

doi: 10.32620/oikit.2023.97.03

УДК 519.711.2

О. К. Погудіна, М. О. Сурмак, О. В. Попов

Аналіз методів проектування та виробництва літаків з електричним вертикальним зльотом і посадкою

*Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут», м. Харків, Україна*

Останні досягнення у технології транспортних засобів з електричним вертикальним зльотом та посадкою (eVTOL - electric vertical take-off and landing) роблять ці засоби привабливими для масового виробництва в аерокосмічній промисловості. **Предметом вивчення** є огляд досягнень у галузі проектування літаків eVTOL з використанням сучасних інструментів моделювання та обчислення. **Метою** є проаналізувати сучасні поширені концепції та конструктивні особливості літаків eVTOL з точки зору забезпечення живлення, потужності силових установок, конструкцій роторів, використання удосконалених легких композитів. Використаним **методом** є вивчення та аналіз відкритих публікацій на тему, яка досліджується. Розглянуті сучасні методології проектування, порівняння інструментів, які використовуються для аналізу і оптимізації ключових параметрів, таких як повна злітна вага, розмах крил, радіус ротора, продуктивності акумуляторних батарей, керованості польоту та інше. Вагомим етапом є випробування. Використання різних методик цифрового моделювання підвищують ефективність цього етапу, то ж скорочують терміни виробництва та модернізації. Велике місце виділено огляду проблем безпечної експлуатації літаків eVTOL. Моделювання літаків eVTOL у візуально реалістичному середовищі дозволяє отримати кращі результати за менший термін. **Висновки:** Дослідження у галузі проектування та випробування транспортних засобів eVTOL мають велике практичне значення у світі. Розглянуті методології демонструють потужну динаміку галузі. Використання сучасних інформаційних технологій дозволяють на етапі проектування та випробування моделювати елементи та процеси більш якісно, що надає таким дослідникам конкурентну перевагу. Проведений у статті огляд дозволяє використати його як базу для досліджень у галузі проектування eVTOL, а також досліджень при розробці методів автономного інтелектуального управління eVTOL. **Ключові слова:** повітряна мобільність; технології eVTOL; літак; проектування; аеродинамічна модель; керованість літака; аерокосмічна промисловість; вертикальний зльот.

Вступ

Повітряна міська мобільність (UAM - Urban Air Mobility) наразі викликає значний інтерес в аерокосмічній промисловості, завдяки останнім досягненням у технології транспортних засобів з електричним вертикальним зльотом і посадкою (eVTOL). Для забезпечення мобільності та змоги посадки на невеликій ділянці необхідним для таких систем є вертикальний зліт, а для забезпечення ефективного крейсерського польоту – гібридна конструкція з властивостями літака з нерухомим крилом і гвинтокрилами [1]. Зараз більшість великих авіабудівних компаній безпосередньо розробляють власні літаки eVTOL або мають дочірні компанії, які займаються цим: Uber, Kitty Hawk, Lilium, Joby Aviation, PAL-V, E-Hang та інші. Загалом, до цього часу було представлено понад 500 концепцій eVTOL [2]. Однак менше 5 % концептів досягли першого польоту через новизну галузі. Багато компаній (наприклад, AIRBUS, Lilium, Joby Aviation) розробляють кілька конфігурацій

[3,4], серед них можна виділити дві основні категорії: мультиротори та літаки з нерухомим крилом. До першої категорії відносяться мультиротори, та нахил-крило, нахил-ротор і «підйом + круїз» до другої [5, 6]. Мультиротори (M-R), оснащені трьома або більше гвинтами, які створюють тягу та підтримують апарат під час зависання та польоту вперед. Похилий гвинт (T-R) і поворотний гвинт (T-W), які також називають конвертопланами, поєднують можливості гвинтокрила та нерухомого крила: у польоті вперед вони подібні до гвинтового літака (досягаючи більшої дальності та швидкості відносно M-R), тоді як за зльотом/посадкою вони схожі на вертольоти. Літаки з поворотним гвинтом здійснюють обертання рушів для переходу від компонування з нерухомим крилом до гвинтокрила (і навпаки); натомість у поворотних крилах підйомні поверхні та рушії є невід'ємними компонентами, отже, вони обертаються разом під час переходу. У такому випадку рухома підйомна поверхня може бути лише частиною цілого крила, і його можна з'єднати з одним або кількома рушійми. Проаналізуємо основні технічні характеристики, відомих eVTOL (табл. 1). Як бачимо зазвичай використовують розподілений електричний двигун (DEP - Distributed Electric Propulsion) [7].

Таблиця 1.

