

Труды МАИ. 2024. № 134  
Trudy MAI, 2024, no. 134

Научная статья  
УДК 62.83.523: 681.513.6  
URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=178471>

## ВОПРОСЫ ПОСТРОЕНИЯ АДАПТИВНОГО РЕЖИМА ПОЛЕТА РАЗВЕДЫВАТЕЛЬНОГО БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Гюнель Вагиф гызы Алиева<sup>1✉</sup>, Омар Анар оглы Гусейнов<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Национальное Аэрокосмическое Агентство,  
Баку, Азербайджанская Республика

<sup>1</sup>[gunelcelilova@mail.ru](mailto:gunelcelilova@mail.ru)✉

*Аннотация.* Необходимость правильной оценки эффективности проводимой разведки, осуществляемой с использованием интегрированных пространственно-распределенных авиационных комплексов пилотируемых средств воздушной разведки объясняется теми экстремальными условиями, в которых они часто должны быть реализованы. При этом правильное планирование таких полетов является одним из важнейших задач, решение которых обеспечит бы успешное завершение миссии беспилотных летательных аппаратов разведывательного типа. Принятие мер, обеспечивающих высокое качество изображений, получаемых в ходе полета БПЛА безусловно является существенной компонентой такого планирования. изображения. Целью настоящего исследования является определение основных закономерностей при организации адаптивного режима работы опто-электронной воспроизводящей аппаратуры. Суть предлагаемого адаптивного режима, заключается в оперативном

изменении фокусного расстояния в зависимости от высоты полета БПЛА с целью достижения максимально возможной величины показателя по шкале NIIRS. В настоящее время для оценки качества изображений, получаемых от электрооптических систем БПЛА в инфракрасном диапазоне, используется критерий NIIRS. NIIRS является оценочной шкалой степени интерпретируемости получаемых от БПЛА изображений. Чем выше оценка по шкале NIIRS, тем больше деталей можно разобрать в полученном изображении. Шкала NIIRS содержит 10 уровней, где нулевой уровень обозначает изображение, в котором невозможно различить, какие-либо детали, девятый уровень обозначает изображения, в которых отчетливо видно передвижение людей. Математическим аппаратом, наиболее часто употребляемым для вычисления уровней этой шкалы является Общее уравнение качества изображения. Исследованы возможности адаптивного построения БПЛА разведывательного типа с переменным фокусным расстоянием. Показано, что корневая зависимость второй степени высоты полета БПЛА от фокусного расстояния оптоэлектронной аппаратуры является наихудшим вариантом адаптивного управления высотой полета, при реализации которого оценка выполнения миссии БПЛА по шкале NIIRS достигает минимальной величины. При проектировании, а также функционировании БПЛА разведывательного типа, целесообразно избегать организации такого режима адаптивного управления.

**Ключевые слова:** адаптивное управление, беспилотный летательный аппарат, фокусное расстояние, высота полета, оптоэлектронная аппаратура

*Для цитирования:* Алиева Г.В., Гусейнов О.А. Вопросы построения адаптивного режима полета разведывательного беспилотного летательного аппарата // Труды МАИ. 2024. № 134. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=178471>

Original article

## ISSUES OF BUILDING AN ADAPTIVE FLIGHT MODE OF A RECONNAISSANCE UAV

**Gunel Vagif gizi Alieva<sup>1</sup>, Omar Anar oglu Huseynov<sup>2</sup>**

<sup>1,2</sup>National Aerospace Agency,

Baku, Republic of Azerbaijan

<sup>1</sup>[gunelcelilova@mail.ru](mailto:gunelcelilova@mail.ru)✉

**Abstract.** The need for a correct assessment of the effectiveness of the conducted reconnaissance carried out using integrated spatially distributed aviation complexes of manned aerial reconnaissance facilities is explained by the extreme conditions in which they often have to be implemented. At the same time, proper planning of such flights is one of the most important tasks, the solution of which would ensure the successful completion of the mission of unmanned aerial vehicles of the reconnaissance type. Taking measures to ensure the high quality of images obtained during the flight of the UAV is certainly an essential component of such planning. The purpose of this study is to determine the main patterns in the organization of an adaptive mode of operation of optoelectronic reproducing equipment. The essence of the proposed adaptive mode is to promptly change the focal length depending on the altitude of the UAV in order to achieve the maximum

