

ЛОБАТЫЙ А. А., БУМАЙ А. Ю., СНИТКОВ Е. В.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ СТОХАСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Белорусский национальный технический университет
г. Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Решается задача идентификации параметров и одновременного оценивания фазовых координат упрощенной математической модели плоского движения беспилотного летательного аппарата (БПЛА), заданной стохастическими уравнениями, включающими случайные функции. В качестве входного сигнала рассматривается угол отклонения руля высоты, а в качестве выходного сигнала – угол тангажа БПЛА, полученные в результате экспериментальных исследований полета БПЛА, и в результате структурной и параметрической идентификации детерминированной математической модели БПЛА. В качестве случайных функций рассматриваются уравнения формирующих фильтров, моделирующих влияние на угловую ориентацию БПЛА турбулентности атмосферы. Выполнены соответствующие преобразования математической модели, позволяющие представить векторно-матричное уравнение модели в линейной форме. Для данной математической постановки задачи обоснован выбор метода одновременного оценивания и параметрической идентификации, основанный на расширении вектора состояния и применении алгоритма калмановской фильтрации. Результаты компьютерного моделирования подтвердили обоснованность применения рассматриваемой стохастической модели и метода идентификации. Данный подход может использоваться для оценивания и идентификации более сложных стохастических математических моделей систем управления техническими объектами.

Ключевые слова: идентификация, стохастическая математическая модель, беспилотный летательный аппарат, турбулентность

Введение

Математическое моделирование сложных мехатронных технических систем с использованием достижений в области информационных технологий является основой развития технической науки. Экспериментальные исследования таких систем являются, как правило, дополнением и подтверждением результатов, полученных путем математического моделирования. Обоснование и синтез адекватных математических моделей технических систем, основанных на корректном применении законов физики – важнейшая задача, стоящая перед инженерами и исследователями.

Разработка математических моделей систем, как правило, состоит из нескольких этапов, включающих обоснование физических принципов, формы математического представления, методов решения сформулированных математических задач.

Одним из этапов математического моделирования систем является идентификация разработанной модели. Под идентификацией в широком смысле понимается получение или уточнение по экспериментальным данным модели реального объекта (процесса), выраженной в тех или иных терминах (описанной на том или ином языке) [1].

Идентификацией динамического объекта (процесса) называется определение параметров и структуры математической модели, обеспечивающих наилучшее совпадение выходных координат модели и объекта при одинаковых входных воздействиях. Задача статистической идентификации объекта управления фор-

мулируется как задача определения его оператора при наблюдении за случайными входными и выходными сигналами [2].

Задачи идентификации определяются видом моделей исследуемых объектов и условиями их наблюдений. При этом методы идентификации отличаются большим разнообразием и, как правило, разделяются по следующим признакам [1-4]: по способу представления характеристик объекта; по методу проведения эксперимента на объекте; по принятому критерию идентификации; по наличию сравнения полученного математического описания с объектом.

Среди задач идентификации одно из центральных мест занимает задача параметрической идентификации в пространстве состояний [1, 5, 6]. Задача состоит в том, чтобы на основе данных экспериментальных исследований определить значения компонент вектора параметров математической модели A_m , при котором степень близости параметров выходного сигнала реальной системы $X(t)$ и модели $X_m(t)$ соответствует заданному критерию идентификации [2].

Объектами идентификации часто являются имеющие все более широкое распространение робототехнические комплексы и системы, к которым относятся беспилотные летательные аппараты (БПЛА). Математические модели БПЛА различных классов в общем виде известны и распространены [7]. Однако различное конструктивное исполнение БПЛА требует постоянного развития и уточнения их математических моделей. Разработка математической модели конкретного БПЛА с детальным подробным описанием каждого из

его элементов требует значительных трудозатрат [8]. В то же время в некоторых случаях для решения отдельных задач исследования элементов системы управления БПЛА достаточно наличия приближенной математической модели.

