

DOI: 10.12731/2227-930X-2024-14-4-312

EDN: BLOMRG

УДК 629.735



Научная статья |

Системный анализ, управление и обработка информации, статистика

## АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК РОЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ НА ОСНОВЕ ПАССИВНОГО И АКТИВНОГО ЭКСПЕРИМЕНТОВ

*А.П. Преображенский, Т.В. Аветисян,  
Ю.П. Преображенский*

### *Аннотация*

**Состояние вопроса.** Беспилотные летательные аппараты в настоящее время активным образом используются в военной, гражданской и научной сферах деятельности. За счет использования роя возникают возможности по повышению эффективности использования беспилотных летательных аппаратов. В работе рассматриваются особенности определения характеристик роя беспилотных летательных аппаратов.

**Материалы и методы.** Проведен анализ решения задачи, связанной с определением однородных характеристик на основе пассивного и активного экспериментов. Происходит обозначение условий, которые разделяются по двум выборкам. Рассматриваются две гипотезы, которые соответствуют условию однородности компонент. Приведены основные этапы алгоритма в пассивном и активном эксперименте, на основе которого выделяются однородные компоненты. Критерий Стьюдента и критерий Фишера применяются для того, чтобы осуществить формирование регрессионных моделей. Проведено определение однородных компонент, в дальнейшем осуществлено их уменьшение. Определено критическое значение скорости, дана оценка по прогнозу скорости. Определены степени полиномов, которые образуют регрессионные модели.

**Результаты.** На основе предложенных в работе подходов проведен анализ роя беспилотных летательных аппаратов. Проведен анализ ключевых компонент роя, уменьшено их число. Погрешность прогноза крейсерских скоростей составила несколько процентов.

**Заключение.** Представленные подходы в работе являются универсальными и могут быть применены для разных роев беспилотных летательных аппаратов. Показаны возможности прогнозирования крейсерских скоростей.

**Ключевые слова:** беспилотные летательные аппараты; пассивный эксперимент; активный эксперимент; рой

**Для цитирования.** Преображенский А.П., Аветисян Т.В., Преображенский Ю.П. Анализ характеристик роя беспилотных летательных аппаратов на основе пассивного и активного экспериментов // International Journal of Advanced Studies. 2024. Т. 14, № 4. С. 65-82. DOI: 10.12731/2227-930X-2024-14-4-312

Original article |  
System Analysis, Management and Information Processing, Statistics

## ANALYSIS OF THE CHARACTERISTICS OF A SWARM OF UNMANNED AERIAL VEHICLES BASED ON PASSIVE AND ACTIVE EXPERIMENTS

*A.P. Preobrazhensky, T.V. Avetisyan,  
Yu.P. Preobrazhensky*

### *Abstract*

**Background.** Unmanned aerial vehicles are currently actively used in the military, civil and scientific spheres of activity. Due to the use of the swarm, there are opportunities to increase the efficiency of the use of unmanned aerial vehicles. The paper discusses the features of determining the characteristics of a swarm of unmanned aerial vehicles.

**Materials and methods.** The analysis of the solution of the problem related to the determination of homogeneous characteristics on the basis



of passive and active experiments is carried out. There is a designation of conditions that are divided into two samples. Two hypotheses that meet the condition of homogeneity of components are considered. The main stages of the algorithm in passive and active experiments, on the basis of which homogeneous components are distinguished, are given. The Student's criterion and the Fisher criterion are used to form regression models. Homogeneous components were determined, and then their reduction was carried out. The critical value of the speed is determined, and the speed forecast is estimated. The degrees of polynomials that form regression models are determined. Results. Based on the approaches proposed in the work, an analysis of a swarm of unmanned aerial vehicles is carried out. The analysis of the key components of the swarm was carried out, their number was reduced. The error in the forecast of cruising speeds was several percent.

**Conclusion.** The presented approaches in the work are universal and can be applied to different swarms of unmanned aerial vehicles. The possibilities of predicting cruising speeds are shown.

