летательного аппарата используется ПИД-регулятор, причем его параметры подбираются автоматически [5]. Это позволяет повысить эффективность управления и снизить влияние субъективных настроек.

В настоящем исследовании рассматривается задача стабилизации углового положения МРЛА, функционирующего на высоте около 50 км в облачном слое атмосферы Венеры.

В математическом представлении система описывается вектором, который включает в себя три переменные, характеризующие пространственную ориентацию (углы крена, тангажа и

рыскания), а также три значения угловых скоростей относительно корпуса аппарата. Динамика этих параметров подчиняется уравнениям движения, в которых учитываются как управляющие воздействия со стороны ПИД-регулятора, так и внешние аэродинамические моменты, вызванные атмосферными потоками.

Механизм управления основан на принципе корректировки углов аппарата относительно заданных целевых значений. Реализация осуществляется через вычисление управляющих моментов, зависящих от текущих отклонений ориентации и их производных. Атмосферные возмущения проявляются через случайные изменения скорости воздушного потока, что приводит к дополнительным аэродинамическим моментам, действующим на аппарат.

Задача управления заключается в том, чтобы минимизировать отклонения ориентации и угловых скоростей за определенный промежуток времени. Для этого используется специальный критерий качества, который учитывает суммарные ошибки в ориентации и скорости вращения. Поиск оптимальных параметров регулятора выполняется методом последовательной корректировки управляющих коэффициентов, при этом каждый шаг сопровождается пересчетом движения аппарата с помощью численного решения уравнений.

Вся система описывает процесс эволюции ориентации аппарата во времени под воздействием как системы управления, так и случайных возмущений ветра. Главная цель — подобрать такие параметры ПИД-регулятора, при которых отклонения ориентации и угловых скоростей будут сведены к минимуму, обеспечивая устойчивое и быстрое восстановление ориентации в условиях турбулентности атмосферы Венеры.

2. Математическая модель углового движения мультироторного летательного аппарата

Угловое движение МРЛА подчиняется уравнениям Эйлера, описывающим динамику твердого тела. В данном случае ориентация аппа-

рата определяется тремя углами: крена, тангажа и рыскания φ, θ, ψ . Угловые скорости рассматриваются в системе координат, связанной с корпусом аппарата, и представляют собой три компоненты, соответствующие вращению вокруг каждой из осей $\omega_x, \omega_y, \omega_z$.

$$\begin{aligned} J_x \dot{\omega}_x &= M_x - (J_y - J_z) \omega_y \omega_z; \\ J_y \dot{\omega}_y &= M_y - (J_z - J_x) \omega_z \omega_x; \\ J_z \dot{\omega}_z &= M_z - (J_x - J_y) \omega_x \omega_y, \end{aligned} \quad (1)$$

где M_x, M_y, M_z — суммарные моменты летательного аппарата относительно его осей.

Динамика вращательного движения формулируется через сумму моментов, действующих на аппарат. Эти моменты включают как управляющие воздействия, создаваемые системой управления, так и внешние возмущения, вызванные аэродинамическими эффектами, турбулентными потоками ветра:

$$\begin{aligned} M_x &= M_{ux} + M_{dx}; \\ M_y &= M_{uy} + M_{dy}; \\ M_z &= M_{uz} + M_{dz}. \end{aligned} \quad (2)$$

Изменение ориентации аппарата во времени описывается кинематическими соотношениями, которые выражают скорость изменения углов через компоненты угловой скорости. Стандартное представление с использованием углов Эйлера позволяет связать их с угловыми скоростями, обеспечивая полное математическое описание вращательного движения:

$$\begin{pmatrix} \dot{\varphi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \sin \varphi \tan \theta & \cos \varphi \tan \theta \\ 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi \\ 0 & \sin \varphi \sec \theta & \cos \varphi \sec \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Так формируется система дифференциальных уравнений, включающая шесть переменных состояния: три угла ориентации и три компоненты угловой скорости. Эта система определяет эволюцию углового движения аппарата под воздействием как управляющих, так и возмущающих факторов [7–10].

