

doi: 10.32620/oikit.2018.81.01

УДК681.5.015

Будиба Уиссам

## **Робастное управление беспилотным летательным аппаратом при неопределенных скоростях**

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского  
«Харьковский авиационный институт»*

Представлен метод реализации робастного управления с помощью номинальной модели беспилотного летательного аппарата (БПЛА). Работа классического регулятора в нелинейной системе управления при возникновении возмущающих воздействий не удовлетворяет заданные критерии качества. При этом изменяются аэродинамические параметры, и система становится неустойчивой. Для устранения нежелательных отклонений в систему управления летательного аппарата вводится робастное управление. Введение такого рода коррекции управляющего сигнала позволяет парировать всевозможные отказы и возмущения, которые приводят к неконтролируемому управлению. Изменение аэродинамических коэффициентов подъемной силы, коэффициента сопротивления, моментов влияет на модель объекта. Номинальная модель рассчитывается путем вычисления коэффициентов в программном пакете ANSYS-CFX и расчет подтверждается экспериментально. Ошибки также моделируются этим программным обеспечением, а диапазоны изменения каждого коэффициента представляют собой совокупность отказов.

**Ключевые слова:** БПЛА, робастное управление, аэродинамические коэффициенты, отказ, неопределенная модель, номинальная модель,  $k$ -бесконечность.

### **Введение**

Поскольку процесс полета БПЛА имеет нелинейную характеристику и высокую чувствительность к внешним возмущениям, классическое управление не может удовлетворять технические характеристики системы БПЛА, так как необходимо постоянное усиление регулятора. Необходимо робастное управление, которое могло бы адаптироваться к изменениям динамики дронов. Каждый отказ, такой, как блокировка элерона, перегрузка скорости, представляет собой набор аэродинамических параметров и коэффициентов, которые представляют собой новую математическую модель описания объекта управления в пространстве состояний. На изменение аэродинамической модели объекта может влиять коэффициент подъемной силы, коэффициент сопротивления, моменты. Процесс полета БПЛА без отказов может представляться благодаря номинальной модели. Номинальная модель – это совокупность аэродинамических коэффициентов, рассчитываемых путем вычисления коэффициентов в среде ANSYS-CFX, и расчет подтверждается экспериментально. Ошибки также моделируются этим программным обеспечением, а диапазоны изменения каждого коэффициента представляют собой совокупность отказов.

С помощью данного робастного управления можно управлять максимальным диапазоном отказов, т. е. до какого максимального значения отказов система будет работоспособной.

## 1. Постановка задачи

Опыт эксплуатации подобных БПЛА в мире, в частности, результатов полетов в лаборатории, показали, что существующие на сегодня методы недостаточно эффективны для решения задачи функционально-устойчивого управления. На рис. 1 показаны отказы, полученные в результате эксперимента, который проводился в лаборатории кафедры 305 Харьковского авиационного института, и результат сравнивались с экспериментальными показаниями в мире [1].

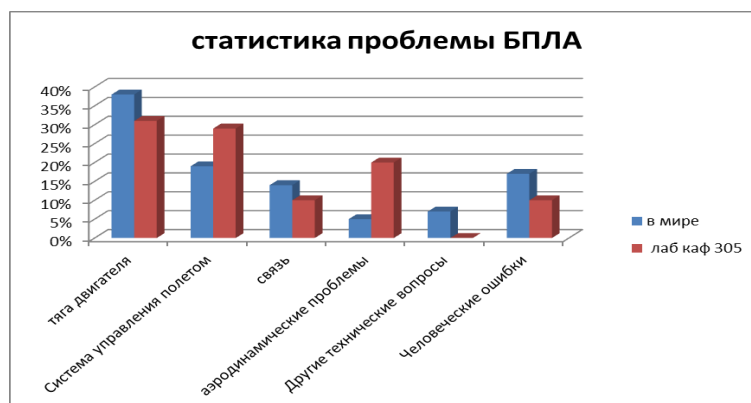


Рис. 1. Статистика экспериментальных и лабораторных исследований

В результате статистического исследования можно отметить, что проблемы в системе управления БПЛА оказывают большое влияние на аварии и катастрофы. Экспериментальные исследования отказоустойчивости очень дорогие в случае, когда система управления не работает должным образом.

