

На правах рукописи

Чжэн Цзинчжун

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫМ  
ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТОМ С ПОДВИЖНОЙ МАССОЙ ПРИ  
ЗАХОДЕ НА ПОСАДКУ**

Специальность 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации,  
статистика

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

郑靖重

Москва – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Научный руководитель: **Селезнева Мария Сергеевна**, кандидат технических наук, доцент, доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана

Официальные оппоненты: **Корсун Олег Николаевич**, доктор технических наук, профессор, руководитель научно-образовательного центра федерального автономного учреждения «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем»

**Андриков Дмитрий Анатольевич**, кандидат технических наук, доцент Российского университета дружбы народов (РУДН)

Ведущая организация: Общество с ограниченной ответственностью "Инскултех"

Защита состоится « 18 » июня 2024 г. в 14 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета 24.2.331.14 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, Госпитальный пер., д. 10, ауд. 613М.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте <http://www.bmstu.ru>.

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба высылать по адресу 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1 на имя учёного секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
24.2.331.14

Муратов Игорь Валентинович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы.**

В последние годы, благодаря преимуществам низкой стоимости, простой конструкции, высокой скрытности и мобильности, беспилотные летательные аппараты (БПЛА) широко используются в гражданских областях, таких как точное земледелие, беспилотные грузовые системы и экологический мониторинг. Применение БПЛА в этих областях может снизить потребление человеческих ресурсов, повысить эффективность работы и в то же время обеспечить безопасность персонала для снижения числа несчастных случаев. С развитием методов управления подвижной массой во многих различных областях (включая спутники, спускаемые аппараты, подводные аппараты и т. д.) исследователи также начали уделять особое внимание применению этой схемы управления к управлению полетом БПЛА. В качестве надежной альтернативы традиционной схеме метод управления подвижной массой позволяет устанавливать блоки управляемой массы внутри БПЛА, а ориентационным движением БПЛА можно управлять, управляя смещением блоков массы. Следовательно, эта схема управления может оптимизировать аэродинамическую форму, упростить конструкцию крыла, чтобы уменьшить сложность изготовления формы крыла, и улучшить целостность формы БПЛА.

Фаза посадки является одной из наиболее критичных и подверженных авариям фаз всего процесса выполнения миссии БПЛА. Чтобы уменьшить количество несчастных случаев в процессе посадки БПЛА, необходимо разработать алгоритмы автоматического управления посадкой с хорошими характеристиками управления и высокой точностью. Наиболее распространенные методы, используемые для управления БПЛА, включают ПИД-регулятор, управление в скользящем режиме (SMC), адаптивное управление, робастное управление, компьютерное зрение, нейронные сети и т. д. Они применяются на всех этапах полета БПЛА для повышения стабильности и безопасности. Нетрудно заметить, что все перечисленные методы управления применяются для БПЛА с элеронами. Для БПЛА с неподвижным крылом, управляемых движущейся массой, много соответствующих исследований было проведено Erturk, Qiu и др. Однако в этих исследованиях, касающихся БПЛА с подвижной массой, не были разработаны детальные и полные алгоритмы управления автоматической посадкой. Как связь различных каналов, так и неопределенность моделей в системах БПЛА с подвижной массой создают трудности при разработке алгоритмов управления автопосадкой.

**Целью работы** является повышение точности управления БПЛА с подвижной массой при заходе на посадку алгоритмическим путем.

Для достижения поставленной цели в работе были сформулированы и решены следующие задачи:

1. Разработка математической модели движения БПЛА с подвижной массой на основе анализа его динамических характеристик;
2. Разработка алгоритмов управления угловыми положениями БПЛА;

3. Разработка алгоритмов управления смещением подвижной массы;
4. Разработка алгоритмов управления автоматической посадкой БПЛА на основе сочетания метода наведения и ориентации;
5. Разработка метода автоматической посадки БПЛА в среде Matlab, и оценка предложенных алгоритмов с помощью численного моделирования.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

1. Разработана математическая модель нового типа БПЛА с подвижной массой. По сравнению с традиционными БПЛА, в которых управление креном осуществляется с помощью элеронов, новая конструкция позволяет оптимизировать аэродинамическую форму, упростить конструкцию крыла и улучшить целостность формы, что дополнительно повышает скрытность БПЛА.

2. Разработан алгоритм управления посадкой, включающий подсистему управления угловыми положениями и подсистему управления скоростью движения. Этот алгоритм позволяет обеспечить посадку БПЛА с подвижной массой на взлетно-посадочную полосу (ВПП) с точностью 0,2 м.

3. Разработан алгоритм управления угловым положением БПЛА на основе алгоритма линейного активного контроля отклонения помех (Linear Active Disturbance Rejection Control, LADRC). Этот алгоритм не опирается на точные математические модели и компенсирует помехи от наблюдателя расширенного состояния, что упрощает его практическое применение.

4. Разработан алгоритм управления угловым положением БПЛА на основе адаптивного супер-твиста скользящего режима, параметры которого формировались адаптивными алгоритмами оценивания, что позволило избежать переоценки параметров и уменьшить дрожание сигналов управляющих входов в среднем на 12% по сравнению с традиционным методом управления в скользящем режиме.

5. Разработан адаптивный алгоритм управления подвижной массой с компенсацией возмущений посредством нейронной сети, который использует адаптивные законы для оценки параметров, нейронные сети применяются для компенсации возмущений.

6. Разработан алгоритм асимптотического адаптивного управления подвижной массой с наблюдателем возмущений, гарантирующее асимптотическую эффективность слежения за смещением ползунка при изменяющихся во времени аддитивных возмущениях и неопределенности параметров.

**Достоверность и обоснованность** полученных теоретических и практических результатов достигается использованием общепринятых достоверных методов, строгостью математических выкладок, основанных на фундаментальных законах механики и кинематики. Теоретические результаты подтверждаются численным моделированием и согласуются с известными данными, опубликованными в открытой печати.

