

АЛГОРИТМЫ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ ОХРАННОГО МОНИТОРИНГА

Канушкин С.В.*

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, дистанционно пилотируемые летательные аппараты, стабилизация, адаптация, беспойсковая система, синтез, точность, установившаяся ошибка, регулятор, устойчивость, фазовая траектория.

Аннотация.

Цель работы: разрешение противоречия между требованиями по обеспечению точности и устойчивости при выборе величины коэффициента передачи по углу рыскания в системе угловой стабилизации беспилотного летательного аппарата охранного мониторинга.

Метод: комплексный теоретико-прикладной синтез на основе эвристического метода в классе беспойсковых самонастраивающихся систем, реализующих прямое адаптивное управление.

Результаты: разработан алгоритм управления, который при больших отклонениях от нулевого значения на фазовой плоскости значение коэффициента передачи по углу снижает, что увеличивает создаваемое опережение по фазе; при малых отклонениях значение коэффициента увеличивается, что обеспечивает повышение точности системы угловой стабилизации дистанционно пилотируемого летательного аппарата.

Обоснован вывод о необходимости и целесообразности использования алгоритмов прямого адаптивного управления, увеличивающих точность системы стабилизации дистанционно пилотируемого летательного аппарата при сохранении запасов устойчивости.

DOI: 10.21681/1994-1404-2020-2-28-40

Введение

Большую роль для мониторинга площадных охраняемых объектов в системе правоохранительных органов играют робототехнические комплексы (РТК). Основными целями применения РТК является придание нового качества используемым средствам в интересах повышения эффективности выполнения задач, снижения потерь и уменьшения финансовых затрат. Особое внимание следует уделять рациональному сочетанию возможностей человека и техники [1, 6 – 8].

Типовой образец робототехнических комплексов можно представить в виде совокупности функционально связанных элементов:

1. Базовый носитель – это могут быть шасси или корпус любой конфигурации, предназначенные для применения в различных средах.

2. Специализированное навесное (встраиваемое) оборудование в виде набора съемных модулей полезной (целевой) нагрузки. Состав специализированного

оборудования устанавливается исходя из функционального предназначения робота.

3. Средства обеспечения и обслуживания, используемые при подготовке к применению и технической эксплуатации робота.

Для мониторинга площадных охраняемых объектов наиболее часто используются летательные аппараты (ЛА) беспилотной авиационной системы, которая включает:

- собственно беспилотный летательный аппарат (БПЛА) – без экипажа на борту;
- пункт управления (пульт оператора, приёмопередающая аппаратура);
- систему связи с беспилотным летательным аппаратом (это может быть прямая радиосвязь или спутниковая связь);
- дополнительное оборудование, необходимое для перевозки и обслуживания беспилотного летательного аппарата.

БПЛА могут обладать разной степенью автономности – от управляемых дистанционно до полностью автоматических. Согласно Правилам использования воз-

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

E-mail: kan.cer59@yandex.ru

душного пространства Российской Федерации, БПЛА определяется как «*летательный аппарат, выполняющий полёт без пилота (экипажа) на борту и управляемый в полёте автоматически, оператором с пункта управления или сочетанием указанных способов*»¹.

Международная организация гражданской авиации разделяет радиоуправляемые модели и БПЛА, указывая, что первые предназначены, прежде всего, для развлечения и должны регулироваться местными, а не международными правилами использования воздушного пространства.

Дистанционно пилотируемый летательный аппарат (ДПЛА) – БПЛА, пилотируемый человеком (пилотом, оператором), находящимся на пункте управления, располагающемся на Земле, на воздушном или космическом аппарате.

Для обозначения ДПЛА иногда употребляется также термин «телепилотируемый ЛА». В отличие от телеуправляемого летательного аппарата (ТЛА), ДПЛА управляется оператором не эпизодически, а непрерывно, в зависимости от конкретной обстановки в районе его полёта и, как правило, оборудуется телевизионной камерой с переменным фокусным расстоянием [13, 14]. ДПЛА является дальнейшим развитием телеуправляемого ЛА, который управляется в основном бортовой автоматической системой.

Основным преимуществом ДПЛА является существенно меньшая стоимость их создания и эксплуатации. Недостатком ДПЛА является уязвимость систем дистанционного управления.

Система управления беспилотным летательным аппаратом

Не зависимо от способа управления положением ДПЛА система управления маршрутом определяет условия совершения маневра между точками заданной траектории полета. Блок следования вдоль траектории полета дает команды автопилоту низкого уровня, который контролируют положение корпуса летательного аппарата. Каждый блок при выработке решений полагается на оценки состояний, получаемых в результате фильтрации показаний бортовых датчиков. Автопилот относится к системам управления низкого уровня, который поддерживает постоянными значения углов крена (вращения), тангажа и рыскания; скорости полета, высоты и курсового направления полета.

Таким образом, ДПЛА представляют собой многосвязные многомерные *нелинейные* динамические объекты. Для создания высокоэффективных систем управления следует применять методы синтеза, позволяющие в полной мере учесть их особенности, а также обеспечить надежное функционирование синтезируе-

мых робототехнических систем во всей допустимой области изменения фазовых координат.

Современные системы стабилизации (автопилот) беспилотного летательного аппарата 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; открытости систем интеллектуального управления для самоорганизации и самообучения; прогнозирования изменения в системе и внешней среде. Требования высокой точности управления обуславливают необходимость разработки новых алгоритмов систем управления автономными мобильными робототехническими системами, работающими в условиях неопределенной внешней среды.

Известно, что управление в иерархических моделях, даже расширенных классической системой обратных связей, не обеспечивает эффективность оценок. Так как по мере углубления на новый уровень иерархии связи и полученные функциональные зависимости несут в себе все возрастающие смещения (ошибки). В силу того, что современные мобильные роботы являются нелинейными объектами управления, которые непрерывно взаимодействуют с внешней средой, то для решения данной задачи целесообразно применить методы и принципы направленной самоорганизации или адаптивной теории управления робототехническими системами [3 – 5].

Теория адаптивных систем возникла в связи с необходимостью решения широкого класса прикладных задач, для которых неприемлемы традиционные методы, требующие знания адекватной математической модели объекта. Качество традиционных (неадаптивных) методов управления тем выше, чем больше априорной информации о самом объекте и условиях его функционирования. На практике достаточно трудно обеспечить точное математическое описание объекта управления.

Так, беспилотный летательный аппарат, 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. Одна из первостепенных *проблем* связана с полетом БПЛА при наличии ветра. Поскольку скорости полета находятся в интервале 36 – 72 км/час, который типичен для ДПЛА, а скорость ветра на нескольких сотнях 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. Основным затруднением в использовании этих методов является требование быть

¹ 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».

в определенном месте в определенное время, которое не может надлежащим образом учитывать изменения скорости относительно Земли, вызванные неизвестными и меняющимися воздействиями ветра.

Разработка автоматических систем управления ДПЛА, создание адекватной математической модели представляет обычно сложную самостоятельную задачу. Более того, характеристики объекта в процессе функционирования могут существенно изменяться. Динамические характеристики летательных аппаратов сильно зависят от режима полета, технологических разбросов, состояния атмосферы. В этих условиях традиционные методы часто оказываются неприменимыми либо не обеспечивают требуемое качество системы автоматического управления.