Основні особливості досліджуваних eVTOL

Назва	Конфігурація	Розташування крила	Двигун	Кількість пасажирів	Поворот компонентів	Шасі
Airbus CityAirbus	коптер	-	DEP -	4	Ні	нерухома опора
Archer (Unnamed)	крило	високоплан	DEP	5	Так	нерухоме триколісне
EHang 216	коптер	-	DEP	2	Ні	нерухома опора
Ehang VT-30	крило	нижньоплан	DEP	2	Ні	нерухоме триколісне
EmbraerX Eve	крило (canard)	високоплан	DEP	4	Ні	нерухома опора
Horison Aircraft Cavourite X5	крило (canard)	нижньоплан	гібридний	5	Ні	триколісне шасі, що забирається
Joby S4	крило	високоплан	DEP	5	Так	триколісне шасі, що забирається
Lillium Jet	крило (canard)	середньоплан	DEP	5	Так	нерухоме триколісне
Terrafugia TF-2A	крило	високоплан	DEP	3	Ні	нерухоме трьколосьне
Vertical Aerospace VA-X4	крило	високоплан	DEP	5	Так	нерухоме трьколосьне
Volocopter VoloCity	коптер	-	DEP	2	Ні	нерухома опора
Wisk Cora	Wing	нижньоплан	DEP	2	Ні	нерухоме трьколосьне

1. Методологія проектування літаків eVTOL

Методологія проектування eVTOL враховує основні аспекти конструкції літака. Відповідно можна виділити п'ять основних етапів:

- TLAR (TLAR - Top-Level Aircraft Requirements) та параметри конструкції: визначає вимоги верхнього рівня та основні зміни до конструкції;
- розрахунок аеродинаміки: оцінює опір літака за допомогою методу вихрової решітки (AVL) і методу накопичення компонентів [8, 9];
- розрахунок пропульсивної системи: розраховує потужність, що постачається пропульсивною системою, за допомогою відповідної діаграми [9,10];
- розрахунок ефективності місії: оцінює характеристики літака за допомогою рівнянь механіки польоту;
- оцінка ваги: оцінюється розбиття маси конфігурації за допомогою оцінки ваги для категорії авіації загального призначення [11] та відомих моделей для електричних компонентів (наприклад, маса батареї).

У [12] представлено розробку методології для прогнозування злітної ваги та відповідної розбивки ваги, приблизних розмірів, потужності та потреби в енергії для eVTOL. Це дозволяє проводити концептуальний аналіз і початкові компромісні дослідження незалежно від конкретного, попереднього вибору конфігурації літака. Літак розглядається як сукупність будівельних блоків, таких як ротори, гвинти, крила та кілька інших підсистем, які сприяють оцінці маси, енергії, потужності та опору. Таким чином, метод дозволяє розглядати широкий діапазон архітектур транспортних засобів, зберігаючи при цьому кількість вхідних даних обмеженою кількома параметрами, доступними на етапі концептуального проектування. Використання генетичного алгоритму для обрання концептуального проекту eVTOL у якості швидкого міжміського транспорту надано у роботі [13]. В роботі [14] наведено результати розробки концептуальних і реальних транспортних засобів eVTOL. Загальною конструктивною ознакою транспортних засобів eVTOL є DEP із кількома гвинтами, розташованими по корпусу. Оскільки транспортні засоби eVTOL зазнають різноманітних умов польоту, включаючи висіння, перехід і політ вперед, їхні гвинти можуть відчувати аеродинамічні умови, які значно відрізняються від звичайної роботи гвинта.

Важливим є метод визначення розмірів, який не залежить від конфігурації транспортного засобу [15] але забезпечує швидку оцінку життєздатності концепцій eVTOL. У рукописі [16] представлена оцінка ваги I класу для розрахунку початкових навантажень. Наведено та обговорено апроксимації навантажень на конструкції крила в крейсерських і злітних умовах. Для розрахунку маси підсистем літака eVTOL застосовано метод напівемпіричної оцінки ваги II класу Cessna. У роботі [15] порівнюється та протиставляється застосування двох концептуальних методів проектування та аналізу літака eVTOL. Використовуючи два інструменти (NDARC і SUAVE), проводяться оцінки ваги та продуктивності літака Kitty Hawk Cora для тієї самої контрольної місії, висвітлюючи області невизначеності на основі відмінностей у спостережуваних результатах. Проведено дослідження повної злітної ваги, були визначені радіус ротора та розмах крил. У інструменті NDARC пропонується модель літака за результатами розрахунків має кращу аеродинамічну конфігурацію. Але у рекомендаціях SUAVE припускають, що вибір менш аеродинамічної та більш

структурно ефективної конструкції створює легший літак. Ці тенденції значною мірою є результатом двох ключових відмінностей. Оцінка ваги крила SUAVE враховує розмах навантажень від роторів. Як результат, зменшення ваги крила стає порівняно більш важливим для моделі у SUAVE. Напівемпірична модель NDARC не враховує ефект цього навантаження на крило.

У [17] описано підхід до моделювання для літака eVTOL з нахилом крила. Взаємодія між крилом і пропелерами фіксується за допомогою теорії імпульсу. Динамічні ефекти, а також диференціальна тяга та поверхні, що відхиляються, враховуються за допомогою теорії смуг, у якій аеродинамічні поверхні поділяються на менші смуги, які можна врахувати, щоб вловити моменти, створені несиметричним потоком. У роботі [6] розроблено та досліджено метод моделювання транспортних засобів eVTOL з використанням даних льотних випробувань.

Результати чисельного моделювання аеродинамічної взаємодії ротор-ротор із застосуванням умов польоту [18], характерних для літака eVTOL, показали невелике зниження продуктивності гвинтів у конфігурації «пліч-о-пліч», тоді як у тандемній конфігурації було виявлено значну втрату тяги приблизно на 40% і зниження ефективності пропульсії приблизно на 20%, особливо коли гвинтові диски повністю перекриваються. У типовій конфігурації великих літаків eVTOL [19] аналізується аеродинамічна взаємодія двороторної системи з переднім ротором і заднім ротором, узгодженими з напрямком потоку. Тоді як у роботі [20] проводиться оцінювання впливу опору підйомного гвинта на продуктивність круїзного літака eVTOL. Компроміси між точністю та обчислювальними витратами трьох методів моделювання гвинта досліджуються у [21] для ряду умов польоту та конфігурацій, характерних для літаків із DEP.