possible value of the indicator on the NIIRS scale. Currently, the NIIRS criterion is used to evaluate the quality of images obtained from electro-optical UAV systems in the infrared range. NIIRS is an evaluation scale of the degree of interpretability of images received from UAVs. The higher the NIIRS score, the more details you can make out in the resulting image. The NIIRS scale contains 10 levels, where the zero level indicates an image in which it is impossible to distinguish any details, the ninth level indicates images in which the movement of people is clearly visible. The mathematical apparatus most often used to calculate the levels of this scale is the General Equation of Image Quality. The possibilities of adaptive construction of reconnaissance-type UAVs with variable focal length are investigated. It is shown that the root dependence of the second degree of the UAV flight altitude on the focal length of optoelectronic equipment is the worst option for adaptive flight altitude control, when implemented, the evaluation of the UAV mission on the NIIRS scale reaches a minimum value. When designing and operating an intelligence-type UAV, it is advisable to avoid organizing such an adaptive control mode.

**Keywords:** adaptive control, UAV, focal length, altitude, optoelectronic equipment

**For citation:** Alieva G.V., Huseynov O.A. Issues of building an adaptive flight mode of a reconnaissance UAV. *Trudy MAI*, 2024, no. 134. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=178471>

## Введение

Как отмечается в работе [1], пилотируемые средства воздушной разведки часто осуществляются в экстремальных условиях, что диктует необходимость правильной оценки эффективности проводимой разведки, осуществляемой с использованием

интегрированных пространственно-распределенных авиационных комплексов. При этом особую важность приобретают показатели разрешения аппаратуры видовой разведки [2]. Согласно [3] этот вопрос непосредственно также актуален для БПЛА, являющихся компонентой таких комплексов. В работе отмечается возможность применения методов искусственного интеллекта для управления групповым полетом БПЛА в составе авиационного комплекса [4]. Вместе с тем разработка новых методов автономным полетом также сохраняет свою важность и актуальность [5]. Как отмечается в работе [6], разведывательные дроны могут функционировать либо по заранее установленному маршруту, либо в режиме дистанционного управления. Согласно [7], в разведывательных целях широко используются дроны типов «летающее крыло» и «дельта крыло».

Одним из важнейших задач, решение которых обеспечил бы успешное завершение миссии беспилотных летательных аппаратов разведывательного типа является правильное планирование полета [8-10].

В работе [11] отмечается возможность полета БПЛА по субоптимальным маршрутам, которые обеспечивают минимум времени перемещения беспилотника с одной позиции на другую в условиях влияния движения воздушных масс с учетом возможностей силовой установки, имеющейся на борту. Согласно [12], в таких ситуациях БПЛА типа «Летающее крыло» проявляет некоторую параметрическую неопределенность, для устранения которого требуется разработка более совершенных контроллеров, обеспечивающих прохождение желаемого пути с минимальным отклонением. При этом такие специальные задачи как слежение за движущимся объектом требуют применения контроллеров слежения асимптотического типа [13].

При этом для наблюдения малозаметных для планирования оптимальных траектории полета с учетом особенности местности [14].

Существенной компонентой такого планирования, безусловно, является принятие мер, обеспечивающих высокое качество изображений, получаемых входе полета БПЛА.

Не менее важным фактором для успешного функционирования БПЛА разведывательного типа является использование в них принципов адаптивного управления. Согласно [15], адаптивная система управления углом тангажа БПЛА позволяет уменьшить ошибку регулирования, вызванную изменением показателей полета объекта управления. Как отмечается в работе [16], планирование миссии БПЛА в автономном полете должно иметь более высокий приоритет, в то время как планирование переходных режимов и адаптивного управления должны быть отнесены задачам более низкого приоритета. Вместе с тем, применение методов адаптивного управления играет важную роль в достижении режима минимального энергопотребления при полете БПЛА [17].

