

П.Г. Ермаков**ЗАДАЧА МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ВЫБОРА
НЕОБОРУДОВАННОГО ВЕРТОДРОМА**

Рассматривается задача многокритериальной оптимизации выбора того или иного необорудованного вертодрома для осуществления посадки на него беспилотным воздушным судном (БВС) вертолетного типа. Формализована задача многокритериальной оптимизации выбора вертодрома на основе удовлетворения требований международной организации гражданской авиации (ИКАО) к необорудованным вертодромам посредством минимизации оригинальной функции потерь, учитывающей следующую информацию: вероятность пригодности того или иного необорудованного вертодрома, вероятность отказа бортовой системы БВС вертолетного типа, неточность определения собственного местоположения воздушного судна, неточность позиционной информации цифровой карты местности и летно-технические характеристики БВС вертолетного типа. Определение пригодности необорудованного вертодрома по предельной высоте элементов рельефа его поверхности предложено осуществлять на основе статистической обработки данных лидарного сканирования подстилающей поверхности земли. Изложены математические постановки задачи принятия решения по посадке воздушного судна на неподготовленную площадку исходя из требований ИКАО к вертодрому по предельной высоте элементов рельефа и твердости грунта. Проведено сравнение вычислительных затрат алгоритмов выбора того или иного необорудованного вертодрома с помощью использования одноплатного компьютера Raspberry Pi 3 Model B. Представлен результат имитационного моделирования разработанного оптимального алгоритма выбора необорудованного вертодрома для оценки его работоспособности в условиях вариативности параметров вероятностной функции потерь на основе веб-сервиса OpenStreetMap и цифровой карты местности SRTM. Приведен результат решения задачи принятия решения по посадке БВС вертолетного на необорудованный вертодром на основе проведенного экспериментального лидарного сканирования поверхности земли.

Необорудованный вертодром; линейное программирование; вероятностная функция потерь; статистическая обработка данных.

P.G. Ermakov**PROBLEM OF MULTI-CRITERIA OPTIMIZATION OF SELECTION
OF AN UNPREPARED HELIDROM**

The problem of multi-criteria optimization of the choice of an unprepared helidrom to plant the unmanned aerial vehicle (UAV) helicopter type on it is considered in this article. The problem of multi-criteria optimization of the choice of an unprepared helidrom is formalized based on satisfying requirements of the International Civil Aviation Organization (ICAO) to an unprepared helidrom by minimizing the original loss function taking into account the following data: the probability of availability of an unprepared helidrom, the probability of failure of the UAV's helicopter type onboard system, the error of a digital elevation map (DEM) positional information, the error of the UAV's helicopter type coordinates information and the technical characteristics of the UAV helicopter type. It is proposed to determine the suitability of an unequipped helidrom based on the maximum height of terrain elements of its surface using statistical processing of a lidar earth scanning data. The mathematical formulations of the problem of decision-making on UAV helicopter type landing are proposed based on requirements for an unprepared helidrom in terms of maximum height of terrain elements and soil hardness. The comparison of the computational time of algorithms of the choice of an unprepared helidrom is completed using Raspberry Pi 3 Model B. The result of a simulation modelling of the proposed optimal algorithm of the choice of an unprepared helidrom for the estimation of its efficiency under conditions of variability of parameters of the probabilistic loss function using OpenStreetMap and SRTM is presented. The result of solving the problem of decision-making on UAV helicopter type landing based on a lidar earth scanning data is presented.

Unprepared helidrom; linear programming; probabilistic loss function; statistical data processing.

Введение. Сегодня на территории Российской Федерации из-за низкой плотности расположения оборудованных вертодромов, а также ввиду следующих факторов [1]:

- ♦ специфика возможных возлагаемых задач на беспилотное воздушное судно (БВС) вертолетного типа (осуществление доставки грузов в труднодоступные районы Земли, где создание необходимой инфраструктуры оборудованного вертодрома затруднено);
- ♦ ненулевая вероятность появления нештатной ситуации на борту БВС вертолетного типа;
- ♦ становится очевидным тот факт, что задача осуществления посадки БВС вертолетного типа на необорудованный вертодром является актуальной.

Ниже представлены требования ИКАО к необорудованному вертодрому:

- ♦ угол наклона необорудованного вертодрома не должен превышать 10° ;
- ♦ неровности на поверхности вертодрома не должны превышать 100 мм под трехметровой рейкой, укладываемой в зоне прохода опор воздушного аппарата;
- ♦ на удалении от края вертодрома до $1,5 D$ (D – диаметр несущего винта воздушного судна, м) за его пределами не должно быть элементов рельефа с высотой, превышающей 1 м;
- ♦ прочность грунта необорудованного вертодрома не должна быть менее 3 кгс/см^2 .

Решением задачи выбора необорудованной посадочной площадки для БВС вертолетного типа с помощью обработки изображений подстилающей поверхности земли занимались авторы [2]. Для исключения осуществления посадки воздушного судна на запрещенную поверхность (например, водоемы, объекты гражданской и военной инфраструктуры, гористая местность и др.) в режиме реального времени исследователями было предложено решение данной проблемы на основе нейросетевой обработки изображений подстилающей земной поверхности. В качестве нейросетевой модели ученые использовали самоорганизующуюся карту Кохонена, способную на борту воздушного судна определить разрешенные земные поверхности на текущем изображении для осуществления дальнейшей на них посадки. Авторы утверждают, что при решении данной задачи классификации с использованием нейросетевой модели, обученной в течение 10000 эпох на 2700 изображениях подстилающей поверхности, было выявлено ошибок первого рода – 21 % и ошибок второго рода – 0%.

