Научная статья
УДК 004.94
URL: https://trudymai.ru/published.php?ID=189705
EDN: https://www.elibrary.ru/FJORVQ

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО ОБЛИКА БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Р.Я. Канчурин[1]✉, А.И. Сергеев[1], А.Б. Колесников[2]

[1]Оренбургский государственный университет имени В.А. Бондаренко, г. Оренбург, Россия
[2]Общество с ограниченной ответственностью «Тюльганский электромеханический завод», г. Оренбург, Россия
✉ ruslankanchurin@gmail.com

Цитирование: Канчурин Р.Я., Сергеев А.И., Колесников А.Б. Автоматизация проектирования геометрического облика беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ: электрон. журнал. № 150. URL: https://trudymai.ru/published.php?ID=189705

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы формирования геометрического облика беспилотных летательных аппаратов. Проведен обзор методов проектирования беспилотных летательных аппаратов, рассмотрены методы мультидисциплинарной оптимизации, генетические алгоритмы, алгоритмы дифференциальной эволюции, методы роя частиц, CFD-анализ, генеративный дизайн и методы искусственного интеллекта. Выявлены проблемы, связанные с точностью моделей на ранних этапах проектирования беспилотных летательных аппаратов, высокой вычислительной сложностью и необходимостью экспериментальной валидации автоматизированных решений. Отмечена актуальность этапа параметризации и описания геометрического облика при использовании методов оптимизации на основе численного моделирования. Предложена методика автоматизированного формирования геометрического описания беспилотных летательных аппаратов, подробно рассмотрен этап построения силуэта модели и формы сечений планера. Описан процесс преобразования эскиза облика беспилотного летательного аппарата на основе аппроксимации неоднородными рациональными *B*-сплайнами. Преимуществом

сплайнов, полученных по предложенной методике, является плавное изменение кривизны по длине, чего трудно достичь при построении и модификации сплайна проектировщиком в системах автоматизированного проектирования.

Ключевые слова: автоматизация проектирования; беспилотный летательный аппарат; оптимизация; NURBS; сплайн.

AUTOMATION OF GEOMETRIC SHAPE DESIGN OF UNMANNED AERIAL VEHICLES

R.Ya. Kanchurin[1]✉, A.I. Sergeev[1], A.B. Kolesnikov[2]

[1]Orenburg State University named after V.A. Bondarenko, Orenburg, Russia
[2]Tyulgan Electromechanical Plant LLC, Orenburg, Russia
✉ ruslankanchurin@gmail.com

Citation: Kanchurin R.Ya., Sergeev A.I., Kolesnikov A.B. Automation of geometric shape design of unmanned aerial vehicles // Trudy MAI. 2026. No. 150. (In Russ.).
URL: https://trudymai.ru/published.php?ID=189705

Abstract. The article discusses the issues of forming the geometric appearance of unmanned aerial vehicles. An overview of the design methods of unmanned aerial vehicles is provided, methods of multidisciplinary optimization, genetic algorithms, differential evolution algorithms, particle swarm methods, CFD analysis, generative design and artificial intelligence methods are considered. Problems related to the accuracy of models at the early stages of designing unmanned aerial vehicles, high computational complexity and the need for experimental validation of automated solutions have been identified. The relevance of the parameterization stage and the description of the geometric appearance when using optimization methods based on numerical modeling is noted. A technique for the automated formation of a geometric description of unmanned aerial vehicles is proposed, and the stage of constructing the silhouette of the model and the shape of the airframe sections is considered in detail. The process of transformation of the sketch of the appearance of an unmanned aerial vehicle based on approximation by inhomogeneous rational B-splines is described. The advantage of the splines obtained by the proposed method is a smooth change in curvature along the length, which is difficult to achieve when constructing and modifying a spline by a designer in computer-aided design systems.

Keywords: Design automation; unmanned aerial vehicle; optimization; NURBS; spline.

Введение

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) самолётной схемы в настоящее время широко применяются в задачах мониторинга, разведки, картографии, доставки грузов и научных исследований. Рост требований к дальности полёта, продолжительности, массе, полезной нагрузке и энергоэффективности приводит к усложнению проектных решений и увеличению числа параметров, подлежащих согласованию уже на ранних стадиях проектирования.