Поэтому моделирование отказов было осуществлено в аэродинамическом приложении (ANSYS-CFX) для того, чтобы уменьшить экспериментальные затраты и исследовать поведение объекта при наличии отказа.

Объект и материалы исследования показаны на рис. 2. В работе рассматривается, как влияют изменения аэродинамических коэффициентов на изменения скорости в продольном движении БПЛА и до какого значения отказа можно управлять скоростью.

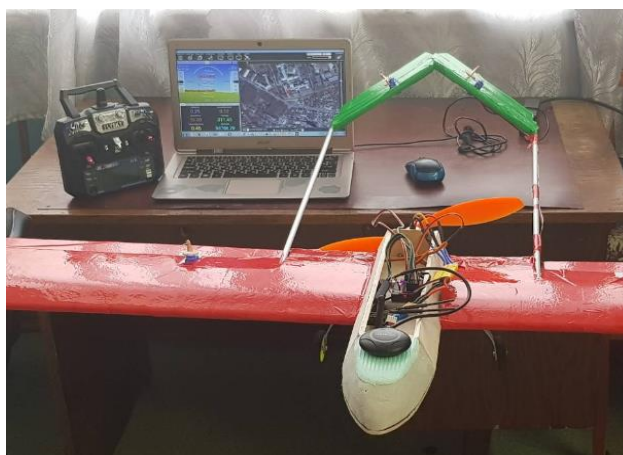


Рис. 2. Объект и материалы исследования БПЛА

Целью работы является создание надежной и робастной системы управления, устойчивой к максимальным отказам.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие задачи:

1. Вычислить все аэродинамические коэффициенты без присутствия отказа в БПЛА, чтобы построить номинальную модель для робастного управления. Необходимые параметры номинальной модели: режим полета – по маршруту, скорость движения – 16 м/с, отклонения элеронов и хвостового оперения равны 0°.

2. Вычислить все аэродинамические коэффициенты при отказе в БПЛА. Сформировать диапазон изменения каждого коэффициента для построения неизвестной модели робастного управления. Необходимые параметры для неизвестной модели: блокировка элеронов с 1 до 33°, скорость движения с 15 до 17 м/с, отклонение хвостового оперения с 0 до 33°.

## 2. Результаты исследований

На рис. 3 график слева показывает сходимости ошибки к значению  $10^{-6}$  через 60 итераций, а график справа – стабилизацию расчёта аэродинамических коэффициентов и моментов через 60 итераций. Отсутствие ошибок в исследовании и полученные результаты очень близки к экспериментальным [2-3].

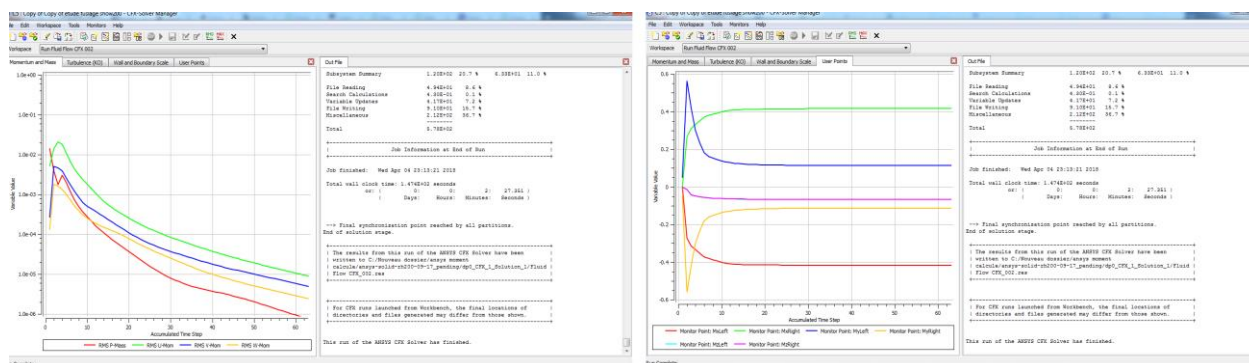


Рис. 3. График сходимости ошибок и стабилизации расчёта аэродинамических коэффициентов (ANSYS-CFX)

На рис. 4 показано изменение коэффициента момента БПЛА, когда изменяются углы отклонения элерона и углы отклонения хвостового оперения (v-образное хвостовое оперение).

