

На правах рукописи



Ермаков Павел Григорьевич

**РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОЙ ПОСАДКИ
БЕСПИЛОТНОГО ВЕРТОЛЕТА НА НЕОБОРУДОВАННУЮ ПЛОЩАДКУ**

Специальность

2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки)

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2025 год

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель: **Евдокименков Вениамин Николаевич,**
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационно-управляющие комплексы летательных аппаратов» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Официальные оппоненты: **Гайденов Андрей Викторович,**
доктор технических наук, профессор, старший научный сотрудник ООО «Инновационные технологии и решения»

Чобан Василий Мильевич,
кандидат технических наук, директор-главный конструктор НИЦ функционального развития ВКЛА АО «НЦВ Миля и Камова»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

Защита диссертации состоится 04 декабря 2025 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.327.03 в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте МАИ по ссылке: https://mai.ru/events/defence/?ELEMENT_ID=185964

Автореферат разослан “___” _____ 2025 г.

Отзывы, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, Отдел Учёного и диссертационных советов МАИ.

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

А.В. Старков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время малые беспилотные воздушные судна (БВС) вертолетного типа, взлетная масса которых составляет до 500 кг, все чаще используются как в гражданских, так и в военных областях. Перспективными задачами для БВС являются: доставка грузов в удаленные районы, поиск терпящих бедствие людей на воде и в лесных массивах, обследование инфраструктурных объектов (линии электропередач, нефтегазопроводы), охрана площадной территории, военное применение (разведывательно-ударные задачи).

Несмотря на очевидные преимущества беспилотных вертолетов (БВ) по сравнению с беспилотными летательными аппаратами самолетного типа, использующими горизонтальный способ взлета и посадки, их широкое практическое применение требует решения ряда проблем, одной из которых является обеспечение посадки на неподготовленную площадку.

Необходимость экстренной посадки на неподготовленную площадку возникает, например, в условиях нештатных режимов работы бортового оборудования, развитие которых способно привести к катастрофе и потере БВ. В свою очередь, обеспечение экстренной посадки на неподготовленную площадку требует оперативного формирования на борту БВ оптимального (в смысле некоторого критерия) маршрута движения БВ с целью поиска площадки, пригодной для посадки.

Также следует подчеркнуть, что для Российской Федерации проблема автоматической посадки БВ на неподготовленную площадку стоит особо остро ввиду низкой плотности размещения оборудованных вертодромов на территории страны.

В соответствии с требованиями международной организации гражданской авиации (ИКАО) площадка, пригодная для безопасной посадки БВ, представляет собой квадратную область со стороной, равной $1,5D \times 1,5D$, где D – диаметр несущего винта, которая удовлетворяет комплексу следующих требований:

- 1) угол наклона вертодрома к горизонту должен быть не более 10° ;
- 2) прочность земной поверхности не менее 3 кгс/см^2 ;
- 3) неровности на поверхности не должны превышать 100 мм;
- 4) на удалении от края вертодрома до $1,5D$ м за его пределами не должно быть элементов рельефа с высотой, превышающей 1 м.

Здесь полагаем, что требования № 1, 3 и 4 к необорудованному вертодрому могут быть удовлетворены на этапе планирования оптимального маршрута облета необорудованных вертодромов на основе обработки данных цифровой карты местности (ЦКМ). Проверка выполнения требования №2 возможна только в реальном полете при пролете БВ над участком местности, рассматриваемым в качестве потенциальной посадочной площадки.

Таким образом, обеспечение безопасной посадки БВ на необорудованный вертодром является актуальной научной и прикладной задачей, решение которой направлено в итоге на повышение безопасности эксплуатации БВ и расширение области их целевого использования.

Задачей осуществления посадки беспилотного вертолета на необорудованный вертодром занимались иностранные и российские ученые – Себастьян Ш. (2012 г.), Марк Т. (2013 г.), Мэттью У. (2013 г.), Ким Н.В. (2020 г.), Носков В.П. (2020 г.), Машков В.Г. (2022 г.), Малышев В.А. (2022 г.). Вместе с тем работы отечественных и зарубежных авторов затрагивают вопросы реализации посадки беспилотного вертолета на неподготовленную местность на основе данных бортовой системы технического зрения, игнорируя при этом различные аспекты предполетного планирования и оперативного управления БВ, конструктивные алгоритмы, обеспечивающие безопасную посадку БВ на необорудованную площадку не представлены в библиографических источниках.

Цель работы. Целью настоящей работы является обеспечение безопасной посадки беспилотного вертолета на необорудованную площадку путем разработки численных алгоритмов, учитывающих комплекс требований к рельефу и прочности грунта в месте предполагаемой посадки.

Объект исследования. Объектом исследования является беспилотный вертолет, совершающий экстренную посадку на необорудованную площадку.

Предмет исследования. Алгоритмы построения оптимального маршрута облета участков местности для обеспечения безопасной посадки беспилотного вертолета на основе: априорной информации о районе целевого применения в виде цифровой карты местности, а также первичной и вторичной навигационной информации (данные бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС) на базе микро-электромеханической системы (МЭМС), лазерного высотомера, лидара, георадара).

Метод исследования. Методы оптимизации, теории вероятностей, комплексной обработки навигационной информации, имитационное математическое моделирование процесса безопасной посадки беспилотного вертолета на базе разработанного специального программно-математического обеспечения (ПМО).

Основные положения, выносимые на защиту:

- алгоритм планирования маршрута облета участков местности для поиска площадки, пригодной для посадки беспилотного вертолета на основе статистической обработки данных ЦКМ;

- алгоритм проверки требования прочности грунта площадки на основе решения задачи нейросетевой классификации с использованием данных георадара;

- специальное программно-математическое обеспечение, реализующее поиск площадки, пригодной для оперативной посадки беспилотного вертолета с учетом

комплекса требований, учитывающих требования к рельефу поверхности и прочности грунта в месте посадки в соответствии с нормами ИКАО;

- результаты имитационного моделирования и летных испытаний разработанных алгоритмов и ПМО, реализующих на борту беспилотного вертолета оперативный поиск площадки, пригодной для посадки, подтвердившие состоятельность используемого модельного аппарата и использованных программно-алгоритмических решений.

Научная новизна полученных в работе результатов состоит в следующем:

1. Разработан алгоритм планирования маршрута облета беспилотным вертолетом участков местности с целью поиска площадки, пригодной для посадки, основанный на использовании вероятностных критериев, учитывающих статистическую неопределенность данных ЦКМ.