Традиционные методы проектирования БПЛА базируются на последовательной работе инженеров-конструкторов, использовании эмпирических зависимостей и ограниченного числа расчётных итераций. Такой подход становится недостаточно эффективным в условиях необходимости быстрого получения оптимальных решений и рассмотрения большого числа вариантов конфигурации. В связи с этим активно развиваются методы автоматизации проектирования, позволяющие формализовать процесс синтеза облика БПЛА и минимизировать влияние субъективных факторов.

Методы проектирования БПЛА

Проектирование БПЛА самолётной схемы имеет ряд специфических особенностей, связанных с малыми числами Рейнольдса, высокой чувствительностью к изменению массы и центровки, а также необходимостью интеграции полезной нагрузки и бортовой электроники [1].

Как показано в ряде исследований, параметры крыла, фюзеляжа и оперения оказывают взаимосвязанное влияние на аэродинамическое качество, устойчивость и управляемость аппарата, что требует комплексного многодисциплинарного подхода [2, 3].

В большинстве работ проектирование БПЛА рассматривается как задача оптимизации, где:

– переменными проектирования являются геометрические параметры (размах крыла, удлинение, стреловидность, площадь оперения), характеристики силовой установки и компоновки;

– критериями оптимизации выступают дальность полёта, продолжительность, масса, аэродинамическое качество или стоимость;

– ограничениями являются условия устойчивости, прочности, взлётно-посадочные характеристики и компоновочные требования.

Такая формализация позволяет применять численные методы оптимизации и автоматизировать процесс поиска рационального облика БПЛА. В работе [4] Комаров В.А. и соавторы предложили метод автоматизированного выбора параметров облика БПЛА самолётной схемы, основанный на численном моделировании и оптимизации с использованием эволюционных алгоритмов.

Одним из наиболее развитых направлений является многодисциплинарная оптимизация, в рамках которой аэродинамические, весовые, прочностные и энергетические модели объединяются в единый вычислительный контур. В работах [3, 4] показано, что применение мультидисциплинарной оптимизации (Multi-disciplinary design optimization, MDO) на ранних стадиях проектирования позволяет получить более сбалансированные проектные решения и снизить количество итераций.

В работе [5] для автоматизации проектирования БПЛА широко применяются генетические алгоритмы, алгоритмы дифференциальной эволюции и методы роя частиц. Их преимущество заключается в способности эффективно исследовать сложные, нелинейные пространства проектных решений.

В частности, алгоритм дифференциальной эволюции показал высокую эффективность при оптимизации аэродинамической компоновки БПЛА самолётной схемы и решении задач продольной балансировки [4, 1].

Численные методы аэродинамики являются ключевым инструментом оценки лётных характеристик БПЛА. Однако классический CFD-анализ (Computational Fluid Dynamics – вычислительная гидродинамика) требует значительных временных затрат, что ограничивает его использование в оптимизационных циклах [6].

Современные исследования направлены на создание автоматизированных CFD-процессов, включающих параметрическую генерацию геометрии, сетки и автоматическую постобработку результатов. В работе [6] показано, что автоматизация предобработки CFD-процессов позволяет существенно сократить время анализа и включить CFD-модели в контур оптимизации проектирования БПЛА.

Генеративный дизайн и методы искусственного интеллекта рассматриваются как перспективные инструменты автоматизации проектирования БПЛА. Обзор работы [7] показывает, что такие подходы позволяют автоматически генерировать множество проектных решений и выбирать наиболее перспективные конфигурации на основе заданных критериев. Методы машинного обучения применяются для аппроксимации сложных аэродинамических зависимостей и ускорения вычислений в MDO-циклах [8].

Существенный вклад в развитие автоматизации проектирования БПЛА вносят диссертационные работы, в которых формализуются задачи выбора схемы и параметров летательных аппаратов. В работе [9] представлена математическая модель автоматизированного выбора схемы и параметров БПЛА самолётного типа, а также алгоритмы генерации трёхмерных моделей.

