

Научная статья

УДК 621.3

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=182666>

ВОПРОСЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ УЗЛОВ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ МУЛЬТИКОПТЕРОВ

Омар Анар оглы Гусейнов^{1✉}, Акиф Аллахверди оглы Фатуллаев²,

^{1,2}Национальное Аэрокосмическое Агентство,

Баку, Азербайджанская Республика

¹omer.huseynov.77@mail.ru✉

Аннотация. Энергопитание беспилотных летательных аппаратов является важнейшей проблемой в решении задачи повышения эффективности таких систем. При этом как перспективные, так и современные решения в области энергопитания должны быть привязаны реальным конструктивным особенностям устоявшихся типичных вариантов построения беспилотников.

Ограниченность времени полетов мультикоптеров остается одним из важных проблем, ждущих своего решения и аналитические методы позволяют успешно решать некоторые задачи проектирования мультикоптеров. Целью настоящей статьи является определение оптимальной взаимосвязи между объемом, используемым типа батарейки и количеством тяговых двигателей постоянного тока.

Вышеуказанная задача может быть поставлена и решена в прямом и обратном виде. Обратная постановка вышеуказанной задачи формулируется следующим

образом: При какой взаимосвязи между емкостью батареи и потребляемым током коптера достигается экстремальное время разряда батареи. При этом должны быть соблюдены такие требования к системе электропитания дронов как (а) малый вес, и (b) высокая эффективность работы. Сформулирована и решена задача выбора батареи для коптеров с различным количеством двигателей постоянного тока, при котором время разряда батареи достиг бы экстремальной величины. При этом предполагается наличие множества батарей с различной энергоемкостью.

Выявлен нежелательный порядок выбора батарейки для мультикоптеров, у которых ток потребления пропорционален количеству имеющихся в них двигателей, при котором среднее время разряда по всему множеству коптеров может достигнуть минимума. Дана рекомендация избегать такого распределения имеющегося энергоресурса по множеству мультикоптеров.

Ключевые слова: мультикоптер, энергоемкость, оптимизация, двигатель постоянного тока, время полета

Для цитирования: Гусейнов О.А., Фатуллаев А.А. Вопросы проектирования узлов электропитания мультикоптеров // Труды МАИ. 2024. № 138. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=182666>

Original article

ISSUES OF DESIGNING POWER SUPPLY UNITS FOR MULTICOPTERS

Omar Anar oglu Huseynov^{1✉}, Akif Allahverdi oglu Fatullayev²

^{1,2}National Aerospace Agency,
Baku, Republic of Azerbaijan
¹omer.huseynov.77@mail.ru✉

Abstract. The power supply of unmanned aerial vehicles is the most important problem in solving the problem of increasing the efficiency of such systems. At the same time, both promising and modern solutions in the field of energy supply should be tied to the real design features of established typical drone construction options. The limited flight time of multicopters remains one of the important problems waiting to be solved and analytical methods make it possible to successfully solve some problems of designing multicopters. The purpose of this article is to determine the optimal relationship between the volume of the battery type used and the number of DC traction motors. The above problem can be posed and solved in a forward and reverse form. The reverse formulation of the above problem is formulated as follows: At what relationship between the battery capacity and the consumed current of the copter, the extreme battery discharge time is achieved. At the same time, such requirements for the drone power supply system as (a) low weight, and (b) high operating efficiency must be met. Results. The problem of choosing a battery for a copter with i number of DC motors at which the battery discharge time would reach an extreme value is formulated and solved. In this case, it is assumed that there are set of batteries with different energy volume. The negative order of battery selection for multicopters, in which the current consumption is proportional to the number of engines available in them, has been revealed, at which the average discharge time over the entire set of copters can reach a minimum. A recommendation is given to avoid such a distribution of available energy resources across a variety of multicopters.

Keywords: multicopter, power consumption, optimization, DC motor, flight time

For citation: Huseynov O.A., Fatullayev A.A. Issues of designing power supply units for multicopters. *Trudy MAI*, 2024, no. 138. URL:

<https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=182666>

Введение

В последние годы пригодность БПЛА как в мирных, так и в военных целях стало очевидным [1-5]. БПЛА могут быть использованы в геологии, в спасательных операциях, в доставке грузов, а также в широком спектре военных действий, включая разведку, оценку эффективности средств поражения, непосредственное поражение вражеских целей. Вместе с тем, ограниченность времени полетов БПЛА остается одним из важных проблем, ждущих своего решения. Классическими требованиями к системе электропитания дронов являются: (а) малый вес, и (б) высокая эффективность работы.

