

СИСТЕМЫ ПЕРЕМЕННОЙ СТРУКТУРЫ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ДРОНАМИ В УСЛОВИЯХ ИНФОРМАЦИОННОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Зайцев А. В.¹, Канушкин С. В.²

Ключевые слова: мониторинг, беспилотные летательные аппараты (дроны), дистанционно пилотируемые летательные аппараты, управление, стабилизация, нелинейность, насыщение, маневр, адаптация, робастность, бинарность, переменная структура, синтез, моделирование, вычислительный эксперимент, неустойчивый предельный цикл, регулятор, устойчивость, фазовый портрет.

Аннотация.

Цель работы: обоснование необходимости использования систем переменной структуры при управлении дронами 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, предписывающего использовать переменные состояния нелинейной динамической системы в качестве координат и операторов одновременно.

Результаты: обоснована необходимость и целесообразность использования систем переменной структуры с нелинейным бинарным алгоритмом «квадрантно-избирательного» управления с адаптацией в особых фазовых состояниях в условиях неопределенностей управленческих моделей; разработан нелинейный бинарный алгоритм угловой стабилизации переменной структуры с дополнительным «квадрантно-избирательным» управлением на участках фазовой плоскости, которые в основном определяют управляемость, устойчивость и быстродействие системы управления движением при действии аддитивных возмущений; экспериментально определено, что система с предложенным алгоритмом стабилизации допускает увеличение на 17,7% максимально возможного аддитивного возмущения градиентного типа без потери динамической устойчивости.

DOI: 10.21681/1994-1404-2022-2-34-48

Введение

Основными целями роботизации правоохранительных органов является придание нового качества используемым средствам в интересах повышения эффективности выполнения задач, снижения потерь и уменьшения финансовых затрат. При этом особое внимание уделяется рациональному сочетанию возможностей человека и техники [1, 7, 8].

Беспилотные летательные аппараты (дроны) играют большую роль для мониторинга площадных охраняемых объектов [3, 6—8, 16]. При условии, что возмущения ветра варьируются и часто непредсказуемы, прокладка траектории 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 настоящее время основной задачей считается определение технических путей и экономической целесообразности создания роботизированных унифицированных платформ, а также решение вопросов интеграции робототехнических комплексов (РТК) в системы управления и связи [10]. Достигнутый уровень развития технологий робототехники позволяет реализовать системный подход [11] в области роботизации и осуществить поэтапный переход от создания отдельных образцов к разработке семейства РТК [2, 7].

В реальных условиях информация о дроне и действующих на него возмущениях всегда неполна. «Информационная неопределенность» — это ситуация, при которой полностью или частично отсутствует информация о вероятных будущих событиях, т. е. неопределенность — это то, что не поддается оценке.

¹ Зайцев Александр Владимирович, доктор технических наук, профессор, профессор Военной академии имени Петра Великого, г. Москва, Российская Федерация.

E-mail: ug253@mail.ru

² Канушкин Сергей Владимирович, кандидат технических наук, доцент, доцент Военной академии имени Петра Великого, г. Москва, Российская Федерация.

E-mail: kan.cer59@yandex.ru

Если априорной информации достаточно для решения задачи синтеза управления (стабилизирующего оператора) дрона, т. е. информация точна и допускаются лишь малые отклонения от модели линейного оператора, а внешних сил — от их модели, и кроме того, цели регулирования заданы не очень «жестко», то для синтеза вполне применимы классические методы синтеза. Если изменения стабилизирующего оператора дрона происходят интенсивно, и к тому же неконтролируемым образом, имеются ограничения на фазовые переменные и управление, то традиционные методы синтеза стабилизирующих регуляторов неприменимы и следует искать новые подходы к синтезу управления в таких сложных условиях.

Архитектура интеллектуальной системы управления

Особенностью построения систем управления мобильных роботов является то, что они, как правило, строятся по иерархическому многоуровневому принципу. При повышении иерархического ранга подсистемы повышается степень ее интеллектуальности. Верхним звеном данной иерархии является система управления поведением. Затем следует система управления движением. Системы управления исполнительными механизмами представляют собой низшие звенья этой иерархии. Во многом возможности робота определяются свойствами *информационно-измерительной системы*, которая, безусловно, должна обладать элементами интеллекта³ [8—12].

РТК представляют собой многосвязные многомерные нелинейные динамические объекты. Для создания высокоэффективных *систем управления* РТК 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. У дронов («беспилотников») скорость ветра часто находится в диапазоне 40—60% воздушной скорости. Важно понимать, что ветер оказывает на дроны значительно большее воздействие, чем на крупные традиционные летательные аппараты, воздушная скорость которых обычно намного больше, чем скорость ветра.

Дроны могут обладать разной степенью автономности — от управляемых дистанционно до полностью автоматических. *Дистанционно пилотируемый летательный аппарат* (ДПЛА) — летательный аппарат, пилотируемый человеком (пилотом, оператором), нахо-

дящимся на пункте управления, располагающемся на Земле, на воздушном или космическом аппарате [14].

Для обозначения ДПЛА иногда употребляется также термин «телепilotируемый летательный аппарат». В отличие от *телеуправляемого* летательного аппарата ДПЛА управляется оператором не эпизодически, а непрерывно, в зависимости от конкретной обстановки в районе его полета и, как правило, оборудуется телевизионной камерой с переменным фокусным расстоянием [15]. ДПЛА является дальнейшим развитием телеуправляемого летательного аппарата, который управляется в основном бортовой автоматической системой.

Основным преимуществом ДПЛА является существенно меньшая стоимость их создания и эксплуатации, а недостатком — уязвимость систем дистанционного управления.

Согласно Правилам использования воздушного пространства Российской Федерации, беспилотный летательный аппарат (дрон) определяется как *«летательный аппарат, выполняющий полет без пилота (экипажа) на борту и управляемый в полете автоматически, оператором с пункта управления или сочетанием указанных способов»*⁴.

Независимо от способа управления положением ДПЛА, система управления маршрутом определяет условия совершения маневра между точками заданной траектории полета. *Автопилот* относится к системам управления низкого уровня, который поддерживает постоянными значения углов крена, тангажа и рыскания, скорости, высоты и курсового направления полета.

Современные системы стабилизации (автопилот) дронов становятся все более и более сложными, так как расширяется круг задач, решаемых ими. При возрастании сложности систем, уровень которых оценивается объемом циркулирующей в них информации, следует использовать, создавать и развивать наиболее *интеллектуальные* компоненты и системы управления. Создание систем интеллектуального управления требует учета основных *принципов*: обмена информацией и открытости систем интеллектуального управления для самоорганизации.

РТК имеют ряд сенсоров (устройств получения видовой информации) для восприятия окружающей его среды, ряд исполнительных устройств (эффекторов) для воздействия на среду и систему управления, которая позволяет роботу совершать целенаправленные и полезные действия. В структуре имеется информационно-измерительная система, которая должна обладать некоторыми интеллектуальными возможностями, и интерфейс с оператором. Устройство информационного обмена обеспечивает распределение видовой информации между бортовыми источниками

³ Методы классической и современной теории автоматического управления. Т. 3: Синтез регуляторов систем автоматического управления / под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 616 с. ISBN 5-7038-2194-0; Методы современной классической теории автоматического управления : учебник в 5-ти тт. Т. 5. Методы современной теории автоматического управления / под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова. М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2004. 784 с. ISBN 5-7038-2193-2.

⁴ Постановление Правительства РФ от 11 марта 2010 г. № 138 (ред. от 12.07.2016) «Об утверждении Федеральных правил использования воздушного пространства Российской Федерации» // СПС «КонсультантПлюс».

видовой информации, передатчиком радиоприемной аппаратуры и бортовым устройством хранения видовой информации. Это устройство также обеспечивает информационный обмен между всеми функциональными устройствами, входящими в состав целевой нагрузки комплекса по выбранному интерфейсу. Таким образом, ДПЛА представляют собой информационную систему и обладают всеми ее особенностями.