3. Разработка закона управления на основе ПИД-регулятора

Для удержания летательного аппарата (ЛА) в заданной ориентации необходимо сформировать управляющие моменты, компенсирующие отклонения от целевых значений углов крена, тангажа и рыскания. Для этого применяется пропорционально-интегрально-дифференциальный ПИД-регулятор, который отдельно регулирует каждую из координат углового движения.

Пропорциональная составляющая K_p управления отвечает за мгновенную реакцию на отклонение, стремясь вернуть аппарат в нужное положение. Дифференциальная K_d -компонента учитывает скорость изменения ошибки, что помогает сглаживать колебания и снижать перерегулирование. Интегральная часть K_i компенсирует накопленные ошибки, устраняя смещения, которые могли бы сохраняться при постоянных внешних возмущениях, таких как устойчивый ветер.

Эффективная работа регулятора определяется корректным подбором его коэффициентов K_p, K_i, K_d . Эти параметры могут настраиваться вручную методом проб и ошибок или подбираться с помощью численных и аналитических методов оптимизации. В частности, для их автоматизированного выбора применяется минимизация критериев качества, например, интеграла квадратичной ошибки, обеспечивающего быструю и точную стабилизацию ориентации.

Оптимальный набор коэффициентов определяется на основе заданного критерия качества управления, который отражает суммарную ошибку ориентации во времени. Для минимизации этого показателя используются численные методы оптимизации [5].

Ошибка ориентации для крена вычисляется как

$$e_\varphi(t) = \varphi(t) - \varphi_{\text{зад}}. \quad (4)$$

Управляющее воздействие по оси крена формируется следующим образом:

$$M_{ux}(t) = -K_{p_x} e_\phi(t) - K_{i_x} \int_0^t e_\phi(\tau) d\tau - K_{d_x} \frac{de_\phi(t)}{dt}. \quad (5)$$

Аналогичные выражения используются для тангажа и рыскания:

$$\begin{cases} M_{uy}(t) = -K_{p_y} e_\theta(t) - K_{i_y} \int_0^t e_\theta(\tau) d\tau - K_{d_y} \frac{de_\theta(t)}{dt} \\ M_{uz}(t) = -K_{p_z} e_\psi(t) - K_{i_z} \int_0^t e_\psi(\tau) d\tau - K_{d_z} \frac{de_\psi(t)}{dt} \end{cases}, \quad (6)$$

где ошибки по тангажу и рысканию определяются как $e_\theta(t) = \theta(t) - \theta_{зад}$, $e_\psi(t) = \psi(t) - \psi_{зад}$.

4. Формирование общей системы дифференциальных уравнений для динамики мультироторного летательного аппарата

В сумме формируется система из шести обыкновенных дифференциальных уравнений, объединяющих динамику трех угловых скоростей ω_x , ω_y , ω_z и кинематику трех эйлеровых углов ϕ , θ , ψ . При дополнении этой системы уравнениями для накопления интегральной ошибки ПИД-регулятора получаем замкнутую математическую модель, позволяющую моделировать реакцию квадрокоптера на управляющие моменты и внешние возмущения ветра. Такая модель служит основой для численной реализации, в которой алгоритм ПИД-регулятора рассчитывает управляющие воздействия M_{ux} , M_{uy} , M_{uz} , а возмущающие моменты M_{dx} , M_{dy} , M_{dz} генерируются функциями аэродинамического возмущения с учетом случайных отклонений скорости ветра.

$$\begin{cases} \dot{\omega}_x = \frac{M_x - (J_y - J_z)\omega_y \omega_z}{J_x} \\ \dot{\omega}_y = \frac{M_y - (J_z - J_x)\omega_z \omega_x}{J_y} \\ \dot{\omega}_z = \frac{M_z - (J_x - J_y)\omega_x \omega_y}{J_z} \\ \dot{\phi} = \omega_x + \omega_y \sin \phi \tan \theta + \omega_z \cos \phi \tan \theta \\ \dot{\theta} = \omega_y \cos \phi - \omega_z \sin \phi \\ \dot{\psi} = \omega_y \sin \phi \sec \theta + \omega_z \cos \phi \sec \theta \end{cases} \quad (7)$$