2. Випробування літаків eVTOL

У [22] описано методологію випробування гвинта зі змінним кроком в аеродинамічній трубі. Пропелери, які використовуються в силових установках eVTOL, працюють у широкому діапазоні умов експлуатації, що призводить до значних коливань осьової тяги та крутного моменту, а також позаосьових сил і моментів у типовій зоні польоту. Розроблено експериментальний план для ефективного збору даних аеродинамічної труби за допомогою методів поверхні відгуку. Аналогічні випробування проводили у роботі [23]. Випробування моделі NASA LA-8 eVTOL, що проводилось у аеродинамічній трубі описано у роботі [24].

При розробці eVTOL необхідно враховувати результати аероакустичної емісії, пов'язаної з нелінійною взаємодією, яка є результатом інтегрованих багатороторних гвинтів і планера eVTOL з поворотним крилом. Акустика є однією з ключових вимог будь-якої майбутньої сертифікації літака eVTOL, тому існують дослідження базової конструкції [25], спрямоване на зменшення кількості створюваного шуму. Для перевірки шуму на етапі конструювання eVTOL у роботі [26] використано високорівневий підхід до моделювання впливу обертового джерела шуму на його генерування.

3. Проектні рішення для вимог безпечної експлуатації

Безпечна експлуатація літаків eVTOL і UAS має першочергове значення. У

роботі [27] проаналізовано види ризиків, на які має бути звернено увагу при ще на етапі створення прототипу. Одним з таких ризиків є вибір та проектування схеми живлення. Метод для визначення конфігурації батареї описано у [28], його оснований на описі властивостей окремого елемента батареї та подальшого розрахунку загальної конфігурації батареї. Гібридна архітектура водневого паливного елемента та батареї для збільшення дальності електричних літаків VTOL розглянута у роботі [29]. Також гібридні джерела живлення від батарей / паливних елементів для eVTOL забезпечують високу пікову потужність, однак широкі діапазони напруги батареї та паливного елемента, що перекриваються, вимагають двоспрямованого перетворювача постійного струму з можливістю підсилення. Для такої системи перетворювача гравіметрична щільність потужності є ключовим показником. У [30] досліджуються обмеження кількох концепцій топології перетворювача для eVTOL.

Методи прогнозування теплової продуктивності акумуляторної батареї та ризику теплової розбіжності під час експлуатації літака eVTOL наведено у [31]. Також відомі результати застосування технології швидкого заряджання для літаків eVTOL [32], що повинна відповідати одночасно трьом показникам: час заряджання менше, ніж обмін пасажиром (5–10 хв), заряджена енергія, достатня для наступної поїздки, і тривалий термін служби.

Наведено задовільна оцінка керованості літака eVTOL, за допомогою планування, проведення та рейтингу віртуальних льотних випробувань на стаціонарному симуляторі [33]. Відомо, що аналіз керованості eVTOL відіграє ключову роль у проектуванні системи керування польотом. Існують роботи, що присвячено організації технології зв'язку з високою пропускною здатністю системи UTM у напрямку узгодженого рішення та автопілотування [34,35].

У роботі [36] автори, застосували досвід конкурсу швидкого прототипування безпілотних літальних апаратів AIAA Design Build Fly для розробки вимог до eVTOL, аналізу конструкції, виготовлення і проведення льотних випробувань за чотири місяці. Можливість реконфігурації була реалізована на ранній стадії концептуального проектування, щоб забезпечити виготовлення багатоцільового літака.

Серед інструментів, що використовуються дослідниками для створення прототипу на концептуальному етапі розробки eVTOL фаворитом є OpenVSP [37]. Це інструмент параметричної геометрії для створення 3D-моделей у процесі концептуального проектування. В середовищі підтримується кілька методів інженерного аналізу і формуються файли, які можуть використовуватися для багатьох інших інструментів. Однак є альтернативні підходи. Автори роботи [38] демонструють використання програмного забезпечення HyperX для проектування eVTOL або UAM Wing. HyperX — це програмне забезпечення для аерокосмічного аналізу та проектування. У Міланському політехнічному університеті [39] проводили роботи по удосконаленню оригінальної аеродинамічної моделі літака. Використовувалися моторні стріли та мотори, а також різне програмне забезпечення сумісно з OpenVSP. Стенд для випробувань двигунів із супутнім програмним забезпеченням був побудований і здатний швидко та з мінімальним втручанням людини оцінити будь-які довільні статичні та динамічні параметри електродвигуна та гребного гвинта. Симулятор польоту Simulink був побудований з використанням даних літака, отриманих з аеродинамічної моделі та експериментальної

ідентифікації двигуна, разом з масовими та інерційними властивостями, отриманими за допомогою точної моделі SolidWorks CAD та точної моделі LiPo. Отримано тренажер, здатний імітувати три режими польоту БПЛА.