Информационная система — система, предназначенная для хранения, поиска и обработки информации, и соответствующие организационные ресурсы (человеческие, технические, финансовые и др.), которые обеспечивают и распространяют информацию⁵ [10].

Многоуровневая архитектура интеллектуальной системы управления, как правило, состоит из трех уровней: концептуального, информационного и операционного. Система, построенная по такой архитектуре, управляет поведением сложных технических объектов в условиях автономного и коллективного взаимодействия. Концептуальный уровень является ответственным за реализацию высших интеллектуальных функций. Информационный и операционный уровни содержат модули, поддерживающие разные интеллектуальные и информационные процедуры и трансформирующие их в управление.

На *информационном* уровне управления решаются задачи информационного моделирования, основными из которых являются: построение информационной ситуации и информационной позиции⁶ [9—12], которые соответствуют компоненту. На информационном уровне управления решаются задачи построения информационной конструкции, которая является отражением системы правил концептуального уровня. Важно заметить различие между интеллектуальными и информационными технологиями. Информационные технологии выполняют функции поддержки интеллектуального управления. Основную роль играют интеллектуальные технологии принятия решений. Они дают возможность наряду с решением или в ходе получения решения осуществлять поиск новых знаний и накопления интеллектуальных ресурсов. Информационные технологии создают только информационные ресурсы. Это означает, что знания, формализованные в явном виде, будучи освоенными, могут стать частью опыта и частью базы знаний и быть использованы для решения задач принятия решений⁷.

⁵ Международный стандарт ISO/IEC 2382:2015 Information technology — Vocabulary.

⁶ 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. ISBN5-02-015149-1.

⁷ ГОСТ Р 53622-2009. Информационные технологии. Информационно-вычислительные системы. Стадии и этапы жизненного цикла, виды и комплектность документов.

Анализ комплексной задачи обеспечения качества управления дроном в условиях действия возмущений

При наличии постоянного ветра в окружающей среде дронам 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 крена, тангажа и рыскания (курсовой) определяются относительно системы координат дрона. Линейные скорости и угловые скорости дрона 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 дрона [1, 2—8, 16]. При дистанционном пилотировании появилась необходимость совершать маневры, достаточные для отработки сигнала управления, без потери *устойчивости* [10] дрона. В таких условиях традиционные методы управления оказываются ограниченными в применении, так как не обеспечиваются требуемое качество. На реальные характеристики контура управления часто накладываются ограничения, связанные с насыщением. Тот факт, что элероны (аэродинамические органы управления) имеют физические ограничения на отклонение, предполагает, что скорость крена дрона будет ограничена⁸.

Автопилот является системой, используемой для управления полетом без помощи пилота. Для дрона автопилот является системой полного управления во время всех фаз полета. Тогда как некоторые функции управления полетом могут находиться на наземной станции управления, автопилотная часть системы управления дрона находится на борту. Основной целью автопилота является управление положением дрона в инерциальной системе и ориентацией в пространстве. Для большинства представляющих интерес маневров, совершаемых в полете, автопилоты, разработанные на основе предположения о динамике развязанных движений, дают хорошие результаты⁹.

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.

На практике не всегда возможно точно разработать *математическую модель* интересующего нас объекта.

⁸ 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.

⁹ Системы управления летательными аппаратами : учебник / под общ. ред. Г.Н. Лебедева. М. : Изд-во МАИ, 2007. 756 с. ISBN 978-5-7035-1853-3.

Изменения условий окружающей среды функционирования системы может существенно влиять на конкретное значение реальных параметров модели и структуру. Поэтому с практической точки зрения выглядит привлекательным найти обобщенную структуру регулятора для наиболее широкого класса нелинейных объектов. При этом в большинстве случаев регулятор реализует отображение вектора состояний в пространство допустимых управлений.

Дрон 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 ветер и прочие возмущения. 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.

Аэродинамические коэффициенты называют производными устойчивости, так как их значения определяют статическую и динамическую устойчивость дрона. *Статическая* устойчивость относится к направлению аэродинамических моментов по мере того, как дрон отклоняется от своих номинальных условий полета. *Динамическая* устойчивость связана с динамическим поведением дрона в ответ на возмущения. Если возмущение воздействует на дрон и при этом со временем отклик дрона демпфируется, то считается, что дрон динамически устойчив.

Большинство летательных аппаратов разрабатываются статически устойчивыми. Однако в некоторых условиях полета центр масс аппарата смещается, и дрон 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 систем переменной структуры при управлении динамическими объектами в условиях неопределенности

В условиях неопределенности первостепенную роль приобретают алгоритмы управления, позволяющие достигать цели управления по возможности за конечное время и обладающие свойством *устойчивости* по отношению к изменениям параметров и действию возмущений. Методы адаптивного управления в условиях информационной неопределенности являются одними из часто используемых путей решения задач

управления сложными динамическими объектами. Адаптивными считаются системы управления, которые в процессе эксплуатации при изменении параметров объектов или характеристик внешних воздействий самостоятельно, без участия человека изменяют параметры регулятора, его структуру, настройку или регулирующие воздействия для поддержания оптимального режима работы объекта [6—9].

Многочисленные обзоры по теории адаптивных систем имеют разнообразные варианты классификации. В некоторых источниках¹⁰ различают три класса адаптивных систем управления (рис. 1):

- 1) самоорганизующиеся системы — в них может автоматически изменяться структура управляющих устройств;
- 2) самонастраивающиеся системы — в них могут автоматически изменяться параметры управляющих устройств;
- 3) самообучающиеся системы — системы, в которых могут автоматически изменяться цели и критерии управления.

Теория адаптивных и робастных систем изучает методы управления неопределенными объектами, для которых являются неприменимыми методы классической теории управления.

Самонастраивающиеся системы делятся на два подкласса: поисковые и беспоисковые. Простейшими *поисковыми* системами являются большинство экстремальных систем, в которых недостаток априорной информации восполняется за счет текущей информации, получаемой в виде реакции объекта на искусственно вводимые поисковые (пробные, тестовые) воздействия.

Системы с адаптацией в особых фазовых состояниях используют особые режимы или свойства нелинейных систем, например режимы автоколебаний, скользящие режимы для организации контролируемых изменений динамических свойств системы управления. Специально организованные особые режимы в таких системах либо служат дополнительным источником рабочей информации об изменяющихся условиях функционирования системы, либо наделяют систему управления новыми свойствами, за счёт которых динамические характеристики управляемого процесса поддерживаются в желаемых пределах независимо от характера возникающих при функционировании изменений. Эти системы можно подразделить на релейные автоколебательные системы и адаптивные системы с переменной структурой.

В системах с переменной структурой за счет нелинейного сочетания различных линейных структур удается организовать специфическое вырожденное движение — *скользящий* режим, или режим перехода от движения, соответствующего одной линейной струк-

¹⁰ Методы современной классической теории автоматического управления : учебник в 5-ти тт. Т. 5. Методы современной теории автоматического управления / под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова. М. : Изд-во МГТУ им. Баумана, 2004. 784 с. ISBN 5-7038-2193-2.



Рис. 1. Классификация адаптивных систем управления

туре, к движению, соответствующему другой линейной структуре, с помощью логического переключения связей в системе в зависимости от ее фазового состояния.

Теория бинарных систем является базой одного из направлений развития принципов адаптивного управления. Одним из таких принципов является использование местных глубоких обратных связей, 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 методологический приём. Переменную называют координатой, если над ней выполняется 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 составляет существо *принципа бинарности* [2—6].

