

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ РЕШЕНИЙ И КОНСТРУКЦИЙ МОДУЛЬНЫХ ДРОНОВ

КЕРЕЕВ А.К. * , САРТАБАНОВА Ж.Е. , РЫСДАУЛЕТОВА А.А. 

*Кереев Адилжан Кутымович – PhD, доцент кафедры информатики и информационных технологий, Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова, г.Ақтөбе, Қазақстан

E-mail: akereyev@zhubanov.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-8283-5807>

Сартабанова Жанар Елибаевна – PhD, старший преподаватель, Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова, Heriot Watt University, Aktobe Campus, г.Ақтөбе, Қазақстан,

E-mail: zhanar.sartabanova@zhubanov.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-4942-5117>

Рысдаулетова Айжан Абайқызы – Магистр, преподаватель, Актюбинский региональный университет имени К.Жубанова, г.Ақтөбе, Қазақстан

E-mail: 30.03.94.a@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-2335-8648>

Аннотация. В статье представлен анализ современных тенденций в области разработки модульных беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), ориентированных на повышение эффективности эксплуатации, снижение эксплуатационных затрат и продление срока службы устройств. Рассмотрены три ключевых направления, определяющих инновационный потенциал дронов: использование бионического дизайна, аддитивного производства и методов топологической оптимизации. Показано, что бионические принципы позволяют улучшать аэродинамические характеристики и маневренность дронов, в то время как 3D-печать обеспечивает гибкость проектирования и ускоряет процесс создания прототипов. Применение топологической оптимизации позволяет значительно снизить вес конструкций без потери прочности, что ведет к росту времени полета и энергоэффективности.

Особое внимание уделено преимуществам модульной архитектуры. Такой подход обеспечивает возможность оперативной замены или модернизации отдельных компонентов без полной разборки устройства, что соответствует концепциям устойчивого развития и экономики замкнутого цикла. Модульность не только снижает расходы на техническое обслуживание, но и способствует сокращению электронных отходов за счет увеличения жизненного цикла дронов. Кроме того, стандартизация интерфейсов и совместимость модулей упрощают интеграцию новых технологий, что особенно важно в условиях стремительного прогресса в области сенсорных систем, аккумуляторных технологий и искусственного интеллекта.

Практическая значимость работы заключается в том, что модульные дроны находят широкое применение в различных сферах – от мониторинга сельскохозяйственных угодий и экологического контроля до промышленной диагностики, логистики и поиска пострадавших в чрезвычайных ситуациях. Возможность оперативной адаптации конфигурации дрона под конкретные задачи повышает эффективность его эксплуатации и делает подобные системы более универсальными и экономически целесообразными.

Таким образом, модульные конструкции дронов формируют новую стратегию в проектировании БПЛА, ориентированную на совместимость, адаптивность и долгосрочную надежность систем. Результаты анализа подчеркивают перспективность дальнейших исследований в области интеграции бионического дизайна, аддитивных технологий и топологической оптимизации, что позволит создавать легкие, энергоэффективные и экологически устойчивые беспилотные системы.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, модульная конструкция, дроны, топологическая оптимизация, аддитивное производство, энергоэффективность.

Введение

Современные беспилотные летательные аппараты (БПЛА) становятся ключевыми инструментами в различных областях: от мониторинга инфраструктуры до доставки грузов. Их эффективность зависит от инновационных решений в конструкции, материаловедении и методах производства. В данной статье рассматриваются три исследования, демонстрирующие передовые подходы к разработке дронов: использование бионического дизайна, аддитивное производство и топологическую оптимизацию. Эти технологии позволяют создавать легкие, энергоэффективные и адаптируемые системы, отвечающие растущим требованиям рынка.

В области БПЛА существует множество типов систем и задач. Хотя наиболее известными

стали БПЛА с большой продолжительностью полета и средним высотным диапазоном, такие как Predator, благодаря их вкладу в недавние конфликты в Ираке и Афганистане, существуют и другие системы, например, ручного запуска, такие как Raven. Существует множество представлений о БПЛА. Некоторые могут воспринимать их как усовершенствованные модели самолетов или летательные аппараты без пилотов, но эти взгляды не отражают всей сложности, разнообразия и возможностей таких систем.