2. Разработан алгоритм проверки требования по предельной прочности грунта в предполагаемом месте посадки, базирующийся на решении задачи классификации на основе данных георадара с использованием нейросетевой модели. Показано, что применение нейросетевого классификатора в комплексе с данными георадара обеспечивает выбор посадочной площадки, удовлетворяющей требованию необходимой прочности грунта с гарантированной вероятностью 0,99.

3. Для непосредственного обеспечения безопасной оперативной посадки беспилотного вертолета на необорудованную площадку разработан алгоритм интеграции навигационных данных БИНС МЭМС и лазерного высотомера вертикального канала бортовой навигационной системы беспилотного вертолета на базе слабосвязанной схемы с возможностью фиксации аномальных всплесков в показании лазерного высотомера, основу которой составляет модификация фильтра Калмана. За счет использования предложенных алгоритмических решений удалось обеспечить III категорию точности посадки по ИКАО с гарантированной вероятностью 0,95.

4. Разработано специализированное ПМО, реализующее:

- планирование маршрута облета беспилотным вертолетом участков местности для поиска площадки, пригодной для посадки, с использованием цифровой карты местности и вероятностных критериев, позволяющих учесть особенности рельефа;

- проверку выполнения требования по необходимой прочности грунта в месте предполагаемой посадки на основе нейросетевой обработки данных георадара;

- высокоточное навигационное счисление высоты БВС вертолетного типа над подстилающей земной поверхностью при осуществлении посадки.

Степень достоверности результатов обусловлена корректным использованием математического аппарата, имитационным моделированием, а также частичной верификацией отработки специального ПМО данными, полученными в результате летных испытаний БВС вертолетного типа.

Практическая значимость результатов работы заключается в повышении безопасности эксплуатации беспилотных вертолетов за счет обеспечения оперативной безопасной посадки на необорудованную площадку с учетом комплекса требований, учитывающих особенности рельефа и прочность грунта в месте предполагаемой посадки.

Внедрение результатов диссертационной работы. Результаты диссертационного исследования внедрены в научно-исследовательскую работу ООО «ЦТИИ НИЦ «Институт имени Н.Е. Жуковского» и в учебный процесс кафедры 704 «Информационно-управляющие комплексы летательных аппаратов» МАИ.

Личный вклад автора. Все результаты настоящего диссертационного исследования получены автором лично. В том числе, автором разработаны вероятностные критерии для оценки пригодности необорудованных вертодром, алгоритм планирования маршрута облета необорудованных площадок, алгоритм нейросетевой классификации типа грунта неподготовленной площадки, алгоритм интеграции навигационных данных БИНС и ЛВ.

Апробация работы. Основные результаты работы обсуждались на следующих научно-технических конференциях: XLIX, L Международные молодежные научные конференции «Гагаринские чтения» (г. Москва, 2023, 2024), 22-я, 23-я Международные научные конференции «Авиация и космонавтика» (г. Москва, 2023, 2024), 15-я Международная конференция «Интеллектуализация обработки информации» ИОИ-2024 (Республика Беларусь, г. Гродно, 2024), V Всероссийская научно-техническая конференция «Навигация, наведение и управление летательными аппаратами» (г. Москва, 2024), на научном семинаре кафедры 604 «Системный анализ и управление» МАИ.

Публикации. Основные положения настоящей диссертационной работы, включая результаты её практического применения, опубликованы в 4 статьях из Перечня ВАК Минобрнауки России [1–4], в 2 статьях [5, 6] в рецензируемых изданиях из перечня МРБД, в сборниках тезисов докладов 6 конференций [10–15], индексируемых в РИНЦ, а также получены 3 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ [7–9].

Объём и структура работы. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, двух приложений и списка литературы из 70 наименований, изложена на 145 страницах машинописного текста, содержит 45 рисунков, 17 таблиц и 33 формулы.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Во **введении** приводится обоснование актуальности решаемой задачи, краткий обзор степени проработанности темы исследования, дается общая характеристика работы.

В **первой главе** приведен библиографический обзор современных зарубежных и отечественных работ, связанных с обеспечением посадки беспилотных воздушных судов вертолетного типа.

Исходя из анализа отечественного и международного опыта по использованию беспилотных вертолетов можно утверждать, что необходимость обеспечения оперативной посадки на необорудованную площадку с соблюдением требований безопасности возникает достаточно часто, например, при решении таких задач как доставка грузов в удаленные места, помощь людям, терпящим бедствие в труднодоступной местности, или при возникновении нештатной ситуации на борту воздушного судна, требующей экстренной посадки.

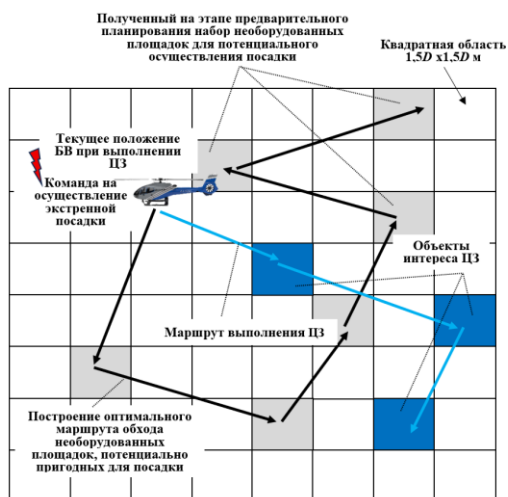


Рис. 1 – Графическая интерпретация постановки задачи

необорудованную площадку в первой главе сформулированы два класса задач, требующих решения:

1. Планирование маршрута облета участков местности для поиска площадки, пригодной для посадки, на основе данных ЦКМ, искаженных присутствием случайных погрешностей:

- определение пригодности участка местности для посадки беспилотного вертолета по углу наклона поверхности;

- определение пригодности участка местности для посадки беспилотного вертолета по предельной высоте элементов рельефа на его поверхности и за пределом собственных границ;

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

2. Проверка требований к посадочной площадке, выполняемая непосредственно в ходе полета:

- определение пригодности посадочной площадки по требованию прочности грунта не менее 3 кгс/см²;
- определение пригодности посадочной площадки по предельной высоте элементов рельефа как на ее поверхности, так и в смежных областях.

Вторая глава посвящена разработке алгоритмов для осуществления безопасной посадки БВС вертолетного типа на основе статистической обработки информации ЦКМ.

