

ДИНАМИКА, БАЛЛИСТИКА, УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ / DYNAMICS, BALLISTICS, AIRCRAFT MOVEMENT CONTROL

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.152.7>

РАЗРАБОТКА АДАПТИВНОГО АЛГОРИТМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОДОЛЬНОГО РЕЖИМА ПОЛЕТА ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Научная статья

Ермилов А.С.^{1,*}, Салтыкова О.А.²

¹ ORCID : 0009-0007-4549-172X;

² ORCID : 0000-0002-3880-6662;

^{1,2} Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, Москва, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (eemilov-sasha[at]yandex.ru)

Аннотация

Цель исследования – сформировать адаптивный алгоритм определения характеристик продольного режима полета летательных аппаратов. Методы исследования: методы концепции автоматического управления; методы математического моделирования; численные методы оптимальных решений; методы оценки скорости рулевого привода у стабилизатора летательных аппаратов, параметрических характеристик и ограничений; метод наименьших квадратов.

В статье приведена постановка задачи адаптивного управления продольным режимом полета летательных аппаратов. Отражены результаты формирования адаптивного алгоритма определения характеристик продольного режима полета летательных аппаратов. Оценена работоспособность авторского адаптивного алгоритма управления продольным режимом полета летательных аппаратов. Основные выводы исследования: было обосновано, что с адаптивным управлением продольным режимом полета летательных аппаратов можно уменьшить скорость стабилизатора летательных аппаратов, обеспечить их устойчивость при влиянии возмущений, обусловленных существенным сокращением уровня результативности стабилизатора. По сравнению с классическими алгоритмами управления продольным режимом полета БПЛА практическое использование адаптивного алгоритма определения параметрических характеристик продольного режима полета, учитывая многорежимность объектов исследования при весовом разбросе неустойчивости $\pm 2,6\%$, способствует обеспечению значительного запаса устойчивости по малой и большой амплитуде; уменьшению скорости стабилизатора летательных аппаратов в два раза; обеспечению стабильности и управляемости БПЛА при влиянии параметрических характеристик – возмущений, которые определяются скачкообразными изменениями и потенциальным сокращением результативности работы стабилизатора летательных аппаратов. При сравнении режима работы БПЛА без и с адаптивным алгоритмом определения характеристик продольного режима полета было отмечено, что при практическом применении авторского алгоритма комплекс корней и астатический корень находятся рядом с уровнями модели эталона с учётом весовых разбросов.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат (БПЛА), адаптивный алгоритм, продольный режим полета, уровень результативности, параметрические характеристики, работоспособность.

DEVELOPMENT OF AN ADAPTIVE ALGORITHM FOR DETERMINING THE CHARACTERISTICS OF THE LONGITUDINAL FLIGHT MODE OF AIRCRAFT

Research article

Ermilov A.S.^{1,*}, Saltykova O.A.²

¹ ORCID : 0009-0007-4549-172X;

² ORCID : 0000-0002-3880-6662;

^{1,2} Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, Moscow, Russian Federation

* Corresponding author (eemilov-sasha[at]yandex.ru)

Abstract

The aim of the study is to form an adaptive algorithm for determining the characteristics of the longitudinal flight mode of aircraft. Research methods: methods of the concept of automatic control; methods of mathematical modelling; numerical methods of optimal solutions; methods of estimating the speed of the steering drive at the aircraft stabilizer, parametric characteristics and constraints; least squares method.

The article presents the formulation of the problem of adaptive control of longitudinal mode of aircraft flight. The results of the formation of an adaptive algorithm for determining the characteristics of the longitudinal mode of flight of aircraft are reflected. The performance of the author's adaptive algorithm for controlling the longitudinal mode of aircraft flight has been evaluated. The main conclusions of the research: it was substantiated that with adaptive control of longitudinal mode of aircraft flight it is possible to reduce the speed of aircraft stabilizer, to ensure their stability under the influence of disturbances caused by a significant reduction in the level of stabilizer performance. In comparison with classical algorithms for controlling the longitudinal flight mode of UAVs, the practical use of the adaptive algorithm for determining the parametric characteristics of the longitudinal flight mode, taking into account the multimode of the study objects at the weight variation of instability $\pm 2.6\%$, contributes to ensuring a significant margin of stability in small and large amplitude; reducing the speed of the aircraft stabilizer by half; ensuring the stability and controllability of UAVs under the influence of parametric characteristics – perturbations of the longitudinal flight mode. When comparing the UAV operation mode without and with the adaptive

algorithm for determining the characteristics of the longitudinal flight mode, it was noted that in the practical application of the author's algorithm, the root complex and astatic root are near the levels of the reference model, taking into account the weight differences.

Keywords: unmanned aerial vehicle (UAV), adaptive algorithm, longitudinal flight mode, performance level, parametric characteristics, performance capability.

Введение

Обеспечение управляемости БПЛА с учётом погрешности параметрической оценки выступает актуальной проблемой интеграции автоматизированных систем, существующих на современном этапе. Такой процесс осуществляется, учитывая весовой разброс, неточность данных параметрических характеристик продольного режима работы БПЛА. Для того чтобы компенсировать весовой разброс посредством классических положений формирования системы управляемости БПЛА с цифровой надстройкой контура управления, нужно применять коэффициенты, отражающие обратные и прямые взаимосвязи составляющих. В данном случае это способствует сокращению резерва устойчивости БПЛА в ходе их движения, а также колебаний инженерно-технической конструкции, увеличению скорости отклонений управленческих компонентов.

В целях решения обозначенной проблемы целесообразно применить на практике адаптивный алгоритм определения параметрических характеристик продольного режима работы БПЛА. Они не предполагают наличие полного объёма информации о системе управления при начальных изменениях и условиях функционирования БПЛА. Это реализуется при помощи подстраивания параметрических системных характеристик на базе информационных данных, которые собираются в ходе совершения полета.