В ходе полета дрона может появиться необходимость совершать маневры. В таких условиях традиционные методы управления оказываются ограниченными в применении, так как не обеспечиваются требуемое качество. Сочетание принципа *бинарности* с принципом *регулирования по отклонению* позволяет получить системы переменной структуры с адаптацией в особых фазовых состояниях. Классическое ПД-управление («пропорционально-дифференциальное») является довольно упрощенной реализацией управления по ошибке на основе обратной связи. ПД-управление широко применяется, даже когда информация о динамике объекта минимальна или полностью отсутствует [9—12].

Но несмотря на очевидную простоту и легкость настройки ПД-управления, стоит отметить его фундамен-

тальные ограничения, которые возникают при появлении большого количества требований к возможностям системы управления. Для того чтобы избавиться от этих проблем при управлении, рассмотрим *системы с переменной структурой* (СПС)¹¹.

Система, которая оптимальна по какому-либо одному критерию, часто не имеет оптимальных характеристик по другому. Многие системы также работают в нескольких режимах, например, отработки больших скачкообразных воздействий и слежения за медленно изменяющимися входными сигналами¹². Один из способов решения данной задачи — создание СПС, которую можно создать *субоптимальной* по нескольким критериям. Под СПС можно понимать систему, реализующую несколько законов управления, переключающихся в процессе функционирования и тем самым обеспечивающих более высокие показатели качества её работы. Или иначе: 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 воздействия¹³.

Синтез нелинейного бинарного алгоритма «квадрантно-избирательного» управления переменной структуры с адаптацией в особых фазовых состояниях

Методы синтеза адаптивных систем можно условно разделить на эвристические и теоретические. В эвристических методах отсутствует строгое обоснование устой-

¹¹ 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.

¹² Там же.

¹³ Там же.

чивости 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.

Реальные системы стабилизации всегда нелинейны. Они содержат 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.

С учетом ограниченной мощности рулевого привода для обеспечения устойчивости движения при увеличенных возмущениях необходимо во *втором и четвертом* квадрантах (рис. 2) уменьшать угол отклонения управляющих органов и, соответственно, уменьшать угловую скорость и угловое ускорение. Следовательно, системы переменной структуры с адаптацией в особых фазовых состояниях управления следует применять в *первом и третьем* квадрантах фазовой плоскости.



Рис. 2. Схема бинарного управления системы переменной структуры с адаптацией в особых состояниях на фазовой плоскости

Таким образом, реализация СПС с адаптацией в особых фазовых состояниях возможна при применении принципа бинарного управления в условиях неопределенности (см. рис. 2). Решение задачи будем искать в классе бинарных систем [2—6]. Теория бинарного управления отражает идеологию единства процессов самоорганизации и управления, т. е. представляет собой своего рода симбиоз кибернетики и синергетики. 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 его оценкам на принцип регулирования по отклонению для компенсации операторных (параметрических) возмущений в операторе объекта регулирования.

Предлагаемый алгоритм использует переменные состояния нелинейной динамической системы как координаты, и те же самые переменные — как операторы. Двойственное толкование переменных позволяет получить *робастный бинарный алгоритм управления* следующего вида:

$$U = k_{\psi}\psi + k_{\dot{\psi}}\dot{\psi} + U_{\text{бин.арн.}}'$$

где $U_{\text{бин.арн.}}$ — бинарная составляющая управления.

Изменение бинарной составляющей алгоритма «квадрантно-избирательного» управления с адаптацией в особых фазовых состояниях можно представить с помощью следующих выражений на различных квадрантах фазовой плоскости (см. рис. 2).

На участке *первого* квадранта фазовой плоскости: $\{(\psi), (\dot{\psi})\}$,

$$\begin{aligned} U_{\text{бин.1квадрант}} &= -\text{Sign}(\psi) \cdot [(\psi) \cdot (\dot{\psi}) + (\psi) \cdot (\dot{\psi}) \cdot \text{Sign}\{(\psi) \cdot (\dot{\psi})\}] \\ &= -(1) \cdot [(\psi\dot{\psi}) + (\psi\dot{\psi}) \cdot (1)] = -(1) \cdot [(\psi\dot{\psi}) + (\psi\dot{\psi})] = -2\psi\dot{\psi}. \end{aligned}$$

На участке *второго* квадранта фазовой плоскости: $\{(-\psi), (\dot{\psi})\}$,

$$\begin{aligned} U_{\text{бин.2квадрант}} &= -\text{Sign}(-\psi) \cdot [(-\psi) \cdot (\dot{\psi}) + (-\psi) \cdot (\dot{\psi}) \cdot \text{Sign}\{(-\psi) \cdot (\dot{\psi})\}] \\ &= -(-1) \cdot [(-\psi\dot{\psi}) + (-\psi\dot{\psi}) \cdot (-1)] = -(-1) \cdot [(-\psi\dot{\psi}) + (\psi\dot{\psi})] \end{aligned}$$

На участке *третьего* квадранта фазовой плоскости: $\{(-\psi), (-\dot{\psi})\}$,

$$\begin{aligned} U_{\text{бин.3квадрант}} &= -\text{Sign}(-\psi) \cdot [(-\psi) \cdot (-\dot{\psi}) + (-\psi) \cdot (-\dot{\psi}) \cdot \text{Sign}\{(-\psi) \cdot (-\dot{\psi})\}] \\ &= -(-1) \cdot [(\psi\dot{\psi}) + (\psi\dot{\psi}) \cdot (1)] = 2\psi\dot{\psi}. \end{aligned}$$

На участке *четвертого* квадранта фазовой плоскости: $\{(\psi), (-\dot{\psi})\}$,

$$U_{\text{бин.4кв.}} = -\text{Sign}(\psi) \cdot [(\psi) \cdot (-\dot{\psi}) + (\psi) \cdot (-\dot{\psi}) \cdot \text{Sign}\{(\psi) \cdot (-\dot{\psi})\}] \\ = -(1) \cdot [(-\psi\dot{\psi}) + (-\psi\dot{\psi}) \cdot (-1)] = -(1) \cdot [(-\psi\dot{\psi}) + (\psi\dot{\psi})] = 0.$$

Бинарная составляющая управления определяется следующим образом:

$$U_{\text{бин.арн.}} = -\text{Sign}(\psi) \cdot [(\psi\dot{\psi}) + (\psi\dot{\psi}) \text{Sign}(\psi\dot{\psi})] = \begin{cases} -2\psi\dot{\psi} & \text{в 1 квадранте;} \\ 0 & \text{во 2 квадранте;} \\ 0 & \text{в 4 квадранте;} \\ 2\psi\dot{\psi} & \text{в 3 квадранте.} \end{cases}$$

$$\psi \cdot \dot{\psi} = \begin{cases} \psi\dot{\psi} > 0 & \text{в 1 и 3 квадранте;} \\ \psi\dot{\psi} < 0 & \text{во 2 и 4 квадранте.} \end{cases}$$

$$\text{Sign}(\psi\dot{\psi}) = \begin{cases} +1 & \text{в 1 и 3 квадранте;} \\ -1 & \text{во 2 и 4 квадранте.} \end{cases}$$

$$\psi\dot{\psi} \text{Sign}(\psi\dot{\psi}) = \begin{cases} \psi\dot{\psi} & \text{в 1 и 3 квадранте;} \\ -\psi\dot{\psi} & \text{во 2 и 4 квадранте.} \end{cases}$$

$$\psi\dot{\psi} + \psi\dot{\psi} \text{Sign}(\psi\dot{\psi}) = \begin{cases} +2\psi\dot{\psi} & \text{в 1 и 3 квадранте;} \\ 0 & \text{во 2 и 4 квадранте.} \end{cases}$$

При этом, как видно, в первом и третьем квадрантах создается дополнительное управление, что обуславливает повышение быстродействия системы угловой стабилизации дрона в процессе полета на участке траектории при действии внешних возмущений. Основной положительный эффект достигается за счет того, что в первом и третьем квадрантах фазовой плоскости сигнал управления уменьшается на величину $(\psi\dot{\psi})$, следовательно, уменьшается угол

отклонения управляющих органов и, соответственно, уменьшается угловая скорость и угловое ускорение, т. е. движение в данных квадрантах во многом определяет не только устойчивость, но и качество управления.