Постановка задачи

В работе [9] решается задача определения формы и параметров математической модели в виде передаточной функции для движения БПЛА в вертикальной плоскости пространства. В качестве входного сигнала рассматривается угол отклонения руля высоты, а в качестве выходного сигнала – угол тангажа БПЛА. Используются результаты экспериментальных исследований полета БПЛА, в качестве которых рассматриваются известные значения входного и выходного сигналов при заданных условиях полета. На рисунке 1 представлены результаты полунатурного моделирования полета БПЛА, проведенного в Научно-производственном центре многофункциональных беспилотных комплексов Национальной академии наук Беларуси. Здесь изображены: график изменения во времени угла отклонения руля высоты $\delta(t)$ (нижний график) и график изменения во времени реакции БПЛА на $\delta(t)$ в виде изменения угла тангажа БПЛА $\vartheta(t)$ (верхний график).

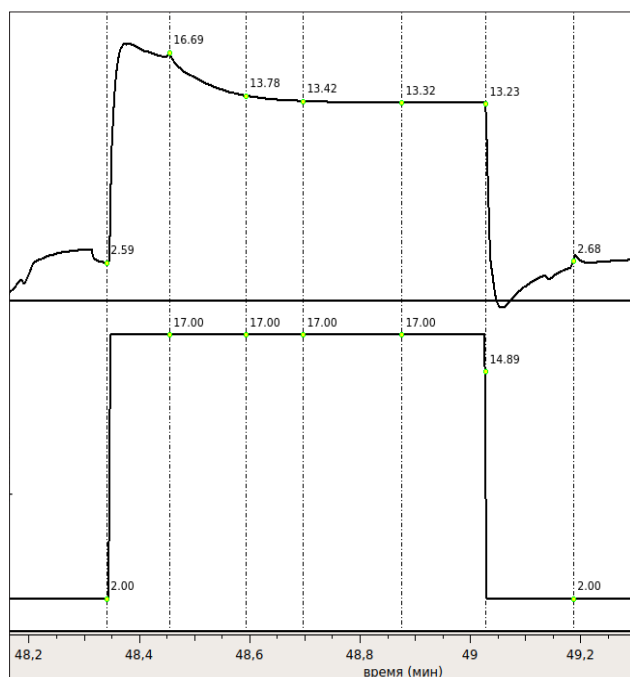


Рисунок 1. Результаты экспериментальных исследований

На рисунке 2 представлены графики изменения $\delta(t) = \delta_k(t_k)$ и $\vartheta(t) = v_k(t_k)$, полученные для упрощенной детерминированной математической модели в среде Mathcad без учета случайных факторов, для которой выполнена идентификация па-

раметров [9]. Рассматривалась модель вращательного движения БПЛА в вертикальной плоскости вида [10]:

$$\ddot{\vartheta} = \frac{m_z^{\omega} + m_z^{\dot{\alpha}}}{I_z} \dot{\vartheta} + \frac{m_z^{\alpha}}{I_z} \vartheta + \frac{m_z^{\delta}}{I_z} \delta, \quad (1)$$

где I_z – момент инерции БПЛА, и δ – угол отклонения руля высоты m_z^{ω} , $m_z^{\dot{\alpha}}$, m_z^{α} , m_z^{δ} – соответствующие аэродинамические коэффициенты.

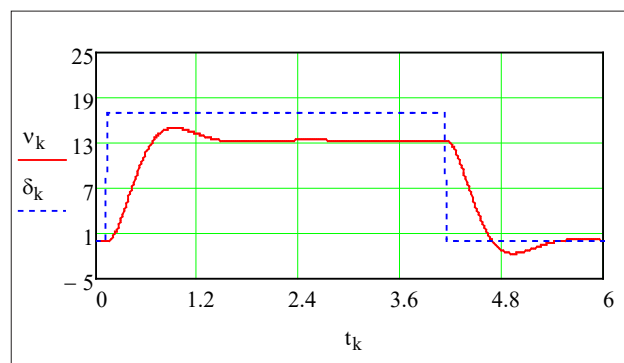


Рисунок 2. Результаты математического моделирования

На движение БПЛА в пространстве действует ряд случайных факторов, среди которых одним из основных является турбулентность атмосферы, которая для БПЛА небольших размеров, к которым относится рассматриваемый в работе [9] БПЛА типа «Бусел», имеет существенное значение.

