

Научная статья

УДК 629.7.01

DOI: 10.26730/1816-4528-2022-6-62-67

Асланова Айтен Баба гызы

НИИ Космических исследований природных ресурсов

*E-mail: Aslanova.a.b.@mail.ru

**ВОПРОСЫ ОПТИМИЗАЦИИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ
ДЛЯ ЭНЕРГОПИТАНИЯ БПЛА****Информация о статье**

Поступила:

15 сентября 2022 г.

Одобрена после

рецензирования:

01 октября 2022 г.

Принята к печати:

14 октября 2022 г.

Ключевые слова:

БПЛА, солнечная батарея, энергопитание, фотоэлемент, оптическая воздушная масса.

Аннотация.

Статья посвящена оптимизации использования солнечных батарей для энергопитания БПЛА. Эффективность процесса превращения солнечной энергии в электроэнергию зависит от двух факторов: эффективности самого процесса физического преобразования оптических лучей Солнца в электроэнергию и соблюдения угловых соотношений для обеспечения попадания в фотоэлементы прямых солнечных лучей под прямым углом. Решения технологических задач по первому фактору тесно связаны с такими показателями, как температура окружающей среды, спектр излучения, сила оптического радиационного потока. Второй фактор заключается в неориентированности фотодиодов солнечных панелей в отношении прямых солнечных лучей. Сформулирован вопрос оптимизации ориентации оптической оси фотоэлементов солнечной панели относительно направления прямых солнечных лучей в зависимости от оптической воздушной массы. Для решения вопроса оптимизации применена неоклассическая вариационная задача Лагранжа, согласно решению которой с ростом оптической воздушной массы разность угла между направленностью фотоэлементов панели и направленностью солнечных прямых лучей, проходя через ноль, может изменить свою полярность. Результаты решения оптимизационной задачи позволяют вычислить аналитическую зависимость изменения значения указанного разностного угла в зависимости от оптической воздушной массы.

Для цитирования: Асланова А.Б. Вопросы оптимизации использования солнечных батарей для энергопитания БПЛА // Горное оборудование и электромеханика. 2022. № 6 (164). С. 62-67. DOI: 10.26730/1816-4528-2022-6-62-67

Введение

БПЛА или дроны могут выполнять различные операции, включая задачи военного характера, миссии по спасению при чрезвычайных ситуациях, разведывательные действия, перенос различных грузов и т.д. Согласно оценкам, приведенным в [1], рынок использования дронов в 2025 году достигнет 1,7 миллиардов долларов США. Вместе с тем область применения БПЛА неизменно расширяется, что требует повышения надежности выполнения приданных им функций. В первую очередь это касается продолжительности полета БПЛА. В настоящее время проблема ограниченности времени полета БПЛА решается в двух направлениях:

1. Усовершенствование батарей [2-4];
2. Увеличение эффективности полета с использованием свойств атмосферных процессов [5-

7], физическую основу которых составляют различные перемещения теплых воздушных потоков.

Также известны работы в области оптимизации энергопотребления БПЛА в режиме их групповых полетов [8-10]. Так, в работах [8,9] предложено энергоэффективное управление потребляемой мощностью путем 3D-размещения группы БПЛА с учетом их мобильности. В работе [10] определена оптимальная высота полета с учетом затухания и потерь в канале.

Достаточно перспективным направлением в решении задач энергопотребления дронов является использование солнечных батарей на борту [11-15]. Как отмечается в работе [16], эффективность процесса превращения солнечной энергии в электроэнергию зависит от двух факторов: эффективность самого процесса физического преобразования оп-

