

Научная статья

DOI 10.15593/2224-9397/2023.1.09

УДК 629.7.05

Гусейнов Гасан Ахмед оглы¹, Зульфугарлы Пери Расим гызы¹,
Абдурахманова Ирада Гамид гызы²

¹Азербайджанский технический университет, Баку, Азербайджан

²Национальное аэрокосмическое агентство, Баку, Азербайджан

ЭМПИРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПОДЪЕМА БПЛА В РЕЖИМЕ ГРУППОВОГО ПОЛЕТА

Энергоэффективное планирование всякой миссии, выполняемой беспилотными летательными аппаратами, является важнейшей задачей. При этом для достижения высокой энергоэффективности беспилотных летательных аппаратов необходимо определить и минимизировать энергопотребление тех функциональных операций беспилотных летательных аппаратов, которые в наибольшей степени потребляют энергию. При отсутствии точной информации о требуемой энергии для выполнения поставленной миссии нельзя предсказать необходимую длительность полета и эффективность такого полета будет низкой. К настоящему времени предложены некоторые модели энергопотребления беспилотных летательных аппаратов при выполнении ими различных полетных маневров. Однако задача оптимизации вертикальных групповых полетов дронов до сих пор не рассматривалась. **Целью** исследования является анализ возможности оптимизации групповых полетов дронов в режиме вертикального полета. Проанализирована возможность оптимизации группового вертикального полета беспилотного летательного аппарата. **Методы:** рассмотрена группа беспилотных летательных аппаратов в режиме вертикального полета, где средние мощности аппаратов составляют линейно упорядоченную последовательность. Исследуется оптимальный вид вновь вводимой функциональной зависимости высоты полета от средней мощности беспилотного летательного аппарата, при наличии ограничения на сумму достигаемых высот членами группы. **Результаты:** решена оптимизационная задача вычисления оптимального вида указанной функциональной зависимости, при которой среднесуммарная величина времен полета всех беспилотных летательных аппаратов в группе достигает экстремума. Получено условие, при котором искомая среднесуммарная величина времени полета достигает максимума, что может быть истолковано как наихудший режим проведения групповых вертикальных полетов. **Практическая значимость:** практическое значение полученного результата заключается в возможности избежания наихудшего режима суммарного энергопотребления группой дронов, совершающих вертикальный полет путем более рационального распределения мощностей дронов по необходимым высотам подъема.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, групповые полеты, оптимизация, высота полета, мощность.

Huseynov Hasan Ahmed oglu¹, Zulfugarly Peri Rasim gyzy¹,
Abdurrakhmanova Irada Hamid gyzy²

¹Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan

²National Aerospace Agency, Baku, Azerbaijan

EMPIRICAL ANALYSIS OF THE UAV VERTICAL LIFT PERFORMANCE IN GROUP FLIGHT MODE

Energy-efficient planning of any mission performed by a UAV is the most important task. At the same time, in order to achieve high energy efficiency of the UAV, it is necessary to identify and minimize the energy consumption of those functional operations of the UAV that consume the most energy. In the absence of accurate information about the required energy to complete the mission, it is impossible to suggest the necessary duration of the flight and the efficiency of such a flight will be low. To date, some models of UAV energy consumption have been proposed when performing various flight maneuvers. However, the task of optimizing vertical group flights of drones has not yet been considered. **Goal.** The purpose of the study is to analyze the possibility of optimizing group drone flights in vertical flight mode. The possibility of optimizing the group vertical flight of the UAV is analyzed. **Methods:** A group of UAVs in vertical flight mode is considered, where the average power of drones is a linearly ordered sequence. The optimal type of the newly introduced functional dependence of the flight altitude on the average power of the UAV is investigated, if there is a limit on the amount of heights reached by the group members. **Results:** The optimization problem of calculating the optimal type of the specified functional dependence is solved, in which the average sum value of the flight times of all UAVs in the group reaches an extremum. A condition is obtained under which the desired average value of the flight time reaches a maximum, which can be interpreted as the worst mode of conducting group vertical flights. Practical significance. **The practical significance** of the result obtained lies in the possibility of avoiding the worst mode of total energy consumption by a group of drones performing vertical flight by more rational distribution of drone power at the required heights of the rise.

