Труды МАИ. 2025. № 142
Trudy MAI. 2025. No. 142. (In Russ.)

Научная статья
УДК 004.942
URL: https://trudymai.ru/published.php?ID=185256
EDN: https://www.elibrary.ru/RYXZXU

ИНТЕГРАЦИЯ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Марина Николаевна Орешина[1]✉, Линара Наилевна Фехретдинова[2]

[1,2]Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова,

Москва, Россия

[1]oreshina.mn@rea.ru✉

[2]lfekhretdinova@gmail.com

Аннотация: в данной статье рассмотрены методы моделирования для создания образцов новой техники и исследования характеристик беспилотных летательных аппаратов. Выполнена классификация БПЛА в зависимости от типа решаемых задач. Применены методы математического моделирования, которые на основе дифференциального исчисления позволяют рассмотреть влияние различных факторов на траекторию движения полета и прочностные характеристики моделей. Методы создания компьютерных 3D-моделей летательных устройств позволяют разработать новые конструкции устройств и оценить влияние факторов и возмущающих воздействий на эксплуатационные характеристики моделей.

Использование современных компьютерных технологий обеспечивают реализацию и интеграцию методов моделирования.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, управление, имитационная модель, математическое моделирование, среды программирования, информационные технологии

Для цитирования: Орешина М.Н., Фехретдинова Л.Н. Интеграция методов моделирования для исследования характеристик беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ. 2025. № 142. URL: https://trudymai.ru/published.php?ID=185256

Original article

INTEGRATION OF MODELING METHODS FOR STUDYING THE CHARACTERISTICS OF UNMANNED AERIAL VEHICLES

Marina N. Oreshina[1]✉, Linara N. Fekhretdinova[2]

[1,2]Plekhanov Russian University of Economics,

Moscow, Russia

[1]oreshina.mn@rea.ru✉

[2]lfekhretdinova@gmail.com

Abstract. The purpose of the work is to integrate modeling methods to create simulation models of unmanned aerial vehicles (UAVs) with the possibility of varying characteristics. The relevance of the research is due to the growing demands on the effectiveness and safety of their use in various fields, including military, civilian and scientific. UAV simulation models created using generative design, neural network approach, and virtual reality

technologies make it possible to reproduce flight characteristics, optimize control, and explore various use cases without the need for expensive and potentially dangerous field tests.

In the study of the influence of various external influences on the trajectory of the UAV flight, methods of integro-differential calculus were used, methods of control theory were used to control the flight of models, generative design methods and appropriate software environments for modeling were used to create 3D models. The accuracy of the behavior of simulation models depends on the correctness of the set initial parameters.

The integration of modeling methods for the creation and research of simulation models during ground and flight tests of samples of promising aircraft allows us to calculate with high accuracy the impact of external influences on the characteristics of UAVs. The proposed set of simulation models can be used as simulators for UAV operators.

The creation of simulation models of unmanned aerial vehicles is an important and relevant process that finds its application in various fields, including military, civil aviation and scientific research. This paper examines the key aspects related to the development of such models, as well as their application to solve various problems.

Keywords: unmanned aerial vehicle, control, simulation model, mathematical modeling, programming environments, information technology

For citation: Oreshina M.N., Fekhretdinova L.N. Integration of modeling methods for studying the characteristics of unmanned aerial vehicles. *Trudy MAI*. 2025. No. 142. (In Russ.). URL: https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=185256

Введение

В статье рассмотрено использование методов математического и 3D моделирования для создания моделей беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и проведения исследований их поведения в различных ситуациях. Рассмотрено, как математические модели могут быть использованы для описания динамики полета БПЛА, а также как они могут быть адаптированы для учета различных факторов, таких как ветер, включая турбулентные процессы, температура и другие атмосферные условия. Важным аспектом работы станет расширение базовой модели, что позволит учитывать многопрофильные траектории полета, что, в свою очередь, повысит точность и реалистичность моделирования.