Теория адаптивных и робастных² систем изучает методы управления неопределенными объектами, для которых являются неприменимыми методы классической теории управления.

Адаптивные (самоадаптирующиеся) системы – это системы управления, обеспечивающие компенсацию параметрических, сигнальных, функциональных или структурных неопределенностей объекта управления за счет автоматической подстройки регулятора в ходе рабочего функционирования системы. Другими словами, адаптивные системы восполняют нехватку априорной информации об объекте управления в ходе рабочего функционирования. В этом смысле они могут также называться самообучающимися системами. Управляющая система, автоматически определяющая нужный закон управления посредством анализа поведения объекта при текущем управлении, называется адаптивной.

Многочисленные обзоры по теории адаптивных систем имеют разнообразные варианты классификации³. Адаптивные системы можно разделить на два больших класса: самоорганизующиеся и самоадаптирующиеся.

В самоорганизующихся системах в процессе функционирования происходит формирование алгоритма управления (его структуры и параметров), позволяющего оптимизировать систему с точки зрения поставленной цели управления. Такого рода задача возникает, например, в условиях изменения структуры и параметров объекта управления в зависимости от режима функционирования, когда априорной информации недостаточно для определения текущего режима. При широком классе возможных структур объекта трудно надеяться на выбор единственной структуры алгоритма управления, способной обеспечить замкнутой си-

стеме достижение цели управления во всех режимах функционирования. Таким образом, речь идет о синтезе при свободной структуре регулятора. Очевидная сложность постановки задачи не позволяет надеяться на простые алгоритмы ее решения, а, следовательно, и на широкое внедрение в настоящее время таких систем в практику управления ДПЛА.

Задача существенно упрощается, если структура объекта управления известна и неизменна, а поведение зависит от ряда неизвестных параметров. Эта задача решается в классе *самоадаптирующихся* систем (СНС), в которых структура регулятора задана (заранее выбрана) и требуется определить лишь алгоритм настройки его коэффициентов (алгоритм адаптации).

СНС делятся на два подкласса: поисковые и беспойсковые. В *поисковых* СНС минимум (или максимум) меры качества (производительность установки, расход топлива и др.) ищется с помощью специально организованных поисковых сигналов. Простейшими поисковыми системами являются экстремальные системы, в которых недостаток априорной информации восполняется за счет текущей информации, получаемой в виде реакции объекта на искусственно вводимые поисковые (пробные, тестовые) воздействия.

В *беспоисковых* СНС в явном или неявном виде имеется модель с желаемыми динамическими характеристиками. Задача алгоритма адаптации состоит в настройке коэффициентов регулятора таким образом, чтобы свести рассогласование между объектом управления и моделью к нулю. Такое управление называют прямым адаптивным управлением (*direct adaptive control*), а системы — адаптивными системами с эталонной моделью (*model reference adaptive systems*). В случае непрямого адаптивного управления (*indirect adaptive control*) сначала проводят идентификацию объекта, а затем определяют соответствующие коэффициенты регулятора. Такие регуляторы называются самоадаптирующимися (*self-tuning regulators*).

При прямом адаптивном управлении контуры адаптации работают по замкнутому циклу. Это позволяет парировать изменения параметров объекта и регулятора в процессе функционирования. Однако каждый контур самонастройки повышает порядок системы как минимум на единицу, и при этом существенно влияет на общую динамику замкнутой системы.

В случае непрямого адаптивного управления контуры самонастройки работают по разомкнутому циклу и, следовательно, не влияют на динамику системы. Однако все ошибки идентификации, уходы параметров объекта и регулятора существенно влияют на точность управления.

В беспоисковых СНС эталонная модель может быть реализована в виде реального динамического звена (явная модель) или присутствовать в виде некоторого эталонного уравнения, связывающего регулируемые переменные и их производные (неявная модель). В неявной модели коэффициенты эталонного уравнения являются параметрами алгоритма адаптации.

² Ловцов Д. А., Калашников Ю. В. Информационная технология автоматизированного ситуационного функционального контроля сложных динамических объектов. I. Стратегия робастного контроля // НТИ. Сер. 2. Информ. процессы и системы. – 1997. – № 2. – С. 21 – 28.

³ См., например: Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник. В 5-ти тт. Том 5. Методы современной теории автоматического управления / Под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова – М.: МГТУ им. Баумана, 2004. – 784 с. ISBN 5-7038-2193-2.

Задачи синтеза алгоритмов адаптивного управления

Рассмотрим задачу синтеза управления для непрерывных динамических объектов в общем виде.

Пусть на объект управления влияют измеряемые возмущения (задающие воздействия) $Y = Y(t)$, неизмеряемые возмущения $N = N(t)$ и управляющие воздействия $U = U(t)$. Наблюдениям доступны выходные переменные объекта $X = X_b(t)$. Поведение объекта зависит от ряда неизвестных параметров, совокупность которых обозначаем через ξ . Задано множество возможных значений ξ , определяющих класс допустимых объектов и возмущений. Задана цель управления, определяющая желаемое поведение объекта управления.

Требуется синтезировать алгоритм управления, использующий измеряемые или вычисляемые на основе измерений величины, не зависящие от ξ и обеспечивающий для каждого ξ достижение заданной цели управления.

Вектор неизвестных параметров ξ обычно состоит из коэффициентов уравнений, составляющих математическое описание объекта, а также из коэффициентов, определяющих изменение внешних воздействий (состояния среды). Кроме того, вектор ξ может содержать абстрактные параметры, описывающие неизмеряемые возмущения, обусловленные неточностью описания объекта управления. Вектор ξ , как правило, считается квазистационарным: постоянным или меняющимся медленно (медленнее динамических процессов в объекте и изменений внешних воздействий).

В дальнейшем будем считать, что процесс (вектор) Z рассматриваемой системы квазистационарен, если он меняется существенно медленнее остальных динамических процессов, протекающих в системе.

Описанная выше задача является задачей управления в условиях неопределенности, связанной с ξ . Задача может решаться поэтапно: вначале идентификация вектора ξ , а затем определение алгоритма управления, обеспечивающего требуемое качество функционирования одним из традиционных методов. Однако такая стратегия синтеза требует дополнительного времени на изучение объекта и неприменима в нестационарных условиях.

Более совершенной стратегией управления является адаптивная стратегия, состоящая в одновременном изучении объекта и управлении им. Алгоритм адаптивного управления имеет двухуровневую структуру (рис. 1).

Алгоритм 1-го уровня (алгоритм регулирования или алгоритм основного уровня) зависит от вектора параметров Θ (вектора параметров регулятора), при каждом ξ он должен обеспечивать достижение цели управления при соответствующем выборе $\Theta = \Theta(\xi)$. Алгоритм 2-го уровня изменяет (настраивает) вектор Θ таким образом, чтобы обеспечить достижение цели управления при неизвестном ξ . Совокупность алгоритмов регулирования и адаптации называется алгоритмом адаптивного управления, а динамическая

система, состоящая из объекта и устройства, реализующего алгоритм адаптивного управления, адаптивной системой управления.