Несмотря на значительный прогресс в области систем автоматизированного проектирования, сохраняются проблемы, связанные с точностью моделей на ранних этапах проектирования беспилотных летательных аппаратов, высокой вычислительной сложностью и необходимостью экспериментальной валидации автоматизированных решений [3,9].

Перспективными направлениями являются развитие цифровых двойников БПЛА, интеграция AI-методов (Artificial Intelligence – искусственный интеллект) в процесс проектирования и автоматизация проектирования с учётом жизненного цикла изделия [10].

Формирование геометрического облика

Одним из важнейших этапов в методиках автоматизированного проектирования БПЛА является этап параметризации и описания

геометрического облика. Особенно важен этот этап при использовании методов оптимизации на основе численного моделирования, когда необходимо в автоматизированном режиме формировать наборы проектных решений для расчета целевой функции.

Описание геометрического облика сложных объектов, особенно летательных аппаратов, является трудно формализуемой задачей. Облик в значительной степени определяется эстетическими качествами проектировщика. Поэтому разработка методики автоматизированного формирования геометрического описания объекта проектирования является актуальной задачей. Основными требованиями к методике являются упрощение задач математического описания геометрии, решаемых проектировщиком, и сокращение времени проектирования для возможности рассмотрения как можно большего пространства проектных решений.

На рисунке 1 показана UML-диаграмма активности (Unified Modeling Language — унифицированный язык моделирования), описывающая методику, предложенную для формирования геометрической модели объекта.

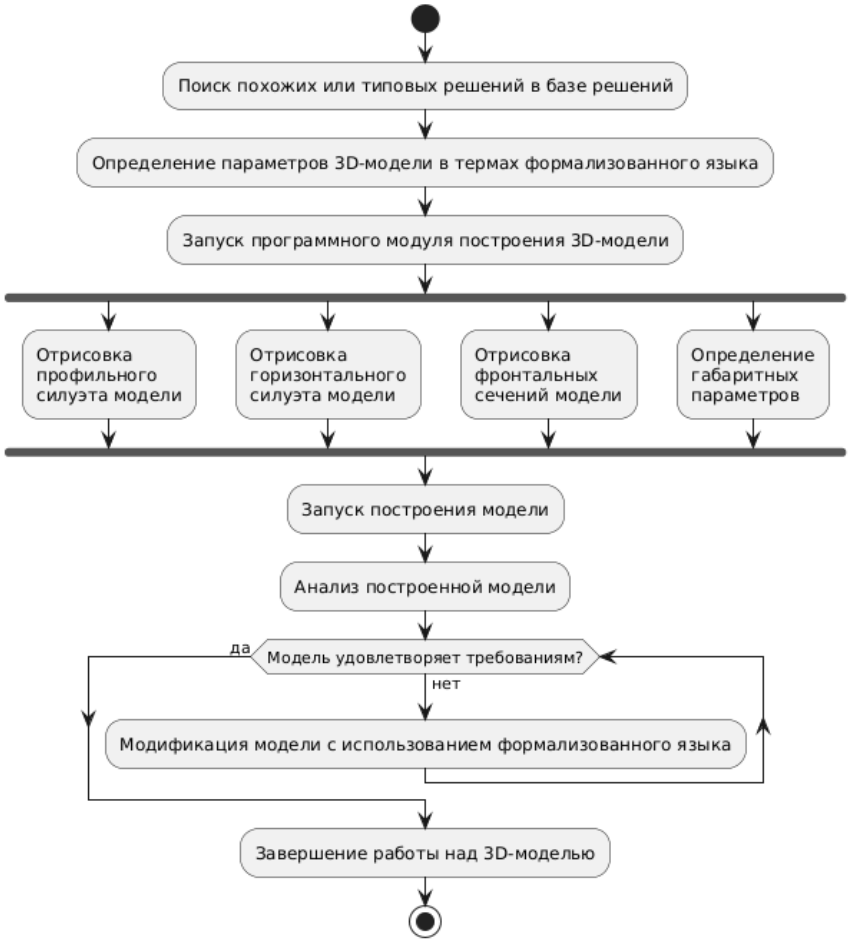


Рисунок 1 – UML-диаграмма активности модуля построения геометрической модели

Для отрисовки силуэта модели и формы сечений разработан модуль «Построение сечений». При его использовании проектировщик получает возможность ввода информации в ЭВМ с помощью графического планшета или компьютерной мыши. Такой подход упрощает формирование моделей, что позволяет увеличить количество проектных решений для дальнейшего анализа.

