

# АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПОЛЕТОМ ПАРАПЛАНА

К.Ю. Котов<sup>1</sup>, А.М. Милованова<sup>1,2</sup>, Е.Д. Семенюк<sup>1,2</sup>, М.А. Соболев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт автоматизации и электротехники СО РАН  
630090, Новосибирск, пр. Коптюга, 1, Россия  
kotov@idisis.iae.nsk.su  
тел: +7 (383) 333-26-25

<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет  
630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2, Россия  
тел: +7 (383) 330-32-44

**Ключевые слова:** парашют, П-регулятор, интегральный критерий качества, продольное и боковое движение.

## Abstract

This report describes the stabilization system of longitudinal and lateral movement of the paraglider, on the basis of P-regulators. Selection of control coefficients is based on the integral quality criterion. The simulation results confirm the effectiveness of the proposed method.

## Введение

В настоящее время беспилотные летательные аппараты (БПЛА), в том числе и парашюты, широко используются как для военных, так и для гражданских целей [1]. К преимуществам парашюта по сравнению с другими летательными аппаратами, относятся: низкая скорость (важная характеристика при мониторинге), устойчивость, управляемость (выходит в стационарные режимы планирования). Также парашют имеет невысокую стоимость, компактность, не требует аэродрома для взлета и посадки. При соизмеримой с другими летательными аппаратами массе конструкции, парашюты обладают значительной грузоподъемностью и продолжительностью нахождения в воздухе. Благодаря данным достоинствам парашют можно адаптировать к определенным практическим задачам.

Основным подходом к разработке систем автоматического управления является линеаризация модели динамики движения парашюта и применение классических методов теории линейных систем для установления оптимальных величин параметров регулятора [2], [3].

Предложенный в работе алгоритм управления основан на построении П-регуляторов с перекрестной связью между продольным и боковым движением, которые уменьшают воздействие маятниковых колебаний системы. Отличительной особенностью работы является использование нелинейной модели и поиск коэффициентов регулятора, основанный на применении интегрального критерия качества.

## 1 Описание объекта управления

По аналогии с [4] рассмотрим нелинейную математическую модель динамики движения парашюта. Введем обозначения:

$[a^B]$  – индекс обозначает систему координат, в которой вычисляется величина (“B” – *body* – центр масс парашюта, “G” – *geographic* – географические координаты, т.е. система координат, связанная с землей);  $[a^B]$  – транспонированная матрица  $[a^B]$ ;  $[x_B^G]^G = [x, y, z]$  – координаты центра масс относительно земли, в системе координат земли;  $[v_B^G]^G = [u, v, w]$  – линейная ско-

рость центра масс относительно земли, в системе координат центра масс;  $[\omega^{BG}]^B = [p, q, r]$  – скорость вращения (угловая скорость) центра масс относительно земли, в системе координат центра масс;  $[\varphi, \theta, \psi]$  – углы Эйлера – углы, которые задают ориентацию центра масс парашюта относительно земли (крен, тангаж, рыскание).

Основу модели составляют уравнения динамики и кинематики:

$$(1) \quad m^B \frac{d[v_B^G]^B}{dt} + m^B [\Omega^{BG}] [v_B^G]^B = [f]^B,$$

где  $[f]^B$  – это сумма всех сил, действующих на тело, в системе координат центра масс,  $[\Omega^{BG}]^B$  – кососимметричная матрица угловых скоростей,  $m^B$  – масса парашюта;

$$(2) \quad [I_B^B]^B \frac{d[\omega^{BG}]^B}{dt} + [\Omega^{BG}] [I_B^B]^B [\omega^{BG}]^B = [M_B]^B,$$

где  $[I_B^B]^B$  – момент инерции парашюта относительно центра тяжести, в системе координат центра масс,  $[M_B]^B$  – сумма моментов сил, действующих на тело, в системе координат центра масс;

$$(3) \quad [\dot{x}_B^G]^G = [v_B^G]^G;$$

$$(4) \quad \begin{bmatrix} \dot{\varphi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \sin \phi \tan \theta & \cos \phi \tan \theta \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi / \cos \theta & \cos \phi / \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix}.$$

Для компьютерной реализации непрерывная математическая модель была заменена на дискретную с малым шагом дискретизации по времени (0,01 секунды).

## 2 Постановка задачи и алгоритм управления

Основной целью разработки системы управления является создание алгоритма регулирования движения парашюта в двух плоскостях: продольной и поперечной. Таким образом, задача управления разбивается на две подзадачи: стабилизация заданной высоты и поддержание курса полета в соответствующих плоскостях.