Несколько схожей задачей определения типа грунта подстилающей поверхности занимались ученые из США [3]. Исследователи предложили алгоритм классификации типа земной поверхности на основе вероятностной нейронной сети на основе использования инерциальных данных для последующей реализации стратегии управления беспилотным наземным аппаратом (БНА). Формирование обучающей выборки происходило с помощью проезда БНА ATRVJr на трех разных земных поверхностях (гравий, асфальт и трава) при постоянной скорости движения аппарата: 0,6 м/с, 0,8 м/с, 1 м/с, 1,2 м/с, 1,4 м/с. Авторы утверждают следующее:

- ♦ на скорости 0,8 м/с движения БНА вероятность правильной классификации травы равняется 87%, вероятность правильной классификации гравия равняется 100%;
- ♦ на скорости 1,2 м/с движения БНА вероятность правильной классификации травы равняется 93%, вероятность правильной классификации гравия равняется 100%.

Далее перейдем к описанию математической постановки задачи многокритериальной оптимизации выбора того или иного необорудованного вертодрома для осуществления потенциальной на него посадки.

Априорное планирование маршрута облета необорудованных вертодромов, производимое в интересах обеспечения безопасной посадки БВС вертолетного типа. Планирование маршрута [4–17] облета необорудованных вертодромов будем производить с учетом суммарных потерь, затрачиваемых на потенциальный перелет к некоторому необорудованному вертодрому. Очевидно, что оптимальным маршрутом облета необорудованных вертодромов является тот, который минимизирует функцию суммарных потерь $\mathcal{L}_\Sigma$:

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

где $C_{i,j}$ – функция потерь, учитывающая потери при потенциальном перелете от i -го необорудованного вертодрома к j -му (величина $C_{i,j}$ является безразмерной характеристикой); $x_{i,j}$ – решение по перелету от i -го необорудованного вертодрома к j -му. В случае положительного решения по перелету к j -му необорудованному вертодрому принимает значение – 1, в противном случае – 0.

Вид функции $C_{i,j}$ представим как:

$$C_{i,j} = (1 - \alpha)\beta \left(p_{\text{апр}}^- + \frac{\Delta m_{\text{ГП}}}{m_0} \right); \quad (2)$$

где α – весовой коэффициент, учитывающий риск отказа бортовых систем БВС в процессе перелета к необорудованному вертодрому, для оценки этой вероятности использована принятая в теории надежности экспоненциальная модель отказов; β – весовой коэффициент, являющийся мерой доверия к прогнозируемому времени на перелет БВС вертолетного типа к необорудованному вертодрому, расходуемого на перелет к тому или иному необорудованному вертодрому; $p_{\text{апр}}^-$ – вероятность непригодности вертодрома на основе статистической обработки ЦКМ; $\Delta m_{\text{ГП}}$ – количество затрачиваемого топлива двигателя внутреннего сгорания (ДВС) БВС вертолетного типа при осуществлении горизонтального полета; m_0 – текущий объем топливного бака БВС вертолетного типа.

Здесь $p_{\text{апр}}^-$ определяется следующим образом:

$$p_{\text{апр}}^- = 1 - \prod_{k=1}^3 p_k^j, \quad (3)$$

где k – индекс вероятности пригодности вертодрома по одному из первых трех требований к его рельефу.

Вероятность пригодности того или иного необорудованного вертодрома по требованию предельного угла наклона рассчитывается на основе гистограммы распределения оценок угла наклона необорудованного вертодрома, полученной при многократном повторе процесса оценивания угла наклона (оценка угла наклона вычисляется на основе метода наименьших квадратов [18]), в котором генерация случайных ошибок высот рельефа осуществляется с помощью метода Монте-Карло. Вероятности пригодности вертодрома по предельной высоте элементов рельефа вычисляются аналогично на основе метода Монте-Карло.

Принимая во внимание тот факт, что БВС вертолетного типа может посетить только один раз необорудованный вертодром, здесь ясно, что возвращение воздушного судна на стартовую позицию не предполагается, а при достижении финального вертодрома – вылет из него невозможен, то вводятся следующие ограничения (H_{in} – условное обозначение стартовой позиции БВС вертолетного типа, H_{out} – условное обозначение финального необорудованного вертодрома) при решении оптимизационной задачи (1):

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{N+1} x_{i,j} = 1, j = \overline{1, N+1}, i \neq j, i \neq H_{out}, j \neq H_{in}; \\ \sum_{j=1}^{N+1} x_{i,j} = 1, i = \overline{1, N+1}, i \neq j, i \neq H_{out}, j \neq H_{in}; \\ \sum_{i \in V} \sum_{j \in V \setminus S} x_{i,j} \geq 1, \forall S \subset V, S \neq \emptyset. \end{cases} \quad (4)$$

Математическая постановка задачи принятия решения по посадке БВС вертолетного типа на необорудованный вертодром на основе лидарного сканирования земной поверхности. В текущей работе вероятность пригодности необорудованного вертодрома по предельной высоте элементов рельефа на основе лидарного сканирования с помощью использования гистограммного метода запишется как:

$$p_{\text{рельеф}} = \sum_{i=1}^{\mathcal{N}_1} \frac{n_1^i}{n_1} \sum_{j=1}^{\mathcal{N}_2} \frac{n_2^j}{n_2}, \quad (5)$$

