

На правах рукописи

Чжоу Жуйян

**Алгоритмы системы автономной посадки беспилотного
летательного аппарата авианосного базирования**

Специальность 2.3.1 – «Системный анализ, управление и обработка
информации, статистика»

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2023

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: **Неусыпин Константин Авенирович**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой систем автоматического управления МГТУ им. Н.Э. Баумана

Официальные оппоненты: **Магомедов Магомед Хабибович**, д.ф.-м.н., с.н.с. лаборатории по математическому обеспечению имитационных динамических систем МГУ им. М.В. Ломоносова

Стуловский Александр Викторович, к.т.н., начальник сектора федерального автономного учреждения «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Защита состоится 13 февраля 2024 г. в 14.30 на заседании диссертационного совета 24.2.331.14 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, Госпитальный пер., 10, ауд. 613м.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования 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 ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.т.н., доцент



Муратов
Игорь Валентинович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Диссертационная работа посвящена исследованию задачи автономной посадки беспилотного летательного аппарата (БЛА) на авианосец. Исследуемый БЛА предназначен для выполнения задач мониторинга морских акваторий, решения задач в интересах МЧС, а также ряда экологических задач.

На эффективность БЛА очень сильно влияет качество выполнения посадки. В отличие от обычной посадки на посадочную полосу, посадка на авианосец должна осуществляться с высокой посадочной скоростью для обеспечения возможности повторной попытки при неудачной посадке. Причем необходимо учитывать негативное влияние возмущений морской среды на управление БЛА. Совокупность особенностей задачи требует применения алгоритмов с повышенной точностью и помехозащищённостью.

Ключевым возмущением в посадке является качка палубы авианосца, вызванная волнением моря. На практике безопасность пилотируемой посадки обеспечивается с помощью оптической системы посадки (ОСП), также часто используется измерение качки, переданное БЛА через радиосвязь от авианосных бортовых датчиков. Для выполнения автономной посадки БЛА при радиомолчании авианосца можно использовать метод визуальной навигации на основе ОСП, а другой подход представляет собой прогнозирование качки авианосца на борту БЛА. Для осуществления прогноза необходимо построить прогнозирующую модель качки авианосца. Получив прогноз качки, осуществляется ее учет при управлении БЛА в процессе посадки на палубу авианосца. Таким образом, компенсация качки является актуальной задачей для повышения точности посадки БЛА.

Другим фактором, влияющим на посадку БЛА на авианосец, является атмосферное возмущение. Существуют разные атмосферные возмущения, такие как турбулентность, устойчивое возмущение от работы винта корабля и т.д., для каждого определена эмпирическая математическая модель. При интенсивном атмосферном возмущении ошибка управления по координатам БЛА достигает нескольких метров. Поэтому разработка помехозащищённого алгоритма управления БЛА для посадки на авианосец является очень актуальной задачей. Для предотвращения влияния указанных возмущений часто используются помехозащищенные алгоритмы, одним из перспективных вариантов является управление с активным подавлением помех (ADRC). Метод ADRC был предложен Хань Цзинцин, а большой вклад в развитие и распространение метода внес Го Чжицян. Внедрение метода ADRC в систему регулирования является актуальной задачей для повышения помехозащищённости алгоритма посадки БЛА.

Кроме эффективности алгоритма регулирования, успешное управление БЛА в большой степени определяется еще точностью использованной навигационной информации.

В БЛА используют навигационные комплексы (НК) различного состава. Обычно в состав НК входят разнообразные навигационные системы (НС), такие как ИНС, ГНСС, ВНС и т.п. Каждая навигационная система работает по определенному физическому принципу и имеет разные преимущества и недостатки. Совместная работа НС позволяет повысить точность определения состояния БЛА. Для повышения точности НК используются различные алгоритмы оценивания (АО), в частности фильтр Калмана (ФК). Однако эффективность ФК во многом определяется точностью априорной информации, неточное значение ковариационных матриц и неопределенность модели погрешностей НС приводят к снижению точности и даже расходимости ФК. Для адаптивного построения модели погрешностей ИНС Неусыпиным К.А., Селезневой М.С., Шень Кай и Чжан Лифэй был предложен ряд алгоритмов с использованием метода группового учета аргументов (МГУА). Адаптивный ФК на основе подобных алгоритмов является перспективным подходом к решению исследуемой задачи.

При посадке на авианосец БЛА осуществляет интенсивное предпосадочное маневрирование, которое вызывает изменение погрешностей НК, кроме того, сигнал ГНСС на практике подвержен помехам, поэтому разработка адаптивного ФК с самоорганизующимися моделями является актуальной задачей.

Решение этого комплекса задач обеспечит повышение точности управления БЛА, серийными и перспективными ЛА.

Целью диссертационной работы является разработка и исследование алгоритмов управления БЛА и коррекции его НК в процессе автономной посадки на авианосец.

Реализация цели предусматривает исследование технических характеристик посадки БЛА на авианосец, повышение точности и безопасности автоматической посадки путём прогнозирования и компенсации качки авианосца, улучшения помехозащищённости алгоритма, а также коррекция погрешностей НК с использованием адаптивного ФК.

Для достижения этой цели в работе были поставлены и решены **следующие задачи:**

1. Анализ процедуры пилотируемой посадки ЛА на авианосец, формирование технических этапов работы системы автоматической посадки и структурной схемы системы;
2. Моделирование динамики БЛА, и исследуемых возмущений возникающих при посадке;
3. Разработка набора алгоритмов для обнаружения авианосца в изображениях, полученных бортовой камерой БЛА, а также компактного алгоритма распознавания в ночных условиях;
4. Разработка алгоритма коррекции погрешностей НК в составе ИНС, ГНСС и т.д. с повышенной точностью навигационных определений в

нештатных ситуациях;

5. Разработка алгоритма управления БЛА, который компенсирует отклонение БЛА от глиссады, вызванное морским волнением, путем прогнозирования качки;

6. Разработка алгоритма управления БЛА с активным подавлением возмущений, оказываемых на БЛА в процессе посадки, такие как турбулентность, порыв ветра и другие атмосферные возмущения.