5. Оптимизация параметров ПИД-регулятора с использованием численных методов

Разработка программы ведется на языке Python с использованием библиотеки SciPy, что позволяет автоматизировать процесс подбора параметров ПИД-регулятора. Вначале формируется критерий качества

$$J(K) = \int_0^T (\varphi(t) - \varphi_{зад})^2 dt,$$

где K — вектор коэффициентов ПИД-регулятора. Этот функционал качества оценивает суммарное отклонение углов ориентации от заданных значений на всем промежутке времени. Затем для каждого набора коэффициентов регулятора выполняется численное интегрирование уравнений движения, причем в процессе расчета учитываются случайные внешние возмущения, например порывы ветра. После завершения интегрирования вычисляется значение критерия качества, отражающего степень расхождения реальной траектории от целевой. Дальнейшая оптимизация коэффициентов выполняется при помощи метода Нелдера — Мида, который позволяет найти такой набор параметров, при котором суммарная ошибка становится минимальной θ . В результате система автоматически находит оптимальные настройки ПИД-регулятора, обеспечивая эффективную стабилизацию ориентации летательного аппарата.

6. Моделирование возмущающих моментов, вызванных атмосферными потоками

Возмущающие моменты, действующие на летательный аппарат, возникают из-за неравномерного обтекания его корпуса воздушным потоком. Их величина зависит от плотности атмосферы, характерных размеров аппарата и относительной скорости потока. В модели приближенно используется выражение, в котором учитываются безразмерные коэффициенты аэродинамических моментов, динамическое давление и параметры конструкции.

Коэффициенты, определяющие влияние возмущений, подбираются оценочно, основываясь

на данных по аналогичным малым летательным аппаратам. Ветер в модели не рассматривается как строго постоянный, а его горизонтальная скорость включает случайную составляющую, равномерно распределенную в определенном интервале. Это приводит к изменению динамического давления на каждом шаге численного интегрирования и, соответственно, к случайным колебаниям возмущающих моментов [11–13].

Для упрощения принимается, что воздействие ветра одинаково по всем трем осям. На данном этапе моделирования цель заключается не в полном соответствии реальным условиям, а в оценке работы системы стабилизации при наличии случайных внешних воздействий.

Формулы, используемые в расчетах:

$$M_{d_i} = C_{m_i} q S L_{\text{char}}, \quad (8)$$

где $q = \frac{1}{2} \rho V_{\text{отн}}^2$ — динамическое давление, а C_{m_i} — аэродинамические коэффициенты моментов.

Горизонтальная скорость ветра моделируется как

$$V_{\text{гор. случ}} = V_{\text{гор}} + \Delta V, \quad (9)$$

где ΔV — случайная величина, имеющая равномерное распределение в диапазоне от -30 до $+30$ м/с.

7. Численный метод решения уравнений движения

Для решения системы дифференциальных уравнений, описывающих динамику летательного аппарата, применяется стандартный численный метод, такой как алгоритм Рунге — Кутты, с адаптивным выбором шага. В данном исследовании используется его реализация в функции `solve_ivp` из библиотеки `scipy.integrate` языка Python, что позволяет обеспечить устойчивость и точность интегрирования [14–16].

Процесс оптимизации параметров ПИД-регулятора основан на численном поиске мини-

мума целевого функционала, характеризующего качество переходного процесса. В данной работе применяется метод минимизации, реализованный в `scipy.optimize`, который позволяет находить наилучшие значения коэффициентов регулятора. В качестве критерия качества рассматривается интеграл квадрата ошибки ориентации во времени, что обеспечивает корректный выбор параметров управления.

Инициализация модели включает задание начальных условий, определяющих углы ориентации, угловые скорости аппарата, а также интегральные ошибки регулирования, которые на начальном этапе принимаются равными нулю. В процессе расчета на каждом временном шаге вычисляются текущие ошибки ориентации, затем проводится их интегрирование для учета накопленных отклонений. Далее определяются управляющие моменты в соответствии с законом ПИД-регулятора, а также моделируются случайные атмосферные возмущения, приводящие к возникновению дополнительных аэродинамических моментов. Эти параметры подставляются в уравнения Эйлера, на основе которых рассчитываются новые значения угловых скоростей и ориентации аппарата.

Повторение данного процесса на протяжении всего временного интервала позволяет получить временные зависимости углов ориентации, их скоростей и других переменных, необходимых для анализа устойчивости системы и эффективности управления [17; 18].

