

**Методика вычисления показателей энергоинформационно –  
эффективного режима функционирования беспилотных летательных  
аппаратов дистанционного зондирования**

**Зульфугарлы П.Р.**

*Азербайджанский технический университет,  
просп. Гусейна Джавида, 25, Баку, 370073, Азербайджан*

*e-mail: [Peri.rzayeva30@gmail.com](mailto:Peri.rzayeva30@gmail.com)*

**Статья поступила 20.03.2021**

**Аннотация**

Одним из основных недостатков БПЛА считается ограниченность их энергообеспеченности. Этот недостаток вызывает необходимость в оптимальном распределении энергобаланса БПЛА путем оптимального выбора траектории полета и порядка коммуникации. Вместе с тем, конечной продукцией разведывательных БПЛА является объем собранной информации в течение осуществляемого полета. Главным выводом из вышеизложенного является то, что БПЛА должен работать в энергоинформационно – эффективном режиме функционирования. Целью настоящей работы является разработка методики вычисления оптимальных режимных параметров, обеспечивающих энергоинформационно – эффективный режим функционирования БПЛА. Предлагаемая методика базируется на представлении БПЛА в виде кибер – физической системы, питаемой от электрического аккумулятора (батареи) и предусматривает проведение двухступенчатой оптимизации режима функционирования БПЛА.

**Ключевые слова:** БПЛА, энергообеспеченность, киберфизическая система, оптимизация, энергоинформационный критерий, эффективность.

## 1. Введение

Хорошо известно, что возможности оперативного и более гибкого размещения аппаратуры дистанционного зондирования на борту беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) существенно расширили возможности решения таких задач как классификация земляного покрова, обнаружение изменений, тематическое картирование и др. [1-5]. БПЛА снабженные GPS и системой автопилота способны выполнить фотограмметрические задачи применительно к различным наземным объектом исследования [6-10]. Многие дорогостоящие технические средства зондирования, такие как мультиспектральные и гиперспектральные камеры, лидары, выполняются в настоящее время в облегченном варианте для выполнения специфических задач зондирования с применением к БПЛА [11]. Вместе с тем, технические возможности БПЛА по сравнению с другими летательным аппаратами значительно ограничены [12-14].

БПЛА значительно более подвержены воздействию метеорологических факторов (ветер, дождь, снег и др.), имеют ограниченный киберфизический и энергетический ресурс [15].

В первую очередь можно отметить ограниченность энергообеспеченности БПЛА. Также возникают проблемы в оптимальном выборе траектории полета, в определении порядка коммуникации, в оптимальном распределении энергобаланса

БПЛА [16]. Главным выводом из вышеизложенного является то, что БПЛА должен работать в энергоинформационно – эффективном режиме функционирования. Целью настоящей работы является разработка методики вычисления оптимальных режимных параметров, обеспечивающих энергоинформационно – эффективный режим функционирования БПЛА. Основу предлагаемой методики составляет представление БПЛА в виде киберфизической системы, питаемой от электрического аккумулятора (батареи). Предлагаемый метод предусматривает проведения двухступенчатой оптимизации режима функционирования БПЛА.

## **2. Предлагаемый метод**

Предлагается двухступенчатый метод достижения энергоинформационно – эффективного функционирования, состоящий из двух ступеней (рис. 1).

1. Проведение оптимизации с целью определения режима энергоэффективного функционирования.
2. Определение условий режима энергоинформационно – эффективного режима функционирования.