Keywords: unmanned aerial vehicle (UAV), group flights, optimization, altitude, power.

Введение

Как отмечается в работах [1–7], эффективность использования энергии на борту БПЛА является важнейшим качеством для достижения поставленных перед беспилотником целей, для увеличения времени функционирования и других функциональных показателей. Согласно [8], при отсутствии точной информации о требуемой энергии для выполнения поставленной миссии нельзя предсказать необходимую длительность полета, и эффективность такого полета будет низкой. Как указывается в работах [9–14], время полета БПЛА зависит в первую очередь от энергопотребления системы тяги и ограничивается энергозапасом на борту. Согласно [15], в настоящее время исследования, посвященные достижению максимального времени полета БПЛА, в основном посвящены разработке оптимизационных алгоритмов, ана-

лизу факторов, влияющих на максимальное время функционирования и энергопотребление БПЛА, таких как погодные условия, скорость полета, вес нагрузки [16–18]. Вместе с тем, как отмечается в [19], энергоэффективное планирование всякой миссии, выполняемой БПЛА, является важнейшей задачей. При этом для достижения высокой энергоэффективности БПЛА необходимо определить и минимизировать энергопотребление тех функциональных операций БПЛА, которые в наибольшей степени потребляют энергию. По этой причине разрабатываются модели энергопотребления БПЛА при выполнении различных операций [20]. В частности, в работе [19] приведены некоторые модели энергопотребления БПЛА, определяющие необходимость в энергии при выполнении различных операций при осуществлении полетов беспилотными средствами. Эмпирические модели энергопотребления БПЛА были разработаны в работе [21]. Так, в работе [21] были предложены некоторые модели энергопотребления БПЛА при выполнении ими различных полетных маневров. Для создания таких эмпирических моделей могут быть использованы различные методики. Так, например, в работе [22] была использована методика «белого ящика» для анализа энергопотребления с учетом динамики передвижения транспортного средства, а в работе [8] для этой цели был применен статистический подход, используя регрессионную модель. Как отмечается в работе [19], для этих целей наиболее удобной оказывается метод «черного ящика», который более информативен для анализа различных состояний полета БПЛА. Например, в работе [19] приведена модель для вычисления энергии при полете БПЛА на разных высотах. Что касается общей энергии E , потребляемой при вертикальных полетах, то этот показатель в общем вычисляется как

$$E = \int_0^T P_t dt, \quad (1)$$

где t – время полета; P_t – мгновенная мощность.

При этом между энергией и высотой подъема БПЛА H существует следующая эмпирическая зависимость [19]:

$$E = -16.9396H^2 + 216.6944H - 157.9473, \quad (2)$$

где E – измеряется в джоулях, H – в метрах.

График выражения (2) приведен на рис. 1.