8. Результаты

8.1. Сравнительный анализ существующих аналогов МРЛА

Развитие МРЛА для исследования планет опирается на технологии, такие как марсианский Ingenuity и дроны DJI Phantom. Эти аппараты работают в разреженной или плотной атмосфере, но имеют ограничения для исследования Венеры.

Ingenuity от NASA — первый вертолет, совершивший управляемый полет в марсианской атмосфере. Он оснащен соосными винтами

1,2 м и питается от солнечных батарей. Однако его конструкция подходит лишь для разреженной среды¹. Дроны DJI Phantom 4, используемые для аэросъемки, рассчитаны на земные условия и не устойчивы к высоким температурам и агрессивной среде Венеры [19].

Предполагается, что МРЛА подходит для Венеры. Он адаптирован к экстремальным условиям, оснащен жаропрочными материалами и антикоррозийной защитой. Адаптивное управление позволяет ему функционировать в турбулентной атмосфере, выполняя точные измерения. В отличие от других аппаратов МРЛА сочетает маневренность, надежность и устойчивость, обеспечивая новый уровень исследования атмосферы Венеры [3].

8.2. Численное моделирование и анализ результатов интегрирования

Анализ результатов работы программы позволил определить оптимальные значения коэффициентов ПИД-регулятора, соответствующие

заданным условиям (рис. 2). Полученные параметры обеспечивают наилучшее качество управления, минимизируют отклонения ориентации аппарата, повышая его устойчивость при воздействии внешних возмущений:

$$K_{p_x} = 0.98364438;$$

$$K_{i_x} = 0.30600732;$$

$$K_{d_x} = 0.04938846;$$

$$K_{p_y} = 1.02849085;$$

$$K_{i_y} = 0.29888653;$$

$$K_{d_y} = 0.04904991;$$

$$K_{p_z} = 1.02307622;$$

$$K_{i_z} = 0.30555037;$$

$$K_{d_z} = 0.05098919.$$

Конечные значения углов:

$$\varphi: -0.0013, \theta: 0.0006, \psi: -0.0006, \text{ рад.}$$

Конечные значения угловых скоростей:

