

ПРИНЦИП БИНАРНОСТИ В УПРАВЛЕНИИ БЕСПИЛОТНЫМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ В УСЛОВИЯХ ИНФОРМАЦИОННОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Зайцев А.В., Канушкин С.В.*

Ключевые слова: беспилотные (дистанционно пилотируемые) летательные аппараты, управление, информационная неопределенность, стабилизация, регулятор, нелинейность, насыщение, маневр, адаптация, бинарность, устойчивость, переменная структура.

Аннотация.

Цель работы: обоснование использования принципа бинарности при управлении беспилотными летательными аппаратами систем охранного мониторинга, функционирующих в условиях информационной неопределенности о действии различных типов аддитивных возмущений при совершении маневра.

Метод: комплексный теоретико-прикладной синтез управления на основе принципа бинарности, который использует переменные состояния нелинейной динамической системы как координаты и операторы одновременно.

Результаты: обоснована необходимость и целесообразность использования бинарных адаптивных алгоритмов стабилизации с переменной структурой в условиях информационной неопределенности управленческих моделей; разработан нелинейный бинарный алгоритм угловой стабилизации переменной структуры с дополнительным «равносигнатурным» управлением на участках фазовой плоскости, которые в основном определяют управляемость, устойчивость и быстродействие системы управления движением при действии аддитивных возмущений; система с предложенным алгоритмом стабилизации увеличивает на 16% максимально возможное аддитивное возмущение типа «скачок» без потери динамической устойчивости.

Сделан вывод о целесообразности применения алгоритмов управления на основе принципа бинарности в управлении летательными аппаратами систем охранного мониторинга.

DOI: 10.21681/1994-1404-2021-4-18-30

Введение

Беспилотные летательные аппараты (дроны) играют большую роль для мониторинга площадных охраняемых объектов в системе правоохранительных органов [2, 4, 7—9, 15, 17]. При условии, что возмущения ветра варьируются и часто непредсказуемы, прокладка траектории движения аппаратов может оказаться проблематичной в условиях, отличных от безветрия. Вместо прокладывания траектории делается акцент на выдерживание заданной траектории, при этом цель — всегда быть на траектории, а не в определенной точке в определенное время. При выдерживании заданной траектории снимается проблема зависимости от времени.

В дистанционно пилотируемых летательных аппаратах (ДПЛА) скорость ветра часто находится в диапазоне от 40 до 60% воздушной скорости. Важно понять, что ветер оказывает на ДПЛА значительно большее воздействие, чем на крупные традиционные летательные аппараты, воздушная скорость которых обычно намного больше скорости ветра.

Согласно Правилам¹ использования воздушного пространства Российской Федерации, беспилотный летательный аппарат определяется как «летательный аппарат, выполняющий полет без пилота (экипажа) на борту и управляемый в полете автоматически, оператором с пункта управления или сочетанием указанных способов».

¹ Постановление Правительства РФ от 11 марта 2010 г. № 138 (ред. от 12.07.2016) «Об утверждении Федеральных правил использования воздушного пространства Российской Федерации».

* **Зайцев Александр Владимирович**, доктор технических наук, профессор, профессор Военной академии имени Петра Великого, г. Москва, Российская Федерация.
E-mail: ug253@mail.ru

Канушкин Сергей Владимирович, кандидат технических наук, доцент, доцент Военной академии имени Петра Великого, г. Москва, Российская Федерация.
E-mail: kan.cer59@yandex.ru

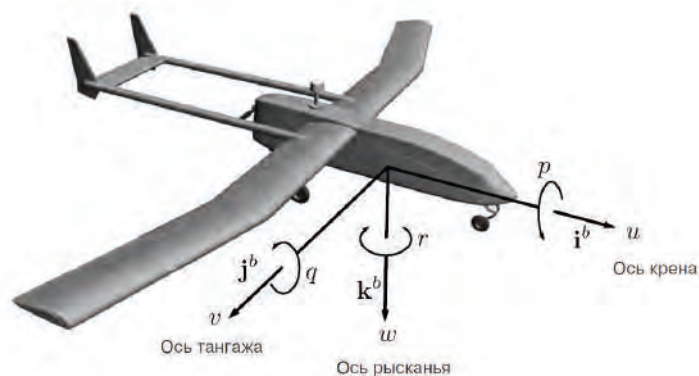


Рис. 1. Схема определения координат перемещения

Анализ комплексной задачи обеспечения качества управления ДПЛА в условиях действия возмущений

При наличии постоянного ветра в окружающей среде летательному аппарату необходимо будет парировать снос, чтобы следовать земной проекции траектории, которая не совпадает с направлением ветра. Угол сноса определяется как разность между курсом и направлением полета (путевым углом). Углы Эйлера — углы крена (вращения), тангажа и рыскания (курсовой угол) определяются относительно системы координат летательного аппарата (рис. 1). Линейные скорости и угловые скорости ДПЛА определяются относительно связанной системы координат.

Боковые аэродинамические силы и моменты сил вызывают поступательное движение в боковом направлении, а также вращательные движения в направлении крена и отклонения от курса (рыскания), что приводит к изменениям направления траектории полета ДПЛА [1, 3—9]. При дистанционном пилотировании появилась необходимость совершать *маневры*, достаточные для отработки сигнала управления, без потери устойчивости ДПЛА. В таких условиях традиционные методы управления оказываются ограниченными в применении, так как требуемое качество управления не обеспечивается [14, 16]. На реальные характеристики контура управления часто накладываются ограничения, связанные с насыщением. Тот факт, что элероны имеют физические ограничения на отклонение, предполагает, что скорость крена ДПЛА будет ограничена².

Автопилот является системой, используемой для управления полетом без помощи пилота. Для ДПЛА автопилот является системой полного управления летательным аппаратом во время всех фаз полета. Некоторые функции управления полетом могут находиться на наземной станции управления, при этом автопилотная часть системы управления ДПЛА находится на борту. Основной целью автопилота является управление по-

ложением в инерциальной системе и ориентацией в пространстве ДПЛА. Для большинства представляющих интерес маневров, совершаемых в полете, автопилоты, разработанные на основе предположения о динамике развязанных движений, дают хорошие результаты³.

Для создания высокоэффективных систем управления следует применять методы *синтеза*, позволяющие в полной мере учесть их особенности, а также обеспечить надежное функционирование синтезируемых робототехнических систем во всей допустимой области изменения фазовых координат в условиях информационной неопределенности [13, 14].

На практике не всегда возможно точно определить математическую модель интересующего нас объекта. Изменения условий окружающей среды функционирования системы могут существенно влиять на конкретное значение реальных параметров модели и ее структуру. Отсюда с практической точки зрения представляется привлекательным найти *обобщенную структуру* регулятора для наиболее широкого класса нелинейных объектов. Поэтому в большинстве случаев регулятор реализует отображение вектора состояний в пространство допустимых управлений.

В прикладной теории управления ДПЛА считают основными *принципами* [1, 17]:

- комплексный охват моделями и методами теории всех этапов полета ДПЛА;
- учет возмущений, в частности, ветровых, действующих на всех этапах полета ДПЛА;
- формирование траектории полета ДПЛА, наиболее подходящей для решения конкретной целевой задачи;
- обеспечение минимальной трудоемкости решения задач программирования полетов ДПЛА.

ДПЛА представляет собой физический летательный аппарат с шестью степенями свободы, который реагирует на команды сервопривода (руль высоты, элерон, руль направления и дроссельная заслонка), а также на

² Рэндал У. Биард, Тимоти У. Мак Лэйн. Малые беспилотные летательные аппараты: теория и практика. М. : Техносфера, 2015. 312 с. ISBN 978-5-94836-393-6.

³ Системы управления летательными аппаратами : учебник / Под общ. ред. Г. Н. Лебедева. М. : Изд-во МАИ, 2007. 756 с. ISBN 978-5-7035-1853-3.