где n_1^i — количество высот элементов рельефа на поверхности области за пределом необорудованного вертодрома до 1,5 значения диаметра несущего винта БВС вертолетного типа, попавших в i -ый интервал гистограммы; n_1 — общее количество высот элементов рельефа поверхности области за пределом необорудованного вертодрома; $\mathcal{N}_1$ — количество столбиков гистограммы высот элементов рельефа на поверхности области за пределом необорудованной площадки, попавших в интервал $[0; 1 - \Delta_{\text{лидар}} - \Delta_{\text{гп}}]$; $\Delta_{\text{лидар}}$ — предельная ошибка вычисления дальности до объекта лидаром; $\Delta_{\text{гп}}$ — предельная ошибка счисления высоты воздушного судна в горизонтальном полете; n_2^j — количество высот элементов рельефа на поверхности необорудованного вертодрома, попавших в j -ый интервал гистограммы; n_2 — общее количество высот элементов рельефа на поверхности необорудованного вертодрома; $\mathcal{N}_2$ — количество столбиков гистограммы высот элементов рельефа на поверхности необорудованного вертодрома, попавших в интервал $[0; h_{\text{ф}} - \Delta_{\text{лидар}} - \Delta_{\text{гп}}]$; $h_{\text{ф}}$ — высота нижней части фюзеляжа БВС вертолетного типа над поверхностью земли.

С учетом приведенного материала настоящей статьи процесс принятия решения по посадке БВС вертолетного типа на текущий вертодром или по перелету к следующему предлагается осуществлять на основе последовательного решения следующих оптимизационных задач.

Задача 1. Принятие решения по снижению с высоты осуществления горизонтального полета БВС вертолетного типа до рекомендуемой высоты дистанционного георадиолокационного зондирования [19, 20] / перелету к следующему необорудованному вертодрому. Математическая постановка запишется следующим образом:

$$\left(p_{\text{рельеф}}^- + \frac{\Delta m_{\text{с}}}{m_0}\right) D + \left((1 + \alpha)\gamma \left(p_{\text{апр}}^- + \frac{\Delta m_{\text{п1}} + \Delta m_{\text{гп}}}{m_0}\right)\right) F \rightarrow \min_{\substack{D \in \{0;1\}, \\ F \in \{0;1\}}}, \quad (6)$$

где D — решение по снижению БВС вертолетного типа до высоты георадиолокационного зондирования; F — решение по перелету БВС вертолетного типа к следующему необорудованному вертодрому; γ — весовой коэффициент, учитывающий неточность позиционирования ЦКМ и воздушного судна при прогнозировании времени перелета к следующему вертодрому; $\Delta m_{\text{с}}$ — количество расходуемого топлива при спуске БВС вертолетного типа до рекомендуемой высоты проведения георадиолокационного облучения грунта вертодрома; $\Delta m_{\text{п1}}$ — количество затрачиваемого топлива при подъеме воздушного судна от высоты проведения лидарного сканирования подстилающей поверхности до высоты осуществления горизонтального полета.

Введем следующее ограничение для данной задачи: $D + F = 1$.

Задача 2. Принятие решения по посадке / перелету к следующему необорудованному вертодрому, математическая постановка данной задачи примет следующий вид:

$$R_{\text{грунт}} L + \left((1 + \alpha)\gamma \left(p_{\text{апр}}^- + \frac{\Delta m_{\text{п2}} + \Delta m_{\text{гп}}}{m_0}\right)\right) F \rightarrow \min_{\substack{L \in \{0;1\}, \\ F \in \{0;1\}}}, \quad (7)$$

где L — решение по посадке БВС вертолетного типа на текущий необорудованный вертодром; $R_{\text{грунт}}$ — потери от ложно-положительных решений (грунт неподходящий для посадки был классифицирован как подходящий) нейросетевого классификатора типа грунта необорудованного вертодрома [21]; $\Delta m_{\text{п2}}$ — количество затрачиваемого топлива при подъеме воздушного судна от рекомендуемой высоты георадиолокационного зондирования до высоты осуществления горизонтального полета.

Ограничение для задачи запишется как: $L + F = 1$.

Моделирование процесса построения оптимального маршрута облета необорудованных вертодромов. Методом исследования рассматриваемой в настоящей статье задачи является имитационное математическое моделирование. Здесь отметим, что имитационное моделирование задачи планирования маршрута облета необорудованных площадок проводилось при следующих параметрах:

- ♦ высотная информации о рельефе земной поверхности: цифровая карта местности SRTM;
- ♦ географические координаты подходящего места осуществления посадки воздушного судна: веб-картографический сервис OpenStreetMap;
- ♦ летно-технические характеристики БВС вертолетного типа: ВРТ-300 КБ «ВР-Технологии».

На основе представленного выше материала схематично решение задачи построения оптимального маршрута облета необорудованных вертодромов примет следующий вид (рис. 1).

