

"УТВЕРЖДАЮ"

Проректор по научной работе
и международной деятельности
Юго-Западного государственного
университета, кандидат
технических наук, доцент

А.Ю. Алтухов

№ 22 от 22 мая 2025 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Юго-Западный государственный университет»

Диссертация Афонина Дмитрия Вячеславовича «Методы, модели и алгоритмы управления роботизированной системой аэродромной буксировки воздушных судов», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика выполнена на кафедре механики, мехатроники и робототехники.

Афонин Дмитрий Вячеславович в 2001 г. окончил Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Воронежский военный авиационный инженерный институт» Министерства обороны Российской Федерации с присуждением квалификации инженера по специальности «Средства аэродромно – технического обеспечения полетов авиации».

В период подготовки диссертации соискатель Афонин Дмитрий Вячеславович обучался в заочной аспирантуре федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Юго-Западный государственный университет», Министерство науки и высшего образования Российской Федерации. После окончания аспирантуры проходил научную стажировку в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Юго-Западный государственный университет». В настоящее время работает преподавателем кафедры аэродромно – технических средств Военного учебно-научного центра Военно-Воздушных сил «Военно-воздушная академия» имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина (г. Воронеж).

Справка о сдаче кандидатских экзаменов № 2737, выдана 27 апреля 2023 г. федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Юго-Западный государственный университет».

Научный руководитель – Яцун Сергей Федорович, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Юго-Западный государственный университет», кафедра механики, мехатроники и робототехники.

По итогам обсуждения принято следующее заключение.

1. Общая оценка выполненной работы

Работа посвящена исследованию способов повышения управляемости беспилотных авиационных систем посредством снижения погрешности движения системы буксировки за счет разработки методов, моделей, алгоритмов управления и исследования функционирования рассматриваемой системы, которые обеспечат заданную точность и быстродействие процесса буксировки воздушных судов.

Буксировка ВС в пределах аэропорта — это сложный и неоднородный процесс, который должен учитывать инфраструктуру аэропорта, количество задействованного персонала, тип ВС и т. д. Таким образом, при буксировке ВС необходимо заранее составлять схему перемещения, в которой следует учитывать схемы движения средств наземного обслуживания ВС, а также маршруты движения других транспортируемых самолетов. Приоритетной задачей обеспечения безопасности буксировки при большой плотности движения является предотвращение столкновений воздушных судов друг с другом и инфраструктурой аэропорта, для этого необходимо задействовать дополнительный обслуживающий персонал.

Одним из путей повышения безопасности и быстродействия систем буксировки ВС, является переход к новым технологиям на основе применения беспилотных тягачей (БТ), которые позволяют значительно сократить численность буксировочной бригады и позволит повысить безопасность и обеспечить максимальную скорость движения ВС по заданному маршруту. Максимальный эффект достигается в том случае, когда оператор, БТ, СУ и ВС образуют интегрированную человеко-машинную систему (ЧМС), эффективность работы которой определяется степенью согласованности (синхронности) работы элементов этой системы.

При этом оценка эффективности БАС будет определяться временем, затраченным на буксировку ВС и сложностью действий экипажа, оператора буксировщика и обслуживающего персонала. Все это

требует постоянного отслеживания современных технологий в этой области и своевременного их внедрения в инфраструктуре аэропорта. Развитие современных технологий связано с использованием беспилотных тягачей (БТ) для ВС. Целесообразность использования БАС заключается в том, что возможно значительно сократить количество обслуживающего персонала, а также использовать беспилотные комплексы, осуществляющие буксировку ВС в автономном режиме для повышения безопасности функционирования аэропорта. Однако основным недостатком таких беспилотных комплексов является отсутствие новых программируемых законов движения и, как следствие, низкая точность и быстродействие процесса буксировки. При этом актуальными становятся задачи, связанные с разработкой новых методов, моделей алгоритмов управления для БАС, требующих дальнейшего решения.

