

УДК 629.735-519

ББК 39.52С21

**ВЛИЯНИЕ ВЕТРА НА СИСТЕМУ УГЛОВОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ
БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА**

А. А. Санько

кандидат технических наук,

Белорусская государственная академия авиации

Минск, Беларусь

min.777.144@mail.ru

И. В. Рожков

магистр технических наук,

Белорусская государственная академия авиации

Минск, Беларусь

7528972@mail.ru

А. А. Шейников

кандидат технических наук,

Военная академия Республики Беларусь

Минск, Беларусь

af.varb@yandex.ru

В статье, в операторной форме представлена математическая модель ветра с учетом его порывистой части и ветра устойчивого направления, действующего на беспилотный летательный аппарат (БЛА) малой дальности в связанной системе координат. Проведен сравнительный анализ влияния параметров ветра на суммарный вектор скорости ветра, действующий на БЛА. Рассмотрена реакция автопилота управления углом тангажа БЛА

на ветер. Доказана необходимость учета скорости ветра при синтезе автопилота угла тангажа для БЛА малой дальности на режиме посадки.

Ключевые слова: ветер, беспилотный летательный аппарат, математическая модель ветра, коэффициент передачи, переходный процесс.

WIND INFLUENCE ON THE ANGULAR STABILIZATION SYSTEM OF THE UNMANNED AERIAL VEHICLE

A. A. Sanko

Candidate of Technical Sciences

Belarusian State Academy of Aviation

Minsk, Republic of Belarus

L.V. Rozhkov

Master of Technical Sciences, an applicant for a degree of Candidate of

Technical Sciences

Belarusian State Academy of Aviation

Minsk, Republic of Belarus

A.A. Sheinikov

Candidate of Technical Sciences

Military Academy of the Republic of Belarus

Minsk, Republic of Belarus

The paper presents a mathematical model of the wind, taking into account its gusting part and the steady-state wind acting on a short-range unmanned aerial vehicle (UAV) in a related coordinate system in an operator form. A comparative analysis of the effect of wind parameters on the total wind velocity vector acting on the UAV has been carried out. The flight pitch autopilot reaction to the wind is considered. The necessity of taking into account the wind speed in the synthesis of autopilot pitch angle for short-range UAVs in landing mode is proved.

Keywords: wind, unmanned aerial vehicle, wind mathematical model, transmission coefficient, transition process.

Введение

Задача синтеза систем управления БЛА характеризуется сложностью их математических моделей и наличием существенных ограничений и возмущений. К основным ограничениям можно отнести ограничения, обусловленные нелинейностью элементов сервоприводов, входящих в состав автопилота, и ветровыми возмущениями, действующими на БЛА. Вопросам разработки робастных систем автоматического управления БЛА посвящено ряд работ: [Малкин. Патент РБ № 8404, Гриднев, 2017]. В данных работах рассматривался синтез робастного автопилота, который является универсальным для любых планеров БЛА с весом от 0,5 кг до 50 кг. Синтез структуры канала тангажа робастного автопилота производится в соответствии с концепцией обратных задач динамики, которая позволяет определить управляющее воздействие на входе сервопривода автопилота с учетом изменения коэффициентов передачи автопилота под воздействием внутренних возмущений. Влияние ветровых возмущений на работу контура автопилота БЛА не рассматривалось, и задача по разработке робастного контура автопилота БЛА (по ветровым возмущениям) не решалась.

Постановка задачи исследования

В данной работе предлагается разработать математическую модель ветра с учетом его порывистой части и ветра устойчивого направления, действующего на БЛА с учетом метрологических особенностей атмосферы заданного участка местности. Исследовать степень влияния ветра на контур автопилота БЛА по углу тангажа.

Решение задачи

Суммарный вектор скорости ветра, действующий на БЛА может быть выражен, как [Рэндал, 2015]:

$$V_w = V_{ws} + V_{wg},$$

где V_{ws} – постоянный вектор, который представляет собой ветер устойчивого направления (обычно выражается в инерциальной системе координат – ИСК); V_{wg} – стохастический процесс, который представляет собой воздушные порывы и другие атмосферные возмущения (стохастическая компонента ветра выражается в связанной системе координат – ССК).

