

УДК 621.7.014

doi: 10.32620/akt.2024.6.06

А. М. ГУМЕННИЙ, Л. В. КАПТАНОВА, Р. С. ЗУБАР,  
В. А. БЕЗКОРОВАЙНИЙ, Р. ДЖАФАРОВ

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

## ГІБРИДНО-ЕЛЕКТРИЧНА СИЛОВА УСТАНОВКА ДЛЯ ЛІТАКІВ: ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ, ВИКЛИКИ ТА МОЖЛИВОСТІ

*Предметом дослідження статті є авіаційні гібридно-електричні силові установки та їхнє застосування в сучасних і перспективних авіаційних технологіях. Особливу увагу приділено аналізу ключових напрямів розвитку цих установок, їхнього впливу на авіацію, а також можливостей інтеграції новітніх технологій для досягнення екологічних цілей. Метою дослідження є представлення сучасних технологій та майбутніх тенденцій у розвитку гібридно-електричних силових установок. Увагу зосереджено на ринку повітряного транспорту, демонстраційних зразках гібридних систем, топологіях силових установок, проєктуванні літаків, електричних системах, зберіганні енергії та двигунах внутрішнього згоряння. Завдання дослідження охоплюють аналіз поточного стану авіаційних гібридно-електричних установок, оцінювання перспектив розвитку електричної міської повітряної мобільності та гібридно-електричних регіональних літаків, визначення оптимальних архітектур для різних типів літаків, таких як безпілотні авіаційні комплекси та регіональні літаки, а також дослідження сучасних технологій зберігання енергії, зокрема акумуляторів і паливних елементів. Наукова і практична новизна статті полягає в узагальненні сучасних підходів до проєктування та впровадження гібридно-електричних силових установок, визначенні ключових напрямів розвитку міської повітряної мобільності та регіональних гібридно-електричних літаків. Розглянуто турбоелектричну архітектуру з розподіленою тягою та інтеграцію поглинання граничного шару як перспективні рішення для досягнення екологічних цілей на 2030 і 2050 роки. Зазначено важливість впровадження новітніх технологій зберігання енергії, як-от літій-іонні та твердотільні батареї, удосконалення систем терморегуляції, використання альтернативних палив (водень, метан), а також технологій розподіленої електричної тяги та інтеграції поглинання граничного шару. Дослідження підтримують міжнародні програми, зокрема CORSIA, та демонструють важливість співпраці між науковими, промисловими й урядовими структурами для зменшення шкідливого впливу авіації на довкілля.*

**Ключові слова:** гібридна електрична тяга; силова електроніка; акумуляція електроенергії; енергетичний менеджмент.

### Вступ

З моменту впровадження реактивних двигунів авіаційна галузь подвоює свій обсяг кожні 20 років, що є найвищим показником у транспортному секторі, і передбачаються такі самі темпи в майбутньому. Однак вплив авіаційної галузі на довкілля, як-от шум та викиди забруднювальних речовин, привертає дедалі більше уваги громадськості.

Окрім цього, передбачувані фінансові вигоди від підвищення енергоефективності спонукають представників транспортної галузі інвестувати в альтернативні джерела енергії. Оскільки авіаційна галузь відповідає за значну частку викидів парникових газів, то досліджується концепція, у якій двигуни внутрішнього згоряння та електродвигуни поєд-

нуються в рушійній установці для підвищення ефективності літальних апаратів та зменшення шкідливого впливу на довкілля.

Така гібридизація може бути досягнута шляхом поєднання двигунів внутрішнього згоряння або силових електронних перетворювачів з електродвигунами та акумуляторними батареями. Основними перевагами гібридно-електричних силових установок, якщо порівняти з традиційними рушійними системами, є:

- підвищення загальної ефективності літаків;
- підвищення надійності літаків, покращення якості розподілу електроенергії та збільшення дальності польоту;
- зменшення викидів забруднювальних речовин і шумового впливу;



– можливість розширення ринку завдяки використанню менших аеропортів.

Гібридно-електрична силова установка (ГЕСУ) видається найбільш життєздатним рішенням для енергоефективної, екологічно чистої та тихої авіаційної силової установки, оскільки вона здатна поєднувати переваги традиційної силової установки і повністю електричного підходу. Незважаючи на це, для того щоб зробити технологію життєздатною, необхідно досягти кількох цілей. Проектом NASA «Дозвуковий літак з нерухомим крилом» визначено чотири аспекти, які необхідно доопрацювати: шум, викиди, витрати авіаційного палива та довжину злітно-посадкової смуги.