Стабилизация полета по высоте обеспечивается регулированием тяги  $f_T$ , по курсу – натяжением левой и правой управляющих строп  $\delta_L$  и  $\delta_R$ . Соотношения, которые связывают силы и моменты, действующие на парашют, с управляющими воздействиями, приведены в [2].

Построим управление в виде обратной связи по ошибке управления высотой  $\Delta z$  и отклонению курсового угла от заданного  $\Delta \varphi$ :

$$(5) \quad \Delta z = z - z_{ref},$$

$$(6) \quad \Delta \varphi = \varphi - \varphi_{ref},$$

где  $z_{ref}$  и  $\varphi_{ref}$  – заданные значения высоты и угла соответственно.

Также необходимо учесть наличие маятниковых колебаний в динамике полета парашюта, которые влияют на его устойчивость. Чтобы обеспечить поперечную устойчивость, компенсируем колебания по крену, включая угловую скорость  $p$  в обратную связь. Для продольного

движения поступим аналогично, устраняя колебания по тангажу добавлением звена с угловой скоростью  $q$ . В результате, П-регулятор движения по курсовому углу имеет вид:

$$(7) \begin{cases} C = K_\varphi \Delta\varphi + K_p p, \\ \delta_R = C, \delta_L = 0, C \leq 0, \\ \delta_L = C, \delta_R = 0, C > 0. \end{cases}$$

В управление движением по высоте необходимо ввести дополнительное звено для устранения возникающей статической ошибки. К сожалению, добавление интегральной составляющей привело к ухудшению быстродействия переходных процессов, появлению перерегулирования и неустойчивости системы. Однако мы можем добавить базовое значение тяги  $f_{TBase}$ , соответствующее горизонтальному режиму полета парашюта [3]. Также внесем ограничение на величину тяги:

$$(8) \begin{cases} f_T = K_z \Delta z + K_q q + f_{TBase}, \\ 0H < f_T < 15H. \end{cases}$$

Использование нелинейной модели не позволяет применять стандартные методы линейной теории. Одним из вариантов решения этой задачи является вычисление параметров или определение структуры регулятора на основе желаемого вида переходных процессов [5]. В данном случае удобно воспользоваться улучшенным интегральным критерием качества [6]:

$$(9) I_z = \int_0^T (\Delta z - T\Delta\dot{z})^2 dt + \int_0^T (\Delta q - T\Delta\dot{q})^2 dt,$$

где  $T$  – время переходного процесса.

Организуем поиск параметров регулятора движения по высоте следующим образом: для каждой высоты  $z_{ref}$  в интервале [0.5:5] м рассчитаем коэффициенты  $K_z$  и  $K_q$ , обеспечивающие минимум интегрального критерия  $I_z$ . Примем желаемое время переходного процесса  $t_{nn}^{жел} = 7$  с, тогда значение  $T = t_{nn}^{жел}/3$ . В данном случае, максимальная продольная скорость – 0.7 м/с, что соответствует реальной скорости набора высоты. При этом величина тяги составляет около 60% от максимально допустимой. Полученные оптимальные параметры:  $K_z = 1.09$  и  $K_q = 7$ . Время переходного процесса при найденных коэффициентах во всем интервале высот отличается от заданного  $t_{nn}^{жел}$  не более чем на 5%.

Оценим процедуру поиска параметров в точке  $z_{ref} = 5$  м. Будем задавать желаемое время переходного процесса от 4 до 10 с. Найдем коэффициенты  $K_z$  и  $K_q$ , обеспечивающие минимум  $I_z$ , и вычислим реальное время переходного процесса  $t_{nn}^{реал}$  (таблица 1). В интервале требуемого времени [5:10] с погрешность получения  $t_{nn}^{реал}$  составила не более 10%.

Аналогичный алгоритм поиска параметров применим для регулятора движения по курсовому углу.

Таблица 1 – Результаты численного моделирования поиска параметров регулятора движения по высоте

$t_{пп}^{жел}$	$K_q$	$K_z$	$t_{пп}^{реал}$	$f_T \max$
4	6.5	1.6	4.89	11.63
5	7.0	1.5	5.07	11.13
6	7.0	1.3	5.98	10.13
7	7.0	1.09	7.36	9.08
8	7.0	0.99	8.23	8.58
9	7.0	0.89	9.3	8.08
10	7.0	0.79	10.64	7.58

Промоделируем работу системы для проверки предложенного алгоритма управления. На рисунке 1 изображена работа регуляторов независимо друг от друга. Результаты совместной работы регуляторов показаны на рисунке 2.