Принцип формирования бинарной составляющей алгоритма «квадрантно-избирательного» 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 квадранта на фазовой плоскости			
	1	2	3	4
ψ	+	+	+	+
$\dot{\psi}$	+	+	—	—
Величина бинарной составляющей	$-2\psi\dot{\psi}$	0	$2\psi\dot{\psi}$	0

Изменение во времени параметров объекта управления принципиально не меняет описанной картины, так как уравнения движения при этом остаются прежними. Таким образом, использование свойств бинарности при управлении дронами позволяют получить робастное управление при действии как аддитивных, так и мультипликативных возмущений.

Конечное уравнение бинарной составляющей с дополнительным «квадрантно-избирательным» управлением переменной структуры имеет вид [17]:

$$U_{\text{бин.арн.}} = -\text{Sign}(\psi) \cdot [\psi\dot{\psi} + (\psi\dot{\psi}) \text{Sign}(\psi\dot{\psi})].$$

На рис. 3 представлены временные диаграммы, поясняющие принцип формирования бинарной составляющей алгоритма «квадрантно-избирательного» управления с адаптацией в особых фазовых состояниях.

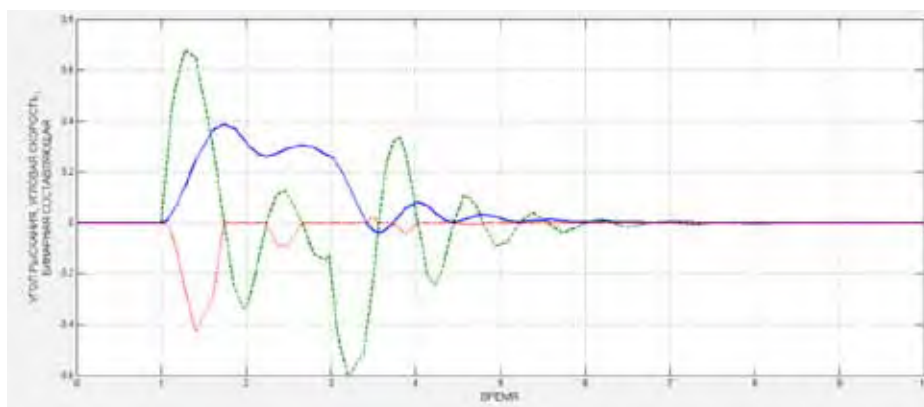


Рис. 3. Временные диаграммы изменения угла рыскания (синий сплошной график), угловой скорости (зеленый график) и бинарной составляющей алгоритма стабилизации (красный график)

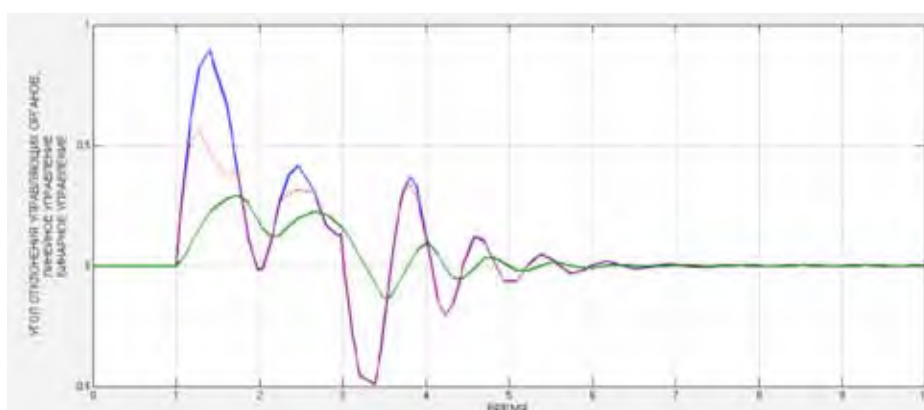


Рис. 4. Временные диаграммы изменения угла отклонения управляющих органов (зеленый сплошной график), линейного управления (синий график) и бинарного управления с «квадрантно-избирательной» адаптацией в особых фазовых состояниях (красный график)

Анализ графиков переходных процессов (рис. 3, рис. 4) показывает, что бинарная составляющая управления появляется только в первом и третьем квадрантах фазовой плоскости, уменьшая сигнал управления на величину $(\psi\dot{\psi})$. При этом уменьшается угол отклонения управляющих органов и, соответственно, уменьшается угловая скорость и угловое ускорение.

Вычислительный эксперимент по оценке устойчивости и качества движения нелинейной системы стабилизации дрона при градиентном возмущении

Вычислительный эксперимент осуществлен в среде MATLAB Simulink путем моделирования динамики канала стабилизации дрона по углу рыскания. Проведен сравнительный анализ динамики системы стабилизации дрона с традиционным линейным ПД-регулятором и предлагаемым нелинейным бинарным алгоритмом «квадрантно-избирательного» управления с адаптацией в особых фазовых состояниях, при прочих одинаковых условиях. В качестве типовых воздействий принимается градиентное возмущение.

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 (рис. 5).

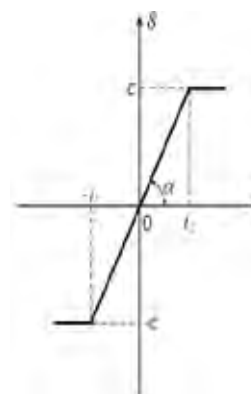


Рис. 5. Нелинейная скоростная статическая характеристика рулевого привода

Характеристика элемента с ограничением выходной координаты (зоной насыщения) описывается выражением:

$$\dot{\delta} = \begin{cases} \dot{\delta}^{\max} \operatorname{sign}(\dot{\delta}) & \text{при } |i| \leq i_2, \\ k i & \text{при } |i| > i_2, \end{cases} \quad \operatorname{tg}(\alpha).$$

Нелинейность типа ограничения играет определяющую роль при исследовании нелинейной динамики углового движения дрона.

При решении задачи исследования рассмотрен наиболее трудный случай и принимаются допущения, что: дрон является жестким твердым телом; требуемые величины диапазонов определяются максимальными

значениями фазовых координат; применим метод «замороженных» коэффициентов (влиянием параметрических возмущений пренебрегаем).

При исследовании динамики углового движения дрона при действии градиентного возмущения в качестве *исходных данных* были взяты следующие характеристики: длительность импульса 1,3 с, диапазон изменения амплитуды импульса $[1 \text{ (1/c}^2); -0,2 \text{ (1/c}^2)]$, амплитуда импульса $1 * K \text{ (c}^{-2})$, где K — коэффициент, задающий амплитуду градиентного возмущения (рис. 8, $K = 0,7831$). Вид аддитивного возмущения *Signal 1*, подаваемого на вход системы угловой стабилизации, изображен на рис. 6.