Останні досягнення в галузі електродвигунів (ЕД), систем зберігання енергії та силових електронних перетворювачів (СЕР) ведуть до того, що авіаційні двигуни стають усе більш електричними. Концепція літаків із підвищеною електрифікацією (ЛПЕ) має на меті змінити системи літака, щоб вони повністю працювали від електрики. Наразі електричними є лише пристрої моніторингу та допоміжні системи, тоді як більш потужні пристрої все ще працюють із гідравлічними або тепловими системами. Попри це, з 2010 року розроблення повністю електричних літальних апаратів було посилено, а з 2016 року навіть прискорено, особливо в галузі міських повітряних транспортних засобів (МПТЗ).

Гібридно-електрична силова установка забезпечує експлуатаційну гнучкість завдяки більшій кількості компонентів. Паливо та акумуляторні батареї дають більше можливостей для керування силовою установкою на різних етапах польоту, а також зменшують споживання енергії порівняно з традиційними системами. Однак це означає збільшення необхідного навантаження на етапі проектування і більшу складність в експлуатації. Належне керування електричними компонентами та процесом згоряння є обов'язковим для дотримання екологічних вимог і зменшення споживання палива.

Авіаційні силові установки поступово розвиваються від невеликих повністю електричних МПТЗ на початку до гібридно-електричних літаків середнього розміру, а пізніше – до регіональних літаків на ГЕСУ протягом трьох десятиліть. Вивчення ГЕСУ потребує мультидисциплінарного комбінованого підходу, який охоплює всі пов'язані сфери, що є складним завданням, з яким важко впоратися. Ця стаття відображає сучасний стан розвитку ГЕСУ, визначає найскладніші вимоги в коротко-строковій і середньостроковій перспективах, аналізує різні підходи й альтернативи, а також указує на шляхи майбутніх досліджень.

## Ринок цивільної авіації

Світовий ринок цивільної авіації набув значного економічного зростання останнім часом, і ця тенденція продовжиться. За оцінками, буде потрібно близько 1300 нових міжнародних аеропортів, а парк комерційних літаків подвоїться до 2050 року.

Авіаційним сектором генеруються значні викиди парникових газів: у 2015 році було викинуто 781 млн тонн CO<sub>2</sub>. За умови відсутності втручання до 2050 року авіаційні викиди можуть збільшитися на 300–700 %. Оскільки на авіаційну галузь припадає 2 % загальних викидів CO<sub>2</sub> у світі, то міжнародні авіаційні організації мають на меті досягти вуглецево-нейтрального зростання з 2020 року, а до 2050 року скоротити викиди на 50 % порівняно з рівнем 2005 року. Цільовий показник для цивільної авіації, установлений Консультативною радою з авіаційних досліджень та інновацій в Європі (ACARE) на 2050 рік, передбачає зменшення викидів CO<sub>2</sub> на 75 %, оксидів азоту (NO<sub>x</sub>) – на 90 %, а шуму – на 65 % порівняно з рівнем 2000 року. Ці цілі неможливо досягти за допомогою традиційних технологій [1].

Цілі NASA спрямовані на зниження рівня шуму на 71 дБ, зменшення викидів оксидів азоту на 75 % та споживання палива на 70 % порівняно з рівнем 2005 року до 2030–2035 років [2]. Інші програми, такі як CLEEN у США, GARDN у Канаді, Clean Sky та Clean Aviation в Європейському Союзі (ЄС), зосереджені на розробленні сертифікованих авіаційних технологій для зменшення споживання палива, зниження рівня шуму польотів та скорочення викидів [3].

Щоб задовольнити цей зростаючий попит і дотриматись екологічних норм, потрібні революційні концепції літаків, які б знизили рівень шуму під час зльоту і посадки на міських територіях навколо аеропортів, зменшили споживання енергії та викиди, залишаючись при цьому економічно життєздатними. Великі аеропорти зі злітно-посадковими смугами довжиною понад 3050 м використовуються інтенсивно, тоді як тисячі менших аеропортів зі злітно-посадковими смугами довжиною менше 910 м недовикористовуються. Нові концепції літаків з архітектурою, що збільшує крутий момент і потужність рушія для коротших злітних відстаней, дадуть змогу майбутнім літальним апаратам ефективно використовувати менші аеропорти.