Методы исследования. При решении сформулированных задач использованы методы теории управления, в частности методы адаптивного управления и оценивания, методы построения моделей, а также математического моделирования.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Разработаны алгоритмы обнаружения авианосца: экономный быстродействующий алгоритм за счет меньшего количества обрабатываемых пикселей и объема вычислений;

2. Разработан каскадный АО, включающий адаптивный ФК, наблюдатель расширенного состояния и МГУА. По сравнению с существующими вариантами предложенный алгоритм не чувствителен к неточности начальной ковариационной матрицы, имеет повышенную точность в условиях сильных помех и при отказе ГНСС и легко реализуем на борту БЛА;

3. Разработан адаптивный АО для коррекции погрешности НК, который увеличивает скорость сходимости оценок после восстановления сигнала ГНСС за счет использования адекватной модели МГУА;

4. Разработан алгоритм наведения БЛА с прогнозированием и компенсацией качки, отличающийся от существующих аналогов высокой точностью определения точки посадки и возможностью учитывать физические ограничения БЛА;

5. Разработан алгоритм управления ориентацией БЛА в процессе посадки, который по сравнению с аналогами легко реализуем в спецвычислителе и имеет хорошую помехозащищенность.

Практическая ценность диссертации:

Предложенная схема системы автономной посадки позволяет БЛА выполнить посадку самостоятельно без использования информации от авианосца, при отсутствии связи между авианосцем и БЛА автономная посадка необходима. Разработанный алгоритм наведения даёт возможность уменьшить отклонение БЛА от заданной глиссады с учетом качки, а разработанный алгоритм управления повышает точность регулирования ориентации БЛА при наличии интенсивных атмосферных возмущений в процессе посадки. С помощью этих алгоритмов обеспечивается безопасность и успех посадки БЛА на авианосец. Разработанный алгоритм адаптивного ФК позволяет с высокой точностью корректировать НК БЛА с

использованием измерений ГНСС. Точность определения состояний БЛА играет ключевую роль в управлении процессом посадки. Предложенный адаптивный ФК позволяет частично компенсировать погрешности НК в нештатных ситуациях.

Разработанные алгоритмы и методы используются в научно-исследовательских проектах компании Shanghai Jianda Intelligent Technology Co. Ltd. и в учебном процессе кафедры систем автоматического управления МГТУ им. Н.Э.Баумана.

Достоверность и обоснованность полученных результатов диссертационной работы подтверждаются результатами математического моделирования, а также согласованностью результатов с известными данными в этой области.

Основные положения диссертационной работы, выносимые на защиту:

1. Алгоритм обнаружения авианосца, и алгоритм распознавания ОСП при ночной посадке БЛА на основе цветовой сегментации;
2. Использование наблюдателя расширенного состояния (НРС) и алгоритма построения модели для адаптивного ФК, и с его помощью коррекция погрешности НК БЛА;
3. Алгоритм управления БЛА с использования прогнозирующей модели качки для посадки на авианосец;
4. Алгоритм управления БЛА с активным подавлением помех для посадки при наличии интенсивных атмосферных возмущений.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на ряде конференций: XI и XII всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (Москва, 2019 г. и 2020 г.); II Межвузовской заочной конференции аспирантов, соискателей и молодых ученых (Москва, 2020 г.); XXVII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам (Санкт-Петербург, 2020 г.); 12th Asia Conference on Mechanical and Aerospace Engineering (Нанкин, Китай, 2021 г.); XLV и XLVI Академические чтения по космонавтике «Королевские чтения» (Москва, 2021 г. и 2022 г.); XV международный симпозиум «проблемы экоинформатики» (Москва, 2022 г.) и научном семинаре кафедры систем автоматического управления МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2023 г.).

Публикация. По теме диссертации опубликовано 16 научных работ, в том числе 7 статей в журналах, входящих в перечень ВАК и 2 статьи, индексируемой в базе Scopus, общим объемом 9,6 п.л. / 4,4 п.л.

Структура и объём диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, общих выводов и заключения, списка используемой литературы. Текст диссертационной работы изложен на 145 машинописной странице, содержит 71 рисунок и 9 таблиц. Список литературы содержит 116 источников.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы, излагаются цель и основные задачи исследования, формулируются научная новизна, практическая ценность полученных результатов, основные положения, выносимые на защиту, представлены данные об апробации результатов и публикациях, а также приведено краткое содержание диссертационной работы.

В первой главе рассмотрены процедуры пилотируемой посадки ЛА на авианосец в разных метеоусловиях и структура системы автоматической посадки. Представлены использованные методы посадки БЛА на авианосец, проанализированы особенности задачи посадки на авианосец и главные трудности. На эффективность посадки наибольшее влияние оказывают качка авианосца и разнообразные атмосферные возмущения. Для обеспечения успешной посадки при отсутствии связи между авианосцем и БЛА предлагается разработать алгоритмы для системы автономной посадки на авианосец (САПА).

На рис. 1 представлена структурная схема САПА, которая в основном состоит из подсистемы наведения, подсистемы управления и НК. САПА, установленная на борту БЛА, сохраняет информацию от авианосца и при отключении ее использует сохраненные предыдущие измерения для прогнозирования качки палубы авианосца.

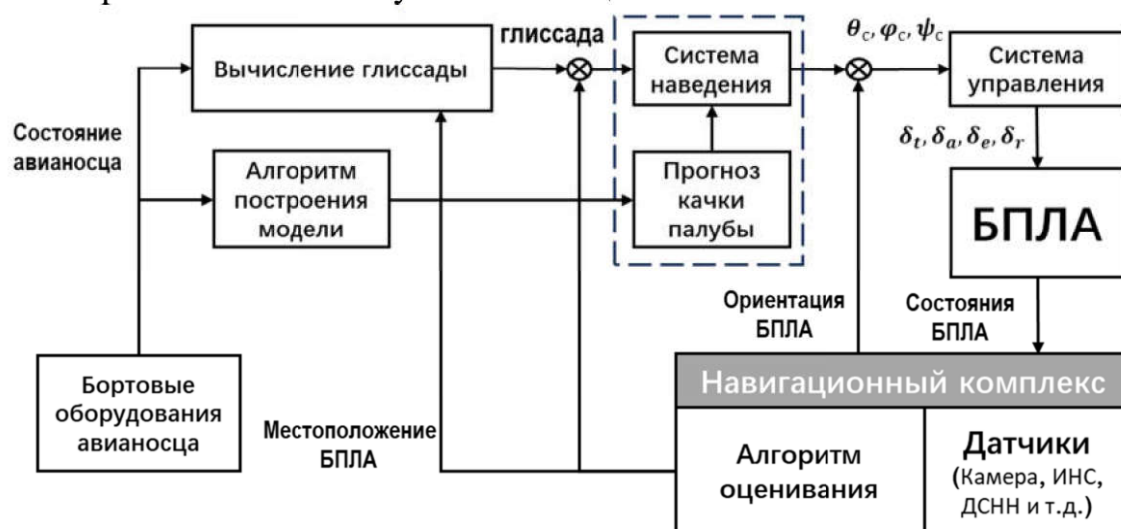


Рис. 1. Структурная схема системы автоматической посадки на авианосец

На рис. 1 введены следующие обозначения: $\theta_c, \varphi_c, \psi_c$ – команды по углу тангажа, крена и рыскания; $\delta_t, \delta_a, \delta_e, \delta_r$ – управляющие воздействия.