График синего цвета отражает влияние отклонения элерона на изменение момента относительно центра масс БПЛА, график красного цвета отражает влияние отклонения хвостового оперения на изменение момента. Площадь влияет на значение момента: чем больше площадь, тем больше сила и момент [9]. Поэтому в результате влияние отклонения хвостового оперения в тангаже и в рыскании возникает большой момент (расстояние до центра масс велико, несмотря на небольшую площадь) [7-8].

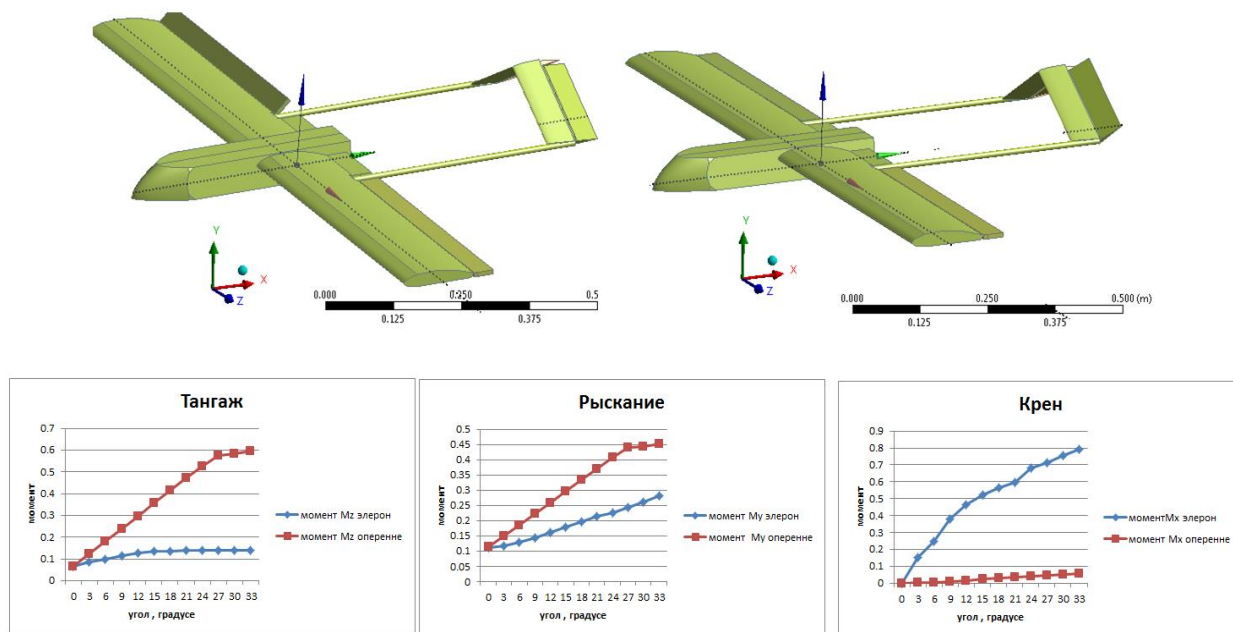


Рис. 4. Изменение коэффициентов момента БПЛА

Чтобы построить устойчивую систему управления необходимо получить линеаризовану модель аэродинамических коэффициентов [4], используя разложение данных формулы по ряду Тейлора:

$$F_z = \frac{1}{2} \rho V^2 S [C_L(\alpha) + C_{Lq} \frac{C}{2V} q + C_{L\delta e} \delta e] , \quad (1)$$

$$F_x = \frac{1}{2} \rho V^2 S [C_D(\alpha) + C_{Dq} \frac{C}{2V} q + C_{D\delta e} \delta e] , \quad (2)$$

На основе изменения аэродинамических коэффициентов (отказов) была разработана оригинальная математическая модель описания объекта управления в пространственном состоянии рис. 5 [4].