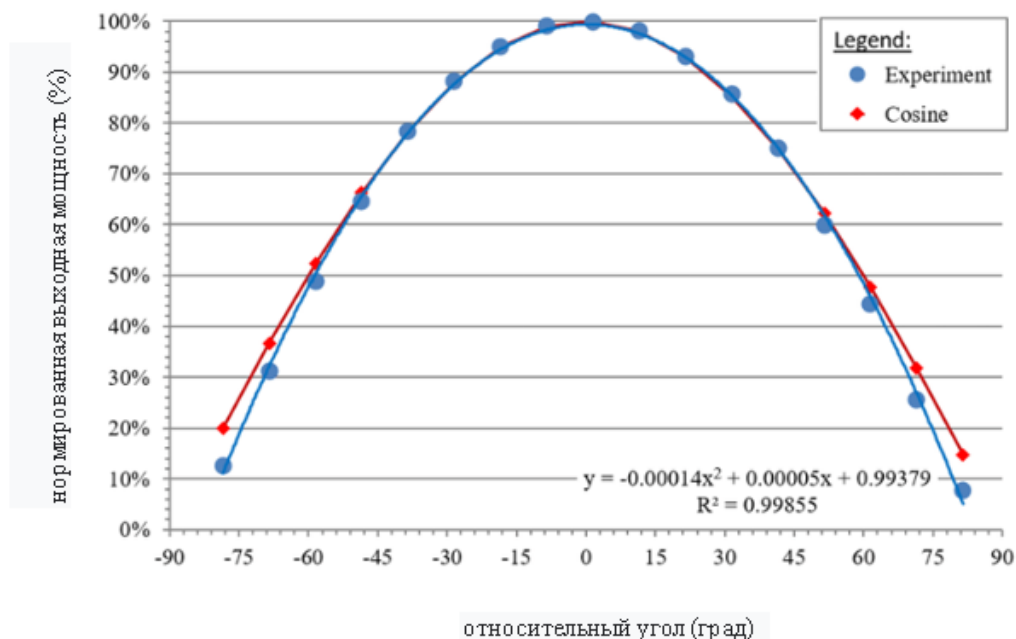


Рис. 1. Экспериментально снятая зависимость эффективности солнечных панелей от разности x между углами направленности фотодиодов панели и направленности прямых солнечных лучей

Fig. 1. Experimentally removed dependence of the efficiency of solar panels on the difference x between the directivity angles of the photodiodes of the panel and the directivity of direct sunlight

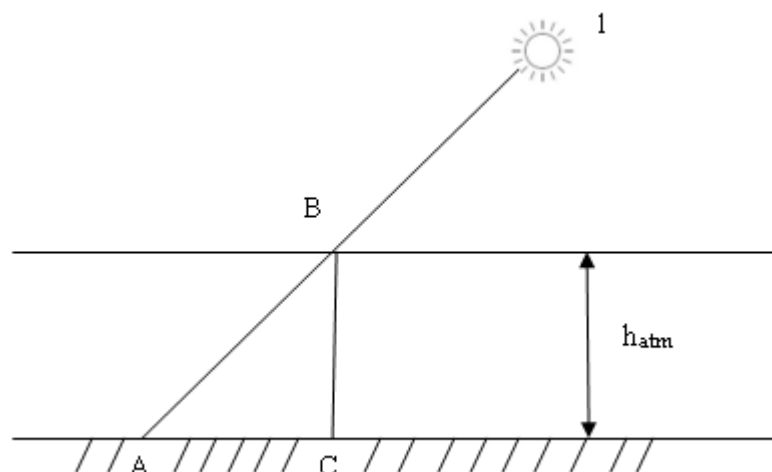


Рис. 2. Упрощенная геометрическая интерпретация оптической воздушной массы. Принятые обозначения:

1 – позиция Солнца; α – угол высоты Солнца; h_{atm} – высота однородной атмосферы

Fig. 2. Simplified geometric interpretation of the optical air mass. Accepted designations: 1 – the position of the Sun; α – the angle of the height of the Sun; h_{atm} – the height of a homogeneous atmosphere

тических лучей Солнца в электроэнергию и соблюдение угловых соотношений для обеспечения попадания в фотоэлементы прямых солнечных лучей под прямым углом. Решения технологических задач по первому фактору тесно связаны с такими показателями, как температура окружающей среды, спектр излучения, сила оптического радиационного потока. Например, согласно [16], солнечная панель «Alta Devices», представляющая собой GaAs-фотоячейки, установленная на дроне, показала эффективность 26% при оптической воздушной массе 1,5, силе солнечного оптического потока 1000 Вт/м², температуре 25°C.

Второй фактор заключается в неориентированности фотодиодов солнечных панелей в отношении прямых солнечных лучей. Так, согласно [16], эффективность солнечных батарей пропорциональна косинусу разности между углами направленности фотодиодов панели и направленности солнечных прямых лучей. В качестве примера на рис. 1 показана кривая зависимости нормализованной величины мощности сгенерированной электроэнергии η на выходе солнечных батарей от вышеуказанной разности углов.

