

Г.А.Гусейнов, П.Р.Зульфугарлы (Азербайджанский Технический Университет),
И.Г.Абдурахманова (Научно-Исследовательский Институт Аэрокосмической
Информатики НАКА)

ЭМПИРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПОДЪЕМА БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ В РЕЖИМЕ ГРУППОВОГО ПОЛЕТА

Введение. Как отмечается в работе [1], эффективность использования энергии на борту беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) является важнейшим качеством для достижения поставленных перед беспилотником целей, для увеличения времени функционирования и других функциональных показателей. Согласно [2], при отсутствии точной информации о требуемой энергии для выполнения поставленной миссии нельзя подсказать необходимую длительность полета, так как эффективность такого полета будет низкой. Как указывается в работе [3], время полета БПЛА зависит в первую очередь от энергопотребления системы тяги и ограничивается энергозапасом на борту. Согласно [4], в настоящее время в исследованиях, посвященных достижению максимального времени полета БПЛА в основном рассмотрены вопросы разработки оптимизационных алгоритмов, анализа факторов, влияющих на максимальное время функционирования и энергопотребление БПЛА, таких как погодные условия, скорость полета, вес нагрузки [5,6,7]. Вместе с тем, как отмечается в [8], энергоэффективное планирование всякой миссии, выполняемой БПЛА является важнейшей задачей. При этом для достижения высокой энергоэффективности БПЛА необходимо определить и минимизировать энергопотребление те функциональные операции БПЛА, которые в наибольшей степени потребляют энергию. По этой причине разрабатываются модели энергопотребления БПЛА, при выполнении различных операций [9]. В частности, в работе [8] 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 [10]. Там 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 [11] была использована методика «белого ящика» для анализа энергопотребления с учетом динамики передвижения транспортного средства, а в работе [2] для этой цели был применен статистический подход, используя регрессионную модель. Как отмечается в работе [8], для этих целей наиболее удобной оказывается метод «черного ящика», которая более информативна для анализа различных состояний полета БПЛА. Например, в работе [8] 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 [8].

$$E = -16,9396H^2 + 216,6944H - 157,9473, \quad (2)$$

где E - измеряется в Джоулях, H - в метрах.

График выражения (2) приведена на рис. 1.

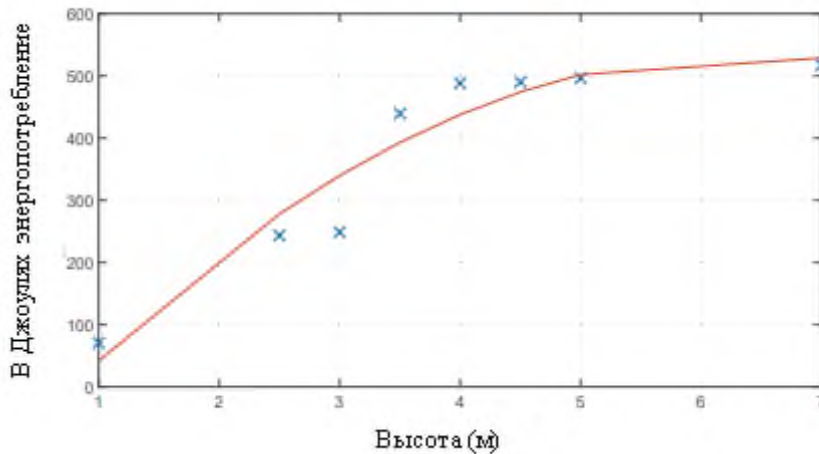


Рис.1. Графическое представление зависимости потребляемой энергии (в Джоулях) от высоты подъема (в метрах) БПЛА

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

Материалы и методы. В общем случае энергию, потребляемую БПЛА при вертикальном полете определим как

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

где T_0 - время вертикального полета на заданную высоту H_0 ; P_{cp} - 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

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

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

$$T_0 = \frac{-a_1 H^2 + a_2 H - a_3}{P_{cp}}. \quad (7)$$

Рассмотрим режим группового полета некоторого количества беспилотников. Отметим, что режим группового полета БПЛА в последние годы широко обсуждается в соответствующих публикациях [12,13,14]. Однако, проведенный анализ имеющихся публикаций по соответствующей теме показал отсутствие результатов по исследованию быстродействия вертикального полета БПЛА в группе.

Далее, 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:

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

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

$$T_0 = \frac{-a_1 H(P_{cp})^2 + a_2 H(P_{cp}) - a_3}{P_{cp}}. \quad (12)$$

Среднесуммарную величину T_0 по всем i определим как

$$T_{0cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[\frac{-a_1 H(P_{cp.i})^2 + a_2 H(P_{cp.i}) - a_3}{P_{cp.i}} \right]. \quad (13)$$

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

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

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

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

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

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

где λ - множитель Лагранжа.