Известны работы, в которых вышеуказанные требования выполняются с использованием различных технических и конструкторских решений. Так, например, в работе [6] рассмотрен вопрос питания БПЛА как с помощью солнечных батарей, так и с помощью энергонасыщенного лазерного луча. В работе [7] задача эффективности энергоиспользования решается путем удаления отработанных батарей из БПЛА. Немалое число работ посвящено использованию солнечной энергии для питания узлов БПЛА. Так, например, в работе [8] предлагается оснастить борт БПЛА дополнительными солнечными элементами для использования энергии рассеянной радиации. В работе [9] отмечено, что БПЛА, выполняющие поисковые работы

мирного назначения могут быть оборудованы большегабаритными солнечными панелями. В работе [10] рассмотрена возможность использования потенциальной гравитационной энергии для планирования траектории полета БПЛА, оборудованного солнечными панелями, а в работах [11,12} исследуется возможность пересылки энергии по открытым атмосферным каналам.

Вместе с тем, как перспективные, так и современные решения в области энергопитания должны быть привязаны реальным конструктивным особенностям устоявшихся типичных вариантов построения БПЛА.

Как отмечается в работе [13], типичная система мультикоптера содержит четыре базовых компонента: (1) пропеллер; (2) двигатель постоянного тока; (3) узел контроля скорости; (4) батарея типа «литий-полимер (LiPO)». Как отмечается в работах [14,15], проектирование основы БПЛА считается эффективным, если система тяги и система управления проектируются одновременно, учитывая принятые критерии эффективности, а также существующие ограничения.

Существуют ряд работ по моделированию системы тяги БПЛА [16-20]. Большинство этих работ основаны на вводимых функций издержек и вызывают большие вычислительные трудности.

Вместе с тем, аналитические методы позволяют успешно решать некоторые задачи проектирования БПЛА. К таким задачам в настоящей статье отнесены следующая задача исследования: Определение оптимальной взаимосвязи между объёмом используемым типа батареи и количеством тяговых двигателей постоянного тока.

Вышеуказанная задача может быть поставлена и решена в прямом и обратном виде. Обратная постановка вышеуказанной задачи формулируется следующим образом: При какой взаимосвязи между емкостью батареи и потребляемым током коптера достигается экстремальное время разряда батареи.

Общая схема подключения батареи к системе контроля полета показано на рис. 1 [6].

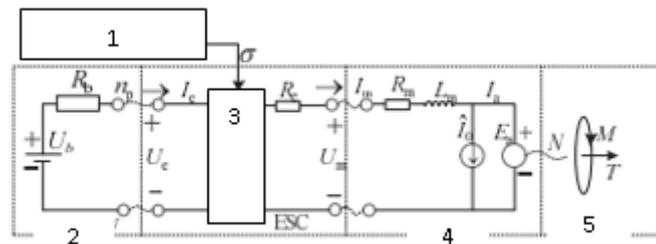


Рис. 1. Схема подключения батареи к узлу контроля полетом БПЛА. Цифрами обозначены: 1-контроллер полета; 2-батарея; 3-узел управления крутящим крылом (пропеллером); 4-мотор; 5-пропеллер

В общем случае, напряжение на выходе батарейки определяется как [13]

$$U_b = U_c + I_b \cdot R_b \quad (1)$$

U_b -номинальное напряжение на выходе батареи; I_b -выходный ток; U_c -напряжение на клеммах батареи.

Применительно к мультикоптерам имеем [13]

$$I_b = nI_0 + I_{other} \quad (2)$$

где n -количество двигателей постоянного тока со встроенным пропеллером; I_0 -ток потребления одного мотора; I_{other} -ток потребления других электронных узлов в БПЛА.

Согласно работе [13], время разряда батареи определяется (в минутах) по следующей формуле

$$t_{dis} = \frac{0,85 \cdot C_b \cdot 0,06}{I_b} \quad (3)$$

где C_b - емкость батареи.

К максимальной скорости разряда батареи (k_b), (измеряемой в мА/мА·час) налагается следующее ограничительное условие [13]:

$$k_b = \frac{1000 I_{bmax}}{C_b} \quad (4)$$

где I_{bmax} - максимально допустимый ток разряда. При этом

$$I_{bmax} \geq n I_0 + I_{other} \quad (5)$$

где I_0 - ток одного двигателя; k_b - максимальная скорость разряда.