Разработка беспилотной авиационной системы (БАС), основывается с одной стороны на структурном синтезе, а с другой на синтезе параметров, которые определены на основе математических моделей и алгоритмов управления в среде функционирования БАС, при этом обеспечена адекватность моделей реальным физическим процессам. Особое внимание уделено оценке состояния БАС и алгоритмам управления, обеспечивающим требуемые динамические качества системы с одновременным обеспечением стабильности в условиях возможной параметрической неопределенности.

Также, для обеспечения высокой точности движения БАС в работе использован контур адаптации, изменяющий параметры регулятора, формирующего корректирующее управление по отклонению. Для реализации этого подхода, разработана система управления беспилотным тягачом на основе предлагаемой беспойсковой адаптивной самонастраивающейся системы (БАСНС) управления движением. Расчётная модель в составе БАСНС используется для задания желаемого поведения, выбранного оператором на основе априорной информации о граничных условиях, выходных и входных воздействиях и определяет расчётное управление.

Для контроля положения БАС относительно контрастной линии (КЛ), применяется метод клеток-ячеек (cell decomposition model), реализованный на оптоэлектронной интегральной микросхеме (ОМ).

Создан экспериментальный образец БАС, оснащенный системой управления движением, реализующей разработанный метод управления движением и системой измерения параметров движения. Методика экспериментальных исследований управляемого движения робота, позволившая на основе натурных испытаний экспериментального образца установить достаточную степень соответствия предложенной математической модели реальному объекту в условиях действия факторов,

исключенных из рассмотрения принятыми допущениями и программное приложение, обеспечивающее возможность разработки и отладки алгоритмов управления движением БАС на базе моделирования его управляемого движения в реальном масштабе времени.

Таким образом, создание и разработка математических моделей и алгоритмов управления БАС является актуальной прикладной задачей.

Представленная соискателем диссертация является законченной научно-исследовательской квалификационной работой, выполненной в соответствии с существующими требованиями к кандидатским диссертациям, логически построенным научным трудом, имеющим внутреннее единство. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы, включающего 143 наименования. Основная часть работы изложена на 135 страницах машинописного текста, содержит 62 рисунка, 3 таблицы.

2. Личное участие автора в получении научных результатов

Выносимые на защиту научные положения разработаны соискателем лично. В научных работах, выполненных в соавторстве, личный вклад соискателя состоит в разработке беспилотной авиационной системы буксировки ВС (БАС), включающей беспилотный тягач (БТ), воздушное судно (ВС), подсистему сопряжения БТ и ВС с комбинированным управлением, позволяющая реализовать заданную точность движения БАС, разработке классификации и последовательности маршрутов БАС, позволяющие осуществлять автономную буксировку ВС по заданной траектории, на основе модульного планирования траектории в виде кусочно-линейных отрезков, разработке математических моделей на основе декомпозиции БАС, позволяющие анализировать системные связи и определять положение БТ и ВС при раздельном и совместном движении, с учетом кинематических и динамических особенностей подсистем, при действии внешних возмущающих воздействий детерминированного и случайного типа, разработке подсистемы сопряжения БТ-ВС и математической модели сило - моментного взаимодействия подсистем БТ – ВС в режиме совместного движения с учетом упруго-вязких свойств модуля сопряжения (СУ) и алгоритма управления БТ и ВС., синтезе желаемого закона движения БАС, позволяющего на заданном отрезке кусочно-линейной траектории обеспечить движение, удовлетворяющее граничным условиям, разработке адаптивного алгоритма управления БАС, реализующего комбинированную стратегию управления движением на основе суперпозиции управления по расчётной модели и корректирующего управления, обеспечивающего допустимые отклонения БТ и ВС

относительно желаемой траектории, проведении экспериментальных исследований прототипа БАС в режиме буксировки и многокритериального анализа показателей качества управления, а так же в непосредственном участии в получении исходных данных, научных экспериментах и в апробации результатов исследования.