ветер и прочие возмущения. При обеспечении точности, необходимой для целей моделирования, модель с шестью степенями свободы оказывается достаточно сложной и громоздкой. Проектирование и анализ управления летательным аппаратом значительно проще осуществляются с помощью использования линейных моделей более низкого порядка: моделей, которые описывают небольшие отклонения от равновесного состояния, включая линейную функцию преобразования, и моделей пространственных состояний.

Автопилот относится к алгоритмам управления низкого уровня, который поддерживает постоянными значения углов крена и тангажа, скорости полета, высоты и курсового направления полета. Автопилот и блоки управления полетом на больших высотах полагаются на точные оценки состояния, получаемые динамической фильтрацией показаний бортовых датчиков.

Полная модель динамики полета совместно с методом оценивания автопилота и состояния представляет собой многомерную, чрезвычайно сложную нелинейную систему уравнений. Полная модель системы слишком сложная, чтобы способствовать разработке высокоуровневых алгоритмов наведения. Поэтому получены нелинейные уравнения низкого порядка, которые моделируют поведение системы с закрытым контуром управления.

Одна из первостепенных проблем связана с полетом ДПЛА при наличии ветра. Поскольку скорости полета находятся в интервале 40—100 км/час, который типичен для ДПЛА, а скорость ветра на высоте нескольких сотен метров над уровнем земли почти всегда превышает 18 км/час, то ДПЛА должны быть способны эффективно маневрировать в воздушном потоке. Традиционные методы отслеживания траектории, используемые в робототехнике, для ДПЛА работают недостаточно хорошо.

Основной целью проектирования автопилота является управление положением в инерциальной системе и ориентацией в пространстве ДПЛА. Для большинства представляющих интерес маневров, совершаемых в полете, автопилоты, разработанные на основе предположения о динамике развязанных движений, дают хорошие результаты. В последующем описании предполагается, что динамика продольных движений (скорость перемещения вперед, маневр по тангажу, набор высоты/снижение) не связана с динамикой боковых скольжений (движения крена, рыскания).

Аэродинамические коэффициенты называют производными устойчивости, так как их значения определяют статическую и динамическую устойчивость ДПЛА. Статическая устойчивость относится к направлению аэродинамических моментов, по мере того как ДПЛА отклоняется от своих номинальных условий полета. Если моменты стремятся к тому, чтобы вернуть ДПЛА в номинальное условие полета, то говорят, что ДПЛА статически устойчив. Если центр давления находится впереди центра масс, БПЛА является статически (аэродинамически) неустойчивым. При отклонении осей БПЛА

от направления полета аэродинамическая сила создает аэродинамический момент, отклоняющий продольную ось ДПЛА на еще больший угол. В данном случае аэродинамический момент M_a совпадает по направлению с возмущающим моментом M_e , который старается увеличить угловое отклонение ДПЛА.

Динамическая устойчивость связана с динамическим поведением летательного аппарата в ответ на возмущения. Если возмущение воздействует на ДПЛА и при этом со временем отклик ДПЛА демпфируется, то говорят, что ДПЛА динамически устойчив. Большинство летательных аппаратов разрабатываются статически устойчивыми. Однако в некоторых условиях полета центр масс аппарата смещается, и ДПЛА может стать статически неустойчивым, что существенно усложняет задачу стабилизации его углового движения. Возникает необходимость в применении новых принципов управления, учитывающих особенности таких объектов.

Особенности и возможности бинарного управления динамическими объектами

Развитие принципов адаптивного управления осуществляется, в частности, в теории бинарных систем, использующих местные глубокие обратные связи, когда необходимые условия реализуются локально, в каком-то месте фазового пространства системы. Суть этого подхода состоит в систематическом применении при структурном синтезе системы принципа регулирования по отклонению и расширению на этой основе множества типов обратных связей. Введенное различие между переменными-координатами и переменными-операторами следует понимать условно, как удобный для использования методический прием. Переменную называют *координатой*, если над ней осуществляется то или иное преобразование, и ту же самую переменную считают *оператором*, если она определяет вид преобразования, выполняемого над какой-либо координатой. Двойственное толкование переменных состояния нелинейной динамической системы принято именовать *принципом бинарности*⁴ [3—6].

То есть принцип бинарности, в соответствии с которым координаты и операторы системы управления рассматриваются в виде единой совокупности ее переменных состояния, составляет методологическую основу построения так называемых бинарных систем. Каждый элемент такой совокупности может выступать в качестве переменной координаты или переменной оператора, содержательная интерпретация каждой переменной состояния предопределяется ее ролью в конкретном локальном преобразовании.

Это означает, что переменные-операторы могут подвергаться тем же преобразованиям, которые обыч-

⁴ Емельянов С.В. Бинарные системы автоматического управления. М. : МНИИПУ, 1984. 313 с.; Емельянов С.В., Коровин С.К. Новые типы обратной связи: Управление при неопределенности. М. : Наука. Физматлит, 1997. 352 с. ISBN 5-02-015149-1.

но совершаются над переменными-координатами. Сочетание принципа бинарности с принципом регулирования по отклонению позволяет перейти к автоматическому формированию законов управления, наделяющих замкнутую нелинейную динамическую систему управления требуемой совокупностью свойств.

Из возможных подходов особый интерес представляют алгоритмы робастного управления, которые к настоящему времени широко применяются в исследованиях различных систем автоматического управления. Робастной называется система, обладающая устойчивостью свойств по отношению к изменениям параметров и действию возмущений⁵ [10—13, 16]. Преимуществом такого подхода является то, что предоставляется возможность использовать *интервальные* методы, обладающие рядом особенностей, среди которых: не требуется знание вероятностных характеристик неопределенностей, а также точного знания самих исходных параметров объекта управления, поскольку эти значения укладываются в определенный интервал. То есть робастные системы относятся к классу ненастраивающихся систем управления, а их малая чувствительность к различного рода вариациям математической модели объекта обеспечивается на этапе синтеза алгоритма управления.

В нелинейных робастных системах малая чувствительность к различным вариациям математической модели объекта управления обеспечивается за счет дополнительного введения в алгоритм управления специальной статической нелинейной обратной связи (рис. 2). При этом даже для линейных объектов управления закон управления оказывается нелинейным. Свойство статических нелинейных законов управления улучшать качество замкнутых систем или обеспечивать нулевую чувствительность к параметрическим или сигнальным возмущениям было установлено достаточно давно.

Бинарное управление является достаточно эффективным средством стабилизации неопределенного объекта, поскольку:

- нет необходимости иметь полную информацию о фазовом векторе объекта;
- допускаются как нестационарная неопределенность, так и произвольные внешние воздействия;
- учитывается разнотемповость физических процессов, протекающих в реальной системе на различных участках фазового пространства.



Рис. 2. Схема системы нелинейного бинарного управления

Следовательно, необходимо обосновать возможность и необходимость применения принципа бинарного управления в условиях информационной неопределенности.

Условно методы синтеза адаптивных систем можно разделить на *эвристические* и *теоретические* [12]. В эвристических методах отсутствует строгое обоснование устойчивости адаптивной системы и, как следствие, условия применимости рассматриваемых методов. В данной работе использован эвристический метод, в котором отсутствует строгое теоретическое доказательство устойчивости адаптивной системы. Возможность и целесообразность применения полученного алгоритма подтверждаются результатами вычислительного эксперимента.

Анализ управляемости ДПЛА (динамической устойчивости) подтверждает, что при некоторых допущениях она определяется из соотношения возмущающего, аэродинамического и управляющего моментов [1, 3—9]. Потеря управляемости при действии внешних возмущений, прежде всего, обусловлена нелинейностями скоростной характеристики рулевого привода типа «зона насыщения» $|\delta| \leq \delta^{\max}$ и ограниченным диапазоном отклонения управляющих органов $|\delta| \leq \delta^{\max}$. Данный участок фазового пространства определяется условиями, где значения угла, угловой скорости и углового ускорения имеют одинаковый знак («равносигнатурный» участок). Данный участок фазового пространства в основном определяет управляемость, устойчивость и быстродействие системы управления движением ДПЛА при совершении маневра и при действии аддитивных возмущений.