Беспилотные летательные аппараты также имеют различные названия: дрон, дистанционно управляемое транспортное средство или самолет (RPV/RPA), беспилотный летательный аппарат (БПЛА), органический летательный аппарат (OAV), аэроробототехника, микро-БПЛА (MAV) и другие. К БПЛА также относятся безмоторные аппараты (планеры), способные к навигации и переноске полезной нагрузки.

Технологические инновации продолжают способствовать развитию БПЛА, акцентируя внимание на эффективности, адаптивности и устойчивости. Поскольку дроны становятся неотъемлемой частью таких отраслей, как сельское хозяйство, наблюдение и доставка, возрастает потребность в конструкциях, которые облегчают техническое обслуживание и модернизацию. Традиционные архитектуры дронов часто затрудняют ремонт и замену компонентов, что приводит к росту расходов и увеличению объема электронных отходов. Для решения этих проблем необходимо переходить к принципам модульного проектирования, что позволит конечным пользователям легко заменять или обновлять части без специальных инструментов или навыков. Такой подход не только продлевает срок службы дрона, но и способствует достижению экологических целей, снижая добычу ресурсов и образование отходов, поддерживая стремление к устойчивой экономике замкнутого цикла [1]. Более того, сочетание модульных конструкций с тщательным тестированием и развитием технических навыков обеспечивает надежность работы и дает пользователям возможность самостоятельно управлять процессом модернизации [2], способствуя формированию более устойчивой и ориентированной на пользователя экосистемы дронов.

Обзор литературы

Технический прогресс все активнее внедряется в различные отрасли, кардинально повышая эффективность и безопасность операций. Среди этих инноваций технологии дронов выделяются своей универсальностью и преобразующим потенциалом. Дроны широко применяются в строительстве для мониторинга объектов и управления проектами, увеличивая производительность и повышая безопасность за счет точного сбора данных и наблюдения в реальном времени. В опасных средах, таких как термоядерные реакторы, дроны позволяют выполнять работы по техническому обслуживанию дистанционно, исключая воздействие опасных условий на работников и обеспечивая бесперебойную работу. Эти примеры подчеркивают ключевую роль дронов в автоматизации сложных процессов, сокращении простоев и предоставлении ценной аналитики для принятия решений. Таким образом, растущее применение дронов в промышленности подчеркивает необходимость разработки модульных конструкций, упрощающих модернизацию и техническое обслуживание, что обеспечивает долгосрочную адаптивность и экономическую эффективность на фоне стремительно развивающихся технологий.

Исследование, представленное в работе «Design and Analysis of a Modular VTOL Drone With Bat-Inspired Wings», фокусируется на создании модульного дрона вертикального взлета и посадки (VTOL), вдохновленного морфологией крыльев летучих мышей. Показано аэродинамическая эффективность таких дронов: крылья с изменяемой геометрией позволяют дрону адаптироваться к различным режимам полета (вертикальный взлет, переход в горизонтальный полет). Взаимозаменяемые крылья и хвостовая часть упрощают настройку дрона под конкретные задачи, такие как мониторинг ветряных электростанций или инспекция резервуаров. Конфигурация с

высоким аспектным отношением крыла ($AR = 8$) показала наилучшее соотношение подъемной силы и сопротивления, что критично для увеличения времени полета. Данный подход демонстрирует, как бионические принципы могут быть использованы для улучшения маневренности и энергоэффективности БПЛА [3].

Работа «Design and Manufacturing Innovations in Modular Drone Design Enabled by Additive Manufacturing» подчеркивает роль 3D-печати в создании модульных дронов. Кастомизируемая плата распределения питания (PDB): Замена стандартных PDB на 3D-печатные версии позволила интегрировать электронику непосредственно в корпус дрона, снизив вес и упростив сборку. Технология FDM-печати с паузами для размещения проводки уменьшила количество соединений и повысила надежность. Студенты-инженеры участвовали в полном цикле разработки — от проектирования до тестирования, что способствовало развитию навыков междисциплинарного collaboration и понимания производственных процессов. Аддитивное производство не только ускоряет итерации, но и открывает новые возможности для создания компактных и многофункциональных конструкций.