Успешная посадка БЛА на авианосец также в большой степени зависит от точности НК. Для коррекции НК часто используется разнообразные алгоритмы оценивания (АО), в том числе и ФК. На рис. 2 приведена схема коррекции погрешности ИНС/ГНСС системы.

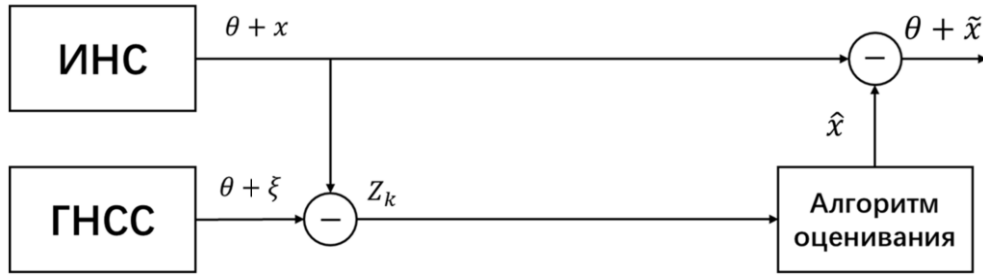


Рис. 2. Схема ИНС/ГНСС интегрированной навигационной системы

На рис.2 введены следующие обозначения: θ – истинная навигационная информация; x – погрешности ИНС; ξ – погрешности ГНСС; Z_k – вектор измерений; $\hat{x}$ – оценка погрешностей ИНС; $\tilde{x}$ – ошибка оценивания погрешностей ИНС.

Однако высокая посадочная скорость и динамика БЛА при посадке может привести к снижению точности оценки или расходимости ФК. Чтобы обеспечить успех посадки разработан алгоритмы адаптивного ФК (АФК).

Сформулирована постановка задачи диссертационного исследования.

Во второй главе рассмотрена задача наведения и управления БЛА, разработан алгоритм наведения с прогнозированием качки и алгоритм управления БЛА с повышенной помехозащищенностью.

Эффективность алгоритмов управления во многом определяется адекватностью использованной модели БЛА. Исследована динамика гипотетического БЛА и построена тестовая математическая модель, наиболее детальную динамическую модель БЛА с 6 степенями можно описать с помощью 12 уравнений, но для простоты при разработке алгоритма для задачи посадки можно использовать широко известную линеаризованную модель продольной динамики БЛА:

$$\begin{pmatrix} \dot{\bar{u}} \\ \dot{\bar{w}} \\ \dot{\bar{q}} \\ \dot{\bar{\theta}} \\ \dot{\bar{h}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_u & X_w & X_q & -g \cos \theta^* & 0 \\ Z_u & Z_w & Z_q & -g \sin \theta^* & 0 \\ M_u & M_w & M_q & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \theta^* & -\cos \theta^* & 0 & u^* \cos \theta^* + w^* \sin \theta^* & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{u} \\ \bar{w} \\ \bar{q} \\ \bar{\theta} \\ \bar{h} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X_{\delta_e} & X_{\delta_t} \\ Z_{\delta_e} & 0 \\ M_{\delta_e} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{\delta_e} \\ \bar{\delta_t} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где u, w – составляющие компоненты скорости БЛА; θ, q – угол и угловая скорость тангажа; h – высота БЛА; δ_e, δ_t – угловое отклонение руля высоты и нормализованная скорость пропеллера; g – ускорение силы тяжести; другие обозначения – линеаризованные коэффициенты.

Качка корабля от волнения обладает стационарностью, на практике в качестве генератора сигнала качки часто используется формирующий фильтр, который имеет вид:

$$G(s) = \frac{gs}{s^2 + as + d}, \quad (2)$$

где все коэффициенты определяются эмпирически. Тестовые значения имеют следующий вид: $g = 0,6$; $a = 0,06$; $d = 0,36$. Для получения сигнала качки вход фильтра должен быть белым шумом.

В процессе посадки необходимо учитывать и атмосферные возмущения, в работе рассматривается турбулентность и установившееся возмущение. Турбулентности воздуха генерируется с помощью некоторого фильтра, а установившееся атмосферное возмущение можно описать через эмпирическую формулу. На рис. 3 представлены сигналы возмущений.

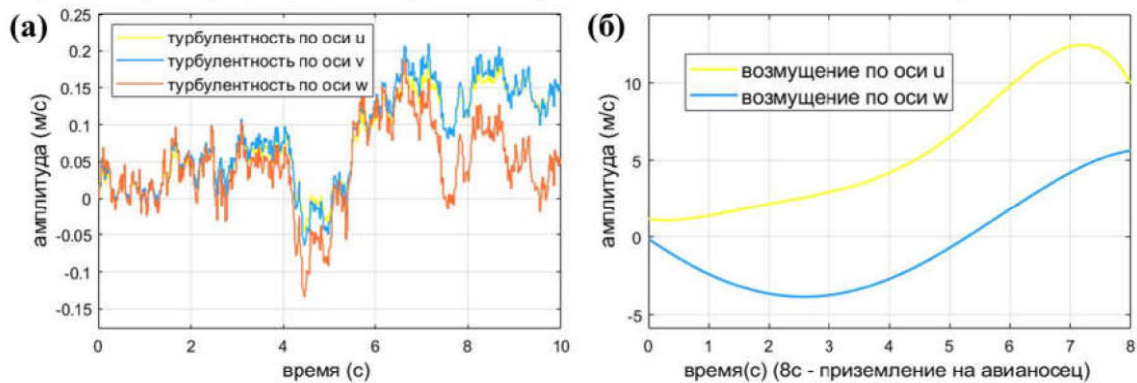


Рис. 3. Сигнал учитываемых возмущений в процессе посадки: (а) турбулентность воздуха; (б) установившееся возмущение.