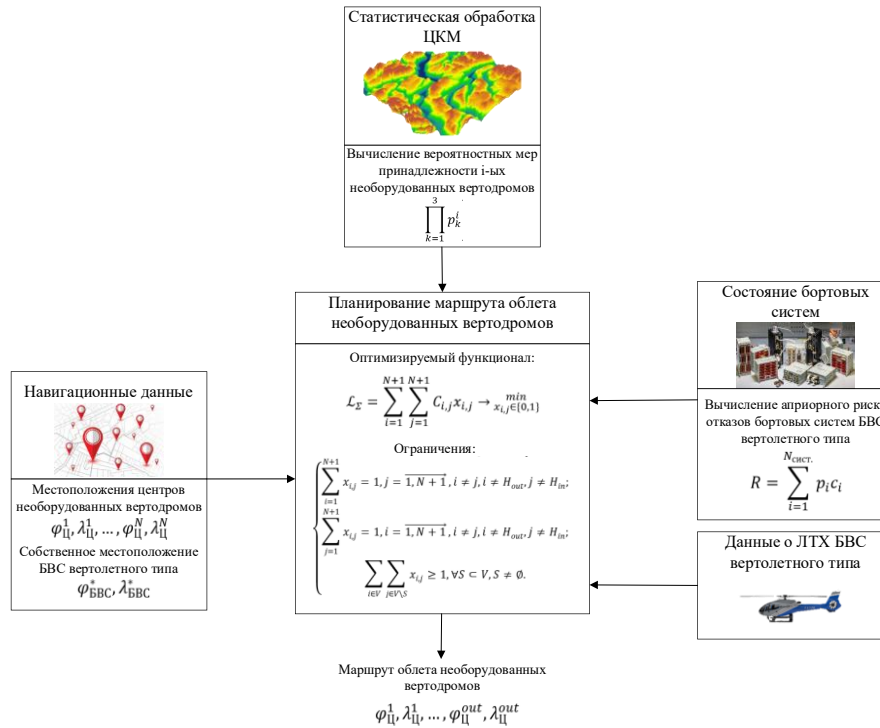


Рис. 1. Схема построения оптимального маршрута облета необорудованных вертодромов

Для исследования предложенного в данном исследовании решения задачи построения оптимального маршрута облета необорудованных вертодромов было разработано специальное программно-математическое обеспечение (ПМО) (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023682103. Заявка № 2023681026 от 12.10.2023. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 23.10.2023). Далее представлен графический интерфейс разработанного специального ПМО (рис. 2).

В общем случае блок-схема предлагаемого алгоритм решения задачи оптимального построения маршрута облета необорудованных вертодромов приведена ниже (рис. 3). В работе для решения сформулированной задачи планирования маршрута облета необорудованных вертодромов предложен комбинированный алгоритм, основанный на сочетании точного алгоритма решения оптимизационной задачи (алгоритм Беллмана-Форда) и генетического / нейросетевого алгоритма. Использование того или иного алгоритма зависит от временных затрат на получение оптимального маршрута. Здесь отметим, что выбор допустимого времени на решение задачи планирования $T_{доп}$, фигурирующее в блоке 5 алгоритма, выходит за рамки данного исследования.

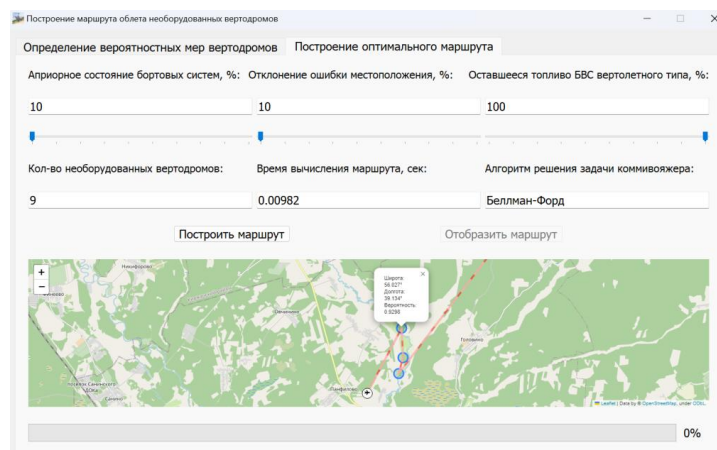


Рис. 2. Графический интерфейс специального ПМО планирования маршрута облета необорудованных вертодромов

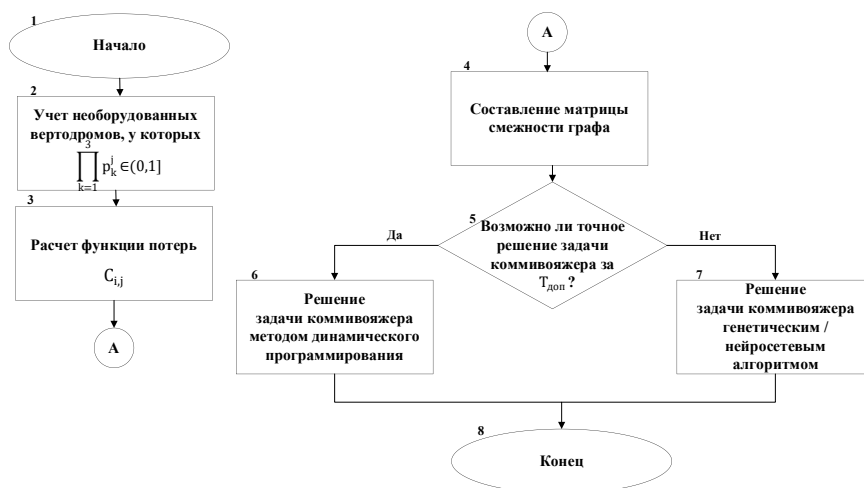


Рис. 3. Блок-схема алгоритма планирования маршрута облета необорудованных вертодромов