Кривая, показанная на рис. 1, аппроксимирована следующим полиномиальным выражением

$$\eta = -a_1 \cdot x^2 + a_2 x + a_3, \quad (1)$$

где: $a_1=0,00014$; $a_2=0,00005$; $a_3=0,99379$.

Вместе с тем согласно законам атмосферной оптики степень направленности прямых солнечных лучей определяется таким показателем, как оптическая воздушная масса. Этот показатель в самой простой интерпретации может быть представлен в качестве отношения гипотенузы АВ к катету ВС (рис. 2).

Согласно упрощенному геометрическому представлению оптической воздушной массы, показанной на рис. 2, имеем

$$m = \frac{AB}{BC} = \sec \alpha, \quad (2)$$

где α – угол высоты Солнца.

В связи с вышеизложенным задачей исследования в настоящей статье является поиск оптимальной зависимости между показателями x и m , при которой в течение некоторого временного интервала полета система солнечного энергоснабжения БПЛА сгенерировала бы максимальное количество электроэнергии.

Предлагаемый метод

Для решения данной задачи воспользуемся выражением закона Бугера-Бера применительно к видимой части спектра электромагнитного излучения Солнца. Согласно этому закону солнечные лучи на поверхности Земли имеют интенсивность, определяемую на фиксированной длине волны λ как

$$I(\lambda) = \frac{I_0(\lambda)}{R^2} \exp[-m\tau_{atm}(\lambda)], \quad (3)$$

где: $I(\lambda)$ – интенсивность солнечного излучения на уровне Земли; $I_0(\lambda)$ – интенсивность внеатмосферного излучения; R – расстояние от Земли до Солнца; $\tau_{atm}(\lambda)$ – оптическая толщина атмосферы.

Далее учитываем известное выражение для $\tau_{atm}(\lambda)$ для видимой области света [17]:

$$\tau_{atm}(\lambda) = \tau_{oz}(\lambda) + \tau_{aer}(\lambda) + \tau_{rel}(\lambda), \quad (4)$$

где: $\tau_{oz}(\lambda)$ – оптическая толщина атмосферного озона;

$\tau_{aer}(\lambda)$ – оптическая толщина атмосферного аэрозоля;

$\tau_{rel}(\lambda)$ – оптическая толщина рэлеевского рассеяния.

Так как фотоэлектрические солнечные панели функционируют в достаточно широком диапазоне длин волн, а выражение (3) действительно в принципе для монохроматического излучения, выражение (3) запишем как

$$I(\lambda) = \frac{I_0(\lambda)}{R^2} \cdot T_{cp}(m, \tau_{atm}(\lambda)), \quad (5)$$

где $T_{cp}(m, \tau_{atm}(\lambda))$ – усредненная по λ величина пропускания атмосферы.

Приняв

$$T_{cp} = \exp(-m\tau_{atm}(\lambda_{cp})), \quad (6)$$

$$I_0(\lambda) = I_0(\lambda_{cp}), \quad (7)$$

выражение (5) переписываем как

$$I(\lambda_{cp}) = c_1 \exp(-m\tau_{atm}(\lambda_{cp})), \quad (8)$$

$$\text{где } c_1 = \frac{I_0(\lambda_{cp})}{R^2} \quad (9)$$

С учетом (1) и (8) эффективность работы солнечной батареи β определим как

$$\beta = c_1 \cdot \eta \cdot \exp[-m\tau_{atm}(\lambda_{cp})]. \quad (10)$$

В дальнейшем для решения задачи определения оптимальной взаимосвязи показателей x и m введем на рассмотрение функцию связи

$$x = f(m), \quad (11)$$

показывающую закон управления вышерассмотренного угла x в зависимости от текущего значения m . Будем для определенности считать, что функция (11) может быть выбрана из подмножества всевозможных функций, удовлетворяющих условию

$$\int_1^{m_{max}} f(m) dm = C_2; \quad C_2 = const. \quad (12)$$

Отметим, что (12) в неявном виде обусловлено ограниченностью ресурсов на формирование команд по управлению величиной x и энергии, затрачиваемой на реализацию таких команд в течение дня.