Целью данного исследования является интеграция методов моделирования для создание имитационных моделей беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) с возможностью варьирования характеристик. Актуальность исследований обусловлена растущими требованиями к эффективности и безопасности их использования в различных сферах, включая военную, гражданскую и научную. Имитационные модели БПЛА, созданные с использованием генеративного дизайна, нейросетевого подхода, технологий виртуальной реальности позволяют воспроизводить летные характеристики, оптимизировать управление и исследовать различные варианты их использования без необходимости проведения дорогих и потенциально опасных полевых испытаний.

Метод решения задачи и принятые допущения:

При исследованиях влияния различных внешних воздействий на траекторию движения полета БПЛА использовалось методы интегро-дифференциального

исчисления, для управления полетом моделей методы теории управления, при создании 3D-моделей применялись методы генеративного дизайна и соответствующие программные среды для моделирования. Точность поведения имитационных моделей зависит от корректности заданных начальных параметров.

Основное содержание статьи

Процесс моделирования БПЛА включает в себя несколько этапов, такие как выбор методологии, разработка математической модели, реализация и тестирование разработанного программного обеспечения и анализ поведения созданных моделей при решении различных задач (рис.1). Начальными условиями являются: масса, размеры, мощность двигателя и аэродинамические характеристики внешней среды, которые играют центральную роль в формировании поведения модели в различных условиях полета.

Основным направлением использования имитационных моделей является оценка поведения модели при заданных параметрах. Поскольку БПЛА могут выполнять различные функции, такие как разведка, доставка грузов или ударные операции, имитационные модели помогают визуализировать и оптимизировать эти операции в зависимости от текущих тактических задач. Создание имитационной модели начинается с анализа требований, создаются банки данных о параметрах модельных элементов, затем моделируются элементы, такие как система управления, авионика и взаимодействие с наземным оборудованием, проводятся испытания и далее анализируются полученные результаты.

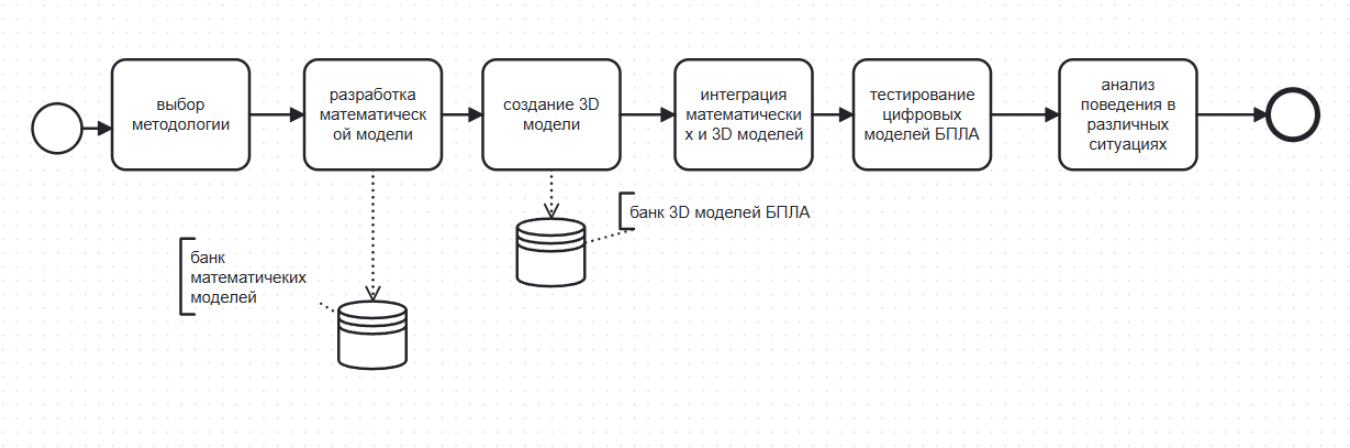

Рис. 1 Процесс моделирования БПЛА с использованием нотации BPMN 2.0

Имитационные модели помогают провести анализ влияния различных факторов на результат исследования, таких как погодные условия, помехи и др. Важно учитывать, что разные среды применения БПЛА требуют различных подходов к моделированию, от городских условий до открытых полей, где меняется и характер ведения навигации. Таким образом, алгоритмы адаптации движения разрабатываются с учетом реальных условий, что позволяет повысить достоверность имитационной модели.