Негативное влияние качки и атмосферных возмущений на посадку необходимо учитывать и устранить отдельно с использованием разных алгоритмов. На рис. 4 представлена схема единой системы управления, которая обеспечивает точность посадки с учетом качки и атмосферных возмущений.

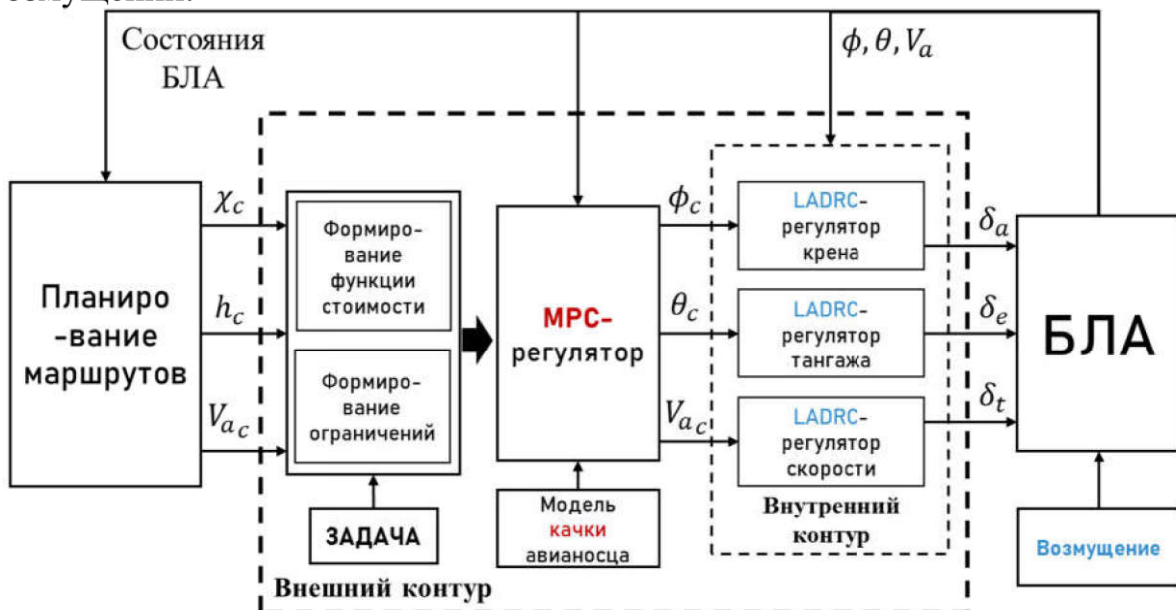


Рис. 4. Структурная схема системы управления БЛА

На рис. 4 введены следующие обозначения: χ_c, h_c, V_{ac} – заданные команды по углу рыскания, высоте и воздушной скорости; δ_a – угловое отклонение элерона.

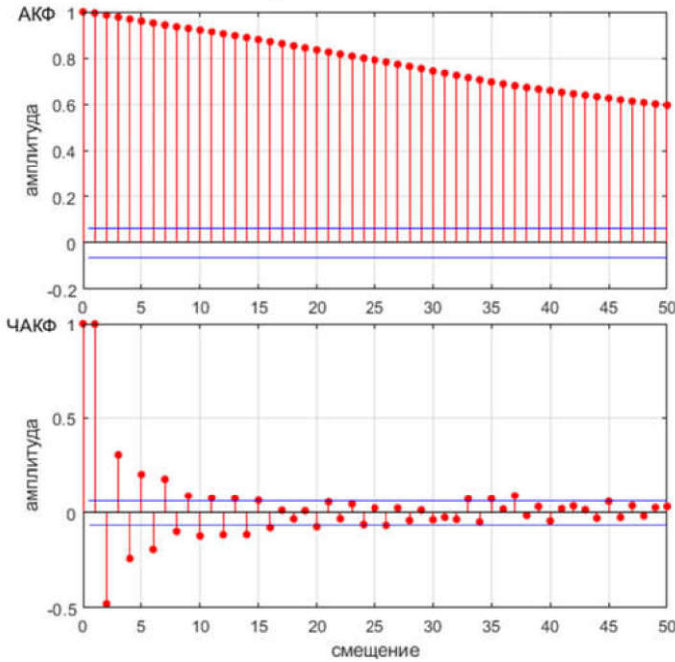


Рис. 5. АКФ и ЧАКФ сигнала качки

Как показано на рис. 4, для компенсации качки предлагается использовать управление с прогнозирующими моделями (МРС), так как прогнозирование качки необходимо для выполнения автономной посадки БЛА.

Проанализированы характеристики сигнала качки и по результатам анализа выбрана авторегрессионная модель 8 порядка для прогнозирования. На рис. 5 показаны автокорреляционная функция (АКФ) и частная автокорреляционная функция (ЧАКФ) сигнала качки.

А в качестве прогнозирующей модели БЛА используется система (1) с модифицированным состоянием d вместо высоты БЛА h , преобразование выполняется в выражении (3). Эффективность МРС-регулятора в большой степени зависит от функционала стоимости, поэтому соответствующая целевая функция сформулирована вокруг ключевого состояния d и представлена в выражении (4).

$$\begin{aligned} \dot{d} &= \dot{h} - V_a \cos \gamma \tan \gamma_g = \dot{h}(1 - \cot(\theta - \alpha) \tan \gamma_g) = f_d, \\ \dot{\vec{d}} &= \frac{\partial f_d}{\partial \dot{h}} \dot{h} + \frac{\partial f_d}{\partial \theta} \bar{\theta} + \frac{\partial f_d}{\partial \alpha} \bar{\alpha} \\ &= [1 - \cot \gamma^* \tan \gamma_g] \dot{h} + \dot{h}^* \tan \gamma_g \left(\frac{1}{\sin^2 \gamma^*} \bar{\theta} + \frac{1}{\sin^2 \gamma^*} \bar{\alpha} \right), \end{aligned} \quad (3)$$

где d – отклонение БЛА от заданной глиссады; V_a – воздушная скорость; α – угол атаки; γ, γ_g – угол наклона реальной и заданной глиссады.

$$J = F(d_N) + \sum_{k=0}^{N-1} H_d d_k^2 + Q_e \delta_e^2 + Q_t \delta_t^2, \quad (4)$$

где $F(d_N) = C_d d_N^2$ – штрафная функция по конечному отклонению от глиссады; C_d, H_d, Q_e, Q_t – весовые коэффициенты; N – горизонт прогнозирования.