**Практическая значимость результатов исследования.** Созданная математическая модель БПЛА с подвижной массой может служить основой для последующих исследований алгоритмов управления. Впервые предложен

способ автоматической посадки БПЛА с подвижной массой на ВПП, эффективность которого подтверждена путем компьютерного моделирования. Этот метод посадки также служит ориентиром для задач посадки БПЛА на другие конструкции. Разработаны алгоритмы управления угловыми положениями БПЛА и алгоритмы отслеживания смещения внутреннего ползуна для повышения точности управления БПЛА. Эти алгоритмы управления могут быть применены к аналогичным устройствам, управляемым подвижными массами, включая спускаемые аппараты, спутники и подводные аппараты.

**Методы исследования.** В диссертации используются методы теории нелинейного управления, теории устойчивости, дифференциальной геометрии, и численные методы. Математическое моделирование процесса автоматической посадки БПЛА на ВПП в среде Matlab.

**Основные положения диссертационной работы, выносимые на защиту.**

1. Математическая модель нового типа БПЛА с подвижной массой.
2. Алгоритм управления посадкой, включающий подсистему управления угловыми положениями и подсистему управления скоростью движения.
3. Алгоритм управления угловым положением БПЛА на основе алгоритма LADRC.
4. Алгоритм управления угловым положением БПЛА на основе адаптивного супер-твиста скользящего режима.
5. Адаптивный алгоритм управления подвижной массой с компенсацией возмущений посредством нейронной сети.
6. Алгоритм асимптотического адаптивного управления подвижной массой с наблюдателем возмущений.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждены на: The 12th Asia Conference on Mechanical and Aerospace Engineering (Nanjing, 2021 г.); XLVI академические чтения по космонавтике «Королевские чтения» (Москва, 2022 г.); International Russian Automation Conference RusAutoCon 2022 (Сочи, 2022 г.); The 13th Asia Conference on Mechanical and Aerospace Engineering (Chengdu, 2022 г.); XLVII академические чтения по космонавтике «Королевские чтения» (Москва, 2023 г.); XXX Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам (Санкт-Петербург, 2023 г.); International Russian Automation Conference RusAutoCon 2023 (Сочи, 2023 г.) и первая научно-практическая конференция с международным участием «Комплексная автоматизация проектирования и производства 2023» (Москва, 2023 г.).

**Публикации.** По теме работы опубликовано 18 научных работ, из них 7 статья в Перечне рецензируемых научных изданий – ВАК РФ и 9 статья в Перечне международных научных изданий в системе Web of Science и Scopus.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Текст диссертации изложен на 113 машинописных страницах, содержит 36 рисунков. Список литературы содержит 100 источников.

**Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы, направления проводимых в диссертационной работе исследований, практическая значимость полученных результатов, а также приведено краткое содержание диссертационной работы.

**В первой главе** представлены различные конструкции БПЛА, описаны основные методы возвращения БПЛА и различные алгоритмы, применяемые при автоматической посадке БПЛА. В последние годы исследователи обращают внимание на технологию управления подвижной массой. В отличие от обычных БПЛА с фиксированным крылом, оснащенных элеронами, БПЛА с подвижными массами обладает лучшими аэродинамическими характеристиками.

Помимо предоставления точной информации о навигации и наведении, система управления полетом также играет важную роль в повышении летных характеристик БПЛА. Летные характеристики БПЛА включают в себя динамические характеристики, такие как маневренность, скорость и характеристики устойчивого состояния, причем характеристики устойчивого состояния показывают, может ли БПЛА точно достичь желаемого значения и сохранить устойчивое состояние после подачи команды на полет. Для выполнения различных задач формы летательных аппаратов варьируются, и аэродинамическая форма БПЛА определяет присущую ему частоту. Малые БПЛА с фиксированным крылом обладают свойством реагирования, и закон управления должен обеспечивать устойчивое состояние полета при одновременном усилении маневренности. Метод управления является междисциплинарной темой, и на его исследование влияют требования рынка и новые теоретические открытия.

**Вторая глава** разработана математические модели движения БПЛА с подвижной массой. Базовая конфигурация БПЛА с жестким крылом и подвижной массой, изучаемая в данной работе, показана на Рис. 1. На основе такой конструкции БПЛА анализируются кинематика, динамика системы, а также силы и моменты сил, действующие на БПЛА. Основные возмущения в процессе посадки БПЛА возникают из-за возмущений ветра, поэтому математическая модель возмущения ветра описывается и применяется к модели среды приземлени.

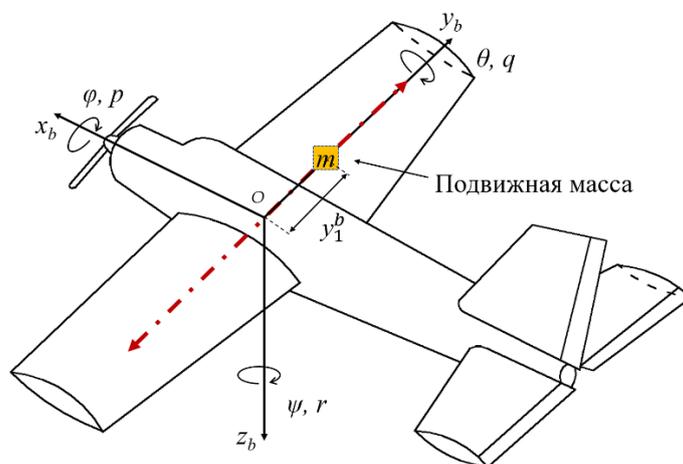


Рис. 1. Конфигурация БПЛА с жестким крылом и подвижной массой

Уравнения динамики движения точки  $O$  выражается в виде

$$\begin{aligned}\dot{u} &= \frac{F_x^b}{m_S} - qw + rv - \mu_1(-ry_1^b - 2ry_1^b + pqy_1^b); \\ \dot{v} &= \frac{F_y^b}{m_S} - ru + pw - \mu_1(\ddot{y}_1^b - y_1^b(r^2 + p^2)); \\ \dot{w} &= \frac{F_z^b}{m_S} - pv + qu - \mu_1(\dot{p}y_1^b + 2py_1^b + qry_1^b),\end{aligned}\quad (1)$$

где  $u$ ,  $v$  и  $w$  – инерционные скорости БПЛА, спроектированные на оси  $x_b$ ,  $y_b$  и  $z_b$  в связанной системе координат (СК);  $\mathbf{F}^b = [F_x^b, F_y^b, F_z^b]^T$  представляет сумму приложенных внешних сил;  $m_S$  – общая масса всей системы,  $m_1$  – масса ползуна,  $\mu_1 = m_1 / m_S$ ;  $p$ ,  $q$ ,  $r$  – угловые скорости крена, тангажа и рысканья, соответственно;  $y_1^b$  – смещение ползуна.