**Keywords:** unmanned aerial vehicles; passive experiment; active experiment; swarm

**For citation.** Preobrazhensky A.P., Avetisyan T.V., Preobrazhensky Yu.P. Analysis of the Characteristics of a Swarm of Unmanned Aerial Vehicles Based on Passive and Active Experiments. *International Journal of Advanced Studies*, 2024, vol. 14, no. 4, pp. 65-82. DOI: 10.12731/2227-930X-2024-14-4-312

## **Введение**

Актуальность исследования связана с тем, что беспилотные летательные аппараты (БПЛА) в настоящее время активно используются в различных сферах, в том числе в военной, гражданской авиации, при осуществлении исследований, для реализации развлечений [1]. Рой БПЛА может рассматриваться в виде новой концепции, связанной с тем, как применяются БПЛА. При этом существенным образом происходит повышение их эффективно-

сти. С тем, чтобы обеспечивать высокую стабильность и хорошую координацию в рое БПЛА необходимо учитывать то, как управление одним БПЛА будет оказывать влияние на их общую совокупность. Влияние оказывает степень однородности характеристик. Для оценки характеристик необходимо разрабатывать соответствующие математические модели.

Проведенный анализ литературных источников показал, что для того, чтобы планировать траектории беспилотных летательных аппаратов можно использовать два подхода [2]. Первый из них рассматривается как интеллектуальный. В нем применяются методы нечеткой логики и нейросетевого моделирования. Второй метод является графоаналитическим. В нем требуется учитывать потенциальные поля, а также диаграммы Вороного. На основе второго метода можно осуществить организацию безопасного перемещения беспилотных летательных аппаратов внутри априорно неопределенных сред. Для того, чтобы между двумя точками, которые лежат на траектории полета беспилотного летательного аппарата, определить длину, можно опираться, например, на нейростоевое моделирование [3]. При движении беспилотных летательных аппаратов в ряде случаев необходимо решать задачи, в которых требуется осуществлять обгибание статических препятствий [4]. Для того, чтобы оценивать предельные отклонения [5] беспилотных летательных аппаратов в ряде случаев необходимо составить соответствующие системы дифференциальных уравнений, для которых требуется обеспечить гарантированные методы их решения.

В известных литературных источниках нет исследований, связанных с рассмотрением особенностей активного и пассивного эксперимента, а также результатов, полученных на основе таких подходов. Этим обусловлена новизна настоящей работы.

**Целью работы** является исследование возможностей использования методики пассивного и активного эксперимента для оценки характеристик роя БПЛА.

### Описание подхода на основе пассивного эксперимента

Проведение идентификации роя БПЛА, для которых характеристики являются различными [6-8], должно основываться на том, что описываются условия неоднородности  $r_1, \dots, r_k$ . С учетом таких условий будет соблюдение принадлежности к однородным компонентам  $f_i^{n_1}(u), \dots, f_i^{n_k}(u)$  по выборкам, соответствующим одномерной выходной переменной  $y_i (i = \overline{1, m})$ .

Если для роя БПЛА будет возрастать степень неоднородности, то при этом происходит рост объема и времени эксперимента. При этом важно осуществлять формирование подходов, в которых однородные компоненты в БПЛА будут ускоренным образом идентифицированы. Используются данные по пассивному эксперименту, которые соотнесены с каждым  $k$ -м ( $k = 1, \dots, N$ ) наблюдением выходной переменной  $y[k]$ , в качестве нее, например, может рассматриваться скорость БПЛА. На их основе происходит определение соответствующих переменных, которые будут на входе  $x_i[k] (i = \overline{1, d})$  а также воздействий, осуществляющих процессы управления  $u_j [k] (j = \overline{1, n})$ .

Требуется относительно выходных переменных  $y$  осуществлять процесс анализа по выборкам. Тогда важно по управляющим воздействиям и входным переменным определять необходимые условия [9, 10]. В ходе решения задачи дихотомический подход применяется по каждому декомпозиционному шагу.

Требуется рассмотрение двух гипотез, чтобы дать оценку относительно однородности [7]:

$H_1$  – по выборкам  $y^{(P)}$  относительно дисперсии будет неоднородность.

$H_2$  – по выборкам  $y^{(P)}$  относительно дисперсии будет однородность.