Другим преимуществом МРС является возможность учитывать физические ограничения БЛА.

Для устранения помех от атмосферных возмущений использован метод управления с активным подавлением помех (ADRC). На основе динамических характеристик модели БЛА для определенных выходных состояний БЛА построены наблюдатели расширенного состояния (НРС). Например, для канала угла тангажа НРС имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \dot{z}_{\theta 1} = z_{\theta 2} + l_{\theta 1}(y_{\theta} - z_{\theta 1}); \\ \dot{z}_{\theta 2} = z_{\theta 3} + \delta_e + l_{\theta 2}(y_{\theta} - z_{\theta 1}); \\ \dot{z}_{\theta 3} = h_{\theta} + l_{\theta 3}(y_{\theta} - z_{\theta 1}); \end{cases} \quad (5)$$

где $z_{\theta 2} = q + d_{\theta 1}$; $z_{\theta 3} = -a_{\theta 1}\dot{\theta} - a_{\theta 2}\theta + (a_{\theta 3} - 1)\delta_e + d_{\theta 2}$ представляет собой суммарную помеху системы канала тангажа.

Получив суммарную помеху закон управления линейного ADRC формулируется следующим образом:

$$u = \frac{u_0 - z_3}{b},$$

где u_0 – предварительное управление, b – коэффициент усиления управляющего воздействия, часто на практике он равен единице.

А параметры НРС определяются известным методом линейного ADRC:

$$l_1 = 3\omega_o; l_2 = 3\omega_o^2; l_3 = \omega_o^3,$$

где ω_o – ширина полосы пропускания НРС.

Ширина полосы пропускания НРС в свою очередь определяется с учетом физического ограничения управляющего устройства БЛА:

$$\omega_{\phi}^2 = a_{\theta 2} + k_{p\theta} a_{\theta 3}; k_{p\theta} = \frac{\delta_e^{\max}}{e_{\theta}^{\max}} \text{sign}(a_{\theta 3}); \omega_{\theta} = \sqrt{a_{\theta 2} + |a_{\theta 3}| \frac{\delta_e^{\max}}{e_{\theta}^{\max}}},$$

где $\delta_e^{\max}, e_{\theta}^{\max}$ – наибольшее угловое отклонение элевона и максимальный допустимый угол тангажа; a_x – коэффициенты соответственных передаточных функций; k_p – коэффициент усиления регулятора.

В третьей главе рассмотрены НК системы автономной посадки и соответствующие алгоритмы.

Другим подходом к реализации автономной посадки БЛА является применение визуальной навигации. Рассмотрены известные методы визуальной одометрии и разработан алгоритм обнаружения авианосца. На рис. 6 приведена структурная схема алгоритма обнаружения авианосца.

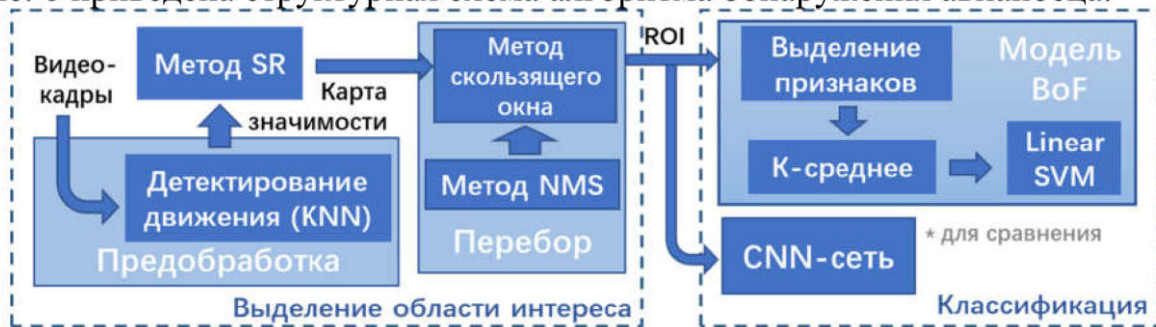


Рис. 6 Структура алгоритма обнаружения авианосца

Данный алгоритм отличается компактным способом выделения области интереса с уменьшением объема вычислений. С использованием алгоритма детектирования движения и метода спектрального остатка (SR) объем обрабатываемых пикселей значительно сокращается.

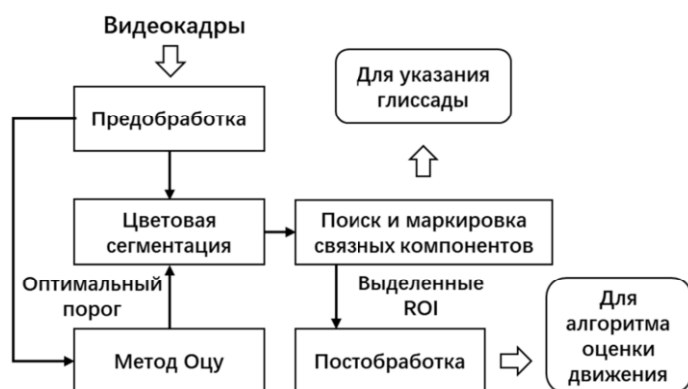


Рис. 7. Схема алгоритма распознавания ОСП

Эффективность алгоритма, основанного на признаках изображения, сильно снижается при малом количестве признаков, поэтому для ночной посадки разработан компактный алгоритм распознавания ОСП, который распознает сигнал ОСП с использованием классических методов обработки изображения. На рис. 7 приведена схема алгоритма.

На практике коррекция погрешности НК часто осуществляется с помощью ФК и его модификации.

Для обеспечения точности оценки НК предложена функциональная схема НК, включающая АФК, наблюдатель расширенного состояния и алгоритма построения модели (АПМ). На рис. 8 представлена схема НК.