Цель исследования – сформировать адаптивный алгоритм определения характеристик продольного режима работы летательных аппаратов.

Задачи исследования:

1. Осуществить постановку задачи адаптивного управления продольным режимом полета летательных аппаратов.
2. Представить результаты формирования адаптивного алгоритма определения характеристик продольного режима работы летательных аппаратов.
3. Отобразить результаты сравнительного анализа и изучения работоспособности адаптивного алгоритма определения характеристик продольного режима работы летательных аппаратов.

Объект исследования – БПЛА.

Предмет исследования – управление продольным режимом работы летательных аппаратов на примере БПЛА.

Научная новизна исследования:

1. Осуществлена постановка задачи адаптивного управления продольным режимом полета летательных аппаратов с формированием структуры адаптивного управления, сочетающей применение априорных данных и текущих результатов выявления параметрических характеристик БПЛА.

2. Создан адаптивный алгоритм определения характеристик продольного режима полета летательных аппаратов, способствующий стабилизации корней полиномиальной модели на фоне модификации рекурсивной концепции метода наименьших квадратов.

Практическая значимость данного исследования состоит в том, что приведенный адаптивный алгоритм определения параметрических характеристик продольного режима работы летательных аппаратов может быть применен для совершенствования процедур текущей идентификации параметрических характеристик продольного режима работы БПЛА различных моделей.

Обзор литературных источников

К управлению высотой и скоростью БПЛА в академическом сообществе представлен общепринятый подход, который подразумевает, что высота и скорость как характеристики продольного режима управления БПЛА разделены. При использовании контроллеров высота БПЛА управляется рулём, а скорость – тяговым стабилизатором.

Одной из актуальных задач в национальной гражданской авиации выступает оптимизация управления высотой и скоростью БПЛА, что отмечено различными авторами [18], [19], [20]. В контексте модели интегрированного управления полетом БПЛА достаточно сложным является обеспечение согласованности характеристик функционирующей системы БПЛА с учётом имеющихся силовых установок [21]. Для того чтобы в полной мере применить технический потенциал БПЛА, нужно скоординировать управленческие действия, что предполагает разработку алгоритма, который предусматривает скоординированное обеспечение всех систем управления режимом полета БПЛА [22].

Во второй половине предыдущего столетия возник подход к управлению полетом БПЛА, базирующийся на манипулировании кинетической и потенциальной энергией. Ключевые концептуальные положения подобного алгоритма приведены в работах [1], [2]. Данный подход позволил сформировать стратегию обеспечения продольного режима полета БПЛА [1].

На базе подхода к управлению полетом БПЛА, основанного на манипулировании кинетической и потенциальной энергией, были протестированы контроллеры на примере разных типов БПЛА в сфере управления полетом [9], навигации полета [10].

В ходе исследования процессов управления и эффективности систем полета БПЛА различными авторами были созданы математические модели. Так, в статье В.А. Федулова, Н.В. Быкова, В.Д. Баскакова представлена математическая модель, позволяющая оценить эффективность системы, поражающие вражеские БПЛА. Математическая модель была сформирована на основе принципов имитационного моделирования [11].

В статье [12] были рассмотрены положения по решению динамических задач управления БПЛА, посредством которых была создана математическая модель. Кроме того, представлена характеристика движения БПЛА в различных

направлениях и плоскостях. Авторы совершили попытку получения полной математической модели движения БПЛА с включением системы дифференциальных уравнений.

Поскольку полная математическая модель движения БПЛА крайне трудная в практической реализации, целесообразно её упростить при помощи концептуальных моделей управления режимом полета БПЛА, приведенных в монографиях [13], [14].

В статье А.В. Рысина, В.Н. Бойкачёва, Я.Б. Островского представлены принципы преобразования линейных систем управления БПЛА к форме в соответствии с каноническим подходом [15]. Научно-исследовательская работа К.В. Егоровой отражает описание задач управления полетами БПЛА, а также методы повышения эффективности управления полетами БПЛА на основе терминальной концепции [16].

Научное исследование, проведенное А.А. Воеводой, Ю.П. Филлюшовым, В.Ю. Филлюшовым, ориентировано на практическое осуществление современных программно-аппаратных средств с целью имплементации алгоритма управления траекторией движения БПЛА. Авторы применили современные вычислительные пакеты и прикладное обеспечение для формирования оптимальной траектории полета БПЛА [17].

Возможность разработки смешанного адаптивного подхода к управлению продольным режимом полета БПЛА была высказана в исследовании [4]. Тем не менее, результатов экспериментальных исследований в сфере формирования адаптивного алгоритма определения параметрических характеристик продольного режима полета БПЛА крайне мало, что подтверждается выводами в работе [8].

Постановка задачи адаптивного управления продольным режимом полета летательных аппаратов

Математическое моделирование продольного режима работы БПЛА осуществляется при помощи уравнения движения, которое может учитывать ключевые факторы управления летательными аппаратами. Интеграция адаптивного алгоритма была обусловлена практическим применением концепции продольного режима работы БПЛА, которая позволяет учесть нелинейность параметрических характеристик. Воздействие возмущений ветра описывалось на базе гипотезы о постепенном охвате ветром БПЛА. Посредством введенного коэффициента $S_{кр}$ учитывалось влияние на вращение БПЛА по крену при малых углах.

На рисунке 1 проиллюстрирована схема задачи адаптивного управления продольным режимом работы летательных аппаратов.