Уравнения динамики движения вокруг точки  $O$  выражается в виде

$$\begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \mathbf{J}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} L - (p\dot{J}_x + (J_z - J_y)qr - J_{xz}pq) \\ M - ((J_x - J_z)pr + J_{xz}(p^2 - r^2)) \\ N - (r\dot{J}_z + (J_y - J_x)pq + J_{xz}qr) \end{bmatrix}; \mathbf{J} = \mathbf{J}_B + \begin{bmatrix} m_1(y_1^b)^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_1(y_1^b)^2 \end{bmatrix},\quad (2)$$

где  $\mathbf{J}$  – матрица инерции БПЛА;  $\mathbf{J}_B$  – тензор инерции, когда БПЛА без подвижной массы;  $L$ ,  $M$ ,  $N$  – компоненты приложенных извне моментов вокруг осей  $x_b$ ,  $y_b$  и  $z_b$  в связанной СК.

Все внешние силы и моменты, действующие на БПЛА, в связанной СК представлены следующим уравнением

$$\begin{bmatrix} F_x^b \\ F_y^b \\ F_z^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -G \sin \theta \\ G \sin \varphi \cos \theta \\ G \cos \varphi \cos \theta \end{bmatrix} + \frac{1}{2} \rho S_{prop} C_{prop} \begin{bmatrix} (k_{motor} \delta_t)^2 - V_a^2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{1}{2} \rho V_a^2 S_{ref} \begin{bmatrix} C_X(\alpha) + C_{X_q}(\alpha) \frac{c}{2V_a} q + C_{X_{\delta_e}}(\alpha) \delta_e \\ C_{Y_0} + C_{Y_\beta} \beta + C_{Y_p} \frac{b}{2V_a} p + C_{Y_r} \frac{b}{2V_a} r + C_{Y_{\delta_r}} \delta_r \\ C_Z(\alpha) + C_{Z_q}(\alpha) \frac{c}{2V_a} q + C_{Z_{\delta_e}}(\alpha) \delta_e \end{bmatrix};\quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} L \\ M \\ N \end{bmatrix} = \mu_1 G \begin{bmatrix} y_1^b \cos \varphi \cos \theta \\ 0 \\ y_1^b \sin \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -k_{T_p} (k_\Omega \delta_t)^2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{1}{2} \rho V_a^2 S_{ref} \begin{bmatrix} b \left( C_{l_0} + C_{l_\beta} \beta + \frac{b}{2V_a} (C_{l_p} p + C_{l_r} r) + C_{l_{\delta_r}} \delta_r \right) \\ c \left( C_{m_0} + C_{m_\alpha} \alpha + \frac{c}{2V_a} C_{m_q} q + C_{m_{\delta_e}} \delta_e \right) \\ b \left( C_{n_0} + C_{n_\beta} \beta + \frac{b}{2V_a} (C_{n_p} p + C_{n_r} r) + C_{n_{\delta_r}} \delta_r \right) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где  $G = m_s g$ ;  $\rho$  – плотность атмосферы;  $S_{prop}$  – площадь вытеснения пропеллера;  $C_{prop}$  – коэффициент полезного действия пропеллера;  $k_{motor}$  – константа, зависящая от характеристик выбранного двигателя;  $V_a$  – скорость движения БПЛА относительно воздуха;  $\delta_t$  – широтно-импульсная модуляция;  $\Omega = k_\Omega \delta_t$  – скорость пропеллера;  $k_{T_p}$  является константой, значение которой определяют экспериментально;  $S_{ref}$  – площадь крыла БПЛА в плане;  $c$  – средняя хорда крыла БПЛА;  $b$  – размах крыла;  $\alpha$  – угол атаки;  $\beta$  – угол бокового скольжения;  $C_*$  – аэродинамические коэффициенты и связанные функции;  $\delta_e$  – отклонение руля высоты;  $\delta_r$  – отклонение руля направления.

Динамическое движение подвижной массы можно выразить как

$$m_1 \left( \ddot{y}_1^b + \dot{v} - y_1^b (r^2 + p^2) + ru - pw \right) = F_u + m_1 g \sin \varphi \cos \theta - F_f, \quad (5)$$

где  $F_u$  – активная управляющая сила, действующая от сервомеханизма на подвижную массу, а  $F_f$  – трение, препятствующее движению блока масс.

**В третьей главе** разработан алгоритм управления автоматической посадкой БПЛА. Соответствующие регуляторы разрабатываются в зависимости от желаемой скорости движения вперед, продольной и боковой траектории. Разработан алгоритм наведения при посадке БПЛА и два алгоритма управления угловыми положениями БПЛА.

Точность посадки БПЛА оказывает большое влияние на их безопасность и эффективность. Для повышения точности БПЛА при посадке на ВПП разработан метод управления автоматической посадкой, интегрирующий наведение и управление. Упрощенная схема системы автоматической посадки БПЛА представлен на Рис. 2. В частности, регулятор скорости движения вперед, регулятор высоты и методы наведения проектируются по желаемой скорости движения вперед, продольной траектории и боковой траектории. Управление угловыми положениями формирует желаемое смещение ползуна, отклонение руля высоты и отклонение руля направления на основе желаемых сигналов крена, тангажа и рысканья. Регулятор положения подвижной массы формирует желаемую движущую силу ползуна на основе желаемого смещения ползуна.



Рис. 2. Упрощенная схема системы автоматической посадки БПЛА

**Алгоритм управления угловыми положениями на основе алгоритма LADRC.** Пусть  $\Phi = [\varphi, \theta, \psi]^T$ ,  $\omega = [p, q, r]^T$ , желаемые скорости вращения  $\omega_c$  рассчитываются следующим образом

$$\omega_c = \mathbf{A}^{-1} \left( \dot{\Phi}_c - \mathbf{k}_\Phi \mathbf{e}_\Phi \right), \quad (6)$$

где  $\mathbf{A}$  – матрица преобразования,  $\Phi_c$  – желаемые угловые положения,  $\mathbf{e}_\Phi = \Phi - \Phi_c$ ,  $\mathbf{k}_\Phi$  – матрица коэффициенты усиления.