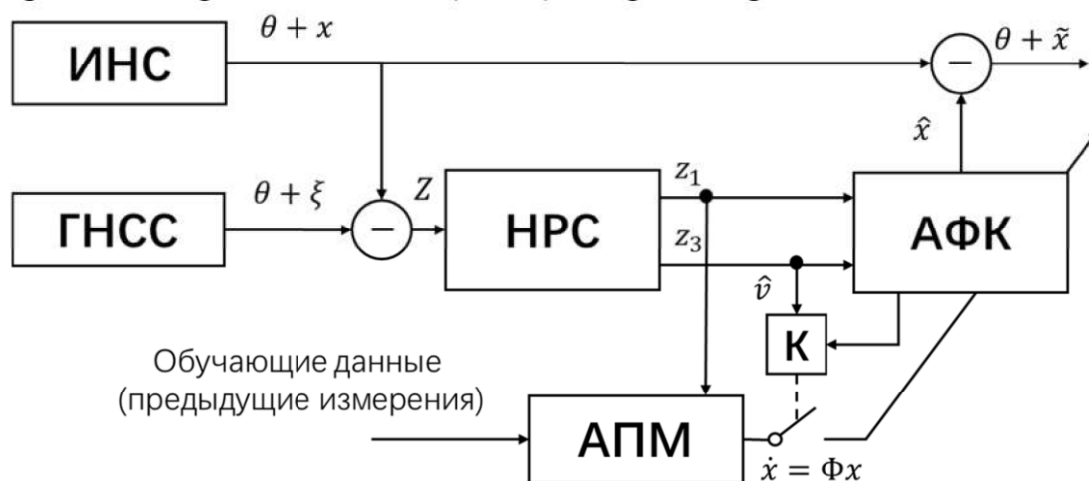


Рис. 8. Функциональная схема АФК с использованием НРС и АПМ

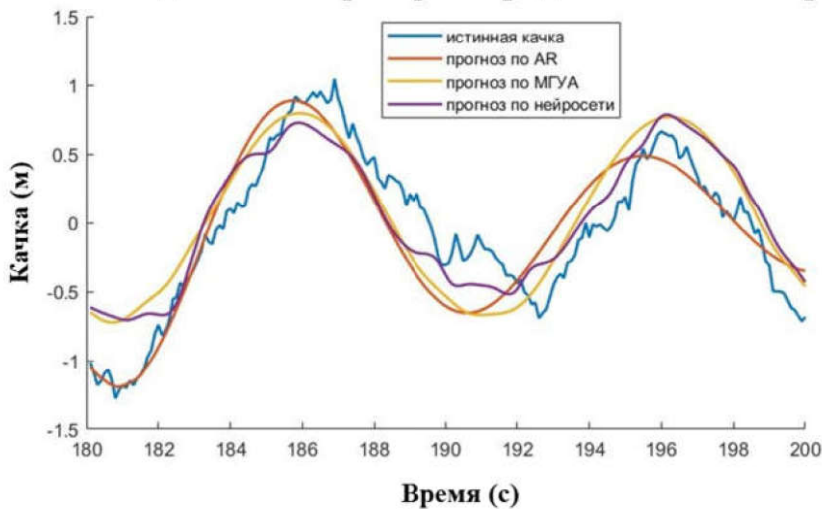
На рис. 8 введены следующие обозначения: z_1 , z_3 – выходы НРС; Φ – модель погрешности ИНС, построенная с помощью АПМ; $\hat{v}$ – дисперсия суммарной помехи НРС определенного состояния БЛА за некоторое прошедшее время. В АФК ковариационная матрица измерительного шума определяется адаптивным образом с использованием жесткой связи по обновляемому процессу в диагональной матрице.

АПМ предназначен для адаптивного обновления модели погрешности ИНС, которая меняется из-за маневра БЛА. Приведены разные АПМ, в том числе МГУА, нейросеть, авторегрессионная модель и т.д. С помощью АПМ

повышается точность НК при отсутствии связи со спутником или других отказах ГНСС. Однако, на практике АПМ является вычислительно тяжелым для БЦВМ, поэтому крайне важно определить, когда АПМ должен прекратить работать и отключиться от системы. Для этого существует общепринятый критерий адекватности модели.

Для предложенного АФК в качестве критерия адекватности модели также использована дисперсия суммарных помех, так как при неполадках ГНСС оценки суммарных помех изменяются значительно.

Четвёртая глава включает результаты экспериментальных исследований. Проверен предложенный алгоритм наведения и управления



БЛА и алгоритм коррекции погрешности НК.

Для проверки точности прогноза качки проведен сравнительный анализ разных алгоритмов, результат представлен на рис. 9. А для проверки эффективности

предложенных алгоритмов в среде Simulink построена тестовая модель БЛА. На основе данной модели проведены моделирование

Рис. 9. Сравнение прогнозирующей моделей

посадки на авианосец, качки авианосца и отклонения БЛА от фиксированной глиссады показаны на рис. 10. Также проведен сравнительный анализ разных алгоритмов, результат представлен в таб. 1. Полученные результаты показали, что с использованием МРС-регулятора качка авианосца хорошо прогнозируется и компенсируется.

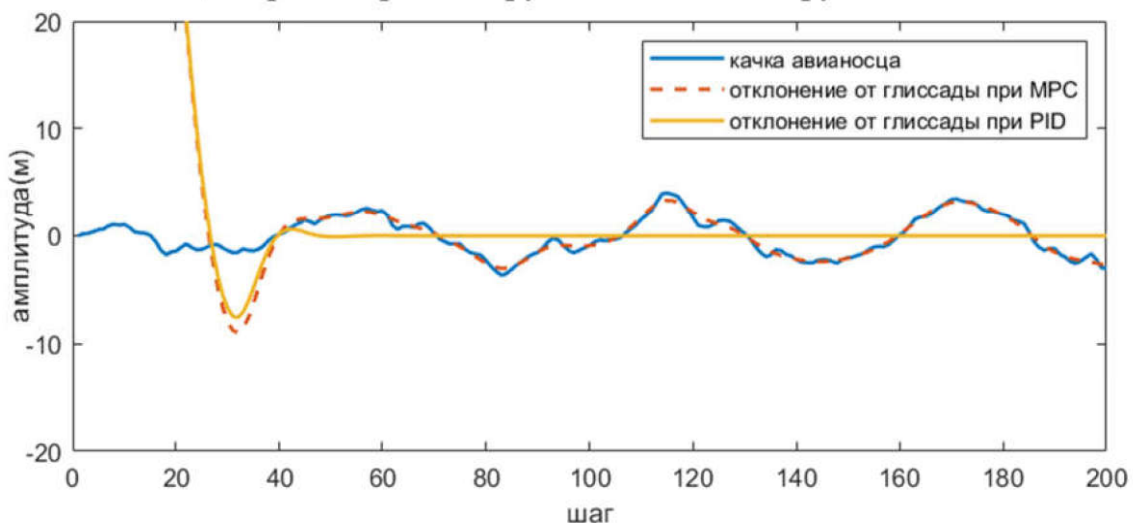


Рис. 10. Качка и отклонение БЛА от заданной глиссады

Таблица 1.