В исследовании «Design and Analysis of Optimized Quadcopter Type Drone Structure» применены методы FEA и топологической оптимизации для проектирования каркаса квадрокоптера. В результате снижен вес на 41%: использование алгоритма ESO (Evolutionary Structural Optimization) позволило удалить избыточный материал, сохранив прочность конструкции. Облегченная рама уменьшила нагрузку на двигатели, что повысило время полета. Разработанное GUI-приложение на Python позволяет оценивать энергоэффективность конструкции на ранних этапах проектирования. Эти методы особенно актуальны для коммерческих дронов, где баланс между прочностью, весом и стоимостью критичен [5].

Все три исследования объединяет стремление к модульности, энергоэффективности и адаптивности.

Бионический дизайн улучшает аэродинамику, аддитивное производство обеспечивает гибкость в проектировании, а топологическая оптимизация минимизирует ресурсозатраты. Например, объединение 3D-печатных компонентов с оптимизированной структурой может привести к созданию дронов с рекордными характеристиками.

Материалы и методы исследования

Малые БПЛА чаще всего классифицируют так:

1. Мультикоптеры (самый популярный тип для съемки, мониторинга и доставки): несколько горизонтальных роторов (4, 6, 8 и более).

Примеры: квадрокоптер (4 пропеллера), гексакоптер (6 пропеллеров).

Плюсы: простота управления, стабильность зависания. Минусы: небольшая дальность и время полета.



Рисунок 1. DJI Phantom 4 Pro — квадрокоптер)

2. Самолётного типа (крылатые дроны): корпус с фиксированным крылом, как у обычного самолета. Примеры: разведывательные или картографические БПЛА.

Плюсы: высокая скорость и большая дальность полета. Минусы: требуется разгон для взлета и посадочная полоса.



Рисунок 2. БПЛА самолетного типа, запуск с катапульты

3. Конвертопланы (гибриды самолета и вертолета): могут вертикально взлетать и приземляться как вертолет, а в полете переходить на горизонтальный режим как самолет. Примеры: WingtraOne, DJI Vtol.

Плюсы: универсальность — можно взлетать с ограниченного пространства и летать далеко.

Минусы: более сложная и дорогая конструкция.



Рисунок 3. WingtraOne — конвертоплан

4. Орнитоптеры (редкие для практики, чаще в исследовательских целях): махающие крылья, имитирующие полет птиц или насекомых. Примеры: роботы-птицы, роботы-стрекозы.

Плюсы: высокая маневренность, малая заметность.

Минусы: слабая грузоподъемность, сложное управление.



Рисунок 4. Малый орнито́птер в форме птицы)

5. Конструкции «Летающие крылья»: корпус сам по себе — крыло, без хвоста. Примеры: военные разведывательные дроны или дизайнерские модели.

Плюсы: аэродинамичность, малая заметность на радарях.

Минусы: сложное управление, уязвимость к порывам ветра.