Схема работы модуля представлена на рисунке 2.

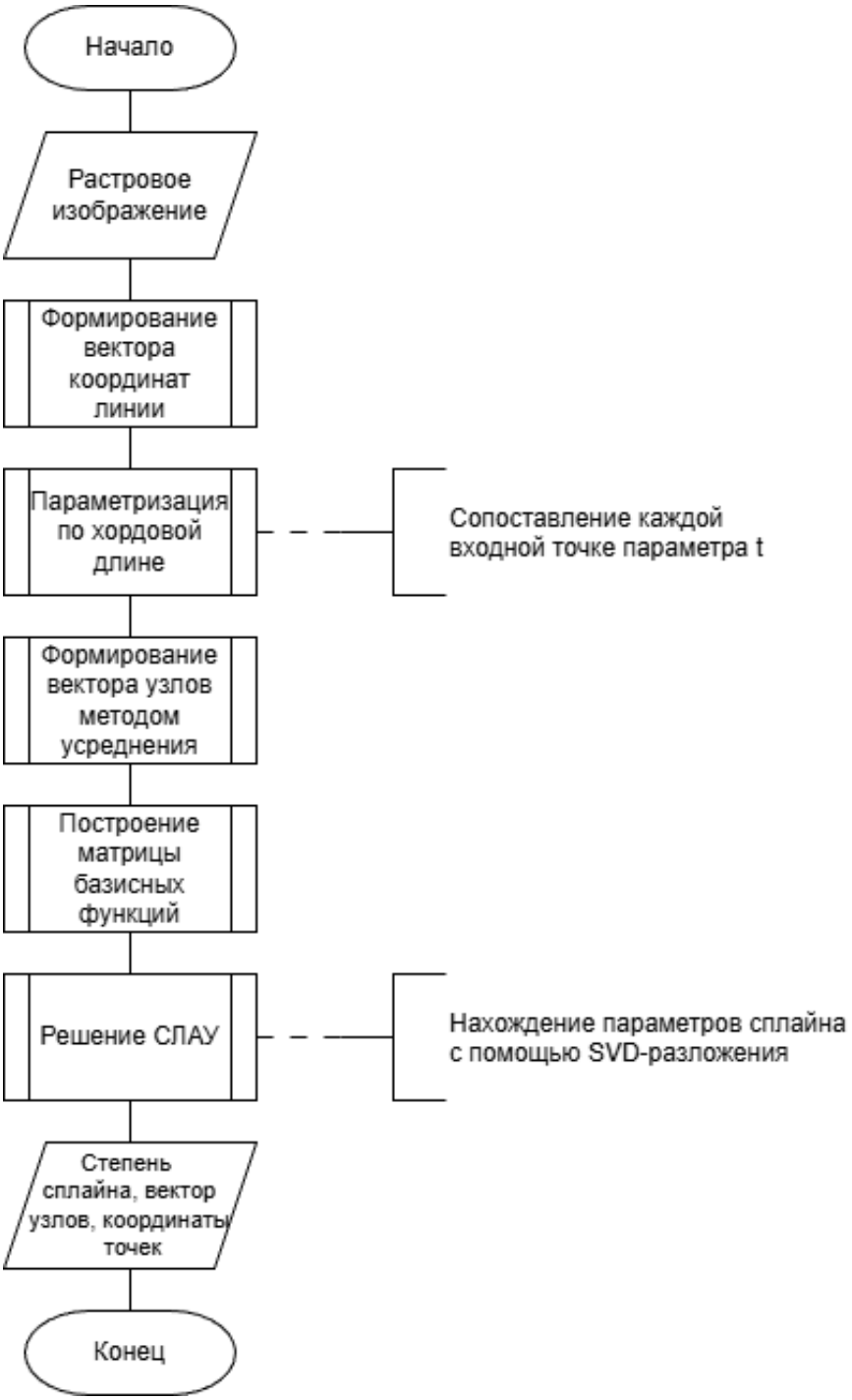


Рисунок 2 – Схема работы модуля построения сечений

После ввода изображения с линией, описывающей сечение, происходит чтение координат пикселей определенного цвета на изображении. Полученный набор точек передается в подпрограмму аппроксимации неоднородными рациональными *B*-сплайнами (Non-uniform rational B-spline, NURBS) с заданной степенью и вектором узлов, построенным методом усреднения параметров.