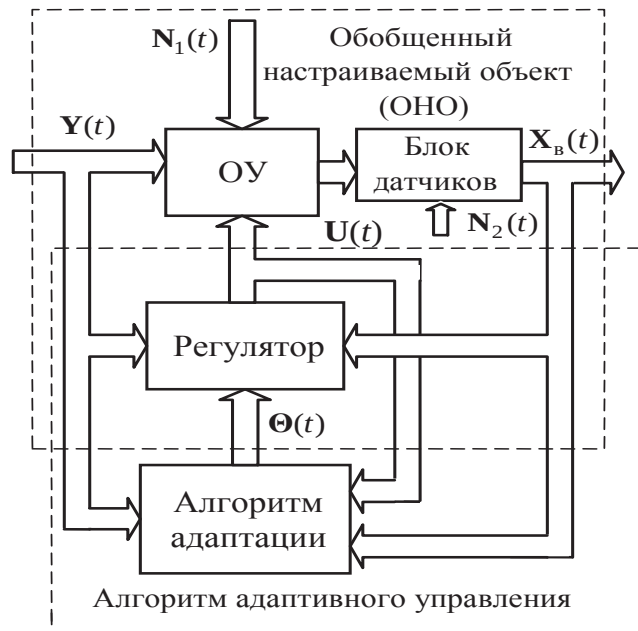


Рис. 1. Структурная схема адаптивной системы управления

Принцип построения идентификационных адаптивных систем (или систем с косвенной адаптацией) основан на использовании процедуры идентификации объекта, т.е. на получении оценок его параметров или динамических характеристик. Полученные оценки используются далее для расчета коэффициентов регулятора. Таким образом, в своей структуре идентификационные адаптивные системы содержат блок (алгоритм) идентификации вырабатывающий оценки неизвестных параметров объекта управления. Основной отличительной чертой адаптивных (самонастраивающихся) систем является наличие дополнительной обратной связи, образованной цепью настройки параметров регулятора. Такая обратная связь получила название параметрической, в отличие от сигнальной обратной связи, образованной непосредственно регулятором (рис. 2).

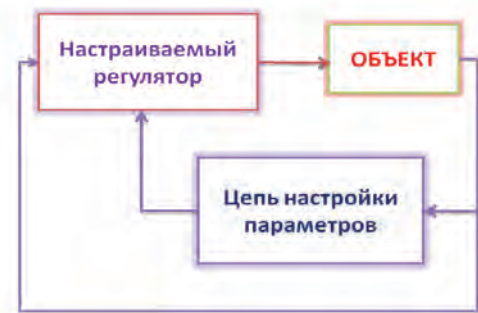


Рис. 2. Схема идентификационной адаптивной системы управления

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 неопределенности являются одними из часто используемых путей решения задач управления сложными объектами. Адаптивными называются 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 [9 – 12].

Различают три класса адаптивных систем управления:

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

Задачами прикладной теории управления беспилотным летательным аппаратом (БПЛА) является разработка математических методов и алгоритмов формирования управления различными видами БПЛА при решении с их использованием соответствующих целевых задач [15].

На практике не всегда возможно точно определить математическую модель интересующего нас объекта. Изменения условий окружающей среды функционирования системы может существенно влиять на конкретное значение реальных параметров модели и структуру. Более того, рассматриваемый класс объектов – ДПЛА – меняет свои динамические характеристики в процессе функционирования. Существовавшие к настоящему времени схемы устранения неопределенности так или иначе могут быть сведены к задачам адаптивного управления. Упрощенная постановка задачи адаптивного управления выглядит следующим образом.

Пусть исходный объект управления описан системой дифференциальных уравнений:

$$\dot{x} = f(x, \theta, u, t); y = h(x),$$

где $\theta \in \Omega_\theta$ – вектор неизвестных параметров модели; Ω_θ – известное заранее множество – класс неопределенности модели.

Целью управления является выполнение соотношения:

$$Q_t \leq \Delta \text{ при } t > t_*,$$

где $Q_t = Q_t[x(\tau), u(\tau), 0 \leq \tau \leq t]$ – целевой локальный функционал, $\Delta \geq 0$ – порог.

Задача синтеза адаптивной системы состоит в нахождении, как правило, не упреждающего управления

$u(t) = U_t[y(\tau), u(\tau), 0 \leq \tau \leq t]$, обеспечивающего достижение цели управления для любых $\theta \in \Omega_\theta$.

Для решения задачи адаптивного управления, как следует из ее постановки, необходимо выбрать класс допустимых управлений U_t и определить процедуру отыскания в нем подходящего управления. Процедуры отыскания «нужного» решения в выбранном классе U_t , т.е. алгоритмы адаптации достаточно развиты на сегодняшний день и могут быть использованы как для линейных, так и для нелинейных моделей объектов управления. Это алгоритмы скоростного градиента, алгоритмы метода рекуррентных целевых неравенств. Возможность достижения цели управления здесь отражается в различных формулировках условий достижимости цели управления.

Среди способов обеспечения универсальности можно выделить два основных – замена исходной нелинейной модели на приближенную линейную и использование нелинейных канонических форм. Предположение об априорной известности структуры модели на практике может оказаться чрезмерно сильным требованием.

Говоря о синтезе регуляторов (как адаптивных, так и не адаптивных) нужно отметить тот факт, что структура регулятора (или класс допустимых управлений) существенным образом зависит от математической модели объекта и от цели управления. В рамках перечисленных методов каждая отдельная задача имеет уникальное решение в пределах класса модели. Это вносит дополнительные трудности в процесс проектирования систем. Поэтому с практической точки зрения выглядит привлекательным найти *обобщенную* структуру регулятора для наиболее широкого класса нелинейных объектов. Поэтому в большинстве случаев регулятор реализует отображение вектора состояний в пространство допустимых управлений, тогда будет естественной и интерпретация процесса синтеза управляющей функции как некоторой оптимизационной процедуры поиска «наилучшего» элемента во множестве допустимых отображений. В этом случае задача синтеза регулятора трансформируется в задачу выбора необходимой информации для организации подобной процедуры.

Множество $U = \{u(x, w) | w \in R\}$ называют множеством допустимых управлений, а управление $u(x) \in U$ допустимым управлением. Задание управляющей функции в классе параметрически неопределенных нелинейных отображений позволяет унифицировать процедуру синтеза управления сложными нелинейными объектами, абстрагируясь от конкретной, часто неизвестной структуры регулятора. Решение проблемы отыскания «почти универсального» регулятора, хотя бы параметрически не доопределенного, для достаточно широкого класса нелинейных динамических объектов позволило бы напрямую использовать методы адаптивного управления, так как условие достижимости автоматически выполнится.

В качестве такого потенциально «почти универсального» регулятора можно принять многослойную

нейронную сеть (МНС) прямого распространения [13]. Применение МНС в качестве регулятора для нелинейных объектов управления оправдано их способностью к аппроксимации произвольных функций нескольких аргументов, определенных на компактном множестве, и способностью к обучению [3 – 5].