Вопросы создания имитационных моделей БПЛА широко освещены в литературных источниках, при этом интеграция методов моделирования и выбора программных сред, требует более глубокого научного рассмотрения. Важным аспектом является оценка точности целостной модели. Этот процесс включает в себя как верификацию, так и валидацию разработанных модулей-подпрограмм, чтобы гарантировать, что имитационная модель адекватно отражает реальные физические процессы. Корректные методы валидации, основанные, например, на сравнении с данными полевых испытаний, позволяют значительно снизить уровень ошибок в прогнозировании и оценках.

Создание имитационных моделей БПЛА требует комплексного подхода, который включает математическое моделирование и физическое обоснование. Основная задача - это формирование системы дифференциальных уравнений, которая была бы способна адекватно описать динамические характеристики аппарата в воздухе, учитывая все важные аспекты, включая гироскопические моменты и влияние внешних возмущений [1-15].

Динамика движения БПЛА описывается в трехмерном пространстве, где основные элементы управления включают тягу, угол наклона и горизонтальное положение. Это приводит к необходимости рассмотреть множество факторов, таких как сопротивление воздуха, сопротивление скольжения. Математическая модель движения летательного аппарата представлена зависимостями (1) - (4).

Зависимость, показывающая изменение ускорения движения БПЛА от результирующей силы, воздействующей на летательный аппарат:

$$m\frac{dV}{dt} = F_{\text{рез}}\ , \qquad (1)$$

где m – масса летательного аппарата (в данной модели предполагается, что масса устройства во время полета не измена), кг, V - скорость движения ЛА (в начальный момент времени, предполагается, что скорость ЛА равна 0), м/с, $F_{рез}$ – результирующая, воздействующая на ЛА во время полета, Н.

Сила тяги $F_{тяги}$, создаваемая двигателем, определяется выражением:

$$F_{\text{рез}} = F_{\text{тяги}} + F_{\text{лоб. сопрот}} + F_{\text{трения}}, \quad (2)$$

где $F_{лоб\ сопрот}$ – сила лобового сопротивления, обусловленная неоднородностями распределения давления в среде, Н, $F_{трения}$ – сила трения, Н.

Ускорение движение летательного объекта, определяется по формулам (3), (4):

$$\frac{dV}{dt} = c\,\frac{[(V(t)-U(t))]}{R}, \quad (3)$$

где c – коэффициент, учитывающий форму ЛА, $U(t)$ – скорость среды, в которой осуществляет движение ЛА, м/с, R – миделево сечение летательного объекта.

$$\frac{dV}{dt} = mg_x \cos\alpha \cos\beta - mg_y \sin\alpha \cos\beta + mg_z \sin\beta \quad (4)$$

g_x, g_y, g_z - проекции ускорение свободного падения на координатные оси, cosα – косинус угла лобового сопротивления, $cos\beta$ – косинус угла скольжения, $sin\alpha$ – синус угла лобового сопротивления, $sin\beta$ – синус угла скольжения.

Прочностные характеристики БПЛА, определяются путем отношения расчетных значений критерия разрушения, показывающего отношения сил, вызывающих появление деформаций и трещин, стремящихся разрушить объект к силе, удерживающим целостность объекта, то есть силе упругости.

Ключевыми аспектами моделирования являются линеаризация и разработка устойчивых алгоритмов, на основе которых реализуется слежение за объектами в трехмерном пространстве. Так, алгоритмы, учитывающие возможные состояния

системы и перекрестные связи между различными элементами, помогают оптимизировать работу БПЛА. Численные расчеты с использованием данной модели проводились путем линеаризации полученных зависимостей, которые обеспечивают точное управление аппаратами в реальном времени.

Уточнение данной модели происходит по мере поступления данных о поведении аппарата в различных условиях, что позволяет улучшить управление и адаптацию в зависимости от внешних факторов.