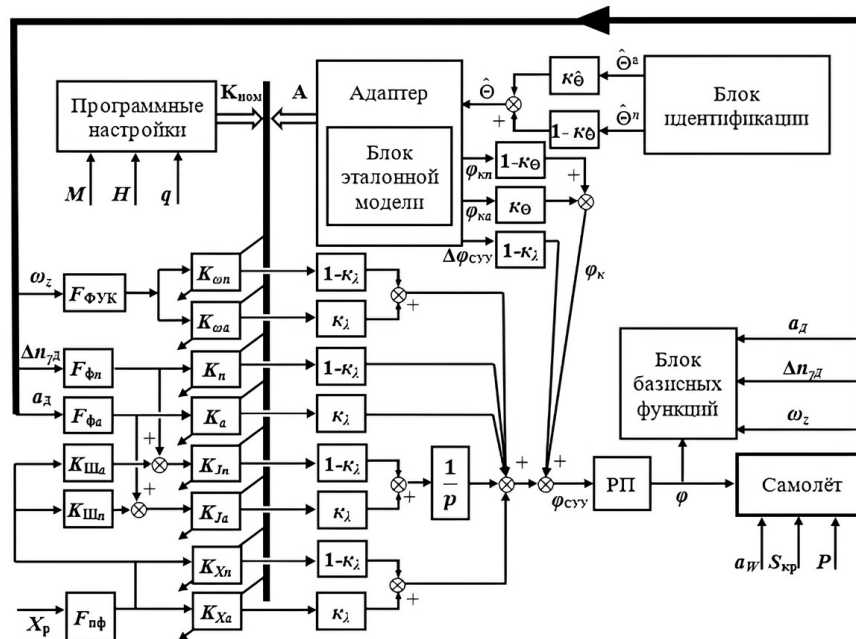


Рисунок 1 - Схема задачи адаптивного управления продольным режимом полета летательных аппаратов

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.152.7.1>

По сравнению с классическими системами управления продольным режимом работы БПЛА адаптивный алгоритм подразумевает работу адаптера (элемент адаптации системы), определение параметрических характеристик продольного режима работы БПЛА. Исходя из оценки параметрических характеристик продольного режима работы БПЛА, элемент адаптации системы выявляет корректировки коэффициентов, адаптирующих систему, с помощью которых обеспечивается эталон математической модели. Передаточные показатели (при общем обозначении K) представляют собой совокупность номинальных уровней цифровых надстроек, корректировки коэффициентов, адаптирующих систему.

Информационная база научного исследования – данные результатов трубных продувок БПЛА, параметрические инерционные характеристики продольного режима работы.

Формирование адаптивного алгоритма определения характеристик продольного режима работы летательных аппаратов

Авторский адаптивный алгоритм определения характеристик продольного режима полета летательных аппаратов включает в себя совокупность стадий:

1. Анализ имеющихся способов адаптации управленческой системы при использовании продольного режима полета БПЛА на основе существующих академических работ [1], [2], [3], [4], [5] и др.

Наиболее результативным может быть беспойсковый способ адаптации управленческой системы при использовании продольного режима полета БПЛА.

2. Определение текущей динамики БПЛА в рамках адаптивного алгоритма.

3. Приближение текущей динамики БПЛА к модели эталона продольного режима полета.

Модель эталона можно рассматривать в качестве звена III порядка, о чём свидетельствует формула (1):

$$W_{\Xi}(p) = \frac{\omega_0^2 * (p + p_N)}{(p + p_1) * (p^2 + 2\varepsilon\omega_0 p + \omega_0^2)} \quad (1)$$

Приведенный эталон соответствует передаточной модели БПЛА как замкнутой системы с адаптивным управлением продольным режимом полета, не учитывая силу тяжести фильтров и стабилизатора БПЛА. Для того чтобы динамическое изменение эталонной модели соответствовало колебаниям, нужно компенсировать коэффициент p_1 , обозначающий аperiодический корень, который определяется астатизмом адаптивного управления, нулевым значением общего знаменателя p . Параметрические характеристики модели эталона отобраны таким образом, что значения ε и ω_0 положительные, но не более 4 баллов.

4. Проведение сравнительного анализа двух методических подходов к формированию адаптивного алгоритма определения характеристик продольного режима полета летательных аппаратов.

Первый методический подход к формированию адаптивного алгоритма определения характеристик продольного режима полета летательных аппаратов базируется на устойчивости уровней коэффициентов, входящих в замкнутую систему математических уравнений, исходя из модели эталона. Приведенное утверждение обозначено в формулах (2), (3):

$$D_{\Xi}(p) = p^3 + p^2 \widetilde{b}_2 + p \widetilde{b}_2 + \widetilde{b}_0 \quad (2)$$

$$D(p) = p^n + p^{n-1} \widetilde{c}_{n-1} + \dots + p^3 \check{c}_3 + p^2 \check{c}_2 + p \check{c}_1 + \check{c}_0 \quad (3)$$

По причине фильтрации обратных взаимосвязей $D(p)$ обладает наиболее высоким порядком по сравнению с $D_{\Xi}(p)$. Присутствует ограничение по количеству параметрических характеристик продольного режима работы БПЛА. Соответственно, целесообразно поддерживать адаптивный алгоритм согласно модели эталона. Для того чтобы это сделать, характеристика $D(p)$ была приведена к виду, обозначенному в формуле (4):

$$D(p) = \left[\frac{1}{\check{c}_3} p^n + p^{n-1} \frac{\widetilde{c}_{n-1}}{\check{c}_3} + \dots + p^3 + p^2 \frac{\check{c}_2}{\check{c}_3} + p \frac{\check{c}_1}{\check{c}_3} + \frac{\check{c}_0}{\check{c}_3} \right] * \check{c}_3 \quad (4)$$

Затем целесообразно приравнять параметры полинома в формуле (4) к параметрическим характеристикам, выделенным в формуле (2). Тогда формируется система математических уравнений. Её решение – корректировки адаптивной системы продольного режима полета БПЛА.