В ходе полета ДПЛА может появиться необходимость совершать маневры. В таких условиях традиционные методы управления оказываются ограниченными в применении, так как не обеспечивается требуемое качество. Сочетание принципа бинарности с принципом регулирования по отклонению позволяет получить системы переменной структуры с адаптацией в особых фазовых состояниях. Классическое пропорционально-дифференциальное (ПД) управление является довольно упрощенной реализацией управления по ошибке на основе обратной связи. ПД-управление широко применяется, даже когда о динамике объекта

⁵ Методы классической и современной теории автоматического управления. Учебник в 5-ти тт. Т. 3. Синтез регуляторов систем автоматического управления / Под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егулова. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 616 с. ISBN 5-7038-2194-0; Т. 5. Методы современной теории автоматического управления / Под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егулова. М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2004. 784 с. ISBN 5-7038-2193-2; Методы инженерного синтеза сложных систем управления: аналитический аппарат, алгоритмы приложения в технике: учебное пособие. Часть II. Вычислительно-аналитический эксперимент: аппарат матричных операторов и вычислительные технологии / Под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егулова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. 416 с. ISBN: 978-5-7038-3451-0.

информация минимальна или совсем отсутствует [12, 13, 17, 18].

Но несмотря на очевидную простоту и легкость настройки ПД-управления, стоит отметить его фундаментальные ограничения, которые возникают при появлении большого количества требований к возможностям системы управления. Для большей определенности выделим три основные проблемы, адресованные к ПД-структуре:

1. Задающее воздействие часто задается как единичная функция, что не соответствует большинству видов динамических систем, так как подается для определения выходного сигнала, поэтому управляющий сигнал делает резкий скачок.

2. ПД-управление часто реализуется с малым коэффициентом передачи дифференцирующего звена из-за чувствительности к шуму.

3. Сумма двух составляющих, в силу своей простоты, не может осуществить лучший закон управления, основанный на предыдущей ошибке и ее изменении.

Для того чтобы избавиться от этих проблем при управлении, рассмотрим системы с *переменной структурой*⁶. Система, которая оптимальна на каком-либо одному критерию, часто не имеет оптимальных характеристик по другому. Стоит также отметить, что многие системы работают в нескольких режимах, например, обработки больших скачкообразных воздействий и слежения за медленно изменяющимися входными сигналами. Один из способов решения данной задачи — создание системы переменной структуры (СПС), которую можно создать *субоптимальной* по нескольким критериям. Под СПС следует понимать систему, которая содержит несколько законов управления, переключающихся в процессе функционирования и тем самым обеспечивающих более высокие показатели качества работы системы. Можно также дать другое определение: это система, в которой путем переключений изменяются связи между элементами в зависимости от ее состояния. В зависимости от того, какие координаты системы и внешние воздействия доступны для измерения, переключение может происходить по величине ошибки, выходной координате исполнительного устройства, задающего или возмущающего воздействий.

Синтез нелинейного бинарного алгоритма «равносигнатурного» управления с адаптацией в особых фазовых состояниях

Решение задачи будем искать в классе бинарных систем [5—6]. Теория бинарного управления отражает идеологию единства процессов самоорганизации и управления, т. е. представляет собой своего рода симбиоз кибернетики и синергетики [11, 12]. Основная особенность заключается в формировании нового механизма генерации нелинейных обратных связей.

Введение бинарного управления в процедуру синтеза систем позволяет построить регулярный механизм аналитической генерации естественной совокупности отрицательных и положительных обратных связей, которые формируют процессы направленной самоорганизации.

Методологическое отличие между подходом к синтезу бинарных систем и подходом к построению большинства адаптивных систем управления заключается в замене принципа регулирования по возмущению или по его оценкам на принцип регулирования по отклонению для компенсации операторных (параметрических) возмущений в операторе объекта регулирования.

Предлагается бинарный алгоритм управления следующего вида [18]:

$$U = k_{\psi}\psi + k_{\dot{\psi}}\dot{\psi} + U_{\text{бинарн.}}$$

Модель нелинейного бинарного алгоритма «равносигнатурного» управления с адаптацией в особых фазовых состояниях представлена на рис. 3.

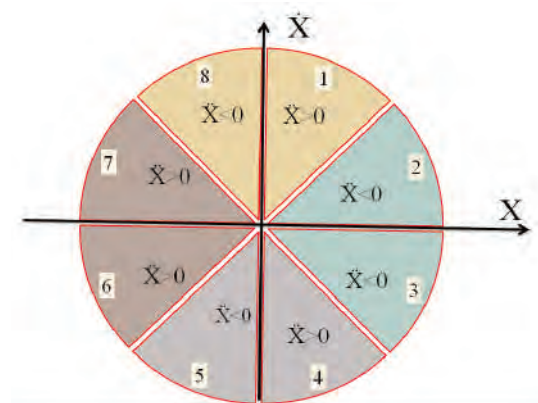


Рис. 3. Схема изменения знака второй производной при устойчивом движении динамической системы на фазовой плоскости

В первом и третьем квадрантах фазовой плоскости возмущающий момент совпадает по направлению с аэродинамическим (для аэродинамически неустойчивого ДПЛА), следовательно, движение в данных квадрантах во многом определяет не только устойчивость, но и качество управления. Двойственное (бинарное) толкование переменных (координаты и операторы) позволяет получить бинарный алгоритм управления следующего вида:

$$U_{\text{бинарн.}} = \{(\text{sign}\psi + \text{sign}\dot{\psi})(\text{sign}\dot{\psi} + \text{sign}\ddot{\psi}) \cdot (\text{sign}(k_{\psi}\psi + k_{\dot{\psi}}\dot{\psi}))\}$$

Изменение бинарной составляющей алгоритма «равносигнатурного» управления с адаптацией в особых фазовых состояниях можно представить с помощью следующих выражений на различных участках фазового пространства (см. рис. 3):

- на участке фазового пространства № 1: $\{(\psi), (\dot{\psi}), (\ddot{\psi})\},$

⁶ Там же.

$$U_{\text{бинарн.1.}} = \{(\text{sign}\psi + \text{sign}\dot{\psi})(\text{sign}\dot{\psi} + \text{sign}\ddot{\psi})\} * (\text{sign}(k_{\psi}\psi + k_{\dot{\psi}}\dot{\psi})) = \\ = \{\text{sign}\psi \cdot \text{sign}\dot{\psi} + \text{sign}\dot{\psi}^2 + \text{sign}\psi \cdot \text{sign}\ddot{\psi} + \text{sign}\dot{\psi} \cdot \text{sign}\ddot{\psi}\} \\ * \text{sign}(k_{\psi}\psi + k_{\dot{\psi}}\dot{\psi}) = \{1 + 1 + 1 + 1\} * \text{sign}(k_{\psi}\psi + k_{\dot{\psi}}\dot{\psi}) = 4$$

– на участке фазового пространства № 2: $\{(\psi), (\dot{\psi}), (-\ddot{\psi})\}$,

$$U_{\text{бинарн.2.}} = \{(\text{sign}\psi + \text{sign}\dot{\psi})(\text{sign}\dot{\psi} + \text{sign}\ddot{\psi})\} * (\text{sign}(k_{\psi}\psi + k_{\dot{\psi}}\dot{\psi})) = \\ = \{\text{sign}\psi \cdot \text{sign}\dot{\psi} + \text{sign}\dot{\psi}^2 + \text{sign}\psi \cdot \text{sign}\ddot{\psi} + \text{sign}\dot{\psi} \cdot \text{sign}\ddot{\psi}\} \\ * \text{sign}(k_{\psi}\psi + k_{\dot{\psi}}\dot{\psi}) = \{1 + 1 - 1 - 1\} * \text{sign}(k_{\psi}\psi + k_{\dot{\psi}}\dot{\psi}) = 0$$