Методология создания имитационной модели предполагает разработку математических зависимостей, которые учитывают все аспекты, в том числе и ограничения, связанные с надежностью вычислительных систем. Это является актуальным, поскольку высокая степень надежности и точности составляет основу функционирования БПЛА в зависимости от условий эксплуатации. Современные исследования показывают, что интеграция методов численного моделирования с практическими испытаниями позволяет находить оптимальные решения для эффективного контроля БПЛА и увеличения времени их автономности [16-25].

Важным шагом является тестирование модели на различных этапах разработки. Для этого осуществляется верификация и валидация математической модели с использованием известных параметров и сценариев поведения, что подтверждает ее соответствие реальным условиям. Например, применение имитационных моделей с использованием методов виртуальной и дополненной реальности в образовательных целях позволяет сформировать у обучающихся навыки аналитического мышления и практического решения поднимающихся проблем.

Таким образом, имитационные модели БПЛА становятся важным инструментом в изучении динамики полета и управлению беспилотными аппаратами. Это демонстрирует, что грамотное сочетание теоретического моделирования и практической реализации создает конкурентные преимущества для современных технологий при разработке техники для авиации.

Рассмотрению виртуальных моделей летательных аппаратов и их взаимодействие с реальными устройствами посвящена работа А. А. Кабанова, И. А. Федорова**.** В данной научной работе обоснованы механизмы вертикальной (в рамках одной онтологии на разных уровнях) и горизонтальной (в рамках разной онтологии одного уровня) интеграции цифровых моделей представлений двойников изделий, производств, систем поставки, определены базовые подходы к разработке архитектуры системы управления цифровыми двойниками производства, направленные на прикладное использование в ходе производства этих систем для авиационной отрасли [22].

В научной статье учеными Российской академии ракетных и артиллерийских наук Солдатовым А.С., Солдатовым Е.С., Богомоловым А.В. (Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук) предложена структура программной платформы синтеза виртуальной модели летательного аппарата, состоящего из цифровых моделей его составных частей путем, рассмотрено управление информационными потоками и интеграцией вычислительных ресурсов в физические процессы производства, испытаний и эксплуатации летательного аппарата [26].

Имитационные модели беспилотных летательных аппаратов применяются в различных областях, включая военное, гражданское и исследовательское использование (рис. 2). Эти модели позволяют исследовать и оптимизировать процессы, которые невозможно тестировать в реальных условиях из-за их сложности или риска.

Рис. 2. Применение БПЛА для решения различных задач

Одним из важных направлений применения имитационного моделирования является обнаружение и нейтрализация БПЛА с помощью радиолокационных систем. Специальные модели учитывают параметры, такие как размер, скорость и маневренность беспилотников, что позволяет оценить их уязвимость к различным методам поражения и разработать эффективные контрмеры. Совершенствование таких систем требует постоянного обновления данных и адаптации алгоритмов в ответ на новые угрозы.

Другой важный аспект использования БПЛА заключается в мониторинге окружающей среды, например, в условиях природных катастроф. Имитационные модели позволяют планировать и оптимизировать маршруты полетов для быстрого

реагирования на аварии, что существенно повышает эффективность спасательных операций. Параметры полета, включая высоту, скорость и угол атаки, могут быть смоделированы для того, чтобы получить максимальную информацию из зондируемой зоны.

В сфере аэрофотосъемки БПЛА могут использоваться для создания высококачественных карт и цифровых моделей местности. Имитационное моделирование здесь помогает оптимизировать методы сбора данных, используя сложные алгоритмы обработки и анализа изображений. Это позволяет значительно сократить время на подготовку данных, что особенно важно в ситуациях, требующих оперативных решений.

Также следует отметить применение БПЛА в военных операциях. Они активно используются для проведения разведки и постановки целеуказаний для наземных и воздушных сил. Имитационные модели позволяют рассмотреть различные сценарии боя, учитывая характеристику местности и специфику противника, что помогает улучшить тактические решения. Этот аспект использования БПЛА требует учета множества факторов, включая время реакции, точность вооружения и методы построения оптимальных траекторий.