Значение V_{ws} для БЛА можно вычислить, как [<https://www.mathworks.com>]:

$$V_{ws} = V_6 \cdot \frac{\ln\left(\frac{h}{Z_0}\right)}{\ln\left(\frac{6}{Z_0}\right)}, \quad 1 \text{ м} < h < 300 \text{ м},$$

где V_6 – среднегодовая скорость ветра на высоте 6 метров для заданного участка местности; h – текущая высота полета БЛА; Z_0 – коэффициент (для указанных высот выбирается 0,15). Например, для Республики Беларусь – $V_6 \approx 2,1$ м/с. [<https://www.energywind.ru>],

Результаты экспериментальных исследований показали, что адекватность модели для неустановившейся, порывистой части ветра достигается при пропускании через линейный, не меняющийся во времени фильтр белого шума, задаваемого спектром турбулентности фон Кармана [Рэндал, 2015]. Для простоты вычисления модели фон Кармана, целесообразно использовать передаточные функции Драйдена:

$$H_x(s) = \sigma_x \sqrt{\frac{2V_a}{L_x}} \cdot \frac{1}{s + \frac{V_a}{L_x}};$$

$$H_y(s) = \sigma_y \sqrt{\frac{3V_a}{L_y}} \cdot \frac{\left(s + \frac{V_a}{\sqrt{3}L_y}\right)}{\left(s + \frac{V_a}{L_y}\right)^2}; \quad (1)$$

$$H_z(s) = \sigma_z \sqrt{\frac{3V_a}{L_z}} \cdot \frac{\left(s + \frac{V_a}{\sqrt{3}L_z}\right)}{\left(s + \frac{V_a}{L_z}\right)^2},$$

где $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ – интенсивности турбулентности вдоль осей ССК БЛА; L_x, L_y, L_z – пространственные длины волн (масштаб турбулентности); V_a – воздушная скорость БЛА, без учета величины ветра устойчивого направления.

Параметры для модели порывов ветра (1) определены в MIL-F-8785C [Flying Qualities of Piloted Airplanes, 1980]. Подходящие параметры в случае небольших и средних высот, слабой и умеренной турбулентности представлены в таблице 1 [W. Langelaan, 2010].

Таблица 1 – Параметры модели порыва ветра Драйдена

Описание порыва ветра	h , м	L_x, L_z , м	L_y , м	σ_x, σ_z , м	σ_y , м
Слабая турбулентность	50	200	50	1,06	0,7
Умеренная турбулентность	50	200	50	2,12	1,4
Слабая турбулентность	600	533	533	1,5	1,5
Умеренная турбулентность	600	533	533	3	3

На рисунке 1 представлена функциональная модель расчета значений скорости ветра, действующего на БЛА в ССК. На рисунке 1: B_3 – универсальная матрица направляющих косинусов, предназначенная для преобразования ИСК в ССК, причем $\psi^* = \psi$; $\upsilon^* = \upsilon$; $\gamma^* = \gamma$; P_3 – перестановочная матрица [Санько, 2016].