Динамика ДПЛА определяется режимом полета, технологическими разбросами и состоянием атмосферы⁴. Особо важно учитывать требование к *точности* отработки программы полета ДПЛА: быть в определенном месте в определенное время. При этом необходимо надлежащим образом учитывать изменения скорости относительно Земли, вызванные неизвестными и меняющимися воздействиями ветра. Выполнение данного условия во многом определяются уровнем точности стабилизации углового положения ДПЛА. Необходимым условием работоспособности ДПЛА является устойчивость углового движения. 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. Точность и устойчивость углового движения определяются алгоритмами угловой стабилизации ДПЛА.

В таких условиях традиционные методы управления оказываются ограниченными в применении, так как не обеспечиваются требуемое качество. Приспособление к условиям функционирования в адаптивных системах обеспечивается путем накопления и обработки информации о динамике объекта в процессе его полета. Это обеспечивает существенное снижение влияния неопределенностей на качество управления, при этом компенсируется недостаток априорной информации на этапе разработки ДПЛА. Известны модели возмущенного движения БПЛА по углу рыскания, алгоритм управления и динамика рулевого привода. Как выбрать K_{ψ} коэффициент передачи по углу рыскания алгоритма для обеспечения точности и устойчивости системы угловой стабилизации по каналу?

Опережение по фазе, создаваемое алгоритмом стабилизации должно быть больше запаздывания, вносимого рулевым приводом. Квазистатическая ошибка по углу обратно пропорциональна коэффициенту усиления автомата стабилизации K_{ψ} по углу рыскания.

Таким образом, при синтезе закона управления по каналу рыскания в системе угловой стабилизации возникает противоречие в выборе величины коэффициента передачи по углу рыскания: для обеспечения устойчивости необходимо данный коэффициент уменьшать, а для обеспечения точности – увеличивать. Обычно поступают следующим образом: выбирают величину коэффициента таким, чтобы обеспечить требуемую *точность* системы угловой стабилизации, а *устойчивости* системы добиваются путем введения корректирующих контуров.

Предлагается решение задачи, при условии, что структура объекта управления известна, а поведение определяется рядом неизвестных параметров. Задача будет решаться в классе самонастраивающихся систем (СНС)⁵. При этом структура алгоритма управления заранее определена, и необходимо выбрать алгоритм адаптации для настройки коэффициентов. В бесполой СНС заданы желаемые динамические характеристики. Таким образом, необходимо реализовать прямое адаптивное управление. В системе с прямым адаптивным управлением контур адаптации должен работать по замкнутому циклу. Это позволит приспосабливаться к изменениям параметров объекта и регулятора в процессе полета. Быстрые процессы будут управляться основным регулятором системы, а медленные изменения отслеживаться адаптером.

Условно методы синтеза адаптивных систем можно разделить на эвристические и теоретические. В *эвристических* методах отсутствует строгое обоснование устойчивости адаптивной системы и, как следствие, условия применимости рассматриваемых методов. Теоретические (строго обоснованные) методы можно разделить на два класса: точные и приближенные. В соответствии с двухуровневой схемой адаптивной системы задача разбивается на два этапа: синтез основного контура и контура адаптации. В основе приближенных подходов лежат методы декомпозиции, основанные на упрощении модели и синтезе по упрощенной модели. Для упрощения и декомпозиции используются методы теории возмущений, методы скалярных и векторных функций Ляпунова, линеаризация, понижение порядка, отбрасывание возмущений. Популярным является подход, основанный на выделении быстрых и медленных движений системы, при этом синтез осуществляется по модели, описывающей медленные движения.

В нашей работе использован *эвристический* метод, в котором отсутствует строгое теоретическое доказательство устойчивости адаптивной системы. Возможность и целесообразность применения полученного алгоритма подтверждаются результатами вычислительного эксперимента.

При решении задачи синтеза и проектирования систем стабилизации ДПЛА необходимо выбирать параметры соответствующего алгоритма стабилизации, значения которых находятся в пределах области устойчивости, только тогда будет обеспечена их работоспособность. Точность работы системы стабилизации на участках работы ДПЛА должна быть такой, чтобы методические ошибки наведения не превышали допустимых значений. Важным ограничением на текущие параметры движения беспилотного летательного аппарата является требование постоянства программных углов тангажа и рыскания, определяющих ориентацию БПЛА, в течение определенного интервала времени полета.

⁴ Системы управления летательными аппаратами: Учебник / Под общ. ред. Г. Н. Лебедева. – М.: Изд-во «МАИ», 2007. – 756 с. ISBN 978-5-7035-1853-3.

⁵ Методы классической и современной теории автоматического управления. Учебник. В 5-ти тт. Том 5. Методы современной теории автоматического управления / Под ред. К. А. Пупкова, Н. Д. Егупова – М.: МГТУ им. Баумана, 2004. – 784 с. ISBN 5-7038-2193-2.

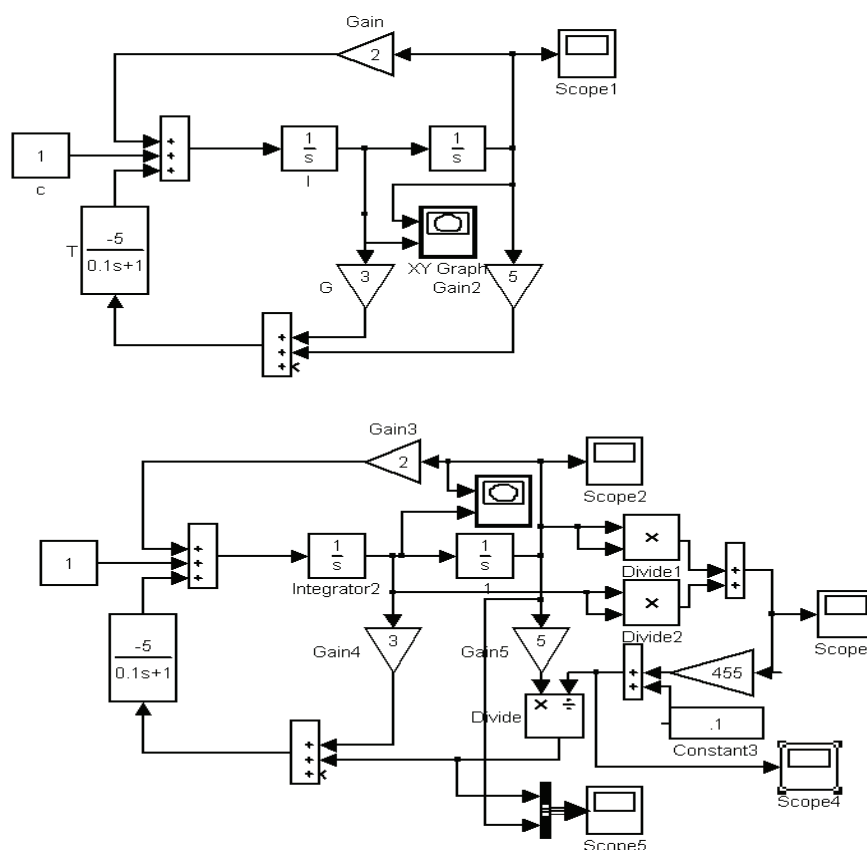


Рис. 3. Схема моделирования системы угловой стабилизации беспилотного летательного аппарата

Недостатком систем с традиционным линейным пропорционально-дифференциальным регулятором (ПД-регулятором) является низкая точность. Недостаток обусловлен противоречием при выборе значения коэффициента передачи по углу. Для увеличения запасов устойчивости системы угловой стабилизации необходимо уменьшить значение коэффициента передачи по углу в пределах области устойчивости. Для повышения точности системы стабилизации (уменьшения значения установившейся ошибки) данный коэффициент необходимо увеличивать [1, 2, 15 – 17]. При увеличении коэффициента передачи по углу в системе уменьшаются запасы устойчивости, и сильно возрастает колебательность системы.