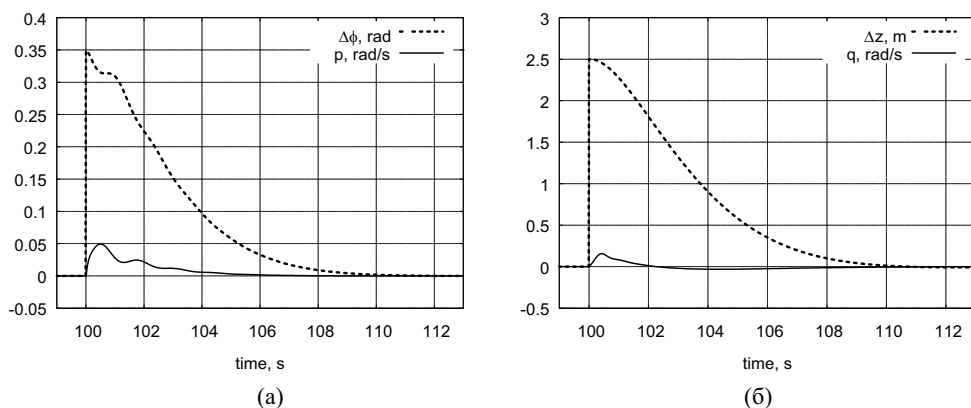


Рисунок 1 – Переходные процессы в каналах управления курсом (а) и высотой (б)

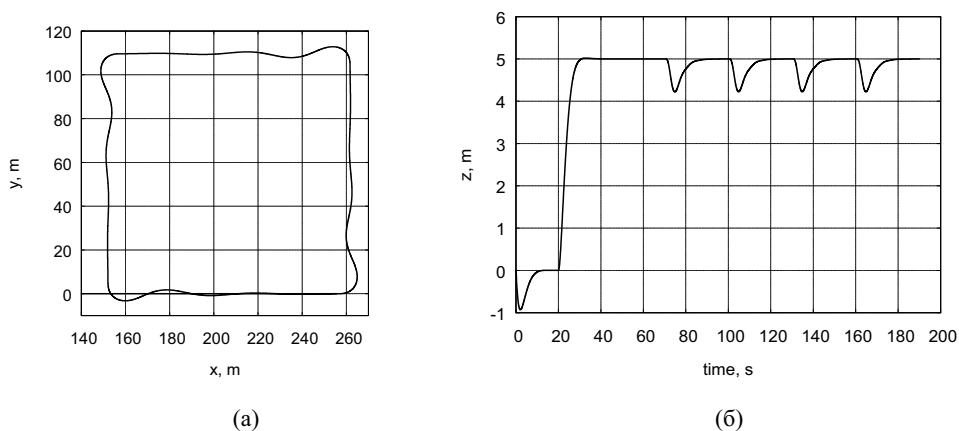


Рисунок 2 – Траектория движения параплана в поперечной (а) и продольной (б) плоскости

## Заключение

Структуру системы управления движением параплана составляют П-регуляторы бокового и продольного движения с компенсацией поперечных колебаний. Для подбора параметров регулятора с использованием нелинейной модели был предложен алгоритм, основанный на применении интегрального критерия качества. Эффективность предложенного метода поиска коэффициентов подтверждают результаты моделирования.

## Список литературы

- [1] Yakimenko O. A. Precision Aerial Delivery Systems: Modeling, Dynamics, and Control. – American Institute of Aeronautics & Astronautics, 2015. – 937 p.
- [2] Umenberger J., Goktogan A. H. Guidance, Navigation and Control of a Small-Scale Paramotor //Robotics and Automation (ACRA), Australasian Conference on. – 2012. – pp. 1-10.

- [3] Зайцев П.В., Формальский А.М. Автономное продольное движение парашюта: математическое моделирование, синтез управления //Известия. – 2008. – №. 5. – С. 122-130.
- [4] Togliа С., Vendittelli М. Modeling and motion analysis of autonomous paragliders //Department of Computer and System Sciences Antonio Ruberti Technical Reports. – 2010. – Т. 2. – №. 5. – 20 p.
- [5] Золотухин Ю.Н., Котов К.Ю., Мальцев А.С., Нестеров А.А., Соболев М.А., Филиппов М.Н., Ян А.П.. Робастное управление подвижными объектами в группе лидер–ведомые с использованием метода структурного синтеза. // Автометрия, 2015. – № 5. – С. 82-91.
- [6] Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. – 4-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Профессия, 2003. – 752 с.