С учетом (1), (10), (11) сформируем целевой функционал проводимой оптимизации в виде задачи Лагранжа:

$$F = \int_1^{m_{max}} [(-a_1 f(m)^2 + a_2 f(m) + a_3) \cdot c_1 \exp[-m\tau_{atm}(\lambda_{cp})] + \gamma \cdot f(m)] dm \quad (13)$$

где: γ – множитель Лагранжа.

Для поиска оптимальной функции $f(m)$ вычислим производную подынтегрального выражения по этой же функции. Имеем

$$[-2a_1 f(m) + a_2] c_1 \cdot \exp[-m\tau_{atm}(\lambda_{cp})] + \gamma = 0. \quad (14)$$

Из (14) находим

$$f(m) = \frac{\gamma}{2a_1 c_1 \cdot \exp[-m\tau_{atm}(\lambda_{cp})]} + \frac{a_2}{2a_1}. \quad (15)$$

Подставив (15) в (12), получаем

$$\gamma \cdot \int_1^{m_{max}} \frac{\exp[-m\tau_{atm}(\lambda_{cp})] dm}{2a_1 c_1} + \int_1^{m_{max}} \frac{a_2 dm}{2a_1}. \quad (16)$$

Из (16) находим

$$\gamma = - \frac{\int_1^{m_{max}} a_2 dm}{\int_1^{m_{max}} \frac{\exp[-m\tau_{atm}(\lambda_{cp})] dm}{c_1}} = \frac{-a_2 c_1 (m_{max} - 1)}{\int_1^{m_{max}} \exp[m\tau_{atm}(\lambda_{cp})] dm}. \quad (17)$$

Так как γ является отрицательной величиной, то, как следует из (15), с ростом m значение x может стать отрицательным, переходя через нулевое значение. Как видно из кривой, показанной на рис. 1, двуполярность показателя x является естественным свойством солнечных панелей в смысле работы оптической схемы в зоне достижения максимальной эффективности преобразования оптической энергии в электрическую. Вместе с тем с весьма высокой вероятностью область значений x в оптимальном режиме не будет располагаться симметрично относительно точки x , в которой эффективность преобразования наивысшая. Это обстоятельство указывает на важность полученных в настоящей статье результатов по оптимизации использования солнечных батарей.

Заключение

Таким образом, сформулирована и решена задача ориентации оптической оси фотоэлементов солнечной панели относительно направления прямых солнечных лучей в зависимости от оптической воздушной массы. Сформулирована неоклассическая вариационная задача Лагранжа, согласно решению