Обсуждение результатов проведенного исследования. Ниже представлена графическая зависимость (рис. 4) средней вероятности (10000 проведенных экспериментов планирования маршрута облета необорудованных вертодромов) выбираемого необорудованного вертодрома в процессе планирования оптимального маршрута облета необорудованных площадок от значения априорного риска отказов бортовых систем БВС вертолетного типа и от текущего объема топлива ДВС БВС вертолетного типа на основе использования веб-картографического сервиса OpenStreetMap и цифровой карты местности SRTM [22].

Вычислительная эффективность алгоритмов решения задачи планирования маршрута облета необорудованных вертодромов (рис. 5) производилась с помощью использования одноплатного компьютера Raspberry Pi 3 Model B (процессор: 4-х ядерный ARMv8 Cortex-A53 Broadcom BCM2837B0; оперативная память: 1GB LPDDR2).

Ниже представлена графическая интерпретация принятия решения по снижению воздушного судна до рекомендуемой высоты георадиолокационного зондирования / перелету к следующей необорудованной площадке в ходе решения оптимизационной задачи (6) на основе экспериментального лидарного сканирования земной поверхности (рис. 6 и 7).

Вероятность выбираемого необорудованного вертодрома

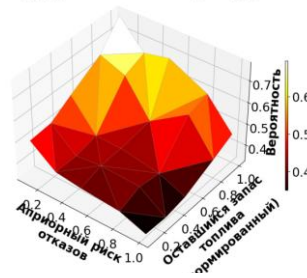


Рис. 4. Вероятность выбираемого необорудованного вертодрома

Вычислительная сложность решения задачи планирования

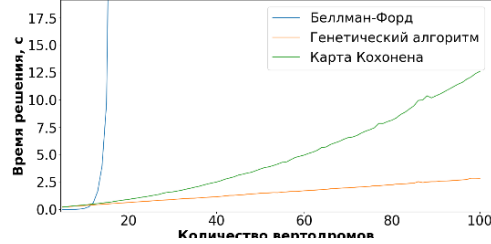


Рис. 5. Вычислительная сложность решения задачи планирования



а) Внешний вид земной поверхности №1

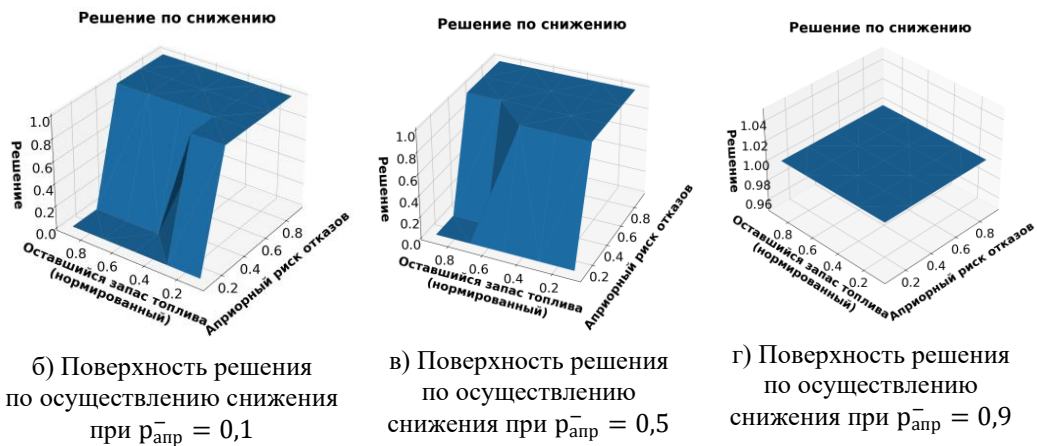
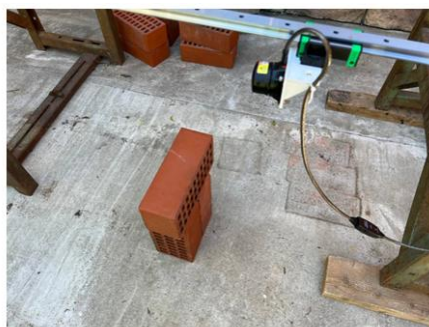


Рис. 6. Графическая интерпретация принимаемого решения по снижению (подстилающая поверхность №1)