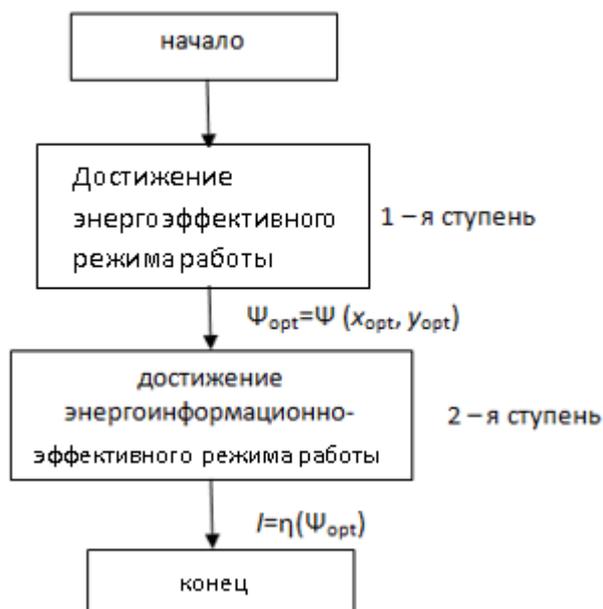


Рис. 1. Блок – схема алгоритма реализации предлагаемого метода энергоинформационной оптимизации

Последовательно рассмотрим вышеизложенные ступени оптимизации. В первой ступени осуществляется оптимизация с целью достижения энергоэффективного режима функционирования БПЛА.

Предлагаемый способ обеспечения энергоэффективного функционирования БПЛА базируется на представлении БПЛА в виде системы, состоящей из кибернетической, физической и энергетической подсистем (рис. 2).

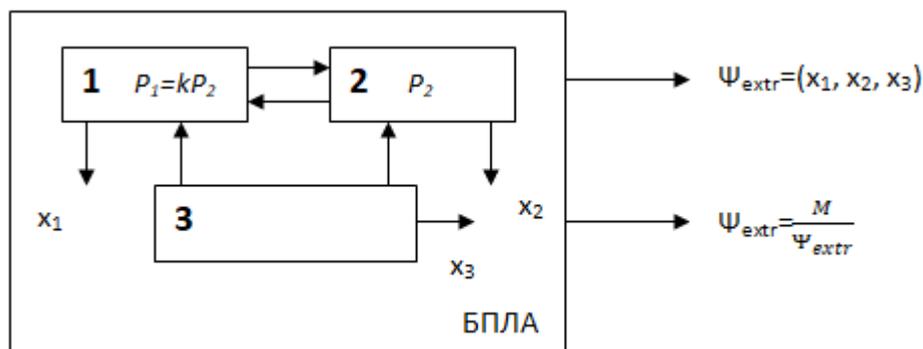


Рис. 2. Блочное представление БПЛА реализующего режим энерго – эффективного функционирования.

Принятые обозначения:  $P_1$  – показатель энергопотребления кибернетической подсистемы (1);  $P_2$  – показатель энергопотребления физической подсистемы (2);  $x_1$  – показатель энерго – эффективного режима кибернетической подсистемы;  $x_2$  – показатель энерго – эффективного режима физической подсистемы;  $x_3$  – показатель энерго – эффективного режима энергетической подсистемы (3);  $\psi_{extr}$  – критерий энерго – эффективного режима;  $\varphi_{extr}$  – критерий энерго – информационно – эффективного режима функционирования БПЛА.

В первой ступени осуществляется следующие операции:

1. Вычисление величин  $x_1, x_2, x_3$ ;
2. Вычисление критерия  $\psi_{extr}$  по заданному выражению

$$\psi_{extr} = \psi(x_1, x_2, x_3)$$

Во второй ступени предлагаемого метода определяется критерий  $\varphi_{extr}$  по заданному выражению

$$\varphi_{extr} = \varphi(\psi_{extr})$$

### 3. Конкретная реализация предлагаемого метода

Рассмотрим вопросы конкретной реализации предложенного метода достижения энергоинформационной эффективности БПЛА.