Второй методический подход к формированию адаптивного алгоритма определения характеристик продольного режима полета летательных аппаратов базируется на достижении устойчивости изменения доминирующих характеристик $D(p)$: комплексно-сопряженной пары коэффициентов и параметра p_1 . Тогда выражение $D(p)$ нужно преобразовать таким образом, чтобы каждому передаточному коэффициенту соответствовала полиномиальная функция. Например, это приведено в формуле (5):

$$D(p) = D_0(p) + K_3 D_{\Xi}(p) + K_{Oc} D_{Oc}(p) + K_J D_J(p) \quad (5)$$

Если известны значения $D_{\Xi}(p)$, p_{s1} , p_{s2} , формируется система математических уравнений. Её решение – корректировки адаптивной системы продольного режима полета БПЛА. Это обозначено в формуле (6):

$$\begin{cases} D(p_{s1}) = 0 \\ RE [D(p_{s2})] = 0 \\ IM [D(p_{s2})] = 0 \end{cases} \quad (6)$$

При этом корректировка адаптивной системы продольного режима полета БПЛА $A_{Xa(n)}$ определяется так, чтобы соблюдалось равенство $p_N = p_1$. Формула (7) непосредственного вычисления приведена ниже:

$$A_{Xa(n)} = \frac{A_{Ja(n)} K_{IIIa(n)}}{p_1} \quad (7)$$

Второй методический подход к формированию адаптивного алгоритма определения характеристик продольного режима полета летательных аппаратов является основным в проведении научного исследования, поскольку по сравнению с первым рассмотренным методическим подходом обеспечивается устойчивость доминирующих коэффициентов согласно заданным числам. Кроме того, объединение адаптивного алгоритма с автоматизированной системой показало, что второй методический подход к формированию адаптивного алгоритма определения характеристик продольного режима полета летательных аппаратов наиболее эффективен.

5. Оценка параметрических характеристик продольного режима полета БПЛА.

Решение подобной задачи лежит в основе осуществления текущей идентификации параметрических характеристик. Анализ нескольких научно-исследовательских трудов [4], [6], [8], [9] показал, что значительный интерес для отечественных и зарубежных исследователей представляет методический подход к идентификации параметрических характеристик на базе рекурсивной (нестандартной) методологии наименьших квадратов (далее – МНК). Использование подобной нестандартной методологии способствует практической реализации идентификации параметрических характеристик, задействованных в управленческой системе продольного режима работы БПЛА. В данном случае отсутствуют ограничения на стабилизацию БПЛА. Кроме того, этот методический подход не включает операции трансформации матричной структуры вычислений, здесь достаточно только одного комплекса количественных измерений текущего состояния адаптивного управления продольным режимом полета БПЛА. Тем не менее, нужно решить матричную систему уравнений.

В процессе реализации научного исследования был использован методический подход, в рамках которого упрощена рекурсивная концепция МНК, однако все параметрические характеристики структурно соответствуют между собой. В авторском методическом подходе к анализу текущей идентификации использована концепция линейного моделирования с насыщением двух характеристик: $f(\epsilon)$ и λ .

Следовательно, изменения параметрических характеристик адаптивной системы управления продольным режимом работы БПЛА определяются в рамках формулы (8):

$$\check{Q}_i = \lambda x_i \check{Q}_{ист i}^2 f(\epsilon), i \in (1, N) \quad (8)$$

где λ – характеристика, вычисляемая по формуле (9):

$$\lambda = \frac{k_0 y_0}{1 + y_0 \sum_{i=1}^N (|\check{Q}_{ист i} * x_i|)} \quad (9)$$

$f(\epsilon)$ – характеристика, вычисляемая по формуле (10):

$$f(\epsilon) = \begin{cases} \frac{\epsilon}{\epsilon_0}, & \text{при } f(\epsilon) < \epsilon_0 \\ 1, & \text{при } f(\epsilon) \geq \epsilon_0 \\ -1, & \text{при } f(\epsilon) \leq -\epsilon_0 \end{cases} \quad (10)$$

Можно отметить, что производная выбранной функции будет с наибольшей вероятностью положительной по математическому знаку. Изменения параметрических характеристик адаптивной системы управления продольным режимом работы могут определяться линейно независимыми параметрами, которые по своему значению отличны от нуля, тогда адаптивный алгоритм будет стабильным с асимптотической точки зрения, поскольку решение, полученное в рамках математического уравнения ϵ , принимающее нулевое значение, не будет выступать направлением адаптивного алгоритма.

$\check{Q}_{ист i}$ – ожидаемое значение при выявлении оценки идентификации характеристик;

\check{Q}_i – оценка идентификации;

ϵ – ошибка.

Расчёт оценок параметрических характеристик в ходе идентификации подразумевает реализацию таких стадий, как:

- 1) фильтрация корректируемых параметрических характеристик;
- 2) выявление модели базисной функции;
- 3) расчёт текущей оценки параметрических характеристик;
- 4) сглаживание полученного решения;
- 5) расчёт первоначальной совокупности оценок моментных и силовых параметрических характеристик.

Использовались две моментные характеристики: $\overline{M_z}(\alpha)$ и $\overline{M_z}(\alpha, \phi)$ с учётом влияния на БПЛА с адаптивным механизмом управления продольным режимом полета, учитывая возмущения ветра и возможные вращения аппарата по крену (см. табл. 1).