– на участке фазового пространства № 3: $\{(\psi), (-\dot{\psi}), (-\ddot{\psi})\}$,

$$U_{\text{бинарн.з.}} = \{(\text{sign}\psi + \text{sign}\dot{\psi})(\text{sign}\dot{\psi} + \text{sign}\ddot{\psi})\} * (\text{sign}(k_{\psi}\psi + k_{\dot{\psi}}\dot{\psi})) = \\ = \{\text{sign}\psi \cdot \text{sign}\dot{\psi} + \text{sign}\dot{\psi}^2 + \text{sign}\psi \cdot \text{sign}\ddot{\psi} + \text{sign}\dot{\psi} \cdot \text{sign}\ddot{\psi}\} \\ * \text{sign}(k_{\psi}\psi + k_{\dot{\psi}}\dot{\psi}) = \{-1 + 1 - 1 + 1\} * \text{sign}(k_{\psi}\psi + k_{\dot{\psi}}\dot{\psi}) = 0$$

– на участке фазового пространства № 4: $\{(\psi), (-\dot{\psi}), (\ddot{\psi})\}$,

$$U_{\text{бинарн.4.}} = \{(\text{sign}\psi + \text{sign}\dot{\psi})(\text{sign}\dot{\psi} + \text{sign}\ddot{\psi})\} * (\text{sign}(k_{\psi}\psi + k_{\dot{\psi}}\dot{\psi})) = \\ = \{\text{sign}\psi \cdot \text{sign}\dot{\psi} + \text{sign}\dot{\psi}^2 + \text{sign}\psi \cdot \text{sign}\ddot{\psi} + \text{sign}\dot{\psi} \cdot \text{sign}\ddot{\psi}\} \\ * \text{sign}(k_{\psi}\psi + k_{\dot{\psi}}\dot{\psi}) = \{-1 + 1 + 1 - 1\} * \text{sign}(k_{\psi}\psi + k_{\dot{\psi}}\dot{\psi}) = 0$$

– на участке фазового пространства № 5: $\{(-\psi), (-\dot{\psi}), (-\ddot{\psi})\}$,

$$U_{\text{бинарн.5.}} = \{(\text{sign}\psi + \text{sign}\dot{\psi})(\text{sign}\dot{\psi} + \text{sign}\ddot{\psi})\} * \text{sign}(k_{\psi}\psi + k_{\dot{\psi}}\dot{\psi}) = \\ = \{\text{sign}\psi \cdot \text{sign}\dot{\psi} + \text{sign}\dot{\psi}^2 + \text{sign}\psi \cdot \text{sign}\ddot{\psi} + \text{sign}\dot{\psi} \cdot \text{sign}\ddot{\psi}\} \\ * \text{sign}(k_{\psi}\psi + k_{\dot{\psi}}\dot{\psi}) = \{1 + 1 + 1 + 1\} * \text{sign}(k_{\psi}\psi + k_{\dot{\psi}}\dot{\psi}) = -4$$

– на участке фазового пространства № 6: $\{(-\psi), (\dot{\psi}), (\ddot{\psi})\}$,

$$U_{\text{бинарн.6.}} = \{(\text{sign}\psi + \text{sign}\bar{\psi})(\text{sign}\psi + \text{sign}\bar{\psi})\} * (\text{sign}(k_\psi\psi + k_{\bar{\psi}}\bar{\psi})) = \\ = \{\text{sign}\psi \cdot \text{sign}\bar{\psi} + \text{sign}\psi^2 + \text{sign}\psi \cdot \text{sign}\bar{\bar{\psi}} + \text{sign}\bar{\psi} \cdot \text{sign}\bar{\bar{\psi}}\} \\ * \text{sign}(k_\psi\psi + k_{\bar{\psi}}\bar{\psi}) = \{1 + 1 - 1 - 1\} * \text{sign}(k_\psi\psi + k_{\bar{\psi}}\bar{\psi}) = 0$$

– на участке фазового пространства № 7: $\{(-\Psi), (\dot{\Psi}), (\ddot{\Psi})\}$,

$$\begin{aligned}
 U_{\text{бинарн.7.}} &= \{(\text{sign}\psi + \text{sign}\dot{\psi})(\text{sign}\dot{\psi} + \text{sign}\ddot{\psi})\} * (\text{sign}(k_{\psi}\psi + k_{\dot{\psi}}\dot{\psi})) = \\
 &= \{\text{sign}\psi \cdot \text{sign}\dot{\psi} + \text{sign}\dot{\psi}^2 + \text{sign}\psi \cdot \text{sign}\ddot{\psi} + \text{sign}\dot{\psi} \cdot \text{sign}\ddot{\psi}\} \\
 &* (\text{sign}(k_{\psi}\psi + k_{\dot{\psi}}\dot{\psi})) = \\
 &= \{-1 + 1 - 1 + 1\} * (\text{sign}(k_{\psi}\psi + k_{\dot{\psi}}\dot{\psi})) = 0
 \end{aligned}$$

– на участке фазового пространства № 8: $\{(-\psi), (\dot{\psi}), (-\ddot{\psi})\}$,

$$\begin{aligned}
 U_{\text{бинарн.8.}} &= \{(\text{sign}\psi + \text{sign}\dot{\psi})(\text{sign}\dot{\psi} + \text{sign}\ddot{\psi})\} * (\text{sign}(k_{\psi}\psi + k_{\dot{\psi}}\dot{\psi})) = \\
 &= \{\text{sign}\psi \cdot \text{sign}\dot{\psi} + \text{sign}\dot{\psi}^2 + \text{sign}\psi \cdot \text{sign}\ddot{\psi} + \text{sign}\dot{\psi} \cdot \text{sign}\ddot{\psi}\} \\
 &* (\text{sign}(k_{\psi}\psi + k_{\dot{\psi}}\dot{\psi})) = \{-1 + 1 + 1 - 1\} * (\text{sign}(k_{\psi}\psi + k_{\dot{\psi}}\dot{\psi})) \\
 &= 0
 \end{aligned}$$

Предлагаемый алгоритм, используя переменные состояния нелинейной динамической системы как координату и оператор, создает дополнительное управление при одинаковых знаках измеряемых параметров. Основной положительный эффект достигается за счет того, что в *первом* и *третьем* квадрантах фазовой плоскости возмущающий момент совпадает по направлению с аэродинамическим, следовательно, движение в данных квадрантах во многом определяет не только быстродействие, но и качество управления. Сущность состоит в том, что необходимо подавать дополнительное управление только в том случае, когда измеряемые параметры угла, угловой скорости и углового ускорения имеют одинаковый знак. При этом повышается

быстродействие и устойчивость системы угловой стабилизации в процессе полета при действии внешних возмущений [18].

Обобщенный нелинейный бинарный алгоритм «равносигнатурного» управления с адаптацией в особых фазовых состояниях можно представить в следующем виде:

$$U = k_{\psi}\psi + k_{\dot{\psi}}\dot{\psi} + \{(\text{sign}\psi + \text{sign}\dot{\psi})(\text{sign}\dot{\psi} + \text{sign}\ddot{\psi})\} * \text{sign}(k_{\psi}\psi + k_{\dot{\psi}}\dot{\psi})$$

Принцип формирования бинарной составляющей алгоритма «равносигнатурного» управления с адаптацией в особых фазовых состояниях представлен в табл. 1.

Таблица 1

Значения знака и величины бинарной составляющей при формировании сигнала управления

Измеряемая величина	Знак измеряемой величины							
	Номер участка на фазовой плоскости							
	1	2	3	4	5	6	7	8
ψ	+	+	+	+	—	—	—	—
$\dot{\psi}$	+	+	—	—	—	—	+	+
$\ddot{\psi}$	+	—	—	+	—	+	+	—
Величина управления	4	0	0	0	—4	0	0	0

На рис. 4 представлены временные диаграммы, поясняющие принцип формирования бинарной состав-

ляющей алгоритма «равносигнатурного» управления с адаптацией в особых фазовых состояниях.