Имитационное моделирование БПЛА предоставляет целый ряд преимуществ, позволяя не только контролировать существующие технологии, но и создавать новые подходы к их использованию. С учетом быстро развивающихся технологий в области искусственного интеллекта и машинного обучения, потенциал для улучшения точности и эффективности моделирования продолжает расти. Эффективные имитационные модели могут сыграть ключевую роль в будущем как для военных, так

и для гражданских применений. Разработка имитационных моделей может послужить основой для создания цифровых двойников БПЛА.

Анализ полученных результатов

Предложенная интеграция методов моделирования на основе дифференциального исчисления и создания 3D моделей БПЛА с использованием современных программных сред позволяет исследовать поведения имитационных моделей при наземных и летных испытаниях образцов перспективных беспилотных летательных аппаратов, с высокой точностью рассчитать влияние внешних воздействий на полетные характеристики БПЛА. Сопоставление полученных результатов с известными, описанными в литературных источниках показали, что перспективным направление является создание цифровых двойников летательных аппаратов, как объединения различных моделей устройства и их взаимодействие с реальным объектом на всех стадиях жизненного цикла устройства от зарождения идеи, проектирования, тестирования образцов до производства и эксплуатации при решении различных задач.

Выводы

Создание имитационных моделей беспилотных летательных аппаратов представляет собой важный и актуальный процесс, который находит свое применение в различных областях, включая военное дело, гражданскую авиацию и научные исследования. В данной работе рассмотрены ключевые аспекты, связанные с разработкой таких моделей, а также их применение для решения различных задач. Актуальность данной темы обусловлена растущей ролью БПЛА в современных

системах воздушной обороны и необходимости их эффективного использования в различных условиях.

Создание имитационных моделей БПЛА является сложным, но крайне важным процессом, который требует глубоких знаний в области математики, физики и программирования. Разработка таких моделей позволяет не только повысить эффективность использования БПЛА, но и значительно улучшить безопасность полетов.

Список источников

1. Ронжин А.Л., Нгуен В.В., Соленая О.Я. Анализ проблем разработки беспилотных летательных манипуляторов и физического взаимодействия БЛА с наземными объектами // Труды МАИ. 2018. № 98. URL: https://trudymai.ru/published.php?ID=90439

2. Кузнецова С.В., Семенов А.С. Цифровые двойники в аэрокосмической промышленности: объектно-ориентированный подход // Труды МАИ. 2023. № 131. URL: https://trudymai.ru/published.php?ID=175930. DOI: 10.34759/trd-2023-131-24

3. Кабанов А.А. Моделирование аэрокосмических производств: обзор технологий, методов и перспектив их использования в производствах будущего // Инженерный журнал: наука и инновации. 2022. № 10 (130). DOI: 10.18698/2308-6033-2022-10-2220

4. Гусейнова Р.О., Гумбатов Д.А. Оптимизация концептуальной разработки беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ. 2024. № 136. URL: https://trudymai.ru/published.php?ID=180684

5. Гусейнов О.А., Фатуллаев А.А. Вопросы проектирования узлов электропитания мультикоптеров // Труды МАИ. 2024. № 138. URL: https://trudymai.ru/published.php?ID=182666

6. Ананьев А.В., Кузияров Н.Ф., Моисеев С.И. Методика многокритериального минимакса для конструирования беспилотных летательных аппаратов мультироторного типа на основе морфологического анализа и теории латентных переменных // Труды МАИ. 2025. № 140. URL: https://trudymai.ru/published.php?ID=184069

7. Зайцева Н.И., Погарская Т.А. Разработка программного комплекса для анализа и оптимизации сборочного процесса в авиастроении // Труды МАИ. 2022. № 124. URL: https://trudymai.ru/published.php?ID=167106. DOI: 10.34759/trd-2022-124-23

8. Гусейнов А.Б. Методика структурно-параметрического синтеза конструктивно-компоновочного облика беспилотного летательного аппарата // Труды МАИ. 2011. № 49. URL: https://trudymai.ru/published.php?ID=28180

9. Цымбал М.Р., Семичастнов А.Е., Балакин Д.А., Удалов Н.Н. Разработка цифрового двойника наземной радионавигационной системы по принципам модельно-ориентированного проектирования с помощью математической среды моделирования Engee // Труды МАИ. 2024. № 136. URL: https://trudymai.ru/published.php?ID=180679