Проводится анализ того, какая из гипотез будет выполнена с учетом уровне значимости  $q\%$  на основе статистических критериев, сравниваемых с критическими значениями. Соответствующие множества переменных  $x_i$  и  $u_j$  определяются при выполнении

гипотезы  $H_1$ , которые ведут к тому, что будет неоднородность в математическом описании.

Проведем анализ для переменной  $x_i$ , которая будет на входе. С учетом условия

$$x_{i\min} \leq x_i \leq x_{i\text{гр}}; \quad (1)$$

$$x_{i\text{гр}} \leq x_i \leq x_{i\max}. \quad (2)$$

будет разделение выборки, соответствующей выходной переменной  $y[k]$ .

Реализуется формирование уравнения регрессии, которое соответствует каждой группе (1), (2). При этом для дискретных моментов времени  $[k]$  определены значения по выходным переменным:

$$y[k] = f(y[k-1], \Delta y[k]), l = 1, \dots, L. \quad (3)$$

Важно учесть, что  $\Delta y$  следует рассматривать в виде функции соответствующих факторов. Помимо этого, оказывает влияние предыстория  $y[k-1]$ , и еще управляющие воздействия  $u_j$ . В таком случае для  $[k]$ -ого момента времени выходная переменная характеризуется зависимостью, которая на основе статистических данных строится в виде уравнения регрессии:

$$y[k] = f_g^w \{x_i, u_j[k], y[k-1]\}, l = 1, \dots, L. \quad (4)$$

Критерий О.Андерсена [11] может быть использован для того, чтобы по переменным  $u_j[k]$  и  $y[k-1]$ , представляемых в виде рядов, проверить то, что не будет корреляции между соседними членами ряда.

Опираясь на теорему Фриша-Во-Ловелла [12], будем применять время в уравнении регрессии для того, чтобы во временном ряде избежать автокорреляции. В таком случае модель (4) представляется так:

$$y[k] = f_g^w \{x_i, u_j[k], y[k-1], [k]\}, l = 1, \dots, L. \quad (5)$$

После этого происходит обозначение двух гипотез:  $H_1$  соответствует по всем  $v$  различным регрессионным коэффициентам  $\beta_{v_1} (v = 1, \dots, d + n + 1)$ , для (1) и  $\beta_{v_2} (v = 1, \dots, d + n + 1)$ , для (2);  $H_2$  соответствует коэффициентам регрессии  $\beta_{v_1}$  и  $\beta_{v_2}$ , которые разные по всем  $v \neq i$  и совпадают для  $v = i$ .

В ходе оценки информации по тому, чтобы определить разницу в пользу  $H_1$  вместо  $H_2$  необходимо опираться на выражение:

$$J\left(\frac{H_1}{H_2}\right) = \frac{1}{\sigma^2} \left( (\beta_1)^T S^1 \beta_1 - (\beta_2)^T S^2 \beta_2 \right), \quad (6)$$

в указанном выражении  $\beta_1 = \{\beta_{11}, \dots, \beta_{v1}, \dots, \beta_{d+n+1}\}$  соответствует вектору коэффициентов регрессии по условию (4);

$(\beta_1)^T$  является транспонированным вектором  $v_1$ ;

$\beta_2 = \{\beta_{12}, \dots, \beta_{v2}, \dots, \beta_{d+n+1}\}$  соответствует вектору коэффициентов регрессии с учетом условия (2);

$\beta_2^T$  соответствует транспонированный вектор  $v_2$ ;

$$S^1 = x_1^T \cdot x_1, \quad x_1 = \{x_{11}, \dots, x_{v1}, \dots, x_{1k}\};$$

$$S^2 = x_2^T \cdot x_2, \quad x_2 = \{x_{21}, \dots, x_{v2}, \dots, x_{2k}\};$$

$x_{1v}, x_{2v}$  соответствуют векторам входной переменной, которые получены в результате экспериментальных измерений по первому и второму уравнениям регрессии ( $v = 1, \dots, d + n + 1$ ); по выходной переменной для  $y$   $[k]\sigma^2$  соответствует оценке дисперсии.

В ходе оценок информации при определенном уровне значимости можно определить критическое значение с учетом  $F$  – распределения для  $(d + n)$  и  $N - (d + n + 1)$  степеней свободы [13, 14]. Использование рандомизации при эксперименте уменьшается влияние входных переменных на регрессионную модель.