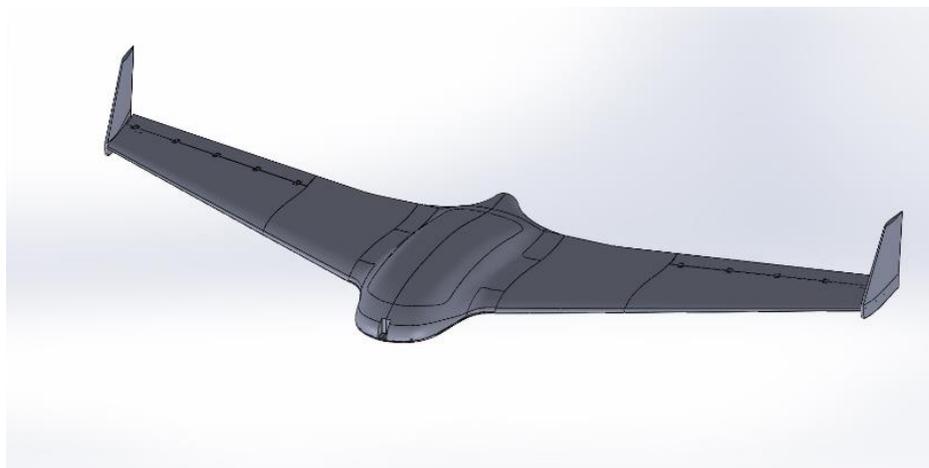


Рисунок 5. БПЛА типа «летающее крыло»

Таблица 1. Сравнения типов малых БПЛА по основным параметрам

| Тип БПЛА | Время полета | Скорость | Простота управления | Стоимость | Особенности |
|------------------|--------------|-------------------------------|-----------------------|-----------------|--|
| Мультикоптер | 20–40 минут | Низкая (10–50 км/ч) | Очень простое | Низкая–средняя | Зависание, точная стабилизация |
| Самолетного типа | 1–3 часа | Высокая (50–150 км/ч) | Средняя | Средняя–высокая | Большая дальность и продолжительность полета |
| Конвертоплан | 1–2 часа | Средняя–высокая (60–100 км/ч) | Сложнее мультикоптера | Высокая | Универсальность взлета и полета |
| Орнито́птер | 5–20 минут | Низкая (5–30 км/ч) | Сложное | Средняя–высокая | Имитирует полет живых существ |
| Летающее крыло | 1–3 часа | Высокая (80–150 км/ч) | Сложное | Средняя–высокая | Высокая аэродинамичность, скрытность |

Результаты и их обсуждение

1. Преимущества модульной конструкции дронов

Внедрение модульной конструкции в разработку дронов дает значительные преимущества, особенно в упрощении технического обслуживания и модернизации. Модульность позволяет быстро заменять или обновлять отдельные компоненты без необходимости полного демонтажа устройства, тем самым снижая время простоя и операционные расходы. Этот подход соответствует принципам устойчивого развития, поскольку он способствует ремонту, а не замене, продлевая срок службы дронов и снижая образование отходов, что соответствует концепциям экономики замкнутого цикла [1]. Кроме того, использование архитектуры открытых модульных систем способствует совместимости и адаптивности, облегчая интеграцию новых технологий без необходимости полной переработки системы. Опыт различных отраслей подтверждает, что модульные решения способствуют ускорению инноваций и укрепляют сотрудничество между производителями, что также крайне важно для развития дронов [6]. Таким образом, модульная конструкция не только упрощает обслуживание, но и делает дроны более устойчивыми к технологическому устареванию.

Внедрение модульной структуры в проектирование дронов значительно упрощает процессы технического обслуживания и ремонта. Традиционные дроны часто требуют специальных навыков и полного демонтажа для устранения неисправностей, что приводит к длительным простоям и высоким расходам. В отличие от них, модульные конструкции позволяют легко заменить или обновить отдельные компоненты без необходимости разбирать все устройство, способствуя культуре ремонта вместо замены. Это соответствует целям устойчивого производства, увеличивая срок службы техники и снижая объем электронных отходов, поддерживая тем самым глобальные экологические инициативы [1]. Кроме того, модульный подход облегчает интеграцию систем диагностики и удаленного обслуживания, аналогичных тем, что применяются в сложных промышленных объектах, например, в термоядерных реакторах [7]. Таким образом, упрощение процессов обслуживания в модульных дронах не только повышает эффективность, но и способствует устойчивости на протяжении всего жизненного цикла технологий.