Решаемыми задачами в настоящей статье являются:

1. Определение взаимосвязи между I_{bmax} и C_b , при которой время разряда достигает экстремума при решении задачи построения одного мультикоптера с n количеством моторов.
2. Определение взаимосвязи между I_{bmax} и C_b при проектировании серии мультикоптеров, в которых устанавливается серия батарей с емкостью $C_{bi}; i = \overline{1, n}$ и максимальные потребления $I_{b.max.i}$

Материалы и методы

Для решения первой поставленной задачи, время разряда батареи с учетом выражений (3) и (5) для дрона с n количеством мотора определим как

$$t_{dis} = \frac{0,85 \cdot C_b \cdot 0,06}{n I_0 + I_{other}} \quad (6)$$

Далее, с учетом $I_{other} \ll nI_0$ из (6) получим

$$t_{dis} = \frac{0,85 \cdot C_b \cdot 0,06}{nI_0} \quad (7)$$

Введем на рассмотрение функцию связи

$$I_{\Sigma} = f(C_b) \quad (8)$$

где $I_{\Sigma} = nI_0$.

Далее рассмотрим случай наличия двух множеств

$$I = \{I_{\Sigma i}\}; i = \overline{1, n} \quad (9)$$

$$C_b = \{C_{bj}\}; j = \overline{1, n} \quad (10)$$

где i -количество моторов в коптере; j -порядковый номер батареи в множестве (10); $I_{\Sigma i}$ -ток потребления дрона с i количеством мотора. Считаем, что I и C_b являются упорядоченными множествами.

При этом

$$I_{\Sigma i} = iI_0 \quad (11)$$

С учетом выражений (7)-(11) запишем

$$t_{dis} = \frac{0,85 \cdot C_{bj} \cdot 0,06}{I_{\Sigma i}(C_{bj})} \quad (12)$$

Условно переходя от дискретной модели (12) к непрерывной модели выражение (12) запишем как

$$t_{dis} = \frac{1}{C_{bmax}} \int_0^{C_{bmax}} \frac{0,85 \cdot C_b \cdot 0,06}{I_{\Sigma}(C_b)} dC_b \quad (13)$$

К функции $I_{\Sigma}(C_b)$ наложим следующее ограничительное условие

$$\int_0^{C_{bmax}} I_{\Sigma}(C_b) dC_b = C; C = const \quad (14)$$

Смысл ограничения (14) заключается в недопустимости превышения суммарного потребления тока при рассмотрении всех вариантов использования аккумуляторов $C_{bj}; j = \overline{1, n}$ и коптеров (рис. 2).

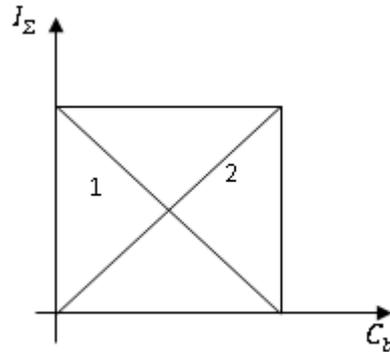


Рис. 2. Выбор взаимосвязи показателей $I_{\Sigma} = iI_0$ и C_{bj} по линиям (1) и (2)

С учетом выражений (13) и (14) составим задачу безусловной вариационной оптимизации, целевой функционал F которого имеет вид

$$F = \frac{1}{C_{bmax}} \int_0^{C_{bmax}} \frac{0,85 \cdot C_b \cdot 0,06}{I_{\Sigma}(C_b)} dC_b + \lambda \left[\int_0^{C_{bmax}} I_{\Sigma}(C_b) dC_b - C \right] \quad (15)$$

где λ -множитель Лагранжа.

Решение задачи (15) должно удовлетворять условию

$$\frac{d \left\{ \frac{0,85 \cdot C_b \cdot 0,06}{I_{\Sigma}(C_b)} + \lambda I_{\Sigma}(C_b) \right\}}{dI_{\Sigma}(C_b)} = 0 \quad (16)$$

Из условия (16) получаем

$$-\frac{0,85 \cdot C_b \cdot 0,06}{I_{\Sigma}(C_b)^2} + \lambda = 0 \quad (17)$$

Из выражения (17) находим

$$I_{\Sigma}(C_b) = \sqrt{\frac{0,85 \cdot C_b \cdot 0,06}{\lambda}} \quad (18)$$

С учетом выражений (14) и (18) можно вычислить множитель Лагранжа в следующем виде

$$\lambda = \frac{4a_1^2 C_{bmax}^3}{9C^2} \quad (19)$$

где $a_1 = const$.