У роботі [40] зроблено повну інтеграцію літака eVTOL у Microsoft AirSim. Побудовано нові візуальні компоненти, які входять до складу VTOLAirSim: повністю анімовану сітку конвертоплана та реалістичне міське середовище. Надано приклади створення індивідуальних літаків і середовищ для VTOL-AirSim. Проаналізовано VTOL-AirSim, як корисний інструмент для моделювання літаків eVTOL у візуально реалістичному середовищі (рис. 1).



Рис. 1. Літак-конвертоплан, що летить у спеціальному середовищі Automotive Bridge Scene [40]

Базуючись на процесі сертифікації звичайних літаків і безпілотних літальних апаратів, у [41] пропонується потенційний процес сертифікації eVTOL. Згідно якого розробники повинні надати конструктивні особливості продукту, тобто загальну архітектуру та сценарій роботи [42]. У цьому випадку заявники повинні показати експлуатаційну концепцію (OPSCON - operational concept) або найбільш релевантну підкатегорію UAM, для розроблювального літака eVTOL (Місто, Між-місто або Навколо міста). Різні підкатегорії UAM мають власні спеціальні вимоги до рівня безпеки, пов'язані з експлуатацією. Сертифікація для використання у місті має найвищі вимоги щодо рівня безпеки, оскільки eVTOL буде експлуатуватися безпосередньо над зоною заторів, він вимагатиме більших експлуатаційних вимог (запас часу, система запобігання зіткненням, мінімальна висота над рівнем моря тощо) та більш жорстких вимог щодо продуктивності (вища функція DAL - design assurance level, програмне та апаратне забезпечення).

Висновки

Дослідження у галузі проектування випробування літаків eVTOL мають велике практичне значення у світі. Розглянуті методології демонструють потужну динаміку галузі. Використання сучасних інформаційних технологій дозволяють на етапі проектування та випробування моделювати елементи та процеси більш якісно, що надає таким дослідникам конкурентну перевагу. Проведений у статті огляд дозволяє використати його як базу для досліджень у галузі проектування eVTOL, а також досліджень при розробці методів автономного інтелектуального управління eVTOL.

Література.

1. Holden, J.; Goel, N, "Fast-Forwarding to a Future of On-Demand Urban Air Transportation", White paper, October, 2016, Uber Elevate, <https://www.uber.com/elevate.pdf>
2. Ugwueze, O., Statheros, T., Bromfield, M., & Horri, N. (Accepted/In press). Trends in eVTOL Aircraft Development: The Concepts, Enablers and Challenges. In *AIAA SciTech 2023* American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc. (AIAA).
3. Polaczyk, N.; Trombino, E.; Wei, P.; Mitici, M. A review of current technology and research in urban on-demand air mobility applications. In Proceedings of the 8th Biennial Autonomous VTOL Technical Meeting and 6th Annual Electric VTOL Symposium, Mesa, AZ, USA, 29–31 January 2019; https://www.aere.iastate.edu/~pwei/proceedings/vfs19_nick.pdf (accessed on 4 October 2021).
4. Datta, A. Commercial Intra City On-Demand Electric-VTOL Status of Technology. <https://vtol.org/files/dmfile/TVF.WG2.YR2017draft.pdf>, October 2021).
5. Rajendran, S.; Srinivas, S. Air taxi service for urban mobility: A critical review of recent developments, future challenges, and opportunities. *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.* 2020, 143, 102090.
6. Straubinger, A.; Rothfeld, R.; Shamiyeh, M.; Büchter, K.D.; Kaiser, J.; Plötner, K.O. An overview of current research and developments in urban air mobility—Setting the scene for UAM introduction. *J. Air Transp. Manag.* 2020, 87, 101852.
7. Cicelini, G. (2022). Numerical and experimental analysis of the flow over an eVTOL concept. <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/34398/1/NumericalExperimentalAnalysis.pdf>
8. Raymer, D. *Aircraft Design: A Conceptual Approach*, 6th ed; American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc.: Reston, VA, USA, 2018; <https://arc.aiaa.org/doi/book/10.2514/4.104909>
9. Sforza, P.M. *Commercial Airplane Design Principles*, 1st ed.; Butterworth–Heinemann: Oxford, UK, 2014; <https://www.sciencedirect.com/book/9780124199538/commercial-airplane-design-principles>
10. Mattingly, J.D.; Heiser, W.H.; Daley, D.H. *Aircraft Engine Design*, 3rd ed.; American Institute of Aeronautics and Astronautics: Washington, DC, USA, 2018; <https://arc.aiaa.org/doi/book/10.2514/4.105173>
11. Wells, D.P.; Horvath, B.L.; McCullers, L.A. The Flight Optimization System Weights Estimation Method. NASA/TM 2017- 219627/Volume I. 2017. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20170005851/downloads/20170005851.pdf>
12. Zhang, J., Liu, Y., Jiang, T., & Zheng, Y. (2023). Conceptual Design and System

Level Analysis of Tilt-Duct eVTOL Aircraft. In *Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology* (pp. 189-198). Springer, Singapore.

13. Xiao, J., Salk, N., & Haran, K. (2020, February). Conceptual design of an eVTOL air shuttle for rapid intercity transport. In *2020 IEEE Power and Energy Conference at Illinois (PECI)* (pp. 1-8). IEEE.