которой с ростом оптической воздушной массы разность угла между направленностью фотоэлементов панели и направленностью солнечных прямых лучей может изменить свою полярность, проходя через ноль. Такая смена полярности является известным фактом, однако полученные в настоящей статье результаты позволяют вычислить аналитическую зависимость изменения значения указанного разностного угла в зависимости от оптической воздушной массы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Raj B., Gopi A.G., Maione R. The societal impact of commercial drones// Technol. Soc. 2016. 45. 83-90. doi:10.1016/j.techsoc.2016.02.009.
2. Holness A.E., Solheim H., Bruck H.A., Gupta S.K. A design framework for realizing multifunctional wings for flapping wing air vehicles using solar cells. *International Journal of Micro Air Vehicles*. 2019; 11(1):1-19.
3. Perez-Rosado A. Design, fabrication and characterization of multifunctional wings to harvest solar energy in flapping wing air vehicles. *Ph. D. thesis. University of Maryland-College Park*. 2015.
4. Donato T., Ficarella A., Spedicato L., Arista A., Ferraro M. A new approach to calculating endurance in electric flight and comparing fuel cells and batteries. *Applied Energy*. 2017; 187(1):807-819.
5. Depenbusch N., Bird J., Langelaan J. The AutoSOAR Autonomous Soaring Aircraft Part 2 Hardware Implementation and Flight Results. *Journal of Field Robotics*. 2017; 35(4):435-458.
6. Stolle M., Wanatabe Y., Doll C., Bolting J. Vision-based Lifespan and Strength Estimation of Sub-Cumulus Thermal Updrafts for Autonomous Soaring. *In Proceedings of the international Conference on unmanned Aircraft Systems*. 2016.
7. Bird J., Langelaan J. Design space exploration for hybrid solar/soaring aircraft. *In Proceedings of the AIAA Aviation Technology, Integration and Operations Conference*. 2017.
8. Mozaffari M., Saad W., Bennis M., Debbah M. Mobile unmanned aerial vehicles (UAVs) for energy-efficient internet of things communications// IEEE Transactions on wireless communications. 2017; 16(11):7574-7589.
9. Bor-Yaliniz R. I., El-Keyi A., Yanikomeroglu H. Efficient 3-d placement of an aerial base station in next generation cellular networks. (*ICC*). 2016 *IEEE International conference on*. IEEE. 2016. Pp. 1-5.
10. Azari M.M., Rosas F., Chen K. C., Pollin S. Optimal UAV positioning for terrestrial-aerial communication in presence of fading. *Global Communication conference (GLOBECOM)*. IEEE. 2016. Pp. 1-7.
11. 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; 53(3):1442-1451.
12. Grano-Romero C., Garcia-Juarez M., Guerrero-Castellanos J.F., Guerrero-Sanchez W.F., Ambrosio-Lazaro R.C., Mino-Aguilar G. Modeling and control of a fixed-wing UAV powered by solar energy: an electric array reconfiguration approach. *13th international conference on power electronics (CIEP)*. 2016. Pp. 52-57.
13. Gao X.Z., Hou Z.X., Guo Z., Liu J.X., Chen X.Q., Energy management strategy for solar-powered high-altitude long-endurance aircraft. *Energy conversion and management*. 2013; 70:20-30.
14. Hosseini S., Dai R., Mesbahi M. Optimal path planning and power allocation for a long endurance solar-powered UAV. *American control conference*. 2013. pp. 2588-2593.
15. Lee B., Park P., Kim C., Yang S., Ahn S. Power managements of a hybridelectric propulsion system for UAVs. *Journal of mechanical science and technology*. 2012; 26(8): 2291-2299.
16. Dantsker Or D., Theile M., Caccamo M. Integrated power modeling for solar-powered, computationally-intensive unmanned aircraft.
17. Marengo F., Santacesaria V., Bais A.F., Balis D., Di Sarra A., Papayannis A., Zerefos Ch. Optical properties of tropospheric aerosols determined by lidar and spectrophotometric measurements. 1997; 36(27): 6875-6886.

© 2022 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Асланова Айтен Баба гызы, ст.н.с., НИИ Космических исследований природных ресурсов (Азербайджанская Республика, г. Баку, AZ 1145, ул. С.С. Ахундова, 1), Aslanova.a.b.@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Асланова Айтен Баба гызы – постановка исследовательской задачи в соавторстве с коллективом лаборатории ремонта и эксплуатации горнотранспортного оборудования; обзор соответствующей литературы; участие в проведении экспериментов; анализ отказов и простоев; аналитические расчеты; выводы; написание текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Aslanova Ayten Baba gizi

Research Institute of Space Research of Natural Resources

*E-mail: Aslanova.a.b.@mail.ru

ISSUES OF OPTIMIZING THE USE OF SOLAR PANELS FOR UAV POWER SUPPLY



Article info

Received:

15 September 2022

Accepted for publication:

01 October 2022

Accepted:

14 October 2022

Keywords: UAV, solar battery, power supply, solar cell. optical air mass.

Abstract.

The article is devoted to optimizing the use of solar panels for UAV power supply. The efficiency of the process of converting solar energy into electricity depends on two factors: the efficiency of the process of physical conversion of the optical rays of the Sun into electricity and compliance with angular ratios to ensure that direct sunlight enters the solar cells at right angles. The solutions of technological problems for the first factor are closely related to such indicators as ambient temperature, radiation spectrum, and the strength of the optical radiation flux. The second factor is the non-orientation of photodiodes of solar panels in relation to direct sunlight. The issue of optimizing the orientation of the optical axis of solar panel solar cells relative to the direction of direct sunlight, depending on the optical air mass, is formulated. To solve the optimization problem, the neoclassical Lagrange variational problem is applied, according to the solution of which, with an increase in the optical air mass, the angle difference between the directivity of the panel's solar cells and the directivity of direct solar rays passing through zero can change its polarity. The results of solving the optimization problem allow us to calculate the analytical dependence of the change in the value of the specified difference angle depending on the optical air mass.