### **Материалы и методы**

Как отмечается в работе [18], качество изображений, получаемых от электрооптических систем БПЛА в инфракрасном диапазоне определяется по критерию NIIRS. Отметим, что NIIRS является оценочной шкалой степени интерпретируемости получаемых от БПЛА изображений. Принято, что чем выше оценка по шкале NIIRS, тем больше деталей можно разобрать в полученном изображении. NIIRS содержит 10 уровней [18], где нулевой уровень обозначает изображение, в котором невозможно различить, какие-либо детали, девятый уровень

обозначает изображения (видео) в которых отчетливо видно передвижение людей. Как указывается в работе [19], наиболее часто употребляемым математическим аппаратом для вычисления уровней NIIRS является общее уравнение качества изображения (General Image Quality Equation (GIQE)). GIQE является эмпирическим уравнением, определяемым следующим выражением

$$NIIRS = ST + A \log_{10}(GSD) + B \log_{10}(RER) - 0,344 \frac{G}{SNR} - 0,656H \quad (1)$$

В уравнении (1)  $ST$ -обозначает тип измерительной системы, для инфракрасной аппаратуры  $ST = 10,75$ .  $GSD$ -наземная дистанция (шаг) взятия отсчетов, определяемая как

$$GSD = \frac{P_p}{f} \cdot h \quad (2)$$

где  $P_p$ -величина пикселя в матрице фотоприемника;  $f$ -фокусное расстояние;  $h$ -высота полета.

$RER$ -показатель камеры воспроизводить контрастные изображения, определяемый эмпирически, с использованием различных тестовых объектов; коэффициенты  $A$  и  $B$  определяются следующим образом:

$$A = \begin{cases} -3,32; & \text{при } RER \geq 0,9 \\ -3,16; & \text{при } RER < 0,9 \end{cases}$$

$$B = \begin{cases} 1,559; & \text{при } RER \geq 0,9 \\ 2,817; & \text{при } RER < 0,9 \end{cases} \quad (3)$$

$SNR$ -отношение сигнал/шум;  $G$ -параметр, отображающий результат операций по улучшению четкости изображений;  $H$ -изменение интенсивности изображений при проведении операций по улучшению четкости изображений.

Взаимное расположение компонентов уравнения иллюстрируется на рис. 1 [19].



Рис. 1. Взаиморасположение компонентов уравнения (1) в случае проецировании матрицы фотоприемника на земляную поверхность под прямым углом

Целью настоящего исследования является определение основных закономерностей при организации адаптивного режима работы опто-электронной воспроизводящей аппаратуры. Суть предлагаемого адаптивного режима, заключается в оперативном изменении фокусного расстояния  $f$  в зависимости от высоты полета БПЛА с целью достижения максимально возможной величины показателя NIIRS.

Для решения задачи наилучшей реализации адаптивного изменения режима функционирования электроннооптических узлов БПЛА примем следующие условия и нововведения:

1. Считаем, что высота полета не превышает высоту пограничного слоя тропосферы ( $\approx 900$  м), в котором накапливаются все загрязнители

атмосферы. С учетом этого допущения считаем, что отношение сигнал/шум не изменяется в ходе набора высоты.

2. Допускаем, что показатели  $G$  и  $H$  также не изменяются в ходе полета БПЛА.
3. Вводится на рассмотрение экспоненциально-модифицированная шкала качества изображений:

$$M(NIIRS) = \exp[A \log_{10}(GSD) + B \log_{10}(RER)] \quad (4)$$

Неучет членов  $G$  и  $H$  в (4) объясняется их постоянством.

Использование экспоненциальной зависимости в (4) объясняется стремлением четкого различения уровней  $NIIRS$ . С учетом отрицательного значения  $A$  выражение (4)

$$M(NIIRS) = \exp \left[ A \log_{10} \left( \frac{1}{GSD} \right)^{|A|} + B \log_{10}(RER) \right] \quad (5)$$

Переходе в (5) из десятичного логарифма к натуральному запишем

$$M(NIIRS) = \exp \left[ d \ln \left( \frac{1}{GSD} \right)^{|A|} + B d \ln RER \right] \quad (6)$$

где  $d$ -коэффициент учитывающий переход на натуральный логарифм.