Влияние турбулентности атмосферы на вращательное движение БПЛА, описываемое выражением (1), проявляется в виде случайного изменения угла тангажа $\vartheta = \vartheta^* + \Delta\vartheta$, где ϑ^* – значение ϑ без влияния турбулентности, $\Delta\vartheta$ – приращение угла ϑ за счет влияния турбулентности.

Турбулентность атмосферы характеризуется случайными перемещениями, которые имеют корреляционные функции для поперечного (бокового) и продольного перемещений следующего вида [7, 10]:

$$K_x(\tau) = \sigma_\tau^2 \exp(-|\tau|T^{-1}), \quad (2)$$

$$K_z(\tau) = \sigma_\tau^2 [1 - |\tau|(2T)^{-1}] \exp(-|\tau|T^{-1}). \quad (3)$$

В выражениях (2)–(3) σ_τ^2 характеризует интенсивность турбулентности; $T = LV^{-1}$ – время прохождения летательным аппаратом масштаба турбулентности L . Величина L равна высоте полета над равнинной местностью. При $\sigma_\tau^2 \leq 0.5$ м/с – слабая турбулентность, при $\sigma_\tau^2 \geq 2.5$ м/с – сильная турбулентность.

Рассмотрим влияние на модель движения БПЛА (1) продольной составляющей турбулентности, уравнения формирующего фильтра для которой имеют вид [10]:

$$x_1(t) = w(t), \quad (4)$$

$$x_2(t) = \dot{x}_1(t) = K_{\xi 1} x_1(t) + b_1 q(t), \quad (5)$$

где $K_{\xi 1} = -T^{-1}$, $b_1 = \sigma_T \sqrt{2T^{-1}}$, $q(t)$ – возбуждающий (порождающий) процесс $w(t)$ белый шум.

На рисунке 3 представлены графики изменения угла $\vartheta(t) = v_k(t_k)$ с учетом влияния турбулентности при $\sigma_T^2 = 1$ м/с и без учета турбулентности (график $\vartheta^*(t) = y_k(t_k)$).

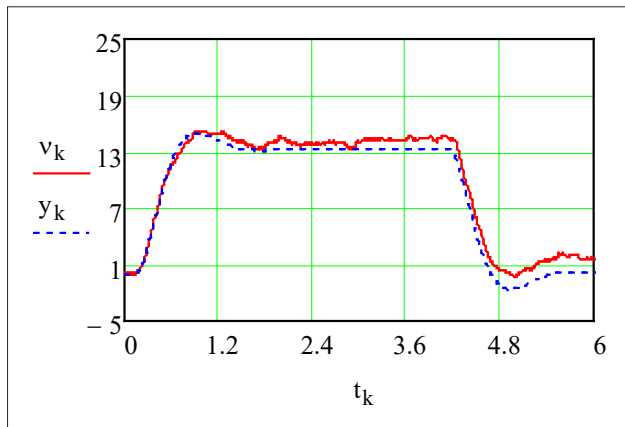


Рисунок 3. Влияние турбулентности

Идентификация стохастической модели БПЛА

Среди различных методов параметрической идентификации стохастических моделей, включающих случайные функции, рассмотрим алгоритмы идентификации, основанные на применении теории оценивания для непрерывных случайных процессов [1, 2]. В данном случае стохастический объект (процесс) описывается векторным уравнением вида:

$$\dot{X} = f(X, U, A, t) + \xi(t), \quad (6)$$

где X – вектор фазовых координат системы (переменных, характеризующих эволюцию системы), f – в общем случае векторная функция, U – вектор управлений, A – вектор параметров, $\xi(t)$ – векторный белый шум с матрицей интенсивностей G , t – текущее время (независимая переменная).