Интеграция модульной структуры в проектирование дронов существенно повышает их модернизируемость и настраиваемость, позволяя пользователям адаптировать устройства к новым технологическим достижениям и специфическим задачам. Это дает возможность независимо обновлять или заменять такие компоненты, как датчики, аккумуляторы и процессоры, без необходимости полной замены устройства, снижая при этом время простоя и сложность технического обслуживания. Более того, модульная архитектура способствует совместимости и стимулирует коллективные инновации за счет использования стандартизированных интерфейсов, что подчеркивается концепцией Modular Open Systems Approach (MOSA) в различных отраслях [6]. Также модульность позволяет внедрять интеллектуальные системы анализа данных и проектировать компоненты с учетом реальных эксплуатационных параметров [8]. Таким образом, модульные дроны создают универсальную платформу, где обслуживание и модернизация упрощаются за счет сочетания модульного «железа» и адаптивного «умного» программного обеспечения.

В современном инженерном проектировании адаптивность является ключевым фактором для удовлетворения требований стремительно развивающихся технологий. Внедрение модульной структуры в конструкции дронов значительно повышает гибкость систем, позволяя беспрепятственно интегрировать новые технологии и функции без необходимости радикальных переработок. Это снижает риски устаревания, сокращает простои и позволяет производить постепенные обновления в соответствии с разнообразными задачами. Стандартизация модулей также облегчает замену и улучшение отдельных компонентов, увеличивая срок службы и

экономичность. Практика из отраслей, использующих модульные подходы, показывает, что гибкость стимулирует инновации и оптимизирует процессы обслуживания [1]. Хотя такие принципы изначально применялись в сложных и опасных условиях, как, например, в термоядерной энергетике, их адаптация для дронов подчеркивает стратегические преимущества (модульности в управлении технологическими изменениями [7]. Такая гибкость, в конечном итоге, обеспечивает долгосрочную эффективность и удовлетворенность пользователей.

Заключение

Интеграция модульной структуры в проектирование дронов кардинально изменяет процессы обслуживания и модернизации, способствуя устойчивому развитию и повышению операционной эффективности. Возможность легкой замены и ремонта отдельных компонентов позволяет значительно продлить срок службы устройств, снижая потребление ресурсов и объем электронных отходов. Это соответствует глобальным экологическим целям, поскольку культура ремонта признана критически важной для устойчивого потребления [1]. Кроме того, применение принципов Modular Open Systems Approach (MOSA) способствует совместимости и стимулирует инновации, что доказано в различных отраслях, включая военную сферу [6]. Таким образом, модульная конструкция дронов не только упрощает техническое обслуживание, но и способствует экономической и экологической устойчивости, подчеркивая важность модульности как стратегического направления в развитии технологий дронов.

Модульная конструкция революционизирует процессы обслуживания и модернизации дронов, позволяя легко заменять или улучшать отдельные компоненты без демонтажа всей системы. Такая гибкость значительно снижает время простоя и затраты на ремонт, поскольку неисправные модули могут быть быстро идентифицированы и заменены. Кроме того, модульность способствует индивидуализации дронов под конкретные задачи или условия эксплуатации, увеличивая их срок службы и универсальность. С точки зрения производства, стандартизация модулей упрощает производственные процессы и управление складскими запасами, стимулируя масштабирование и инновации. Модульные конструкции также позволяют легко интегрировать новые технологии, повышая производительность. Эти преимущества соответствуют современным тенденциям в обслуживании сложных систем, где модульный подход и передовые технологии автоматизации и искусственного интеллекта оптимизируют эффективность и использование ресурсов [7, 9]. Следовательно, модульная конструкция становится ключевой стратегией для продвижения технологий дронов в коммерческой и промышленной сферах.

Будущее разработки дронов лежит в интеграции искусственного интеллекта для автономного управления, использовании композитных материалов для дальнейшего снижения веса и внедрении стандартов сертификации для 3D-печатных компонентов [10]. Представленные работы демонстрируют, что сочетание бионического дизайна, аддитивных технологий и методов оптимизации способно изменить индустрию БПЛА, делая их более доступными, надежными и многофункциональными.