ГЕСУ – це еволюція, за якої невеликі літаки можуть використовувати аеродроми з меншими злітно-посадковими смугами для комерційного застосування. Електродвигуни мають більший крутий момент на низьких швидкостях, що робить прискорення літака під час зльоту більшим.

Скандинавські країни наголошують на сталому розвитку авіаперевезень, плануючи до 2040 року перейти на використання ближніх і внутрішніх авіаперевезень на 100 % електричними літальними апаратами [4]. Цей час необхідний, оскільки електричний літак потребує визначення стандартів зарядження, нової інфраструктури та нових бізнес-моделей.

### Міська повітряна мобільність

Очікуване проникнення повітряних суден (ПС) на ринок розпочнеться з 1–2 пасажирських літаків, повністю електричних міських повітряних таксі (МПТ) до 2025 року, 15–20 пасажирських літаків на гібридно-електричних силових установках з 2025 до 2030 року і літаків на акумуляторних батареях або паливних елементах з 2035 до 2045 року [5]. Перший літак на гібридних двигунах із понад 50 місцями очікується до 2032 року.

Упровадження міської повітряної мобільності є революційним кроком в авіаційній галузі. Її розроблення ведеться з 1970-х років, проте спочатку у вигляді безпілотних екземплярів із невеликими акумуляторами та електродвигунами потужністю в кілька кіловатів. Поява на ринку літій-іонних (Li-Ion) і літій-полімерних (Li-Po) акумуляторів з 2001 року стала важливим етапом для розвитку електричної тяги завдяки збільшеній енергоємності акумуляторів [6].

Міська авіаційна мобільність (ММ) – це безпечна й ефективна система повітряних пасажирських і вантажних перевезень у межах міста, що покликана розвантажити дорожній рух, покращити мобільність, скоротити час транспортування та зменшити забруднення навколишнього середовища. Основними сферами застосування є трансфери до аеропортів, таксі, швидка допомога, поліція та інші служби швидкого реагування, де використовуються малогабаритні (до п'яти пасажирів) електричні та гібридні транспортні засоби з вертикальним зльотом і посадкою [7].

ММ забезпечить громадський доступ до повітряного транспорту в межах мегаполісів. Дослідницькі проекти отримали значні інвестиції, більшість із них спрямовані на повністю електричні ПС з вертикальним зльотом і посадкою. Прогнози стверджують, що повітряне таксі та авіадоставка посилок будуть уведені в експлуатацію на ринку США до 2030 року. Очікується, що в перші роки роботи в США обсяг ринку становитиме 2,5 млрд доларів США, а загальний доступний ринок – 500 млрд доларів США [8].

Однак щоб реалізувати цю технологію, необхідно розв'язати такі проблеми, як затвердження нор-

мативних актів і стандартів, отримання сертифікатів резервування, урахування погодних умов та створення міської інфраструктури. Реальні концепції, що передбачають використання ПС вертикального зльоту та посадки (ВЗП), є малошумними і можуть працювати від 15 до 45 хв, але необхідно проаналізувати питання доступності підзарядження. Інша проблема полягає в тому, що ВЗП потребують значного споживання електроенергії на початку та в кінці польоту. Ця технологія все ще має високий ризик сертифікації та режимів відмов, оскільки не має резервування приводів або здатності до планування. Більшість із них потребують високої енергоємності акумулятора, що може призводити до теплових збоїв, створюючи додаткові сертифікаційні виклики. Також необхідно подолати соціальні бар'єри, пов'язані з безпекою, конфіденційністю та рівнем шуму. Для вирішення цих питань потрібна тісна співпраця між урядами та авіаційною промисловістю.

Літаки короткого зльоту і посадки мають простіший вигляд для сертифікації рішення для безпілотних авіаційних комплексів, оскільки їхні зліт і посадка подібні до звичайних літаків, але на коротших дистанціях, і вони здатні планувати для аварійної посадки. ПС короткого зльоту та посадки зазвичай мають більшу дальність польоту та вищу крейсерську швидкість.

Багато стартапів і виробників розробляють проекти безпілотного авіаційного комплексу (БпАК). Volocopter – це двомісний мультикоптер ВЗП, здатний пролетіти до 27 км зі швидкістю 70 км/год. Lilium Jet працює над ВЗП для двох осіб із дальністю польоту до 300 км [9,10]. Joby Aviation, Zee Aero і Kitty Hawk працюють над іншими концепціями ВЗП, де дальність польоту обмежена енергоємністю акумуляторів, тоді як підхід гібридно-електричної силової установки розглядається як спосіб збільшити цю дальність. Програма Boeing NeXt розробила прототип пасажирського ВЗП з дальністю польоту до 80 км. Концепція восьмипропелерного літака ВЗП є частиною програми EmbraerX.