Модель вектора параметров представляет собой выражение вида:

$$\dot{A} = \xi_A(t). \quad (7)$$

Здесь $\xi_A(t)$ – белый шум, не зависящий от $\xi(t)$.

Процесс $X(t)$, представляющий собой в данной задаче $X(t) = \vartheta(t)$, измеряется датчиком аэродинамических углов, математическая модель которого имеет вид

$$Z = h(X, U, A, t) + \eta(t), \quad (8)$$

где h – векторная функция, $\eta(t)$ – белый шум интенсивности Q , не зависящий от шумов $\xi(t)$ и $\xi_A(t)$.

Введением в рассмотрение расширенного вектора состояний $X_p^T = [X^T A^T]$ совместное оценивание и идентификация проводятся на основе стохастического описания для вектора $X_p^T = X_p^T(t)$ [1, 2].

Особенностью данной постановки задачи является то, что все переменные расширенного вектора состояний X_p^T коррелированы между собой, что несколько осложняет поиск оптимального решения. В работе [11] предлагается представлять матрицу параметров $A(t)$ в виде $A^* + a$, где A^* – матрица номинальных значений коэффициентов (параметров) объекта идентификации, a – матрица малых случайных отклонений коэффициентов.

Обозначив в выражении (1) $\vartheta = y_1$, $\dot{\vartheta} = \dot{y}_1 = y_2$, запишем уравнения состояния объекта в форме Коши:

$$\dot{y}_1 = y_2, \quad y_1(t_0) = y_{10}; \quad (9)$$

$$\dot{y}_2 = A_1^* y_1 + A_2^* y_2 + m_{y1}^* A_1 + m_{y2}^* A_2 + U_1 + \xi_2, \quad y_2(t_0) = y_{20}; \quad (10)$$

$$\dot{A}_1 = 0, \quad A_1(t_0) = A_{10}; \quad (11)$$

$$\dot{A}_2 = 0, \quad A_2(t_0) = A_{20}. \quad (12)$$

В выражении (10) обозначено $U_1 = U_0 - m_{y1}^* A_1^* - m_{y2}^* A_2^*$. U_0 – детерминированное управление (зондирующий сигнал $\delta(t)$). Входящие в уравнение (10) в качестве коэффициентов математические ожидания m_{y1}^* и m_{y2}^* вычисляются путем параллельного с выражениями (9)–(12) интегрирования уравнений для номинальных значений вектора состояний:

$$\dot{m}_{y1}^* = m_{y2}^*, \quad m_{y1}^*(t_0) = 0; \quad (13)$$

$$\dot{m}_{y2}^* = A_1 m_{y1}^* + A_2 m_{y2}^* + U_0, \quad m_{y2}^*(t_0) = 0. \quad (14)$$

В данном случае наблюдается (измеряется) переменная y_2 с ошибкой ξ_2 . Математическая модель процесса наблюдения описывается выражением:

$$Z = y_2 + \eta(t), \quad (15)$$

где $\eta(t)$ – белый шум интенсивности Q .

Обоснованность допущения о применимости представления ошибки измерителя в виде белого шума основана на том, что в пределах полосы пропускания измерителя угловой скорости ($y_2 = \dot{\vartheta}$) спектральная плотность ошибки измерений принимается постоянной, что в бесконечной области изменения аргумента соответствует спектральной плотности белого шума.