На основе результатов, полученных по пассивному эксперименту в БПЛА, можно предложить такой алгоритм, на основе которого выделяются однородные компоненты:

1. По выходным и входным переменным происходит формирование полного перечня.
2. С точки зрения неоднородностей в управлении БПЛА делятся на подгруппы.
3. Происходит выделение существенных входных переменных.
4. Для факторов в процессах проводится проверка на наличие корреляции.

5. В случае наличия корреляции проведение сокращения показателей.

6. На основе дисперсного анализа проведение выделения однородных компонент в БПЛА.

7. Исходя из п.5 по информативным переменным проверка гипотезы относительно нормального распределения [15].

8. По пассивному эксперименту происходит установление условий  $r$ , они делятся по двум группам  $r^{(1)}$  и  $r^{(2)}$ .

9. Для групп  $r^{(1)}$  и  $r^{(2)}$  проводится оценка однородности дисперсий в выборках.

10. Определяются переменные  $x_i$  и  $u_j$  по которым будет неоднородность в дисперсии.

11. Происходит деление по двум частям, связанным с переменными  $x_i$  и  $u_j$ , формируется уравнение регрессии с учетом того, какие коэффициенты автокорреляции, как они соответствуют критерию Андерсона.

13. Для всех показателей процессов по однородным компонентам БПЛА создаются регрессионные модели (8), в них проводится расчет коэффициентов, применяется t-критерий Стьюдента и F-критерий Фишера [15].

16. Осуществляется дополнительная проверка на однородность компонент в БПЛА при использовании критерия Андерсона [15] для оценки автокорреляции ряда  $\Delta u_i[k]$ :

$$\Delta u_i[k] = u_i[k] - \bar{u}_i[k]. \quad (7)$$

#### **Описание подхода на основе активного эксперимента**

В активном эксперименте используются управляющие воздействия  $u_j$  ( $j = 1, \dots, n$ ) для того, чтобы реализовывать действия по декомпозиции в математическом описании. Тогда условия однородности будут делиться по группам за счет того, что одновременным образом определяются для всех переменных  $u_j$  ( $j = 1, \dots, n$ ) однородные диапазоны. Можно отметить достоинство активного эксперимента, состоящее в том, что можно получить упрощенную статическую модель. Укажем основные шаги в алгоритме, на основе которого происходит поиск по однородным диапазонам в управлении.

1. Происходит формирование связи среди выходных и входных переменных [16]

$$y_i = f(u_1, \dots, u_n), \quad (8)$$

при этом  $u = \{u_1, \dots, u_n\}$  рассматривается в виде вектора управляющих воздействий;  $y_i$  соответствует  $i$ -й выходной переменной.

2. Реализуется определение верхней и нижней границ по управляющим воздействиям.

3. Проводится выбор исходной точки, в дальнейшем будет проводиться эксперимент:

$$E = \|u_{ik}\|, \quad k = 1, \dots, N, \quad j = 1, \dots, n, \quad (9)$$

в выражении  $N$  – соответствует в ходе реализации эксперимента количества опытов;

$u_{jo} = \{u_{10}, \dots, u_{n0}\}$  – соответствует по исходному состоянию вектору управляющих воздействий.

4. Происходит на основе экспериментов для выходной переменной формирование соответствующего вектора  $y_{ib} = \{y_{i1}, \dots, y_{iN}\}$ . Управляющие воздействия при этом варьируются в ходе воздействия на величину  $Dy_j$ , когда реализуется план эксперимента  $E$ .

5. Используется  $t$ -критерий Стьюдента, позволяющий на основе результатов эксперимента по коэффициентам регрессии дать оценку статистической значимости.

6. Формируется уравнение регрессии

$$\hat{y} = a_0 + a_1 u_1 + \dots + a_n u_n. \quad (10)$$

7. Используется  $F$ -критерий Фишера для того, чтобы осуществить процесс проверки адекватности математической модели (10).