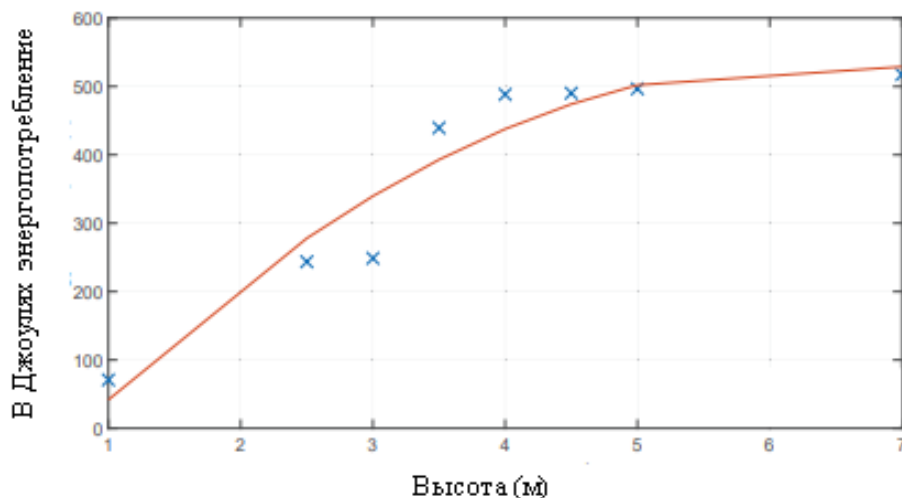


Рис. 1. График выражения (2), показывающий зависимость потребляемой энергии в джоулях от высоты подъема в метрах

Режим группового полета некоторого количества беспилотников

Отметим, что режим группового полета БПЛА в последние годы широко обсуждается в соответствующих публикациях (см. например [23–25]). Однако проведенный анализ имеющихся публикаций по соответствующей теме показал отсутствие результатов по исследованию быстродействия вертикального полета БПЛА в группе.

Целью настоящей работы являются анализ и оптимизация времени вертикального полета БПЛА, необходимого для достижения заданной высоты беспилотниками в режиме группового полета.

Материалы и методы

В общем случае энергию, потребляемую БПЛА при вертикальном полете, определим как

$$E = T_0 \cdot P_{\text{ср}}, \quad (3)$$

где T_0 – время вертикального полета на заданную высоту H_0 ; $P_{\text{ср}}$ – средняя величина мощности за время совершения этого полета.

В целом, показатель T_0 характеризует быстродействие выполнения рассматриваемой операции вертикального полета и согласно (3) определится как

$$T_0 = \frac{E}{P_{\text{ср}}}. \quad (4)$$

С учетом (2) и (4) получим:

$$T_0 = \frac{-16,9396H^2 + 216,6944H - 157,9473}{P_{cp}}. \quad (5)$$

Для удобства дальнейшей записи примем следующие обозначения:

$$a_1 = 16,9396; \quad a_2 = 216,6944; \quad a_3 = 157,9483. \quad (6)$$

С учетом (6) выражение (5) перепишем как

$$T_0 = \frac{-a_1H^2 + a_2H - a_3}{P_{cp}}. \quad (7)$$

Рассмотрим режим группового полета некоторого количества беспилотников.

Для решения поставленной задачи введем на рассмотрение функциональную зависимость:

$$H = H(P_{cp}). \quad (8)$$

При этом считаем, что мощности P_{cp} беспилотников в группе составляют некоторое упорядоченное множество P_{cp} , определяемое как

$$P_{cp} = \{P_{cp.i}\}; \quad i = \overline{1, n}, \quad (9)$$

где n – количество беспилотников в группе.

При этом упорядоченность элементов множества (9) характеризуется следующим свойством:

$$P_{cp.i} = P_{cp.i-1} + \Delta P_{cp}; \quad i = \overline{1, n}; \quad \Delta P_{cp} = \text{const}. \quad (10)$$

С учетом (8) для группы БПЛА введем следующее ограничительное условие:

$$\sum_{i=1}^n H(P_{cp.i}) = C_0. \quad (11)$$

Физически условие (11) является ограничением на суммарную высоту подъема элементов группы.

С учетом (8) выражение (7) перепишем как

$$T_0 = \frac{-a_1H(P_{cp})^2 + a_2H(P_{cp}) - a_3}{P_{cp}}. \quad (12)$$

Среднесуммарную величину T_0 по всем i определим как

$$T_{0cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[\frac{-a_1H(P_{cp.i})^2 + a_2H(P_{cp.i}) - a_3}{P_{cp.i}} \right]. \quad (13)$$

На базе вышеизложенной дискретной модели (11), (13) составим непрерывную модель.