Рис. 6. График градиентного возмущения

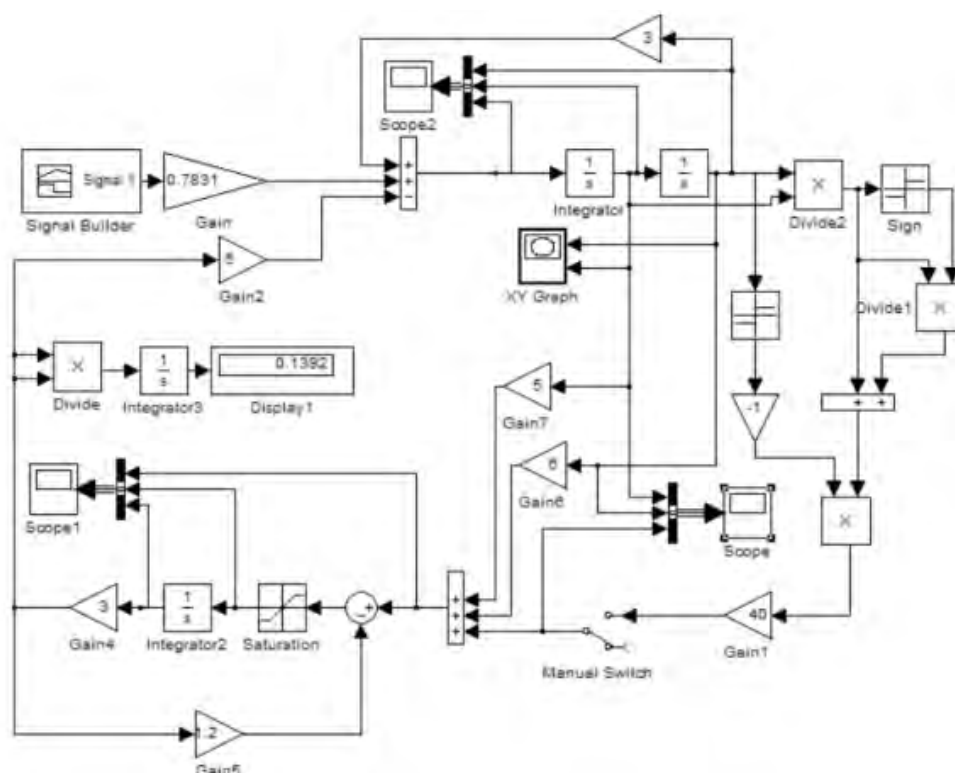


Рис. 7. Схема моделирования системы с градиентным возмущением и линейным ПД-регулятором

Постепенно увеличивая амплитуду градиентного возмущения (K), было определено максимальное значение возмущения аддитивного типа, которое способна выдержать система стабилизации, оставаясь при этом устойчивой (неустойчивый предельный цикл) (рис. 7).

Структурная схема модели с предлагаемым нелинейным бинарным алгоритмом «квадрантно-избирательного» управления с адаптацией в особых фазовых состояниях, в котором дополнительное управление формируется только в первом и третьем квадрантах, представлена на рис. 9.

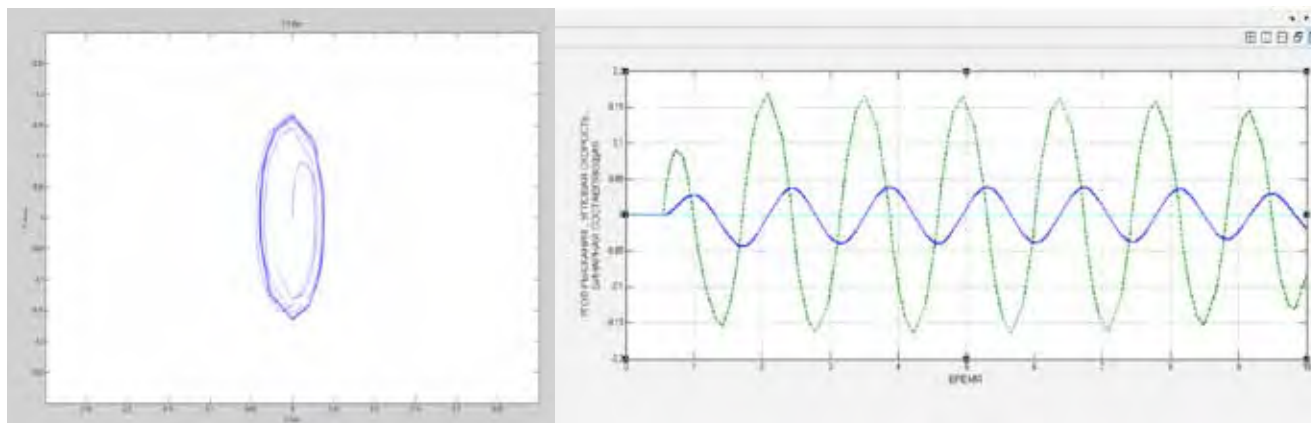


Рис. 8. Фазовый портрет и графики изменения угла рыскания (синий) и угловой скорости (зеленый) при максимально возможном градиентном возмущении $K=0,7831$ и линейным ПД-регулятором

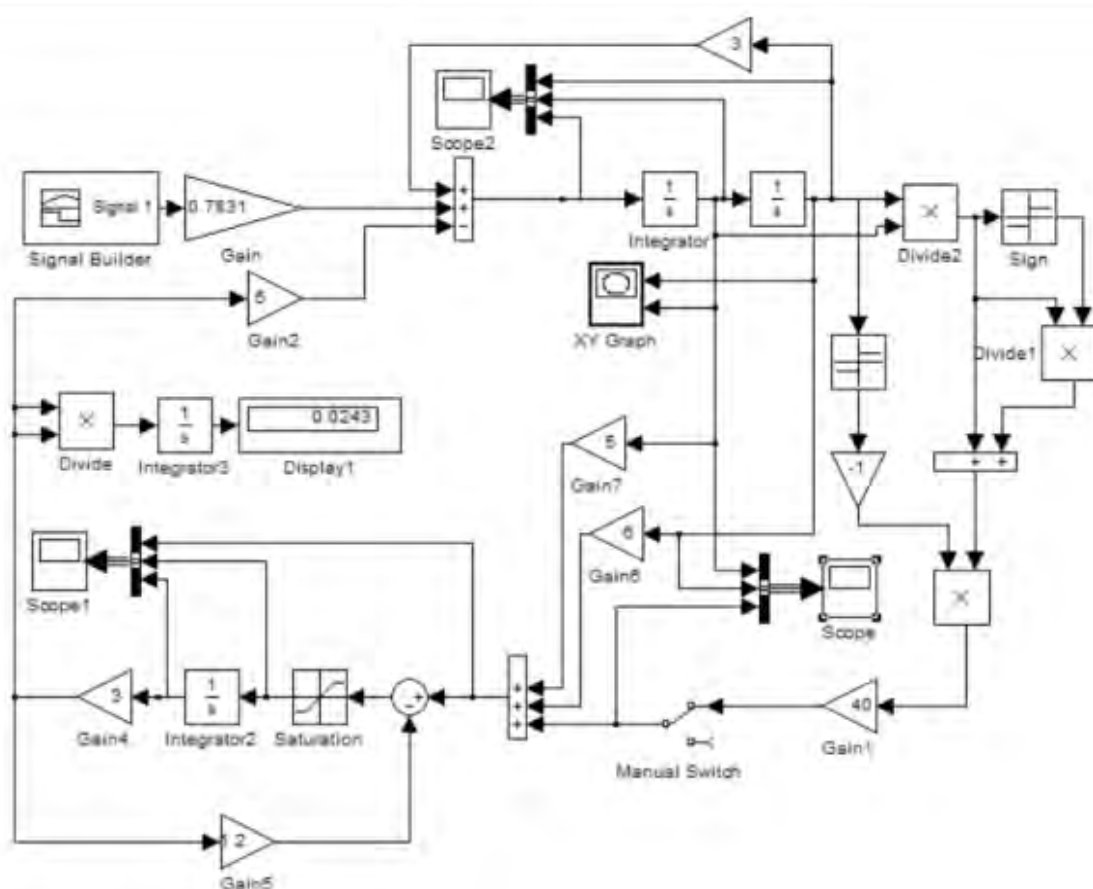


Рис. 9. Схема моделирования системы с градиентным возмущением и бинарным регулятором

