

## О Т З Ы В

научного руководителя д.т.н., профессора, заведующего кафедрой «Информационно-управляющие комплексы летательных аппаратов» МАИ Евдокименкова Вениамина Николаевича на диссертацию Ермакова Павла Григорьевича на тему: «Разработка алгоритмов для обеспечения безопасной посадки беспилотного вертолета на необорудованную площадку», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки).

В диссертации Ермакова П.Г. рассматривается актуальная техническая задача разработки алгоритмов, реализуемых на борту беспилотного вертолета (БВ) для обеспечения его экстренной безопасной посадки на неподготовленную площадку.

Замечу, что реализация на борту БВ функций по обеспечению возможности безопасной посадки на неподготовленную площадку, способствует повышению безопасности полета БВ и расширению области их целевого применения. Это обстоятельство стимулирует активные исследования в данной области как в России, так и за рубежом.

Несмотря на понимание специалистами необходимости реализации на борту БВ мер, направленных на обеспечение экстренной безопасной посадки на неподготовленную площадку, работы в этом направлении пока далеки от завершения, что обусловлено необходимостью учета комплекса требований к посадочной площадке, включающих как особенности рельефа поверхности, так и прочность грунта в месте предполагаемой посадки.

Именно это обстоятельство, по моему мнению, обуславливает актуальность диссертационной работы Ермакова П.Г., в которой предлагаются конструктивные, пригодные для практической реализации алгоритмы, позволяющие планировать оптимальный маршрут движения БВ в процессе поиска площадки, потенциально пригодной для посадки, и принимать обоснованное решение относительно возможности безопасной посадки с учетом состояния грунта.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографического списка.

Во введении проводится анализ современного состояния исследований процессов управления БВ, который сопровождается многочисленными ссылками на работы отечественных и зарубежных специалистов в данной предметной области. Автор обосновывает и формулирует основные положения, определяющие актуальность решаемой задачи, проводит обзор основных разделов работы, а также анализ полученных результатов с оценкой их научной новизны и практической значимости. Приведенные во введении библиографические ссылки на собственные работы автора указывают на глубину проработки материалов диссертационной работы, их научную и прикладную значимость.

В первой главе на основе библиографического обзора современных зарубежных и отечественных работ, связанных с обеспечением посадки беспилотных воздушных судов вертолетного типа, предложена оригинальная двухэтапная схема алгоритма обеспечения экстренной посадки БВ на неподготовленную площадку.

На первом этапе с использованием цифровой карты местности решается задача планирования оптимального маршрута облета участков местности для поиска площадки, пригодной для посадки. В процессе формирования оптимального маршрута движения БВ учитываются требования по углу наклона поверхности посадочной площадки и требования по предельной высоте элементов рельефа на ее поверхности и за пределом собственных границ.

На втором этапе, выполняемом непосредственно в ходе движения БВ по сформированному на первом этапе маршруту, реализуется проверка требований к прочности грунта посадочной площадки с использованием данных георадара и нейросетевого классификатора

Во второй главе диссертационной работы представлены конкретные алгоритмы, обеспечивающие оптимальное планирование маршрута движения БВ для поиска площадки, пригодной для экстренной посадки, на основе статистической обработки информации ЦКМ.

Планирование маршрута достигается в результате последовательного выполнения следующих действий:

- 1) вероятностная оценка пригодности участка местности для посадки БВ по углу наклона поверхности;

2) вероятностная оценка пригодности участка местности для посадки беспилотного вертолета по предельной высоте элементов рельефа на его поверхности и за пределом собственных границ;

Основу алгоритмов, обеспечивающих решение этих задач составляет комбинация методов наименьших квадратов и Монте-Карло, использование которых позволяет учесть наличие статистической неопределенности в информации ЦКМ.

3) построение оптимального маршрута облета участков местности, рассматриваемых в качестве площадок, потенциально пригодных для посадки, с учетом вероятностных оценок их пригодности.