$$\omega_x: 0.0005, \omega_y: -0.0001, \omega_z: 0.0002, \text{ рад/с.}$$

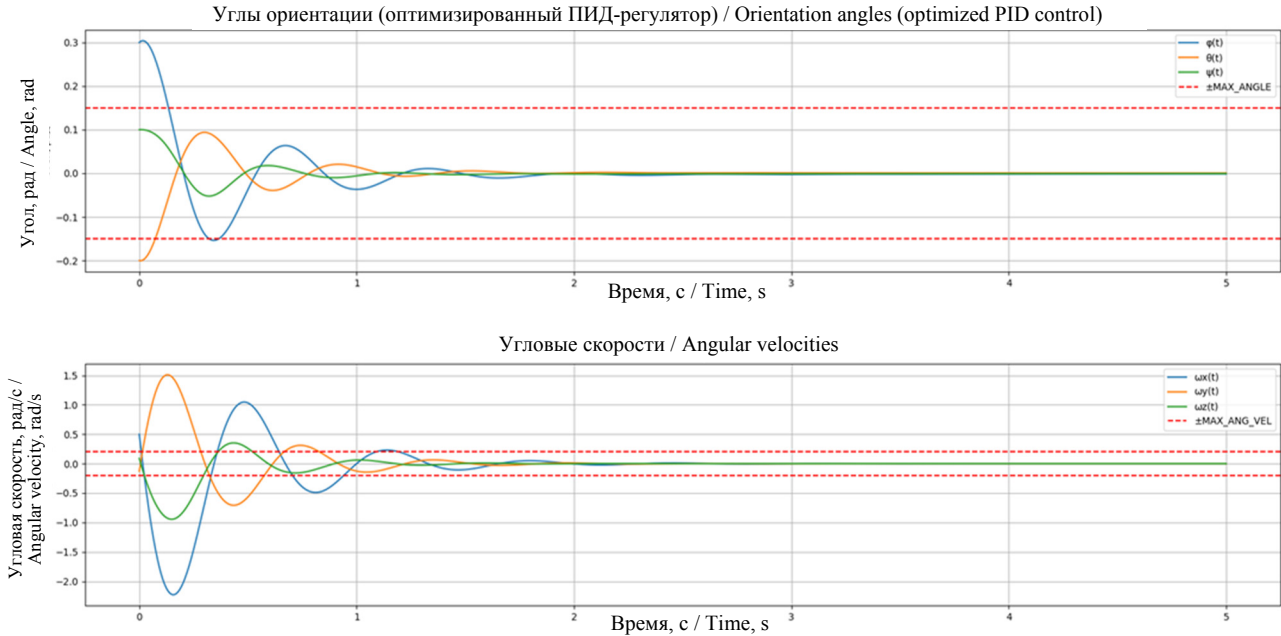


Рис. 2. Стабилизация МРЛА с ПИД-регулятором при случайных ветровых возмущениях

Источники: выполнено В.В. Рыжковым

Figure 2. MRAC stabilization with a PID controller under random wind disturbances

Source: by V.V. Ryzhkov

¹ Farrell WM, McLain JL, Marshall JR, Wang A. Will the Martian helicopter cause a local atmospheric breakdown on Mars? 2021. URL: <https://arxiv.org/abs/2102.0418> (accessed: 28.01.2025).

Заключение

Анализ полученных результатов демонстрирует успешное выполнение поставленных задач, связанных с оптимизацией параметров ПИД-регулятора для стабилизации углового положения МРЛА. Использование метода численной оптимизации позволило подобрать такие коэффициенты регулятора, которые обеспечивают минимальные отклонения углов ориентации от заданных значений, а также быструю стабилизацию при наличии возмущений.

Графики динамики углов и угловых скоростей (см. рис. 2) подтверждают эффективность регулятора: после начальных колебаний система демонстрирует быстрое (порядка двух секунд) затухание отклонений и стремление параметров к целевым значениям. Остаточные ошибки находятся в пределах допустимого диапазона, а угловые скорости стабилизируются практически на нулевом уровне, что свидетельствует о высокой точности управления.

Проведенное исследование подтверждает, что предложенный подход к автоматизированному подбору параметров ПИД-регулятора позволяет минимизировать интегральную ошибку ориентации и улучшить динамические характеристики системы. Разработанный алгоритм стабилизации может быть использован для управления летательными аппаратами в сложных атмосферных условиях, включая сильные возмущения, характерные для облачного слоя Венеры.

Список литературы

1. Moroz V.I. The atmosphere of Venus // *Soviet Physics Uspekhi*. 1971. Vol. 14. No. 3. <https://doi.org/10.1070/PU1971v014n03ABEH004705>
2. Kliore A.J., Moroz V.I., Keating G.M. The Venus International Reference Atmosphere // *Advances in Space Research*. 1985. Vol. 5. No. 11. P. 1–2. [https://doi.org/10.1016/0273-1177\(85\)90196-6](https://doi.org/10.1016/0273-1177(85)90196-6)
3. Яценко М.Ю., Воронцов В.А., Рыжков В.В. Обзор проблемных вопросов создания мультироторного летательного аппарата для исследования Венеры // *Инженерный журнал: наука и инновации*. 2023. Вып. 2. <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2023-2-2255> EDN: YFMKKG
4. Яценко М.Ю., Воронцов В.А., Рыжков В.В. Системотехническое исследование мультироторного летательного аппарата как перспективного технического средства изучения атмосферы и поверхности планеты Венера // *Космические аппараты и технологии*. 2023.

Т. 7, № 3 (45). С. 220–226. <https://doi.org/10.26732/j.st.2023.3.06> EDN: UNAKMH

5. Денисенко В.В. ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации // *Системы и средства автоматизации*. 2006. № 4. С. 66–74. URL: <https://www.cta.ru/cms/f/342946.pdf> (дата обращения: 12.11.2024)

6. Лю Ф. Сравнительный анализ методов настройки ПИД-регуляторов // *Научные исследования*. 2023. С. 23–26. URL: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/51524> (дата обращения: 12.11.2024)

7. Лобатый А.А., Гу П. Математическое моделирование движения летательных аппаратов мультироторного типа // *Системный анализ и прикладная информатика*. 2023. № 1. С. 10–15. <https://doi.org/10.21122/2309-4923-2023-1-10-15> EDN: KFOYKO

8. Саблина Г.В., Маркова В.А. Настройка параметров ПИД-регулятора в системе с объектом второго порядка с запаздыванием // *Автоматика*. 2022. Т. 58. № 4. С. 110–117. <https://doi.org/10.15372/AUT20220411> EDN: RIZPWY

9. Бюшгенс Г.С., Студнев Р.В. Динамика самолёта. Пространственное движение. Москва : Машиностроение, 1983. 320 с.

