

DOI: 10.12731/2227-930X-2023-13-4-37-49

УДК 629.7:007.52



Научная статья | Транспортные и транспортно-технологические системы

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ РОЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

*Т.В. Аветисян, Я.Е. Львович, А.П. Преображенский*

*Проведение разработки беспилотных летательных аппаратов можно рассматривать в качестве перспективного направления современной авиации. В них значительным образом снижены габаритные характеристики, если сравнивать с традиционными летательными аппаратами. Также можно формировать беспилотные летательные аппараты, которые нацелены на выполнение соответствующих задач. Для подготовки специалиста, управляющего беспилотным летательным аппаратом требуется меньше времени, если сравнивать с обычными летчиками. Работа связана с созданием математических моделей, которые позволяют проводить интегральным способом оценку эффективности и проведения кластерной структуризации роя беспроводных летательных аппаратов. При этом есть возможности для того, чтобы учесть ограниченность ресурсов, проводить перераспределение ресурсов. Происходит ресурсы распределение ресурсов среди кластеров, при этом приходится применять принцип обратных приоритетов. После этого реализуется распределение по беспилотным летательным аппаратам той сетевой структуры, которая была оптимизирована. Используется мониторинговая информация. Показаны основные этапы решения задачи, которые базируются на оптимизационных процедурах.*

**Ключевые слова:** *рой; беспилотный летательный аппарат; математическая модель; алгоритм; оптимизация*

*Для цитирования.* Аветисян Т.В., Львович Я.Е., Преображенский А.П. Моделирование и оптимизация роя беспилотных летательных аппаратов // *International Journal of Advanced Studies*. 2023. Т. 13, № 4. С. 37-49. DOI: 10.12731/2227-930X-2023-13-4-37-49

Original article | Transport and Transport-Technological Systems

## SIMULATION AND OPTIMIZATION OF A SWARM OF UNMANNED AERIAL VEHICLES

*T.V. Avetisyan, Ya.E. Lvovich, A.P. Preobrazhensky*

*The development of unmanned aerial vehicles can be regarded as a promising direction of modern aviation. They have significantly reduced dimensional characteristics, if compared with traditional aircraft. It is also possible to form unmanned aerial vehicles, which are aimed at performing corresponding tasks. It takes less time to train a specialist to fly an unmanned aerial vehicle compared to conventional pilots. The work is related to the creation of mathematical models that allow an integral way to evaluate the effectiveness and conduct cluster structuring of a swarm of wireless aircraft. At the same time, there are opportunities to take into account the limited resources, to carry out redistribution of resources. Resources are distributed among clusters, and the principle of inverse priorities has to be applied. After that, the distribution over the drones of the network structure that has been optimized is implemented. Monitoring information is used. The main stages of solving the problem, which are based on optimization procedures, are shown.*

**Keywords:** *swarm; unmanned aerial vehicle; mathematical model; algorithm; optimization*

**For citation.** Avetisyan T.V., Lvovich Ya.E., Preobrazhensky A.P. *Simulation and Optimization of a Swarm of Unmanned Aerial Vehicles. International Journal of Advanced Studies, 2023, vol. 13, no. 4, pp. 37-49. DOI: 10.12731/2227-930X-2023-13-4-37-49*

## **Введение**

Мы рассматриваем рой беспроводных летательных аппаратов в виде некоторой сетевой структуры. В такой сетевой структуре характеристики эффективности работы будут зависеть от развития и взаимодействия каждого из компонентов. Необходимо учитывать множество показателей в ходе проведения процессов мониторинга. Тогда возникают возможности для реализации контроля и управления с точки зрения того, насколько эффективны различные действия.

Ранжирование объектов может осуществляться, основываясь на результатах наблюдений. При этом учитывается тот уровень эффективности, который был достигнут. После этого, должно быть принято решение относительно редуцирования сетевой структуры. Кроме того, учитывается то, каким образом будет осуществляться процесс перераспределения ресурсного обеспечения.