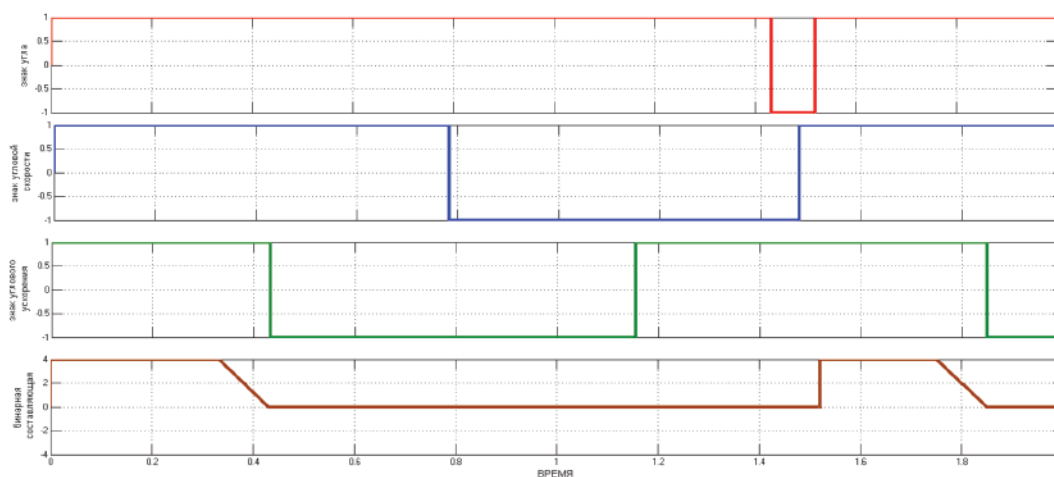


Рис. 4. Временные диаграммы изменения знаков угла, угловой скорости, углового ускорения и бинарной составляющей алгоритма стабилизации

Вычислительный эксперимент

Вычислительный эксперимент по оценке устойчивости движения нелинейной системы стабилизации ДПЛА с различными типами регулятора при аддитивном возмущении (воздействии) типа «скачок» осуществлен в среде *MATLAB Simulink* путем моделирования ди-

намики канала стабилизации ДПЛА по углу рыскания. Проведен сравнительный анализ динамики системы стабилизации ДПЛА с традиционным линейным ПД-регулятором и предлагаемым нелинейным бинарным алгоритмом «равносигнатурного» управления с адаптацией в особых фазовых состояниях при прочих одинаковых условиях.

Принцип бинарности в управлении беспилотными летательными аппаратами...

Модель системы стабилизации содержит нелинейность типа «зона ограничения (насыщения)» скоростной характеристики рулевого привода. Эта нелинейность является не только наиболее типичной для системы управления, но и постоянно присутствующей. Насыщение характеризует ограничение мощности рулевого привода и присутствует в любом реально существующем приводе.

При решении задачи экспериментального исследования рассмотрен наиболее трудный случай и принимаются следующие *допущения*: ДПЛА является твердым телом; требуемые величины диапазонов определяются

максимальными значениями фазовых координат; ДПЛА статически (аэродинамически) неустойчив; применим метод «замороженных» коэффициентов; влиянием параметрических возмущений пренебрегаем.

При исследовании динамики углового движения ДПЛА при действии возмущения типа «скачок» в качестве исходных данных были взяты следующие характеристики: длительность импульса 0,5 с, амплитуда импульса $0,5 * K \text{ с}^{-2}$, где K — коэффициент, задающий амплитуду импульса (рис. 6, $K = 0,855$). Вид аддитивного возмущения *Signal 1*, подаваемого на вход системы угловой стабилизации, представлен на рис. 5.

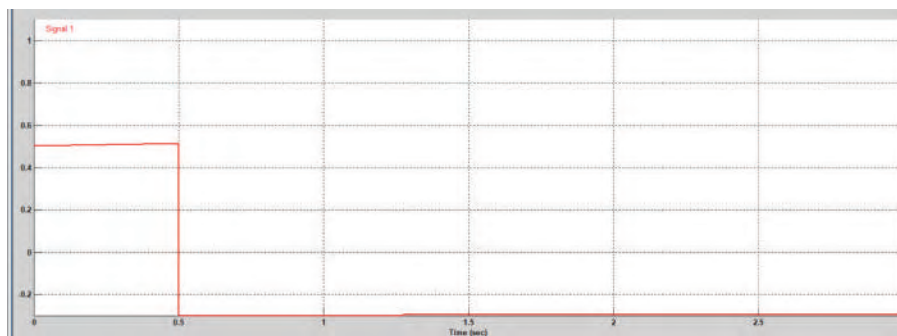


Рис. 5. График аддитивного возмущения типа «скачок»

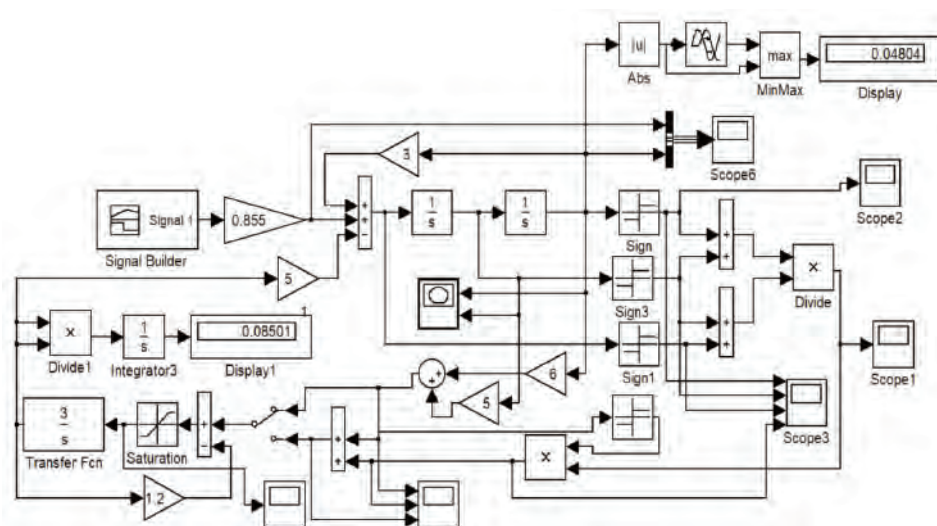


Рис. 6. Схема моделирования системы с возмущением типа «скачок» и линейным ПД-регулятором

Постепенно увеличивая амплитуду возмущения типа «скачок» (K), было определено максимальное значение возмущения аддитивного типа, которое спо-

собна выдержать система стабилизации, оставаясь при этом динамически устойчивой (неустойчивый предельный цикл) (рис. 7).

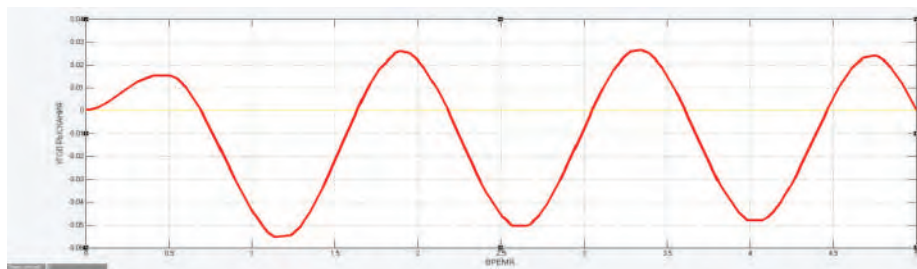


Рис. 7. График изменения угла рыскания при максимально возможном возмущении типа «скачок» ($K=0,855$) и линейным ПД-регулятором

Структурная схема модели с предлагаемым нелинейным бинарным алгоритмом «равнозначного» управления с адаптацией в особых фазовых состояниях, в котором дополнительное управление формиру-

ется только в том случае, когда измеряемые значения угла, угловой скорости и углового ускорения имеют одинаковый знак, представлена на рис. 8.