Модели (11) и (13) в непрерывном представлении имеют следующий вид:

$$\int_0^{P_{\text{cp.max}}} H(P_{\text{cp}}) dP_{\text{cp}} = C_{0.H}, \quad (14)$$

$$T_{0.\text{cp.H}} = \frac{1}{P_{\text{cp.max}}} \int_0^{P_{\text{cp.max}}} \left[\frac{-a_1 H(P_{\text{cp}})^2 + a_2 H(P_{\text{cp}}) - a_3}{P_{\text{cp}}} \right] dP_{\text{cp}}. \quad (15)$$

На базе непрерывных моделей (14), (15) следует вычислить оптимальную функцию $H(P_{\text{cp}})_{\text{opt}}$ при которой $T_{0.\text{cp.H}}$ достиг бы экстремальной величины. С учетом моделей (14) и (15) составим задачу безусловной вариационной оптимизации, целевой функционал F которого будет иметь следующий вид:

$$F = \frac{1}{P_{\text{cp.max}}} \cdot \int_0^{P_{\text{cp.max}}} \left[\frac{-a_1 H(P_{\text{cp}})^2 + a_2 H(P_{\text{cp}}) - a_3}{P_{\text{cp}}} \right] dP_{\text{cp}} + \lambda \left[\int_0^{P_{\text{cp.max}}} H(P_{\text{cp}}) dP_{\text{cp}} - C_{0.H} \right] \quad (16)$$

где λ – множитель Лагранжа.

Решение вышеизложенной оптимизационной задачи согласно [20] должно удовлетворить условию:

$$\frac{d \left\{ \left[\frac{-a_1 H(P_{\text{cp}})^2 + a_2 H(P_{\text{cp}}) - a_3}{P_{\text{cp}}} \right] + \lambda H(P_{\text{cp}}) \right\}}{dH(P_{\text{cp}})} = 0. \quad (17)$$

Из (17) получаем:

$$\frac{-2a_1 + a_2}{P_{\text{cp}}} + \lambda = 0. \quad (18)$$

Из (18) находим:

$$H(P_{\text{cp}}) = \frac{P_{\text{cp}} \lambda + a_2}{2a_1}. \quad (19)$$

С учетом (14) и (19) вычислим λ . Имеем:

$$\int_0^{P_{\text{cp.max}}} \left(\frac{P_{\text{cp}} \lambda + a_2}{2a_1} \right) dP_{\text{cp}} = C_{0.H}. \quad (20)$$

Из (20) находим:

$$\frac{\lambda}{2a_1} \cdot \frac{P_{\text{cp.max}}^2}{2} + \frac{a_2}{2a_1} P_{\text{cp.max}} = C_{0.H}. \quad (21)$$

Из (21) получим:

$$\lambda = \frac{C_{0.H} - \frac{a_2}{2a_1} P_{\text{cp.max}}}{\frac{P_{\text{cp.max}}^2}{4a_1}} = \frac{4a_1 C_{0.H}}{P_{\text{cp.max}}^2} - \frac{2a_2}{P_{\text{cp.max}}}. \quad (22)$$

С учетом (19) и (22) находим оптимальный вид функции $H(P_{cp})$:

$$H(P_{cp})_{opt} = \frac{P_{cp} \left[\frac{4a_1 C_{0,H}}{P_{cp,max}^2} - \frac{2a_2}{P_{cp,max}} \right] + a_2}{2a_1}. \quad (23)$$

Можно показать, что при решении (23) функционал F достигает максимума. Для этого следует взять производную (18) по $H(P_{cp})$ и убедиться, что результат всегда является отрицательной величиной, что и есть признак того, что F при условии (23) достигает максимума.