3. Обоснованность и степень достоверности результатов исследований

Результаты диссертационной работы подтверждаются результатами вычислительных экспериментов, их сравнением, практической апробацией разработанных моделей, алгоритмов и методов. Результаты были представлены на научно-технических конференциях всероссийского и международного уровней, опубликованы в ведущих рецензируемых журналах, а также согласуются с результатами других исследований в данной области.

Для решения поставленных задач использовались методы динамической оптимизации, проектирования беспилотных систем, теория и практика систем автоматического управления, теоретической механики, упругости, методы математического моделирования динамических систем, методы оптимального планирования и проектирования, основанные на использовании технологий искусственного интеллекта и вычислительного моделирования. При создании программных продуктов использованы математические пакеты MathCAD, Matlab, SolidWorks.

Результаты исследования показали непротиворечивость аналогичным результатам, полученным другими исследователями. Результаты экспериментальных исследований согласуются с ранее опубликованными экспериментальными данными по теме диссертации.

Достоверность научных результатов обоснована соответствием результатов экспериментальных исследований основным теоретическим положениям и выводам диссертации.

4. Научная новизна результатов

Основные результаты являются научными фактами, характеризующимися научной новизной: аналитическая модель беспилотной авиационной системы буксировки воздушных судов, отличающаяся конфигурируемой структурой функционально взаимодействующих подсистем буксируемого судна, сцепного устройства, беспилотного тягача и учетом влияния внешних нестационарных возмущающих воздействий в автономном режиме, обеспечивающая анализ свойств и состояний системы

буксировки в многофакторных условиях реальной эксплуатации; метод синтеза планируемой кусочно-линейной траектории движения беспилотного тягача, реализуемый суперпозициями параметров траектории системой буксировки, отличающийся учетом рассчитываемых параметров индивидуально для каждого этапа буксировки в соответствии с граничными условиями, обеспечивающий безопасное и точное движение буксировочной системы из начального положения в конечное; алгоритм управления движением беспилотного тягача на основе синтеза множества параметров, определяющих работу адаптивного регулятора, отличающийся использованием интегральных параметров движения для формирования корректирующих воздействий с учетом возникающих внешних факторов и обеспечивающий минимизацию отклонения реальной траектории от заданной оператором; алгоритм позиционирования беспилотного тягача, отличающийся использованием аддитивного сигнала системы визуального контроля для определения фактического отклонения системы буксировки относительно контрастной линии, обеспечивающий повышение надежности контроля управления буксировкой воздушных судов во внештатных ситуациях.

5. Оценка практической значимости результатов исследования

Теоретическая и практическая значимость состоит в исследовании системных связей и закономерностей функционирования БАС. В результате взаимодействия элементов БАС реализованы возможности БТ для достижения максимальной эффективности в смысле быстродействия и точности автономного движения БАС. Математические модели с учетом системных связей между БТ и ВС и упруго-вязких свойств модуля сопряжения (СУ) и алгоритм управления, основанный на расчётной модели и корректирующих воздействиях БАС обеспечивают управление БТ при буксировке ВС с заданной точностью и быстродействием.

Практическая значимость работы состоит в создании инструментальных средств проектирования БАС на основе теоретических исследований, которые использованы для создания БАС, проведения экспериментальной апробации и изучения эффективности алгоритмов управления. Результаты исследований внедрены в учебный процесс на кафедре аэродромно-технических средств в ФГКВУ ВО «ВУНЦ ВВС ВВА им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» и в рамках летно-тактического учения авиационной эскадрильи и батальона аэродромно-технического обеспечения (аэродром Бельбек).

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки Российской Федерации в рамках проекта «Приоритет 2030».

6. Ценность научных работ соискателя

Теоретическая ценность работы соискателя состоит в развитии теории взаимодействия человека и системы, создания человеко-машинных интерфейсов, математических моделей и алгоритмов управления, обеспечивающих заданные показатели качества.