Выражение (6) перепишем как

$$M(NIIRS) = \left( \frac{1}{GSD} \right)^{d|A|} \cdot (RER)^{dB} \quad (7)$$

С учетом (2) и (7) получим

$$M(NIIRS) = \left( \frac{f}{Pph} \right)^{d|A|} \cdot (RER)^{dB} \quad (8)$$

4. Допускаем, что в оптоэлектронном оборудовании БПЛА предусмотрена возможность дискретного изменения фокусного расстояния  $f$ .

При этом требуется определить те оптимальные высоты полета  $h_{opt}$ , при которых  $M(NIIRS)$  достиг бы максимума. Следовательно, требуется определить оптимальный вид функции

$$h_{opt} = \varphi(f) \quad (9)$$

При которой  $M(NIIRS)$  достиг бы экстремальной величины.

5. С учетом существующего технологического диапазона

$$\Delta f = (f_{max} \div f_{min}) \quad (10)$$

осуществляется переход на среднеинтегральную оценку  $M(NIIRS)$ :

$$M(NIIRS)_{cp} = \frac{1}{f_{max}} \int_{f_{min}}^{f_{max}} \left( \frac{f}{P_P h(f)} \right)^{d|A|} \cdot (RER)^{dB} df \quad (11)$$

6. Для решения задачи вычисления экстремали функционала (11) наложим на искомую функцию  $h(f)$  следующее ограничительное условие

$$\int_{f_{min}}^{f_{max}} h(f) df = C_1 \quad C_1 = const \quad (12)$$

С учетом (11) и (12) составляется следующий функционал  $F$  безусловной вариационной оптимизации

$$F = \frac{1}{f_{max}} \int_{f_{min}}^{f_{max}} \left( \frac{f}{P_P h(f)} \right)^{d|A|} + \lambda \left[ \int_{f_{min}}^{f_{max}} h(f) df - C_1 \right] \quad (13)$$

где  $\lambda$ -множитель Лагранжа.

Рассмотрим вопрос о решении задачи (13), смысл которого заключается в определении оптимального вида функции, при котором  $F$  достиг бы экстремального значения. Согласно условиям уравнения Эйлера-Лагранжа решение данной задачи должно удовлетворить условию [20].

$$\frac{d\left\{\left(\frac{f}{P_P h(f)}\right)^{d|A|} + \lambda h(f)\right\}}{dh(f)} = 0 \quad (14)$$

Из (14) получаем

$$\left[-\frac{f d|A|}{P_P h^2(f)}\right] \left[\frac{f}{P_P h(f)}\right]^{(d|A|-1)} + \lambda = 0 \quad (15)$$

или

$$-\frac{d|A| f^{d|A|}}{P_P^{d|A|} \cdot h(f)^{d|A|+1}} + \lambda = 0 \quad (16)$$

Из (15) находим

$$h(f) = \frac{d|A|+1}{\sqrt{\frac{d|A| f^{d|A|}}{\lambda P_P^{d|A|}}}} \quad (17)$$

Вычислим значение множителя Лагранжа используя выражения (12) и (17).

Имеем

$$\int_{f_{min}}^{f_{max}} \frac{1}{\lambda^{\frac{1}{d|A|+1}}} d|A|^{\frac{1}{d|A|+1}} \left(\frac{f}{P_P}\right)^{\frac{d|A|}{d|A|+1}} df = C_1 \quad (18)$$

Из (18) находим

$$\frac{C_2}{\lambda^{\frac{1}{d|A|+1}}} \int_{f_{min}}^{f_{max}} f^{\frac{d|A|}{d|A|+1}} df = C_1 \quad (19)$$

где  $C_2 = \frac{d|A|^{\frac{1}{d|A|+1}}}{P_P^{\frac{d|A|}{d|A|+1}}}$ .