Рассмотрим первую ступень оптимизации режима функционирования БПЛА по критерию

$$P_{\Sigma} = (P_{10} + P_2) \rightarrow \min$$

где  $P_{10}$  – энергопотребление кибернетической части системы, заданная постоянная величина;  $P_0$  – энергопотребление физической части БПЛА, подлежащее минимизации;  $M$  – количество информации, принимаемой БПЛА в течение полета на трассе полета длиной  $\psi_{extr}$ . В первой ступени оптимизации  $\psi_{extr}$  определяется как

$$\psi_{extr} = V_{opt} \cdot T_{on}(i_{min}) \quad (1)$$

где  $V$  – скорость полета БПЛА, когда  $P_0$  – достигает минимума;  $T_{on}(i_{min})$  – время полета БПЛА, в течение которой, при заданной емкости батареи при вычисленном минимальном токе нагрузки разряд батареи минимален.

Как видно из (1) показатель  $\psi_{extr}$  является расстоянием, пройденным БПЛА в течение  $T_{on}(i_{min})$  со скоростью  $V$ .

Следует отметить, что задача определения скорости  $V_{opt}$ , при которой энергопотребление физической части БПЛА минимально решена в работах [6,7]. Приведем наиболее простое решение данного вопроса, изложенное в [17]. Согласно [17-18], минимальное энергопотребление физической части БПЛА достигается по минимуму функции

$$F = C_1 V^3 + \frac{C_2}{V}, \quad (2)$$

где  $C_1, C_2$  – конструктивные постоянные физической части БПЛА.

Графическое отображение зависимости (2) приведено на рис. 3.

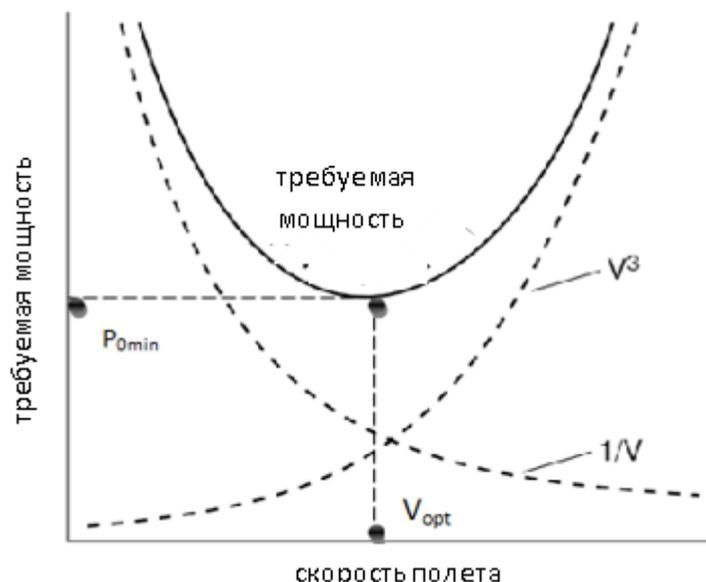


Рис. 3. Графическая иллюстрация зависимости энергопотребления физической части от скорости полета БПЛА [6]

Следует отметить, что  $V_{opt}$  однозначно определяет значение  $P_{0min}$ , при котором потребление тока от батарей минимально.

Предварительно выясним вопрос об определении минимально потребляемого тока батареи при выполнении следующих дополнительных условий:

1. Емкость батареи задается и учитывается в расчетах.
2. Требуется достичь минимального уменьшения напряжения батареи при вычисленном токе нагрузки в течение заданного времени.

Согласно [19-20], разряд батареи моделируется следующим выражением.

$$E = E_0 - R \cdot i - \frac{k \cdot Q}{Q - iT} (t^* + iT) + A \cdot \exp(-B \cdot iT) \quad (3)$$

где  $E_0$  – постоянное напряжение батареи;

$k$  – поляризационная постоянная;

$Q$  – емкость батареи;

$i$  – ток разряда;

$R$  – внутреннее сопротивление батареи;

$T$  – время разряда;

$i^*$  – энергопотребление на фильтрацию высокочастотных составляющих сигнала в цели питания;

$A, B$  – показатели экспоненциальных переходных процессов.

