

УДК 629.7.036.3:534.83

ПАССИВНЫЕ И АКТИВНЫЕ МЕТОДЫ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ШУМОПОДАВЛЕНИЯ В КОНСТРУКЦИЯХ EVTOL

Михонов И.В.¹, школьник 10 класса,

Хажакян В.О.², магистрант гр. 空天25M007, I курс,

Михонов В.В.³, магистрант гр. T11O-102CB-25, I курс

Научный руководитель: Хорлина Е.М.¹, учитель физики и информатики

Муниципальное бюджетное общеобразовательное учреждение

¹«Средняя общеобразовательная школа-интернат»

г. Кашира

²Шанхайский университет Цзяо Тун, Школа авиации и астронавтики,
кафедра машиностроения

г. Шанхай

³Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Московский авиационный институт (национальный
исследовательский университет)» №11 «Новые материалы и
производственные технологии»

г. Москва

Введение. В последние годы концепция городской воздушной мобильности (Urban Air Mobility, UAM) активно развивается как один из способов решения проблемы транспортных заторов в крупных городах. Электрические аппараты вертикального взлёта и посадки (eVTOL) рассматриваются в качестве основного типа летательных аппаратов для таких систем благодаря экологичности и возможности эксплуатации в условиях плотной городской застройки [1].



Рисунок 1 — Электрический аппарат вертикального взлета и посадки

Однако на пути широкого внедрения eVTOL существует серьёзное препятствие — акустическое воздействие на городскую среду. В отличие от вертолётов, аппараты eVTOL используют распределённые силовые установки с несколькими высокооборотными винтами. Это создаёт сложную картину шума, а низкая высота полёта (100–300 метров над жилыми кварталами) делает проблему особенно острой. Исследователи отмечают, что без существенного снижения шума относительно традиционных вертолётов общественное принятие городской авиамобильности останется под вопросом [1].

Цель настоящей работы — анализ и систематизация основных подходов к снижению аэродинамического шума eVTOL, рассматриваемых в современных научных исследованиях и патентах.

Для достижения поставленной цели решались следующие *задачи*:

1. Выявить основные физические механизмы аэродинамического шума многороторных eVTOL;
2. Классифицировать существующие методы шумоподавления на пассивные и активные;
3. Проанализировать эффективность геометрической оптимизации лопастей как пассивного метода;
4. Рассмотреть принципы активного управления шумом (синхрофазирование, разброс оборотов, адаптивные системы);
5. Определить перспективные направления интеграции методов для достижения максимального акустического комфорта в городской среде.

Физические механизмы шумообразования eVTOL. Аэродинамический шум eVTOL имеет сложную физическую природу. Его можно разделить на две основные категории:

- *Собственный шум винтов.* При вращении лопасти создают периодические возмущения давления. Возникает тональный шум на частоте прохождения лопастей и её гармониках. Чем выше скорость вращения и нагрузка на винт, тем интенсивнее этот шум.
- *Шум взаимодействия.* В многороторных схемах этот тип шума становится критическим. Он включает взаимодействие вихрей с лопастями, когда лопасть проходит через вихрь, сошедший с предыдущей лопасти [1].

Понимание этих механизмов является основой для выбора эффективных методов шумоподавления.

Пассивные методы шумоподавления. Геометрическая оптимизация является базовым подходом к снижению шума. Воздействуя на форму лопастей на этапе проектирования, можно уменьшить интенсивность самих источников шума без применения дополнительных систем.

Одним из эффективных решений является применение стреловидности лопасти. Этот конструктивный элемент создаёт эффект «дефазировки»: разные участки лопасти излучают шум с небольшим сдвигом по времени, что приводит к частичному взаимному гашению акустических волн. Принципиально важно, что геометрические решения могут работать по тому

же принципу, что и активное фазовое управление, но при этом не требуют сложных бортовых систем.

Современные исследования [2] показывают, что применение мультифидельной оптимизации позволяет на ранних этапах проектирования находить баланс между аэродинамической эффективностью, уровнем шума и массой конструкции. Пассивная оптимизация геометрии обеспечивает снижение шума на 4–5 дБ [2].