Из (19) находим

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{\frac{C_2}{C_1} \int_{f_{min}}^{f_{max}} f^{\frac{d|A|}{d|A|+1}} df}} \quad (20)$$

Обозначим вычисляемую величину  $\lambda$  по выражению (20) в виде  $\lambda_0$ .

Следовательно, имеем

$$h(f) = \frac{d|A|+1}{\sqrt{\frac{d|A|f^{d|A|}}{\lambda_0 P_P^{d|A|}}}} \quad (21)$$

Можно показать, что при решении (21) функционал  $F$  достигает минимума, т.к. вторая производная подинтегрального выражения в (13) по искомой функции имеет положительный знак.

### **Обсуждение и заключение**

Таким образом, проведенный анализ показывает, что корневая зависимость второй степени высоты полета БПЛА от фокусного расстояния оптоэлектронной аппаратуры является наихудшим вариантом адаптивного управления высотой полета, при реализации которого оценка выполнения миссии БПЛА по шкале NIIRS достигает минимальной величины. Такое заключение получается при допущении того, что оптоэлектронная сканирующая аппаратура имеет регулируемое фокусное расстояние, отношение сигнал/шум не изменяется по всему диапазону высоты полета ниже пограничного уровня атмосферы, показатели четкости и интенсивности не изменяются при режимных и корректирующих изменениях функционирования оптоэлектронной аппаратуры. При функционировании БПЛА разведывательного типа целесообразно избегать такого режима адаптивного управления.

### **Список источников**

1. Ананьев А.В., Иванников К.С. Динамическая модель оценки эффективности сценариев ведения воздушной разведки интегрированным пространственно-распределенным разведывательным авиационным комплексом // Труды МАИ. 2022.

№ 122. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=164268>. DOI: [10.34759/trd-2022-122-16](https://doi.org/10.34759/trd-2022-122-16)

2. Трохов Д.А., Туркин И.К. К вопросу проектирования беспилотного летательного аппарата для решения разведывательных задач на море // Труды МАИ. 2014. № 78. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=53735>

3. Каримов А.Х. Особенности проектирования беспилотных авиационных систем нового поколения // Труды МАИ. 2011. № 47. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=26769>

4. Андриевский Б.Р., Попов А.М., Михайлов В.А., Попов Ф.А. Применение методов искусственного интеллекта для управления полетом беспилотных летательных аппаратов // Аэрокосмическая техника и технологии. 2023. Т. 1. № 2. С. 72-107.

5. Zuo Z., Liu C., Han Q., Song J. Unmanned aerial vehicles: control methods and future challenges // IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2022, vol. 9, no 4, pp. 1-14. DOI: [10.1109/JAS.2022.105410](https://doi.org/10.1109/JAS.2022.105410)

6. Agbeyangi A.O., Odiete J.O., Olorunlomeye A.B. Review on UAVs used for aerial surveillance // Journal of multidisciplinary engineering science and technology, 2016, vol. 3, issue 10.

7. Teli S.N., Jagtap M., Nadekar R., Gudade P., More R., Bhagat P. Unmanned aerial vehicle for surveillance // International Journal of Scientific & Technology Research, 2014, vol. 3, issue 5.

8. El-Sherbeny N.A. Vehicle routing with time windows: an overview of exact, heuristic and metaheuristic methods // Journal of King Saud University - Science, 2010, vol. 22 (3), pp. 123-131. DOI: [10.1016/j.jksus.2010.03.002](https://doi.org/10.1016/j.jksus.2010.03.002)