а) Внешний вид земной поверхности №2

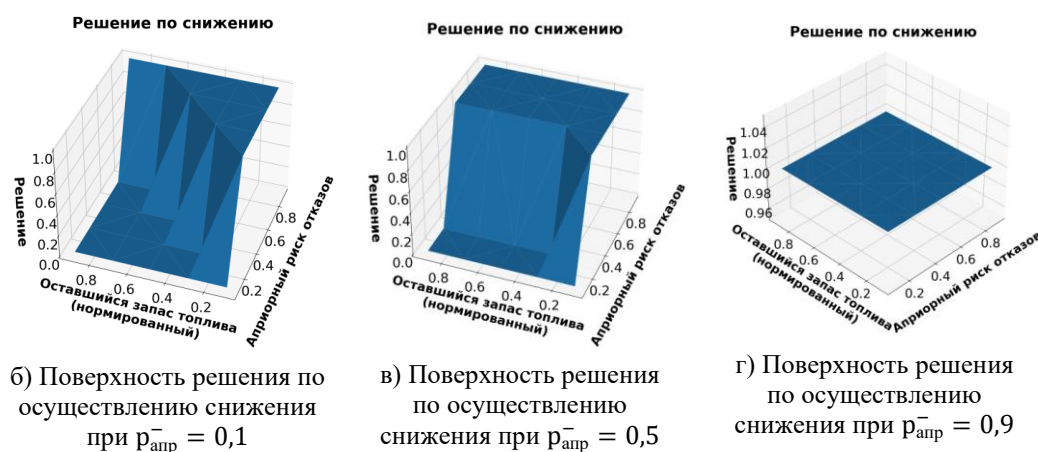


Рис. 7. Графическая интерпретация принимаемого решения по снижению (подстилающая поверхность №2)

Заключение. В статье предложен алгоритм построения оптимального маршрута облета необорудованных вертодромов с целью поиска площадки, пригодной для посадки с учетом требований к ее рельефу. Задача формирования оптимального маршрута сведена к задаче целочисленного линейного программирования, в которой за счет соответствующего описания функции потерь удастся учесть существенные факторы при выборе того или иного необорудованного вертодрома (вероятность пригодности необорудованного вертодрома, вероятность отказа бортовых средств воздушного судна, неточность позиционирования летательного аппарата, летно-технические характеристики воздушного судна). Принятие решения по осуществлению посадки БВС вертолетного типа на необорудованный вертодром предложено осуществлять с помощью последовательного решения следующих оптимизационных задач:

- ◆ задача по принятию решения по спуску до рекомендуемой высоты георадиолокационного зондирования / перелету воздушного судна к следующему необорудованному вертодрому;
- ◆ задача по принятию решения по посадке / перелету воздушного судна к следующей необорудованной площадке.

Проведено имитационное моделирование предложенного алгоритма планирования оптимального маршрута облета необорудованных вертодромов, по результату которого можно говорить об адекватности используемых математических моделей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Цуканов И.Р., Азман А.В. Решаемые проблемы, преимущества и перспективы развития беспилотных вертолетов // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2022. – Вып. 9.

2. Альханов Д.С., Кузурман В.А., Гоголев А.А. Оптическое детектирование перспективных посадочных зон для беспилотного воздушного судна вертолетного типа с помощью самоорганизующихся карт Кохонена // Вестник Московского авиационного института. – 2020. – Т. 29, № 3. – С. 209-221.
3. DuPont E.M., Roberts R.G., Moore C.A. Speed Independent Terrain Classification // 38th Southeastern Symposium on System Theory. March 2006.
4. Андреев М.А., Миллер А.Б., Миллер Б.М., Степанян К.В. Планирование траектории беспилотного летательного аппарата в сложных условиях при наличии угроз // Известия РАН. ТИСУ. – 2012. – № 2. – С. 66-176.
5. Гончаренко В.И., Желтов С.Ю., Князь В.А., Лебедев Г.Н., Михайлин Д.А., Царева О.Ю. Интеллектуальная система планирования групповых действий беспилотных летательных аппаратов при наблюдении наземных мобильных объектов на заданной территории // Известия РАН. ТИСУ. – 2021. – № 3. – С. 39-56.
6. Evdokimenkov V.N., Krasilshchikov M.N., Kozorez D.A. Development of Pre-flight Planning Algorithms for the Functional-program Prototype of a Distributed Intellectual Control System of Unmanned Flying Vehicle Groups // INCAS Bulletin. – 2019. – Vol. 11, No. 1. – P. 75-88.
7. Евдокименков В.Н., Хохлов С.В. Планирование групповых действий беспилотных летательных аппаратов в распределенной системе интеллектуального управления // ВКИТ. – 2022. – № 3. – С. 3-14.
8. Евдокименков В.Н., Ермаков П.Г., Гоголев А.А. Построение оптимального маршрута облета необорудованных вертодромов // ВКИТ. – 2023. – № 12. – С. 3-10.
9. Xu Y., Che C. A brief review of the intelligent algorithm for traveling salesman problem in UAV route planning // 2019 IEEE 9th international conference on electronics information and emergency communication (ICEIEC). – IEEE, 2019. – P. 1-7.
10. Jang D.S., Chae H.J., Choi H.L. Optimal control-based UAV path planning with dynamically-constrained TSP with neighborhoods // 2017 17th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS). – IEEE, 2017. – P. 373-378.
11. Khoufi I., Laouiti A., Adjih C. A survey of recent extended variants of the traveling salesman and vehicle routing problems for unmanned aerial vehicles // Drones. – 2019. – Vol. 3, No. 3. – P. 66.
12. Cengiz E. et al. Effects of variable UAV speed on optimization of travelling salesman problem with drone (TSP-D) // The International Conference on Artificial Intelligence and Applied Mathematics in Engineering. – Cham: Springer International Publishing, 2021. – P. 295-305.
13. Yilmaz B.Y., Denizer S.N. Multi uav based traffic control in smart cities // 2020 11th International conference on computing, communication and networking technologies (ICCCNT). – IEEE, 2020. – P. 1-7.
14. Fu J. et al. On hierarchical multi-UAV dubins traveling salesman problem paths in a complex obstacle environment // IEEE Transactions on Cybernetics. – 2023. – Vol. 54, No. 1. – P. 123-135.
15. Mersiovsky T. et al. Optimal learning rate and neighborhood radius of Kohonen's self-organizing map for solving the travelling salesman problem // Proceedings of the 2nd International Conference on Intelligent Systems, Metaheuristics & Swarm Intelligence. – 2018. – P. 54-59.
16. Khachumov M. An Approach to Formation Control of UAVs Based on Applying Adapted Kohonen Neural Network // 2023 IEEE Ural-Siberian Conference on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT). – IEEE, 2023. – P. 258-261.
17. Guan Q. et al. Kohonen self-organizing map based route planning: A revisit // 2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). – IEEE, 2021. – P. 7969-7976.
18. 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 // Тр. МАИ. – 2023. – № 132.
19. Noviello C. et al. An Overview on Down-Looking UAV-Based GPR Systems // Remote Sensing. – 2022. – Vol. 14. – P. 1-28.
20. Garcia-Fernandez M. et al. UAV-mounted GPR for NDT application // 15th European Radar Conference (EuRAD). – 2018. – P. 2-5.
21. 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. – P. 521-533.
22. Yang L., Meng X., Zhang X. SRTM DEM and its application advances // International Journal of Remote Sensing. – 2011. – Vol. 32, No. 14. – P. 3875-3896.