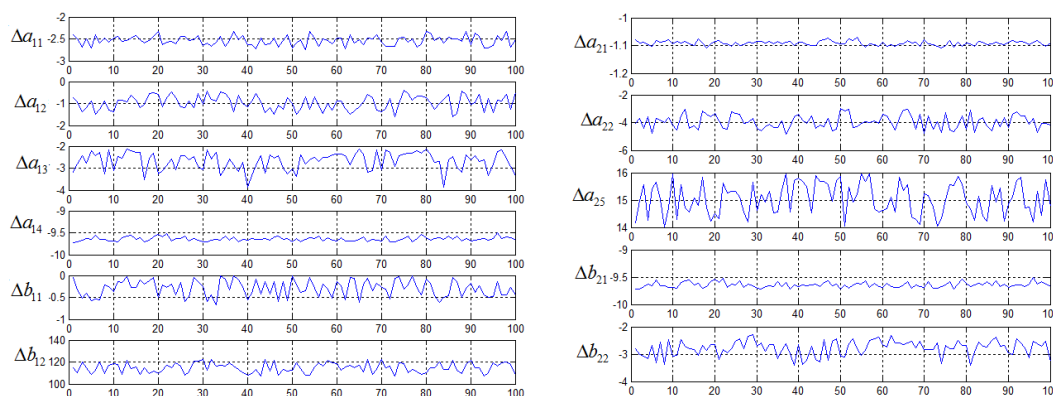


Рис. 5. Изменение диапазона аэродинамических коэффициентов матрицы ΔA

На основе минимальных и максимальных значений аэродинамических коэффициентов строятся матрицы ΔA , ΔB (с влиянием отказов) [6-7]. Благодаря данным матрицам получается неопределенная модель пространства и состояния:

$$\begin{cases} \dot{X} = (\Delta A)X + (\Delta B)U \\ Y = CX + DU \end{cases}, \quad (3)$$

$$\begin{pmatrix} V \\ v \\ v_a \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta a_{11} & \Delta a_{12} & \Delta a_{13} & \Delta a_{14} \\ \Delta a_{21} & \Delta a_{22} & \Delta a_{23} & \Delta a_{24} \\ \Delta a_{31} & \Delta a_{32} & \Delta a_{33} & \Delta a_{34} \\ \Delta a_{41} & \Delta a_{42} & \Delta a_{43} & \Delta a_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V \\ v \\ v_a \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta b_{11} & \Delta b_{12} \\ \Delta b_{21} & \Delta b_{22} \\ \Delta b_{31} & \Delta b_{23} \\ \Delta b_{41} & \Delta b_{43} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta_{x80c} \\ \delta_D \end{pmatrix}, \quad (4)$$

На рис. 6 изображено, как реагирует номинальная модель без управления продольным движением: первый график – скорость, второй график – угловая скорость, третий график – угол тангажа объекта, четвертый график – высота. При задании значений сигнала для всех графиков мы видим изменения значения и поведение сигналов на выходе.