8. По гиперповерхности переменных для выбранных точек ( $k=1, \dots, T$ ) рассматриваются мысленные эксперименты. Движение происходит в направлении  $\bar{u}(\bar{u}_1, \bar{u}_2, \dots, \bar{u}_m)$ , с учетом  $\text{grad}(\bar{u})$ , который достигается на основе эксперимента  $E$  (9) [17].

9. Чтобы выбрать направление движения, необходимо определить такую переменную  $u_i$ , по которой будет обеспечиваться максимизация произведения  $\hat{a}_i \Delta u_i$

$$\max(\hat{a}_i \Delta u_i) = \hat{a}_\delta \Delta u_\delta. \quad (11)$$

10. В случае крутого восхождения  $\lambda_{\text{КВ}}$  проводится определение шага варьирования по  $u_i$ .

11. Для остальных переменных  $y_j (j = 1, \dots, n - 1)$  проводится расчет значений  $\lambda_{\text{КВ}}$ :

$$\lambda_{\text{КВ}} = \frac{\hat{a}_j \Delta u_j}{\hat{a}_\delta \Delta u_\delta} \cdot \lambda_{\text{КВ}}. \quad (12)$$

12. Когда реализуется мысленный эксперимент, то для точек  $k$ , по направлению  $\bar{u}$ , происходит определение предсказанных значений выходной переменной  $\hat{y}_{\text{ипрк}}$ . При этом будет сравнение с экспериментальными значениями  $y_{\text{иЭК}}$  через 2–3 шага:

$$\bar{y}_{\text{иЭК}} - y_{\text{ипрк}} = \left| \left( \hat{y}_{\text{ипр}}(k-1) + \hat{y}_{\text{ипр1}} - a_0 \right) \right| \leq \Delta y_{\text{идоп}}, \quad (14)$$

в этом выражении  $\Delta y_{\text{идоп}}$  – является допустимой погрешностью в ходе реализации аппроксимирующих процедур;

$\bar{y}_{\text{иЭК}}$  – соответствует усредненному значению переменной  $y_i$  с учетом того, какие были проведены параллельные опыты, которые соответствуют точке  $k$ , размещенной на гиперповерхности.

13. Происходит выбор нового уровня, который есть на границе адекватности  $u_{\text{ипр}}$  с учетом  $\bar{y}_{\text{иЭК}} - \hat{y}_{\text{ипрк}} > \Delta y_{\text{идоп}}$ . Будет определение нового шага по варьированию. После этого будет реализован план активного эксперимента для БПЛА.

14. Происходит повторение пунктов 3–13.

15. С учетом  $p$  однородных диапазонов управления при диапазонах управления  $y_i = f_i^p(u)$  будут формироваться  $p$  математических моделей.

16. С учетом того, какой коэффициент множественной корреляции  $R_M$  в однородных компонентах БПЛА дается оценка по уровню работоспособности математических моделей [12].

Происходит использование коэффициента множественной корреляции с тем, чтобы провести проверку работоспособности математических моделей [18; 19] однородных компонент, для которых будет адекватное описание процесса. То есть, вы-



полняется условие  $F_{\text{PAC}} < F_{\text{KP}}$  с учетом того, что задан уровень значимости  $q\%$  [12]. Считаем, что будет достаточная работоспособность по математической модели в случае выполнения условия для коэффициента множественной корреляции  $R_M > 0,8$ . Иначе на базе методов дисперсионного анализа будут оцениваться как влияют качественные неуправляемые входные переменные. Они разделяются по качественным уровням и с их учетом для однородных компонент БПЛА строятся математические модели [12].

За счет того, что выделяются однородные диапазоны управления возникают возможности для того, чтобы по математическим моделям осуществить существенное упрощение их структуры, будет по каждой из однородных компонент БПЛА уменьшено число управляющих воздействий.

## Результаты

Был рассмотрен рой БПЛА, в котором было 53 объекта. Для этого роя было выделено 14 однородных компонентов: размах крыла, длина аппарата, высота аппарата, вес, максимальная скорость, крейсерская скорость, дальность полета, время полета, высота полета, грузоподъемность, мощность двигателя, виды датчиков, масса груза, стоимость конструкции.