REFERENCES

1. Tsukanov I.R., Azman A.V. Reshaemye problemy, preimushchestva i perspektivy razvitiya bespilotnykh vertoletov [Problems to be solved, advantages and development prospects of unmanned helicopters], *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of Tula State University. Technical sciences], 2022, Issue 9.

2. Al'khanov D.S., Kuzurman V.A., Gogolev A.A. Opticheskoe detektirovanie perspektivnykh posadochnykh zon dlya bespilotnogo vozdušnogo sudna vertoletnogo tipa s pomoshch'yu samoorganizuyushchikhsya kart Kokhonena [Optical detection of promising landing zones for an unmanned helicopter-type aircraft using self-organizing Kohonen maps], *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta* [Bulletin of the Moscow Aviation Institute], 2020, Vol. 29, No. 3, pp. 209-221.
3. DuPont E.M., Roberts R.G., Moore C.A. Speed Independent Terrain Classification, *38th Southeastern Symposium on System Theory*. March 2006.
4. Andreev M.A., Miller A.B., Miller B.M., Stepanyan K.V. Planirovanie traektorii bespilotnogo letatel'nogo apparata v slozhnykh usloviyakh pri nalichii ugroz [Planning the trajectory of an unmanned aerial vehicle in difficult conditions in the presence of threats], *Izvestiya RAN. TISU* [Bulletin of the RAS. TISU], 2012, No. 2, pp. 66-176.
5. Goncharenko V.I., Zheltov S.YU., Knyaz' V.A., Lebedev G.N., Mikhaylin D.A., TSareva O.Yu. Intel'ktual'naya sistema planirovaniya gruppovykh deystviy bespilotnykh letatel'nykh apparatov pri nablyudenii nazemnykh mobil'nykh ob'ektov na zadannoy territorii [Intelligent system for planning group actions of unmanned aerial vehicles when observing ground mobile objects in a given territory], *Izvestiya RAN. TISU* [Bulletin of the RAS. TISU], 2021, No. 3, pp. 39-56.
6. Evdokimenkov V.N., Krasilshchikov M.N., Kozorez D.A. Development of Pre-flight Planning Algorithms for the Functional-program Prototype of a Distributed Intellectual Control System of Unmanned Flying Vehicle Groups, *INCAS Bulletin*, 2019, Vol. 11, No. 1, pp. 75-88.
7. Evdokimenkov V.N., Khokhlov S.V. Planirovanie gruppovykh deystviy bespilotnykh letatel'nykh apparatov v raspredelennoy sisteme intellektual'nogo upravleniya [Planning group actions of unmanned aerial vehicles in a distributed intelligent control system], *VKIT* [Bulletin of Computer and Information Technologies], 2022, No. 3, pp. 3-14.
8. Evdokimenkov V.N., Ermakov P.G., Gogolev A.A. Postroenie optimal'nogo marshruta obleta neoborudovannykh vertodromov [Construction of an optimal flight route around unequipped heliports], *VKIT* [Bulletin of Computer and Information Technologies], 2023, No. 12, pp. 3-10.
9. Xu Y., Che C. A brief review of the intelligent algorithm for traveling salesman problem in UAV route planning, *2019 IEEE 9th international conference on electronics information and emergency communication (ICEIEC)*. IEEE, 2019, pp. 1-7.
10. Jang D.S., Chae H.J., Choi H.L. Optimal control-based UAV path planning with dynamically-constrained TSP with neighborhoods, *2017 17th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*. IEEE, 2017, pp. 373-378.
11. Khoufi I., Laouiti A., Adjih C. A survey of recent extended variants of the traveling salesman and vehicle routing problems for unmanned aerial vehicles, *Drones*, 2019, Vol. 3, No. 3, pp. 66.
12. Cengiz E. et al. Effects of variable UAV speed on optimization of travelling salesman problem with drone (TSP-D), *The International Conference on Artificial Intelligence and Applied Mathematics in Engineering*. Cham: Springer International Publishing, 2021, pp. 295-305.
13. Yilmaz B.Y., Denizler S.N. Multi uav based traffic control in smart cities, *2020 11th International conference on computing, communication and networking technologies (ICCCNT)*. IEEE, 2020, pp. 1-7.
14. Fu J. et al. On hierarchical multi-UAV dubins traveling salesman problem paths in a complex obstacle environment, *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2023, Vol. 54, No. 1, pp. 123-135.
15. Merstovskiy T. et al. Optimal learning rate and neighborhood radius of Kohonen's self-organizing map for solving the travelling salesman problem, *Proceedings of the 2nd International Conference on Intelligent Systems, Metaheuristics & Swarm Intelligence*, 2018, pp. 54-59.
16. Khachumov M. An Approach to Formation Control of UAVs Based on Applying Adapted Kohonen Neural Network, *2023 IEEE Ural-Siberian Conference on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT)*. IEEE, 2023, pp. 258-261.
17. Guan Q. et al. Kohonen self-organizing map based route planning: A revisit, *2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. IEEE, 2021, pp. 7969-7976.
18. Ermakov P.G., Evdokimenkov V.N., Gogolev A.A. Opredelenie ugla naklona neoborudovannoy posadochnoy ploshchadki bespilotnogo vozdušnogo sudna vertoletnogo tipa na osnove informatsii tsifrovoy karty mestnosti [Determination of the angle of inclination of an unequipped landing pad of an unmanned aerial vehicle of a helicopter type based on information from a digital terrain map], *Tr. MAI* [Proceedings of MAI], 2023, No. 132.
19. Noviello C. et al. An Overview on Down-Looking UAV-Based GPR Systems, *Remote Sensing*, 2022, Vol. 14, pp. 1-28.
20. Garcia-Fernandez M. et al. UAV-mounted GPR for NDT application, *15th European Radar Conference (EuRAD)*, 2018, pp. 2-5.