Наблюдатель LESO (Linear extended state observer) и управляющий вход  $\mathbf{u}_\omega$  проектируются следующим образом

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\omega}} &= \beta_1^\omega (\omega - \hat{\omega}) + \hat{\mathbf{f}}_\omega + \mathbf{g}_\omega \mathbf{u}_\omega; \quad \hat{\mathbf{f}}_\omega = \beta_2^\omega (\omega - \hat{\omega}); \\ \mathbf{u}_\omega &= \mathbf{g}_\omega^{-1} \left( \mathbf{k}_1^\omega (\omega_c - \hat{\omega}) - \hat{\mathbf{f}}_\omega + \dot{\omega}_c \right), \end{aligned} \quad (7)$$

где  $\hat{\mathbf{f}}_\omega$  – оценка общего возмущения,  $\beta_1^\omega$ ,  $\beta_2^\omega$ , и  $\mathbf{k}_1^\omega$  – матрицы параметров. Принципиальная схема алгоритма управления угловыми положениями на основе алгоритма LADRC показана на Рис. 3.

**Адаптивный супер-твист скользящий режим управления угловыми положениями.** Учитывая неопределенности и возмущения модели, создана нелинейная математическая модель для БПЛА. Разработанный адаптивный супер-твист скользящий режим управления (Adaptive Super-Twisting Sliding Mode Control, ASTSMC) может добиться сходимости ошибки угла ориентации за ограниченное время. С помощью анализа Ляпунова предложенный алгоритм гарантирует устойчивость. Схема алгоритма ASTSMC показана на Рис. 4.

Модель угловых положений может быть выражена как

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_1 &= \mathbf{x}_2; \\ \dot{\mathbf{x}}_2 &= \mathbf{F}_1 + \mathbf{G}_1 \mathbf{u}_\omega + \mathbf{d}_1, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $\mathbf{x} = [\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2]^T := [\Phi, \dot{\Phi}]^T$ ;  $\mathbf{F}_1$ ,  $\mathbf{G}_1$  и  $\mathbf{d}_1$  задаются

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_1 &= \dot{\mathbf{A}} \mathbf{A}^{-1} \dot{\Phi} - \mathbf{A} \mathbf{J}_B^{-1} \left[ \mathbf{A}^{-1} \dot{\Phi} \times (\mathbf{J}_B \cdot \mathbf{A}^{-1} \dot{\Phi}) \right] + \mathbf{A} \mathbf{J}_B^{-1} \mathbf{M}_1; \\ \mathbf{G}_1 &= \mathbf{A} \mathbf{J}_B^{-1} \mathbf{B}_M; \quad \mathbf{d}_1 = \Delta \mathbf{F}_1 + \Delta \mathbf{G}_1, \end{aligned} \quad (9)$$

где  $\mathbf{d}_1$  – полное возмущение, содержащее члены связи  $\Delta \mathbf{F}_1$  и  $\Delta \mathbf{G}_1$ , которые относятся к  $\mathbf{F}_1$  и  $\mathbf{G}_1$ .

Входной сигнал может быть получен как

$$\mathbf{u}_\omega = \mathbf{G}_1^{-1} \left( \ddot{\Phi}_c - \mathbf{F}_1 - \mathbf{c}_1 \dot{\mathbf{e}}_\Phi - \lambda_1 \|\mathbf{s}\|^{\frac{1}{2}} \tanh(\mathbf{s}) - \alpha_1 \int \tanh(\mathbf{s}) dt \right) \quad (10)$$

где  $\lambda_1 > 0$  и  $\alpha_1 > 0$  – параметры регулятора.

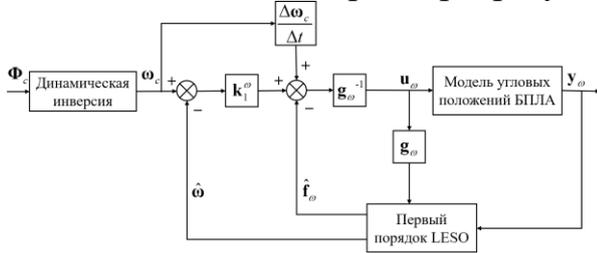


Рис. 3. Схема алгоритма управления угловыми положениями на основе алгоритма LADRC



Рис. 4. Схема алгоритма управления угловыми положениями на основе алгоритма ASTSMC

**Четвертая глава посвящена** разработке три алгоритмов управления смещением подвижной массой. Инерционная связь между ползуном и корпусом, многочисленные неопределенности, включая возмущения аэродинамических параметров и немоделируемые возмущения, вероятно, будут влиять на точность движения ползуна. Наличие частых отклонений внутреннего ползунка, в свою очередь, приведет к колебаниям или даже дисперсии всей связанной системы. Эти возмущения и неопределенности неизбежно приведут к возникновению проблем при разработке их регуляторов.

**Алгоритм управления подвижной массой на основе алгоритма LADRC.** Мы получили управляющую команду для смещения ползуна, превратив ее в желаемую выходную команду регулятора положения подвижной массы. В соответствии с динамическим движением подвижной массы, приведенным выше (5), выражение пространства состояний расширения может быть получено в виде

$$\begin{aligned} \dot{y}_1^b &= \dot{y}_1^b; \\ \ddot{y}_1^b &= f_y + g_y F_u; \\ \dot{f}_y &= \dot{f}_y, \end{aligned} \quad (11)$$

где  $f_y$  и  $g_y$  определяются

$$f_y = g \sin \varphi \cos \theta - \frac{F_f}{m_1} + y_1^b (r^2 + p^2) - \dot{v} - ru + pw; \quad g_y = \frac{1}{m_1}. \quad (12)$$

Наблюдатель LESO и конечное желаемое положение ползуна имеют следующий вид

$$\begin{aligned} \dot{\hat{y}}_1^b &= \beta_1^{y_1^b} (y_1^b - \hat{y}_1^b) + \hat{y}_1^b; \quad \dot{\hat{y}}_1^b = \beta_2^{y_1^b} (y_1^b - \hat{y}_1^b) + \hat{f}_y + g_y F_u; \\ \dot{\hat{f}}_y &= \beta_3^{y_1^b} (y_1^b - \hat{y}_1^b); \quad F_u = g_y^{-1} \left( k_1^{y_1^b} (y_{1c}^b - \hat{y}_1^b) + k_2^{y_1^b} (\dot{y}_{1c}^b - \hat{y}_1^b) - \hat{f}_y + \ddot{y}_{1c}^b \right), \end{aligned} \quad (13)$$

где  $\beta_1^{y_1^b}$ ,  $\beta_2^{y_1^b}$  и  $\beta_3^{y_1^b}$  – коэффициенты усиления наблюдателя;  $k_1^{y_1^b}$  и  $k_2^{y_1^b}$  –

коэффициенты усиления положительной обратной связи. Принципиальная схема алгоритма управления подвижной массой БПЛА на основе алгоритма LADRC показана на Рис 5.