Результаты имитационного эксперимента

Проведен имитационный вычислительный эксперимент⁶, в ходе которого динамика системы угловой стабилизации БПЛА была смоделирована в *MatLab Simulink* (рис. 3).

⁶ Методы инженерного синтеза сложных систем управления: аналитический аппарат, алгоритмы приложения в технике. Часть II. Вычислительно-аналитический эксперимент: аппарат матричных операторов и вычислительные технологии / Под ред. К. А. Пупкова, Н. Д. Егупова. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. – 416 с. ISBN: 978-5-7038-3451-0.

На рис. 4, 5 представлены фазовая траектория и график переходного процесса системы по углу рыскания при действии аддитивных постоянных возмущений с традиционным линейным ПД-регулятором.

Предлагается изменять величину коэффициента передачи по углу в зависимости от величины отклонения изображающей точки от нулевого значения на фазовой плоскости:

$$R^2 = \psi^2 + \dot{\psi}^2, K_{\psi}^* = \frac{K_{\psi}}{K_2 + K_1 R^2}.$$

Предложенный адаптивный алгоритм управления системы стабилизации увеличивает точность системы при сохранении запасов устойчивости. При больших отклонениях от нулевого значения на фазовой плоскости значение коэффициента передачи по углу уменьшается, что увеличивает создаваемое опережение по фазе. При малых отклонениях значение коэффициента увеличивается, что обеспечивает увеличение точности системы угловой стабилизации. На рис. 6 представлены графики переходных процессов в системе с традиционным линейным регулятором и с предлагаемым адаптивным.

Характер изменения коэффициента передачи по углу алгоритма стабилизации беспилотного летательного аппарата и сигнала адаптации представлены на рис. 7, 8.

Анализ графиков на рис. 7, 8 показывает, что при номинальном значении коэффициента передачи по углу

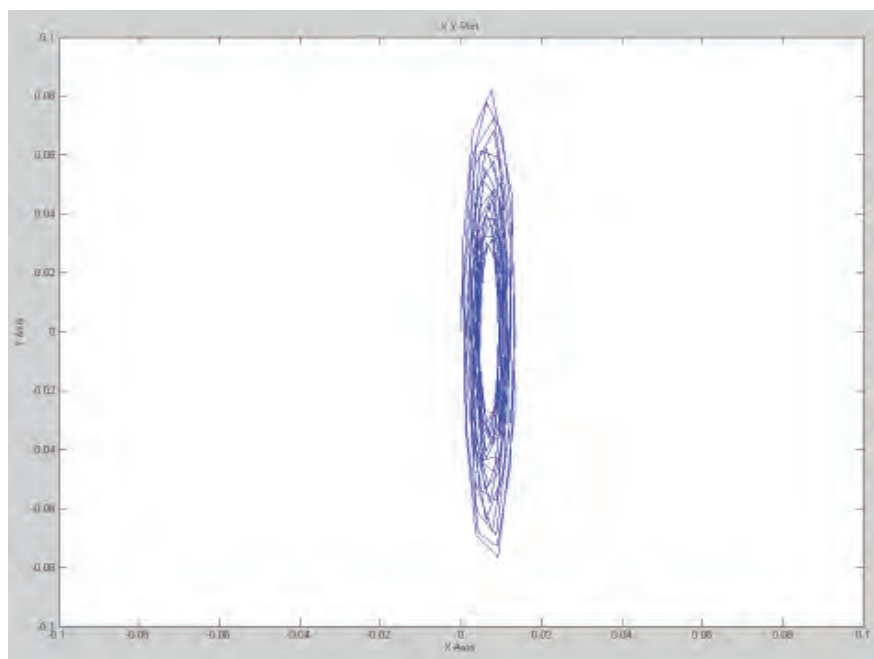


Рис. 4. Фазовая траектория переходного процесса системы по углу рыскания при действии аддитивных постоянных возмущений с традиционным линейным ПД-регулятором

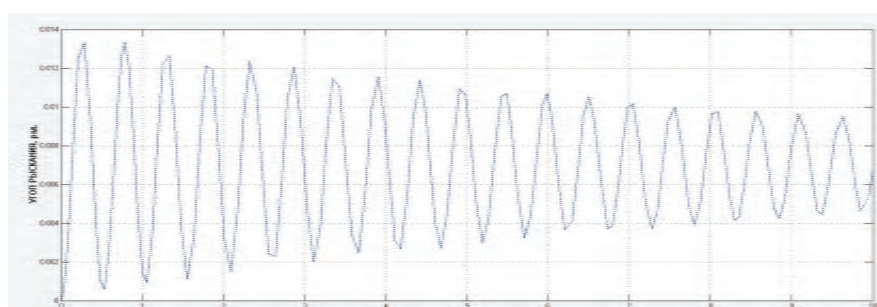


Рис. 5. График переходного процесса системы по углу рыскания при действии аддитивных постоянных возмущений с традиционным линейным ПД-регулятором

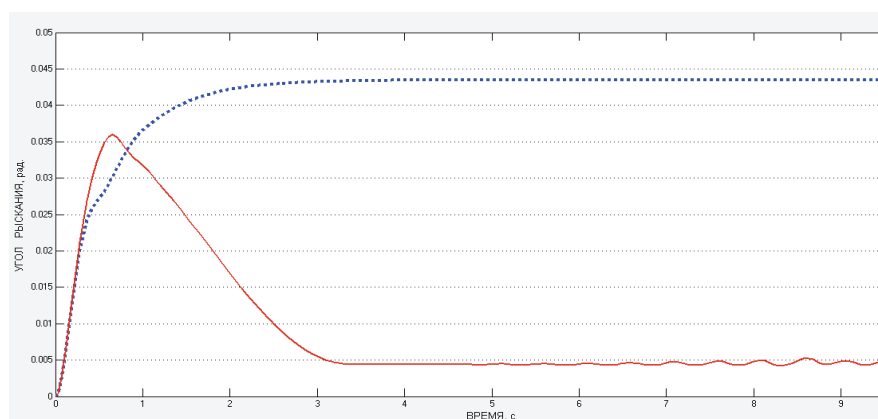


Рис. 6. Графики переходных процессов по углу рыскания в системе с традиционным линейным регулятором (пунктирная линия) и с предлагаемым адаптивным при действии аддитивных постоянных возмущений (сплошная линия)