Пусть мы рассматриваем систему роя беспилотных летательных аппаратов, которая описывается на основе кластерной структуры. Особенности ее функционирования базируются на таких факторах:

- при осуществлении процессов кластерной структуризации необходимо учитывать то, насколько получающиеся результаты зависят от того, какой тип структур и параметров в применяемых математических моделях, на базе которых рассматриваемый рой беспилотных летательных аппаратов будет подвергаться интегральному оцениванию эффективности;

- в ходе осуществления процессов группировки беспроводных летательных аппаратов в кластеры требуется, чтобы, когда формировались граничные условия, были учтены альтернативные подходы;

- ограниченные ресурсы будут перераспределяться внутри системы, с учетом использования кластерной структуры. Тогда могут быть получены эффективные характеристики беспроводных

летательных аппаратов. Необходимо использовать процедуры редукции в ходе работы;

- информационно-мониторинговая среда предоставляет возможности для того, чтобы получить всю требуемую информацию. Она будет использована при оценках эффективности работы систем беспилотных летательных аппаратов. В информационно-мониторинговой системе в каждом модуле необходимо использовать механизмы настройки [1, 2].

Целью работы являлась разработка математических моделей, на основе которых для систем роя беспроводных летательных аппаратов можно осуществлять оценку эффективности функционирования.

### **Описание математической модели роя беспилотных летательных аппаратов**

Требуется провести трансформацию мониторинговой информации. При этом реализуется многовариантный выбор по моделям, которые дают возможности для получения интегральных оценок. С учетом требований задач, в которых рассматриваются процессы структуризации по кластерам. При этом модели применяются с точки зрения их возможностей.

Дадим пояснение особенностей трансформации мониторинговой информации. Способы, которые направлены на реализацию связей между управляющим центром и рассматриваемыми беспилотными летательными аппаратами, позволяют в ходе практического использования на основе кластерных подходов сформировать соответствующую эффективную систему:

- объекты, которые относятся к кластерам-лидерам будут реализовывать процедуры поглощения. В этой связи будет происходить уменьшение числа объектов внутри кластеров. Тогда можно наблюдать процессы редукции в подмножествах объектов. Происходит изменение в том, какая будет по ним нумерация;

- если будет наблюдаться назначение дополнительной компоненты в ресурсе  $R$ , тогда можно говорить о росте эффективности работы объектов. В таком случае объекты будут перемещаться между кластерами. Происходит изменение в том, какая будет по ним нумерация.

По первому этапу сеть роя беспилотных летательных аппаратов будет редуцирована. Задача решается в несколько этапов. При этом эффективность функционирования таких объектов будет выровнена. В целевой функции по уровню нижней оценки будет происходить процесс роста [3, 4].

В интеграционном подходе в ходе решения рассматриваемой задачи можно выделить несколько шагов. Происходит выбор подмножества объектов  $O_t$  ( $t = \overline{1, T}$ ), которое будет связано с нижним уровнем. При этом такие объекты характеризуются низкими интегральными оценками  $Y_t$  ( $t = \overline{1, T}$ ). Объекты-лидеры могут осуществлять процедуры поглощения их, с учетом того, что интегральная оценка  $Y_1$  ( $1 = \overline{1, L}$ ),  $L = T$ ,  $Y_1 \gg Y_t$  характеризуется высокими уровнями. Есть возможности для формирования интегральной оценки  $Y_{it} = f(Y_1, Y_t) < Y_1$ , ( $1 = \overline{1, L}$ ,  $t = \overline{1, T}$ ), которая будет соответствовать новому объекту.

Тогда можно говорить о реализации итерационного процесса. При этом новая группа объектов-лидеров, будет выделяться в ходе того, как в редуцированной системе будет продолжаться интеграционный процесс. Новое множество объектов будет сформировано и т.д.

Необходимо опираться на оптимизационные подходы при анализе рассматриваемой задачи. В ней необходима поддержка роста по уровню нижних оценок. При этом важно, чтобы относительно любого из объектов  $O_l$  для объектов  $O_t$ , было обеспечено поглощение [5, 6].

При анализе объектов-лидеров необходимо стремиться к обеспечению минимизации интегральной оценки  $Y_iM$ . Происходит формирование булевых переменных для того, чтобы обеспечить создание бикритериальной оптимизационной модели:

$$x_{it} = \begin{cases} 1, & \text{когда объектом } O_i \text{ происходит поглощение объекта } O_t, \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

в ней целевые функции представляются так

$$\sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T (Y_l - Y_{lt} x_{lt}) \rightarrow \min, \quad (1)$$

$$\min_{l \leq l \leq L} \left( \sum_{t=1}^T Y_{lt} x_{lt} \right) \rightarrow \max \quad (2)$$