10. Белоконь С.А., Золотухин Ю.Н., Филиппов М.Н. Архитектура комплекса полунатурного моделирования систем управления летательными аппаратами // Автометрия. 2017. Т. 53, № 4. С. 44–50. DOI: 10.15372/AUT20170405

11. Белоконь С.А., Деришев Д.С., Золотухин Ю.Н., Ян А.П. Моделирование движения гибридного летательного аппарата // Автометрия. 2019. Т. 55, № 4. С. 49-56. DOI: 10.15372/AUT20190405

12. Кузьмин О.В., Лавлинский М.В. Создание модели беспилотного летательного аппарата для помощи в решении проблемы пожаров в Иркутской области // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2020. Т. 66, № 2. С. 136-143. URL: doi.org/ 10.26731/1813-9108.2020.2(66).136-143

13. Belokon S.A., Zolotukhin Yu.N., Kotov K.Yu. et al. Total Energy Control of Aircraft Longitudinal Motion // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. 2023. V. 59, No. 5. P. 580-591. URL: doi.org/ 10.3103/s8756699023050011

14. Белоконь С.А. Золотухин Ю.Н., Мальцев А.С. Совместное управление скоростью и высотой полёта малого беспилотного летательного аппарата на основе полной энергии // Автометрия. 2024. Т. 60, № 3. С. 104-112. DOI: 10.15372/AUT20240310

15. Федулов В.А., Быков Н.В., Баскаков В.Д. Оценка эффективности системы поражения малоразмерных беспилотных летательных аппаратов методом имитационного моделирования // Системы управления, связи и безопасности. 2023. № 4. С. 63-104.

16. Беляев П.Ю., Зикратов И.А. Исследование автономной навигации беспилотных летательных аппаратов на основе корреляционных методов сравнения изображений // Труды учебных заведений связи. 2024. Т. 10, № 5. С. 109–118.

17. Бондарев А.Н., Киричек Р.В. Обзор беспилотных летательных аппаратов общего пользования и регулирования воздушного движения БПЛА в разных странах // Информационные технологии и телекоммуникации. 2016. Т. 4, № 4. С. 13–23.

18. Бондарев А.Н. Бородин А.С., Киричек Р.В. Метод регулирования воздушного движения БПЛА в умных городах и сообществах // 72-я Всероссийская научно-техническая конференция, посвященная Дню радио (Санкт-Петербург, 20–28 апреля 2017): труды конференции. - Санкт-Петербург, ЛЭТИ им. В.И. Ульянова (Ленина), 2017. С. 186-188.

19. Kirichek R., Koucheryavy A. Internet of Things Laboratory Test Bed // Lecture Notes in Electrical Engineering. 2016. No. 348. P. 485-494. DOI: 10.1007/978-81-322-2580-5_44

20. Паршутин С.Г. Имитационная модель подготовки комплекса с беспилотными летательными аппаратами к полету // Вестник Московского авиационного института. 2024. Т. 31. № 1. С. 41–48.

21. Солдатов А.С., Осипов А.А. Функциональная модель автоматизированной системы подготовки полетных заданий на испытательные полеты // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. Т. 5. С. 41-47.

22. Кириллов В.Ю., Орешина М.Н. Модельные и стендовые испытания технических систем с использованием IT-технологий // Шаг в будущее: искусственный интеллект и цифровая экономика: Smart Nations: экономика цифрового равенства (Москва, 09-10 декабря 2019): сборник трудов. Москва: Государственный университет управлегия, 2020. Т. 2. С. 225-230.