Активные методы шумоподавления. Активные методы предполагают управление работой силовой установки в процессе полёта для снижения акустического воздействия.

Метод синхрофазирования — это активный подход, который не уменьшает шум каждого винта по отдельности, а управляет их взаимной интерференцией. Идея заключается в следующем: если несколько роторов вращаются с одинаковой частотой, но с определённым сдвигом фаз, акустические волны от разных источников могут складываться в противофазе в заданной точке пространства. В результате пики давления гасят друг друга там, где это важно (например, на земле под аппаратом), при некотором увеличении шума в других направлениях.

Разброс частот вращения является дополнительным активным методом. При вращении роторов с незначительно отличающимися оборотами тональные составляющие шума распределяются по разным частотам, что снижает субъективно воспринимаемый уровень шума за счёт отсутствия доминирующих тонов.

Патенты компании Joby Aero [3, 4] демонстрируют перспективность интеллектуальных активных систем управления, которые снижают шум за счёт адаптивной регулировки работы винтов в реальном времени, учитывая режим полёта, высоту и акустические требования конкретной городской зоны. Согласно патентным данным, применение таких систем позволяет достичь дополнительного снижения шума до 15–20 дБ в критических направлениях [3, 4].

Перспективы развития. Анализ рассмотренных источников позволяет выделить несколько направлений дальнейшего развития методов снижения шума.

Наиболее эффективным представляется гибридный подход, сочетающий:

- пассивную оптимизацию геометрии, снижающую шум в самом источнике на 4–5 дБ [2];
- активное фазовое управление и разброс оборотов, обеспечивающие дополнительное снижение до 15–20 дБ в заданном направлении [3, 4].

Важную роль играет внедрение методов интегрированного проектирования, позволяющих уже на этапе разработки находить оптимальный баланс между аэродинамической эффективностью, уровнем шума и массой конструкции [2].

Наиболее перспективным направлением является сочетание этих подходов в единой системе: пассивная оптимизация снижает шум в

источнике, а активное управление «донастраивает» акустическое поле под требования конкретной городской среды. Дальнейшее развитие области связано с созданием интегрированных систем проектирования и внедрением алгоритмов активного управления шумом в реальном времени.

Заключение. В результате проведённого аналитического обзора установлено следующее:

1. Основными физическими источниками шума eVTOL являются собственный шум винтов и шум взаимодействия в многороторных конфигурациях, причём последний становится критическим при полётах на малых высотах;

2. Пассивные методы, в частности геометрическая оптимизация лопастей (стреловидность, профилирование), позволяют снизить шум на 4–5 дБ без применения дополнительных бортовых систем;

3. Активные методы, такие как синхрофазирование, разброс оборотов и адаптивное управление, обеспечивают дополнительное снижение шума до 15–20 дБ в заданных направлениях, что подтверждается патентными данными ведущих разработчиков [3, 4];

4. Наибольшая эффективность достигается при гибридном подходе, сочетающем пассивную оптимизацию на этапе проектирования с активным управлением в реальном времени, адаптирующимся к условиям полёта;

5. Перспективы развития связаны с созданием интегрированных систем проектирования и внедрением алгоритмов активного шумоподавления, способных адаптироваться к требованиям городской воздушной мобильности.

Список литературы:

1. Zhao, C., Yang, Y., Cheng, Z., Zhang, T., & Liu, Y. (2026). Recent advancements and challenges for eVTOL aircraft aerodynamic noise in Urban Air Mobility. Progress in Aerospace Sciences. (Статья Южного университета науки и технологий, Китай)

2. Ye, Y., Liang, Y., Shan, X., & Huang, K. (2025). Design approach for tilt propellers of UAM/eVTOLs for cruise and hover considering aerodynamic and aeroacoustic characteristics via a multi-fidelity model. Aerospace Science and Technology, 156, 109739.

3. Joby Aero, Inc. (2024). Rotary airfoil with reduced acoustic output. U.S. Patent No. 11,905,009.

4. Joby Aero, Inc. (2025). System and method for aircraft noise mitigation. U.S. Patent No. 12,280,885.