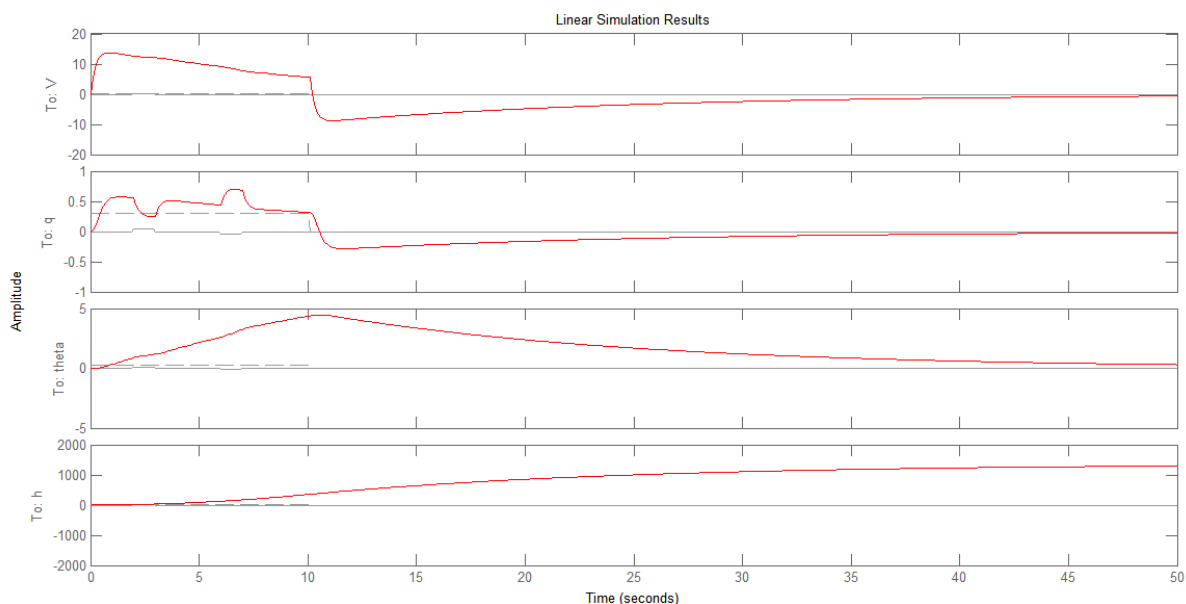


Рис. 6. Поведение номинальной модели

Структура робастного управления отображена на рис. 7. Она составлена с помощью процесса k-бесконечности (k-infinity), пространства состояний и его матриц (A.K-бесконечность, B.K-бесконечность, C.K-бесконечность, D.K-бесконечность), а также неизвестной математической моделью описания объекта в пространстве состояний.

Чтобы обновить информацию механизма управления используют данные с выхода модели БПЛА [5-6].

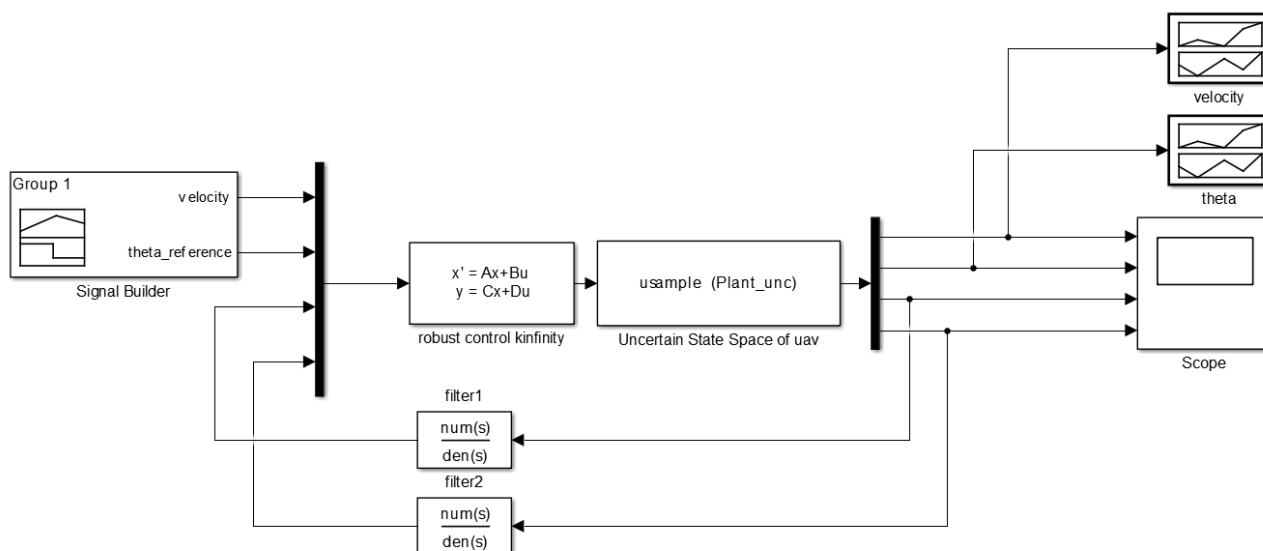


Рис. 7. Структура робастного управления

На рис. 8 отображена логарифмическая амплитудно-частотная характеристика. Она показывает частоту неопределенной модели и частоту номинальной модели, а также изменение частотного значения вокруг диапазона неизвестной модели.