9. Schneider M. The vehicle-routing problem with time windows and driver-specific times // European Journal of Operational Research, 2016, vol. 250, pp. 101-119. DOI: [10.1016/j.ejor.2015.09.015](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.09.015)
10. Hu C., Lu J., Liu X., Zhang G. Robust vehicle routing problem with hard time windows under demand and travel time uncertainty // Computers & Operations Research, 2018, vol. 94, pp. 139-153. DOI: [10.1016/j.cor.2018.02.006](https://doi.org/10.1016/j.cor.2018.02.006)
11. Тимошенко А.В., Балдычев М.Т., Маренков И.А., Пивкин И.Г. Способ построения «субоптимальных маршрутов мониторинга разнотипных источников беспилотным летательным аппаратом // Труды МАИ. 2020. № 111. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=115145>. DOI: [10.34759/trd-2020-111-10](https://doi.org/10.34759/trd-2020-111-10)
12. Nasab H.M., Navazani N. Adaptive control for trajectory tracking of an unmanned aerial vehicle // Advanced Engineering Forum, 2016, vol. 17, pp. 101-110. DOI: [10.4028/www.scientific.net/AEF.17.101](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AEF.17.101)
13. Xue W., Zhu X., Yang X., Ye H., Chen X. A moving target tracking control of quadrotor UAV based on passive control and super-twisting sliding mode control // Mathematical problems in engineering, 2021. URL: <https://doi.org/10.1155/2021/6627495>
14. Zhang J., Huang H. Occlusion-aware UAV path planning for reconnaissance and surveillance // Drones, 2021, vol. 5, pp. 98. DOI: [10.3390/drones5030098](https://doi.org/10.3390/drones5030098)
15. Архипов А.В., Тимошенко С.П. Применение адаптивных регуляторов в системах управления беспилотными летательными аппаратами // Известия вузов. Электроника. 2022. Т. 27. № 5. С. 652-663. DOI: [10.24151/1561-5405-2022-27-5-652-663](https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-5-652-663)

16. Vachtsevanos G., Tang L., Drozeski G., Gutierrez L. From mission planning to flight control of unmanned aerial vehicles: strategies and implementation tools // Annual reviews in control, 2005, vol. 29, issue 1, pp. 101-115. DOI: [10.1016/j.arcontrol.2004.11.002](https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2004.11.002)
17. Korneyev A., Gorobetz M., Alps I., Ribickis L. Adaptive traction drive control algorithm for electrical energy consumption minimization of autonomous unmanned aerial vehicle // Electrical, Control and Communication Engineering. 2019, vol. 15, no. 2, pp. 62-70. DOI: [10.2478/ecce-2019-0009](https://doi.org/10.2478/ecce-2019-0009)
18. Bai J., Su Y., Chen L., Feng Y., Liu J. EO Sensor planning for UAV engineering reconnaissance based on NIIRS and GIQE // Mathematical Problems in Engineering, 2018, vol. 4, pp. 1-9. DOI: [10.1155/2018/6837014](https://doi.org/10.1155/2018/6837014)
19. Stecz W., Gromada K. Determining UAV flight trajectory for target recognition using EO/IR and SAR // Sensors, 2020, vol. 20 (19), pp. 5712. DOI: [10.3390/s20195712](https://doi.org/10.3390/s20195712)
20. Эльсгольц Л.Э. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление. - М.: Наука, 1974. – 432 с.

## References

1. Anan'ev A.V., Ivannikov K.S. *Trudy MAI*, 2022, no. 122. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=164268>. DOI: [10.34759/trd-2022-122-16](https://doi.org/10.34759/trd-2022-122-16)
2. Trokhov D.A., Turkin I.K. *Trudy MAI*, 2014, no. 78. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=53735>
3. Karimov A.Kh. *Trudy MAI*, 2011, no. 47. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=26769>