Набор точек представляется в виде:

$$\boldsymbol{Q}_k = (x_k, y_k), k = 0, \dots, m-1, \quad (1)$$

где *x, y* – координаты точек,

m – количество точек.

Далее каждой точке сопоставляется параметр $t_k \in [0,1]$:

– задаётся $t_0 = 0$;

– для *k=1,..., m-1*: $t_k = t_{k-1} + \|\boldsymbol{Q}_k - \boldsymbol{Q}_{k-1}\|$;

– нормализуются параметры: $t_k \leftarrow \frac{t_k}{t_{m-1}}$.

Далее строится сплайн с точными краевыми условиями, затем определяется размер вектора узлов:

$$|U| = n + p + 1, \quad (2)$$

где *p* – степень сплайна;

n – число контрольных точек.

Граничные узлы:

$$U_0 = U_1 = \cdots = U_p = 0, U_n = U_{n+1} = \cdots = U_{n+p} = 1. \quad (3)$$

Внутренние узлы вычисляются как:

$$U_{p+j} = \frac{1}{p}\sum_{i=j}^{j+p-1} t_i. \quad (4)$$

Каждый внутренний узел – это среднее значение *p* последовательных параметров данных. Благодаря этому плотность узлов автоматически

подстраивается под распределение точек и при неравномерных данных сплайн более точно аппроксимирует геометрию.

Аппроксимирующая кривая имеет формулу:

$$C(t) = \sum_{i=0}^{n-1} N_{i,p}(t)\mathbf{P}_i \quad (5)$$

где $\mathbf{P}_i$ – неизвестные контрольные точки;

$N_{i,p}(t)$ – базисные B-сплайн функции степени p, вычисляемые рекуррентно по формуле Кокса-де Бура.

Для построения матрицы базисных функций:

– вычисляются все $N_{i,p}(t)$, *i=0,..., n-1;*

– формируется матрица:

$$A_{k,i} = N_{i,p}(t_k), A \in \mathbb{R}^{m \times n}. \quad (6)$$

Для координат *x* и *y* решаются две независимые задачи:

$$A\mathbf{P}_x \approx \mathbf{Q}_x, A\mathbf{P}_y \approx \mathbf{Q}_y. \quad (7)$$

Для решения задачи минимизируется функционал:

$$min\|A\mathbf{P} - \mathbf{Q}\|_2^2. \quad (8)$$

Решение находится через SVD-разложение (Singular Value Decomposition - сингулярное разложение матрицы).

Результат аппроксимации сохраняется в файле и содержит степень сплайна, количество контрольных точек, вектор узлов, координаты контрольных точек.

Анализ кривизны полученных сплайнов в CAD-системе Siemens NX показан на рисунке 3. Далее на основе полученных сечений формируется каркас и поверхности элементов летательного аппарата.