Список литературы

1. Dalhammar, Carl, Jensen, Charlotte Louise, Olsson, Anna Richter, Quist, et al. «Futures of Fixing: Exploring the life of product users in circular economy repair society scenarios» International Institute for Industrial Environmental Economics, Lund University, 2022, doi: <https://core.ac.uk/download/541136934.pdf>
2. Behle, Riccarda, Kretschmar, Dominik, Lechner, Thomas, Trzesniowski, et al. «Module 4. Technical Skills Upgrade» Bellaterra: Universitat Autònoma de Barcelona. Edo-serveis, 2018, doi: <https://core.ac.uk/download/491372781.pdf>
3. Maja & Stankoski, Marko & Berberu, Mihael & Atanasov, Aleksandar & Janevski, Jane &

Jovanova, Jovana. (2020). Design and Analysis of a Modular VTOL Drone With Bat-Inspired Wings. 10.1115/SMASIS2020-2342.

4. Akasheh Firas & Shannon David & Pippins Ryan & Thompson Eugene & Carter Adrian & Baker Stephen & Guiseppi Brandon. Additive Manufacturing-Enabled Modular Drone Design Development by Multidisciplinary Engineering Student Team Additive Manufacturing-Enabled Modular Quadcopter Drone Design Development by Multidisciplinary Engineering Student Team. 2022, 10.18260/1-2--42122.

5. Sucuoğlu H. S. Design and analysis of optimized quadcopter type drone structure. Innovative Approaches to Engineering Problems, 2025, 1(1), 4-11.

6. Halbert Triston M., Johnson, Davin S. «Plug and play acquisition (Implementing mosa)» Monterey, CA; Naval Postgraduate School, 2024, doi: <https://core.ac.uk/download/643186473.pdf>

7. Zhang Ziyue. «Review of the current industrial products for remote handling in fusion reactor» 2024, doi: <https://core.ac.uk/download/630298220.pdf>

8. Li Yunpeng. «A Smart Products Lifecycle Management (sPLM) Framework - Modeling for Conceptualization, Interoperability, and Modularity» Surface at Syracuse University, 2018, doi: <https://core.ac.uk/download/215712850.pdf>

9. Hadiya Rahul. «Applications of Artificial Intelligence in Construction Industry: A Review» Assam Don Bosco University, 2021, doi: <https://core.ac.uk/download/478568655.pdf>

10. Allen, Gavin, Yang, Lichao, Zhang, Zichao, Zhao, et al. «Achieving on-site trustworthy AI implementation in the construction industry: a framework across the AI lifecycle», <https://www.mdpi.com/2075-5309/15/1/21>, 2024, doi: <https://core.ac.uk/download/635930515.pdf>

References

1. Dalhammar, Carl, Jensen, Charlotte Louise, Olsson, Anna Richter, Quist, et al.. «Futures of Fixing: Exploring the life of product users in circular economy repair society scenarios» International Institute for Industrial Environmental Economics, Lund University, 2022, doi: <https://core.ac.uk/download/541136934.pdf>

2. Behle, Riccarda, Kretschmar, Dominik, Lechner, Thomas, Trzesniowski, et al. «Module 4. Technical Skills Upgrade» Bellaterra: Universitat Autònoma de Barcelona. Edo-serveis, 2018, doi: <https://core.ac.uk/download/491372781.pdf>

3. Maja & Stankoski, Marko & Berberu, Mihael & Atanasov, Aleksandar & Janevski, Jane & Jovanova, Jovana. (2020). Design and Analysis of a Modular VTOL Drone With Bat-Inspired Wings. 10.1115/SMASIS2020-2342.

4. Akasheh, Firas & Shannon, David & Pippins, Ryan & Thompson, Eugene & Carter, Adrian & Baker, Stephen & Guiseppi, Brandon. Additive Manufacturing-Enabled Modular Drone Design Development by Multidisciplinary Engineering Student Team Additive Manufacturing-Enabled Modular Quadcopter Drone Design Development by Multidisciplinary Engineering Student Team. 2022, 10.18260/1-2--42122.

5. Sucuoğlu, H. S. Design and analysis of optimized quadcopter type drone structure. Innovative Approaches to Engineering Problems, 2025, 1(1), 4-11.