В ходе реализации пассивного эксперимента в качестве существенных входных переменных рассматривались координаты возможных препятствий для БПЛА. В качестве выходной переменной рассматривалась скорость. Критическое значение скорости составило 98 км/ч. Проведено формирование регрессионных моделей, которые базировались на полиномах, не превышающих 5 степени. Была осуществлена дополнительная проверка на однородность компонент. Число однородных компонент было уменьшено до 11. В ходе реализации активного эксперимента погрешность спрогнозированных значений крейсерских скоростей не превышала 7%.

## **Выводы**

В работе рассмотрены возможности применения методики пассивного и активного эксперимента для оценки характеристик роя БПЛА. Для выходных характеристик (скоростей) были построены регрессионные модели, при этом степень полинома не превышала 5. Осуществлено уменьшение числа возможных однородных компонент в рое БПЛА. Дан прогноз по значениям крейсерских скоростей.

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.  
Исследование не имело спонсорской поддержки.*

## **Список литературы**

1. Абрамов М.М. Новые и перспективные направления применения беспилотных летательных аппаратов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 3. С. 227-232. <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2022-3-227-233>
2. Финаев В.И., Соловьев В.В., Шаповалов И.О., Белоглазов Д.А., Титов А.Е. Анализ графоаналитических методов планирования перемещения подвижных объектов // Известия ТулГУ. Технические науки. 2015. Вып. 11. Ч. 2. С. 137-148.
3. Кореванов С.В. Аппроксимация длины траектории полета и положения беспилотных летательных аппаратов с помощью нейронной сети // Научный вестник МГТУ ГА. 2014. №210. С.135-137.
4. Ткачев С.Б., Крищенко А.П., Канатников А.Н. Автоматическая генерация сложных пространственных траекторий БПЛА и синтез управлений // Математика и Математическое моделирование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2015. № 01. С.1–17. <https://doi.org/10.7463/mathm.0115.0778000>
5. Рогалев А.Н., Рогалев А.А. Численные оценки предельных отклонений траекторий летательных аппаратов в атмосфере // Вестник СибГАУ. Т. 16. № 1. 2015. С. 104–112.
6. Покровская О.Д., Мороз Ю.А., Меликов М.И. Трансформация рынка транспортных услуг в России в условиях международных

- санкций // International Journal of Advanced Studies. 2023. Т. 13. № 1. С. 197-211. <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2023-13-1-197-211>
7. Натальсон А.В. Перспективы развития транспортной отрасли в эпоху цифровой трансформации // International Journal of Advanced Studies. 2023. Т. 13. № 2-2. С. 74-78.
  8. Бородулин И.В., Гасилова О.С., Мальцева А.А., Сидоров Б.А. Оценка неравномерности движения транспортных средств в местах разделения транспортных потоков // International Journal of Advanced Studies. 2023. Т. 13. № 3. С. 68-81. <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2023-13-3-68-81>
  9. Кудряшов А.В., Преображенский Ю.П. Анализ компонентов транспортных систем // Современные автомобильные материалы и технологии (САМИТ-2023). Сборник научных статей 15-й Международной научно-технической конференции. Курск, 2023. С. 116-118.
  10. Маренков Н.М., Клименко Ю.А. О проблемах управления транспортными процессами в компаниях // Современные автомобильные материалы и технологии (САМИТ-2023). Сборник научных статей 15-й Международной научно-технической конференции. Курск, 2023. С. 144-146.
  11. Симчера В. М. Методы многомерного анализа статистических данных. М.: Финансы и статистика, 2008. 398 с.
  12. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. The Elements of Statistical Learning. Springer: New-York, 2017. 764 p.
  13. Калиушко Д.А., Зеленина А.Н. Разработка информационной системы учета грузоперевозок // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2023. № 3 (46). С. 7-8.
  14. Львович Я.Е., Преображенский Ю.П., Ружицкий Е. О проблемах использования современных технологий в «Умных городах» // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2022. № 2 (41). С. 116-119.
  15. Грачев Ю.П. Математические методы планирования экспериментов. М.: Пищевая промышленность, 2005. 168 с.