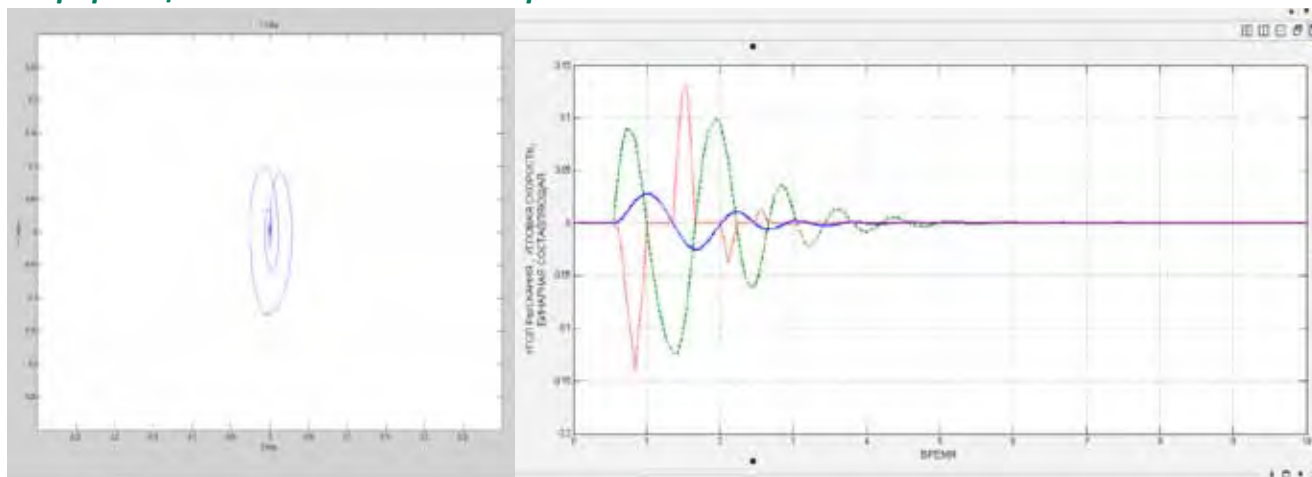


Рис. 10. Фазовый портрет и графики изменения угла рыскания (синий), угловой скорости (зеленый) и бинарной составляющей управления (красный) при максимально возможном градиентном возмущении $K = 0,7831$ и бинарном регуляторе

При амплитуде градиентного возмущения $K = 0,7831$ динамика системы угловой стабилизации с бинарным регулятором остается устойчивой (рис. 10).

Постепенно увеличивая амплитуду градиентного возмущения (K), было определено максимальное зна-

чение возмущения аддитивного градиентного типа, которое способна выдержать система стабилизации, оставаясь при этом устойчивой (неустойчивый предельный цикл) (рис. 11 и 12).

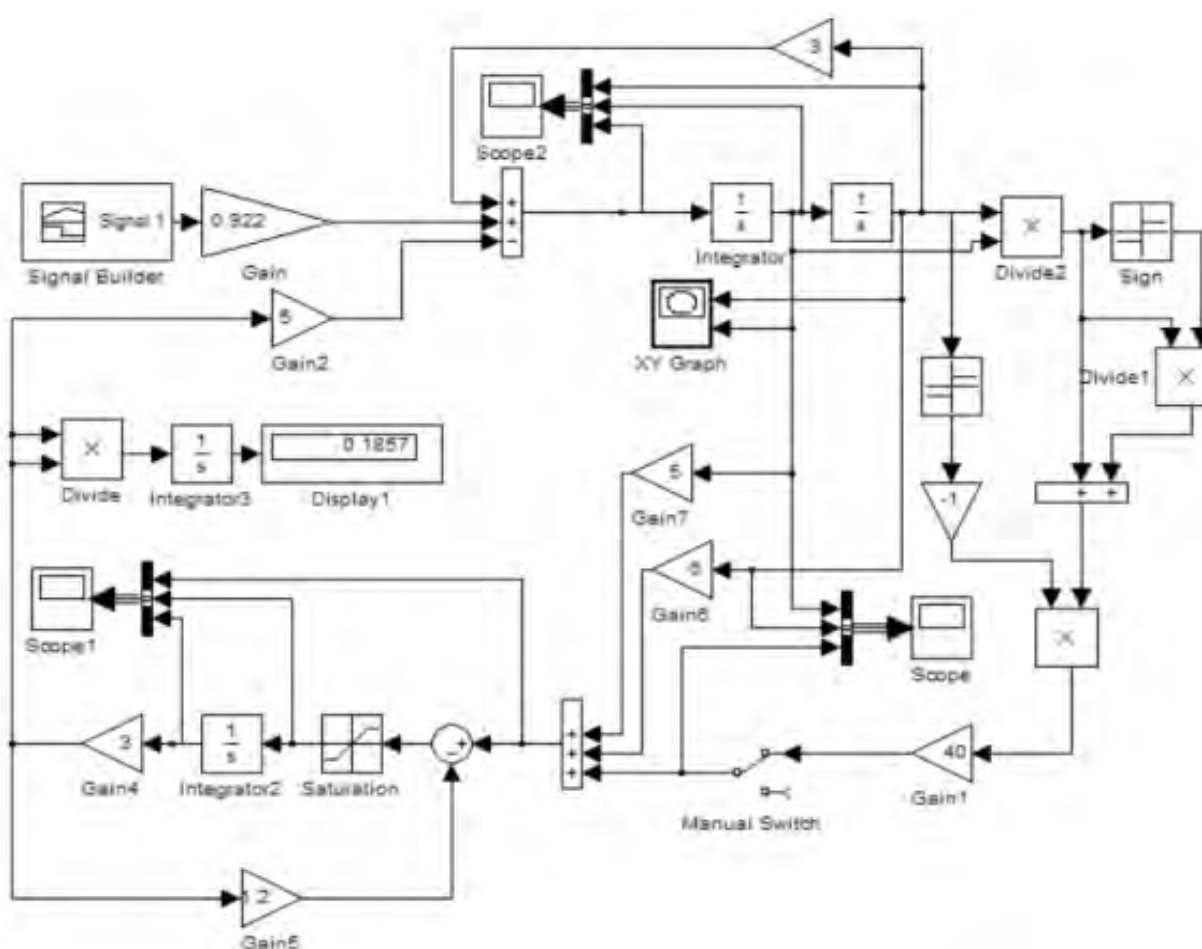


Рис.11. Схема моделирования системы с максимально возможным градиентным возмущением и бинарным регулятором

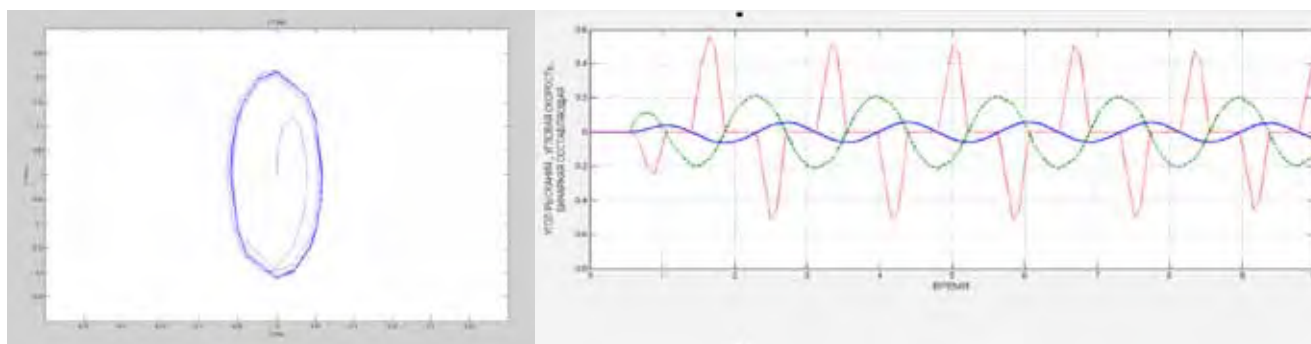


Рис. 12. Фазовый портрет и графики изменения угла рыскания (синий), угловой скорости (зеленый) и бинарной составляющей управления (красный) при максимально возможном градиентном возмущении $K = 0,922$ и бинарном регуляторе

Предлагаемая система с бинарным регулятором выходит на границу устойчивости движения (неустойчивый предельный цикл) при величине аддитивного градиентного возмущения $K = 0,922$ (см. рис. 11 и 12).