Точность разных алгоритмов посадки при наличии качки

Алгоритм	Средняя ошибка состояний			Конечная ошибка глиссады
	Скорость u	Высота h	Угол тангажа θ	
ПИД	0,5251 м/с	2,7594 м	0,3426 рад	0,742 м
LQR	0,1358 м/с	2.2455 м	0,1504 рад	0,358 м
MPC	0,1208 м/с	1,8253 м	0,1256 рад	0,267 м

Выход MPC-регулятора служит командой и входом для алгоритма управления (регулирования ориентации БЛА), как показано в предыдущем изложении, а рулями управляет ADRC-регулятор.

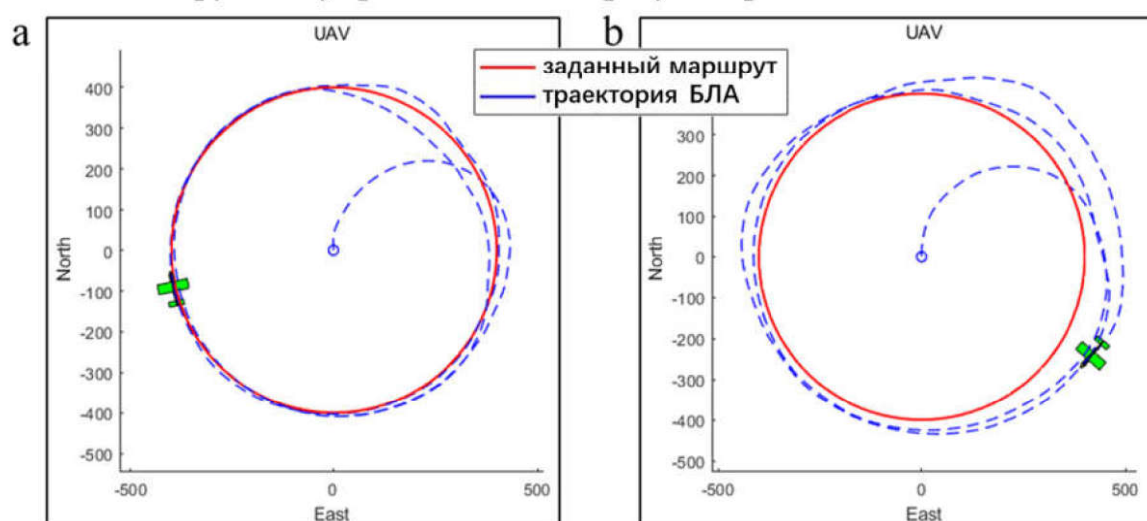


Рис. 11. Результат управления БЛА при наличии возмущений

На рис. 11 представлен результат сравнения ADRC и ПИД-регуляторов при наличии интенсивного атмосферного возмущения (средняя скорость турбулентности воздуха 3 м/с по направлениям восток и север). Результат математического моделирования показал, что по сравнению с ПИД-регулятором, ADRC обладает превосходной помехозащищенностью и позволяет значительно уменьшить отклонение БЛА от заданного маршрута.

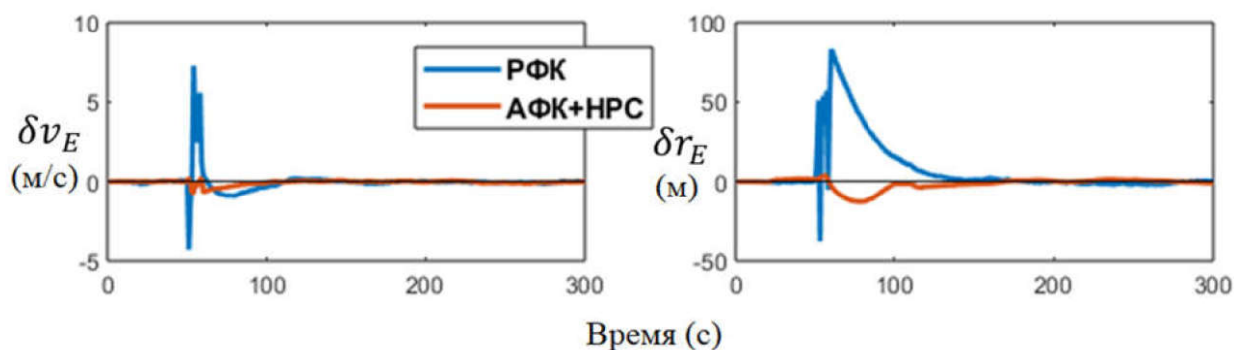


Рис. 12. Результаты коррекции погрешности ИНС

Проведены также результаты моделирования коррекции погрешности ИНС с использованием разработанного АФК. С момента 51с до 60с возник отказ ГНСС и ошибка измерения увеличивается в 50 раз. На рис. 12 приведен результат, который показал, что предложенный АФК позволяет повысить точность НК в нештатных ситуациях.

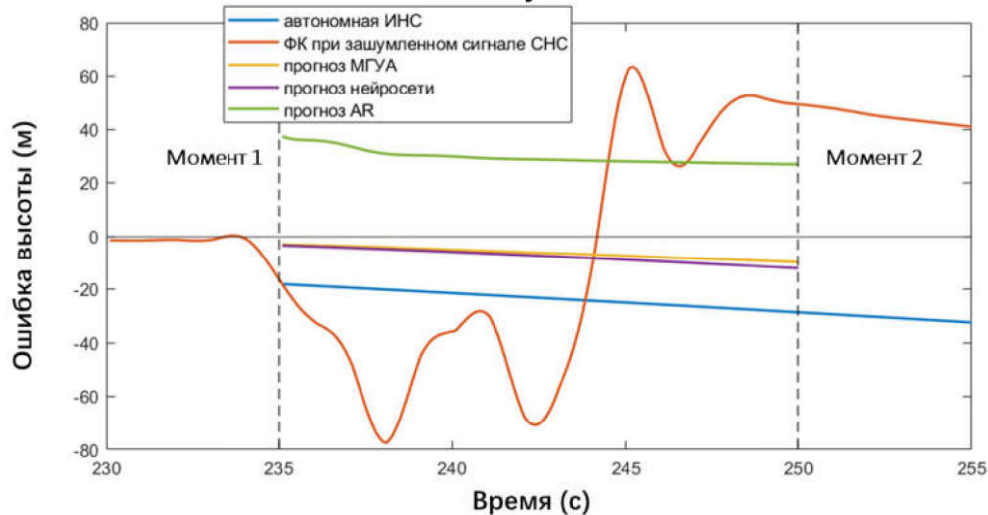


Рис. 13. Результат прогнозирования погрешности ИНС

На рис. 13 приведены графики ошибок оценки высоты при использовании разных методов. Автономная ИНС используется как эталон. Проведено сравнение эффективности МГУА, нейросети и авторегрессионной модели. Результат показал, что АПМ даёт возможность снизить ошибку оценки, и следовательно, уменьшить время сходимости АО.