7. Соответствие паспорту научной специальности

Диссертация и автореферат Афонина Дмитрия Вячеславовича соответствуют следующим пунктам паспорта специальности 2.3.1. «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика»:

2. Формализация и постановка задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта,

5. Разработка специального математического и алгоритмического обеспечения систем анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта,

6. Методы идентификации систем управления на основе ретроспективной, текущей и экспертной информации,

14. Разработка принципиально новых методов анализа и синтеза элементов систем управления с целью улучшения их технических характеристик.

8. Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем

Основные положения диссертационной работы нашли полное отражение в опубликованных соискателем научных трудах:

1. Афонин, Д. В. Динамический анализ двухзвенной связанной системы / Д. В. Афонин, А. С. Печурин, С. Ф. Яцун // International Journal of Open Information Technologies. -2024. -Т. 12. -№. 5. -С. 49. [ВАК, Scopus, WoS].

2. Афонин, Д.В. Моделирование автономного криволинейного движения роботизированной системы буксировки летательных аппаратов / Д.В. Афонин, А.С. Печурин, С.Ф. Яцун // Проблемы машиностроения и надежности машин. -2022. -(2). -С. 91. [ВАК, Scopus, WoS].

3. Афонин, Д. В. Управление движением роботизированной двухзвенной колесной системы по заданной траектории / Д. В. Афонин, А. С. Печурин, С. Ф. Яцун // International Journal of Open Information Technologies. – 2023. – Т. 11. – №. 4. – С.38. [ВАК, Scopus, WoS].

4. Афонин, Д.В. Информационная система роботизированной буксировочной аэродромной системы / Д.В. Афонин, О.Б. Кочергин, С.Ф.

Яцун // Известия Юго-Западного государственного университета. -2023. - 22(3). -С. 24. [ВАК].

5. Афонин, Д.В. Моделирование совместного движения роботизированного буксировщика и самолета с помощью сигналов оптронной матрицы / Д.В. Афонин, А.С. Печурин, С.Ф. Яцун // Известия Юго-Западного государственного университета. -2022. -26(3). -С. 63. [ВАК].

6. Афонин, Д. В. Управление движением роботизированной колесной системы двух тел, связанной упругим элементом / Д. В. Афонин, А. С. Печурин, С. Ф. Яцун // Известия Волгоградского государственного технического университета -2024. -№. 4. -С. 6. [ВАК].

7. Яцун, С. Ф. Моделирование движения робота-тягача для транспортировки самолетов по аэродрому / С. Ф. Яцун, В. В. Бартенев, Е. Н. Политов, Д. В. Афонин. // Известия Юго-Западного государственного университета. -2018. -22(2). -С. 34. [ВАК].

8. Afonin, D. V. Development of a Control System for a Robotic Towing Platform for Aircraft In / D. V. Afonin, A. S. Pechurin, S. F. Yatsun // Frontiers in Robotics and Electromechanics. Springer. -2023. -P.97. [Scopus].

9. Afonin, D. V. Simulation of the Autonomous Curvilinear Motion of a Robotic Aircraft Towing System / D. V. Afonin, A. S. Pechurin, S. F. Yatsun // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. -2022. -51(2). -P.173. [Scopus].

10. Politov, E. Mathematical Modeling of Motion of a Two-Section Wheeled Robot / E. Politov, D. Afonin, V. Bartenev //In Proceedings of 14th International Conference on Electromechanics and Robotics “Zavalishin's Readings”. Springer. Singapore. -2020.-P. 397. [Scopus].

11. Saveleva, E. Mobile robotic platform with three-wheeled transmission motion control / E. Saveleva, E. Politov, D. Afonin // In Proceedings of RusAutoCon-2022, Scopus. -2022. -P.34. [Scopus].

12. Афонин, Д.В. Комбинированная система управления движением роботизированной буксировочной системы / Д.В. Афонин, А.С. Печурин, С.Ф. Яцун // Сборник докладов XVIII Международной конференции по электромеханике и робототехнике. Завлишинские чтения. -Санкт-Петербург: -2023. -С. 119. [РИНЦ].

13. Афонин, Д. В. Повышение эффективности буксировочных аэродромных систем на основе быстрогодействия процесса буксировки воздушных судов / Д. В. Афонин // Научный альманах. -7-2 (105). -2023. -С. 23. [РИНЦ].