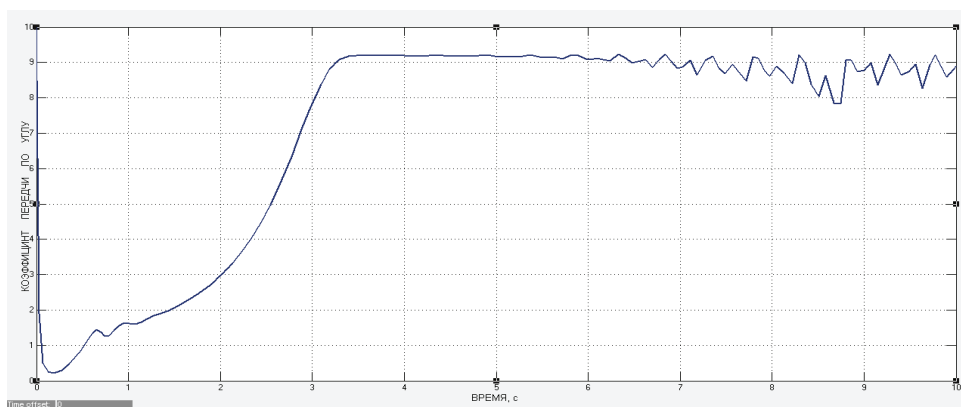


Рис. 7. Графики изменения коэффициента передачи по углу алгоритма стабилизации

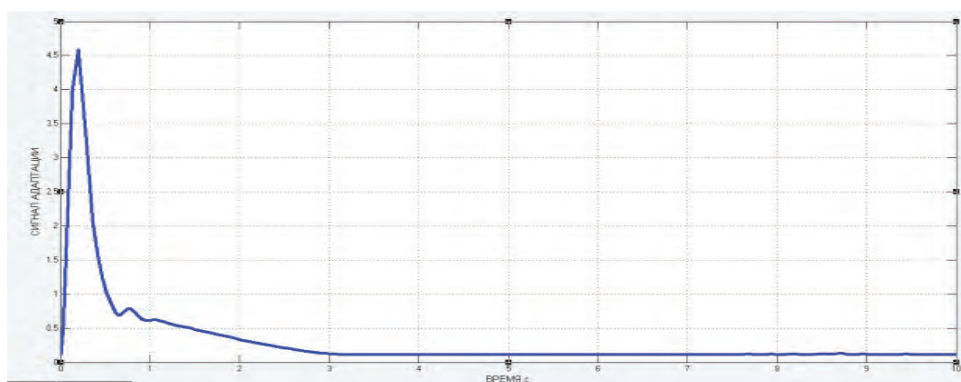


Рис. 8. Графики изменения сигнала адаптации

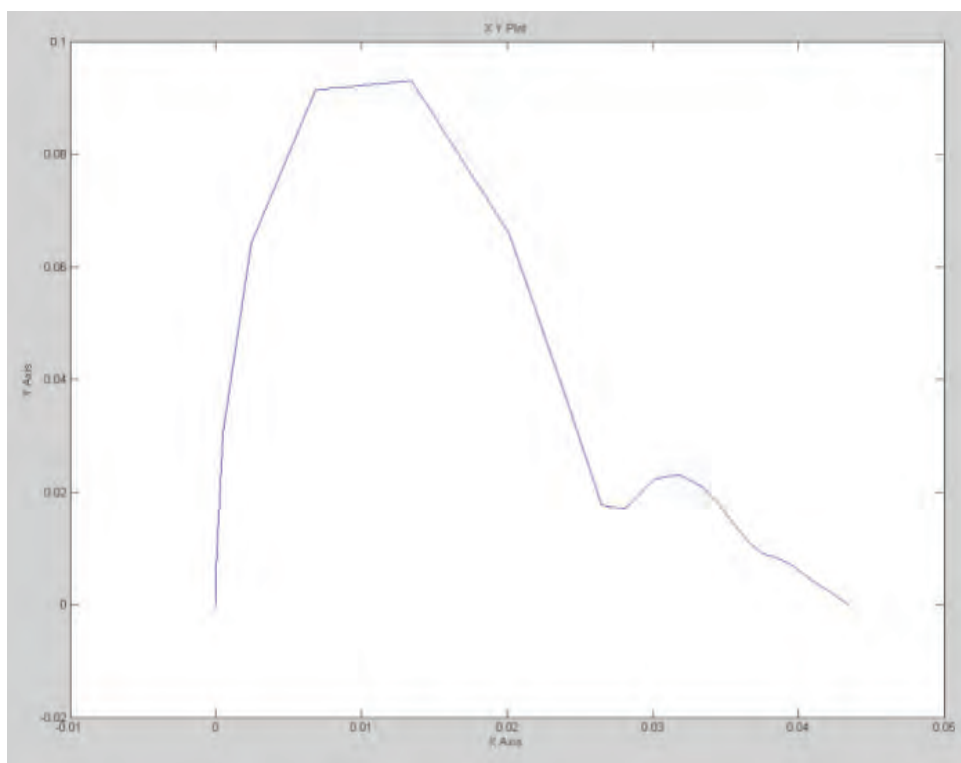


Рис. 9. Фазовая траектория движения системы с линейным ПД-регулятором при действии аддитивных возмущений ($\psi_{уст.} = 0,044$ рад.)

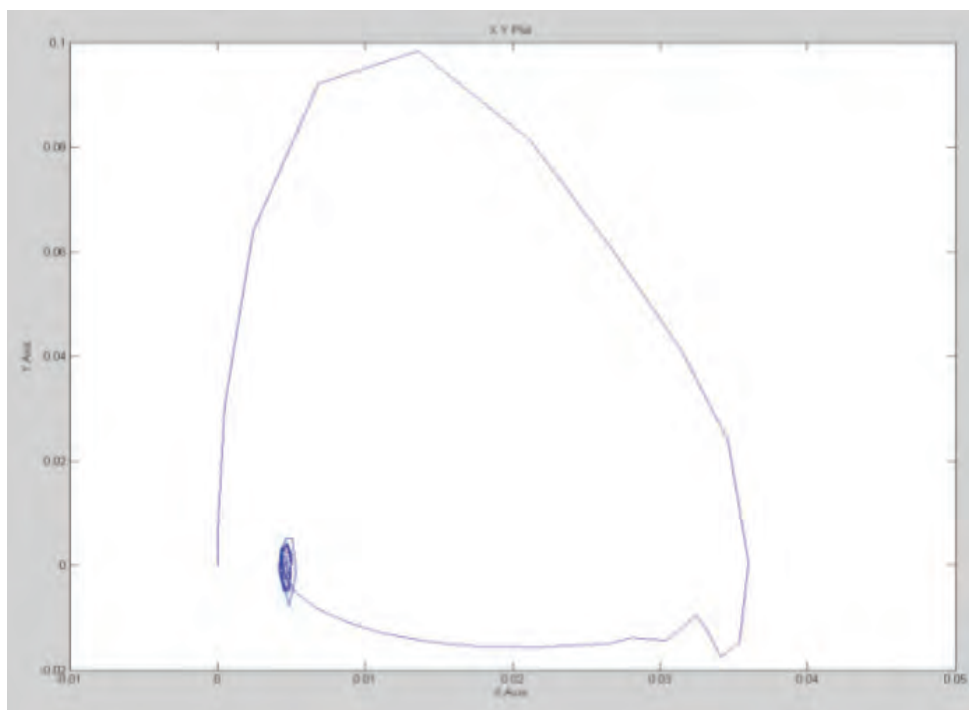


Рис. 10. Фазовая траектория движения системы с адаптивным регулятором при действии аддитивных возмущений ($\psi_{уст.} = 0,005$ рад.)