Таким образом, полученное решение (23) обеспечивает максимальную величину $T_{0,cp,H}$, определяемую как

$$T_{0,cp,H,max} = \frac{1}{P_{cp,max}} \int_0^{P_{cp,max}} \left[\frac{-a_1 H(P_{cp})_{opt}^2 + a_2 H(P_{cp})_{opt} + a_3}{P_{cp}} \right] dP_{cp}. \quad (24)$$

Заключение

Рассмотрена задача оптимизации группового вертикального полета БПЛА. В качестве базового положения использованы результаты исследований по установлению эмпирической зависимости энергопотребления БПЛА от высоты вертикального полета. Рассмотрена группа БПЛА, осуществляющих вертикальный полет, средние мощности которых составляют линейно упорядоченную последовательность. Вводится на рассмотрение функциональная зависимость высоты полета от средней мощности БПЛА, при этом на сумму достигаемых высот члены группы налагается ограничительное условие. Составлена и решена оптимизационная задача вычисления оптимального вида введенной функциональной зависимости, при которой среднесуммарная величина времен полета всех БПЛА в группе достигает экстремума. Исследование оптимизационной задачи позволило получить решение в виде условия, при котором искомая среднесуммарная величина времени полета достигает максимума, что может быть истолковано как наилучший режим проведения групповых вертикальных полетов, которых следовало бы избегать.

Библиографический список

1. Energy efficiency optimization in UAVs: a review / E.I. Amoiralis, M.A. Tsili, V. Spathopoulos, A. Hatziefremidis // Materials Science Forum. – 2014. – Vol. 792. – P. 281–286.

2. Energy efficient 3D positioning of micro unmanned aerial vehicles for underlay cognitive radio systems / H. Ghazzai, M. Ben Ghorbel, A. Kadri, Md.J. Hossain // IEEE International Conference on Communications (ICC 2017). – Paris, France, May 2017.

3. Dries Hulens J.V., Goedeme T. How to choose the best embedded processing platform for onboard UAV image processing // International Joint Conference Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications (VISIGRAPP). – Berlin, Germany, Mar. 2015.

4. Wannberg M. Designing unmanned aircraft systems: a comprehensive approach. – Second Edition. – Stockholm, Sweden: KTH, School of Engineering Sciences (SCI), Aeronautical and Vehicle Engineering, Aerodynamics, 2012.

5. Gundlach J. The quadrotor platform from a military point of view / American Institute of Aeronautics and Astronautics. – 2014.

6. UAV-enabled intelligent transportation systems for the smart city: Applications and challenges / H. Menouar, I. Guvenc, K. Akkaya, A.S. Uluagac, A. Kadri, A. Tuncer // IEEE Communications Magazine. – Mar. 2017. – Vol. 55, № 3. – P. 22–28,

7. Jain R., Templin F. Requirements, challenges and analysis of alternatives for wireless datalinks for unmanned aircraft systems // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – Jun. 2012. – Vol. 30, № 5. – P. 852–860.

8. Mission-based energy consumption prediction of multirotor UAV / A.S. Prasetia, R.J. Wai, Y.L. Wen, Y.K. Wang // Digital Object Identifier. – March 2019. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2903644

9. Hwang M.H., Cha H.R., Jung S.Y. Practical endurance estimation for minimizing energy consumption of multirotor unmanned aerial vehicles // Energies. – 2018. – 11. – 2221. DOI: 10.3390/en11092221

10. Gatti M., Giulietti F., Turci M. Maximum endurance for battery-powered rotary-wing aircraft // Aerosp. Sci. Technol. – 2015. – 45. – P. 174–179. DOI: 10.1016/j.ast.2015.05.009

11. Abdilla A., Richards A., Burrow S. Power and endurance modeling of battery-powered rotorcraft // Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). – Hamburg, Germany, 28 September – 2 October 2015. – P. 675–680.

12. Cheng F., Hua W., Pin C. Rotorcraft flight endurance estimation based on a new battery discharge model // *Chin. J. Aeronaut.* – 2017. – 30. – P. 1561–1569.