Для решения этой задачи в работе предлагается использовать классический алгоритм решения задачи коммивояжера, адаптированный для целей обеспечения экстренной посадки БВ.

В третьей главе диссертационной работы представлен алгоритм, реализуемый непосредственно в процессе движения БВ по сформированному маршруту, который позволяет оценить пригодность для посадки того или иного участка местности с учетом требования по прочности грунта.

Основу алгоритма, обеспечивающего решение этой задачи составляют данные георада и нейросетевой классификатор на базе двухслойного персептрона. В работе показано, что задача проверки требований по прочности грунта может быть сведена к задаче бинарной классификации с двумя исходами: «площадка пригодна для посадки по прочности грунта», «площадка не соответствует требованиям по прочности грунта». Сочетание данных георадара в комбинации с нейросетевой моделью классификации обеспечивает частоту правильной классификации посадочной площадки по прочности грунта на уровне 99%.

Однако, использование георадара, как информационной основы алгоритма для проверки требования по прочности грунта в месте посадки, требует снижения БВ до малых высот, что предъявляет повышенные требования к точности определения высоты на борту БВ. Для обеспечения высокоточного определения высоты БВ в диссертационной работе предлагается использовать БИНС на базе МЭМС и лазерный высотомер (ЛВ) для коррекции высоты над подстилающей поверхностью.

Интеграция навигационных данных производится на основе слабосвязанной схемы, ядром которой является модифицированный фильтр Калмана. Необходимость модификации обусловлена тем, что дисперсия вычисляемой ЛВ высоты вертолета над подстилающей поверхностью неизвестна и может изменяться в процессе движения аппарата.

Все представленные в третьей главы алгоритмы доведены до уровня программной реализации с возможностью их размещения на борту БВ, что подтверждается свидетельствами об официальной регистрации программ.

Четвертая глава диссертационной работы посвящена анализу результатов имитационного моделирования процесса осуществления безопасной посадки БВ на необорудованную площадку на основе использования разработанного специального программно-математического обеспечения.

В продолжении всего периода подготовки диссертационной работы Ермаков П.Г демонстрировал высокий профессиональный уровень, научную эрудицию, владение математическим аппаратом и современными программными средствами. Большая личная заслуга Ермакова П.Г состоит в том, что сложная техническая задача обеспечения экстренной безопасной площадки БВ на неподготовленную площадку сведена (с сохранением её существенных технических особенностей) к комплексу задач, для которых существуют теоретически строгие решения и эффективные численные алгоритмы.

Данная диссертация явилась результатом многолетних исследований, проводимых коллективом специалистов Института №7 МАИ при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований по проблемам управления беспилотными летательными аппаратами в условиях одиночного и группового применения.

В течение всего периода работы над диссертацией Ермаков П.Г демонстрировал умение работать в коллективе, способность предложить и обосновать оригинальное решение технической задачи и способ его алгоритмической и программной реализации.

Результаты диссертационной работы уже сегодня активно используются в учебном процессе Института №7, в лекционных, практических и лабораторных занятиях.

Автореферат полностью передает содержание диссертационной работы.

Суммируя изложенные выше соображения, полагаю, что Ермаков П.Г. является вполне сложившимся специалистом, в полной мере достойным присуждения ученой степени кандидата технических наук. Выполненная им диссертационная работа является завершенным научным исследованием, содержащим оригинальное решение актуальной технической задачи обеспечения экстренной посадки БВ на неподготовленную площадку. Диссертационная работа соответствует требованиям, предъявляемым ВАК РФ к кандидатским диссертациям (пункты 8, 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней»).

Учитывая научно-квалификационный уровень Ермакова П.Г., качество представленной диссертационной работы считаю, что Ермаков П.Г. достоин присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки).

Научный руководитель,  
д.т.н., профессор

В.Н. Евдокименков

25.06.2025

Подпись В.Н. Евдокименкова заверяю:  
директор дирекции Института № 7 МАИ



А.В. Кривилев