С учетом (18) и (19) окончательно получим

$$I_{\Sigma}(C_b) = \frac{3C}{2} \sqrt{\frac{C_b}{C_{bmax}^3}} \quad (20)$$

Вместе с тем, при условии (20) функционал F достигает минимума, т. к. производная выражения (17) оказывается всегда положительной величиной.

Следовательно, при решении задачи подбора аккумулятора для коптера с суммарным током потребления моторов I_{Σ} следует избегать зависимости между I_{Σ} и C_b в виде (20) в качестве наихудшей зависимости между указанными показателями.

Таким образом, решение поставленной выше задачи показало, что при проектировании мультимоторного дрона с учетом принятых ограничений следует избегать зависимости I_{Σ} от C_b в виде выражения (20).

Заключение

Сформулирована и решена задача выбора батареи для коптера с i количеством двигателей постоянного тока, при котором время разряда батареи достиг бы экстремальной величины. При этом предполагается наличие множества батарей $\{C_{bi}\}$, где $C_{bi} - C_{bi-1} = \Delta C_b$; $\Delta C_b = const$.

Определен такой порядок выбора батарейки для мультикоптеров, у которых ток потребления пропорционален количеству имеющихся в них двигателей, при котором

среднее время разряда по всему множеству $\{I_{\Sigma 0}\}$ достиг бы минимума. Дана рекомендация избежать такого распределения множества мультикоптеров о элементам множества $\{C_{bi}\}$.

Список источников

1. Bowen D. Encyclopedia of war machines: an historical survey of the world's great weapons, Peerage books, London, UK, 1977, 368 p.
2. Hannavy J. Encyclopedia of nineteenth-century photography, Routledge, Taylor & Francis group, 2007, 828 p.
3. Ambrosia V. G., Wegener S., Zajkowski T. et al. The Ikhana UAS western states fire imaging missions: from concept to reality (2006-2011) // Geocarto International, 2011. DOI: [10.1080/10106049.2010.539302](https://doi.org/10.1080/10106049.2010.539302)
4. Torres-Sanchez J., Lopez-Granados F., Pena J. M. An automatic object-based method for optimal thresholding in UAV images: application for vegetation detection in herbaceous crops // Computers and electronics in agriculture, 2015, vol. 114, pp. 43-52. DOI: [10.1016/j.compag.2015.03.019](https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.03.019)
5. Primicerio J., Gennaro S. F., Fiorillo E., Genesio L., Lugato E. A flexible unmanned aerial vehicle for precision agriculture // Precision Agriculture, 2012, vol. 13 (4), pp. 517-523. DOI: [10.1007/s11119-012-9257-6](https://doi.org/10.1007/s11119-012-9257-6)
6. Асланова А.Б. Вопросы оптимизации комбинированного питания БПЛА с использованием солнечных батарей и наземной воздушной передачи энергии лазерным лучом // Труды МАИ. 2022. № 122. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=164287>. DOI: [10.34759/trd-2022-122-21](https://doi.org/10.34759/trd-2022-122-21)