Алгоритм определения вероятности пригодности необорудованного вертодрома по предельному углу наклона на основе ЦКМ предполагает выполнение следующих шагов:

1. Выполнение сортировки потенциальных посадочных площадок на основе данных ЦКМ для отбраковки заведомо непригодных участков земной поверхности для посадки беспилотного вертолета на основе проверки следующего условия:

$$node[i, j].type \neq ProhibType, \forall i, j \in [i_{min} \dots i_{max}, j_{min} \dots j_{max}];$$

где: *node* – текущая ячейка ЦКМ; *type* – тип объекта земной поверхности текущего узла ЦКМ; *ProhibType* – априори заданный список запрещенных типов объектов земной поверхности для совершения посадки (объекты гражданской инфраструктуры, водоемы, военные объекты и т.д.); *i_{min} ... i_{max}* – минимальные и максимальные значения индексов строк ЦКМ предполагаемой области нахождения посадочной площадки; *j_{min} ... j_{max}* – аналогичные индексы столбцов ЦКМ.

2. Оценивание угла наклона поверхности участка местности на основе метода наименьших квадратов (в предположении о том, что систематическая ошибка ЦКМ устранена):

$$\alpha^* = \underset{\alpha \in [0; \pi/2)}{\operatorname{argmin}} \{ (Y - F(\alpha))^T K^{-1} (Y - F(\alpha)) \}; \quad (1)$$

где: α^* – оценка угла наклона потенциальной посадочной площадки; K – диагональная ковариационная матрица ошибок высотной информации ЦКМ, размерность $2(sz + 1) \times 2(sz + 1)$; Y – вектор – столбец абсолютных значений высот рельефа по периметру площадки на основе ЦКМ, размера $2(sz + 1) \times 1$; $F(\alpha)$ – нелинейная вектор-функция, связывающая компоненты вектора Y с оцениваемым углом площадки размера $2(sz + 1) \times 1$; $sz = [1,5D/dscr]$ – количество ячеек стороны необорудованного вертодрома, занимаемой на ЦКМ; $[]$ – операция выделения целой части числа; $dscr$ – дискретность ЦКМ, м.

3. Вычисление вероятности пригодности участка местности для осуществления посадки беспилотного вертолета. Вероятность пригодности участка местности по требованию предельного угла наклона поверхности рассчитывается на основе гистограммы распределения оценок угла наклона (1), полученной при многократном повторе процесса оценивания угла наклона, в котором генерация случайных ошибок высот рельефа осуществляется с помощью метода Монте-Карло:

$$p_1 = \sum_{i=1}^{\mathcal{N}_1} \frac{n_1^i}{n_1}; \quad (2)$$

где: p_1 – вероятность соответствия участка местности требованию «Угол наклона необорудованного вертодрома к горизонту должен быть не более 10° »; n_1^i – количество реализаций угла наклона площадки, попавших в i -ый интервал гистограммы; n_1 – общее количество реализаций угла наклона площадки; $\mathcal{N}_1$ – количество столбиков гистограммы, попавших в интервал $[0; 10]^\circ$.

4. Проверка требований по предельному перепаду высот внутри потенциальной посадочной площадки и высот за ее границей. Вероятности p_2, p_3 , подтверждающие выполнение этих требований рассчитываются по аналогии с p_1 :

$$p_2(p_3) = \sum_{i=1}^{\mathcal{N}_2(\mathcal{N}_3)} \frac{n_2^i(n_3^i)}{n_2(n_3)}; \quad (3)$$

где: p_2 – вероятность соответствия участка поверхности требованию «Неровности на поверхности вертодрома не должны превышать 100 мм»; n_2^i – количество реализаций высот элементов рельефа внутри выбранного участка поверхности, попавших в i -ый интервал гистограммы; n_2 – общее количество реализаций высот элементов рельефа внутри рассматриваемого участка поверхности; $\mathcal{N}_2$ – количество столбцов гистограммы, попавших в интервал $[0; 0,1]$ м; p_3 – вероятность соответствия участка поверхности требованию: «На удалении от края вертодрома до 1,5D м за его пределами не должно быть элементов рельефа с высотой, превышающей 1 м»; n_3^i – количество реализаций высот элементов рельефа внутри области за границей рассматриваемой площадки, попавших в i -ый интервал гистограммы; n_3 – общее количество реализаций высот элементов рельефа; $\mathcal{N}_3$ – количество столбиков гистограммы, попавших в интервал $[0; 1]$ м.

Вероятность пригодности участка местности для его использования в качестве осадочной площадки с учетом требований к рельефу поверхности на основе ЦКМ рассчитывалась путем произведения вероятностей p_1, p_2, p_3 .

Построение оптимального маршрута облета участков местности, рассматриваемых в качестве потенциальных посадочных площадок, достигнуто путем решения следующей оптимизационной задачи:

$$\mathcal{L}_\Sigma = \sum_{i=1}^{N+1} \sum_{j=1}^{N+1} C_{i,j} x_{i,j} \rightarrow \min_{x_{i,j} \in \{0,1\}} \quad (4)$$

где: $x_{i,j}$ – решение по перелету от i -го участка местности к j -му (в случае перелета к j -му участку принимает значение – 1, в противном случае – 0); $C_{i,j}$ – безразмерная функция, учитывающая потери, возникающие при перелете от i -го участка местности к j -му. Причем при $i = 1$ функция $C_{i=1,j}$ является функцией потерь при перелете беспилотного вертолета от текущего местоположения к j -му участку. Функция потерь $C_{i,j}$ в исследовании записывается как:

$$C_{i,j} = (1 - \alpha_{i,j}) \beta \left(p_{\text{апр}}^j + \frac{\Delta m_{\text{ГП}}}{m_0} \right); \quad (5)$$

$\alpha_{i,j}$ – весовой коэффициент, учитывающий риск отказа бортовых систем беспилотного вертолета на соответствующем участке перелета. Для его вычисления использована принятая в теории надежности экспоненциальная модель отказов, учитывающая текущий часовой налет беспилотного вертолета и время, необходимое для перелета к следующему участку местности, $0 \leq \alpha_{i,j} < 1$; β – весовой коэффициент, имеющий смысл меры доверия к прогнозному значению затрат топлива, рассчитываемому в условиях случайных ошибок бортового навигационного комплекса и ЦКМ, $0 < \beta \leq 1$; $p_{\text{апр}}^j = 1 - \prod_{k=1}^3 p_k^j$ – вероятность непригодности j -го участка на основе ЦКМ, рассчитанная на основе выражений (2),(3); $\Delta m_{\text{ГП}}$ – количество затрачиваемого топлива двигателем внутреннего сгорания (ДВС) вертолета при осуществлении горизонтального полета, кг; m_0 – текущая масса топлива, кг. Здесь отметим также, что $C_{i,j} \in (0; 1 + \Delta m_{\text{ГП}}/m_0]$.