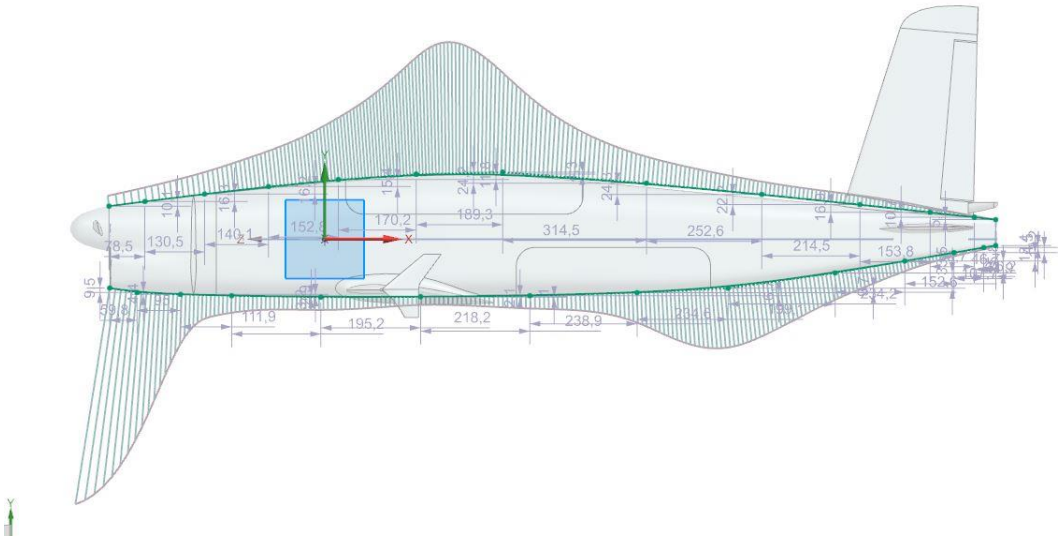


Рисунок 3 – Анализ кривизны полученных сплайнов

Заключение

Описанный в статье модуль формирования геометрического облика БПЛА в составе САПР элементов летательных аппаратов прошёл успешную апробацию. Важным свойством полученных сплайнов является плавное изменение кривизны по длине, чего трудно достичь при построении и модификации сплайна ручным способом.

Модуль позволил ускорить формирование геометрического облика БПЛА, повысить количество предварительно проанализированных проектных решений и выявить наиболее предпочтительный вариант.

В перспективе дальнейших исследований возможна интеграция методов искусственного интеллекта и развитие цифровых двойников БПЛА.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Список источников

1. Mueller T. J. (ed.). Low Reynolds number aerodynamics : proceedings of the conference, Notre Dame, Indiana, USA, 5-7 June 1989. — Berlin : Springer, 1989. — 446 p. — (Lecture notes in engineering). — ISBN 3-540-51884-3.

2. Sobieszczanski-Sobieski J., Haftka R. T. Multidisciplinary Aerospace Design Optimization: Survey of Recent Developments // Structural Optimization. — 1997. — Vol. 14, no. 1. — P. 1-23. — DOI:10.1007/BF01197554.

3. Martins J. R. R. A., Lambe A. B. Multidisciplinary design optimization: A survey of architectures // AIAA Journal. — 2013. — Vol. 51, no. 9. — P. 2049-2075.

4. Комаров В. А. [и др.]. Автоматизация концептуального проектирования и модификации беспилотных летательных аппаратов самолётного типа с использованием многодисциплинарной оптимизации и эволюционных алгоритмов. Часть 1: методы и модели// Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. — 2024. – №3 – с. 42-57.

5. Deb K. Multi-objective optimization using evolutionary algorithms. — Chichester : Wiley, 2001. — 497 p.

6. Pliakos C., Efrem G., Dimopoulos T., Panagiotou P. Efficient Unmanned Aerial Vehicle Design: Automated Computational Fluid Dynamics Preprocessing from Geometry to Simulation // Engineering Proceedings. — 2025. — Vol. 90, no. 1. — P. 52. — DOI:10.3390/engproc2025090052.

7. Souvanhnakhoomman S., Chua A. A comprehensive review of generative design applications in unmanned aerial vehicles // ASEAN Engineering Journal. — 2025. — Vol. 15. — P. 163-175. — DOI:10.11113/aej.v15.21286.

8. Forrester A., Sobester A., Keane A. Engineering design via surrogate modelling: a practical guide. — Chichester : Wiley, 2008. — 228 p.

9. Хоанг Ван Хынг. Автоматизация выбора схемы и параметров беспилотных летательных аппаратов самолётного типа с использованием многодисциплинарной оптимизации : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 2.5.13. — Самара, 2025. — 19 с. : ил.

10. Кондусова В. Б., Кондусов Д. В. Информационная поддержка жизненного цикла беспилотных летательных аппаратов как инструмент повышения эффективности функционирования САПР // Автоматизация в промышленности. — 2024. — № 9. — С. 14-17.