Таблица 1 - Оценка текущей идентификации параметрических характеристик при управлении продольным режимом полета БПЛА

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.152.7.2>

Оценка текущей идентификации параметрических характеристик	Время, секунды	1	2	3	4
-1	0	1	1	1	1

Оценка текущей идентификации параметрических характеристик	Время, секунды	1	2	3	4
-0,9	10	0,2	0,6	0,62	0,86
-0,8	20	0,1	0,58	0,61	0,84
-0,7	30	-0,01	0,42	0,57	0,85
-0,6	40	-0,4	0,38	0,54	0,87
-0,5	50	-0,42	0,38	0,51	0,88
-0,4	60	-0,80	0,37	0,49	0,89
-0,3	70	-0,83	0,36	0,36	0,92
-0,2	80	-0,79	0,35	0,33	0,96
-0,1	90	-0,85	0,33	0,34	0,99
0	100	-0,77	0,32	0,30	1,03
0,1	110	-0,88	0,31	0,28	1,05
0,2	120	-0,79	0,30	0,26	1,07
0,3	130	-0,91	0,29	0,24	1,08
0,4	140	-0,81	0,28	0,24	1,09
0,5	150	-0,75	0,27	0,23	1,10
0,6	160	-0,67	0,26	0,22	1,12
0,7	170	-0,63	0,25	0,20	1,14
0,8	180	-0,61	0,24	0,18	1,15
0,9	190	-0,53	0,22	0,19	1,17
1,0	200	-0,4	0,21	0,19	1,21

Примечание: 1 – полет по крену; 2 – ветер; 3 – малая амплитуда движения БПЛА; 4 – большая амплитуда движения БПЛА

Масштаб полученной оценки, в первую очередь, определяется в ситуации малой амплитуды движения БПЛА, так как полученные значения практически соответствуют ожидаемым. Воздействие на степень точности расчётов при выявлении текущего состояния относительной погрешности крайне низкое. Кроме того, относительная погрешность оценки параметрической характеристики, обусловленной наличием ветра, соответствует полученным расчётам, не воздействует на интеграцию адаптивного алгоритма управления продольным режимом полета БПЛА.

При управлении продольным режимом полета БПЛА решение математической модели может быть не единственным. Тем не менее, при синтезе параметрических характеристик решение математической модели единственное, оно достаточное для практического применения в адаптивном алгоритме управления продольным режимом полета БПЛА, обеспечивает стабилизацию движения БПЛА в условиях адаптивного управления.

Работоспособность адаптивного алгоритма определения характеристик продольного режима работы летательных аппаратов

Особенности формирования адаптивного алгоритма определения характеристик продольного режима полета БПЛА, выбор критериев для создания модели эталона, выявление критериев скорости работы стабилизатора БПЛА позволили проанализировать интеграцию адаптивного алгоритма определения характеристик продольного режима полета БПЛА при осуществлении полета с одинаковой скоростью. При сравнении режима работы БПЛА без и с адаптивным алгоритмом определения характеристик продольного режима работы было отмечено, что практическое применение авторского алгоритма комплекс корней и астатический корень находятся рядом с уровнями модели эталона с учётом весовых разбросов (см. рис. 2, 3).

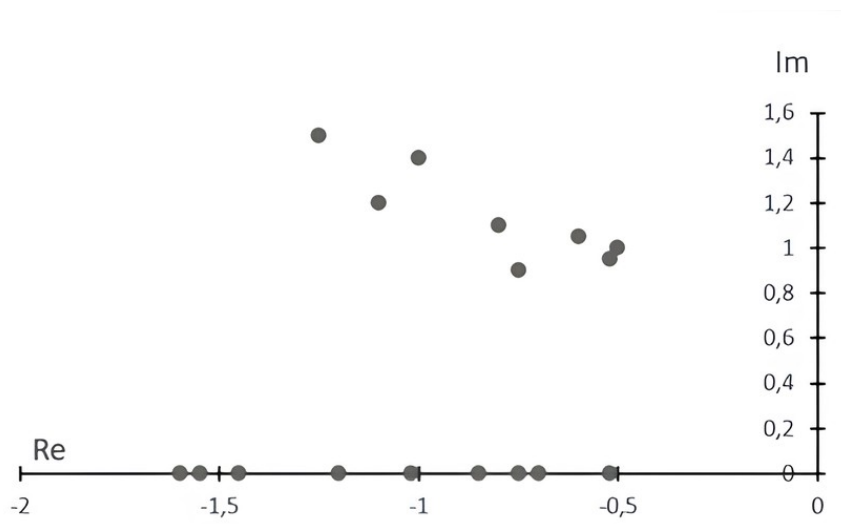


Рисунок 2 - Исследование режима работы БПЛА без применения адаптивного алгоритма определения параметрических характеристик продольного режима полета
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.152.7.3>

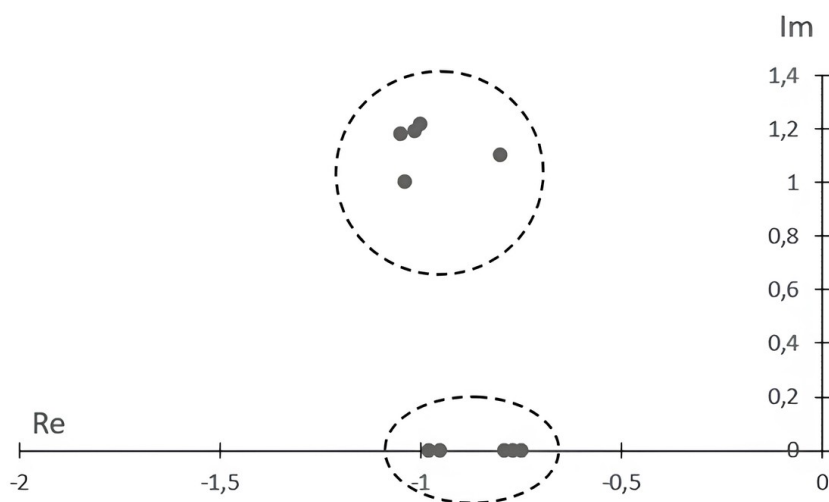


Рисунок 3 - Исследование режима работы БПЛА с применением адаптивного алгоритма определения параметрических характеристик продольного режима полета
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.152.7.4>

Практическое использование векторных сигналов при управлении продольным режимом полета способствовало обеспечению устойчивости комплекса корней и астатического корня в некоторой ограниченной области значений рядом с уровнями модели эталона. В данном случае это гарантирует высокую степень качества динамики летательных аппаратов.