16. Львович Я.Е., Преображенский Ю.П., Ружицкий Е. Проблемы моделирования транспортных потоков // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2022. № 3 (42). С. 72-74.
17. Львович Я.Е., Преображенский Ю.П., Ружицкий Е. Принципы обеспечения метрологических характеристик информационно-измерительных систем позиционирования транспортных средств // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2022. № 3 (42). С. 95-98.
18. Бухольцев И.М., Львович Я.Е. Оптимизация моделирования процессов балансировки и ребалансировки инвестиций для реализации программы развития многообъектной организационной системы // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2024. Т. 12. № 1 (44). С. 7. <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2024.44.1.015>
19. Гусев П.Ю., Львович Я.Е. Структуризация многофункциональной цифровизированной системы и управление ею на основе оптимизационных моделей дезагрегации ресурсов и объемов деятельности // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2023. Т. 11. № 4 (43). <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2023.43.4.004>

### *References*

1. Abramov M. M. Novye i perspektivnye napravleniya primeneniya bes-pilotnyh letatel'nyh apparatov [New and promising areas of application of unmanned aerial vehicles]. *Izvestiya Tula State University. Technical sciences*, 2022, no. 3, pp. 227-232. <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2022-3-227-233>
2. Finaev V.I., Solov'ev V.V., Shapovalov I.O., Beloglazov D.A., Titov A.E. Analysis of the graph-analytical methods of the moving objects motion planning. *Izvestiya Tula State University. Technical sciences*, 2015, no. 11, part 2, pp. 137-148.
3. Korevanov S.V. Approksimaciya dliny traektorii poleta i polozheniya bespilotnyh letatel'nyh apparatov s pomoshch'yu nejronnoj seti [Ap-

- proximation of the flight path length and position of unmanned aerial vehicles using a neural network]. *Scientific Bulletin of Moscow State Technical University of Civil Aviation*, 2014, no. 210, pp. 135-137.
4. Tkachev S.B., Krishchenko A.P., Kanatnikov A.N. Automatic generation of complex spatial trajectories of UAV and synthesis of controls. *Mathematics and Mathematical Modeling. Bauman Moscow State Technical University*, 2015, no. 01, pp. 1-17. <https://doi.org/10.7463/mathm.0115.0778000>
  5. Rogalev A.N., Rogalev A.A. Numerical estimations of the limit deviations of the aircraft trajectories in the atmosphere. *Bulletin of Siberian State Agrarian University*, 2015, vol. 16, no. 1, pp. 104–112.
  6. Pokrovskaya O.D., Moroz Yu.A., Melikov M.I. Transformaciya rynka transportnyh uslug v Rossii v usloviyah mezhdunarodnyh sankcij [Transformation of the transport services market in Russia under international sanctions]. *International Journal of Advanced Studies*, 2023. vol. 13, no. 1, pp. 197-211. <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2023-13-1-197-211>
  7. Natalson A.V. Perspektivy razvitiya transportnoj otrasli v epohu cifrovoj transformacii [Prospects for the development of the transport industry in the era of digital transformation]. *International Journal of Advanced Studies*, 2023, vol. 13, no. 2-2, pp. 74-78.
  8. Borodulin I.V., Gasilova O.S., Maltseva A.A., Sidorov B.A. Ocenka neravnomernosti dvizheniya transportnyh sredstv v mestah razdeleniya transportnyh potokov [Assessment of uneven movement of vehicles in places of separation of traffic flows]. *International Journal of Advanced Studies*, 2023, vol. 13, no. 3, pp. 68-81. <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2023-13-3-68-81>
  9. Kudryashov A.V., Preobrazhensky Yu.P. Analiz komponentov transportnyh system [Analysis of components of transport systems]. *Modern automotive materials and technologies (SAMIT-2023). Collection of scientific articles of the 15th International Scientific and Technical Conference*. Kursk, 2023, pp. 116-118.
  10. Marenkov N.M., Klimenko Yu.A. O problemah upravleniya transportnymi processami v kompaniyah [On the problems of transport process