6. Halbert, Triston M., Johnson, Davin S. «Plug and play acquisition (Implementing mosa)» Monterey, CA; Naval Postgraduate School, 2024, doi: <https://core.ac.uk/download/643186473.pdf>

7. Zhang Ziyue. «Review of the current industrial products for remote handling in fusion reactor» 2024, doi: <https://core.ac.uk/download/630298220.pdf>

8. Li Yunpeng. «A Smart Products Lifecycle Management (sPLM) Framework - Modeling for Conceptualization, Interoperability, and Modularity» Surface at Syracuse University, 2018, doi: <https://core.ac.uk/download/215712850.pdf>

9. Hadiya, Rahul. «Applications of Artificial Intelligence in Construction Industry: A Review»

10. Allen, Gavin, Yang, Lichao, Zhang, Zichao, Zhao, et al. «Achieving on-site trustworthy AI implementation in the construction industry: a framework across the AI lifecycle», <https://www.mdpi.com/2075-5309/15/1/21>, 2024, doi: <https://core.ac.uk/download/635930515.pdf>

МОДУЛЬДІК ДРОНДАРДЫҢ ҚОЛДАНЫСТАҒЫ ШЕШІМДЕРІ МЕН КОНСТРУКЦИЯЛАРЫНА ТАЛДАУ

КЕРЕЕВ А.К. , САРТАБАНОВА Ж.Е. , РЫСДАУЛЕТОВА А.А. 

*Кереев Адилжан Қутымович – PhD, информатика және ақпараттық технологиялар кафедрасының доценті, Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Ақтөбе қ., Қазақстан.

E-mail: akereyev@zhubanov.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-8283-5807>

Сартабанова Жанар Елибаевна – PhD, аға оқытушы, Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Heriot Watt University, Ақтөбе кампусы, Ақтөбе қ., Қазақстан.

E-mail: zhanar.sartabanova@zhubanov.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-4942-5117>

Рысдаулетова Айжан Абайқызы – Магистр, оқытушы, Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Ақтөбе қ., Қазақстан.

E-mail: 30.03.94.a@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-2335-8648>

Андатпа. Мақалада модульдік ұшқышсыз ұшу аппараттарын (ҰҰА) жасаудағы заманауи үрдістерге талдау ұсынылған. Зерттеу аппараттардың пайдалану тиімділігін арттыруға, пайдалану шығындарын азайтуға және қызмет ету мерзімін ұзартуға бағытталған. Дрондардың инновациялық әлеуетін айқындайтын үш негізгі бағыт қарастырылады: бионикалық дизайнды қолдану, аддитивті өндіріс және топологиялық оңтайландыру әдістері. Бионикалық принциптер дрондардың аэродинамикалық қасиеттері мен маневрлігін жақсартатыны, ал 3D-басып шығару жобалау икемділігін қамтамасыз етіп, прототиптерді жасауды жеделдететіні көрсетілген. Топологиялық оңтайландыруды қолдану дрон салмағын беріктігін жоғалтпай едәуір азайтуға мүмкіндік береді, бұл ұшу уақытын ұзартып, энергия тиімділігін арттырады.

Модульдік архитектураның артықшылықтарына ерекше көңіл бөлінген. Мұндай тәсіл құрылғыны толық бөлшектемей-ақ жеке компоненттерді жедел ауыстыруға немесе жаңартуға мүмкіндік береді, бұл орнықты даму және тұйық экономика қағидаттарына сәйкес келеді. Модульдік тәсіл техникалық қызмет көрсету шығындарын ғана азайтып қоймай, дрондардың өмірлік циклін ұзарта отырып, электрондық қалдықтардың азаюына ықпал етеді. Сонымен қатар интерфейсдерді стандарттау мен модульдердің үйлесімділігі жаңа технологияларды енгізуді жеңілдетеді, бұл сенсорлық жүйелер, аккумуляторлық технологиялар және жасанды интеллект салаларындағы жылдам прогресс жағдайында аса маңызды.