запись ограничений представляется так

$$\sum_{l=1}^L x_{lt} = 1, t = \overline{1, T}, \quad \sum_{t=1}^T x_{lt} = 1, l = \overline{1, L}, \quad x_{lt} \in \{0, 1\}, t = \overline{1, T}, l = \overline{1, L}. \quad (3)$$

Ресурсное обеспечение, которое требуется для функционирования роя беспилотных летательных аппаратов должно быть распределено соответствующим образом. Для этого предлагается опираться на подход, в котором есть два этапа. На первом этапе ресурсы распределяются среди кластеров. На втором этапе происходит распределение объектов той сетевой структуры, которая была оптимизирована. Для первого этапа необходимо опираться на принцип обратных приоритетов.

Тогда необходимо проводить учет по кластеру общую потребность анализируемого беспилотного летательного аппарата. Кроме того, по каждому сформированному в системе кластеру требуется обозначать приоритет. С тем, чтобы по всей сетевой системе осуществлять процессы оптимизации мы можем использовать на практике комбинированный механизм [7]. При этом происходит разбиение по двум группам беспилотных летательных аппаратов в кластерах. С учетом того, что объекты будут близки к показателям объектов-лидеров, будет происходить формирование первой группы. Такие объекты, которые в последующем будут поглощаться объектами-лидерами, входят в состав второй группы.

Пусть общий ресурс  $R$  будет распределен соответствующим образом  $R_m$  ( $m = 1, M$ ). Важно при этом ориентироваться на то, какая будет принадлежность беспилотных летательных аппаратов к

кластеру в рамках принципа обратных приоритетов. Еще в системе по любому из кластеров ведется обозначение значений приоритетов. Происходит деление на поддерживающие R1 и развивающие R2 ресурсы, которые существуют в кластерах. Принципа обратных приоритетов применяется в ходе того, как распределяется поддерживающий ресурс. при учёте потребностей объектов. Также необходимо, чтобы был учет величин интегральных оценок эффективности. Оптимизационный подход применяется, когда распределяется второй вид ресурса [8].

Тогда будет рост в значениях эффективности беспилотных летательных аппаратов  $O_t$  ( $t_m = 1, T_m, m = 2, M$ ) относительно  $j$ -го показателя. С точки зрения объектов-лидеров можно говорить о том, что будут близкими значения такого показателя и среднего значения относительно кластера с номером  $m = 1$ . Тогда в ходе оценок функционирования системы мы должны учитывать несколько значения по  $j$ -му показателю, который относится к объекту  $O_t$  ( $t_m = 1, T_m, m = 2, M$ ) будут рассматриваться как достаточно близкие внутри объектов-лидеров к значениям такого показателя

$$a_{t_m j} = \frac{y_{t_j}}{y_{1j}}$$

В рассматриваемом выражении  $\bar{y}_{1j}$  показывает какое будет, среднее значение, которое относится к  $j$ -му показателю для беспилотных летательных аппаратов, соответствующим кластеру с номером 1. По булевым переменным ведется соответствующая оценка

$$x_{t_m j} = \begin{cases} 1, & \text{когда для объекта } O_{t_m} \text{ идет выделение развивающего ресурса,} \\ & \text{чтобы повышать эффективность по } j\text{-му показателю,} \\ 0, & \text{в противном случае, } t_m = 1, T_m, j = 1, J. \end{cases}$$

Относительно беспилотных летательных аппаратов, которые лежат в  $m$ -м кластере мы можем сформировать следующую оптимизационную модель:

$$\sum_{t_m=1}^{T_m} \sum_{j=1}^J a_{t_m j} x_{t_m j} \rightarrow \max, \tag{4}$$

$$\sum_{t_m=1}^{T_m} \sum_{j=1}^J r_{t_m j} x_{t_m j} \leq R_m^2, \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^J x_{t_m j} = 1, t_m = \overline{1, T_m}, x_{t_m j} \in \{0, 1\}, t_m = \overline{1, T_m}, j = \overline{1, J}. \quad (6)$$

Когда рассматриваемые беспилотные летательные аппараты внутри системы при кластерном разделении подвергаются экспертно-оптимизационному моделированию, то можно обозначить соответствующую процедуру. В ней выделяются такие шаги:

- 1) внутри системы относительно беспилотных летательных аппаратов формируется мониторинговая информация;
- 2) по беспилотным летательным аппаратам рассчитываются интегральные оценки;
- 3) с учетом величин интегральных оценок беспилотные летательные аппараты будут проранжированы;
- 4) с учетом граничных значений при заданном числе кластеров эксперты будут разделять множество беспилотных летательных аппаратов;
- 5) по соседним кластерам будет формироваться множество беспилотных летательных аппаратов;
- 6) по базовым показателям рассчитываются оценки эффективности беспилотных летательных аппаратов;
- 7) осуществляется процесс формирования оптимизационной модели;
- 8) будут реализовываться процедуры, связанные с рандомизированным поиском;
- 9) то, как формируется кластерное разделение иллюстрируется на базе наглядно-образной модели [9];
- 10) по соседним кластерам альтернативные варианты разделения будут сравниваться экспертом [10];
- 11) внутри зоны, где не будут совпадать эвристические и оптимизационные решения, будет происходить формирование множества беспилотных летательных аппаратов;

12) по распределению кластеров будет принят окончательный вариант.

Генетический алгоритм (ГА) предлагается использовать с тем, чтобы обеспечить реализацию такого решения. Будем считать, что размер популяции ГА равен  $N$ , по поколениям имеем максимальное число  $T$ , текущая популяция соответствует  $P_t$ .

Когда при многокритериальной оптимизации происходит решение задачи, тогда можно в генетическом алгоритме представить таким образом общую схему функционирования:

- 1) в ходе проведения процессов моделирования должна быть сформирована начальная популяция. В качестве нее мы выбираем  $P_0 = \emptyset$ ,  $t = 0$  ( $t = 0, \dots, T$ ). Процесс выбора индивида  $i$  реализуется с учетом того, что  $i = 1, \dots, N$ . При разработке модели учитывается допустимый генотип. Происходит добавление к множеству  $P_0$  ( $P_0 = P_0 + \{i\}$ );
- 2) требуется оценить характеристики популяции. Вектор значений целевых функций  $F(i)$  должен быть вычислен внутри популяции. Он, который связан с каждым индивидом  $i$ . При этом оценка скалярного значения того, какая будет приспособленность  $f(i)$  будет осуществляться в рамках соответствующего подхода;
- 3) особи отбираются в соответствии с заданными правилами;
- 4) реализуются процедуры скрещивания для особей;
- 5) новая популяция формируется в соответствии с заданными правилами;
- 6) возврат к п. 2 в случае, когда не будет происходить сходимости по популяции, в противном случае будет реализован останов;
- 7) после того, как задача решена, ее результатом после того, как выполнен алгоритм, множество всех недоминируемых индивидов.

## Выводы

В работе проведено рассмотрение особенностей систем роя беспилотных летательных аппаратов, которые характеризуются

на основе кластерной структуры. Анализируются вопросы, которые относятся к эффективности их функционирования. Даны предложения по разработке подхода, который в сетевой системе для объектов дает возможности для многовариантного моделирования эффективности. В нем с учетом требований кластерной структуризации можно осуществить такого варианта, который будет наиболее оптимальным. Он используется при рассмотрении моделей, которые необходимы для того, чтобы формировать интегральную оценку. При моделировании кластерной структуризации осуществлены исследования, на базе генетического алгоритма, связанные с множеством показателей эффективности.

### *Список литературы*

1. Миркина О.Н. Состояние транспортной отрасли России и основные тенденции её развития // International Journal of Advanced Studies. 2022. Т. 12. № 1. С. 104-122.
2. Львович Я.Е., Преображенский А.П., Преображенский Ю.П. Анализ некоторых проблем оптимального управления в сложных системах // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2022. № 2 (41). С. 93-95.
3. Preobrazhenskiy Yu.P., Chuprinskaya Yu.L., Ruzhicky E. The problems of process control in computer systems // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2022. № 1 (40). С. 92-94.
4. Воронов А.А., Блинов Р.А., Смирнов А.О., Иванов П.Т., Александров А.А. Применение методов системного анализа для повышения эффективности работы транспортных предприятий // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2022. № 1 (40). С. 114-117.
5. Рихтер Т.В., Белоус А.В. Автоматизация процесса учета оборудования на предприятии // International Journal of Advanced Studies. 2022. Т. 12. № 2. С. 69-85.
6. Зотова В.А., Тихонова Н.А., Феофанова Т.Д. Техническое состояние транспортных средств и его изменение в процессе эксплуатации // International Journal of Advanced Studies. 2021. Т. 11. № 3. С. 76-82.