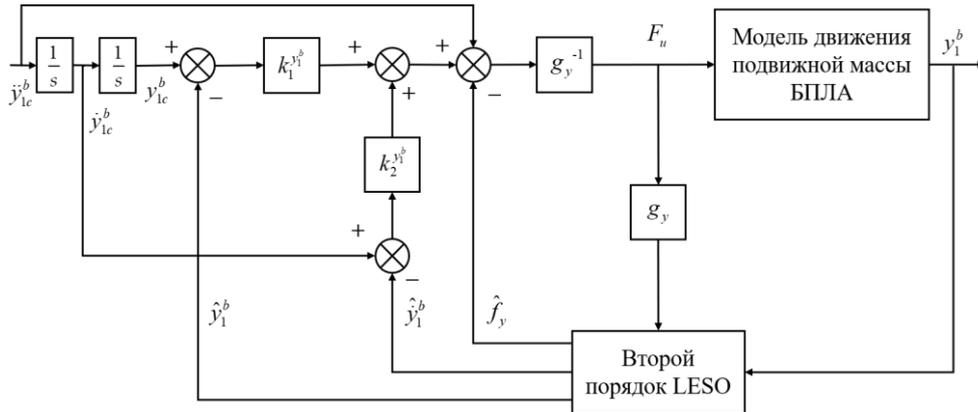


Рис. 5. Схема алгоритма управления подвижной массой БПЛА на основе алгоритма LADRC

**Адаптивный алгоритм управления подвижной массой с компенсацией возмущений посредством нейронной сети (ARCNN).** Параметрическая адаптивная стратегия предназначена для оценки параметров, в то же время нейронная сеть предназначена для компенсации неопределенности модели, включая возмущение. Конкретная схема управления показана на Рис 6.



Рис. 6. Схема адаптивного алгоритма управления подвижной массой с компенсацией возмущений посредством нейронной сети

В соответствии с уравнением (5) упрощенную модель подвижной массы можно описать следующим образом:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2; \\ m_1 \dot{x}_2 &= F_u + m_1 f_1 - \sigma_2 x_2 - \Delta(t), \end{aligned} \quad (14)$$

где сменные состояния  $\mathbf{x} = [x_1, x_2]^T = [y_1^b, \dot{y}_1^b]^T$ , измеримая функция  $f_1 = x_1(r^2 + p^2) + g \sin \varphi \cos \theta - \dot{v} - ru + pw$ ,  $\Delta(t) = \sigma_0 z + \sigma_1 \dot{z}$  – возмущение.

Входной сигнал может быть получен как

$$\begin{aligned} F_u &= u_a + u_s; u_a = \hat{\theta}_1(\dot{\alpha}_1 - f_1) + \hat{\theta}_2 x_2 + \hat{\Delta}; \\ u_s &= u_{s1} + u_{s2}; u_{s1} = -k_2 z_2; u_{s2} = -\frac{h_s^2}{4\varepsilon} z_2, \end{aligned} \quad (15)$$

где  $k_2$  – положительный расчетный параметр,  $u_a$  – адаптивная функция управления с компенсацией, основанная на модели,  $u_s$  – функция обратной связи по ошибкам,  $\hat{\Delta}$  – оценка  $\Delta$ .

**Алгоритм асимптотического адаптивного управления подвижной массой с наблюдателем возмущений (ARCO).** В данной работе предлагается высокоэффективный адаптивный алгоритм с наблюдателем возмущений для управления слежением подвижной массой. Для обработки неопределенностей параметров и возмущений в регуляторе используется адаптивный наблюдатель возмущений с адаптивным усилением и закон адаптивного оценивания параметров. Асимптотическая эффективность слежения регулятора анализируется с помощью функции Ляпунова. Конкретная схема управления показана на Рис 7.

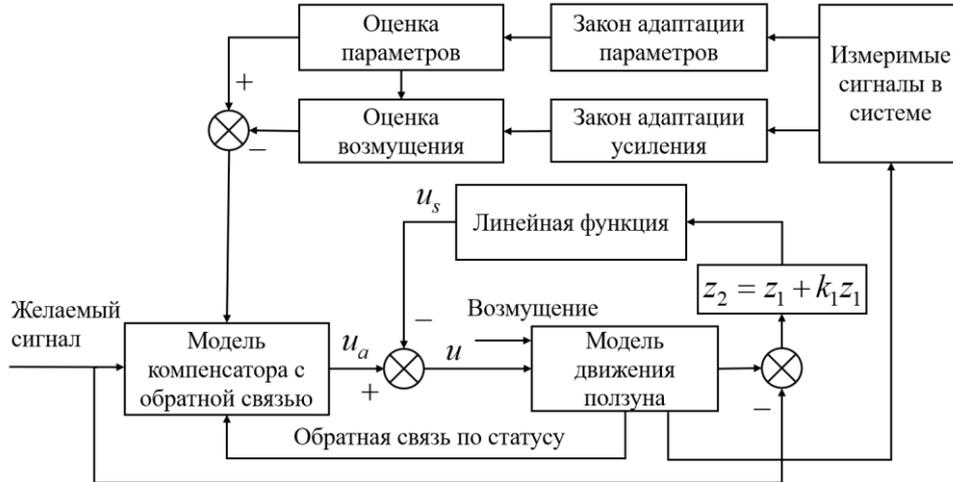


Рис. 7. Схема алгоритма асимптотического адаптивного управления подвижной массой с наблюдателем возмущений

Пусть вектор неизвестных параметров системы  $\theta = [\theta_3, \theta_4]^T = [1/m_1, \sigma_2/m_1]^T$ , тогда модель подвижной массой может быть выражена:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2; \\ \dot{x}_2 &= \theta^T \phi + f_1 + x_3; \\ \dot{x}_3 &= \dot{d}(t), \end{aligned} \quad (16)$$

где  $\phi = [F_u, -x_2]^T$ ,  $d(t) = -\Delta(t)/m_1$ .