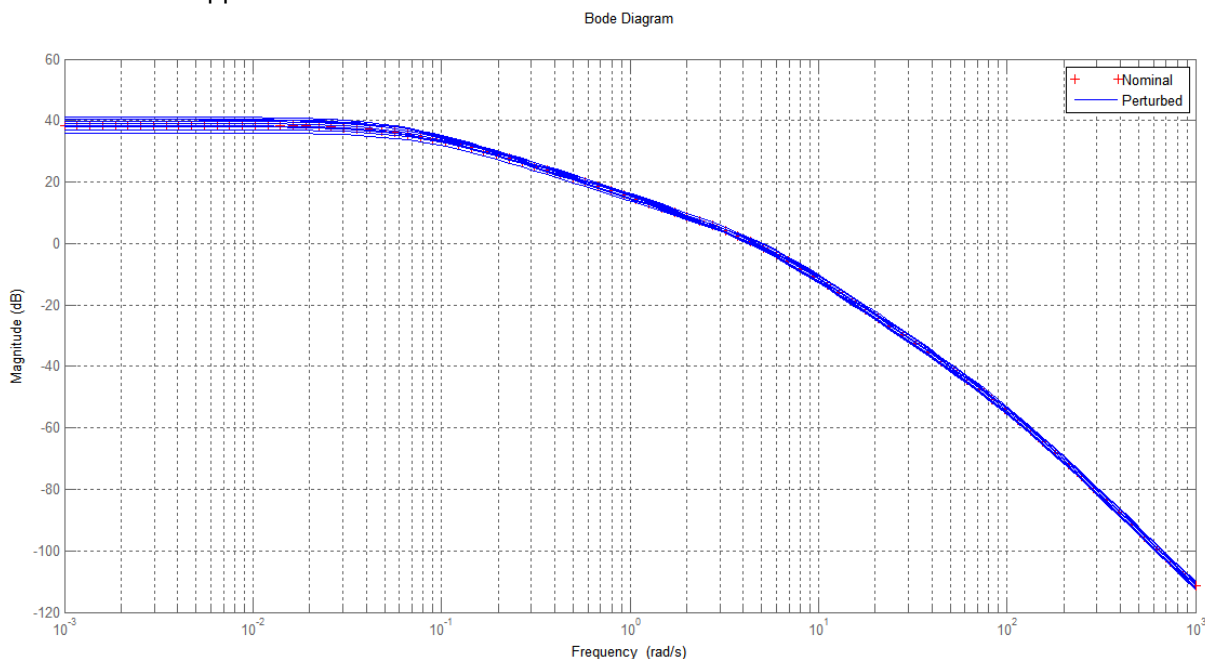


Рис. 8. Логарифмическая амплитудно-фазовая частотная характеристика номинальной и неизвестной моделей

На рис. 9 отображено робастное управление скоростью БПЛА с первым возмущением на 3-й секунде и вторым – на 3,5-й секунде. Наблюдается сравнение сигналов на входе и выходе БПЛА. Номинальное значение для скорости – 16 м/с.