21. 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.
22. Yang L., Meng X., Zhang X. SRTM DEM and its application advances, *International Journal of Remote Sensing*, 2011, Vol. 32, No. 14, pp. 3875-3896.

Ермаков Павел Григорьевич – Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет); e-mail: pavel-ermakov-1998@mail.ru; г. Москва; тел.: 89854612510; аспирант.

Ermakov Pavel Grigor'evich – Moscow Aviation Institute; e-mail: pavel-ermakov-1998@mail.ru; Moscow, Russia; phone: +79854612510; postgraduate.

УДК 007.52 + 621.865.8

DOI 10.18522/2311-3103-2024-6-201-209

А.А. Хачатрян, Е.С. Брискин

ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ЛИНЕЙНЫМИ ПРИВОДАМИ РОБОТА ПРИ ЕГО ДВИЖЕНИИ ПО ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Эксплуатация роботов на вертикальных и близких к ним поверхностях имеет широкие перспективы в силу необходимости выполнения на них достаточно большого количества технологических операций с одной стороны и сложности использования ручного труда – с другой стороны. Рассматривается движение мобильного робота по вертикальной поверхности. Движение робота и его удержание на поверхности осуществляется посредством работы двух линейных приводов, оказывающих на него давление, и опирающихся на платформы, способные перемещаться по горизонтальной поверхности. Робот и платформа имеют колеса рояльного типа, работающие в одном из двух режимов – свободном и тормозном. При этом тормозные устройства обеспечивают надежное сцепление колес с соответствующими поверхностями. Предложена расчетная схема и математическая модель робототехнической системы, использующей усилие линейных приводов для перемещения робота по вертикальной ровной поверхности. Решена задача динамики движения мобильного робота, перемещение которого по рабочей поверхности осуществляется за счет управления величиной и направлением усилий, развиваемых актуаторами и выбора заторможенных опор, обеспечивающих устойчивый режим движения. Рассмотрен процесс движения, состоящий из трех этапов, на каждом из которых одна из опор робота заторможена, при этом и все опоры платформ на горизонтальной поверхности также заторможены. При переходе между этапами движения мобильный робот совершает остановку перед тем, как сменить заторможенное колесо, после чего возобновляется движение. Силами трения между расторможенными опорами робота и рабочей поверхностью пренебрегается. Получены уравнения и траектория движения центра масс мобильного робота. Представлены зависимости длин линейных приводов механизма прижатия от координат центра масс робота. Проведено имитационное моделирование, в результате которого определены диапазоны изменений длин линейных приводов и развиваемые усилия, обеспечивающие требуемое перемещение.

Мобильные робототехнические средства; перемещение; математическая модель; имитационное моделирование; задача динамики; робот вертикального перемещения; движение по вертикальной поверхности.

A.A. Khachatryan, E.S. Briskin

FEATURES OF CONTROL OF LINEAR DRIVES OF A ROBOT WHEN ITS MOVEMENT ON A VERTICAL SURFACE

The operation of robots on vertical and close to them surfaces has broad prospects due to the need to perform a sufficiently large number of technological operations on them on the one hand and the complexity of using manual labor on the other hand. The movement of a mobile robot along a vertical surface is considered. The movement of the robot and its retention on the surface is carried out through the operation of two linear actuators that exert pressure on it and rely on platforms capable of moving along a horizontal surface. The robot and the platform have piano-type wheels operating in one of two modes – free