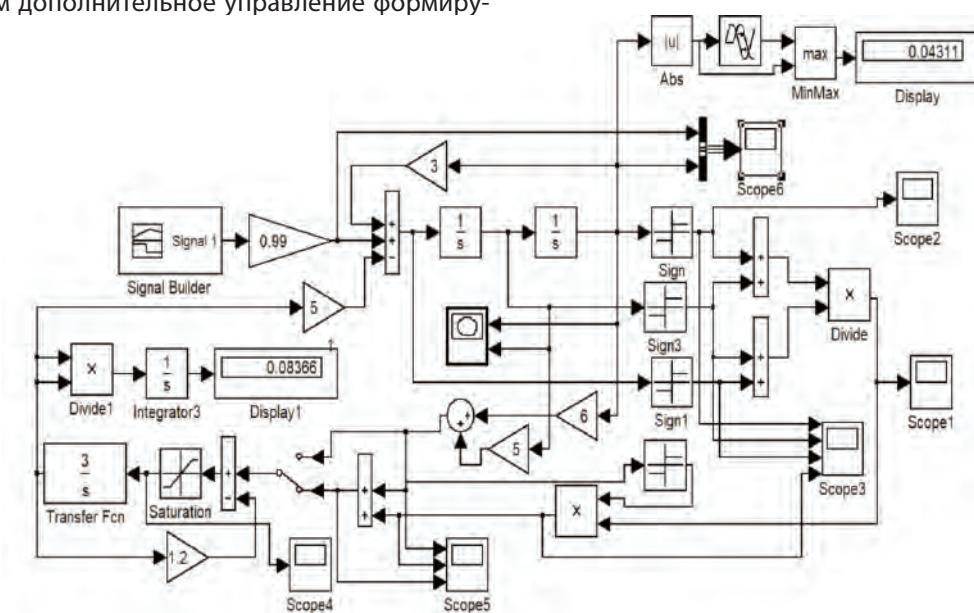


Рис. 8. Схема моделирования системы с возмущением типа «скачок» и бинарным регулятором

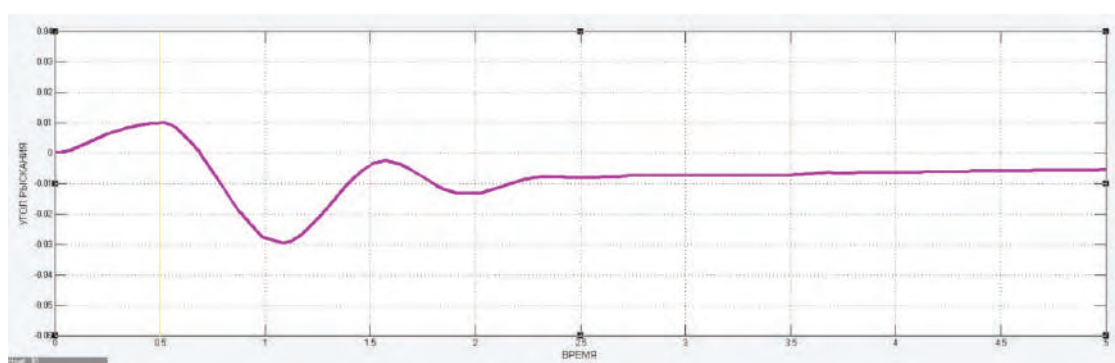


Рис. 9. График изменения угла рыскания при максимально возможном возмущении типа «скачок» ($K=0.855$) с линейным ПД-регулятором при бинарном управлении

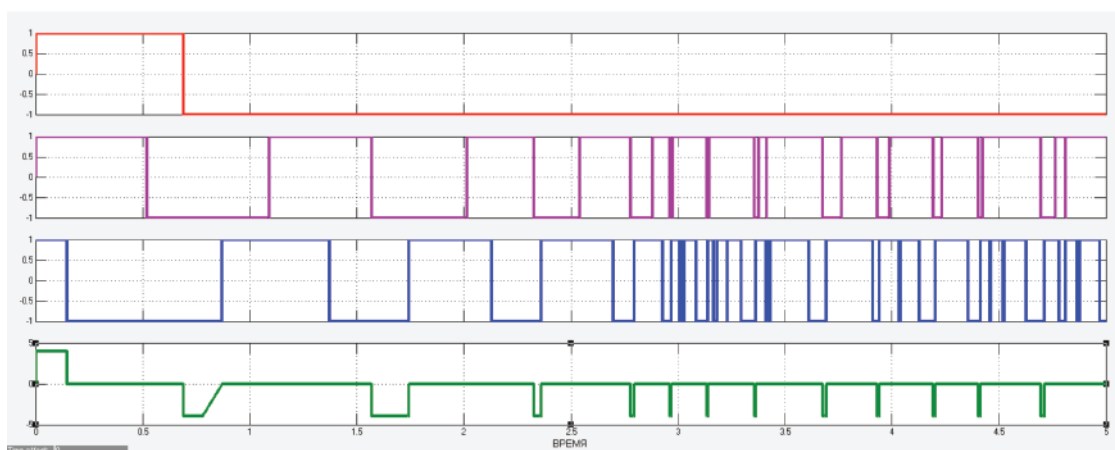


Рис. 10. Временные диаграммы изменения знаков угла, угловой скорости, углового ускорения и бинарной составляющей алгоритма стабилизации

Принцип бинарности в управлении беспилотными летательными аппаратами...

При амплитуде возмущения типа «скачок» ($K = 0,855$) динамика системы угловой стабилизации с бинарным регулятором остается устойчивой (рис. 9).

На рис. 10 представлены временные диаграммы, поясняющие принцип формирования бинарной составляющей алгоритма «равносигнаурного» управления

с адаптацией в особых фазовых состояниях при действии возмущения типа «скачок» ($K = 0,855$).

Предлагаемая система с бинарным регулятором выходит на границу (неустойчивый предельный цикл) при величине аддитивного возмущения $K = 0,99$ (рис. 8, рис. 11).

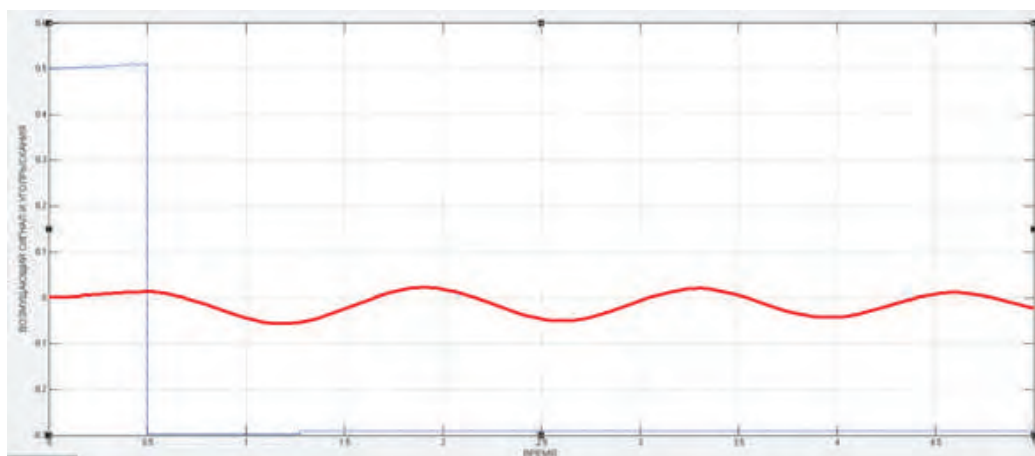


Рис. 11. График изменения угла рыскания при максимально возможном возмущении типа «скачок» ($K=0.99$) с бинарным регулятором

На рис. 12 представлены временные диаграммы, поясняющие принцип формирования бинарной составляющей алгоритма «равносигнаурного» управления с адаптацией в особых фазовых состояниях при действии возмущения типа «скачок» ($K = 0,635$).