23. Орешина М.Н., Зверев А.П., Карпенко В.А., Ивлев А.Д. Разработка методологии и программного обеспечения управления и прогнозирования параметров сложных технических систем // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. Т. 4. С. 76-80. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-4-76-80

24. Ageev A.M., Makarov I.V. The method of syntheses of hardware and software complexes for unmanned aerial vehicles fl ight control systems development // Journal of Siberian Federal University Engineering & Technologies. 2016. No. 9 (8). P. 1267-1278. DOI: 10.17516/1999-494X-2016-9-8-1267-1278

25. Кабанов А.А., Федоров И.А. Архитектура системы управления цифровыми двойниками производств как основа интеграции различных моделей их представлений // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2022. № 82. С. 162- 176. DOI: 10.21667/1995-4565-2022-82-162-176

26. Солдатов А.С., Солдатов Е.С., Богомолов А.В. Технологическая платформа синтеза цифрового двойника летательного аппарата на основе технологий киберфизических систем // Шестнадцатая международная конференция «Управление развитием крупномасштабных систем» - MLSD'2023 (Москва, 26–28 сентября 2023): сборник трудов. – Москва: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2023. С. 1092-1099. DOI: 10.25728/mlsd.2023.1092

References

1. Ronzhin A.L., Nguen V.V., Solenaya O.Ya. Analysis of the problems of unmanned flying manipulators development and UAV physical interaction with ground objects. *Trudy MAI*. 2018. No. 98. (In Russ.). URL: https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=90439

2. Kuznetsova S.V., Semenov A.S. Digital twins in the aerospace industry: an object-oriented approach. *Trudy MAI*. 2023. No. 131. (In Russ.). URL: https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=175930. DOI: 10.34759/trd-2023-131-24

3. Kabanov A.A. Simulation in the aerospace industry: review of technologies, methods and prospects of their use in future industries. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii*. 2022. No. 10 (130). (In Russ.). DOI: 10.18698/2308-6033-2022-10-2220

4. Guseinova R.O., Gumbatov D.A. Optimization of the conceptual development of unmanned aerial vehicles. *Trudy MAI*. 2024. No. 136. (In Russ.). URL: https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=180684

5. Guseinov O.A., Fatullaev A.A. Issues of designing power supply units for multicopters. *Trudy MAI*. 2024. No. 138. (In Russ.). URL: https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=182666

6. Anan'ev A.V., Kuziyarov N.F., Moiseev S.I. Multicriterial minimax method for designing fpv-type unmanned aerial vehicle based on morphological analysis and latent variable theory. *Trudy MAI*. 2025. No. 140. (In Russ.). URL: https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=184069

7. Zaitseva N.I., Pogarskaya T.A. Development of software complex for analysis and optimization of the aircraft assembly process. *Trudy MAI*. 2022. No. 124. (In Russ.). URL: https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=167106. DOI: 10.34759/trd-2022-124-23

8. Guseinov A.B. Methods of structural and parametric synthesis of structural and layout image UAV. *Trudy MAI*. 2011. No. 49. (In Russ.). URL: https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=28180

9. Tsymbal M.R., Semichastnov A.E., Balakin D.A., Udalov N.N. Development of a digital twin of a ground-based radio navigation system based on the principles of model-oriented design using the mathematical modeling environment Engee. *Trudy MAI*. 2024. No. 136. (In Russ.). URL: https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=180679

10. Belokon' S.A., Zolotukhin YU.N., Filippov M.N. Architecture of a platform for hardware-in-the-loop simulation of flying vehicle control systems. *Avtometriya*. 2017. V. 53, No. 4. P. 44–50. (In Russ.). DOI: 10.15372/AUT20170405

11. Belokon' S.A., Derishev D.S., Zolotukhin Yu.N., Yan A.P. Simulation of hybrid unmanned aerial vehicle motion. *Avtometriya*. 2019. V. 55, No. 4. P. 49-56. (In Russ.). DOI: 10.15372/AUT20190405

12. Kuz'min O.V., Lavlinskii M.V. Creating a model of an unmanned aerial vehicle for help in solving the fire problem in the Irkutsk region Sovremennye tekhnologii. *Sistemnyi analiz. Modelirovanie*. 2020. V. 66, No. 2. P. 136-143. (In Russ.). URL: doi.org/ 10.26731/1813-9108.2020.2(66).136-143

13. Belokon S.A., Zolotukhin Yu.N., Kotov K.Yu. et al. Total Energy Control of Aircraft Longitudinal Motion. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. 2023. V. 59, No. 5. P. 580-591. URL: doi.org/ 10.3103/s8756699023050011

14. Belokon' S.A. Zolotukhin Yu.N., Mal'tsev A.S. Collaborative control based on the total energy of the flight speed and altitude of a small unmanned aerial vehicle. *Avtometriya*. 2024. V. 60, No. 3. P. 104-112. (In Russ.). DOI: 10.15372/AUT20240310

15. Fedulov V.A., Bykov N.V., Baskakov V.D. Evaluation of the effectiveness of a system for destroying small-sized unmanned aerial vehicles by simulation modeling. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti*. 2023. No. 4. P. 63-104. (In Russ.)