В первом приближении можно допустить, что

$$\frac{k \cdot Q}{Q - iT} \gg Ri + \frac{kQi^*}{Q - iT} - A \cdot \exp(-B \cdot iT) \quad (4)$$

Таким образом, в первом приближении из (3) имеем

$$E = E_0 - \frac{kQ \cdot iT}{Q - iT} \quad (5)$$

На основании (5) можно заключить, что мощность  $P(T)$  потребляемая от батареи, потраченная на функционирование в течение  $T$  может быть вычислена по формуле

$$P(T) = \frac{kQ \cdot i^2 T}{Q - iT} \quad (6)$$

С учетом вышеизложенного на основе (6) для  $P_{\text{omin}}$  запишем:

$$P_{0\min} = \frac{kQ \cdot i^2 T}{Q - iT} \quad (7)$$

Из (7) получим

$$P_{0\min} \cdot Q - P_{0\min} i \cdot T = kQ \cdot i^2 \cdot T \quad (8)$$

Из (8) получаем следующее квадратное уравнение:

$$i^2 + \frac{P_{0\min}}{kQ} \cdot i - \frac{P_{0\min}}{kT} = 0 \quad (9)$$

Решение квадратного уравнения (9) дает

$$i = -\frac{P_{0\min}}{2kQ} \pm \sqrt{\left(\frac{P_{0\min}}{2kQ}\right)^2 + \frac{P_{0\min}}{kT}} \quad (10)$$

Таким образом, согласно полученному выражению (10) при известных значениях  $P_{0\min}$ ,  $k$ ,  $Q$ , задаваясь величина  $T$  можно вычислить необходимую величину тока нагрузки  $i$ .

Что касается второй ступени оптимизации функционирования БПЛА, то здесь количество информации, добываемой в течение полета  $T$  в простейшем случае может быть определено как

$$M = \frac{T}{\Delta T} \cdot \log_2 \left( \frac{U_{\max}}{\Delta U} + 1 \right) \quad (11)$$

где  $\Delta T$  – временная дискрета передачи элементов информации;  $U_{\max}$  – максимально возможная величина радиометрического сигнала;  $\Delta U$  – шумы в канале;  $T$  – время полета.

С учетом вышеизложенного можно предложить следующую методику вычисления показателей полета БПЛА в режиме энергоинформационно – эффективного дистанционного зондирования.

1. При заданных  $M$ ,  $\Delta t$ ,  $U_{\max}$ ,  $\Delta U$  на основании выражения (11) вычисляется  $T$ .
2. При известных  $P_{0\min}$ ,  $k$ ,  $Q$  и  $T$  определяется значение  $i$ , обеспечивающее требуемый режим функционирования.
3. Вычисляется критерий производительности БПЛА в режиме дистанционного зондирования:

$$\varphi = \frac{M}{\psi} = \frac{T}{\Delta t} \frac{\log\left(\frac{U_{\max}}{\Delta U} + 1\right)}{V_{opt} \cdot T} = \frac{\log\left(\frac{U_{\max}}{\Delta U} + 1\right)}{\Delta t \cdot V_{opt}} = \frac{\log\left(\frac{U_{\max}}{\Delta U} + 1\right)}{\Delta \psi}$$

Таким образом, физический смысл  $\varphi$  заключается в количестве энтропии получаемого БПЛА при проходе расстояния  $\Delta \psi$  за время временной дискретности  $\Delta t$ .

#### 4. Заключение

Таким образом, сформирована и решена задача оптимизации функционирования БПЛА дистанционного зондирования, выполняющего полет в энергоинформационно – эффективном режиме. БПЛА представляется в качестве системы состоящей из трех взаимосвязанных частей. Для анализа используется известный результат о том, что энергопотребление физической части БПЛА имеет минимум от скорости полета. Также используется известное выражение разряда емкости аккумулятора от тока нагрузки. Получено квадратное уравнение, решение которого позволило определить оптимальную величину тока нагрузки.

В результате проведенного исследования получены формулы для вычисления предлагаемых критериев оптимальности ступеней предложенного метода двухступенчатой оптимизации БПЛА дистанционного зондирования.