For citation: Aslanova A.B. Issues of optimizing the use of solar panels for UAV power supply. Mining Equipment and Electromechanics, 2022; 6(164):62-67 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1816-4528-2022-6-62-67

REFERENCES

1. Raj B., Gopi A.G., Maione R. The societal impact of commercial drones// Technol. Soc. 2016. 45. 83-90. doi:10.1016/j.techsoc.2016.02.009.
2. Holness A.E., Solheim H., Bruck H.A., Gupta S.K. A design framework for realizing multifunctional wings for flapping wing air vehicles using solar cells. *International Journal of Micro Air Vehicles*. 2019; 11(1):1-19.
3. Perez-Rosado A. Design, fabrication and characterization of multifunctional wings to harvest solar energy in flapping wing air vehicles. *Ph. D. thesis. University of Maryland-College Park*. 2015.
4. Donato T., Ficarella A., Spedicato L., Arista A., Ferraro M. A new approach to calculating endurance in electric flight and comparing fuel cells and batteries. *Applied Energy*. 2017; 187(1):807-819.
5. Depenbusch N., Bird J., Langelaan J. The AutoSOAR Autonomous Soaring Aircraft Part 2 Hardware Implementation and Flight Results. *Journal of Field Robotics*. 2017; 35(4):435-458.
6. Stolle M., Wanatabe Y., Doll C., Bolting J. Vision-based Lifespan and Strength Estimation of Sub-Cumulus Thermal Updrafts for Autonomous Soaring. *In Proceedings of the international Conference on unmanned Aircraft Systems*. 2016.
7. Bird J., Langelaan J. Design space exploration for hybrid solar/soaring aircraft. *In Proceedings of the AIAA Aviation Technology, Integration and Operations Conference*. 2017.
8. Mozaffari M., Saad W., Bennis M., Debbah M. Mobile unmanned aerial vehicles (UAVs) for energy-efficient internet of things communications// *IEEE Transactions on wireless communications*. 2017; 16(11):7574-7589.
9. Bor-Yaliniz R. I., El-Keyi A., Yanikomeroglu H. Efficient 3-d placement of an aerial base station in next generation cellular networks. (*ICC*). *2016 IEEE International conference on*. IEEE. 2016. Pp. 1-5.
10. Azari M.M., Rosas F., Chen K. C., Pollin S. Optimal UAV positioning for terrestrial-aerial communication in presence of fading. *Global Communication conference (GLOBECOM)*. IEEE. 2016. Pp. 1-7.
11. 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; 53(3):1442-1451.
12. Grano-Romero C., Garcia-Juarez M., Guerrero-Castellanos J.F., Guerrero-Sanchez W.F., Ambrosio-Lazaro R.C., Mino-Aguilar G. Modeling and control of a fixed-wing UAV powered by solar energy: an electric array reconfiguration approach. *13th interna-*

tion conference on power electronics (CIEP). 2016. Pp. 52-57.

13. Gao X.Z., Hou Z.X., Guo Z., Liu J.X., Chen X.Q., Energy management strategy for solar-powered high-altitude long-endurance aircraft. *Energy conversion and management*. 2013; 70:20-30.

14. Hosseini S., Dai R., Mesbahi M. Optimal path planning and power allocation for a long endurance solar-powered UAV. *American control conference*. 2013. pp. 2588-2593.

15. Lee B., Park P., Kim C., Yang S., Ahn S. Power managements of a hybridelectric propulsion

system for UAVs. *Journal of mechanical science and technology*. 2012; 26(8): 2291-2299.

16. Dantsker Or D., Theile M., Caccamo M. Integrated power modeling for solar-powered, computationally-intensive unmanned aircraft.

17. Marengo F., Santacesaria V., Bais A.F., Balis D., Di Sarra A., Papayannis A., Zerefos Ch. Optical properties of tropospheric aerosols determined by lidar and spectrophotometric measurements. 1997; 36(27): 6875-6886.

© 2022 The Author. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

Aslanova Ayten Baba gizi, Senior Researcher, Research Institute of Space Research of Natural Resources (Azerbaijan Republic, Baku, AZ 1145, S.S. Akhundova str. 1), Aslanova.a.b.@mail.ru

Contribution of the authors:

Aslanova Ayten Baba gizi – formulation of a research task in collaboration with the staff of the laboratory for the repair and operation of mining equipment; review of relevant literature; participation in experiments; analysis of failures and downtime; analytical calculations; conclusions; writing a text.

Author have read and approved the final manuscript.