14. Афонин, Д. В. Разработка робота-тягача для транспортировки самолетов по аэродрому / Д. В. Афонин, Е. Н. Политов, Е. А. Тимофеев // Наука молодых-будущее России. -2017. -С. 14. [РИНЦ].

15. Афонин Д. В., Политов Е. Н., Яцун С. Ф. Роботизированная платформа для перемещения самолетов по аэродрому // Прогресс транспортных средств и систем-2018. С. 190-191. [РИНЦ].

16. Политов, Е. Н. Кинематический анализ двухсекционного колесного робота / Е. Н. Политов, Е. А. Тимофеев, Д. В. Афонин // Завалишинские чтения. -2019. -С. 272. [РИНЦ].

17. Афонин Д. В. Программно-вычислительный комплекс алгоритмов функционирования роботизированной буксировочной аэродромной системы // Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ 2022669489, 20.10.2022. [Роспатент].

18. Афонин Д. В. Программная реализация адаптивного алгоритма управления движением системы буксировки воздушных судов по заданной контрастной линии // Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ 2022680281, 28.10.2022. [Роспатент].

19. Программная реализация методики экспериментального получения характеристик основных показателей роботизированной буксировочной аэродромной системы № 2022680280, 28.10.2022. [Роспатент].

20. Афонин Д.В. Схема «Роботизированная буксировочная аэродромная система» // Патент на промышленный образец № 139660, 14.12.2023. [Роспатент].

9. Ссылки на источники заимствований

Диссертация соответствует требованиям п.14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842.

В диссертации Афонин Дмитрий Вячеславович ссылается на авторов и источники заимствования материалов. При использовании в диссертации результатов научных работ, выполненных соискателем лично и (или) в соавторстве, соискатель отмечает в диссертации это обстоятельство.

10. Апробация работы

Основные научные результаты диссертации получены на основе математического аппарата теории систем, методов математического моделирования, теории автоматического управления и механики, а также методов экспериментальных исследований. Результаты работы докладывались, обсуждались и получили положительную оценку на вузовских научных конференциях студентов и аспирантов в области научных исследований на кафедре механики, мехатроники и робототехники (г. Курск, 2019 – 2022), основные положения диссертации доложены и обсуждены на XV и XVI Международных научно-технических конференциях по электромеханике и робототехнике «Завалишинские чтения – 2020, 2021,2023», Международной научно-технической конференции, RusAutoCon-2022, научно-технических конференциях ВУНЦ ВВС «ВВА» (г. Воронеж 2021,2022, 2023 года).

Выводы

На основании вышеизложенного считаем, что диссертационная работа Афолина Дмитрия Вячеславовича «Методы, модели и алгоритмы управления роботизированной системой аэродромной буксировки воздушных судов» представляет собой законченное научное исследование, основные результаты которого представляют научный и практический интерес для специалистов в области робототехнических систем и изделий военного назначения.

Диссертационная работа в полной мере удовлетворяет паспорт специальности 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации (технические науки), так как посвящена разработке и исследованиям теории взаимодействия человека и беспилотной авиационной системы (БАС), включающая беспилотный тягач (БТ), воздушное судно (ВС), подсистему сопряжения БТ и ВС с комбинированным управлением, позволяющая реализовать заданную точность движения БАС.

Диссертация «Методы, модели и алгоритмы управления роботизированной системой аэродромной буксировки воздушных судов» соискателя Афолина Дмитрия Вячеславовича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации (технические науки).

Заключение принято на расширенном заседании кафедры «механики, мехатроники и робототехники».

Присутствовало на заседании 16 чел. Результаты голосования: «за» - 16 чел., «против» - 0 чел., «воздержались» - 0 чел., протокол № 10 от «22» мая 2025 г.

Рукавицын Александр Николаевич
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры механики,
мехатроники и робототехники

Емельянова Оксана Викторовна
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры механики,
мехатроники и робототехники