10. Aslanov V.S., Ledkov A. Attitude dynamics and control of space debris during ion beam transportation. Amsterdam : Elsevier Publ.; 2023. 312 p. ISBN 978-0-32399-299-2 ISBN 978-0-32399-300-5

11. Иванов А.М., Беляев Ф.С., Беляев С.П., Волков А.Е., Реснина Н.Н. Применение метода Нелдера–Мида для оптимизации выбора констант модели Лихачёва–Волкова // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Математика. Механика. Астрономия*. 2022. Т. 9, вып. 4. С. 693–704. <https://doi.org/10.21638/spbu01.2022.411> EDN: TMNRBL

12. Балакин В.Л., Крикунов М.М. Возмущенное движение гиперзвукового самолета при наборе высоты // *Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение*. 2019. Т. 18. № 2. С. 7–20. <https://doi.org/10.18287/2541-7533-2019-18-2-7-20> EDN: YOTZWJ

13. Ковтуненко В.М., Камеко В.Ф., Яскевич Э.П. Аэродинамика орбитальных космических аппаратов. Киев : Наукова думка, 1977. 156 с.

14. Ледков А.С. Динамика и управление цилиндрическим космическим мусором при бесконтактной транспортировке ионным потоком // *Труды МАИ*. 2023. № 131. <https://doi.org/10.34759/trd-2023-131-04> EDN: XUITIS

15. Нуньес-Иглесиас Х., ван дер Уолт Ш., Дэшнот Х. Элегантный SciPy : научное программирование на Python. Москва : ДМК Пресс, 2018. 350 с. ISBN 978-5-97060-600-1

16. Хилл К. Научное программирование на Python / пер. с англ. А.В. Снастина. Москва : ДМК-Пресс, 2021. 646 с. ISBN 978-5-97060-914-9

17. Любанович Б. Простой Python: современный стиль программирования / пер. с англ. Е. Зазноба. 2-е

изд. Санкт-Петербург : Питер, 2021. 592 с. ISBN 978-5-4461-1639-3

18. Воронов А.А. Введение в динамику сложных управляемых систем. Москва: Наука, 1985. 352 с. URL: <https://reallib.org/reader?file=1212928&pg=3> (дата обращения: 21.11.2024).

19. Taddia Y., Stecchi F., Pellegrinelli A. Использование беспилотного летательного аппарата DJI Phantom 4 RTK для топографического картографирования прибрежных зон // Международные архивы фотограмметрии, дистанционного зондирования и пространственной информации. 2019. Т. XLII-2/W13. С. 625–630. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-625-2019>

References

1. Moroz VI. The atmosphere of Venus. *Soviet Physics Uspekhi*. 1971;14(3):317. <https://doi.org/10.1070/PU1971v014n03ABEH004705>

2. Kliore AJ, Moroz VI, Keating GM. The Venus International Reference Atmosphere. *Advances in Space Research*. 1985;5(11):1–2. [https://doi.org/10.1016/0273-1177\(85\)90196-6](https://doi.org/10.1016/0273-1177(85)90196-6)

3. Yatsenko MYu, Vorontsov VA, Ryzhkov VV. Review of problematic issues in creation of a multicopter aircraft for Venus exploration. *Engineering Journal: Science and Innovation*. 2023;(2):8. (In Russ.) <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2023-2-2255> EDN: YFMKKG

4. Yatsenko MYu, Vorontsov VA, Ryzhkov VV. Systems engineering study of a multicopter aircraft as a promising tool for studying the atmosphere and surface of Venus. *Spacecraft and Technologies*. 2023;7(3):220–226. (In Russ.) <https://doi.org/10.26732/j.st.2023.3.06> EDN: UNAKMH