Применяя теорию линейной фильтрации (фильтр Калмана–Бьюси [1, 2, 11]), составляем уравнения для оценок расширенного вектора состояний:

$$\dot{\hat{y}}_1 = \hat{y}_2 + \frac{1}{Q} R_{12} (z_2 - \hat{y}_2), \quad \hat{y}_1(t_0) = 0; \quad (16)$$

$$\dot{\hat{y}}_2 = A_1^* \hat{y}_1 + A_2^* \hat{y}_2 + m_{y1}^* \hat{A}_1 + m_{y2}^* \hat{A}_2 + U_1 + \frac{1}{Q} R_{22} (z_2 - \hat{y}_2), \quad \hat{y}_2(t_0) = 0; \quad (17)$$

$$\dot{\hat{A}}_1 = \frac{1}{Q} R_{23} (z_2 - \hat{y}_2), \quad \hat{A}_1(t_0) = A_1^*; \quad (18)$$

$$\dot{\hat{A}}_2 = \frac{1}{Q} R_{24} (z_2 - \hat{y}_2), \quad \hat{A}_2(t_0) = A_2^*. \quad (19)$$

Значения корреляционных моментов $R_{12}, R_{22}, R_{23}, R_{24}$ вычисляются путем решения уравнений Риккати, которые в матричной форме имеют вид [1, 11]:

$$\dot{R}_y = A^* R_y + R_y A^{*T} + m_y^* R_{yA} + R_{yA} m_y^{*T} - R_y C^T Q^{-1} C R_y + G, \quad R_y(t_0) = 0; \quad (20)$$

$$\dot{R}_A = -R_{yA} C^T Q^{-1} C R_{yA}, \quad R_A(t_0) = 0; \quad (21)$$

$$\dot{R}_{yA} = A^* R_{yA} + m_y^* R_A - R_y C^T Q^{-1} C R_{yA}, \quad R_{yA}(t_0) = 0. \quad (22)$$

В выражениях (20)–(22):

$$R_y = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} \\ R_{21} & R_{22} \end{bmatrix}, \quad R_A = \begin{bmatrix} R_{33} & R_{34} \\ R_{34} & R_{44} \end{bmatrix}, \quad R_{yA} = \begin{bmatrix} R_{13} & R_{14} \\ R_{23} & R_{24} \end{bmatrix}.$$

Решение уравнений (9)–(22) выполнено в среде Mathcad [12] методом Эйлера, так как другим методом решать стохастические уравнения, включающие модели некоррелированных белых шумов, недопустимо ввиду необходимости отсутствия при моделировании корреляции между моментами дискретизации по времени.

На рисунке 4 представлены графики изменения во времени оценок процессов $\hat{A}_1(t) = af1_k$ и $\hat{A}_2(t) = af2_k$ при номинальных значениях для рассматриваемого примера

$$A_1^* = \frac{m_z^\alpha}{I_z} = -22.97 \text{ 1/с}^2, \quad A_2^* = \frac{m_z^\omega + m_z^\alpha}{I_z} = -5.352 \text{ 1/с}.$$