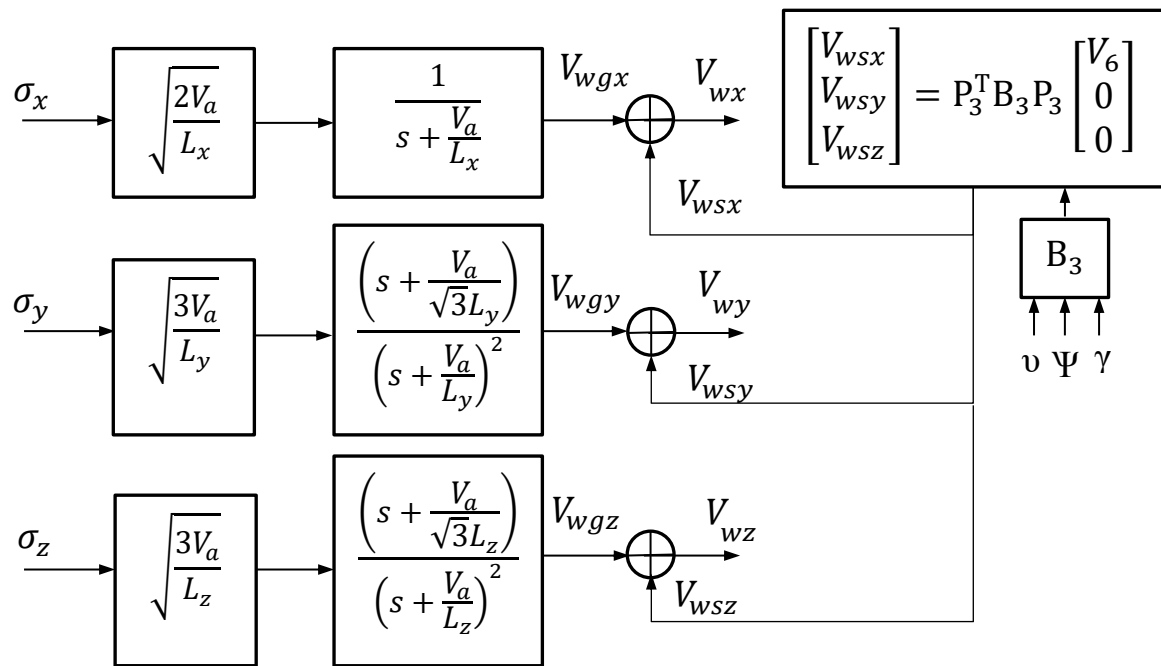


Рисунок 1 – Функциональная модель расчета ветра, действующего на БЛА в ССК

Функциональная модель расчета ветра была реализована в среде виртуального моделирования MATLAB. При проведении моделирования были приняты следующие допущения: направление ветра устойчивого направления совпадает по касательной к направлению полета БЛА; не учитывались: неровности местности; наличия ветра типа «ножницы»; другие метеорологические фракции (за исключением высоты полета). Результаты моделирования представлены на рисунках 2–5. Параметры полета БЛА: $\gamma = 1$ град; $v = 2$ град; $\Psi = 100$ град.

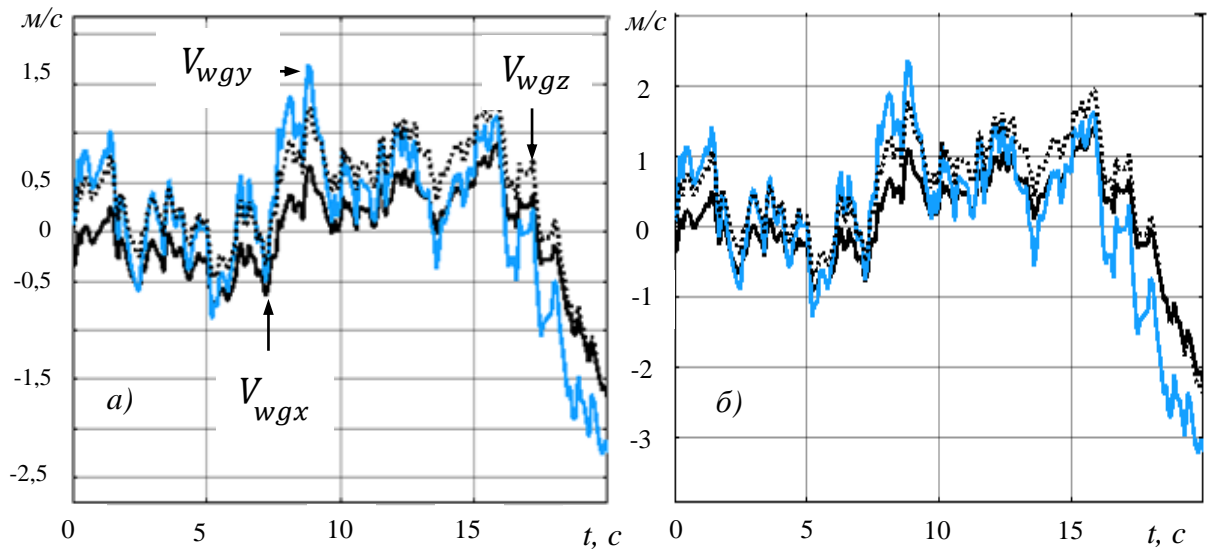


Рисунок 2 – Результаты моделирования значений стохастической компоненты ветра, действующего на БЛА в ССК ($V_a = 15$ м/с, $H = 50$ м)
 а) при слабой турбулентности ветра; б) при умеренной турбулентности вет-