При анализе переходных процессов в управлении БПЛА при помощи адаптивного алгоритма управления продольным режимом полета было обнаружено, что при малых сигналах отмечается ошибка реакции БПЛА, что возможно при низком значении и недокомпенсированности астатического корня. Анализ обратных взаимосвязей показал, что переходные процессы в управлении БПЛА в рамках настраивания адаптивного алгоритма находятся на приемлемом уровне. Практическое использование адаптивного алгоритма определения параметрических характеристик продольного режима полета БПЛА, учитывая многорежимность аппаратов при весовом разбросе неустойчивости $\pm 2,6\%$, способствовало обеспечению значительного запаса устойчивости по малой и большой амплитуде.

Работоспособность адаптивного алгоритма определения характеристик продольного режима полета летательных аппаратов исследовалась с точки зрения корректировки скорости движения. Кроме того, были использованы разные маневры БПЛА: торможение, разворот, разгон. На примере каждого из них была достигнута устойчивость и управляемость продольным режимом полета БПЛА, учитывая корректировки скорости движения. Процесс оценки текущей идентификации также был относительно устойчивым.

По сравнению с классическими алгоритмами управления продольным режимом полета БПЛА практическое использование адаптивного алгоритма определения параметрических характеристик продольного режима полета, учитывая многорежимность объектов исследования при весовом разбросе неустойчивости $\pm 2,6\%$, способствует:

1. Обеспечению значительного запаса устойчивости по малой и большой амплитуде.
2. Уменьшению скорости стабилизатора летательных аппаратов в два раза.
3. Обеспечению стабильности и управляемости БПЛА при влиянии параметрических характеристик – возмущений, которые определяются скачкообразными изменениями и потенциальным сокращением результативности работы стабилизатора летательных аппаратов.

Заключение

На основании результатов проведенного научного исследования и вышеизложенного материала были сделаны следующие ключевые выводы в работе:

1. Актуальная проблема исследования: обеспечение управляемости БПЛА с учётом погрешности параметрической оценки в условиях интеграции автоматизированных систем, существующих на современном этапе.

2. Адаптивный алгоритм подразумевает работу адаптера (элемент адаптации системы), определение параметрических характеристик продольного режима полета БПЛА. Исходя из оценки параметрических характеристик продольного режима полета БПЛА, элемент адаптации системы выявляет корректировки коэффициентов, адаптирующих систему, с помощью которых обеспечивается эталон математической модели.

3. Информационная база научного исследования – данные результатов трубных продувок БПЛА, параметрические инерционные характеристики продольного режима полета.

4. Авторский адаптивный алгоритм определения характеристик продольного режима полета летательных аппаратов включает в себя совокупность стадий: анализ имеющихся способов адаптации управленческой системы при использовании продольного режима полета БПЛА на основе существующих академических работ; определение текущей динамики БПЛА в рамках адаптивного алгоритма; приближение текущей динамики БПЛА к модели эталона продольного режима работы; проведение сравнительного анализа двух методических подходов к формированию адаптивного алгоритма определения характеристик продольного режима работы летательных аппаратов: по результатам был выбран второй методический подход, поскольку по сравнению с первым рассмотренным методическим подходом обеспечивается устойчивость доминирующих коэффициентов согласно заданным числам; оценка параметрических характеристик продольного режима полета БПЛА.

5. По сравнению с классическими алгоритмами управления продольным режимом полета БПЛА практическое использование адаптивного алгоритма определения параметрических характеристик продольного режима работы, учитывая многорежимность объектов исследования при весовом разбросе неустойчивости $\pm 2,6\%$, способствует обеспечению значительного запаса устойчивости по малой и большой амплитуде; уменьшению скорости стабилизатора летательных аппаратов в два раза; обеспечению стабильности и управляемости БПЛА при влиянии параметрических характеристик – возмущений, которые определяются скачкообразными изменениями и потенциальным сокращением результативности работы стабилизатора летательных аппаратов.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Юревич Е.И. Теория автоматического управления / Е.И. Юревич. — Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2007. — 560 с.
2. Oosedo A. Flight control systems of a quad tilt rotor unmanned aerial vehicle for a large attitude change / A. Oosedo // Seattle. — 2015. — P. 2326–2331.
3. Кузнецов А.А. Нелинейные методы управления сложными объектами в условиях неопределенности / А.А. Кузнецов // Сборник докладов XXVII Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям. — 2024. — С. 54–57.
4. Грязина Е.Н. Синтез регуляторов низкого порядка по критерию H_∞ : параметрический подход / Е.Н. Грязина // Автоматика и телемеханика. — 2007. — № 3. — С. 94–105.
5. Воробьев В.В. Системы управления летательных аппаратов / В.В. Воробьев. — Москва : ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 2008. — 203 с.
6. Дорф Р. Современные системы управления / Р. Дорф. — Москва : Лаборатория базовых знаний, 2002. — 832 с.
7. Чьонг Ф.С. Выбор коэффициентов усиления контура системы стабилизации угла тангажа беспилотного летательного аппарата с учетом допусков на аэродинамические и массово-центровочные характеристики / Ф.С. Чьонг // Политехнический молодежный журнал. — 2018. — № 5. — С. 1–9.
8. Сантьяго М.Л.А. Исследование колебаний конвертоплана-квадрокоптера при переходном режиме в вертикальной продольной плоскости / М.Л.А. Сантьяго // Сборник трудов Семнадцатой международной научно-практической конференции «Наука и образование: отечественный и зарубежный опыт». — 2019. — С. 23–31.