рыскания равно 5 его адаптивное значение изменяется от 1 до 9, что соответствует установленной стратегии управления.

Таким образом, решена задача повышения точности системы угловой стабилизации без снижения запасов устойчивости углового движения. При этом выполняются ограничения на текущие параметры движения БПЛА по предельно допустимой скорости изменения программных углов тангажа и рыскания. Предполагаемая система увеличивает точность системы при сохранении запасов устойчивости. При больших отклонениях от нулевого значения на фазовой плоскости значение коэффициента передачи по углу уменьшается, что увеличивает создаваемое опережение по фазе. При малых отклонениях значение коэффициента увеличивается, что обеспечивает увеличение точности системы угловой стабилизации.

Результаты исследования системы управления ДПЛА с традиционным линейным и адаптивным алгоритмом управления в среде *Matlab Simulink* представлены на рис. 9, 10, соответственно.

В ходе имитационного эксперимента в программной среде *MatLab Simulink*, адаптивный алгоритм угловой стабилизации подтвердил обеспечение устойчивости углового движения системы стабилизации летательного аппарата при аддитивных возмущениях, с уменьшением величины установившейся ошибки по углу рыскания практически на порядок. Динамика канала стабилизации ДПЛА с линейным и адаптивным управлением подтверждает предпочтительность последнего, у которого значение установившейся ошибки на порядок меньше, что особенно важно при реализации

метода наведения, который отрабатывается системой угловой ориентации и стабилизации.

По результатам имитационного эксперимента можно сделать вывод о необходимости и целесообразности использования алгоритмов прямого адаптивного управления, увеличивающих точность системы стабилизации ДПЛА при сохранении запасов устойчивости.

Заключение

Таким образом, для повышения эффективности выполнения задачи мониторинга площадных охраняемых объектов в системе правоохранительных органов, снижения потерь и уменьшения финансовых затрат необходимо применение РТК. Основным преимуществом ДПЛА по сравнению с другими типами объектов РТК является существенно меньшая стоимость их создания и эксплуатации.

Основным затруднением в использовании методов отслеживания траектории полета для ДПЛА является требование быть в определенном месте в определенное время, которое не может надлежащим образом быть выполнено с учетом изменений скорости полета относительно Земли, вызванных неизвестными и меняющимися воздействиями ветра. Традиционные методы отслеживания траектории, используемые в робототехнике, для ДПЛА работают недостаточно хорошо.

Задачами прикладной теории управления ДПЛА является разработка математических методов и алгоритмов формирования управления различными видами РТК при решении с их использованием соответствующих целевых задач. ДПЛА представляет собой физи-

ческий 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.

Разработка автоматических систем управления ДПЛА, создание адекватной математической модели представляет обычно сложную самостоятельную задачу. Более того, характеристики объекта в процессе функционирования могут существенно изменяться. Динамические характеристики ЛА сильно зависят от режима полета, технологических разбросов и состояния атмосферы. В этих условиях традиционные методы часто оказываются неприменимыми либо не обеспечивают требуемое качество системы автоматического управления. Существовавшие к настоящему времени схемы устранения неопределенности так или иначе могут быть сведены к задачам адаптивного управления. Адаптивные (самонастраивающиеся) системы – это системы управления, обеспечивающие компенсацию параметрических, сигнальных, функциональных или структурных неопределенностей объекта управления за счет автоматической подстройки регулятора в ходе рабочего функционирования системы.

Сделан вывод о необходимости и целесообразности использования алгоритмов прямого адаптивного управления, увеличивающих точность системы стабилизации БПЛА при сохранении запасов устойчивости.

Обоснована возможность применения комплексного теоретико-прикладного синтеза, на основе эвристического метода, в классе беспоисковых самонастраивающихся систем, реализующих прямое адаптивное управление.

Предложен алгоритм управления, который при больших отклонениях от нулевого значения на фазовой плоскости значение коэффициента передачи по углу уменьшает, что увеличивает создаваемое опережение по фазе. При малых отклонениях значение коэффициента увеличивается, что обеспечивает повышение точности системы угловой стабилизации БПЛА. Таким образом, разрешается противоречие между требованиями по обеспечению точности и устойчивости при выборе величины коэффициента передачи по углу рыскания в системе угловой стабилизации дистанционно пилотируемого БПЛА охранного мониторинга.

Результаты вычислительного эксперимента в программной среде *MatLab Simulink*, подтверждают эффективность автопилота ДПЛА с адаптивным алгоритмом угловой стабилизации.

Рецензент: Тютюнник Вячеслав Михайлович, доктор технических наук, профессор, академик РАН, Президент Международного информационного Нобелевского центра, г. Тамбов.

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. Биард Р. У., Маклэйн Т. У. Малые беспилотные летательные аппараты: теория и практика. М.: Техносфера, 2015. 312 с. ISBN 978-5-94836-393-6
3. Зайцев А. В., Канушкин С. В. Возможности адаптивного управления робототехническими системами // Труды XVIII Всеросс. науч. конф. «Нейрокомпьютеры и их применение» / МГППУ. М.: МГППУ, 2020. С. 124 – 125. ISBN 978-5-94051-214-1
4. Зайцев А. В., Канушкин С. В. Возможности управления многосвязными динамическими робототехническими системами // Труды XVI Всеросс. науч. конф. «Нейрокомпьютеры и их применение» / МГППУ. М.: МГППУ, 2018. С. 61 – 62. ISBN 978-5-94051-172-4
5. Зайцев А. В., Канушкин С. В. Управление робототехническими системами в условиях неопределенности // Труды XVII Всеросс. науч. конф. «Нейрокомпьютеры и их применение» / МГППУ. М.: МГППУ, 2019. С. 359 – 360. ISBN 978-5-94051-186-1
6. Канушкин С. В. Правовые аспекты реализации функциональных возможностей интеллектуальных роботов в работе правоохранительных органов // Правовая информатика. 2018. № 2. С. 23 – 38. DOI:10.21681/1994-1404-2018-2-23-38
7. Канушкин С. В. Синергетический подход в управлении группой беспилотных летательных аппаратов интеллектуальной системы охранного мониторинга // Правовая информатика. 2018. № 3. С. 25 – 37. DOI:10.21681/1994-1404-2018-3-25-37
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. Колесников А. А. Современная прикладная теория управления. Ч. III. Новые классы регуляторов технических систем. Таганрог: 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: основные положения // Правовая информатика. 2019. № 3. С. 4 – 20. DOI: 10.21681/1994-1404-2019-3-04-20
13. Ловцов Д. А., Гаврилов Д. А. Моделирование оптико-электронных систем дистанционно пилотируемых аппаратов: Монография. М.: «Технолоджи-3000», 2019. 164 с. ISBN 978-5-94472-036-8
14. 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.
15. Моисеев В. С. Основы теории эффективного применения беспилотных летательных аппаратов. Казань: «Школа», 2015. 444 с. ISBN 978-5-9905685-4-9
16. Патент на полезную модель № 186218 РФ. Система боковой стабилизации / Канушкин С. В., Зайцев А. В., Волков А. В., Шишкин К. В., Барыкин Д. А., Сачук А.П. (РФ). № 2018130051; Заяв. 10.08.2018.
17. Патент на полезную модель № 182886 РФ. Система угловой стабилизации / Канушкин С. В., Зайцев А. В., Волков А. В., Шишкин К. В., Сачук А.П. (РФ). № 2018117102; Заяв. 07.05.2018.