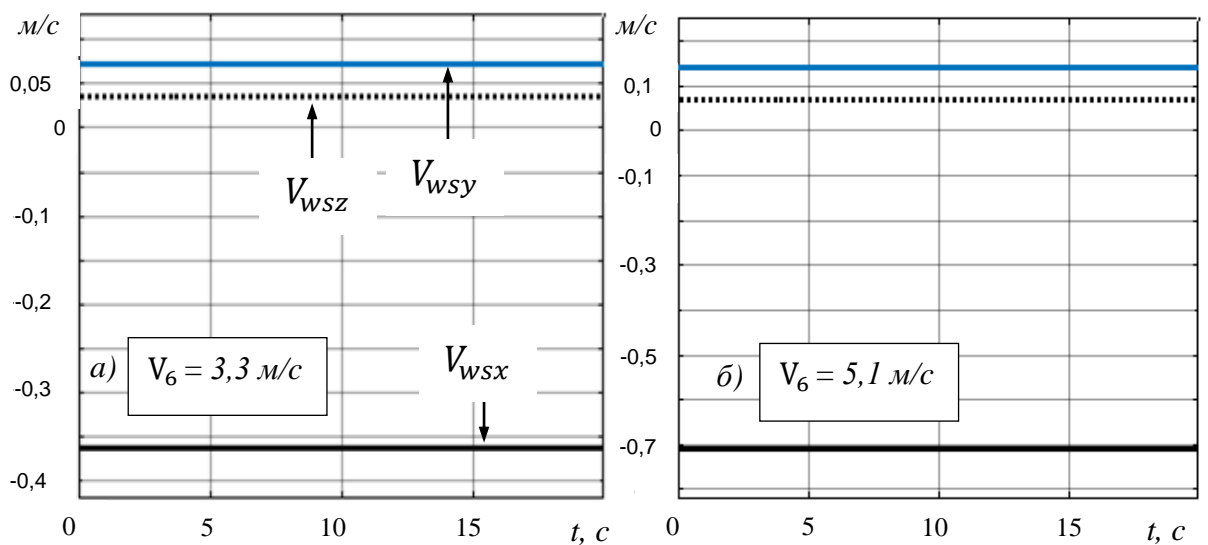


Рисунок 3 – Результаты моделирования ветра устойчивого направления, действующего на БЛА ($V_a = 15$ м/с)

Как видно из рисунков 2–3: стохастическая компонента турбулентности ветра существенно выше значений ветра устойчивого направления, действующего на БЛА. Причем, самое большое отношение V_{wg}/V_{ws} имеет компонент ветра, действующий на БЛА в вертикальном направлении – V_{wgy} . Его

наличие может создать сложности при выполнении посадки БЛА, как в автоматическом, так и в ручном режиме.