7. Шакиров А.А., Зарипова Р.С. Особенности моделирования логистических систем // International Journal of Advanced Studies. 2019. Т. 9. № 4. С. 27-31.
8. Жилина А.А., Кострова В.Н., Преображенский Ю.П. Разработка методики постановки задачи выбора управленческого решения на основе оптимизационного подхода // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2018. Т. 6. № 1 (20). С. 243-253.
9. Грошев А.Г., Фролов В.Н., Федорков Е.Д. Построение онтологических моделей систем автоматизированного проектирования // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2020. № 4 (35). С. 52-56.
10. Львович Я.Е., Львович И.Я., Львович Э.М. Проблемы обработки цифровых сигналов в системах передачи информации // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2020. № 3 (34). С. 27-29.

### *References*

1. Mirkina O.N. International Journal of Advanced Studies, 2022, vol. 12, no. 1, pp. 104-122.
2. L'vovich Ya.E., Preobrazhenskiy A.P., Preobrazhenskiy Yu.P. Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy, 2022, no. 2 (41), pp. 93-95.
3. Preobrazhenskiy Yu.P., Chuprinskaya Yu.L., Ruzhicky E. Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy, 2022, no. 1 (40), pp. 92-94.
4. Voronov A.A., Blinov R.A., Smirnov A.O., Ivanov P.T., Aleksandrov A.A. Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy, 2022, no. 1 (40), pp. 114-117.
5. Rikhter T.V., Belous A.V. International Journal of Advanced Studies, 2022, vol. 12, no. 2, pp. 69-85.
6. Zotova V.A., Tikhonova N.A., Feofanova T.D. International Journal of Advanced Studies, 2021, vol. 11, no. 3, pp. 76-82.
7. Shakirov A.A., Zaripova R.S. International Journal of Advanced Studies, 2019, vol. 9, no. 4, pp. 27-31.
8. Zhilina A.A., Kostrova V.N., Preobrazhenskiy Yu.P. Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii, 2018, vol. 6, no. 1 (20), pp. 243-253.

9. Groshev A.G., Frolov V.N., Fedorkov E.D. Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy, 2020, no. 4 (35), pp. 52-56.
10. L'vovich Ya.E., L'vovich I.Ya., L'vovich E.M. Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy, 2020, no. 3 (34), pp. 27-29.

### **ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ**

**Аветисян Татьяна Владимировна**, преподаватель колледжа, специалист проектного отдела ВИВТ  
*Колледж ВИВТ; Автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования Воронежский институт высоких технологий*  
*ул. Ленина, 73а, г. Воронеж, 394043, Российская Федерация*  
*vtatyana\_avetisyan@mail.ru*

**Львович Яков Евсеевич**, профессор, доктор технических наук, профессор  
*Автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования Воронежский институт высоких технологий*  
*ул. Ленина, 73а, г. Воронеж, 394043, Российская Федерация*  
*Kotkovvivi@yandex.ru*

**Преображенский Андрей Петрович**, профессор, доктор технических наук, профессор  
*Автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования Воронежский институт высоких технологий*  
*ул. Ленина, 73а, г. Воронеж, 394043, Российская Федерация*  
*Kotkovvivi@yandex.ru*

### **DATA ABOUT THE AUTHORS**

**Tatiana V. Avetisyan**, project specialist VIVT  
*College of the Voronezh Institute of High Technologies; Voronezh Institute of High Technologies*

*73a, Lenin Str., Voronezh, 394043, Russian Federation*  
*vtatyana\_avetisyan@mail.ru*  
*ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3559-6070>*

**Jakov E. Lvovich**, Doctor of Technical Sciences, Professor  
*Voronezh Institute of High Technologies*  
*73a, Lenin Str., Voronezh, 394043, Russian Federation*  
*Komkovvivi@yandex.ru*  
*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7051-3763>*

**Andrey P. Preobrazhenskiy**, Doctor of Technical Sciences, Professor  
*Voronezh Institute of High Technologies*  
*73a, Lenin Str., Voronezh, 394043, Russian Federation*  
*Komkovvivi@yandex.ru*  
*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6911-8053>*

Поступила 14.06.2023

После рецензирования 10.07.2023

Принята 15.07.2023

Received 14.06.2023

Revised 10.07.2023

Accepted 15.07.2023