- management in companies]. *Modern automotive materials and technologies (SAMIT-2023). Collection of scientific articles of the 15th International Scientific and Technical Conference*. Kursk, 2023, pp. 144-146.
11. Simchera V. M. *Metody mnogomernogo analiza statisticheskikh daniy* [Methods of multidimensional analysis of statistical data]. M.: Finance and Statistics, 2008, 398 p.
  12. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. *The Elements of Statistical Learning*. Springer: New-York, 2017, 764 p.
  13. Kaliushko D.A., Zelenina A.N. Razrabotka informacionnoj sistemy ucheta gruzoperevozok [Development of an information system for cargo transportation accounting]. *Bulletin of the Voronezh Institute of High Technologies*, 2023, no. 3 (46), pp. 7-8.
  14. Lvovich Ya.E., Preobrazhensky Yu.P., Ruzhitsky E. O problemah ispol'zovaniya sovremennyh tekhnologij v "Umnyh gorodah" [On the problems of using modern technologies in "Smart cities"]. *Bulletin of the Voronezh Institute of High Technologies*, 2022, no. 2 (41), pp. 116-119.
  15. Grachev Yu.P. *Matematicheskie metody planirovaniya eksperimentov* [Mathematical methods of planning experiments]. M.: Food industry, 2005, 168 p.
  16. Lvovich Ya.E., Preobrazhensky Yu.P., Ruzhitsky E. Problemy modelirovaniya transportnyh potokov [Problems of modeling traffic flows]. *Bulletin of the Voronezh Institute of High Technologies*, 2022, no. 3 (42), pp. 72-74.
  17. Lvovich Ya.E., Preobrazhensky Yu.P., Ruzhitsky E. Principy obespecheniya metrologicheskikh harakteristik informacionno-izmeritel'nyh sistem pozicionirovaniya transportnyh sredstv [Principles of ensuring metrological characteristics of information and measuring positioning systems of vehicles]. *Bulletin of the Voronezh Institute of High Technologies*, 2022, no. 3 (42), pp. 95-98.
  18. Bukholtsev I.M., Lvovich Ya.E. Optimizaciya modelirovaniya processov balansirovki i rebalansirovki investicij dlya realizacii programmy razvitiya mnogoob'ektnoj organizacionnoj sistemy [Optimization of modeling the processes of balancing and rebalancing investments

for the implementation of the program for the development of a multi-object organizational system]. *Modeling, optimization and information technologies*, 2024, vol. 12, no. 1 (44), p. 7. <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2024.44.1.015>

19. Gusev P.Yu., Lvovich Ya.E. Strukturizaciya mnogofunkcional'noj cifrovizirovannoj sistemy i upravlenie eyu na osnove optimizacionnyh modelej dezagregacii resursov i obemov deyatel'nosti [Structuring of a multifunctional digitized system and its management based on optimization models of disaggregation of resources and volumes of activity]. *Modeling, optimization and information technology*, 2023, vol. 11, no. 4 (43). <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2023.43.4.004>

#### **ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ**

**Преображенский Андрей Петрович**, доктор технических наук, профессор

*Автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования Воронежский институт высоких технологий*

*ул. Ленина, 73а, г. Воронеж, 394043, Российская Федерация  
Komkovvivi@yandex.ru*

**Аветисян Татьяна Владимировна**, преподаватель

*Автономная некоммерческая профессиональная образовательная организация «Колледж Воронежского института высоких технологий»*

*ул. Ленина, 73а, г. Воронеж, 394043, Российская Федерация  
vtatyana\_avetisyan@mail.ru*

**Преображенский Юрий Петрович**, проректор по ИТ, кандидат технических наук, доцент

*Автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования Воронежский институт высоких технологий*

*ул. Ленина, 73а, г. Воронеж, 394043, Российская Федерация  
petrovich@vivt.ru*

### **DATA ABOUT THE AUTHORS**

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

**Tatiana V. Avetisyan**, Teacher  
*College of the Voronezh Institute of High Technologies  
73a, Lenin Str., Voronezh, 394043, Russian Federation  
vtatyana\_avetisyan@mail.ru  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3559-6070>*

**Yuri P. Preobrazhensky**, Vice-Rector for IT, Candidate of Technical  
Sciences, Associate Professor  
*Voronezh Institute of High Technologies  
73a, Lenin Str., Voronezh, 394043, Russian Federation  
petrovich@vivt.ru*

Поступила 10.10.2024

После рецензирования 08.11.2024

Принята 21.11.2024

Received 10.10.2024

Revised 08.11.2024

Accepted 21.11.2024