Ограничения для оптимизационной задачи (4) запишутся как:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{N+1} x_{i,j} = 1, j = \overline{1, N+1}, i \neq j, i \neq H_{\text{out}}, j \neq H_{\text{in}}; \\ \sum_{j=1}^{N+1} x_{i,j} = 1, i = \overline{1, N+1}, i \neq j, i \neq H_{\text{out}}, j \neq H_{\text{in}}; \\ \sum_{i \in V} \sum_{j \in V \setminus S} x_{i,j} \geq 1, \forall S \subset V, S \neq \emptyset. \end{cases}$$

Здесь первые два ограничения означают, что беспилотный вертолет посещает каждый участок местности только один раз, причем очевидно, что его возвращение на стартовую позицию не предполагается, а при достижении финального участка-вылет из него невозможен (H_{in} – начальная позиция; H_{out} – финальный участок), последнее вводится для связанности получаемого маршрута облета потенциальных посадочных площадок.

В третьей главе представлен алгоритм для осуществления безопасной посадки БВС вертолетного типа с учетом пригодности посадочной площадки требованию прочности грунта.

Задача определения типа грунта в месте предполагаемой посадки сведена к задаче бинарной классификации, где: X – заданное конечное множество описаний (объектов x), элементами которого являются: диэлектрическая проницаемость грунта и скорость распространения электромагнитной волны в нем, получаемые с помощью георадара; Y – известное конечное множество ответов на принадлежность той или иной совокупности электрофизических характеристик грунта классу «Грунт подходит для посадки» ($Y = 1$) или «Грунт НЕ подходит для посадки» ($Y = 0$). Иными словами, необходимо получить функциональную зависимость $f: X \rightarrow Y$, способную классифицировать $\forall x \in X$.

В работе для решения задачи бинарной классификации типа грунта использован двухслойный перцептрон. Обучающая выборка для данной задачи включала набор значений диэлектрической проницаемости грунта и скорости распространения электромагнитной волны в нем для обоих исходов.

В этом случае искомая зависимость имеет вид:

$$f(\varepsilon, v) = f_{\text{акт}} \left(\sum_{i=1}^{N_{\text{нейрон}}} W_i^2 f_{\text{акт}} \left(\sum_{j=1}^{N_{\text{нейрон}}} \sum_{j=1}^{N_{\text{вх}}} W_{i,j}^1 x_j + b_i^1 \right) + b^2 \right); \quad (6)$$

где: $f(\varepsilon, v)$ принимает значение 0 – если грунт не подходит для осуществления посадки, 1 – иначе; $W_{i,j}^1$ – весовые коэффициенты между входным и первым скрытым слоями нейронной сети; W_i^2 – весовые коэффициенты между первым и вторым скрытыми слоями нейронной сети; $N_{\text{нейрон}}$ – количество нейронов в первом скрытом слое; $N_{\text{вх}}$ – количество входов нейронной сети; x – входной вектор двухслойного перцептрона, $x = (\varepsilon, v)^T$; b_i^1 – вектор смещения первого скрытого слоя нейронной сети; b^2 – смещение второго скрытого слоя нейронной сети; $f_{\text{акт}}$ – функция активации нейронов.

Оценка возможности посадки или необходимости перелета к следующему участку местности на основе проведенного георадиолокационного зондирования грунта предполагаемого места посадки осуществляется путем решения следующей оптимизационной задачи:

$$R_{\text{грунт}} L + \left((1 + \alpha) \gamma \left(p_{\text{апр}}^- + \frac{\Delta m_{\text{П1}} + \Delta m_{\text{ГП}}}{m_0} \right) \right) F \rightarrow \min_{\substack{L \in \{0;1\}; \\ F \in \{0;1\}}} \quad (7)$$

где: L – решение по посадке в текущей области; F – решение по перелету к следующему участку; $R_{\text{грунт}}$ – риск потерь от ложно-положительных решений нейросетевого классификатора, определяемый как: $R_{\text{грунт}} = FPRC_{0.5} + FPRC_1$; FPR – вероятность появления ложно-положительных решений (неподходящий грунт для посадки был классифицирован как подходящий); $C_{0.5}$ – весовой коэффициент, учитывающий тяжесть последствий посадки на влажный грунт ($C_{0.5} = 0,5$); C_1 – весовой коэффициент, учитывающий тяжесть последствий посадки на болото ($C_1 = 1$); γ – весовой коэффициент, учитывающий неточность позиционирования ЦКМ и воздушного судна при прогнозировании времени перелета к следующему вертодрому, $1 \leq \gamma < +\infty$.

В качестве ограничения выступает равенство: $L + F = 1$.

Опыт практического использования георадиолокации показывает, что георадар при дистанционном зондировании необходимо располагать на расстоянии от земной поверхности, которое должно составлять не более одной длины излучаемой радиотехническим устройством электромагнитной волны в воздухе. Следовательно, предварительно перед спуском беспилотного вертолета до высоты проведения георадиолокационного облучения почвы предполагаемого места посадки необходимо определить его пригодность по предельной высоте элементов рельефа поверхности. Оценивание высот неровностей места посадки осуществлялось с помощью статистической обработки матрицы высот рельефа, полученной на основе лидарного сканирования подстилающей земной поверхности. Вероятность принадлежности предполагаемого места посадки по его рельефу с помощью проведенного лидарного сканирования на основе использования гистограммного метода запишется как:

$$p_{\text{рельеф}} = \sum_{i=1}^{\mathcal{N}_1} \frac{n_1^i}{n_1} \sum_{j=1}^{\mathcal{N}_2} \frac{n_2^j}{n_2}; \quad (8)$$

где: n_1^i – количество высот элементов рельефа поверхности за границей посадочной площадки, попавших в i -ый интервал гистограммы; n_1 – общее количество высот элементов рельефа поверхности; $\mathcal{N}_1$ – количество столбцов гистограммы высот элементов рельефа поверхности за границей посадочной площадки, попавших в интервал $[0; 1 - \Delta_{\text{лидар}} - \Delta_{\text{ГП}}]$ м; $\Delta_{\text{лидар}}$ – предельная ошибка вычисления дальности до объекта лидаром; $\Delta_{\text{ГП}}$ – предельная ошибка счисления высоты вертолета в горизонтальном полете (определяется по результату отработки алгоритмического обеспечения бортовой навигационной системы на летных данных);

n_2^j – количество высот элементов рельефа на поверхности посадочной площадки, попавших в j -ый интервал гистограммы; n_2 – общее количество высот элементов рельефа; $\mathcal{N}_2$ – количество столбцов гистограммы высот элементов рельефа на поверхности посадочной площадки, попавших в интервал $[0; h_\phi - \Delta_{\text{лидар}} - \Delta_{\text{гп}}]$ м; h_ϕ – высота нижней части фюзеляжа вертолета над поверхностью земли.