14. Simmons B. M., Hatke D. B. Investigation of High Incidence Angle Propeller Aerodynamics for Subscale eVTOL Aircraft. – 2021. – №. NASA/TM-20210014010.

15. Vegh, J. M., Botero, E., Clark, M., Smart, J., & Alonso, J. J. (2019, August). Current capabilities and challenges of NDARC and SUAVE for eVTOL aircraft design and analysis. In *2019 AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium (EATS)* (pp. 1-19). IEEE. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=8941446>

16. Wadia, K., Buszek, M., Poliakov, N., & Castro, S. G. (2022). Preliminary design and analysis of crashworthy structures for a long-range eVTOL aircraft. In *AIAA Scitech 2022 Forum* (p. 1485). <https://doi.org/10.2514/6.2022-1485.vid>

17. Cook J. A strip theory approach to dynamic modeling of evtol aircraft //AIAA SciTech 2021 Forum. – 2021. – C. 1720. <https://doi.org/10.2514/6.2021-1720>

18. Piccinini R., Tugnoli M., Zanotti A. Numerical Investigation of the Rotor-Rotor Aerodynamic Interaction for eVTOL Aircraft Configurations //Energies. – 2020. – T. 13. – №. 22. – C. 5995. <https://doi.org/10.3390/en13225995>

19. Healy R., Misiorowski M., Gandhi F. A CFD-Based Examination of Rotor-Rotor Separation Effects on Interactional Aerodynamics for eVTOL Aircraft //Journal of the American Helicopter Society. – 2022. – T. 67. – №. 1. – C. 1-12. <https://doi.org/10.4050/JAHS.67.012006>

20. Bacchini, A., Cestino, E., Van Magill, B., & Verstraete, D. (2021). Impact of lift propeller drag on the performance of eVTOL lift+ cruise aircraft. *Aerospace Science and Technology*, 109, 106429. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2020.106429>

21. Erhard, R. M., & Alonso, J. J. (2022). A Comparison of Propeller Wake Models for Distributed Electric Propulsion and eVTOL Aircraft in Complex Flow Conditions. In *AIAA SCITECH 2022 Forum* (p. 1676).

22. Simmons, B. M. (2022). Efficient Variable-Pitch Propeller Aerodynamic Model Development for Vectored-Thrust eVTOL Aircraft. In *AIAA AVIATION 2022 Forum* (p. 3817). <https://doi.org/10.2514/6.2022-3817.vid>

23. Yokota, K., Fujimoto, H., & Kobayashi, H. (2021, March). Observer-based Angle of Attack Estimation for Tilt-Wing eVTOL Aircraft. In *2021 IEEE International Conference on Mechatronics (ICM)* (pp. 1-6). IEEE.

24. Simmons, B. M., Morelli, E. A., Busan, R. C., Hatke, D. B., & O'Neal, A. W. (2022). Aero-Propulsive Modeling for eVTOL Aircraft Using Wind Tunnel Testing with Multisine Inputs. In *AIAA AVIATION 2022 Forum* (p. 3603).

25. Higgins, R. J., Barakos, G. N., Shahpar, S., & Tristante, I. (2021). A computational fluid dynamic acoustic investigation of a tiltwing eVTOL concept aircraft. *Aerospace Science and Technology*, 111, 106571. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2021.106571>

26. Amargianitakis, D. C., Self, R., Proenca, A., Torija Martinez, A., & Synodinos, A. (2022). Generation of noise exposure contours for eVTOL aircraft including transition. In *28th AIAA/CEAS Aeroacoustics 2022 Conference* (p. 3088).

27. Thompson E. L. et al. A Survey of eVTOL Aircraft and AAM Operation Hazards

//AIAA AVIATION 2022 Forum. – 2022. – С. 3539.

28. Alba-Maestre J. et al. Preliminary propulsion and power system design of a tandem-wing long-range eVTOL aircraft //Applied Sciences. – 2021. – Т. 11. – №. 23. – С. 11083. <https://doi.org/10.3390/app112311083>

29. Ng W., Patil M., Datta A. Hydrogen fuel cell and battery hybrid architecture for range extension of electric VTOL (eVTOL) aircraft //Journal of the American Helicopter Society. – 2021. – Т. 66. – №. 1. – С. 1-13. <https://doi.org/10.4050/JAHS.66.012009>

30. D. Menzi, Z. Yu, J. Huber and J. W. Kolar, "Comparative Evaluation of Ultra-Lightweight Buck-Boost DC-DC Converter Topologies for Future eVTOL Aircraft," *2022 IEEE 23rd Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL)*, 2022, pp. 1-8, doi: 10.1109/COMPEL53829.2022.9830019.

31. Harrison, J., Charles, D., Zenker, J., & Frank, E. (2019, August). Using Multi-physics System Simulation to Predict Battery Pack Thermal Performance and Risk of Thermal Runaway During eVTOL Aircraft Operations. In 2019 AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium (EATS) (pp. 1-13). IEEE. doi: 10.2514/6.2019-4406.