References

1. Mueller T. J. (ed.). Low Reynolds number aerodynamics : proceedings of the conference, Notre Dame, Indiana, USA, 5-7 June 1989. — Berlin : Springer, 1989. — 446 p. — (Lecture notes in engineering). — ISBN 3-540-51884-3. 2

2. Sobieszczanski-Sobieski J., Haftka R. T. Multidisciplinary Aerospace Design Optimization: Survey of Recent Developments // Structural Optimization. — 1997. — Vol. 14, no. 1. — P. 1-23. — DOI:10.1007/BF01197554.

3. There is no magazine number, no pages, and I have not found the source at all. 4 Martins J. R. R. A., Lambe A. B. Multidisciplinary design optimization: A survey of architectures // AIAA Journal. — 2013. — Vol. 51, no. 9. — P. 2049-2075.

4. Komarov V. A. [et al.]. Automation of Conceptual Design and Modification of Unmanned Aerial Vehicles of the Aircraft Type Using Multidisciplinary Optimization and Evolutionary Algorithms. Part 1: Methods and Models// Bulletin of Samara University. Aerospace Engineering, Technologies, and Mechanical Engineering. — 2024. — No. 3. — pp. 42-57.

5. Deb K. Multi-objective optimization using evolutionary algorithms. — Chichester : Wiley, 2001. — 497 p.

6. Pliakos C., Efrem G., Dimopoulos T., Panagiotou P. Efficient Unmanned Aerial Vehicle Design: Automated Computational Fluid Dynamics Preprocessing from Geometry to Simulation // Engineering Proceedings. — 2025. — Vol. 90, no. 1. — P. 52. — DOI:10.3390/engproc2025090052.

7. Souvanhnakhoomman S., Chua A. A comprehensive review of generative design applications in unmanned aerial vehicles // ASEAN Engineering Journal. — 2025. — Vol. 15. — P. 163-175. — DOI:10.11113/aej.v15.21286.

8. Forrester A., Sobester A., Keane A. Engineering design via surrogate modelling: a practical guide. — Chichester : Wiley, 2008. — 228 p.

9. Hoang Van Hung. Automation of the selection of the scheme and parameters of aircraft-type unmanned aerial vehicles using multidisciplinary optimization : abstract of the dissertation of the Candidate of Technical Sciences : 2.5.13. — Samara, 2025. — 19 p. : ill.

10. Kondusova V. B., Kondusov D. V. Information support of the life cycle of unmanned aerial vehicles as a tool to improve the efficiency of CAD operation // Automation in industry. - 2024. — No. 9. — P. 14-17.

Информация об авторах

Руслан Ямилевич Канчурин, аспирант, Аэрокосмический институт Оренбургского государственного университета имени В.А. Бондаренко, г. Оренбург, Россия, e-mail: ruslankanchurin@gmail.com

Александр Иванович Сергеев, д-р техн. наук, профессор, директор, Аэрокосмический институт Оренбургского государственного университета имени В.А. Бондаренко, г. Оренбург, Россия, e-mail: alexandr_sergeew@mail.ru

Александр Борисович Колесников, главный конструктор, ООО «Тюльганский электромеханический завод», г. Оренбург, Россия; e-mail: kolesnikov.temz@gmail.com

Information about the authors

Ruslan Ya. Kanchurin, postgraduate student, Orenburg State University named after V.A. Bondarenko, Orenburg, Russia; e-mail: ruslankanchurin@gmail.com

Alexander I. Sergeev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Director Aerospace Institute of Orenburg State University named after V.A. Bondarenko, Orenburg, Russia, e-mail: alexandr_sergeew@mail.ru

Alexander B. Kolesnikov, Chief Designer, Tyulgan Electromechanical Plant LLC, Orenburg, Russia, e-mail: kolesnikov.temz@gmail.com

Получено 28 апреля 2026 ● Принято к публикации 18 августа 2026 ● Опубликовано 28 октября 2026
Received 28 April 2026 ● Accepted 18 August 2026 ● Published 28 October 2026