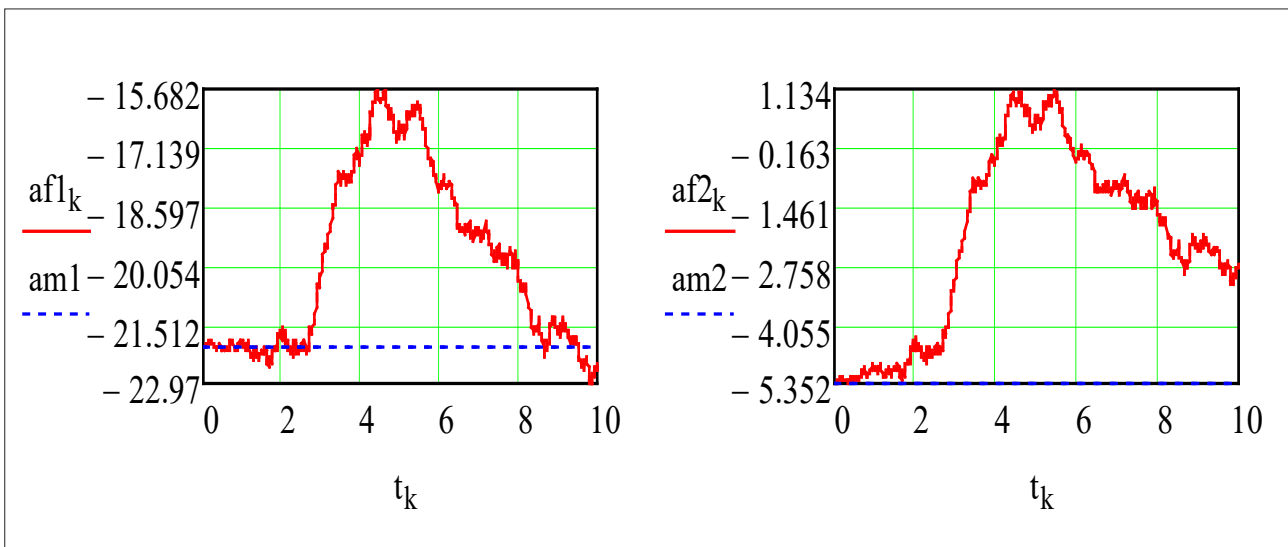


Рисунок 4. Процессы в $\hat{A}_1(t) = af1_k$ и $\hat{A}_2(t) = af2_k$

Как видно на рисунке 4, существенные отклонения оценок параметров математической модели от номинальных значений наблюдаются в течение времени действия внешнего управляющего воздействия (рис. 1) с инерционностью, характерной для данной системы. При этом характер изменения процессов и схож, так как оба этих процесса зависят от ошибок одного и того же измерителя Z_2 , что следует из формул (18) и (19).

Заключение

Результаты компьютерного моделирования показали работоспособность методики параметрической идентификации, упрощенной стохастической математической модели вращательного движения БПЛА в вертикальной плоскости, представленной в пространстве состояний в форме Коши при математической модели измерителя в классической форме