### **Библиографический список**

1. Nex F., Remondino F. UAV for 3D mapping applications: A review // Applied Geomatics, 2014, vol. 6, pp. 1 - 15. DOI: [10.1007/s12518-013-0120-x](https://doi.org/10.1007/s12518-013-0120-x)
2. Bhardwaj A., Sam L., Marrin-Torres F.J., Kumar R. UAVs as remote sensing platform in glaciology: Present applications and future prospects // Remote Sensing of Environment, 2016, vol. 175, pp. 196 - 204. DOI: [10.1016/j.rse.2015.12.029](https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.12.029)
3. Torresan C., Berton A., Coretenuto F., Di Gennaro S.F., Gioli B., Matese A., Miglietta F., Vagnoli C., Zaldei A., Wallace L. Forestry applications of UAVs in Europe: A review // Journal of Remote Sensing, 2017, vol. 38, pp. 2427 - 2447.
4. Crommelinck S., Bennet R., Gerke M., Nex F., Yang M.Y., Vosselman G. Review of automatic feature extraction from high-resolution optical sensor data for UAV-based cadastral mapping // Journal of Remote Sensing, 2016, vol. 8 (8), pp. 689. DOI: [10.3390/rs8080689](https://doi.org/10.3390/rs8080689)
5. Yan W.Y., Shaker A., El-Ashmawy N. Urban land cover classification using airborne LIDAR data: A review // Remote Sensing of Environment, 2015, vol. 158, pp. 295 - 310. DOI: [10.1016/j.rse.2014.11.001](https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.11.001)

6. Смирнов А.А. Использование метода внесения цифровых предсказаний для повышения энергоэффективности инфокоммуникационных радиосредств // Труды МАИ. 2019. № 105. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=104214>
7. Тимошенко А.В., Кошкарев А.С. Сравнительный анализ энтропийной метрики информативности оптических изображений пространственных объектов // Труды МАИ. 2020. № 112. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=116348>. DOI: [10.34759/trd-2020-112-10](https://doi.org/10.34759/trd-2020-112-10)
8. Протасов В.И., Шаронов А.В., Шарнин М.М., Клименко А.С. Минимизация вероятности ошибок в распознавании объектов бортовыми компьютерными системами беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ. 2017. № 92. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=77251>
9. Трохов Д.А., Туркин И.К. К вопросу проектирования беспилотного летательного аппарата для решения разведывательных задач на море // Труды МАИ. 2014. № 78. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=53735>
10. Нго К.Т., Нгуен В.В., Харьков И.Ю., Усина Е.Е., Шумская О.О. Функциональная модель взаимодействия БЛА с наземной роботизированной платформой при решении сельскохозяйственных задач // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2018. № 6-3 (86). С. 41 - 50.
11. Каримов А.Х. Возможности беспилотных авиационных систем следующего поколения // Труды МАИ. 2011. № 47. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=26768>

12. Красильщиков М.Н., Серебряков Г.Г. Современные информационные технологии в задачах навигации и наведения беспилотных маневренных летательных аппаратов. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. - 556 С.
13. Востриков О.В. Обоснование облика навигационной системы ударного беспилотного летательного аппарата // Труды МАИ. 2011. № 48. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=26757>
14. Корченко А.Г., Ильяш О.С. Обобщенная классификация беспилотных летательных аппаратов: збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. Вип.4 (33). - Харьков: ХУПС, 2012. - С. 27 - 36.
15. Бухалев В.А., Болдинов В.А. Фильтрация сигналов при низкочастотных помехах в измерительно-информационных системах беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ. 2017. № 97. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=87283>
16. Дивеев А.И., Конырбаев Н.Б. Управление группой квадрокоптеров методом вариационного аналитического программирования // Труды МАИ. 2017. № 96. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=85774>
17. Yong Z., Zhang R. Energy-efficient UAV communication with trajectory optimization // IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, pp. 99. DOI: [10.1109/TWC.2017.2688328](https://doi.org/10.1109/TWC.2017.2688328)
18. Dukkanci O., Kara B. Y., Bektas T. Minimizing energy and cost in range-limited drone deliveries with speed optimization // Transportation Research. Part C. Emerging Technologies, 2021, vol. 125 (4). DOI: [10.1016/j.trc.2021.102985](https://doi.org/10.1016/j.trc.2021.102985)