7. Асланова А.Б. Оптимизация режимных показателей батарейных БПЛА с дифференциальным сбросом веса полезной нагрузки // Труды МАИ. 2021. № 119. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=159794>. DOI: [10.34759/trd-2021-119-16](https://doi.org/10.34759/trd-2021-119-16)
8. Джахидзаде Ш.Н. Вопросы оптимизации использования дополнительных солнечных панелей для питания узлов беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ. 2019. № 108. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=109570>. DOI: [10.34759/trd-2019-108-17](https://doi.org/10.34759/trd-2019-108-17)
9. Betancourth N.J.P., Villamarin J.E P., Rios J.J.V. Bravo-Mosquera P.D., Ceron-Munoz H.D. Design and manufacture of a solar-powered unmanned aerial vehicle for civilian surveillance missions // Journal of Aerospace Technology and Management, 2016, vol. 8 (4), pp. 385-396. DOI: [10.5028/jatm.v8i4.678](https://doi.org/10.5028/jatm.v8i4.678)
10. Lee J.S., Yu K.H. Optimal Path Planning of solar-powered UAV using gravitational potential energy // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2017, vol. 53, no. 3, pp. 1442-1451. DOI: [10.1109/TAES.2017.2671522](https://doi.org/10.1109/TAES.2017.2671522)
11. Makki B., Svensson T., Bruisman K., Perez J., Alouini M-S. Wireless energy and information transmission in FSO and Rf-FSO links // IEEE Wireless Communication Letters, 2018, vol. 7 (1), pp. 90-93. DOI: [10.1109/LWC.2017.2755658](https://doi.org/10.1109/LWC.2017.2755658)
12. Богушевская В.А., Заяц О.В., Масляков Я.Н., Мацак И.С., Никонов А.А., Савельев В.В., Шептунов А.А. Разработка системы дистанционного энергоснабжения беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ. 2012. № 51. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=29047>
13. Dai X., Quan Q., Ren J., Cai K. Y. An analytical design-optimization method for electric propulsion systems of multicopter UAVs with desired hovering endurance //

- IEEE/ASME transactions on mechatronics, 2019, vol. 24, no. 1. DOI: [10.1109/TMECH.2019.2890901](https://doi.org/10.1109/TMECH.2019.2890901)
14. Oktay T., Sultan C. Simultaneous helicopter and control-system design // Journal of Aircraft, 2013, vol. 50, no. 3, pp. 911–925. DOI: [10.2514/1.C032043](https://doi.org/10.2514/1.C032043)
 15. Oktay T., Konar M., Onay M., Aydin M., Mohamed M.A. Simultaneous small uav and autopilot system design // Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2016, vol. 88, no. 6, pp. 818–834. DOI: [10.1108/AEAT-04-2015-0097](https://doi.org/10.1108/AEAT-04-2015-0097)
 16. Harrington A.M. Optimal propulsion system design for a micro quad rotor, Master's thesis, University of Maryland, College Park, 2011.
 17. Shi D., Dai X., Zhang X., Quan Q. A practical performance evaluation method for electric multicopters // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2017, vol. 22, no. 3, pp. 1–10. DOI: [10.1109/TMECH.2017.2675913](https://doi.org/10.1109/TMECH.2017.2675913)
 18. McCrink M., Gregory J.W. Blade element momentum modeling of low-re small uas electric propulsion systems // 33rd AIAA Applied Aerodynamics Conference, 2015. DOI: [10.2514/6.2015-3296](https://doi.org/10.2514/6.2015-3296)
 19. Lawrence D., Mohseni K. Efficiency analysis for long duration electric mavs // Infotech@Aerospace Conferences, 2005. DOI: [10.2514/6.2005-7090](https://doi.org/10.2514/6.2005-7090)
 20. Stepaniak M.J., Graas F.V., De Haag M.U. Design of an Electric Propulsion System for a Quadrotor Unmanned Aerial Vehicle // Journal of Aircraft, 2009, vol. 46, no. 3, pp. 1050–1058. DOI: [10.2514/1.38409](https://doi.org/10.2514/1.38409)

References

1. Bowen D. *Encyclopedia of war machines: an historical survey of the world's great weapons*, Peerage books, London, UK, 1977, 368 p.
2. Hannavy J. *Encyclopedia of nineteenth-century photography*, Routledge, Taylor & Francis group, 2007, 828 p.
3. Ambrosia V. G., Wegener S., Zajkowski T. et al. The Ikhana UAS western states fire imaging missions: from concept to reality (2006-2011), *Geocarto International*, 2011. DOI: [10.1080/10106049.2010.539302](https://doi.org/10.1080/10106049.2010.539302)
4. Torres-Sanchez J., Lopez-Granados F., Pena J. M. An automatic object-based method for optimal thresholding in UAV images: application for vegetation detection in herbaceous crops, *Computers and electronics in agriculture*, 2015, vol. 114, pp. 43-52. DOI: [10.1016/j.compag.2015.03.019](https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.03.019)
5. Primicerio J., Gennaro S. F., Fiorillo E., Genesio L., Lugato E. A flexible unmanned aerial vehicle for precision agriculture, *Precision Agriculture*, 2012, vol. 13 (4), pp. 517-523. DOI: [10.1007/s11119-012-9257-6](https://doi.org/10.1007/s11119-012-9257-6)
6. Aslanova A.B. *Trudy MAI*, 2022, no. 122. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=164287>. DOI: [10.34759/trd-2022-122-21](https://doi.org/10.34759/trd-2022-122-21)
7. Aslanova A.B. *Trudy MAI*, 2021, no. 119. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=159794>. DOI: [10.34759/trd-2021-119-16](https://doi.org/10.34759/trd-2021-119-16)
8. Dzhakhidzade Sh.N. *Trudy MAI*, 2019, no. 108. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=109570>. DOI: [10.34759/trd-2019-108-17](https://doi.org/10.34759/trd-2019-108-17)
9. Betancourth N.J.P., Villamarin J.E.P., Rios J.J.V. Bravo-Mosquera P.D., Ceron-Munoz H.D. Design and manufacture of a solar-powered unmanned aerial vehicle for civilian