Исследования систем при допустимой величине амплитуды градиентного возмущения $K = 0,75$

показали, что система переменной структуры с нелинейным бинарным алгоритмом «квадрантно-избирательного» управления с адаптацией в особых фазовых состояниях имеет большее быстродействие по сравнению с системой с линейным ПД-регулятором (рис. 13).

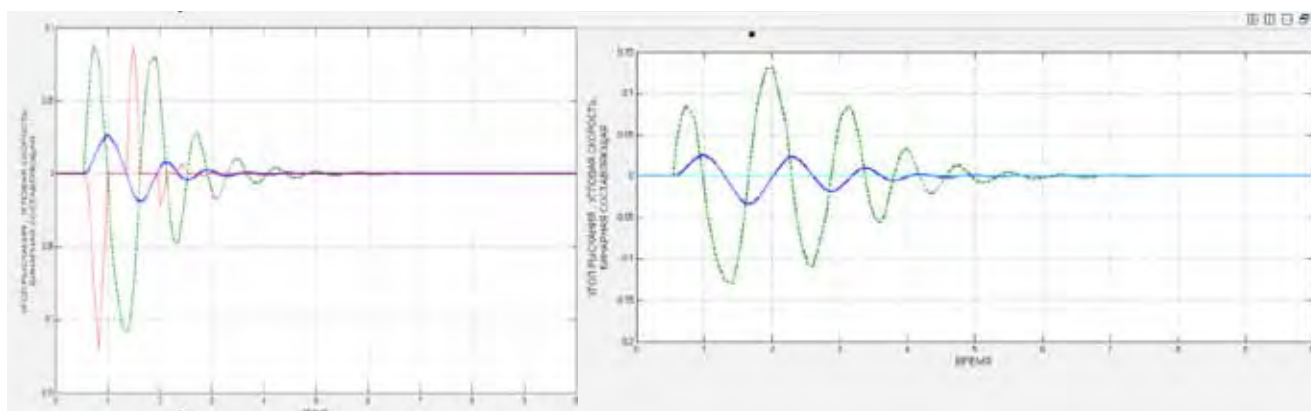


Рис. 13. Графики изменения угла рыскания (синий), угловой скорости (зеленый) и бинарной составляющей управления (красный) при допустимой величине амплитуды градиентного возмущения $K = 0,75$ с бинарным и линейным регулятором

Таблица 2

Сравнительные характеристики систем стабилизации с линейным ПД-регулятором и с бинарным регулятором переменной структуры при градиентном возмущении

	Системы с линейным ПД-регулятором	Системы с бинарным регулятором переменной структуры
Максимально возможное аддитивное градиентное возмущение без потери устойчивости	$0,7831 \text{ c}^{-2}$	$0,922 \text{ c}^{-2}$ (больше на 17,7%)
Время переходного процесса системы при амплитуде аддитивного возмущения $K = 0,75$	6,2 с	5 с (меньше на 24%)
Максимальная угловая скорость отклонения при амплитуде аддитивного возмущения $K = 0,75$	$0,14 \text{ c}^{-1}$	$0,11 \text{ c}^{-1}$ (меньше на 27%)
Расход топлива на управление при амплитуде аддитивного возмущения $K = 0,75$	0,0363	0,0199 (меньше на 82%)

Максимальное аддитивное градиентное возмущение, которое можно подать на систему угловой стабилизации с традиционным линейным ПД-алгоритмом управления без потери ее устойчивости, равно $0,7831 \text{ с}^{-2}$, в то время как в аналогичной системе переменной структуры с нелинейным бинарным алгоритмом «квадрантно-избирательного» управления с адаптацией в особых фазовых состояниях — $0,922 \text{ с}^{-2}$. Таким образом, система переменной структуры с бинарным алгоритмом управления обеспечивает устойчивость движения при больших на 17,7% аддитивных градиентных возмущениях, чем системы с линейным ПД-регулятором.

Заключение

В статье обоснована система переменной структуры с нелинейным бинарным алгоритмом «квадрантно-избирательного» управления с адаптацией в особых фазовых состояниях углового движения дрона. Основной положительный эффект достигается за счет того, что в первом и третьем квадрантах фазовой плоскости уменьшается сигнал управления на величину $(\psi\psi)$. Данный участок фазового пространства в основном определяет управляемость [13], динамическую устойчивость и быстродействие [10, 12] системы стабилизации движения дрона при совершении маневра в условиях действия аддитивных возмущений.

Результаты вычислительного эксперимента подтвердили, что по сравнению с системой стабилизации дрона с традиционным линейным ПД-регулятором система переменной структуры с бинарным алгоритмом «квадрантно-избирательного» управления с адаптацией в особых фазовых состояниях обеспечивает устойчивость движения при больших значениях аддитивных возмущений. Система с предложенным алгоритмом стабилизации допускает увеличение максимально возможного аддитивного возмущения градиентного типа на 17,7% без потери динамической устойчивости, что можно считать основной характеристикой алгоритма стабилизации, особенно при необходимости совершения маневра. Сделан вывод о целесообразности применения систем переменной структуры с алгоритмами бинарного управления в условиях информационной неопределенности.

Полученные в ходе выполнения работы результаты могут быть использованы при разработке систем управления дронами, при обосновании тактико-технических требований к специальному алгоритмическому обеспечению систем управления дронами и являются исходными данными и теоретической основой для исследования вопросов применения адаптивных методов бинарного управления нелинейными системами с переменной структурой.

Рецензент: **Тютюнник Вячеслав Михайлович**, доктор технических наук, профессор, академик РАН, Президент Международного информационного Нобелевского центра, г. Тамбов, Российская Федерация.
E-mail: vmtutyunnik@gmail.com

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. Зайцев А.В., Канушкин С.В. Многокритериальная стабилизация летательного аппарата на основе принципа бинарности управления // Информационные системы и процессы : сб. научн. тр. Вып. 18 / под ред. В. М. Тютюнника. Тамбов : МИНЦ «Нобелистика», 2018. С. 37—45. ISBN 978-5-86609-220-8.
3. 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
4. Зайцев А.В., Канушкин С.В. Особенности бинарного управления беспилотным летательным аппаратом // Труды XVI Всеросс. науч. конф. «Нейрокомпьютеры и их применение» (13 марта 2018 г.) / МГППУ. М. : МГППУ, 2018. С. 62—63.
5. 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. ISBN: 978-5-904773-19-9.
6. Зайцев А.В., Канушкин С.В. Принцип бинарности в управлении летательными аппаратами систем охранного мониторинга // Правовая информатика. 2021. № 4. С. 18—30. DOI: 10.21681/1994-1404-2021-4-18-30
7. 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
8. Канушкин С.В. Особенности адаптивного управления робототехническими системами охранного мониторинга // Правовая информатика. 2020. № 2. С. 28—40. DOI: 10.21681/1994-1404-2020-2-28-40.
9. Колесников А.А. Современная прикладная теория управления. Ч. III. Новые классы регуляторов технических систем. Таганрог : Изд-во ТРТУ, 2000. 656 с. ISBN 5-8327-0045-7.
10. Ловцов Д.А. Информационная теория эргасистем : тезаурус. М. : Наука, 2005. 248 с. ISBN 5-02-033779-X.
11. Ловцов Д.А. Системный анализ. Часть. 1. Теоретические основы. М. : РГУП, 2018. 224 с. ISBN 978-5-93916-701-7.