На основе проведенного лидарного сканирования рельефа подстилающей земной поверхности решение по снижению до рекомендуемой высоты проведения георадиолокационного зондирования грунта принимается на основе оптимизационной задачи вида:

$$\left(p_{\text{рельеф}}^- + \frac{\Delta m_c}{m_0}\right) D + \left((1 + \alpha)\gamma \left(p_{\text{апр}}^- + \frac{\Delta m_{\text{п2}} + \Delta m_{\text{гп}}}{m_0}\right)\right) F \rightarrow \min_{\substack{D \in \{0;1\}; \\ F \in \{0;1\}}} \quad (9)$$

где: D – решение по снижению в текущей области; $p_{\text{рельеф}}^-$ – вероятность непригодности предполагаемого места по предельному перепаду высот рельефа на основе проведенного лидарного сканирования ($p_{\text{рельеф}}^- = 1 - p_{\text{рельеф}}$); Δm_c – количество расходуемого топлива при спуске вертолета до рекомендуемой высоты проведения георадиолокационного облучения грунта, кг; $\Delta m_{\text{п2}}$ – количество затрачиваемого топлива ДВС при подъеме вертолета от высоты проведения лидарного сканирования подстилающей поверхности до высоты осуществления горизонтального полета, кг.

Решение данной оптимизационной задачи производится при ограничении вида: $D + F = 1$.

С учетом приведенного выше материала, а также принимая ввиду тот факт, что на осуществление безопасной посадки безусловно влияет точность счисления высоты воздушного судна, дополнительно рассмотрен вопрос счисления высоты на этапе осуществления посадки. В качестве основной навигационной системы беспилотного вертолета используется БИНС на базе МЭМС и лазерный высотомер (ЛВ) для коррекции высоты над подстилающей поверхностью. Функциональная схема вертикального канала бортовой интегрированной навигационной системы БВС вертолетного типа при посадке представлена ниже (рис. 2).

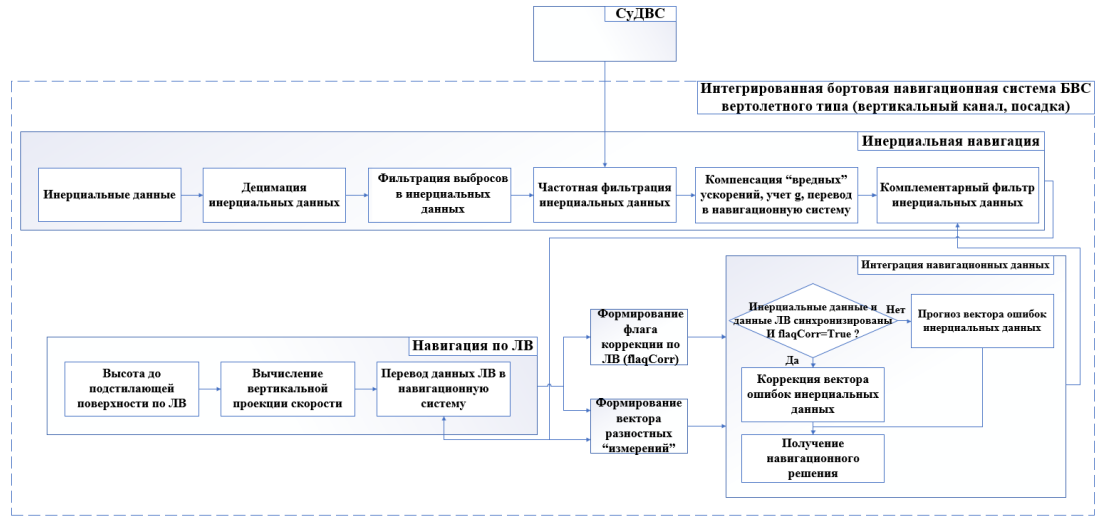


Рис. 2– Функциональная схема вертикального канала бортовой интегрированной навигационной системы БВС вертолетного типа при осуществлении посадки

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 не является постоянной во времени величиной в процессе движения аппарата.

Вектор оцениваемых параметров в данном случае запишется как:

$$\Delta X = (\Delta Z_{\text{БИНС}} \Delta v_{\text{ЗБИНС}} \Delta a_{0\text{ЗБИНС}})^T;$$

где: $\Delta Z_{\text{БИНС}}$ – ошибка инерциального счисления высоты, м; $\Delta v_{\text{ЗБИНС}}$ – ошибка инерциального счисления вертикальной проекции вектора скорости, м/с; $\Delta a_{0\text{ЗБИНС}}$ – ошибка смещения нулевого сигнала акселерометра по вертикальной проекции вектора ускорения вертолета, м/с².

Адаптация ковариационной матрицы ошибок ЛВ происходит на основе следующего выражения:

$$\tilde{R}_c = \alpha \max \left(1, \frac{\text{tr} \left(\frac{1}{N} \sum_{j=0}^N (\Delta Y_{c-j} - H \Delta \hat{X}_{k-jK}) (\Delta Y_{c-j} - H \Delta \hat{X}_{k-jK})^T \right)}{\text{tr} (H \hat{P}_k H^T + \tilde{R}_{c-1})} \right) \tilde{R}_{c-1}; \quad (10)$$

где: α – поправочный коэффициент (априори заданная положительная константа); $\tilde{R}_c$ – значение ковариационной матрицы ошибок ЛВ на шаге c коррекции; $\tilde{R}_{c-1}$ – значение ковариационной матрицы ошибок ЛВ на шаге $c - 1$ коррекции; ΔY_c – вектор разностных «измерений» на c шаге проведения коррекции; $\Delta Y_c = (Z_{\text{БИНС}} - Z_{\text{ЛВ}} \ v_{\text{ЗБИНС}} - v_{\text{ЗЛВ}})^T$; $Z_{\text{БИНС}}$ – инерциальная высота, м; $Z_{\text{ЛВ}}$ – высота по ЛВ, м; $v_{\text{ЗБИНС}}$ – инерциальная вертикальная проекция вектора линейной скорости, м/с; $v_{\text{ЗЛВ}}$ – вертикальная проекция вектора линейной скорости по ЛВ, м/с; $\Delta \hat{X}_k$ – прогнозное значение оцениваемого вектора ошибок инерциальных данных на шаге k прогноза; H – матрица наблюдаемости; $\hat{P}_k$ – прогнозное значение апостериорной ковариационной матрицы ошибок оценивания

компонент вектора ΔX на шаге k ; N – общее количество тактов вычисления ковариационной матрицы ошибок ЛВ; K – количество временных отсчетов, прошедших с последнего этапа коррекции; $tr()$ – операция вычисления следа матрицы.