16. Belyaev P.Yu., Zikratov I.A. Research of autonomous navigation of unmanned aerial vehicles aircraft based on correlation methods of image comparison. *Trudy uchebnykh zavedenii svyazi*. 2024. V. 10, No. 5. P. 109–118. (In Russ.)

17. Bondarev A.N., Kirichek R.V. Overview of public-use unmanned aerial vehicles and UAV air traffic control in different countries. *Informatsionnye tekhnologii i telekommunikatsii*. 2016. V. 4, No. 4. P. 13–23. (In Russ.)

18. Bondarev A.N. Borodin A.S., Kirichek R.V. UAV air traffic control method in smart cities and communities. *72-ya Vserossiiskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya, posvyashchennaya Dnyu radio*: trudy konferentsii. Saint-Petersburg, LETI im. V.I. Ul'yanova (Lenina) Publ., 2017. P. 186-188.

19. Kirichek R., Koucheryavy A. Internet of Things Laboratory Test Bed. Lecture Notes in Electrical Engineering. 2016. No. 348. P. 485-494. DOI: 10.1007/978-81-322-2580-5_44

20. Parshutin S.G. Simulation model of flight preparation of a complex with unmanned aerial vehicles. *Aerospace MAI Journal*. 2024. V. 31, No. 1. P. 41–48. (In Russ.)

21. Soldatov A.S., Osipov A.A. A functional model of an automated system for preparing flight tasks for test flights. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta*. *Tekhnicheskie nauki.* 2023. V. 5, P. 41-47. (In Russ.)

22. Kirillov V.Yu., Oreshina M.N. Model and bench tests of technical systems using IT technologies. *Shag v budushchee: iskusstvennyi intellekt i tsifrovaya ekonomika: Smart Nations: ekonomika tsifrovogo ravenstva*: sbornik trudov. Moscow: Gosudarstvennyi universitet upravlegiya Publ., 2020. V. 2. P. 225-230.

23. Oreshina M.N., Zverev A.P., Karpenko V.A., Ivlev A.D. Development of methodology and software for control and forecasting of parameters of complex technical systems.

Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2023. V. 4, P. 76-80. (In Russ.). DOI: 10.24412/2071-6168-2023-4-76-80

24. Ageev A.M., Makarov I.V. The method of syntheses of hardware and software complexes for unmanned aerial vehicles fl ight control systems development. *Journal of Siberian Federal University Engineering & Technologies*. 2016. No. 9 (8). P. 1267-1278. (In Russ.). DOI: 10.17516/1999-494X-2016-9-8-1267-1278

25. Kabanov A.A., Fedorov I.A. The architecture of the digital twin production management system as the basis for the integration of various models of their representations. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2022. No. 82. P. 162-176. (In Russ.). DOI: 10.21667/1995-4565-2022-82-162-176

26. Soldatov A.S., Soldatov E.S., Bogomolov A.V. Technological platform for synthesizing an aircraft's digital twin based on cyberphysical systems technologies. *Shestnadtsataya mezhdunarodnaya konferentsiya «Upravlenie razvitiem krupnomasshtabnykh sistem» - MLSD'2023*: sbornik trudov. Moscow: Institut problem upravleniya im. V.A. Trapeznikova RAN Publ., 2023. P. 1092-1099. DOI: 10.25728/mlsd.2023.1092

Статья поступила в редакцию 26.03.2025
Одобрена после рецензирования 10.04.2025
Принята к публикации 25.06.2025
The article was submitted on 26.03.2025; approved after reviewing on 10.04.2025; accepted for publication on 25.06.2025