с аддитивной ошибкой в виде белого шума. Следует заметить, что применение такого метода параметрической идентификации с одновременным оцениванием вектора состояния на основе фильтра Калмана применимо лишь для ограниченного круга прикладных задач. Применение такого подхода требует линеаризации нелинейных моделей, расширения вектора состояния путем введения дополнительных формирующих фильтров, составления и интегрирования большого числа дифференциальных уравнений для определения взаимных корреляционных моментов элементов расширенного вектора состояний. В то же время при проведении исследований разрабатываемой системы на этапе предварительного проектирования такой подход может предоставить возможность исследователю выявить отдельные свойства динамической системы и обосновать необходимые допущения, позволяющие упростить некоторые задачи анализа и синтеза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник по теории автоматического управления / А. Г. Александров, В. М. Артемьев, В. Н. Афанасьев [и др.] ; под ред. А. А. Красовского. М. : Наука, 1987. 711 с.
2. Методы классической и современной теории автоматического управления : в 5 т. / под ред. К. А. Пупкова, Н. Д. Егупова. Изд. 2-е, перераб. и доп. Т. 2 : Статистическая динамика и идентификация систем автоматического управления. М. : Изд-во МГТУ, 2004. 638 с.
3. Цыпкин, Я. З. Информационная теория идентификации / Я. З. Цыпкин. М. : Наука, 1995. 336 с.
4. Методы идентификации нечетких и стохастических систем / С. В. Соколов, С. М. Ковалев, П. А. Кучеренко, Ю. А. Смирнов. М. : Физматлит, 2018. 427 с.
5. Лобатый, А. А. Параметрическая идентификация стохастической системы неградиентным случайным поиском / А. А. Лобатый, В. Ю. Степанов // Наука и техника. 2017. Т. 16, № 3. С. 256–261. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-3-256-261.
6. Абуфанас, А. С. Поисковый алгоритм параметрической идентификации электропривода системы мониторинга / А. С. Абуфанас, А. А. Лобатый, А. Г. Шведко // Системный анализ и прикладная информатика, 2017. № 2. С. 39–45. DOI: 10.21122/2309-4923-2017-2-39-46.
7. Моисеев, В. С. Прикладная теория управления беспилотными летательными аппаратами / В. С. Моисеев. Казань : Респ. центр мониторинга качества образования, 2013. 768 с.
8. Яцына, Ю. Ф. Компьютерное моделирование контура управления беспилотного авиационного комплекса для обеспечения устойчивости и управляемости / Ю. Ф. Яцына, Ю. В. Гриднев // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. 2018. Т. 63, № 3. С. 368–380. DOI: 10.29235/1561-8358-2018-63-3-368-380.
9. Идентификация упрощенной математической модели беспилотного летательного аппарата / А. А. Лобатый, Ю. Ф. Яцына, С. С. Прохорович, Е. А. Хвितко // Системный анализ и прикладная информатика. 2020. № 2. С. 26–33. DOI: 10.21122/2309-4923-2020-2-26-33.
10. Дмитриевский, А. А. Внешняя баллистика / А. А. Дмитриевский, Л. Н. Лысенко. Изд. 4-е, перераб. и доп. М. : Машиностроение, 2005. 608 с.
11. Казаков, И. Е. Статистическая теория систем управления в пространстве состояний / И. Е. Казаков. М. : Наука, 1975. 432 с.
12. Кирьянов, Д. В. Mathcad 15 / Mathcad Prime 1.0. / Д. В. Кирьянов. СПб. БХВ-Петербург, 2012. 428 с.

REFERENCES

1. Handbook of Automatic Control Theory. A.G. Alexandrov, V.M. Artemyev, V.N. Afanasyev, [et al.]; edited by A.A. Krasovsky. Moscow: Nauka; 1987. 712 p. (in Russian).
2. Methods of classical and modern theory of automatic control : in 5 volumes. Edited by K.A. Pupkov, N.D. Egupov. 2nd ed., revised and enlarged. Volume 2 : Statistical dynamics and identification of automatic control systems. Moscow: Izdatel'stvo MGTU; 2004. 638 p. (in Russian).
3. Tsyypkin Y.Z. Information theory of identification. Moscow: Nauka; 1995. 336 p. (in Russian).
4. Sokolov S.V., Kovalev S.M., Kucherenko P.A., Smirnov Y.A. Methods of identification of fuzzy and stochastic systems. Moscow: Fizmatlit; 2018. 427 p. (in Russian).
5. Lobaty A.A., Stepanov V.Y. Parametric identification of a stochastic system by non-gradient random searching. Science and Technique. 2017;16(3):256–261. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-3-256-261> (in Russian).
6. Abufanas A.S., Lobaty A.A., Shvedko A.G. Search algorithm for the parametric identification of the electric drive of the monitoring system. Systems analysis and applied information science. 2017;2:39–45. <https://doi.org/10.21122/2309-4923-2017-2-39-46> (in Russian).
7. Moiseev V.S. Applied Theory of Unmanned Aerial Vehicle Control. Kazan: Respublikanskiy tsentr monitoringa kachestva obrazovaniya; 2013. 768 p. (in Russian).
8. Yatsyna Y.F., Gridnev Y.V. Computer simulation of control contour of unmanned aviation complex to provide robustness and controllability. Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, Physical–Technical Series. 2018;63(3):368–380. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-3-368-380> (in Russian).
9. Lobaty A.A., Yatsyna Y.F., Prohorovith S.S., Khvitko Y.A. Identification of a simplified mathematical model of an unmanned aerial vehicle. Systems analysis and applied information science. 2020;2:26–33. <https://doi.org/10.21122/2309-4923-2020-2-26-33> (in Russian).
10. Dmitrievsky A.A., Lysenko L.N. External ballistics. 4th ed., revised and enlarged. Moscow: Mashinostroenie; 2005. 608 p. (in Russian).
11. Kazakov I.E. Statistical theory of control systems in state space. Moscow: Nauka; 1975. 432 p. (in Russian).
12. Kiryanov D.V. Mathcad 15 / Mathcad Prime 1.0. St. Petersburg: BHV-Petersburg; 2012. 428 p. (in Russian).