5. Denisenko VV. PID regulators: principles of construction and modifications. *Systems and Automation Devices*. 2006;(4):66–74. (In Russ.) Available from: <https://www.cta.ru/cms/f/342946.pdf> (accessed: 12.11.2024)

6. Liu F. Comparative analysis of PID controller tuning methods. *Scientific Researches*. 2023;23–26. (In Russ.) Available from: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/51524> (accessed: 12.11.2024)

7. Lobaty AA, Gu P. Mathematical modeling of movement of multi-rotor type aircraft. *System analysis and applied information science*. 2023;(1):10–15. (In Russ.) <https://doi.org/10.21122/2309-4923-2023-1-10-15> EDN: KFOYKO

8. Sablina GV, Markova VA. Tuning of PID controller parameters in a system with a second-order object with

delay. *Avtometriya*. 2022;58(4):110–117. (In Russ.) <https://doi.org/10.15372/AUT20220411> EDN: RIZPWY

9. Byushgens GS, Studnev RV. *Dynamics of the Aircraft. Spatial Movement*. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 1983. (In Russ.)

10. Aslanov VS, Ledkov A. *Attitude dynamics and control of space debris during ion beam transportation*. Amsterdam: Elsevier Publ.; 2023. 312 p. ISBN 978-0-32399-299-2 ISBN 978-0-32399-300-5

11. Ivanov AM, Belyaev FS, Volkov AE, Belyaev SP, Resnina NN. Application of the Nelder-Mead method for optimizing the selection of constants of the Likhachev-Volkov model. *Vestnik of Saint Petersburg University. Mathematics. Mechanics. Astronomy*. 2022;9(4):693–704. (In Russ.) <https://doi.org/10.21638/spbu01.2022.411> EDN: TMNRBL

12. Balakin VL, Krikunov MM. Disturbed motion of a hypersonic vehicle in climb. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2019;18(2):7–20. (In Russ.) <https://doi.org/10.18287/2541-7533-2019-18-2-7-20> EDN: YOTZWJ

13. Kovtunenkov VM, Kameko VF, Yaskevich EP. *Aerodynamics of orbital spacecraft*. Kiev: Naukova Dumka; 1977. (In Russ.)

14. Ledkov A.S. Dynamics and control of cylindrical space debris during contactless ion beam assisted transportation. *Trudy MAI*. 2023;(131):4. <https://doi.org/10.34759/trd-2023-131-04> (In Russ.) EDN: XUITIS

15. Nunez-Iglesias H, van der Walt S, Dashnoy H. *Elegant SciPy: Scientific Programming in Python*. Moscow: DMK Press; 2018. (In Russ.) ISBN 978-5-97060-600-1

16. Hill K. *Scientific Programming in Python*. Translated from English by A.V. Slastin. Moscow: DMK Press; 2021. (In Russ.) ISBN 978-5-97060-914-9

17. Lobanovich B. *Simple Python: Modern Programming Style*. 2nd ed. Saint Petersburg: Piter Publ.; 2021. (In Russ.) ISBN 978-5-4461-1639-3

18. Voronov AA. *Introduction to the Dynamics of Complex Controlled Systems*. Moscow: Nauka Publ.; 1985. (In Russ.) Available from: <https://reallib.org/reader?file=1212928&pg=3> (accessed: 21.11.2024).

19. Taddia Y, Stecchi F, Pellegrinelli A. Use of the DJI Phantom 4 RTK unmanned aerial vehicle for topographic mapping of coastal areas. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2019;XLII-2/W13:625–630. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-625-2019>

Сведения об авторе

Рыжков Владислав Валентинович, аспирант кафедры 604 «Системный анализ и управление», Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Российская Федерация, 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4; eLIBRARY SPIN-код: 2911-4515, ORCID: 0009-0008-2756-8479; e-mail: dinozavr.ru@mail.ru

About the author

Vladislav V. Ryzhkov, postgraduate student of the of the Department 604 “System Analysis and Control”, Moscow Aviation Institute (National Research University), 4 Volokolamsk highway, Moscow, 125993, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 2911-4515, ORCID: 0009-0008-2756-8479; e-mail: dinozavr.ru@mail.ru