Роль наблюдателя заключается в оценке аддитивных возмущений, и наблюдатель может быть построен как

$$\dot{\hat{x}}_2 = \hat{\theta}^T \phi + f_1 + \hat{x}_3 - 2w\tilde{x}_2; \quad \dot{\hat{x}}_3 = -w^2\tilde{x}_2 - \hat{\beta}_1 \text{sgn}(\tilde{x}_2), \quad (17)$$

где  $w$  – положительная константа; функция  $\text{sgn}(\cdot)$  обозначает символьную функцию;  $\hat{\beta}_1$  – обновленный коэффициент усиления.

Можно предложить управляющий вход:

$$F_u = [\hat{\theta}_4 x_2 - \hat{x}_3 - f_1 + \dot{\alpha}_1 - k_2 z_2] / \hat{\theta}_3, \quad (18)$$

где  $k_2 > 0$  представляет собой коэффициент усиления обратной связи, который должен быть настроен в соответствии с реальной системой.

В пятой главе содержит результаты моделирования. Разработана соответствующая платформа моделирования на основе математических моделей и алгоритмов управления, полученных в предыдущих главах. Эффективность различных предложенных алгоритмов управления проверяется с помощью численного моделирования, и результаты моделирования анализируются.

**Результаты моделирования алгоритмов угловых положений БПЛА.** Фактические и желаемые угловые сигналы БПЛА представлены на Рис. 8–10.

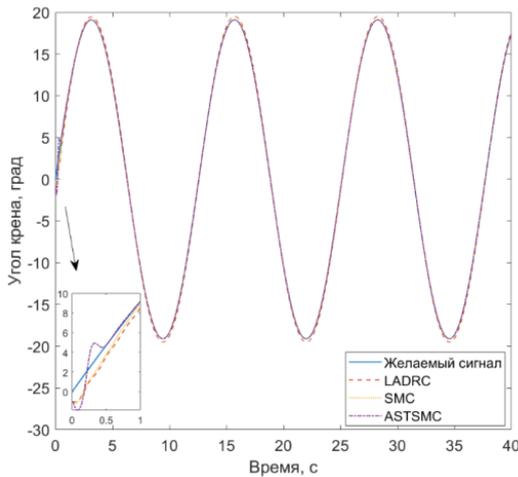


Рис. 8. Угол крена

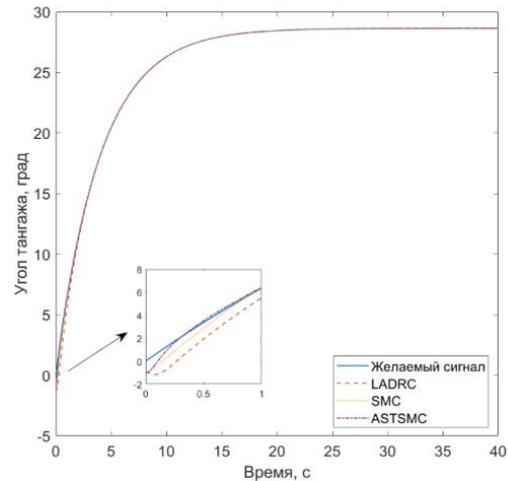


Рис. 9. Угол тангажа

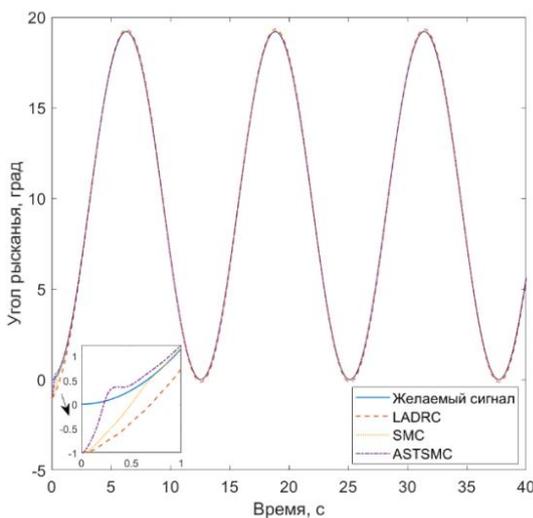


Рис. 10. Угол рыскания

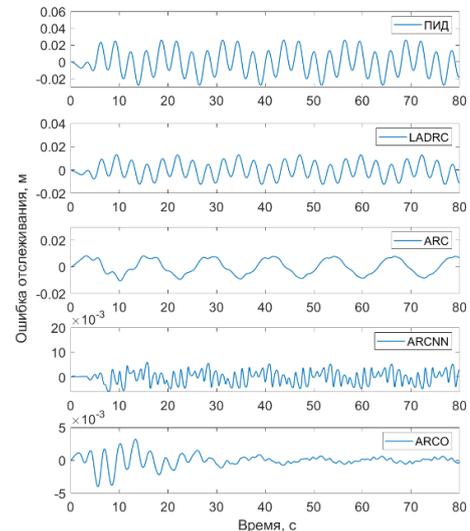


Рис. 11. Ошибка отслеживания

Из этих трех графиков видно, что все три алгоритма обеспечивают хорошие эффекты управления, т. е., перекрытие между фактическим и желаемым углом достаточно велико. Выходные сигналы полных каналов быстро достигают командных сигналов в течение 1 секунды. Ошибки слежения быстро уменьшаются за короткое время и, наконец, сходятся к очень маленькому значению. При частичном увеличении видно, что алгоритм ASTSMC имеет самую высокую скорость отслеживания, но есть небольшое превышение. Это

превышение может быть уменьшен путем регулировки величины коэффициента усиления. Алгоритм SMC отслеживает несколько быстрее, чем алгоритм LADRC, но разница невелика.