IDENTIFICATION OF A STOCHASTIC MODEL OF AN UNMANNED AERIAL VEHICLE

Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The problem of identifying parameters and simultaneously estimating phase coordinates of a simplified mathematical model of the planar motion of an unmanned aerial vehicle (UAV), defined by stochastic equations including random functions, is solved. The input signal is the elevator deflection angle, and the output signal is the UAV pitch angle, obtained as a result of experimental studies of the UAV flight, and as a result of the structural and parametric identification of the deterministic mathematical model of the UAV. The equations of shaping filters that model the influence of atmospheric turbulence on the angular orientation of the UAV are considered as random functions. The corresponding transformations of the mathematical model are performed, allowing the vector-matrix equation of the model to be represented in linear form. For this mathematical formulation of the problem, the choice of a method of simultaneous estimation and parametric identification based on state vector expansion and the application of the Kalman filtering algorithm is justified. The results of computer modeling confirmed the validity of the application of the considered stochastic model and identification method. This approach can be used to estimate and identify more complex stochastic mathematical models of control systems for technical objects.

Keywords: identification, stochastic mathematical model, unmanned aerial vehicle, turbulence



Лобатый Александр Александрович

Белорусский национальный технический университет (БНТУ), г. Минск, Республика Беларусь. Доктор технических наук, профессор. Профессор кафедры «Робототехнические системы» БНТУ. Проводит исследования в области анализа и синтеза систем управления, в том числе – беспилотными летательными аппаратами. Автор и соавтор научных статей, книг и учебных пособий.

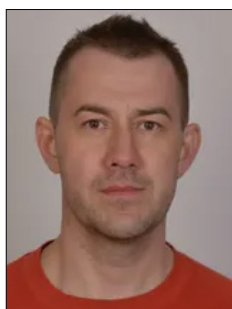
Alexander A. Lobaty

Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus.

Doctor of Science (Engineering), Professor. Professor of the Department of Robotic systems at the Belarusian National Technical University. Conducts research in the field of analysis and synthesis of control systems, including those of unmanned aerial vehicles. Author and co-author of scientific articles, books, and textbooks.

Тел: +375 (29) 346-82-56.

E-mail: lobaty@bntu.by



Бумай Андрей Юрьевич

Белорусский национальный технический университет (БНТУ), г. Минск, Республика Беларусь. Старший преподаватель кафедры «Информационные системы и технологии» БНТУ. Проводит исследования в области анализа и синтеза стохастических систем управления применительно к беспилотным летательным аппаратам.

A. Y. Bumai

Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus.

Senior lecturer in the Department of Information systems and technologies at the Belarusian National Technical University. Conducts research in the analysis and synthesis of stochastic control systems applicable to unmanned aerial vehicles.

E-mail: abumaj@bntu.by



Снитков Евгений Валерьевич

Белорусский национальный технический университет (БНТУ), г. Минск, Республика Беларусь. Соискатель кафедры «Робототехнические системы» БНТУ. Проводит исследования в области анализа и синтеза стохастических систем управления применительно к беспилотным летательным аппаратам.

E. V. Snitkov

Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus.

Applicant of the Department of Robotic systems at the Belarusian National Technical University. Conducts research in the analysis and synthesis of stochastic control systems applicable to unmanned aerial vehicles.

E-mail: abumaj@bntu.by