9. Санько А.А. Сравнительный анализ использования регуляторов различных типов для синтеза робастного управления сервоприводом беспилотного летательного аппарата / А.А. Санько // *Авиационный Вестник*. — 2020. — № 2. — С. 6–11.
10. Польшгалова Д.К. Адаптивное управление нестационарных систем / Д.К. Польшгалова // *Автоматизированные системы управления и информационные технологии : материалы всероссийской научно-технической конференции*. — 2021. — С. 426–431.
11. Федулов В.А. Оценка эффективности системы поражения малоразмерных беспилотных летательных аппаратов методом имитационного моделирования / В.А. Федулов, Н.В. Быков, В.Д. Баскаков // *Системы управления, связи и безопасности*. — 2023. — № 4. — С. 63–104.
12. Аполлонов Д.В. Формирование алгоритмов системы автоматического управления преобразуемого беспилотного летательного аппарата / Д.В. Аполлонов, К.И. Бибикина, В.М. Шибяев [и др.] // *Труды МАИ*. — 2022. — № 122. — С. 23.
13. Моисеев В.С. Беспилотные вертолеты сельскохозяйственного назначения / В.С. Моисеев. — Казань : Редакционно-издательский центр «Школа», 2023. — 407 с.
14. Крамарь В.А. Беспилотные летательные аппараты, их электромагнитная стойкость и математические модели систем стабилизации / В.А. Крамарь, А.Н. Володин, Е.В. Евтушенко. — Москва : ИНФРА-М, 2024. — 180 с.
15. Рысин А.В. Оптимизация частотной и символьной синхронизации в режиме когерентного накопления по псевдослучайным кодам с целью улучшения помехозащищенности и получением максимальной чувствительности по принимаемому сигналу для управления беспилотными летательными аппаратами (БПЛА) / А.В. Рысин, В.Н. Бойкачев, Я.Б. Островский // *Актуальные исследования*. — 2023. — № 33(163). — С. 17–35.
16. Егорова К.В. Имитационная модель управления полетом группы беспилотных летательных аппаратов на основе алгоритма пчелиной колонии / К.В. Егорова // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. — 2023. — № 2. — С. 68–71.
17. Воевода А.А. Разработка линейной системы управления тягой винтомоторной группы для БПЛА / А.А. Воевода, Ю.П. Филюшов, В.Ю. Филюшов // *Информатика и автоматизация*. — 2024. — № 5. — С. 1454–1484.
18. Сергеев А.А. Управление автономной посадкой БПЛА самолетного типа на статическую и динамическую посадочные площадки по «гибким» кинематическим траекториям / А.А. Сергеев, А.Б. Филимонов, Н.Б. Филимонов // *Мехатроника, автоматизация, управление*. — 2021. — № 3. — С. 156–167.
19. Иванов М.В. ESC регуляторы оборотов: эффективный способ управления бесколлекторными двигателями беспилотных летательных аппаратов / М.В. Иванов // *Вестник Тувынского государственного университета. Технические и физико-математические науки*. — 2023. — № 2. — С. 39–47.
20. Лобатый А.А. Аналитический синтез управляющего ускорения беспилотного летательного аппарата / А.А. Лобатый, А.Ю. Бумай, С.С. Прохорович // *Наука и техника*. — 2021. — № 4. — С. 338–344.
21. Подкуйко И.А. Поиск оптимальных параметров силовой установки высотного беспилотного летательного аппарата / И.А. Подкуйко // *Актуальные проблемы развития авиационной техники и методов ее эксплуатации-2020*. — 2021. — С. 47–53.
22. Ким Н.В. Формирование области начальных условий воздушных стартов беспилотного летательного аппарата / Н.В. Ким // *Моделирование и анализ данных*. — 2024. — № 4. — С. 104–114.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Jurevich E.I. Teoriya avtomaticheskogo upravlenija [The theory of automatic control] / E.I. Jurevich. — Sankt-Peterburg : VXB-Peterburg, 2007. — 560 p. [in Russian]
2. Oosedo A. Flight control systems of a quad tilt rotor unmanned aerial vehicle for a large attitude change / A. Oosedo // Seattle. — 2015. — P. 2326–2331.
3. Kuznetsov A.A. Nelinejnye metody upravlenija slozhnymi ob'ektami v uslovijah neopredelennosti [Nonlinear methods of managing complex objects under conditions of uncertainty] / A.A. Kuznetsov // Collection of reports of the XXVII International Conference on Soft Computing and Measurements. — 2024. — P. 54–57. [in Russian]
4. Grjazina E.N. Sintez reguljatorov nizkogo porjadka po kriteriju H_∞ : parametriceskij podhod [Synthesis of low-order regulators according to the H_∞ criterion: a parametric approach] / E.N. Grjazina // *Automation and Telemechanics*. — 2007. — № 3. — P. 94–105. [in Russian]
5. Vorob'ev V.V. Sistemy upravlenija letatel'nyh apparatov [Aircraft control systems] / V.V. Vorob'ev. — Moscow : VVIA im. N.E. Zhukovskogo, 2008. — 203 p. [in Russian]
6. Dorf R. Sovremennye sistemy upravlenija [Modern management systems] / R. Dorf. — Moscow : Laboratorija bazovyh znaniy, 2002. — 832 p. [in Russian]
7. Chyong F.S. Vybor koeffitsientov usilenija kontura sistemy stabilizatsii ugla tangazha bespilotnogo letatel'nogo apparata s uchetom dopuskov na aerodinamicheskie i massovo-tsentrovochnye harakteristiki [Selection of the gain coefficients of the contour of the pitch angle stabilization system of an unmanned aerial vehicle, taking into account the tolerances for aerodynamic and mass-centering characteristics] / F.S. Chyong // *Polytechnic Youth Magazine*. — 2018. — № 5. — P. 1–9. [in Russian]
8. Sant'jago M.L.A. Issledovanie kolebanij konvertoplana-kvadroptera pri perehodnom rezhime v vertikal'noj prodol'noj ploskosti [Investigation of the oscillations of a tiltrotor quadcopter in a transient mode in a vertical longitudinal plane] / M.L.A. Sant'jago // Proceedings of the Seventeenth International Scientific and Practical Conference "Science and Education: domestic and foreign experience". — 2019. — P. 23–31. [in Russian]
9. San'ko A.A. Sravnitel'nyj analiz ispol'zovanija reguljatorov razlichnyh tipov dlja sinteza robastnogo upravlenija servoprivodom bespilotnogo letatel'nogo apparata [Comparative analysis of the use of regulators of various types for the

synthesis of robust servo control of an unmanned aerial vehicle] / A.A. San'ko // Aviation Bulletin. — 2020. — № 2. — P. 6–11. [in Russian]