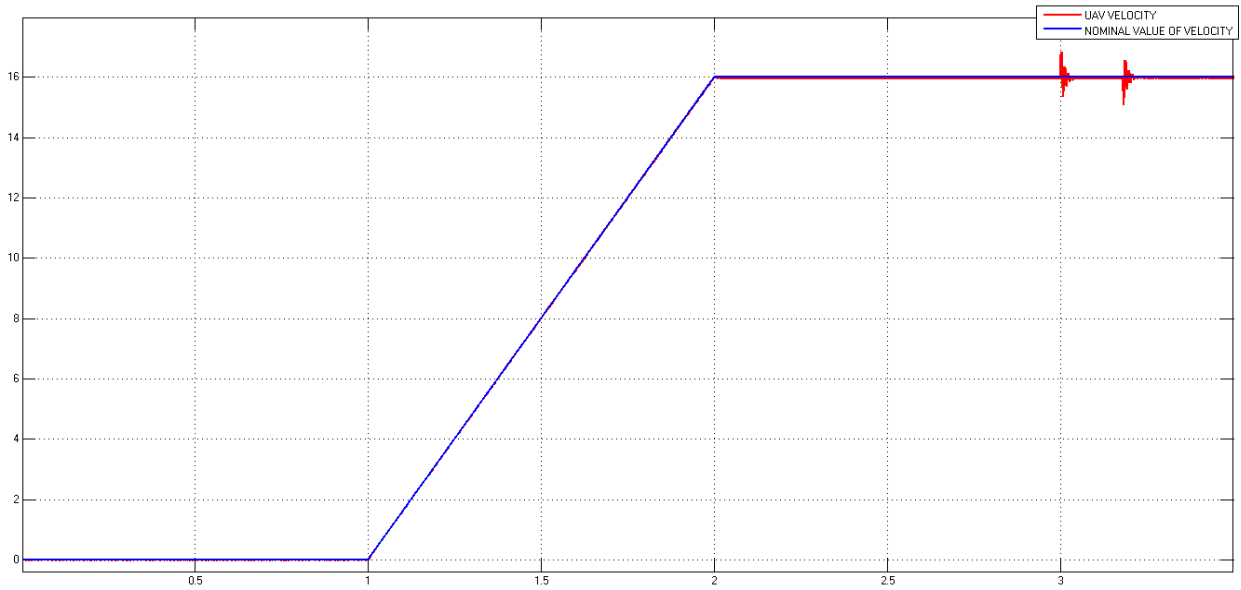


Рис. 9. Робастное управление для скорости

На рис. 10 показано поведение неопределенной модели с наличием нескольких отказов на 3-й секунде, а также отражено, как робастное управление сможет управлять скоростью при наличии ошибок и вернуть ее до номинального значения 16 м/с.

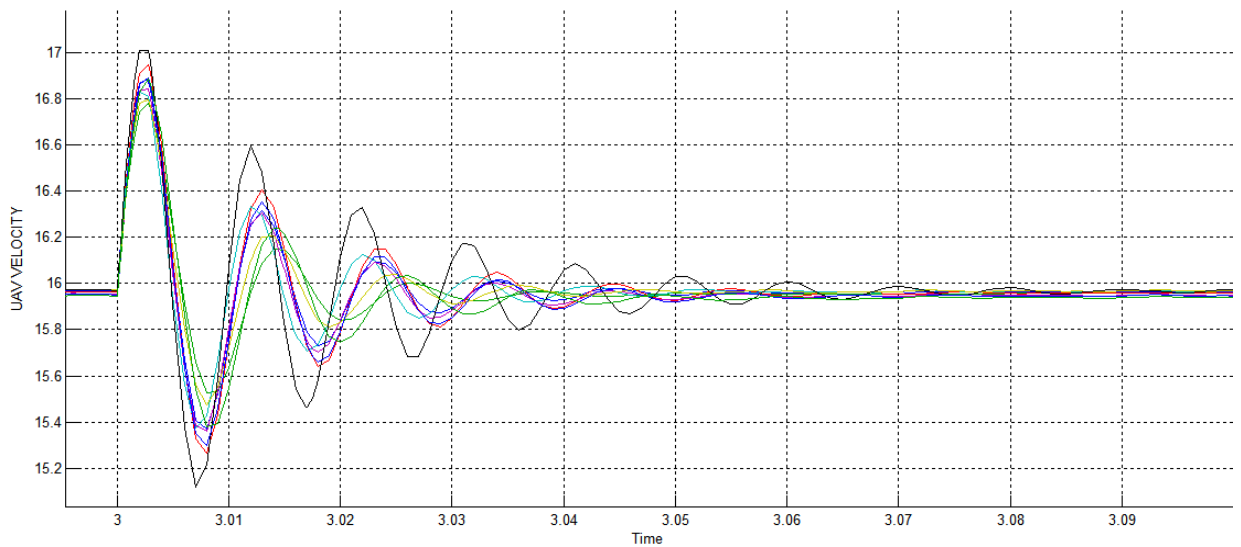


Рис. 10. Робастное управление скоростью при наличии нескольких отказов

### Выводы

1. Результаты эксперимента показывают, что предлагаемый метод является эффективным для управления продольным движением БПЛА.
2. Конструкция робастного управления с использованием методов изменения аэродинамических коэффициентов в диапазонах и исследованных интервалах является эффективной для решения проблемы управления.
3. Исследование отказов с помощью аэродинамических программных сред является эффективным с точки зрения уменьшения затрат.
4. Результаты теоретических исследований очень близки к экспериментальным данным.