Жұмыстың практикалық маңызы – модульдік дрондар ауыл шаруашылық алқаптарын мониторингілеуден және экологиялық бақылаудан бастап, өнеркәсіптік диагностика, логистика және төтенше жағдайларда зардап шеккендерді іздеуге дейінгі түрлі салаларда кеңінен қолданылады. Дрон конфигурациясын нақты міндеттерге жедел бейімдеу мүмкіндігі оның пайдалану тиімділігін арттырып, мұндай жүйелерді әмбебап әрі экономикалық тұрғыдан тиімді етеді.

Осылайша, модульдік дрон конструкциялары үйлесімділікке, бейімделгіштікке және жүйелердің ұзақ мерзімді сенімділігіне бағытталған ҰҰА жобалауда жаңа стратегия қалыптастырады. Талдау нәтижелері бионикалық дизайнды, аддитивті технологияларды және топологиялық оңтайландыруды интеграциялау саласындағы әрі қарайғы зерттеулердің болашағы зор екенін айқындайды. Бұл жеңіл, энергия тиімді және экологиялық орнықты ұшқышсыз жүйелерді жасауға мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: ұшқышсыз ұшу аппараттары, модульдік конструкция, дрондар, топологиялық оңтайландыру, аддитивті өндіріс, энергия тиімділігі.

ANALYSIS OF EXISTING SOLUTIONS AND DESIGNS OF MODULAR DRONES

KEREYEV A.K. , SARTABANOVA ZH.E. , RYSDAULETOVA A.A. 

*Kereyev Adilzhan Kutymovich – PhD, associate professor, department of computer science and information technologies, Zhubanov Aktobe Regional University, Aktobe, Kazakhstan.

E-mail: akereyev@zhubanov.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-8283-5807>

Sartabanova Zhanar Yelibayevna – PhD, senior lecture, K.Zhubanov Aktobe Regional University, Heriot Watt University, Aktobe Campus, Aktobe, Kazakhstan.

E-mail: zhanar.sartabanova@zhubanov.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-4942-5117>

Rysdauletova Aizhan Abaykyzy – Master, lecturer, K.Zhubanov Aktobe Regional University, Aktobe, Kazakhstan.

E-mail: 30.03.94.a@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-2335-8648>

Abstract. The article presents an analysis of modern trends in the development of modular unmanned aerial vehicles (UAVs), aimed at improving operational efficiency, reducing operating costs, and extending the service life of devices. Three key areas that define the innovative potential of drones are considered: the use of bionic design, additive manufacturing, and topological optimization methods. It is shown that bionic principles improve the aerodynamic characteristics and maneuverability of drones, while 3D printing provides design flexibility and accelerates the prototyping process. The application of topological optimization makes it possible to significantly reduce the weight of structures without losing strength, which leads to increased flight time and energy efficiency.

Special attention is paid to the advantages of modular architecture. This approach enables the prompt replacement or modernization of individual components without the complete disassembly of the device, which aligns with the concepts of sustainable development and circular economy. Modularity not only reduces maintenance costs but also helps to decrease electronic waste by extending the lifecycle of drones. In addition, the standardization of interfaces and compatibility of modules simplify the integration of new technologies, which is especially important in the context of rapid progress in sensor systems, battery technologies, and artificial intelligence.

The practical significance of the work lies in the fact that modular drones are widely used in various fields—from agricultural land monitoring and environmental control to industrial diagnostics, logistics, and search for victims in emergency situations. The ability to quickly adapt the drone’s configuration to specific tasks increases its operational efficiency and makes such systems more versatile and economically viable.

Thus, modular drone designs form a new strategy in UAV development, focused on compatibility, adaptability, and long-term reliability of systems. The results of the analysis highlight the promising prospects for further research in the integration of bionic design, additive technologies, and topological optimization, which will make it possible to create lightweight, energy-efficient, and environmentally sustainable unmanned systems.

Key words: unmanned aerial vehicles, modular design, drones, topology optimization, additive manufacturing, energy efficiency.