10. Polygalova D.K. Adaptivnoe upravlenie nestatsionarnyh sistem [Adaptive control of non-stationary systems] / D.K. Polygalova // Automated control systems and information technologies : materials of the All-Russian Scientific and Technical Conference. — 2021. — P. 426–431. [in Russian]

11. Fedulov V.A. Otsenka effektivnosti sistemy porazhenija malorazmernyh bespilotnyh letatel'nyh apparatov metodom imitatsionnogo modelirovanija [Evaluation of the effectiveness of the system of destruction of small-sized unmanned aerial vehicles by simulation modeling] / V.A. Fedulov, N.V. Bykov, V.D. Baskakov // Management, Communication and Security Systems. — 2023. — № 4. — P. 63–104. [in Russian]

12. Apollonov D.V. Formirovanie algoritmov sistemy avtomaticheskogo upravlenija preobrazuemogo bespilotnogo letatel'nogo apparata [Formation of algorithms for the automatic control system of the converted unmanned aerial vehicle] / D.V. Apollonov, K.I. Bibikova, V.M. Shibaev [et al.] // Works of MAI. — 2022. — № 122. — P. 23. [in Russian]

13. Moiseev V.S. Bespilotnye vertolety sel'skohozjajstvennogo naznacheniya [Unmanned helicopters for agricultural purposes] / V.S. Moiseev. — Kazan' : Redaktsionno-izdatel'skij tsentr «Shkola», 2023. — 407 p. [in Russian]

14. Kramar' V.A. Bespilotnye letatel'nye apparaty, ih elektromagnitnaja stojkost' i matematicheskie modeli sistem stabilizatsii [Unmanned aerial vehicles, their electromagnetic resistance and mathematical models of stabilization systems] / V.A. Kramar', A.N. Volodin, E.V. Evtushenko. — Moscow : INFRA-M, 2024. — 180 p. [in Russian]

15. Rysin A.V. Optimizatsija chastotnoj i simvol'noj sinhronizatsii v rezhime kogherentnogo nakoplenija po psevdosluchajnym kodam s tsel'ju uluchsheniya pomehozaschishennosti i polucheniem maksimal'noj chuvstvitel'nosti po prinimaemomu signalu dlja upravlenija bespilotnymi letatel'nymi apparatami (BPLA) [Optimization of frequency and character synchronization in the mode of coherent accumulation by pseudorandom code in order to improve noise immunity and obtain maximum sensitivity to the received signal for controlling unmanned aerial vehicles (UAVs)] / A.V. Rysin, V.N. Bojkachev, Ja.B. Ostrovskij // Current Research. — 2023. — № 33(163). — P. 17–35. [in Russian]

16. Egorova K.V. Imitatsionnaja model' upravlenija poletom gruppy bespilotnyh letatel'nyh apparatov na osnove algoritma pchelinoj kolonii [Simulation model of flight control of a group of unmanned aerial vehicles based on the bee colony algorithm] / K.V. Egorova // Bulletin of the Voronezh State Technical University. — 2023. — № 2. — P. 68–71. [in Russian]

17. Voevoda A.A. Razrabotka linejnoy sistemy upravlenija tjagoj vintomotornoj gruppy dlja BPLA [Development of a linear thrust control system for a propeller-driven group for UAVs] / A.A. Voevoda, Ju.P. Filjushov, V.Ju. Filjushov // Computer Science and Automation. — 2024. — № 5. — P. 1454–1484. [in Russian]

18. Sergeev A.A. Upravlenie avtonomnoj posadkoj BPLA samoletnogo tipa na staticheskiju i dinamicheskiju posadochnye ploschadki po «gibkim» kinematicheskim traektorijam [Control of autonomous landing of aircraft-type UAVs on static and dynamic landing pads along "flexible" kinematic trajectories] / A.A. Sergeev, A.B. Filimonov, N.B. Filimonov // Mechatronics, Automation, Control. — 2021. — № 3. — P. 156–167. [in Russian]

19. Ivanov M.V. ESC reguljatory oborotov: effektivnyj sposob upravlenija beskollektornymi dvigateljami bespilotnyh letatel'nyh apparatov [ESC speed controls: an effective way to control the brushless motors of unmanned aerial vehicles] / M.V. Ivanov // Bulletin of the Tuvan State University. Technical and Physico-mathematical Sciences. — 2023. — № 2. — P. 39–47. [in Russian]

20. Lobatyj A.A. Analiticheskij sintez upravljajushego uskoreniya bespilotnogo letatel'nogo apparata [Analytical synthesis of the control acceleration of an unmanned aerial vehicle] / A.A. Lobatyj, A.Ju. Bumaj, S.S. Prohorovich // Science and Technology. — 2021. — № 4. — P. 338–344. [in Russian]

21. Podkujko I.A. Poisk optimal'nyh parametrov silovoj ustanovki vysotnogo bespilotnogo letatel'nogo apparata [Search for optimal parameters of the power plant of a high-altitude unmanned aerial vehicle] / I.A. Podkujko // Topical Problems of Development of Aviation Equipment and Methods of Its Operation-2020. — 2021. — P. 47–53. [in Russian]

22. Kim N.V. Formirovanie oblasti nachal'nyh uslovij vozdushnyh startov bespilotnogo letatel'nogo apparata [Formation of the area of initial conditions for aerial launches of an unmanned aerial vehicle] / N.V. Kim // Data Modeling and Analysis. — 2024. — № 4. — P. 104–114. [in Russian]