Решение вышеизложенной оптимизационной задачи согласно [15] должна удовлетворить условию

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

Из (17) получаем:

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

Из (18) находим:

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

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

$$\int_0^{P_{ср.мах}} \left(\frac{P_{ср} \lambda + a_2}{2a_1} \right) dP_{ср} = C_{0.н.} \quad (20)$$

Из (20) находим:

$$\frac{\lambda}{2a_1} \cdot \frac{P_{ср.мах}^2}{2} + \frac{a_2}{2a_1} P_{ср.мах} = C_{0.н.} \quad (21)$$

Из (21) получим:

$$\lambda = \frac{C_{0.н.} - \frac{a_2}{2a_1} P_{ср.мах}}{\frac{P_{ср.мах}^2}{4a_1}} = \frac{4a_1 C_{0.н.}}{P_{ср.мах}^2} - \frac{2a_2}{P_{ср.мах}}. \quad (22)$$

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

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

Можно показать, что при решении (23) функционал F достигает максимума. Для этого следует взять производную (18) по $H(P_{ср})$ и убедиться, что результат

всегда является отрицательной величиной, что и есть признаком того, что F при условии (23) достигает максимума.

Таким образом, полученное решение (23) обеспечивает максимальную величину $T_{0,ср.н.}$ определяемую как

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

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 членами 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. Решение оптимизационной задачи позволило получить решение в виде условия, при которой искомая среднесуммарная величина времени полета достигает максимума, что может быть истолковано как наихудший режим проведения групповых вертикальных полетов, которых следовало бы избегать.

Список литературы

1. Amoiralis E. I., Tsili M. A., Spathopoulos V., Hatziefremidis A. Energy efficiency optimization in UAVs: a review// Materials Science Forum Vol. 792. 2014. Pp. 281-286.
2. Prasetya A. S., Wai R. J., Wen Y. L., Wang Y. K. Mission-based energy consumption prediction of multicopter UAV// Digital Object Identifier. March 26, 2019. 10.1109/ACCESS.2019.2903644.
3. Hwang M. H., Cha H. R., Jung S. Y. Practical endurance estimation for minimizing energy consumption of multicopter unmanned aerial vehicles // Energies 2018. 11. 2221. Doi:10.3390/en11092221.
4. 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. <https://doi.org/10.3390/drones6080186>.
5. 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 // In information systems architecture and technology: Proceedings of 39th international conference on information systems architecture and technology-ISAT 2018. 2019. Pp. 173-184.
6. Lui Z., Sengupta R., Kurzhnskiy A. A power consumption model for multi-rotor small unmanned aircraft systems // In proceedings of the 2017 international conference on unmanned aircraft systems (ICUAS). China. 27-29 October 2017. Pp. 310-315.
7. Traub L. W. Validation of endurance estimates for battery powered UAVs // Aeronaut. J. 2013. 117. Pp.1155-1166.
8. Abeywickrama H. V., Jayawickrama B. A., He Y., Dutkiewicz E. Empirical power consumption model for UAVs.

9. Tseng C. M., Chau C. K., Elbassioni K., Khonji M. Flight tour planning with recharging optimization for battery operated autonomous drones // 2017. <https://arxiv.org/abs/1703.10049>.
10. Ahmedl S., Mohamed A., Harras K., Kholief M., Mesbah S. Energy efficient path planning techniques fo UAV-based systems with space discretization // IEEE wireless communications and networking conference (WCNC). 2016.
11. 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.
12. Zhou Y., Rao B., Wang W. UAV swarm intelligence: recent advances and future trends // Digital Object Identifier. 2020. 10.1109/ACCESS.2020.3028865.
13. Tahir A., Boling J., Haghbayan M. H., Toivonen H. T., Plosila J. Swarms of unmanned aerial vehicles- a survey // Journal of industrial information integration. 16. 100106. 2019.
14. Giles K. A framework for integrating the development of swarm unmanned aerial system doctrine and design // Public release. STO-MP-SET-222. <https://www.sto.nato.int/publications/STO%20Meeting%20Proceedings/STO-MP-SET-222/MP-SET-222-14.pdf>

H.Ə.Hüseynov, P.R.Zülfüqarlı, İ.H.Əbdurrəhmanova
Pilotsuz uçuş aparatlarının (PUA) qrupla uçuş rejimində vertikal qalxma
cəldliyinin empirik analizi
Xülasə

PUA-nın qrup şəklində vertikal uçuşunun optimallaşdırılması imkanlarına baxılmış, uçuş hündürlüyünün pilotsuz aparatın orta gücündən funksional asılılığı müəyyənləşdirilmişdir. Baxılan funksionalın optimal qiyməti hesablanmış və qrupda PUA-nın uçuş müddətinin orta qiymətinin ekstremumu təyin edilmişdir.

H.A.Huseynov, P.R.Zulfuqarli, I.H.Abdurahmanova
Empirical analysis of vertical ascent speed of unmanned aerial vehicles (UAV)
in group flight mode
Abstract

The possibilities of optimizing the vertical flight of the UAV as a group were considered, and the functional dependence of the flight height on the average power of the unmanned aerial vehicle was determined. The optimal value of the considered functional was calculated and the extremum of the average value of the UAV flight time in the group was determined.