Сравнительные характеристики систем стабилизации с линейным ПД-регулятором и с бинарным регулятором при возмущении типа «скачок» представлены в табл. 2 (см. рис. 6, рис. 8).

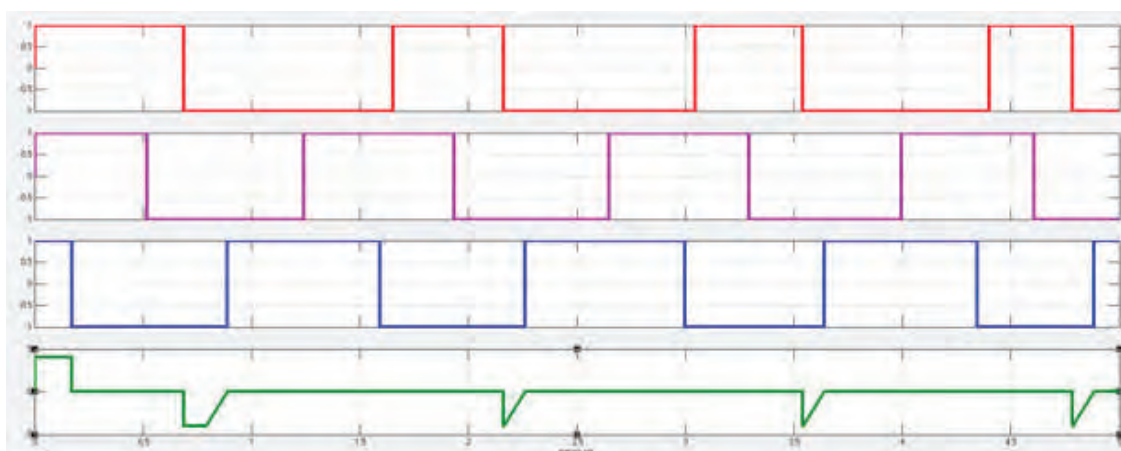


Рис. 12. Временные диаграммы изменения знаков угла, угловой скорости, углового ускорения и бинарной составляющей алгоритма стабилизации

Таблица 2

Сравнительные характеристики систем стабилизации с линейным ПД-регулятором и с бинарным регулятором при возмущении типа «скачок»

	Системы с линейным ПД-регулятором	Системы с бинарным регулятором
Максимально возможное аддитивное возмущение без потери устойчивости	0,855	0,99 (больше на 16%)
Допустимый максимальный угол отклонения при действии аддитивных возмущений	0,04804	0,04311 (меньше на 11%)
Расход топлива на управление	0,08501	0,08366 (меньше на 1,6%)

Максимальное аддитивное возмущение типа «скачок», которое можно подать на систему угловой стабилизации с традиционным линейным ПД-алгоритмом управления без потери ее устойчивости, равно $0,855 \text{ с}^{-2}$. В аналогичной системе с предлагаемым нелинейным бинарным алгоритмом «равносигнатурного» управления с адаптацией в особых фазовых состояниях, соответственно, $0,99 \text{ с}^{-2}$. Таким образом, система с бинарным алгоритмом управления обеспечивает *устойчивость* движения при аддитивных возмущениях типа «скачок» на 16% больше.

Заключение

Рассмотрен нелинейный бинарный алгоритм угловой стабилизации ДПЛА с дополнительным «равносигнатурным» управлением, в котором структура алгоритма меняется только на участках фазового пространства, где значения угла, угловой скорости и углового ускорения имеют одинаковый знак. Данный участок фазового пространства в основном определяет управляемость, динамическую устойчивость и быстродействие системы управления движением аэродинамически неустойчивым ДПЛА при совершении маневра в условиях действия аддитивных возмущений.

Результаты вычислительного эксперимента подтвердили, что по сравнению с системой стабилизации ДПЛА с традиционным линейным ПД-регулятором система с бинарным «равносигнатурным» алгоритмом управления обеспечивает устойчивость движения при больших значениях аддитивных возмущений. Система с предложенным алгоритмом стабилизации увеличивает на 16% максимально возможное аддитивное возмущение без потери динамической устойчивости при возмущении типа «скачок», что можно считать важной характеристикой алгоритма стабилизации, особенно при необходимости совершения маневра. Сделан вывод о целесообразности применения алгоритмов бинарного управления в условиях информационной неопределенности.

Полученные в ходе выполнения теоретико-экспериментальных исследований результаты могут быть использованы при разработке систем управления ДПЛА, при обосновании тактико-технических требований к специальному алгоритмическому обеспечению систем управления ДПЛА, а также в качестве исходных данных и теоретической основы для исследования вопросов применения адаптивных методов бинарного управления нелинейными системами с переменной структурой в условиях информационной неопределенности.

Литература

1. Афанасьев П.П. Основы устройства, проектирования, конструирования и производства летательных аппаратов (дистанционно-пилотируемые летательные аппараты). М. : Изд-во МАИ, 2006. 528 с. ISBN 978-5-7035-1626-3.
2. Васильев В.В., Джуган Р.В. Отождествление беспилотных летательных аппаратов в оптико-электронной системе контроля их группового полета // Правовая информатика. 2021. № 2. С. 40—47. DOI: 10.21681/1994-1404-2020-2-40-47.
3. Зайцев А.В., Канушкин С.В. Многокритериальная стабилизация летательного аппарата на основе принципа бинарности управления // Информационные системы и процессы : сб. науч. тр. Вып. 18 / Под ред. В. М. Тютюнника. Тамбов : МИНЦ «Нобелистика», 2018. С. 37—45. ISBN 978-5-86609-220-8.
4. Зайцев А.В., Канушкин С.В. Нелинейная динамика систем управления робототехническими комплексами охранного мониторинга // Правовая информатика. 2020. № 2. С. 41—53. DOI: 10.21681/1994-1404-2020-2-41-53.
5. Зайцев А.В., Канушкин С.В. Особенности синергетического управления робототехнической системой // Труды XVI Всеросс. науч. конф. «Нейрокомпьютеры и их применение» (13 марта 2018 г.) / МГППУ. М. : МГППУ, 2018. С. 66—67.
6. Зайцев А.В., Канушкин С.В. Реализация бинарного управления в системах с параметрическими обратными связями // Труды VIII Всеросс. науч.-практ. конф. «Современное непрерывное образование и инновационное развитие» (13 апреля 2018 г.). Т. 1 / ФГАУ «ФИРО». Серпухов : МОУ «ИИФ», 2018. С. 185—187.
7. Зайцев А.В., Канушкин С.В. Оптимизационный подход в многокритериальной стабилизации беспилотных летательных аппаратов охранного мониторинга // Правовая информатика. 2020. № 3. С. 65—78. DOI: 10.21681/1994-1404-2020-3-65-78.
8. Канушкин С.В. Управление робототехническими системами охранного мониторинга в условиях неопределенности // Правовая информатика. 2019. № 2. С. 40—48. DOI: 10.21681/1994-1404-2019-2-40-48.
9. Канушкин С.В. Особенности адаптивного управления робото-техническими системами охранного мониторинга // Правовая информатика. 2020. № 2. С. 28—40. DOI: 10.21681/1994-1404-2020-2-28-40.
10. Колесников А.А. Современная прикладная теория управления. Часть III. Новые классы регуляторов технических систем. Таганрог : Изд-во ТРТУ, 2000. 656 с. ISBN 5-8327-0045-7.
11. Ловцов Д.А. Информационная теория эргасистем : тезаурус. М. : Наука, 2005. 248 с. ISBN 5-02-033779-X.
12. Ловцов Д.А. Системный анализ. Часть. 1. Теоретические основы. М. : РГУП, 2018. 224 с. ISBN 978-5-93916-701-7.
13. Ловцов Д.А. Информационная теория эргасистем: основные положения // Правовая информатика. 2019. № 3. С. 4—20. DOI: 10.21681/1994-1404-2019-3-04-20.
14. Ловцов Д.А. Информационная теория эргасистем : монография. М. : РГУП, 2021. 314 с. ISBN 978-5-93916-887-8.