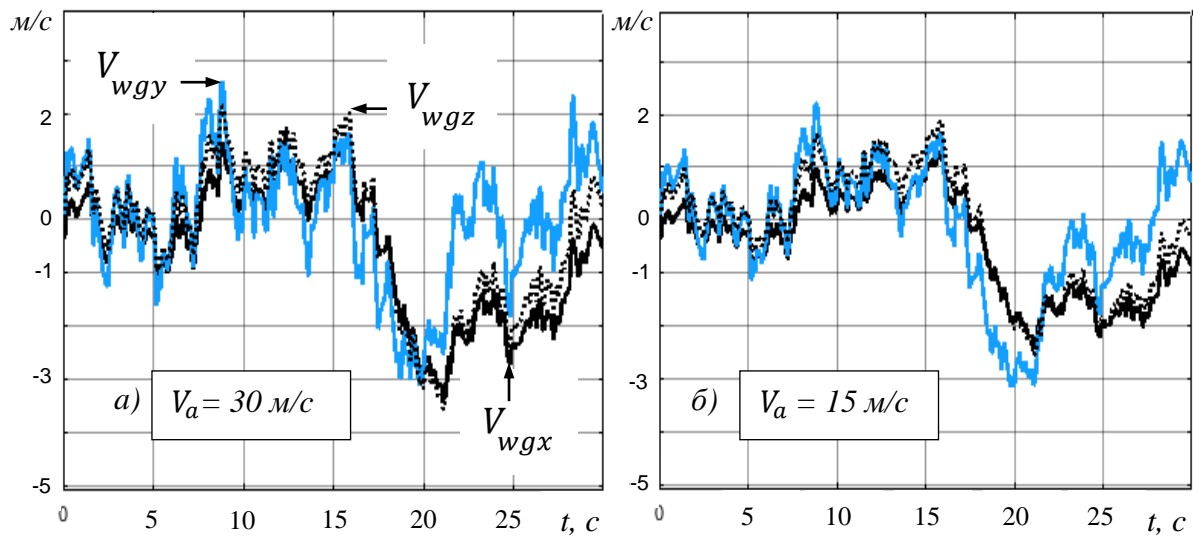


Рисунок 4 – Результаты моделирования стохастической компоненты ветра при его умеренной турбулентности ($V_6 = 3,3 \text{ м/с}$; $H = 50 \text{ м}$)

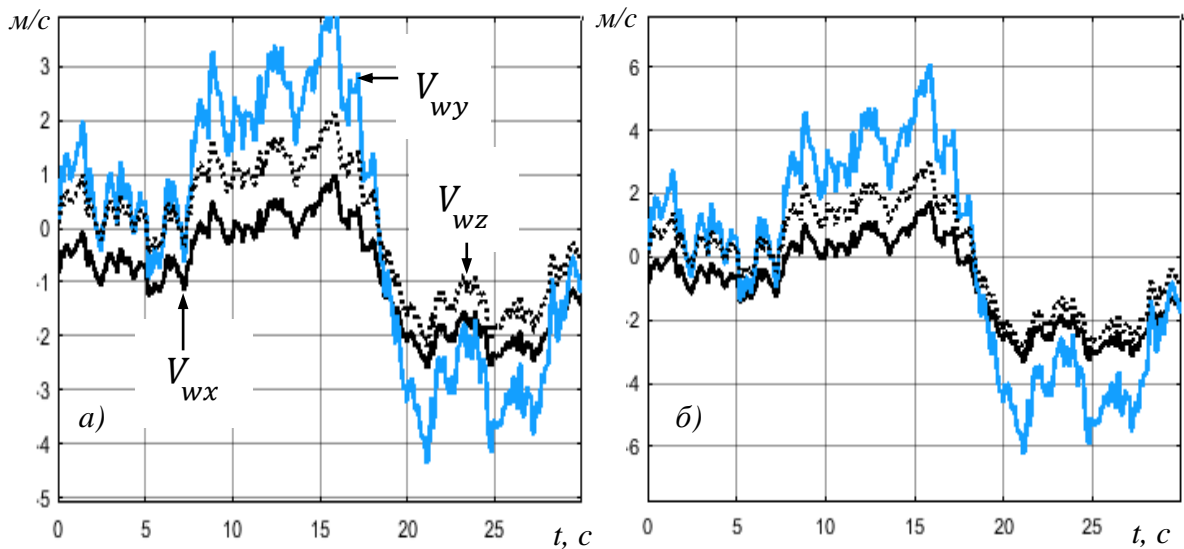


Рисунок 5 – Результаты моделирования суммарного значения скорости ветра, действующего на БЛА ($V_6 = 4.73 \text{ м/с}$; $V_a = 15 \text{ м/с}$; $H = 600 \text{ м}$):
a) слабой турбулентности ветра; б) при умеренной турбулентности ветра

Увеличение значения ветра устойчивого направления в 1,5 раза в ИСК (см. рисунок 3), приведет к аналогичному увеличению ветра устойчивого направления, действующего на БЛА в ССК, что обуславливает их линейную зависимость. При увеличении воздушной скорости БЛА в 2 раза, стохастическая компонента ветра изменится не значительно (10-15 %) (см. рисунок 4).

Стохастическая компонента ветра (см. рисунок 5), определяется главным образом интенсивностью и масштабом ее турбулентности в данной географической области, причем с высотой полета БЛА она будет увеличиваться.

Структурная схема рассматриваемой модели продольного движения БЛА с учетом ветровых возмущений представлена на рисунке 6 [Красовский, 1971].