19. Xu G., Liu L., Zhang X. Modeling and performance analysis for low altitude electrical UAVs // International Conference on Civil, Transportation and Environment. ICCTE, 2016. DOI: [10.2991/iccte-16.2016.184](https://doi.org/10.2991/iccte-16.2016.184)
20. Chan H. L., Sutanto D. A new battery model for use with battery energy storage systems and electrical vehicles power systems // Conference: Power Engineering Society Winter Meeting, IEEE, 2000, vol. 1. DOI: [10.1109/PESW.2000.850009](https://doi.org/10.1109/PESW.2000.850009)

# **Indicators computing technique for energy-information effectiveness mode indicators of unmanned aerial vehicles for remote sensing functioning**

**Zulfugarli P.R.**

*Azerbaijan Technical University,*

*25, Hussein Javid prosp., Baku, 370073, Azerbaijan*

*e-mail: [Peri.rzayeva30@gmail.com](mailto:Peri.rzayeva30@gmail.com)*

## **Abstract**

One of the major UAV shortages is limitation imposed on its energy provision. This shortage necessitates optimal distribution of the UAV energy balance by optimal selection of its flight trajectory and communication order. Alongside with that, the final product of the reconnaissance type UAV is the information volume collected while the performed flight. The main inference from the above said is that the UAV should operate in the energy-informational effective functioning mode. The purpose of the presented work consists in developing the technique for optimal mode parameters computing, ensuring energy-informational effective mode of the UAV functioning.

The suggested technique is based on the UAV representation of as a cyber-physical system fed by electric battery, and envisages performing a two-step optimization of the UAV functioning. The first step implements optimization of energy consumption optimization based of the battery discharge model. The optimization criterion at the first step is the indicator of the distance covered, defined as a product of the optimal speed of the cyber-physical system and the flight time during which the battery discharge was minimum at the minimum computed load current and specified battery capacity. At the second stage,

the optimization criterion is the quantity of the procured information at the fixed length of the passed flight track.

The authors formed and solved the problem of the remote sensing UAV functioning optimization, performing the flight in energy-informational effective mode. Quadratic equation, which solution allowed determining the optimal load current value was obtained. Formulas for computing the stages optimality criteria of the suggested two-stage optimization method of the remote sensing UAV were obtained as well.

The obtained results may be employed in developing highly effective UAV implemented with a view of remote sensing information collecting and processing in the extended time functioning.

The major outcome of performed study consists in the possibility of the UAV energy-informational functioning implementation intended for of information collecting and remote sensing.

**Keywords:** unmanned aerial vehicle (UAV), energy provision, cyber-physical system, optimization, energy-information criterion, effectiveness.

### **References**

1. Nex, F., Remondino F. UAV for 3D mapping applications: A review, *Applied Geomatics*, 2014, vol. 6, pp. 1 - 15. DOI: [10.1007/s12518-013-0120-x](https://doi.org/10.1007/s12518-013-0120-x)