В заключении сформулированы основные полученные результаты.

Основные результаты работы:

1. Предложена схема системы автономной посадки БЛА на авианосец. Для обеспечения самостоятельного выполнения операции предлагается использовать ВНС и алгоритм прогнозирования качки.
2. Разработаны компактный алгоритм выделения областей интереса, алгоритм обнаружения авианосца и алгоритм распознавания для ночной посадки;
3. Разработан АФК с использованием наблюдателя расширенного состояния. По сравнению с существующими вариантами предложенный алгоритм не чувствителен к неточности начальной ковариационной матрицы, и имеет повышенную точность при отказе ГНСС (точнее в среднем на 5-10 %), причем легко реализуем на борту БЛА;
4. Разработан каскадный АО, включающий АФК с использованием алгоритма построения модели МГУА, который увеличивает скорость сходимости АФК в процессе полета БЛА по глиссаде. По сравнению с аналогами точность повышается в среднем на 12%;
5. Разработан алгоритм управления БЛА с прогнозированием и компенсацией качки, отличающийся от существующих вариантов повышенной точностью точки приземления (точнее в среднем на 8%) и

возможностью учитывать физические ограничения БЛА;

6. Разработан помехозащищенный алгоритм для регулирования ориентации и других состояний БЛА в процессе посадки, который по сравнению с аналогами легко реализуем на борту БЛА и имеет хорошую помехозащищенность.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Разработка нелинейного фильтра Калмана с самоорганизующимися моделями / Жуйян Ч. [и др.] // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2023. № 4. С. 1-9. (0,9 п.л. / 0,7 п.л.), **к 1.**

2. Алгоритм распознавания сигналов измерительного комплекса беспилотного летательного аппарата / Жуйян Ч. [и др.] // Автоматизация. Современные технологии. 2020. 74(12). С. 543-548. (0,6 п.л. / 0,2 п.л.), **к.2.**

3. Разработка алгоритмического обеспечения обнаружения авианосца с использованием техники машинного зрения для автоматической посадки БПЛА / Жуйян Ч. [и др.] // Автоматизация. Современные технологии. 2022. 76(12). С. 545-550. (0,6 п.л. / 0,4 п.л.), **к 2**

4. Управление БПЛА с помощью активного подавления возмущений для безопасности посадки на авианосец / Жуйян Ч. [и др.] // Автоматизация. Современные технологии. 2023. 77(4). С. 155-161. (0,7 п.л. / 0,4 п.л.), **к 2.**

5. The algorithm of the color signal recognition at landing an unmanned aerial vehicle on an aircraft carrier in autonomous mode / Жуйян Ч. [и др.] // Автоматизация. Современные технологии. 2020. 74(2). С. 78-84. (0,6 п.л. / 0,1 п.л.), **к 2.**

6. Метод наведения спускаемого аппарата с подвижной массой для точной посадки / Жуйян Ч. [и др.] // Перспективы науки. 2022. 11(158). С. 34-39. (0,6 п.л. / 0,3 п.л.), ВАК.

7. Алгоритм распознавания цветовых сигналов при посадке беспилотного летательного аппарата авианосного базирования / Жуйян Ч. [и др.] // Инженерная физика. 2020. №1. С. 51-59. (1 п.л. / 0,6 п.л.), ВАК.

8. Zhou R, Neusypin KA. ADRC-Based UAV Control Scheme for Automatic Carrier Landing // Engineering Proceedings. 2023. Vol. 33, no. 1: 66. (0,8 п.л./ 0,065 п.л.)

9. Zhou R., Neusypin K.A. Model predictive control for automatic carrier landing considering ship motion // The 12th Asia Conference on Mechanical and Aerospace Engineering. J. Phys.: Conf. Ser. 2235 012005. (0,7 п.л. / 0,3 п.л.)

10. Жуйян Ч. Автоматическая посадка беспилотного аппарата на авианосец при использовании машинного зрения // Сборник материалов II межвузовской заочной конференции аспирантов, соискателей и молодых ученых «Наука, технологии и бизнес». 2020. С. 150-155. (0,65 п.л. / 0,25 п.л.)

11. Жуйян Ч., Рязанова Н.Ю. Тестирование алгоритма распознавания цветowych сигналов беспилотного летательного аппарата // «Будущее машиностроения России». Москва. 2020. С. 126-132. (0,6 п.л. / 0,3 п.л.)
12. Чжоу Ж., Рязанова Н.Ю., Синькэ Ч. Алгоритм посадки беспилотного космического летательного аппарата // XLV академические чтения по космонавтике. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021. С. 374-376. (0,2 п.л. / 0,1 п.л.)
13. Жуйян Ч., Неусыпин К.А. Модели атмосферных возмущений в задаче посадки БПЛА на авианосец // XV Международного симпозиума. «Проблемы экоинформатики». Москва, 2022. С. 46-50. (0,5 п.л./ 0,27 п.л.)
14. Жуйян Ч., Неусыпин К.А., Селезнева М.С. Прогноз качки при посадке летательного аппарата на авианосец // Будущее машиностроения России. Сборник докладов Двенадцатой Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов. 2019. С. 826-829. (0,45 п.л. / 0,2 п.л.)
15. Жуйян Ч., Неусыпин К.А., Селезнева М.С., Пролетарский А.В. Алгоритм прогнозирования качки при посадке самолета на палубу авианосца // XXVII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. Сборник материалов. 2020. С. 69-72. (0,4 п.л. / 0,1 п.л.)
16. Жуйян Ч., Неусыпин К.А., Селезнева М.С., Рязанова Н.Ю., Чжан С. Алгоритм движения при посадке беспилотного летательного аппарата на автомобиль // XXVII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. Сборник материалов. 2020. С. 73-75. (0,3 п.л. / 0,1 п.л.)