Здесь стоит отметить, что коррекция вектора оцениваемых параметров происходит не только при синхронизации навигационных данных, но и при присваивании логической переменной разрешения коррекции по лазерному высотомеру (*flaqCorr*) значения *ИСТИНА* для исключения влияния аномальных всплесков в вырабатываемое фильтром Калмана навигационное решение. Логической переменной *flaqCorr* присваивается значение *ИСТИНА*, если выполняется следующее условие:

$$|Z_{\text{ЛВ}}(t_i) - Z_{\text{ЛВ}}(t_{i-1})| \leq V_{\text{скор}}(h_{\text{ГП}}, V_{\text{ГП}})N_{\text{т}}\Delta t + \Delta_{\text{ЛВ}};$$

где: $Z_{\text{ЛВ}}(t_i)$ – значение высоты на текущем такте функционирования ЛВ, м; $Z_{\text{ЛВ}}(t_{i-1})$ – значение высоты на предыдущем такте функционирования ЛВ, м; $V_{\text{скор}}(h_{\text{ГП}}, V_{\text{ГП}})$ – значение скороподъемности вертолета, м/с; $\Delta_{\text{ЛВ}}$ – предельная ошибка высоты до земной поверхности по ЛВ, м; $N_{\text{т}}$ – количество тактов присутствия аномальных всплесков в данных ЛВ; Δt – время дискретизации показаний ЛВ, с.

Четвертая глава посвящена анализу результатов имитационного моделирования процесса осуществления посадки беспилотного вертолета на необорудованный вертодром на основе использования разработанного специального программно-математического обеспечения.

Имитационное моделирование процесса планирования оптимального маршрута облета беспилотным вертолетом необорудованных вертодромов проводилось при использовании ЦКМ: высотная информация рельефа - SRTM, информация о типе объекта земной поверхности - OpenStreetMap. Исследование процесса априорного планирования маршрута облета необорудованных вертодромов происходило с помощью использования специального ПМО (рис. 3).

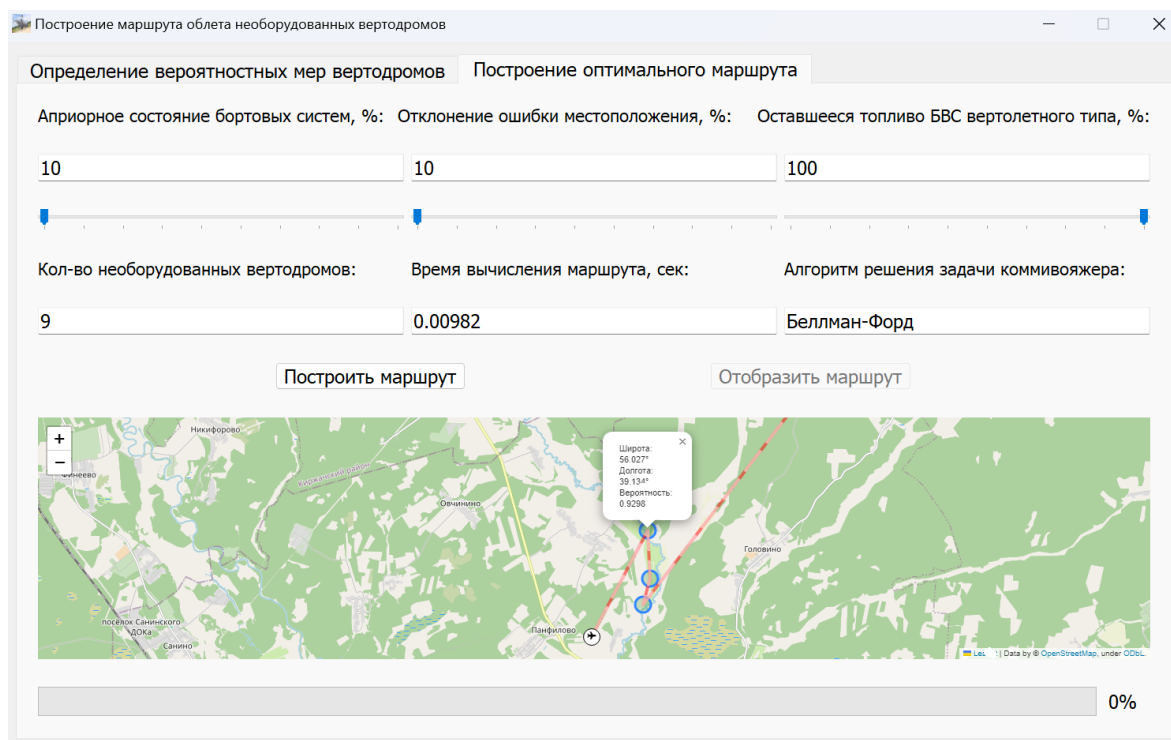
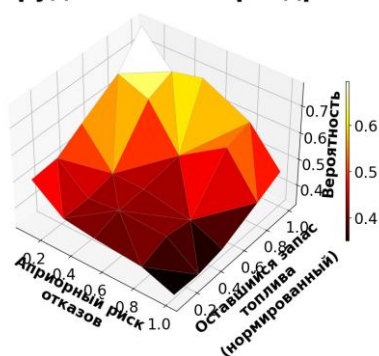


Рис. 3– Графический интерфейс специального ПМО априорного планирования маршрута облета необорудованных вертодромов

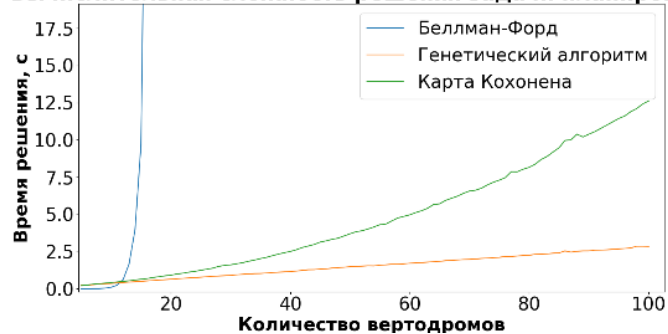
Зависимость вероятности (по результатам проведения 10000 вычислительных экспериментов) выбора необорудованного вертодрома в процессе планирования оптимального маршрута облета участков местности от значения риска отказов бортовых систем вертолета и текущего запаса топлива, а также вычислительная сложность планирования маршрута облета участков местности приведены ниже (рис. 4). Оценка временных затрат решения задачи планирования производилась с помощью использования одноплатного компьютера Raspberry Pi 3 Model B.