13. Hassanalian M., Radmanesh M., Sedaghat A. Increasing flight endurance of MAVS using multiple quantum well solar cells // *Int. J. Aeronaut. Space Sci.* – 2014. – 15. – P. 212–217. DOI: 10.5139/ijass.2014.15.2.212

14. Su Y., Liahng H., Wu J. Multilevel Peukert equations based residual capacity estimation method for lead-acid batteries // *Proceedings of the IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies.* – Singapore, 24–27 November 2008. – P. 101–105.

15. Rapid evaluation model of endurance performance and its application for agricultural UAVs / J. Li, B. Long, H. Wu, X. Hu, X. Wei, Z. Zhang, L. Chai, J. Xie // *Drones.* – 2022. – 6. – 86. – URL: <https://doi.org/10.3390/drones6080186>

16. Energy consumption in unmanned aerial vehicles: a review of energy consumption models and their relation to the UAV routing / A. Thibbituwawa, P. Nielsen, B. Zbigniew, G. Bocewicz // *Information Systems Architecture and Technology: Proceedings of 39th International Conference on Information Systems Architecture and Technology-ISAT 2018.* – 2019. – P. 173–184.

17. Lui Z., Sengupta R., Kurzhnskiy A. A power consumption model for multi-rotor small unmanned aircraft systems // *Proceedings of the 2017 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS).* – China. 27–29 October 2017. – P. 310–315.

18. Traub L.W. Validation of endurance estimates for battery powered UAVs // *Aeronaut. J.* – 2013. – 117. – P. 1155–1166.

19. Empirical power consumption model for UAVs / H.V. Abeywickrama, B.A. Jayawickrama, Y. He, E. Dutkiewicz // *2018 IEEE 88th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall), 27-30 August 2018, Chicago, IL, USA.*

20. Flight tour planning with recharging optimization for battery operated autonomous drones / C.M. Tseng, C.K. Chau, K. Elbassioni, M. Khonji. – 2017. – URL: <https://arxiv.org/abs/1703.10049>

21. Energy efficient path planning techniques fo UAV-based systems with space discretization / S. Ahmedl, A. Mohamed, K. Harras, M. Kholief, S. Mesbah // *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC).* – 2016.

22. Kim E., Lee J., Shin K.G. Real-time prediction of battery power requirements for electric vehicles // IEEE/ACM International Conference on Cyber-Physical Systems. – Philadelphia, USA, 2013.

23. Zhou Y., Rao B., Wang W. UAV swarm intelligence: recent advances and future trends // Digital Object Identifier. – 2020. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3028865

24. Swarms of unmanned aerial vehicles- a survey / A. Tahir, J. Boling, M.H. Haghbayan, H.T. Toivonen, J. Plosila // Journal of Industrial Information Integration. – 2019. – 16. – 100106.

25. Giles K. A framework for integrating the development of swarm unmanned aerial system doctrine and design // Public Release. STO-MP-SET-222. – URL: <https://www.sto.nato.int/publications/STO%20Meeting%20Proceedings/STO-MP-SET-222/MP-SET-222-14.pdf>

References

1. Amoiralis E.I., Tsili M.A., Spathopoulos V., Hatziefremidis A. Energy efficiency optimization in UAVs: a review. *Materials Science Forum*, 2014, vol. 792, pp. 281-286.

2. Ghazzai H., Ben Ghorbel M., Kadri A., Hossain Md.J. Energy efficient 3D positioning of micro unmanned aerial vehicles for underlay cognitive radio systems. *IEEE International Conference on Communications (ICC 2017), Paris, France, May 2017*.

3. Dries Hulens J.V., Goedeme T. How to choose the best embedded processing platform for onboard UAV image processing. *International Joint Conference Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications (VISIGRAPP)*. Berlin, Germany, Mar. 2015.