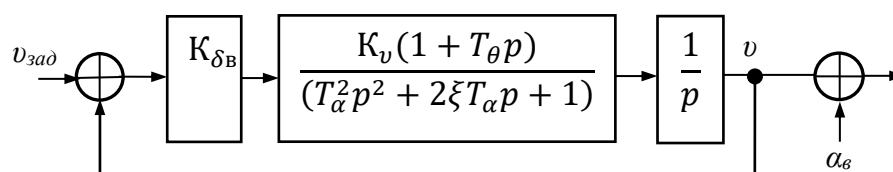


Рисунок 6 – Структурная схема модели продольного движения БЛА с учетом ветровых возмущений

Где α_ϵ – угол ветра, $\alpha_B \approx \frac{V_{wy}}{V_a}$; K_{δ_B} – коэффициент передачи по рулю высоты; K_v – коэффициент передачи по тангажу; T_θ – постоянная времени характеризующая маневренность БЛА в продольном направлении; T_α – постоянная времени собственных колебаний БЛА; ξ – коэффициент демпфирования. Для исследуемого БЛА: $K_{\delta_B} = 1,525$; $\xi = 0,805$; $T_\alpha = 0,1$ с; $T_\theta = 0,229$ с; $K_v = 4,365$ 1/с [Распопов, 2008].

Проведенные исследования показали (см. рисунок 7), что с увеличением скорости полета БЛА влияние ветровых возмущений по управляющему воздействию (угол тангажа) уменьшается и составляет не более 5–10%. С учетом того, что средняя крейсерская скорость полета БЛА малой

дальности составляет (90 – 110 км/ч \approx 30 м/с) [А. Г. Шведко, 2018], влиянием ветровых возмущений на БЛА на заданной географической территории можно пренебречь.

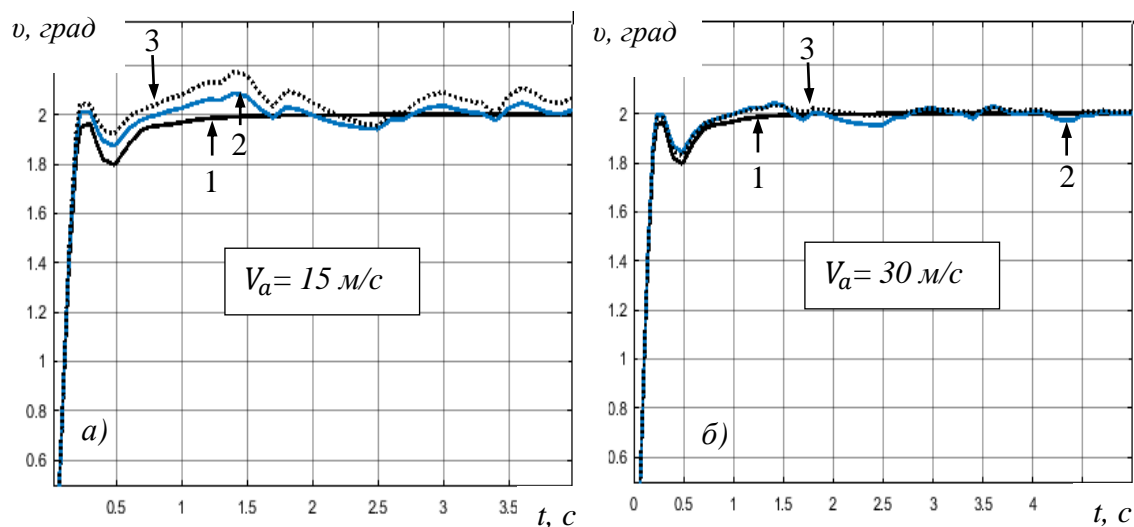


Рисунок 7 – Результаты моделирования угла тангажа БЛА

- 1) ветра нет; 2) умеренная турбулентность ветра ($H = 50 \text{ м}$);
3) умеренная турбулентность ветра ($H = 600 \text{ м}$)

Заключение

В результате проведенных исследований:

– на основе модели Драйдена разработана математическая модель расчета скорости ветра, действующего на БЛА в связанной системе координат;

– установлено, что применительно к заданной географической территории, стохастическая компонента ветра существенно больше значения ветра устойчивого направления; влиянием ветровых возмущений на БЛА, при его крейсерских скоростях полета более 100 км/ч можно пренебречь.