15. Ловцов Д.А., Гаврилов Д.А. Моделирование оптико-электронных систем дистанционно пилотируемых аппаратов : монография. М. : Технолож-3000, 2019. 164 с.
16. Ловцов Д.А., Карпов Д.С. Динамическое планирование навигационных определений объектов ракетно-космической техники в АСУ летными испытаниями // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2010. № 1. С. 53—60.
17. Моисеев В.С. Основы теории эффективного применения беспилотных летательных аппаратов. Казань : РИЦ «Школа», 2015. 444 с. ISBN 978-5-9905685-4-9.
18. Система угловой стабилизации / Канушкин С.В., Зайцев А.В., Волков А.В., Шишкин К.В., Сачук А.П. Патент на полезную модель № 182886 по заявке № 2018117102, приоритет от 07.05.2018.

Рецензент: **Сухов Андрей Владимирович**, доктор технических наук, профессор, старший научный сотрудник научно-производственного объединения «Специальная техника и связь», г. Москва, Российская Федерация.

E-mail: avs57@mail.ru

THE BINARITY PRINCIPLE IN CONTROLLING UNMANNED AERIAL VEHICLES UNDER THE CONDITIONS OF INFORMATION UNCERTAINTY

Aleksandr Zaitsev, Dr.Sc. (Technology), Professor at the Peter the Great Military Academy, Moscow, Russian Federation.

E-mail: ug253@mail.ru

Sergei Kanushkin, Ph.D. (Technology), Associate Professor at the Peter the Great Military Academy, Moscow, Russian Federation.

E-mail: kan.cer59@yandex.ru

Keywords: *unmanned aerial (remotely-piloted) vehicles (drones), control, information uncertainty, stabilisation, regulator, nonlinearity, saturation, manoeuvre, adaptation, binarity, stability, variable structure.*

Abstract.

Purpose of the paper: justifying the use of the binarity principle in controlling unmanned aerial vehicles (drones) used by security monitoring systems operating under the conditions of uncertainty of information on the action of various types of additive disturbances at the time of doing a manoeuvre.

Method used: a multi-faceted theoretical and applied synthesis of control based on the binarity principle using state variables of a nonlinear dynamic system simultaneously as coordinates and operators.

Results obtained: a justification is given for the need and expediency of using binary adaptive stabilisation algorithms having variable structure under the conditions of information uncertainty of control models. A nonlinear binary algorithm is developed for angular stabilisation of a variable structure with additional "equisignature" control in the phase plane sections determining mainly the controllability, stability and processing speed of the motion control system under the impact of additive disturbances. A system with the proposed stabilisation algorithm increases the maximum possible additive jump perturbation by 16% without a loss of dynamic stability.

A conclusion is made on the expediency of using control algorithms based on the binarity principle for controlling security monitoring system drones.

References

1. Afanas'ev P.P. Osnovy ustroystva, proektirovaniia, konstruirovaniia i proizvodstva letatel'nykh apparatov (distantionno-pilotiruemye letatel'nye apparaty). M. : Izd-vo MAI, 2006. 528 pp. ISBN 978-5-7035-1626-3.
2. Vasil'ev V.V., Dzhugan R.V. Otozhdestvlenie bespilotnykh letatel'nykh apparatov v optiko-elektronnoi sisteme kontrolya ikh gruppovogo poleta. Pravovaia informatika, 2021, No. 2, pp. 40-47. DOI: 10.21681/1994-1404-2020-2-40-47.
3. Zaitsev A.V., Kanushkin S.V. Mnogokriterial'naia stabilizatsiia letatel'nogo apparata na osnove printsipa binarnosti upravleniia. Informatsionnye sistemy i protsessy : sb. nauch. tr., vyp. 18, pod red. V. M. Tiutiunnika. Tambov : MINTS "Nobelistika", 2018, pp. 37-45. ISBN 978-5-86609-220-8.

4. Zaitsev A.V., Kanushkin S.V. Nelineinaya dinamika sistem upravleniya robototekhnicheskimi kompleksami okhrannogo monitoringa. *Pravovaya informatika*, 2020, No. 2, pp. 41-53. DOI: 10.21681/1994-1404-2020-2-41-53 .
5. Zaitsev A.V., Kanushkin S.V. Osobennosti sinergeticheskogo upravleniya robototekhnicheskoi sistemoi. *Trudy XVI Vseross. nauch. konf. "Neirokomp'yutery i ikh primeneniye"* (13 marta 2018 g.), MGPPU. M. : MGPPU, 2018, pp. 66-67.
6. Zaitsev A.V., Kanushkin S.V. Realizatsiya binarnogo upravleniya v sistemakh s parametricheskimi obratnymi svyaziyami. *Trudy VIII Vseross. nauch.-prak. konf. "Sovremennoye nepreryvnoye obrazovanie i innovatsionnoye razvitiye"* (13 aprelya 2018 g.). T. 1, FGAU "FIRO". Serpukhov : MOU "IIF", 2018, pp. 185-187.
7. Zaitsev A.V., Kanushkin S.V. Optimizatsionnyi podkhod v mnogokriterial'noi stabilizatsii bespilotnykh letatel'nykh apparatov okhrannogo monitoringa. *Pravovaya informatika*, 2020, No. 3, pp. 65-78. DOI: 10.21681/1994-1404-2020-3-65-78 .
8. Kanushkin S.V. Upravlenie robototekhnicheskimi sistemami okhrannogo monitoringa v usloviyakh neopredelennosti. *Pravovaya informatika*, 2019, No. 2, pp. 40-48. DOI: 10.21681/1994-1404-2019-2-40-48 .
9. Kanushkin S.V. Osobennosti adaptivnogo upravleniya robo-tekhnicheskimi sistemami okhrannogo monitoringa. *Pravovaya informatika*, 2020, No. 2, pp. 28-40. DOI: 10.21681/1994-1404-2020-2-28-40 .
10. Kolesnikov A.A. *Sovremennaya prikladnaya teoriya upravleniya. Chast' III. Nove klassy regulirovateley tekhnicheskikh sistem*. Taganrog : Izd-vo TRTU, 2000. 656 pp. ISBN 5-8327-0045-7.
11. Lovtsov D.A. *Informatsionnaya teoriya ergasistem : tezaurus*. M. : Nauka, 2005. 248 pp. ISBN 5-02-033779-X.
12. Lovtsov D.A. *Sistemnyi analiz. Chast' 1. Teoreticheskie osnovy*. M. : RGUP, 2018. 224 pp. ISBN 978-5-93916-701-7.
13. Lovtsov D.A. Informatsionnaya teoriya ergasistem: osnovnye polozheniya. *Pravovaya informatika*, 2019, No. 3, pp. 4-20. DOI: 10.21681/1994-1404-2019-3-04-20 .
14. Lovtsov D.A. *Informatsionnaya teoriya ergasistem : monografiya*. M. : RGUP, 2021. 314 pp. ISBN 978-5-93916-887-8.
15. Lovtsov D.A., Gavrilov D.A. *Modelirovaniye optiko-elektronnykh sistem distantsionno pilotiruemyykh apparatov : monografiya*. M. : Tekhnolodzhii-3000, 2019. 164 pp.
16. Lovtsov D.A., Karpov D.S. Dinamicheskoye planirovaniye navigatsionnykh opredelenii ob'ektov raketno-kosmicheskoy tekhniki v ASU letnymi ispytaniyami. *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina*, 2010, No. 1, pp. 53-60.
17. Moiseev V.S. *Osnovy teorii effektivnogo primeneniya bespilotnykh letatel'nykh apparatov*. Kazan' : RITs "Shkola", 2015. 444 pp. ISBN 978-5-9905685-4-9.
18. Sistema uglovoi stabilizatsii / Kanushkin S.V., Zaitsev A.V., Volkov A.V., Shishkin K.V., Sachuk A.P. Patent na poleznuyu model' No. 182886 po zaiavke No. 2018117102, prioritet ot 07.05.2018.