4. Wannberg M. Designing unmanned aircraft systems: a comprehensive approach. Second Edition. Stockholm, Sweden: KTH, School of Engineering Sciences (SCI), Aeronautical and Vehicle Engineering, Aerodynamics, 2012.

5. Gundlach J. The Quadrotor Platform from a Military Point of View. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2014.

6. Menouar H., Guvenc I., Akkaya K., Uluagac A.S., Kadri A., Tuncer A. UAV-enabled intelligent transportation systems for the smart city: Applications and challenges. *IEEE Communications Magazine*, Mar. 2017, vol. 55, no. 3, pp. 22-28.

7. Jain R., Templin F. Requirements, challenges and analysis of alternatives for wireless datalinks for unmanned aircraft systems. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Jun. 2012, vol. 30, no. 5, pp. 852-860.

8. Prasetia A.S., Wai R.J., Wen Y.L., Wang Y.K. Mission-based energy consumption prediction of multirotor UAV. *Digital Object Identifier*, March 2019. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2903644
9. Hwang M.H., Cha H.R., Jung S.Y. Practical endurance estimation for minimizing energy consumption of multirotor unmanned aerial vehicles. *Energies*, 2018, 11, 2221. DOI: 10.3390/en11092221
10. Gatti M., Giulietti F., Turci M. Maximum endurance for battery-powered rotary-wing aircraft. *Aerosp. Sci. Technol.*, 2015, 45, pp. 174-179. DOI: 10.1016/j.ast.2015.05.009
11. Abdilla A., Richards A., Burrow S. Power and endurance modelling of battery-powered rotorcraft. *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. Hamburg, Germany, 28 September - 2 October 2015, pp. 675-680.
12. Cheng F., Hua W., Pin C. Rotorcraft flight endurance estimation based on a new battery discharge model. *Chin. J. Aeronaut.*, 2017, 30, pp. 1561-1569.
13. Hassanalian M., Radmanesh M., Sedaghat A. Increasing flight endurance of MAVS using multiple quantum well solar cells. *Int. J. Aeronaut. Space Sci.*, 2014, 15, pp. 212-217. DOI: 10.5139/ijass.2014.15.2.212
14. Su Y., Liahng H., Wu J. Multilevel Peukert equations based residual capacity estimation method for lead-acid batteries. *Proceedings of the IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies, Singapore, 24-27 November 2008*, pp. 101-105.
15. Li J., Long B., Wu H., Hu X., Wei X., Zhang Z., Chai L., Xie J. Rapid evaluation model of endurance performance and its application for agricultural UAVs. *Drones*, 2022, 6, 86, available at: <https://doi.org/10.3390/drones6080186>
16. Thibbituwawa A., Nielsen P., Zbigniew B., Bocewicz G. Energy consumption in unmanned aerial vehicles: a review of energy consumption models and their relation to the UAV routing. *Information systems architecture and technology: Proceedings of 39th international conference on information systems architecture and technology-ISAT 2018*, 2019, pp. 173-184.
17. Lui Z., Sengupta R., Kurzhnskiy A. A power consumption model for multi-rotor small unmanned aircraft systems. *Proceedings of the 2017 international conference on unmanned aircraft systems (ICUAS)*. China. 27-29 October 2017, pp. 310-315.

18. Traub L.W. Validation of endurance estimates for battery powered UAVs. *Aeronaut. J.*, 2013, 117, pp. 1155-1166.

19. Abeywickrama H.V., Jayawickrama B.A., He Y., Dutkiewicz E. Empirical power consumption model for UAVs. *2018 IEEE 88th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall), 27-30 August 2018, Chicago, IL, USA.*

20. Tseng C.M., Chau C.K., Elbassioni K., Khonji M. Flight tour planning with recharging optimization for battery operated autonomous drones, 2017, available at: <https://arxiv.org/abs/1703.10049>

21. Ahmed S., Mohamed A., Harras K., Kholief M., Mesbah S. Energy efficient path planning techniques for UAV-based systems with space discretization. *IEEE wireless communications and networking conference (WCNC)*, 2016.