Таким образом, актуальной задачей при синтезе автопилота БЛА с учетом ветровых возмущений является решение задач посадки, где скорости полета БЛА значительно меньше 30 м/с. Полученные результаты целесообразно использовать при синтезе автопилота БЛА малой дальности,

предназначенного для летной эксплуатации в заданной географической территории.

Библиографический список

1. *Гриднев Ю. В.* Робастный автопилот канала тангажа беспилотного летательного аппарата / Ю. В. Гриднев, А. Г. Иванов // Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. 2017. № 3 (105). С. 40 – 43.
2. *Малкин В. А., Гриднев Ю. В., Пальцев А. Н., Цанава А. А.* Робастный автопилот канала тангажа летательного аппарата / Патент № 18251.
3. *Михалев И. А.* Системы автоматического управления полетом самолета. М.: Машиностроение, 1971. 464 с.
4. *Мхитарян А. М.* Аэродинамика. М. : Машиностроение, 1976. 448 с.
5. *Распопов Б. Я.* Автопилот беспилотного летательного аппарата // Б. Я. Распопов, С. В. Телухин // Мехатроника, автоматизация, управление 2008. № 10. С. 19.
6. *Рэндал У. Биард, Тимоти У. МакЛэйн.* Малые беспилотные летательные аппараты: теория и практика. Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2015. 312 с.
7. *Санько А. А.* Основы построения и алгоритмы работы навигационных систем воздушных судов: пособие по изучению дисциплины: часть 1 / сост.: А. А. Санько, В. М. Дедков. Минск: БГАА, 2016. 96 с.
8. Сервопривод // Докл. науч.-метод. семинара., М.: Издательство МЭИ, 2013. 88 с.
9. *Langelaan J. W., Alley N., and J. Niedhoefer,* Wind field estimation for small unmanned aerial vehicles in AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, AIAA 2010-8177 / August 2010. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mathworks.com/help/aerotbx/environment.html> (дата обращения: 10.01.2019).
10. Flying Qualities of Piloted Airplanes. U.S. Military Specification MIL-F-8785C. Washington, D.C.: U.S. Department of Defense, 1980. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.energywind.ru/recomendacii/skorost-vetra-belarus.html> (дата обращения: 10.01.2019).

References

1. Flying Qualities of Piloted Airplanes. U.S. Military Specification MIL-F-8785C. Washington, D.C. : U.S. Department of Defense, 1980. [Electronic resource]. - Access mode: <https://www.energywind.ru/recomendacii/skorost-vetra-belarus.html> (In English).
2. *Langelaan J. W., Alley N., and Niedhoefer J.*, “Wind field estimation for small unmanned aerial vehicles,” in AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, AIAA 2010-8177, August, 2010 [Electronic resource]. - Access mode: <https://www.mathworks.com/help/erotbx/environment.html> (In English).
3. *Malkin V.A., Gridnev Yu.V., Paltsev A.N., Tsanova A.A.* Robust autopilot channel pitch of the aircraft / Patent number 18251. (In Russian)
4. *Mikhalev I.A.* Automatic flight control systems of the aircraft. M. : Mashinostroenie, 1971. P.464. (In Russian)
5. *Mkhitaryan A.M.* Aerodynamics. Ed. 2nd, Pererab. and add. M.: Mashinostroenie, 1976. P.448. (In Russian)
6. *Randal W. Byard, Timothy W. McLain.* Small unmanned aerial vehicles: theory and practice. Moscow: TECHNOSPHERA, 2015. P.312. (In Russian)
7. *Raspopov B.Ya., Telukhin S.V.* Autopilot unmanned aerial vehicle. Mechatronics, Automation, Control No. 10, 2008. P. 19. (In Russian)
8. Robust autopilot of the pitch channel of an unmanned aerial vehicle. Reports BSUIR. 2017, No. 3 (105). Gridnev Yu.V., Ivanov A.G. (In Russian)
9. *Sanko A. A.* Basics of construction and algorithms of the navigation systems of aircraft: a manual for the study of discipline. Part 1 / comp. : A. A. Sanko, V. M. Dedkov. Minsk: BGAA, 2016. P.96. (In Russian)
10. Servo Drive // Report of scientific method. seminar., M. : Publishing House MEI, 2013. P.88. (In Russian)