- surveillance missions, *Journal of Aerospace Technology and Management*, 2016, vol. 8 (4), pp. 385-396. DOI: [10.5028/jatm.v8i4.678](https://doi.org/10.5028/jatm.v8i4.678)
10. Lee J.S., Yu K.H. Optimal Path Planning of solar-powered UAV using gravitational potential energy, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2017, vol. 53, no. 3, pp. 1442-1451. DOI: [10.1109/TAES.2017.2671522](https://doi.org/10.1109/TAES.2017.2671522)
11. Makki B., Svensson T., Bruisman K., Perez J., Alouini M-S. Wireless energy and information transmission in FSO and Rf-FSO links, *IEEE Wireless Communication Letters*, 2018, vol. 7 (1), pp. 90-93. DOI: [10.1109/LWC.2017.2755658](https://doi.org/10.1109/LWC.2017.2755658)
12. Bogushevskaya V.A., Zayats O.V., Maslyakov Ya.N., Matsak I.S., Nikonov A.A., Savel'ev V.V., Sheptunov A.A. *Trudy MAI*, 2012, no. 51. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=29047>
13. Dai X., Quan Q., Ren J., Cai K. Y. An analytical design-optimization method for electric propulsion systems of multicopter UAVs with desired hovering endurance, *IEEE/ASME transactions on mechatronics*, 2019, vol. 24, no. 1. DOI: [10.1109/TMECH.2019.2890901](https://doi.org/10.1109/TMECH.2019.2890901)
14. Oktay T., Sultan C. Simultaneous helicopter and control-system design, *Journal of Aircraft*, 2013, vol. 50, no. 3, pp. 911–925. DOI: [10.2514/1.C032043](https://doi.org/10.2514/1.C032043)
15. Oktay T., Konar M., Onay M., Aydin M., Mohamed M.A. Simultaneous small uav and autopilot system design, *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 2016, vol. 88, no. 6, pp. 818–834. DOI: [10.1108/AEAT-04-2015-0097](https://doi.org/10.1108/AEAT-04-2015-0097)
16. Harrington A.M. *Optimal propulsion system design for a micro quad rotor*, Master's thesis, University of Maryland, College Park, 2011.

17. Shi D., Dai X., Zhang X., Quan Q. A practical performance evaluation method for electric multicopters, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2017, vol. 22, no. 3, pp. 1–10. DOI: [10.1109/TMECH.2017.2675913](https://doi.org/10.1109/TMECH.2017.2675913)
18. McCrink M., Gregory J.W. Blade element momentum modeling of low-re small uas electric propulsion systems, *33rd AIAA Applied Aerodynamics Conference*, 2015. DOI: [10.2514/6.2015-3296](https://doi.org/10.2514/6.2015-3296)
19. Lawrence D., Mohseni K. Efficiency analysis for long duration electric mavs, *Infotech@Aerospace Conferences*, 2005. DOI: [10.2514/6.2005-7090](https://doi.org/10.2514/6.2005-7090)
20. Stepaniak M.J., Graas F.V., De Haag M.U. Design of an Electric Propulsion System for a Quadrotor Unmanned Aerial Vehicle, *Journal of Aircraft*, 2009. vol. 46, no. 3, pp. 1050–1058. DOI: [10.2514/1.38409](https://doi.org/10.2514/1.38409)

Статья поступила в редакцию 01.08.2024

Одобрена после рецензирования 08.08.2024

Принята к публикации 25.10.2024

The article was submitted on 01.08.2024; approved after reviewing on 08.08.2024; accepted for publication on 25.10.2024