12. Ловцов Д.А. Информационная теория эргасистем : монография. М. : РГУП, 2021. 314 с. ISBN 978-5-93916-887-8.
13. Ловцов Д.А. Информационные показатели эффективности функционирования АСУ сложными динамическими объектами // Автоматика и телемеханика. 1994. № 12. С. 143—150.
14. Ловцов Д.А., Гаврилов Д.А. Моделирование оптико-электронных систем дистанционно пилотируемых аппаратов : монография. М. : Техноложди-3000, 2019. 164 с. ISBN 978-5-94472-036-8.
15. Ловцов Д.А., Гаврилов Д.А. Эффективная автоматизированная оптико-электронная система аэрокосмического мониторинга // Правовая информатика. 2019. № 2. С. 29—35. DOI: 10.21681/1994-1404-2019-2-29-35
16. Моисеев В.С. Основы теории эффективного применения беспилотных летательных аппаратов. Казань : РИЦ «Школа», 2015. 444 с. ISBN 978-5-9905685-4-9.
17. Патент на полезную модель № 186492 (RU) «Система угловой стабилизации» / Канушкин С.В., Зайцев А.В., Волков А.В., Шишкин К.В., Барыкин Д.А., Сачук А.П. (RU). По заявке № 2018129426/11(047405), приоритет от 10.08.2018.

VARIABLE STRUCTURE SYSTEMS IN CONTROLLING DRONES UNDER THE CONDITIONS OF INFORMATION UNCERTAINTY

Aleksandr Zaitsev¹⁴, Sergei Kanushkin¹⁵

Keywords: monitoring, unmanned aerial vehicle (UAV), drone, remotely operated aerial vehicle (ROAV), control, stabilisation, nonlinearity, saturation, manoeuvre, adaptation, robustness, binarity, variable structure, synthesis, modelling, computational experiment, unstable limit cycle, regulator, stability, phase portrait.

Abstract.

Purpose of the work: justifying the need to use variable structure systems in controlling security monitoring drones operating under the conditions of uncertainty of information on the effect of different types of additive disturbances at the time of making a manoeuvre.

Method used: a multi-faceted theoretical and applied synthesis of control based on the binarity principle which prescribes using nonlinear dynamic system state variables as co-ordinates and operators at the same time.

Results obtained. A justification is given for the need and advisability to use variable structure systems with a nonlinear binary algorithm of the so-called quadrant selective control with adaptation in special phase states under the conditions of uncertainty of control models. A nonlinear binary algorithm for angular stabilisation of a variable structure with additional quadrant selective control in those phase plane sections that mainly determine the controllability, stability and processing speed of the motion control system under the impact of additive disturbances is developed. It was found experimentally that a system with the proposed stabilisation algorithm permits a 17.7% increase in the maximum possible additive gradient type disturbance without a loss of dynamic stability.

References

1. Afanas'ev P.P. Osnovy ustroistva, proektirovaniia, konstruirovaniia i proizvodstva letatel'nykh apparatov (distsionno-pilotiruemye letatel'nye apparaty). M. : Izd-vo MAI, 2006. 528 pp. ISBN 978-5-7035-1626-3.
2. Zaitsev A.V., Kanushkin S.V. Mnogokriterial'naia stabilizatsiia letatel'nogo apparata na osnove printsipa binarnosti upravleniia. Informatsionnye sistemy i protsessy : sb. nauchn. tr. Vyp. 18, pod red. V. M. Tiutiunnika. Tambov : MINTs "Nobelistika", 2018, pp. 37–45. ISBN 978-5-86609-220-8.
3. Zaitsev A.V., Kanushkin S.V. Nelineinaia dinamika sistem upravleniia robototekhnicheskimi kompleksami okhrannogo monitoringa. Pravovaia informatika, 2020, No. 2, pp. 41–53. DOI: 10.21681/1994-1404-2020-2-41-53
4. Zaitsev A.V., Kanushkin S.V. Osobennosti binarnogo upravleniia bespilotnym letatel'nyim apparatom. Trudy XVI Vseross. nauch. konf. "Neirokomp'yutery i ikh primeneniie" (13 marta 2018 g.). MGPPU. M. : MGPPU, 2018, pp. 62–63.
5. Zaitsev A.V., Kanushkin S.V. Realizatsiia binarnogo upravleniia v sistemakh s parametricheskimi obratnymi svyaziami. Trudy VIII Vseross. nauch.-prak. konf. "Sovremennoe nepreryvnoe obrazovanie i innovatsionnoe razvitie" (13 aprelya 2018 g.). T. 1. FGAU "FIO". Serpukhov : MOU "IIF", 2018, pp. 185–187. ISBN: 978-5-904773-19-9.

¹⁴ **Aleksandr Zaitsev**, Dr.Sc. (Technology), Professor at the Peter the Great Military Academy, Moscow, Russian Federation.
E-mail: ug253@mail.ru

¹⁵ **Sergei Kanushkin**, Ph.D. (Technology), Associate Professor at the Peter the Great Military Academy, Moscow, Russian Federation.
E-mail: kan.cer59@yandex.ru

6. Zaitsev A.V., Kanushkin S.V. Printsip binarnosti v upravlenii letatel'nykh apparatami sistem okhrannogo monitoringa. *Pravovaia informatika*, 2021, No. 4, pp. 18–30. DOI: 10.21681/1994-1404-2021-4-18-30
7. Kanushkin S.V. Upravlenie robototekhnicheskimi sistemami okhrannogo monitoringa v usloviakh neopredelennosti. *Pravovaia informatika*, 2019, No. 2, pp. 40–48. DOI: 10.21681/1994-1404-2019-2-40-48
8. Kanushkin S.V. Osobennosti adaptivnogo upravleniia robototekhnicheskimi sistemami okhrannogo monitoringa. *Pravovaia informatika*, 2020, No. 2, pp. 28–40. DOI: 10.21681/1994-1404-2020-2-28-40.
9. Kolesnikov A.A. *Sovremennaiia prikladnaia teoriia upravleniia*. Ch. III. *Novye klassy regulatorov tekhnicheskikh sistem*. Taganrog : Izd-vo TRTU, 2000. 656 pp. ISBN 5-8327-0045-7.
10. Lovtsov D.A. *Informatsionnaia teoriia ergasistem : tezaurus*. M. : Nauka, 2005. 248 pp. ISBN 5-02-033779-X.
11. Lovtsov D.A. *Sistemnyi analiz*. Chast'. 1. *Teoreticheskie osnovy*. M. : RGUP, 2018. 224 pp. ISBN 978-5-93916-701-7.
12. Lovtsov D.A. *Informatsionnaia teoriia ergasistem : monografiia*. M. : RGUP, 2021. 314 pp. ISBN 978-5-93916-887-8.
13. Lovtsov D.A. *Informatsionnye pokazateli effektivnosti funktsionirovaniia ASU slozhnymi dinamicheskimi ob'ektami*. *Avtomatika i telemekhanika*, 1994, No. 12, pp. 143–150.
14. Lovtsov D.A., Gavrilov D.A. *Modelirovanie optiko-elektronnykh sistem distantsionno pilotiruemykh apparatov : monografiia*. M. : Tekhnolodzhii-3000, 2019. 164 pp. ISBN 978-5-94472-036-8.
15. Lovtsov D.A., Gavrilov D.A. *Effektivnaia avtomatizirovannaia optiko-elektronnaia sistema aerokosmicheskogo monitoringa*. *Pravovaia informatika*, 2019, No. 2, pp. 29–35. DOI: 10.21681/1994-1404-2019-2-29-35
16. Moiseev V.S. *Osnovy teorii effektivnogo primeneniia bespilotnykh letatel'nykh apparatov*. Kazan' : RITs "Shkola", 2015. 444 pp. ISBN 978-5-9905685-4-9.
17. Patent na poleznuiu model' No. 186492 (RU) "Sistema uglovoi stabilizatsii". Kanushkin S.V., Zaitsev A.V., Volkov A.V., Shishkin K.V., Barykin D.A., Sachuk A.P. (RU). Po zaiavke No. 2018129426/11(047405), prioritet ot 10.08.2018.