4. Andrievskii B.R., Popov A.M., Mikhailov V.A., Popov F.A. *Aerokosmicheskaya tekhnika i tekhnologii*, 2023, vol. 1, no. 2, pp. 72-107.
5. Zuo Z., Liu C., Han Q., Song J. Unmanned aerial vehicles: control methods and future challenges, *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2022, vol. 9, no 4, pp. 1-14. DOI: [10.1109/JAS.2022.105410](https://doi.org/10.1109/JAS.2022.105410)
6. Agbeyangi A.O., Odieta J.O., Olorunlomeye A.B. Review on UAVs used for aerial surveillance, *Journal of multidisciplinary engineering science and technology*, 2016, vol. 3, issue 10.
7. Teli S.N., Jagtap M., Nadekar R., Gudade P., More R., Bhagat P. Unmanned aerial vehicle for surveillance, *International Journal of Scientific & Technology Research*, 2014, vol. 3, issue 5.
8. El-Sherbeny N.A. Vehicle routing with time windows: an overview of exact, heuristic and metaheuristic methods, *Journal of King Saud University - Science*, 2010, vol. 22 (3), pp. 123-131. DOI: [10.1016/j.jksus.2010.03.002](https://doi.org/10.1016/j.jksus.2010.03.002)
9. Schneider M. The vehicle-routing problem with time windows and driver-specific times, *European Journal of Operational Research*, 2016, vol. 250, pp. 101-119. DOI: [10.1016/j.ejor.2015.09.015](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.09.015)
10. Hu C., Lu J., Liu X., Zhang G. Robust vehicle routing problem with hard time windows under demand and travel time uncertainty, *Computers & Operations Research*, 2018, vol. 94, pp. 139-153. DOI: [10.1016/j.cor.2018.02.006](https://doi.org/10.1016/j.cor.2018.02.006)
11. Timoshenko A.V., Baldychev M.T., Marenkov I.A., Pivkin I.G. *Trudy MAI*, 2020, no. 111. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=115145>. DOI: [10.34759/trd-2020-111-10](https://doi.org/10.34759/trd-2020-111-10)

12. Nasab H.M., Navazani N. Adaptive control for trajectory tracking of an unmanned aerial vehicle, *Advanced Engineering Forum*, 2016, vol. 17, pp. 101-110. DOI: [10.4028/www.scientific.net/AEF.17.101](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AEF.17.101)
13. Xue W., Zhu X., Yang X., Ye H., Chen X. A moving target tracking control of quadrotor UAV based on passive control and super-twisting sliding mode control, *Mathematical problems in engineering*, 2021. URL: <https://doi.org/10.1155/2021/6627495>
14. Zhang J., Huang H. Occlusion-aware UAV path planning for reconnaissance and surveillance, *Drones*, 2021, vol. 5, pp. 98. DOI: [10.3390/drones5030098](https://doi.org/10.3390/drones5030098)
15. Arkhipov A.V., Timoshenkov S.P. *Izvestiya vuzov. Elektronika*, 2022, vol. 27, no. 5, pp. 652-663. DOI: [10.24151/1561-5405-2022-27-5-652-663](https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-5-652-663)
16. Vachtsevanos G., Tang L., Drozeski G., Gutierrez L. From mission planning to flight control of unmanned aerial vehicles: strategies and implementation tools, *Annual reviews in control*, 2005, vol. 29, issue 1, pp. 101-115. DOI: [10.1016/j.arcontrol.2004.11.002](https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2004.11.002)
17. Korneyev A., Gorobetz M., Alps I., Ribickis L. Adaptive traction drive control algorithm for electrical energy consumption minimization of autonomous unmanned aerial vehicle, *Electrical, Control and Communication Engineering*, 2019, vol. 15, no. 2, pp. 62-70. DOI: [10.2478/ecce-2019-0009](https://doi.org/10.2478/ecce-2019-0009)
18. Bai J., Su Y., Chen L., Feng Y., Liu J. EO Sensor planning for UAV engineering reconnaissance based on NIIRS and GIQE, *Mathematical Problems in Engineering*, 2018, vol. 4, pp. 1-9. DOI: [10.1155/2018/6837014](https://doi.org/10.1155/2018/6837014)
19. Stecz W., Gromada K. Determining UAV flight trajectory for target recognition using EO/IR and SAR, *Sensors*, 2020, vol. 20 (19), pp. 5712. DOI: [10.3390/s20195712](https://doi.org/10.3390/s20195712)

20. El'sgol'ts L.E. *Differentsial'nye uravneniya i variatsionnoe ischislenie* (Differential equations and calculus of variations), Moscow, Nauka, 1974, 432 p.

Статья поступила в редакцию 18.12.2023

Одобрена после рецензирования 25.12.2023

Принята к публикации 27.02.2024

The article was submitted on 18.12.2023; approved after reviewing on 25.12.2023; accepted for publication on 27.02.2024