Вероятность выбираемого необорудованного вертодрома



а) Вероятность выбираемого необорудованного вертодрома

Вычислительная сложность решения задачи планирования



б) Время решения задачи планирования облета необорудованных вертодромов

Рис. 4– Графическое представление результатов верификации алгоритма планирования маршрута облета необорудованных вертодромов

Результаты решения задачи бинарной классификации на основе использования открытых данных зондирования почвы (георадар с частотой излучения э-м волны 100 МГц), полученные в ходе отработки специального ПМО (рис. 5).

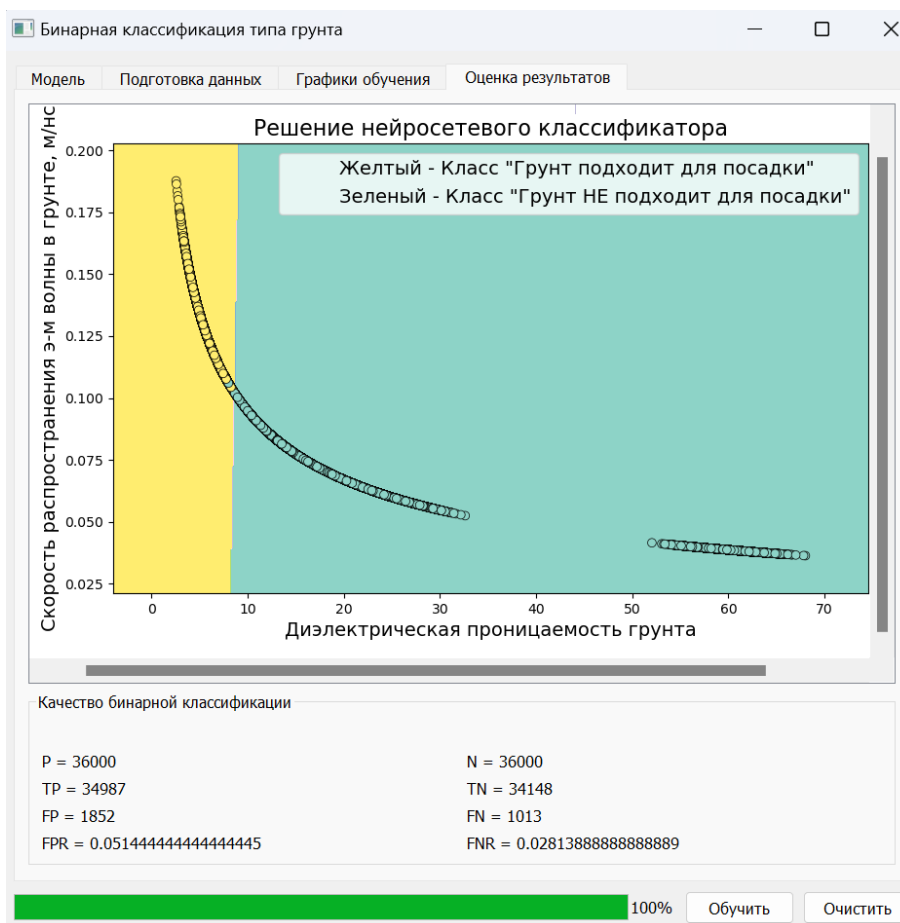


Рис. 5– Графическое изображение решения задачи бинарной классификации двухслойным перцептронам

Верификация разработанного алгоритма счисления высоты воздушного судна при осуществлении посадки производилась при использовании БИНС на базе МЭМС VectorNav VN100 и ЛВ Lightware Sf11/c. Результаты отработки некоторых наборов летных данных БВС вертолетного типа в части определения высоты с помощью специального ПМО (рис. 6).



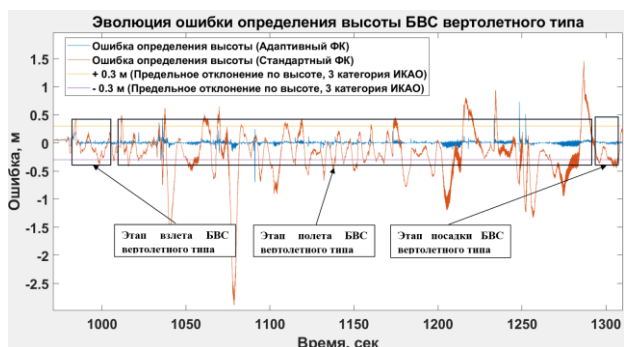
а) Набор данных № 1



б) Фрагмент полета № 1 опытного образца



в) Набор данных № 2



д) Набор данных № 3



г) Фрагмент полета № 2 опытного образца



е) Фрагмент полета № 3 опытного образца

Рис. 6– Графическая интерпретация отработки алгоритмического обеспечения бортовой интегрированной навигационной системы вертикального канала

Заключение диссертации содержит основные выводы по проведенному исследованию.

В **приложении** диссертационной работы приведена информация о зарегистрированных программах для ЭВМ и об актах внедрения результатов настоящего исследования.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

Суммируя все вышесказанное, перечислим основные теоретические и прикладные результаты диссертационной работы. К числу основных теоретических результатов относятся:

1.Алгоритм проверки требований ИКАО к необорудованной посадочной площадке беспилотного вертолета на основе статистической обработки информации ЦКМ: угол наклона поверхности к горизонту должен быть не более 10° ; неровности на поверхности не должны превышать 100 мм; на удалении от края вертодрома до $1,5 D$ м за его пределами не должно быть элементов рельефа с высотой, превышающей 1 м.

2.Алгоритм оптимального планирования маршрута облета участков местности, реализующий решение задачи коммивояжера с вероятностной функцией потерь. За счет соответствующего описания предложенной функции потерь удастся учесть следующие существенные факторы, влияющие на выбор посадочной площадки: вероятность пригодности вертодрома с учетом особенностей рельефа; вероятность отказа бортового

оборудования; ошибка определения собственного местоположения; неточность данных, представленных в ЦКМ; летно-технические характеристики БВС вертолетного типа.

3. Алгоритм проверки требования к посадочной площадке по предельной прочности грунта, базирующийся на решении задачи бинарной классификации на основе нейросетевой обработки показаний георадара. В качестве классификатора используется двухслойный перцептрон, на вход которого поступает вычисляемая георадаром диэлектрическая проницаемость зондируемого грунта и расчетная скорость распространения электромагнитной волны в нем, выходом нейронной сети является предсказанное значение принадлежности облучаемого грунта к одному из двух классов: «Грунт подходит для посадки» или «Грунт НЕ подходит для посадки».

4. Алгоритм интеграции навигационных данных БИНС МЭМС и ЛВ вертикального канала бортовой навигационной системы беспилотного вертолета (этап осуществления посадки) на базе слабосвязанной схемы с возможностью фиксации аномальных всплесков в показании ЛВ, основой которой является адаптивная модификация фильтра Калмана.