32. Kleinbekman, I. C., Mitici, M. A., & Wei, P. (2018, September). eVTOL arrival sequencing and scheduling for on-demand urban air mobility. In 2018 IEEE/AIAA 37th Digital Avionics Systems Conference (DASC) (pp. 1-7). IEEE. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.05.001>

33. Díaz García, G., Seiferth, D., Meidinger, V., Dollinger, D., Nagarajan, P., & Holzappel, F. (2021). Conduction of mission task elements within simulator flight tests for handling quality evaluation of an eVTOL aircraft. In AIAA Scitech 2021 Forum (p. 1897). <https://doi.org/10.2514/6.2021-1897>

34. LI, C. L., QU, W. Q., LI, Y. D., HUANG, L. Y., & WEI, P. (2020). Overview on traffic management of urban air mobility (UAM) with eVTOL aircraft. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 20(4).

35. Kleinbekman, I. C., Mitici, M. A., & Wei, P. (2018, September). eVTOL arrival sequencing and scheduling for on-demand urban air mobility. In 2018 IEEE/AIAA 37th Digital Avionics Systems Conference (DASC) (pp. 1-7). IEEE. doi: 10.1109/DASC.2018.8569645.

36. Kozel, F. K., Tu, J. Q., Li, E. Q., & Warren, M. M. Design of a Subscale Reconfigurable eVTOL Aircraft for Transition Corridor Flight Testing. <https://matthewmwarren.com/wp-content/uploads/2019/08/Tilty-Structural-Design.pdf>

37. McDonald, R. A., & Gloudemans, J. R. (2022). Open Vehicle Sketch Pad: An Open Source Parametric Geometry and Analysis Tool for Conceptual Aircraft Design. In AIAA SCITECH 2022 Forum (p. 0004). <https://doi.org/10.2514/6.2022-0004>

38. Tutorial – Preliminary Design of an eVTOL UAM Wing <https://collieraerospace.com/essential-videos/>

39. Martello, N. C. (2021). Modelling and integration of an eVTOL UAV. Modelling and integration of an eVTOL UAV

40. Nielsen, S. M. (2021). A Visually Realistic Simulator for Autonomous eVTOL Aircraft (Doctoral dissertation, Brigham Young University). <https://scholarsarchive.byu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=10349&context=etd>

41. MOU, Y., JIANG, M., & ZHU, G. Certification Considerations of eVTOL Aircraft. www.icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2020/data/papers/ICAS2020_0231_paper.pdf

42. Jones, M., & Jusko, T. (2022). Development and Testing of Scalable Mission

Task Elements for Certification of eVTOL Aircraft. In AIAA SCITECH 2022 Forum (p. 1192).

References

1. Holden, J.; Goel, N, “Fast-Forwarding to a Future of On-Demand Urban Air Transportation”, White paper, October, 2016, Uber Elevate, <https://www.uber.com/elevate.pdf>
2. Ugwueze, O., Statheros, T., Bromfield, M., & Horri, N. (Accepted/In press). Trends in eVTOL Aircraft Development: The Concepts, Enablers and Challenges. In *AIAA SciTech 2023* American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc. (AIAA).
3. Polaczyk, N.; Trombino, E.; Wei, P.; Mitici, M. A review of current technology and research in urban on-demand air mobility applications. In Proceedings of the 8th Biennial Autonomous VTOL Technical Meeting and 6th Annual Electric VTOL Symposium, Mesa, AZ, USA, 29–31 January 2019; https://www.aere.iastate.edu/~pwei/proceedings/vfs19_nick.pdf (accessed on 4 October 2021).
4. Datta, A. Commercial Intra City On-Demand Electric-VTOL Status of Technology. <https://vtol.org/files/dmfile/TVF.WG2.YR2017draft.pdf>, October 2021).
5. Rajendran, S.; Srinivas, S. Air taxi service for urban mobility: A critical review of recent developments, future challenges, and opportunities. *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.* 2020, 143, 102090.
6. Straubinger, A.; Rothfeld, R.; Shamiyeh, M.; Büchter, K.D.; Kaiser, J.; Plötner, K.O. An overview of current research and developments in urban air mobility—Setting the scene for UAM introduction. *J. Air Transp. Manag.* 2020, 87, 101852.
7. Cicelini, G. (2022). Numerical and experimental analysis of the flow over an eVTOL concept. <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/34398/1/NumericalExperimentalAnalysis.pdf>
8. Raymer, D. *Aircraft Design: A Conceptual Approach*, 6th ed; American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc.: Reston, VA, USA, 2018; <https://arc.aiaa.org/doi/book/10.2514/4.104909>
9. Sforza, P.M. *Commercial Airplane Design Principles*, 1st ed.; Butterworth–Heinemann: Oxford, UK, 2014; <https://www.sciencedirect.com/book/9780124199538/commercial-airplane-design-principles>
10. Mattingly, J.D.; Heiser, W.H.; Daley, D.H. *Aircraft Engine Design*, 3rd ed.; American Institute of Aeronautics and Astronautics: Washington, DC, USA, 2018; <https://arc.aiaa.org/doi/book/10.2514/4.105173>
11. Wells, D.P.; Horvath, B.L.; McCullers, L.A. The Flight Optimization System Weights Estimation Method. NASA/TM 2017- 219627/Volume I. 2017. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20170005851/downloads/20170005851.pdf>
12. Zhang, J., Liu, Y., Jiang, T., & Zheng, Y. (2023). Conceptual Design and System Level Analysis of Tilt-Duct eVTOL Aircraft. In *Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology* (pp. 189-198). Springer, Singapore.
13. Xiao, J., Salk, N., & Haran, K. (2020, February). Conceptual design of an eVTOL air shuttle for rapid intercity transport. In *2020 IEEE Power and Energy*

Conference at Illinois (PECI) (pp. 1-8). IEEE.