### Список литературы

1. Francois bateman, hassan noura, mustapha ouladsine diagnostic et tol'erances aux d'efauts : application a un drone. – С. 6-7 .
2. Jin Tao, Wei Liang, Qing-Lin Sun, Pan-Long Tan, Shu-Zhen Luo, Zeng-Qiang Chen, Ying-Ping He, Modeling And Control Of A Powered Parafoil In Wind And Rain Environments, IEEE2017–С. 1-11.
3. Будиба, Уиссам Модели малогабаритного летательного аппарата как объекта исследования функционально устойчивого управления // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – 2017. №78. С.136-143
4. Randal w. Beard timothy w. Mclain, Small Unmanned Aircraft-Theory and Practice // Princeton University Press, Oxfordshire. – С.39-87.
5. Gu Petkov and Konstantinov, Robust Control Design with Matlab. – С.13-50.
6. Civil Aircraft Autopilot Design Using Robust Control-Searchable. – С. 29-63.
7. Aérodynamique Et Mécanique Du Vol.2, du B.I.A au C.A.E.A, Académie de Toulouse, france. – С. 6-23.
8. Oblak Blagoje, Theorie Classique De La Portance, vesion du printemps 2011. - С. 1-10.
9. Fernandez Cyril, Roman Vincent, Phenomene D'electromouillage, Universite De Nice Sophia-Antipolis, Уравнение Дюпре-Юнга. – С. 3-10.
10. Фирсов, С.Н. Обеспечение функциональной устойчивости системы стабилизации и ориентации малогабаритного автономного летящего изделия [Текст]/С.Н.Фирсов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2014. – №5. – С. 54 – 60.

Поступила в редакцию 28.09.2018



## **Робастне управління безпілотним літальним апаратом при невизначених швидкостях**

Наведено метод реалізації робастного управління за допомогою номінальної моделі безпілотного літального апарата (БПЛА). Робота класичного регулятора в нелінійній системі управління при виникненні збурюючих впливів не задовольняє заданим критеріям якості. При цьому змінюються аеродинамічні параметри, і система стає нестійкою. Для усунення небажаних відхилень у систему управління літального апарата вводиться робастне керування. Введення такого роду корекції керуючого сигналу дозволяє париувати всілякі відмови і збурення, які призводять до неконтрольованого управління.

Зміна аеродинамічних коефіцієнтів піднімальної сили, коефіцієнта опору, моментів, котрі впливають на модель об'єкта. Номінальна модель розраховується шляхом обчислення коефіцієнтів в програмному середовищі ANSYS-CFX і розрахунок підтверджується експериментально. Помилки також моделюються цим програмним забезпеченням, а діапазони зміни кожного коефіцієнта являють собою сукупність відмов.

**Ключові слова:** БПЛА, робастне управління, аеродинамічні коефіцієнти, відмова, невизначена модель, номінальна модель,  $k$ -нескінченність.

## **Robust Control of an Unmanned Aerial Vehicle at Undetermined Speeds**

This paper presents the method for implementing robust control using a nominal model of an unmanned aerial vehicle (UAV). The operation of a classical controller in a nonlinear control system in the event of disturbing influences does not satisfy the specified quality criteria. This changes the aerodynamic parameters, and the system becomes unstable. To eliminate unwanted deviations in the control system of the aircraft introduced robust control. The introduction of such a correction control signal allows you to fend off all sorts of failures and disturbances that lead to uncontrolled control.

Changes in the aerodynamic lift coefficients, coefficient of resistance, and moments affect the model of the object. The nominal model is calculated by calculating the coefficients with the ANSYS-CFX software and the calculation is confirmed experimentally. Errors are also modeled by this software, and the ranges of variation of each coefficient are a set of failures.

**Key words:** UAV, robust control, aerodynamic coefficients, failure, indefinite model, nominal model,  $k$ -infinity.

### **Сведения об авторах:**

**Будиба Уиссам** – аспирант кафедры электротехники и мехатроники, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Украина.