2. Bhardwaj A., Sam L., Marrin-Torres F.J., Kumar R. UAVs as remote sensing platform in glaciology: Present applications and future prospects, *Remote Sensing of Environment*, 2016, vol. 175, pp. 196 - 204. DOI: [10.1016/j.rse.2015.12.029](https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.12.029)
3. Torresan C., Berton A., Coretenuto F., Di Gennaro S.F., Gioli B., Matese A., Miglietta F., Vagnoli C., Zaldei A., Wallace L. Forestry applications of UAVs in Europe: A review, *Journal of Remote Sensing*, 2017, vol. 38, pp. 2427 - 2447.
4. Crommelinck S., Bennet R., Gerke M., Nex F., Yang M.Y., Vosselman G. Review of automatic feature extraction from high-resolution optical sensor data for UAV-based cadastral mapping, *Journal of Remote Sensing*, 2016, vol. 8 (8), pp. 689. DOI: [10.3390/rs8080689](https://doi.org/10.3390/rs8080689)
5. Yan W.Y., Shaker A., El-Ashmawy N. Urban land cover classification using airborne LIDAR data: A review, *Remote Sensing of Environment*, 2015, vol. 158, pp. 295 - 310. DOI: [10.1016/j.rse.2014.11.001](https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.11.001)
6. Smirnov A.A. *Trudy MAI*, 2019, no. 105. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=104214>
7. Timoshenko A.V., Koshkarev A.S. *Trudy MAI*, 2020, no. 112. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=116348>. DOI: [10.34759/trd-2020-112-10](https://doi.org/10.34759/trd-2020-112-10)
8. Protasov V.I., Sharonov A.V., Sharnin M.M., Klimenko A.S. *Trudy MAI*, 2017, no. 92. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=77251>
9. Trokhov D.A., Turkin I.K. *Trudy MAI*, 2014, no. 78. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=53735>

10. Ngo K.T., Nguen V.V., Khar'kov I.Yu., Usina E.E., Shumskaya O.O. *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2018, no. 6-3 (86), pp. 41 - 50.
11. Karimov A.Kh. *Trudy MAI*, 2011, no. 47. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=26768>
12. *Sovremennye informatsionnye tekhnologii v zadachakh navigatsii i navedeniya bespilotnykh manevrennykh letatel'nykh apparatov*. Edited by M.N.Krasilnikov and G.G.Serebryakov. (State-of-the-art information technologies in tasks of navigation and guiding of tactical unmanned aerial vehicles), Moscow, FIZMATLIT, 2009, 556 p.
13. Vostrikov O.V. *Trudy MAI*, 2011, no. 48. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=26757>
14. Korchenko A.G., Il'yash O.S. *Obobshchennaya klassifikatsiya bespilotnykh letatel'nykh apparatov: zbirnik naukovikh prats' Kharkivskogo universitetu Povitryanykh Sil* (Generalized classification of unmanned aerial vehicles. Collection of scientific works of Kharkov University of Air Forces), Khar'kov, KhUPS, 2012, issue. 4 (33), pp. 27 - 36.
15. Bukhalev V.A., Boldinov V.A. *Trudy MAI*, 2017, no. 97. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=87283>
16. Diveev A.I., Konyrbaev N.B. *Trudy MAI*, 2017, no. 96. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=85774>
17. Yong Z., Zhang R. Energy-efficient UAV communication with trajectory optimization, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2016, pp. 99. DOI: [10.1109/TWC.2017.2688328](https://doi.org/10.1109/TWC.2017.2688328)

18. Dukkanci O., Kara B. Y., Bektas T. Minimizing energy and cost in range-limited drone deliveries with speed optimization, *Transportation Research. Part C. Emerging Technologies*, 2021, vol. 125 (4). DOI: [10.1016/j.trc.2021.102985](https://doi.org/10.1016/j.trc.2021.102985)
19. Xu G., Liu L., Zhang X. Modeling and performance analysis for low altitude electrical UAVs, *International Conference on Civil, Transportation and Environment. ICCTE*, 2016. DOI: [10.2991/iccte-16.2016.184](https://doi.org/10.2991/iccte-16.2016.184)
20. Chan H.L., Sutanto D. A new battery model for use with battery energy storage systems and electrical vehicles power systems, *Conference: Power Engineering Society Winter Meeting*, IEEE, 2000, vol. 1. DOI: [10.1109/PESW.2000.850009](https://doi.org/10.1109/PESW.2000.850009)