ALGORITHMS OF ADAPTIVE CONTROL OF ROBOTIC SECURITY MONITORING SYSTEMS

Sergey Kanushkin, Ph.D. (Technology), Associate Professor at the Peter the Great Military Academy of Strategic Rocket Forces, Moscow, Russian Federation.

E-mail: kan.cer59@yandex.ru

Keywords: monitoring, robotic systems, unmanned aerial vehicle, remotely piloted aircraft, control, stabilization, adaptation, searchless system, synthesis, accuracy, steady-state error, controller, stability, phase trajectory.

Abstract.

The purpose of the work: to resolve the contradiction between the requirements for ensuring accuracy and stability when choosing the value of the yaw angle transmission coefficient in the angular stabilization system of an unmanned aerial vehicle for security monitoring.

Method: complex theoretical and applied synthesis, based on the heuristic method, in the class of searchless self-adjusting systems that implement direct adaptive control.

Results: a control algorithm is developed that reduces the value of the angle transfer coefficient for large deviations from the zero value on the phase plane, which increases the created phase advance. With small deviations, the coefficient value increases, which increases the accuracy of the angular stabilization system of a remotely piloted aircraft.

It is concluded that it is necessary and appropriate to use direct adaptive control algorithms that increase the accuracy of the remotely piloted aircraft stabilization system while maintaining stability reserves.

References

1. Afanas'ev P. P. Osnovy` ustroïstva, proektirovaniia, konstruirovaniia i proizvodstva letatel'ny`kh apparatov (distantcionno-pilotiruemy`e letatel'ny`e appara-ty'). M.: Izd-vo «MAI», 2006. 528 s. ISBN 978-5-7035-1626-3
2. Biard R. U., Macle`i`n T. U. Maly`e bespilotny`e letatel'ny`e apparaty': teoriia i praktika. M.: Tekhnosfera, 2015. 312 c. ISBN 978-5-94836-393-6
3. Zai'tcev A. V., Kanushkin S. V. Vozmozhnosti adaptivnogo upravleniia robototekhnicheskimi sistemami // Trudy` XVIII Vseross. nauch. konf. «Nei`rokompiutery` i ikh primeneniie» / MGPPU. M: MGPPU, 2020. S. 124 – 125. ISBN 978-5-94051-214-1
4. Zai'tcev A. V., Kanushkin S. V. Vozmozhnosti upravleniia mnogosviazny`mi dinamicheskimi robototekhnicheskimi sistemami // Trudy` XVI Vseross. nauch. konf. «Nei`rokompiutery` i ikh primeneniie» / MGPPU. M: MGPPU, 2018. S. 61 – 62. ISBN 978-5-94051-172-4
5. Zai'tcev A. V., Kanushkin S. V. Upravlenie robototekhnicheskimi sistemami v usloviakh neopredelennosti // Trudy` XVII Vseross. nauch. konf. «Nei`rokompiutery` i ikh primeneniie» / MGPPU. M: MGPPU, 2019. S. 359 – 360. ISBN 978-5-94051-186-1
6. Kanushkin S. V. Pravovy`e aspekty` realizatsii funktsional'ny`kh vozmozhnostei` intellektual'ny`kh robotov v rabote pravookhranitel'ny`kh organov // Pravovaia informatika. 2018. № 2. S. 23 – 38. DOI:10.21681/1994-1404-2018-2-23-38
7. Kanushkin S. V. Sinergeticheskii` podhod v upravlenii gruppoi` bespilotny`kh letatel'ny`kh apparatov intellektual'noi` sistemy` okhrannogo monitoringa // Pravovaia informatika. 2018. № 3. S. 25 – 37. DOI:10.21681/1994-1404-2018-3-25-37
8. Kanushkin S. V. Upravlenie robototekhnicheskimi sistemami okhrannogo monitoringa v usloviakh neopredelennosti // Pravovaia informatika. 2019. № 2. S. 40 – 48. DOI: 10.21681/1994-1404-2019-2-40-48.

9. Kolesnikov A. A. Sovremennaya prikladnaya teoriya upravleniya. Ch. III. Novyye klassy` regulatorov tekhnicheskikh sistem. Taganrog: TRTU, 2000. 656 s. ISBN 5-8327-0045-7.
10. Lovtsov D. A. Informatcionnaya teoriya e`rgasistem: Tezaurus. M.: Nauka, 2005. 248 c. ISBN 5-02-033779-X
11. Lovtsov D. A. Sistemny`i` analiz. Chast`. 1. Teoreticheskie osnovy`. M.: RGUP, 2018. 224 s. ISBN 978-5-93916-701-7
12. Lovtsov D. A. Informatcionnaya teoriya e`rgasistem: osnovny`e polozheniya // Pravovaya informatika. 2019. № 3. S. 4 – 20. DOI: 10.21681/1994-1404-2019-3-04-20
13. Lovtsov D. A., Gavrilov D. A. Modelirovaniye optiko-e`lektronny`kh sistem distantsionno pilotiruemy`kh apparatov: Monografiya. M.: «Tekhnolodzhii-3000», 2019. 164 s. ISBN 978-5-94472-036-8
14. Lovtsov D. A., Gavrilov D. A. E`ffektivnaya avtomatizirovannaya optiko-e`lektronnaya sistema aeorokosmicheskogo monitoringa // Pravovaya informatika. 2019. № 2. S. 29 – 35. DOI: 10.21681/1994-1404-2019-2-29-35.
15. Moiseev V. S. Osnovy` teorii e`ffektivnogo primeneniya bespilotny`kh letatel`ny`kh apparatov. Kazan`: «Shkola», 2015. 444 s. ISBN 978-5-9905685-4-9
16. Patent na poleznuyu model` № 186218 RF. Sistema bokovoi` stabilizatsii / Kanushkin S. V., Zaitcev A. V., Volkov A. V., Shishkin K. V., Bary`kin D. A., Sachuk A. P. (RF). № 2018130051; Zaiav. 10.08.2018.
17. Patent na poleznuyu model` № 182886 RF. Sistema uglovoi` stabilizatsii / Kanushkin S. V., Zaitcev A. V., Volkov A. V., Shishkin K. V., Sachuk A. P. (RF). № 2018117102; Zaiav. 07.05.2018.