22. Kim E., Lee J., Shin K.G. Real-time prediction of battery power requirements for electric vehicles. *IEEE/ACM international conference on cyber-Physical systems*. Philadelphia, USA 2013.

23. Zhou Y., Rao B., Wang W. UAV swarm intelligence: recent advances and future trends. *Digital Object Identifier*, 2020. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3028865

24. Tahir A., Boling J., Haghbayan M.H., Toivonen H.T., Plosila J. Swarms of unmanned aerial vehicles- a survey. *Journal of industrial information integration*, 2019, 16, 100106.

25. Giles K. A framework for integrating the development of swarm unmanned aerial system doctrine and design. *Public release. STO-MP-SET-222*, available at: <https://www.sto.nato.int/publications/STO%20Meeting%20Proceedings/STO-MP-SET-222/MP-SET-222-14.pdf>

Сведения об авторах

Гусейнов Гасан Ахмед оглы (Баку, Азербайджанская Республика) – доктор технических наук, профессор, профессор-консультант кафедры «Технология машиностроения» Азербайджанского технического университета (AZ1073, Азербайджан, Баку, пр. Гусейн Джавида, 25, e-mail: tk.xt2001@mail.kg).

Зульфугарлы Пери Расим гызы (Баку, Азербайджанская Республика) – ассистент кафедры «Радиотехника» Азербайджанского технического университета (AZ1073, Азербайджан, Баку, пр. Гусейн Джавида, 25, e-mail: peri.rzayeva30@gmail.com).

Абдурахманова Ирада Гамид гызы (Баку, Азербайджанская Республика) – кандидат технических наук, начальник отдела Научного исследовательского института аэрокосмической информатики (AZ1145, Баку, ул. С.С. Ахундова, 1, e-mail: abdurraxmanovairada@mail.ru).

About the authors

Gasan Ahmed oglu Huseynov (Baku, Republic of Azerbaijan) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor-Consultant of the Department of Mechanical Engineering Technology of the Azerbaijan Technical University (AZ1073, Azerbaijan, Baku, 25, Huseyn Javid ave., e-mail: tk.xt2001@mail.kg).

Peri Rasim gyzy Zulfugarli (Baku, Republic of Azerbaijan) – Assistant of the Department of Radio Engineering of the Azerbaijan Technical University (AZ1073, Azerbaijan, Baku, 25, Hussein Javid ave., e-mail: peri.rzayeva30@gmail.com).

Irada Hamid gyzy Abdurrahmanova (Baku, Republic of Azerbaijan) – Ph. D. in Technical Sciences, Head of Department of the Scientific Research Institute of Aerospace Informatics (AZ1145, Baku, 1, S.S. Akhundov str., e-mail: abdurraxmanovairada@mail.ru).

Поступила: 17.02.2023. Одобрена: 15.03.2023. Принята к публикации: 01.04.2023.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов по отношению к статье.

Вклад авторов. Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Гусейнов, Гасан Ахмед оглы. Компьютерное моделирование процесса кормления собак в закрытых вольерах в условиях пандемии / Гусейнов Гасан Ахмед оглы, Зульфугарлы Пери Расим гызы, Абдурахманова Ирада Гамид гызы // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2023. – № 45. – С. 184–196. DOI: 10.15593/2224-9397/2023.1.09

Please cite this article in English as:

Huseynov Hasan Ahmed oglu, Zulfugarly Peri Rasim gizi, Abdurrakhmanova Irada Hamid gyzy. Empirical analysis of the uav vertical lift performance in group flight mode. *Perm National Research Polytechnic University Bulletin. Electrotechnics, information technologies, control systems*, 2023, no. 45, pp. 184-196. DOI: 10.15593/2224-9397/2023.1.09