Индексы эффективности в период последних 10 секунд рассчитаны в Таблице 1–3. Максимальное значение  $M_e$ , среднее значение  $\mu$  и стандартное отклонение  $\sigma$  ошибки углов меньше при разработанном алгоритме ASTSMC, чем при алгоритме SMC и алгоритме LADRC. Это означает, что алгоритм ASTSMC демонстрирует более высокую точность в установившемся режиме.

Таблица 1.

Данные о производительности по крену за последние 10 секунд

Индексы (град)	$M_e$	$\mu$	$\sigma$
LADRC	0.4299	0.2415	0.1292
SMC	0.0111	0.0073	0.0035
ASTSMC	0.0088	0.0053	0.0029

Таблица 2.

Данные о производительности по тангажу за последние 10 секунд

Индексы (град)	$M_e$	$\mu$	$\sigma$
LADRC	0.0093	0.0058	0.0022
SMC	0.0111	0.0060	0.0033
ASTSMC	0.0080	0.0055	0.0020

Таблица 3.

Данные о производительности по рысканию за последние 10 секунд

Индексы (град)	$M_e$	$\mu$	$\sigma$
LADRC	0.1540	0.1104	0.0430
SMC	0.0471	0.0377	0.0078
ASTSMC	0.0099	0.0046	0.0028

**Результаты моделирования алгоритмов смещения подвижной массы.** Кривые ошибок отслеживания для пяти алгоритмов (ПИД, LADRC, ARC (Adaptive robust control), ARCNN, ARCO) показаны на Рис. 11. Индексы эффективности этих алгоритмов в период последних 10 секунд рассчитаны в Таблице 4. Как видно, алгоритм ARCO демонстрирует более высокую точность в установившемся режиме.

Таблица 4.

Данные о производительности за последние 10 секунд

Индексы (м)	$M_e$	$\mu$	$\sigma$
ПИД	0.0279	0.0074	0.0074
LADRC	0.0130	0.0058	0.0036
ARC	0.0083	0.0054	0.0023
ARCNN	0.0053	0.0022	0.0014
ARCO	0.0006	0.0003	0.0002

**Результаты моделирования автопосадки БПЛА на ВПП.** Цель нашего управления – обеспечить полет БПЛА по заданной траектории и, в конечном счете, посадку в заданном месте на наземной ВПП (инерционные координаты точки приземления определяются как  $[X_{td}, Y_{td}, H_{td}] = [0, 0, 0]$ ).

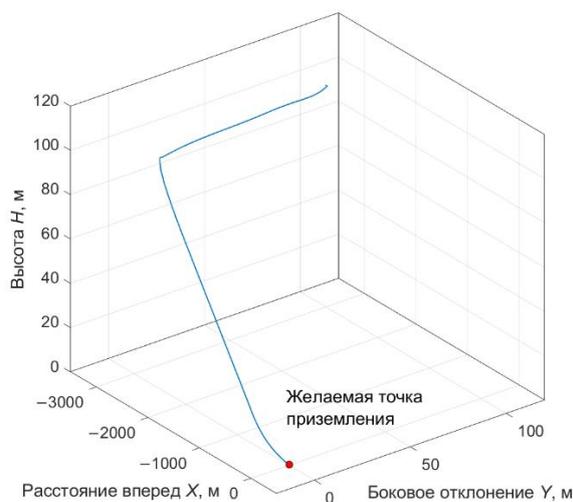


Рис. 12. Траектория движения БПЛА в течение всего процесса посадки

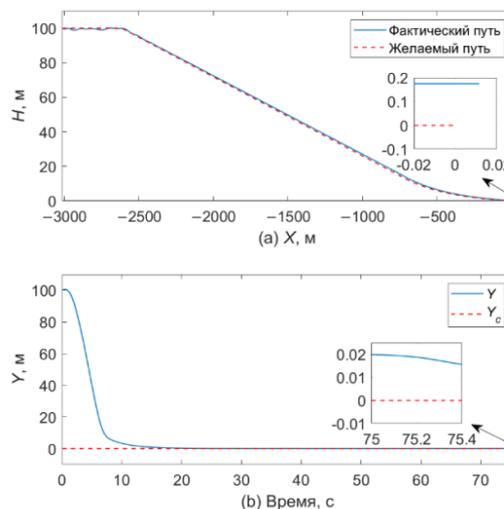


Рис. 13. (а) Траектория движения БПЛА в плоскостях  $X-H$ ; (б) боковое отклонение

Трехмерная траектория движения БПЛА во время посадки показана на Рис. 12. Для более наглядной демонстрации точности процесса посадки на Рис. 13 показана траектория движения БПЛА в плоскости  $X-H$  и боковое отклонение. Нетрудно заметить, что фактическая траектория совпадает с желаемой на протяжении всего процесса посадки, за исключением этапа начальной корректировки. Кроме того, точность слежения за БПЛА в направлениях  $X$  и  $H$  в конечном итоге достигает ошибок порядка 0,01 м и 0,2 м соответственно. Боковое отклонение быстро уменьшается на этапе сближения и, наконец, сходится с осевой линией ВПП примерно через 15 с. Когда БПЛА садится на ВПП, его боковое отклонение достигает примерно 0,02 м. В целом эффективность предложенных алгоритмов управления автоматической посадкой подтверждается приведенными выше результатами моделирования. Совместная работа этих алгоритмов помогает БПЛА выполнять посадочные задачи по заданной траектории и в конечном итоге точно приземлиться на ВПП.

**В заключении** приведены основные результаты работы.

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработана нелинейная модель движения БПЛА с подвижной массой, использованная для анализа характеристик и проектирования регуляторов БПЛА.
2. Разработан метод автоматического управления посадкой БПЛА, объединяющий наведение и управление. На основе этого метода БПЛА может приземлиться вблизи желаемой точки приземления с точностью 0,2 м, что на 14% точнее по сравнению с аналогом.