5. Формализованные критерии для принятия решения: по снижению беспилотного вертолета до рекомендуемой высоты проведения георадиолокационного зондирования грунта места посадки / перелету к следующей площадке; по посадке / перелету к следующему участку местности.

Важнейшими прикладными результатами диссертационной работы являются следующие:

1. Специальное ПМО для моделирования процесса планирования оптимального маршрута облета участков местности для поиска посадочной площадки БВС вертолетного типа на основе использования веб картографического сервиса OpenStreetMap, данных о рельефе земной поверхности SRTM и летно-технических характеристик БВС вертолетного типа ВРТ300 (КБ «ВР-Технологии»).

2. Специальное ПМО для обработки летных данных инерциальной навигационной системы VN100 (МЭМС) и ЛВ Lightware Sf11/c БВС вертолетного типа, в результате функционирования которого можно утверждать следующее: вероятность попадания ошибки определения высоты БВС в интервал ± 30 см (III категория точности по ИКАО) составила более **95 %** на этапе осуществления посадки.

3. Специальное ПМО для решения задачи нейросетевой классификации грунта посадочной площадки на основе данных о зондировании почвы георадаром с частотой излучения электромагнитной волны 100 МГц, обеспечивающее вероятность правильной классификации грунтов с учетом нормативных требований к прочности на уровне **99 %**.

Все перечисленные результаты в совокупности обеспечивают повышение безопасности эксплуатации беспилотных вертолетов и расширение их функциональных возможностей.

ОСНОВНЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Перечень ВАК

1. Ермаков П.Г., Евдокименков В.Н., Гоголев А.А. Определение угла наклона необорудованной посадочной площадки беспилотного воздушного судна вертолетного типа на основе информации цифровой карты местности / П.Г. Ермаков, В.Н. Евдокименков, А.А. Гоголев // Труды МАИ. – 2023. – № 132. (2,4 п.л./1,73 п.л.)

2. Евдокименков В.Н., Ермаков П.Г., Гоголев А.А. Построение оптимального маршрута облета необорудованных вертодромов / В.Н. Евдокименков, П.Г. Ермаков, А.А. Гоголев // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2023. – № 12. – С.3-10. (0,9 п.л./0,6 п.л.)

3. Ермаков П.Г. Статистическая обработка данных бортовых навигационных систем беспилотного воздушного судна вертолетного типа при осуществлении посадки / П.Г. Ермаков // Труды МАИ. – 2024. – № 138. (2,8 п.л.)

4. Ермаков П.Г. Задача многокритериальной оптимизации выбора необорудованного вертодрома / П.Г. Ермаков // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2024. – № 6. – С.191 – 201. (1,3 п.л.)

Перечень МРБД ВАК

5. Евдокименков В.Н., Ермаков П.Г., Гоголев А.А. Оперативное управление беспилотным вертолетом для обеспечения экстренной безопасной посадки на необорудованную площадку // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2024. – № 3. – С. 169-182. (англ.) Evdokimenkov V.N., Gogolev A.A. and Ermakov P.G. Operational Control of an Unmanned Helicopter to Ensure an Emergency Safe Landing on an Unequipped Pad // Journal of Computer and Systems Sciences International. 2024. vol. 63. no. 3. pp. 521 – 533 (1,5 п.л./1,0 п.л.)

6. Гоголев А.А., Ермаков П.Г. Алгоритм комплексирования данных бесплатформенной инерциальной навигационной системы малых беспилотных летательных аппаратов // СТИН. – 2022. – № 7. (англ.) Gogolev A.A., Ermakov P.G. Algorithm for Integrating Data from the Autonomous Inertial Navigation Systems of Drones // Russian Engineering Research. 2022. vol.42. no. 9. pp.936– 938. (0,35 п.л./0,23 п.л.)

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

7. Ермаков П.Г., Евдокименков В.Н., Гоголев А.А. Программа для построения оптимального маршрута облета БВС вертолетного типа необорудованных вертодромов / П.Г. Ермаков, В. Н. Евдокименков, А.А. Гоголев // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023682103. – 2023.

8. Ермаков П.Г. Программа обработки инерциальных данных на базе МЭМС и лидара БВС вертолетного типа / П.Г. Ермаков // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024614592. – 2024.

9. Ермаков П.Г., Шайхутдинов М.Р. Программа для решения задачи классификации типа грунта необорудованного вертодрома / П.Г. Ермаков, М.Р. Шайхутдинов //

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024618425. – 2024.

Другие публикации

10. Ермаков П.Г. Определение угла наклона необорудованной посадочной площадки беспилотного воздушного судна вертолетного типа на основе априорной информации цифровой карты местности / П.Г. Ермаков // Сборник тезисов работ международной молодежной научной конференции XLIX «Гагаринские чтения – 2023». – М.: Издательство «Перо», 2023. – С. 510 – 511.

11. Ермаков П.Г. Построение оптимального маршрута облета необорудованных вертодромов / П.Г. Ермаков // 22-я Международная конференция «Авиация и космонавтика». 20–24 ноября 2023 года. Москва. Тезисы. – М.: Издательство «Перо», 2023. – С. 240.

12. Ермаков П.Г. Определение типа грунта подстилающей земной поверхности при осуществлении посадки БВС вертолетного типа / П.Г. Ермаков // Сборник тезисов работ международной молодежной научной конференции L «Гагаринские чтения – 2024». – М.: Издательство «Перо», 2024. – С. 453 – 454.

13. Ермаков П.Г., Лебедев М.А., Фурс Е.В. Визуальная навигация беспилотного летательного аппарата на основе анализа изображений подстилающей поверхности / П.Г. Ермаков, М.А. Лебедев, Е.В. Фурс // Интеллектуализация обработки информации: тез. докл. 15-й междунар. конф., Гродно, 23–27 сент. 2024 г. – Гродно.: ГрГУ, 2024. – 111 с. – С.91 – 92.

14. Ермаков П.Г. Принятие решения по осуществлению посадки беспилотного воздушного судна вертолетного типа на необорудованный вертодром / П.Г. Ермаков // 23-я Международная конференция «Авиация и космонавтика». 18–22 ноября 2024 года. Москва. Тезисы. – М.: Издательство «Перо». – 2024. – С. 117.

15. Ермаков П.Г. Алгоритм счисления высоты беспилотного воздушного судна вертолетного типа на этапе осуществления посадки на необорудованный вертодром / П.Г. Ермаков // V Всероссийская научно-техническая конференция «Навигация, наведение и управление летательными аппаратами». Тезисы докладов. 27–28 ноября. Москва. – М.: Издательство «Круглый стол». – 2024. – 332 с. – С. 229–231.