14. Simmons B. M., Hatke D. B. Investigation of High Incidence Angle Propeller Aerodynamics for Subscale eVTOL Aircraft. – 2021. – №. NASA/TM-20210014010.

15. Vegh, J. M., Botero, E., Clark, M., Smart, J., & Alonso, J. J. (2019, August). Current capabilities and challenges of NDARC and SUAVE for eVTOL aircraft design and analysis. In 2019 AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium (EATS) (pp. 1-19). IEEE. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=8941446>

16. Wadia, K., Buszek, M., Poliakov, N., & Castro, S. G. (2022). Preliminary design and analysis of crashworthy structures for a long-range eVTOL aircraft. In AIAA Scitech 2022 Forum (p. 1485). <https://doi.org/10.2514/6.2022-1485>.vid

17. Cook J. A strip theory approach to dynamic modeling of eVTOL aircraft //AIAA SciTech 2021 Forum. – 2021. – C. 1720. <https://doi.org/10.2514/6.2021-1720>

18. Piccinini R., Tugnoli M., Zanotti A. Numerical Investigation of the Rotor-Rotor Aerodynamic Interaction for eVTOL Aircraft Configurations //Energies. – 2020. – T. 13. – №. 22. – C. 5995. <https://doi.org/10.3390/en13225995>

19. Healy R., Misiorowski M., Gandhi F. A CFD-Based Examination of Rotor-Rotor Separation Effects on Interactional Aerodynamics for eVTOL Aircraft //Journal of the American Helicopter Society. – 2022. – T. 67. – №. 1. – C. 1-12. <https://doi.org/10.4050/JAHS.67.012006>

20. Bacchini, A., Cestino, E., Van Magill, B., & Verstraete, D. (2021). Impact of lift propeller drag on the performance of eVTOL lift+ cruise aircraft. Aerospace Science and Technology, 109, 106429. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2020.106429>

21. Erhard, R. M., & Alonso, J. J. (2022). A Comparison of Propeller Wake Models for Distributed Electric Propulsion and eVTOL Aircraft in Complex Flow Conditions. In AIAA SCITECH 2022 Forum (p. 1676).

22. Simmons, B. M. (2022). Efficient Variable-Pitch Propeller Aerodynamic Model Development for Vectored-Thrust eVTOL Aircraft. In AIAA AVIATION 2022 Forum (p. 3817). <https://doi.org/10.2514/6.2022-3817>.vid

23. Yokota, K., Fujimoto, H., & Kobayashi, H. (2021, March). Observer-based Angle of Attack Estimation for Tilt-Wing eVTOL Aircraft. In 2021 IEEE International Conference on Mechatronics (ICM) (pp. 1-6). IEEE.

24. Simmons, B. M., Morelli, E. A., Busan, R. C., Hatke, D. B., & O'Neal, A. W. (2022). Aero-Propulsive Modeling for eVTOL Aircraft Using Wind Tunnel Testing with Multisine Inputs. In AIAA AVIATION 2022 Forum (p. 3603).

25. Higgins, R. J., Barakos, G. N., Shahpar, S., & Tristanto, I. (2021). A computational fluid dynamic acoustic investigation of a tiltwing eVTOL concept aircraft. Aerospace Science and Technology, 111, 106571. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2021.106571>

26. Amargianitakis, D. C., Self, R., Proenca, A., Torija Martinez, A., & Synodinos, A. (2022). Generation of noise exposure contours for eVTOL aircraft including transition. In 28th AIAA/CEAS Aeroacoustics 2022 Conference (p. 3088).

27. Thompson E. L. et al. A Survey of eVTOL Aircraft and AAM Operation Hazards //AIAA AVIATION 2022 Forum. – 2022. – C. 3539.

28. Alba-Maestre J. et al. Preliminary propulsion and power system design of a tandem-wing long-range eVTOL aircraft //Applied Sciences. – 2021. – T. 11. – №. 23. – C. 11083. <https://doi.org/10.3390/app112311083>