3. Разработан алгоритм управления угловыми положениями БПЛА на основе алгоритма LADRC. Этот алгоритм имеет простую структуру и не чувствителен к параметрической неопределенности модели системы.
4. Разработан адаптивный супер-твист скользящий режим управления угловыми положениями БПЛА. Этот алгоритм снабжен адаптивной структурой усиления на основе алгоритма SMC и использует функцию  $\tanh$  для замены функции  $\text{sign}$  при моделировании. Конечный входной сигнал управления является гладким, что позволяет избежать проблемы дрожания сигнала, а точность управления повышается в среднем на 12% по сравнению с алгоритмом SMC.
5. Разработан алгоритм управления отслеживанием положения ползуна на основе алгоритма LADRC, который компенсирует ошибку за счет использования оценки возмущений. Этот алгоритм повышает точность в среднем на 10% по сравнению с ПИД-алгоритмом.
6. Разработан адаптивный алгоритм управления подвижной массой с компенсацией возмущений по нейронной сети, который повышает точность по ряду математических моделей в среднем на 15% по сравнению с аналогичными алгоритмами ARC.
7. Разработан алгоритм асимптотического адаптивного управления подвижной массой с наблюдателем возмущений, который повышает точность на 19% по сравнению с аналогичными алгоритмами ARC.
8. Предложенные в диссертации алгоритмы исследованы методом математического моделирования в среде Matlab и подтверждена их эффективность.

### СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Zheng J., Neusypin K.A., Selezneva M.S. Auto-Landing of Moving-Mass Actuated Unmanned Aerial Vehicles Based on Linear Active Disturbance Rejection Control // Drones. 2023. Vol. 7, No. 8, P.539. (2.7 п.л. / 1.2 п.л.)
2. Адаптивное робастное управление креном для летательного аппарата с подвижной массой / Чжэн Цзинчжун [и др.] // Автоматизация. Современные технологии. 2022, Т. 76, №11, С. 500–506. (0.8 п.л. / 0.4 п.л.), к 2.
3. Управление ориентацией маневрирующего спускаемого аппарата с компенсацией возмущений с помощью нейронной сети / Чжэн Цзинчжун [и др.] // Автоматизация. Современные технологии. 2023, Т. 77, №3, С. 128–133. (0.7 п.л. / 0.5 п.л.), к 2.
4. Метод наведения спускаемого аппарата с подвижной массой для точной посадки / Чжэн Цзинчжун [и др.] // Перспективы Науки. 2022, Т. 158, №11, С. 34–39. (0.7 п.л. / 0.3 п.л.), к 2.
5. Управление ориентацией спускаемого аппарата с одинарной подвижной массой / Чжэн Цзинчжун [и др.] // Перспективы Науки. 2022, Т. 159, №12, С. 42–45. (0.5 п.л. / 0.3 п.л.), к 2.
6. Чжэн Ц. Управление угловыми положениями беспилотных летательных аппаратов с подвижной массой // Перспективы Науки. 2023, Т. 171, №12, С. 63–66. (0.5 п.л. / 0.3 п.л.), к 2.

7. Чжоу Ж., Неусыпин К.А., Чжэн Ц. Разработка алгоритмического обеспечения обнаружения авианосца с использованием техники машинного зрения для автоматической посадки БПЛА // Автоматизация. Современные технологии. 2022, Т. 76, №12, С. 545–550. (0.7 п.л. / 0.4 п.л.), к 2.
8. Хэ Б., Муратов И.В., Чжэн Ц. Распределенный псевдоспектральный метод для оптимизации траектории беспилотного летательного аппарата на основе билинейной касательной // Автоматизация. Современные технологии. 2023, Т. 77, №11, С. 489–496. (0.9 п.л. / 0.6 п.л.), к 2.
9. Адаптивное интегральное робастное управление креном для спускаемого аппарата с подвижной массой / Чжэн Цзинчжун [и др.] // XLVI Академические чтения по космонавтике. 2022. С. 531–534. (0.5 п.л. / 0.2 п.л.)
10. Робастное адаптивное управление креном для спускаемого аппарата с немоделируемыми динамиками / Чжэн Цзинчжун [и др.] // XLVII Академические чтения по космонавтике. 2023. С. 159–161. (0.4 п.л. / 0.2 п.л.)
11. Zheng J., Selezneva M.S. Continuous integral Robust Roll Control for Single Moving-mass Controlled Reentry Vehicle // The 12th Asia Conference on Mechanical and Aerospace Engineering (ACMAE). 2021. Vol. 2235, No. 1, P. 012024. (0.7 п.л. / 0.4 п.л.)
12. Zheng J., Selezneva M.S. Asymptotic Adaptive Roll Tracking Control for Single Moving-mass Controlled Reentry Vehicle // 2022 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). 2022. P. 134–139. (0.7 п.л. / 0.5 п.л.)
13. Zheng J., Selezneva M.S., Yi J., Zhu L. Attitude Control of a Moving Mass-Actuated Fixed-Wing UAV Based on LADRC // The 12th Asia Conference on Mechanical and Aerospace Engineering (ACMAE). 2022. Vol. 2472, No. 1, P. 012045. (0.7 п.л. / 0.4 п.л.)
14. Zheng J., Neusypin K.A., Selezneva M.S., Zhou R. Adaptive Super-Twisting Sliding Mode Attitude Control for Moving Mass-actuated Unmanned Aerial Vehicles // The 30th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS). 2023. P. 1–4. (0.5 п.л. / 0.3 п.л.)
15. Zheng J., Selezneva M.S., Neusypin K.A. Auto-landing Control for Moving-mass Actuated Unmanned Aerial Vehicles // 2023 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). 2023. P. 70–74. (0.6 п.л. / 0.4 п.л.)
16. Hu, Y., Shen, K., Neusypin, K.A., Shi, J., Zheng, J. Controllability Analysis of the Autopilot with Angular-Acceleration Feedback // 2022 International Conference on Guidance, Navigation and Control (ICGNC). 2022. P. 859–868. (1.2 п.л. / 0.5 п.л.)
17. Zhu, L., Gavriushin, S.S., Zheng, J. Review on the Positioning Error Causes Analysis and Methods to Improve Positioning Accuracy of Parallel Robot // The 4th International Symposium on Computer Science, Digital Economy and Intelligent Systems (CSDEIS). 2022. P. 712–721. (1.2 п.л. / 0.7 п.л.)
18. Yi J., Selezneva M.S., Neusypin K.A., Zheng J. Application of the Self-Organization Algorithm with the Trend Redundancy in Navigation and Mapping of the Vehicle // The 30th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS). 2023. P. 1–4. (0.5 п.л. / 0.4 п.л.)