29. Ng W., Patil M., Datta A. Hydrogen fuel cell and battery hybrid architecture for range extension of electric VTOL (eVTOL) aircraft //Journal of the American Helicopter Society. – 2021. – Т. 66. – №. 1. – С. 1-13. <https://doi.org/10.4050/JAHS.66.012009>
30. D. Menzi, Z. Yu, J. Huber and J. W. Kolar, "Comparative Evaluation of Ultra-Lightweight Buck-Boost DC-DC Converter Topologies for Future eVTOL Aircraft," *2022 IEEE 23rd Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL)*, 2022, pp. 1-8, doi: 10.1109/COMPEL53829.2022.9830019.
31. Harrison, J., Charles, D., Zenker, J., & Frank, E. (2019, August). Using Multi-physics System Simulation to Predict Battery Pack Thermal Performance and Risk of Thermal Runaway During eVTOL Aircraft Operations. In 2019 AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium (EATS) (pp. 1-13). IEEE. doi: 10.2514/6.2019-4406.
32. Kleinbekman, I. C., Mitici, M. A., & Wei, P. (2018, September). eVTOL arrival sequencing and scheduling for on-demand urban air mobility. In 2018 IEEE/AIAA 37th Digital Avionics Systems Conference (DASC) (pp. 1-7). IEEE. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.05.001>
33. Díaz García, G., Seiferth, D., Meidinger, V., Dollinger, D., Nagarajan, P., & Holzapfel, F. (2021). Conduction of mission task elements within simulator flight tests for handling quality evaluation of an evtol aircraft. In AIAA Scitech 2021 Forum (p. 1897). <https://doi.org/10.2514/6.2021-1897>
34. LI, C. L., QU, W. Q., LI, Y. D., HUANG, L. Y., & WEI, P. (2020). Overview on traffic management of urban air mobility (UAM) with eVTOL aircraft. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 20(4).
35. Kleinbekman, I. C., Mitici, M. A., & Wei, P. (2018, September). eVTOL arrival sequencing and scheduling for on-demand urban air mobility. In 2018 IEEE/AIAA 37th Digital Avionics Systems Conference (DASC) (pp. 1-7). IEEE. doi: 10.1109/DASC.2018.8569645.
36. Kozel, F. K., Tu, J. Q., Li, E. Q., & Warren, M. M. Design of a Subscale Reconfigurable eVTOL Aircraft for Transition Corridor Flight Testing. <https://matthewmwarren.com/wp-content/uploads/2019/08/Tilty-Structural-Design.pdf>
37. McDonald, R. A., & Gloude-mans, J. R. (2022). Open Vehicle Sketch Pad: An Open Source Parametric Geometry and Analysis Tool for Conceptual Aircraft Design. In AIAA SCITECH 2022 Forum (p. 0004). <https://doi.org/10.2514/6.2022-0004>
38. Tutorial – Preliminary Design of an eVTOL UAM Wing <https://collieraerospace.com/essential-videos/>
39. Martello, N. C. (2021). Modelling and integration of an eVTOL UAV. Modelling and integration of an eVTOL UAV
40. Nielsen, S. M. (2021). A Visually Realistic Simulator for Autonomous eVTOL Aircraft (Doctoral dissertation, Brigham Young University). <https://scholarsarchive.byu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=10349&context=etd>
41. MOU, Y., JIANG, M., & ZHU, G. Certification Considerations of eVTOL Aircraft. www.icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2020/data/papers/ICAS2020_0231_paper.pdf
42. Jones, M., & Jusko, T. (2022). Development and Testing of Scalable Mission Task Elements for Certification of eVTOL Aircraft. In AIAA SCITECH 2022 Forum (p. 1192).

Надійшла до редакції 17.04.2022, розглянута на редколегії 17.04.2022

Analysis of methods of design and production of aircraft with electric vertical take-off and landing

Recent advances in electric vertical take-off and landing (eVTOL) technology make these vehicles attractive for mass production in the aerospace industry. The subject of the study is a review of advances in the field of eVTOL aircraft design using modern modeling and computational tools. The goal is to analyze the current common concepts and design features of eVTOL aircraft in terms of power supply, power plant capacity, rotor designs, and the use of advanced lightweight composites. The method used is the study and analysis of open publications on the subject under investigation. Modern design methodologies are reviewed, comparison of tools used to analyze and optimize key parameters, such as total take-off weight, wingspan, rotor radius, battery performance, flight controllability, etc. An important stage is the test. The use of various methods of digital modeling increases the efficiency of this stage, as well as shortens the terms of production and modernization. A large place is devoted to the review of the problems of safe operation of eVTOL aircraft. Modeling eVTOL aircraft in a visually realistic environment allows you to get better results in less time. Conclusions: Research in the field of eVTOL & vehicle test design is of great practical importance in the world. The considered methodologies demonstrate the powerful dynamics of the industry. The use of modern information technologies allows at the stage of design and testing to model elements and processes more qualitatively, which gives such researchers a competitive advantage. The review carried out in the article allows you to use it as a basis for research in the field of eVTOL design, as well as research in the development of methods of autonomous intelligent control of eVTOL.

Keywords: Air Mobility; eVTOL technologies; aircraft; design; aerodynamic model; aircraft handling; aerospace industry; vertical take-off.

Відомості про авторів

Погудіна Ольга Костянтинівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційні технології проектування Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», ok.pogudina@gmail.com, ORCID: [0000-0001-5689-2552]

Сурмак Микола Олександрович, аспірант кафедри інформаційні технології проектування Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», n.surmak@khai.edu, ORCID: [0000-0003-0491-9973]

Попов Олексій Вікторович аспірант кафедри інформаційні технології проектування Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», a.popov@fed.com.ua, ORCID: [0000-0002-2526-9140]

About the Autors

Pohudina Olha Kostyantynivna, PhD, Assistant at the Department of Information Technology of Design at National Aerospace University Kharkiv Aviation Institute, ok.pogudina@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5689-2552

Surmak Mykola Oleksandrovich post-graduate student at the Department of Information Technology of Design at National Aerospace University Kharkiv Aviation Institute, n.surmak@khai.edu, ORCID: [0000-0003-0491-9973]

Popov Oleksii Viktorovich post-graduate student at the Department of Information Technology of Design at National Aerospace University Kharkiv Aviation Institute, a.popov@fed.com.ua, ORCID: [0000-0002-2526-9140]