### Гібридно-електрична силова установка для літаків

Гібридно-електрична силова установка вважається ефективною альтернативою традиційним літкам малої та середньої дальності. Такі компанії, як Airbus, Siemens, Rolls-Royce та Boeing, активно інвестують у розвиток цієї технології. Для архітектур гібридно-електричних силових установок визначено п'ять основних категорій:

1. Послідовний гібрид – енергія надходить до електродвигуна від генератора, який працює на двигуні внутрішнього згоряння.

2. Паралельний гібрид – двигун внутрішнього згоряння та електродвигун працюють одночасно для забезпечення тяги.

3. Послідовно-паралельний гібрид – комбінування принципів послідовного та паралельного гібридів для підвищення ефективності.

4. Турбоелектричний гібрид – турбогенератор забезпечує електричну енергію для електродвигунів, які приводять літак у рух.

5. Повністю електричний – використання лише електродвигуна, який живиться від акумуляторів або інших джерел електроенергії.

У деяких гібридних топологіях застосовують силовий електронний перетворювач замість двигуна внутрішнього згоряння. Кожна з архітектур має свої особливості, що стосуються енергоефективності, сфери застосування, складності конструкції та технічних викликів. Концепція розподіленої тяги в поєднанні з деякими із цих архітектур може забезпечити додаткові переваги завдяки синергійному ефекту.

Розглянемо перспективні архітектури ГЕСУ для легких літаків.

### Послідовний гібрид

У послідовній гібридній архітектурі лише електродвигуни механічно з'єднані з гвинтами. Двигун внутрішнього згоряння (ДВЗ) приводить у дію електрогенератор, електричний вихід якого запускає двигун або заряджає батареї за допомогою силового електронного перетворювача. У фазах польоту, які потребують низького пропульсивного зусилля (наприклад, крейсерська фаза), енергія, перетворена генератором, може також заряджати батареї.

Послідовна архітектура може бути поєднана з концепціями розподіленої тяги. Головною перевагою архітектури серії є те, що ДВЗ механічно не пов'язаний із генератором тяги, а отже, може постійно працювати з оптимальною робочою потужністю та швидкістю. Крім того, простота концепції дає змогу легко керувати рушієм.

До недоліків належить те, що електродвигун повинен забезпечувати всю тягу самостійно, тому його необхідно проектувати для максимальної потужності, що призводить до збільшення ваги силового агрегату. Послідовна конфігурація підходить для застосувань, що вимагають високого крутного моменту та низької швидкості, але є менш ефективною, ніж паралельна. Вона також вимагає використання акумуляторів із збільшеною ємністю та електродвигунів, що збільшує масу та об'єм силового агрегату.

### Паралельна гібридна архітектура

У паралельній гібридній архітектурі є два паралельні рушійні вали, що живляться від джерел двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ) та електродвигуна (ЕД), які механічно з'єднані між собою. Вали ДВЗ та ЕД, що живляться від акумуляторів, з'єднані з валом, який приводить у рух вентилятор або пропелер, тому будь-який із них або обидва можуть забезпечувати рух. Ця гібридна архітектура також дає змогу заряджати батареї, коли ДВЗ приводить у рух пропелер і ЕД через муфту. У цьому випадку ЕД працює як електричний генератор.

На валу ДВЗ, на відміну від послідовної та послідовно-паралельної архітектур, немає електричного генератора, і розміри електричних двигунів можуть бути меншими, оскільки тягу забезпечують обидва джерела енергії, що сприяє зменшенню ваги.

Серед недоліків цієї конфігурації слід зазначити додаткову вагу, спричинену механічним з'єднанням, а також необхідність у більш складній системі управління силовою установкою. Крім того, робота ДВЗ може бути менш оптимальною на різних етапах польоту, ніж у серійній конфігурації, оскільки він безпосередньо бере участь у створенні тяги.

### Послідовна / паралельна гібридна архітектура

Ця архітектура є комбінацією двох попередніх. Двигун внутрішнього згоряння, електродвигун, електричний генератор і пропелер механічно з'єднані через муфту. Таким чином, механічна потужність ДВЗ може бути використана для обертання пропелера або перетворена на електричну енергію генератором для заряджання акумуляторів.

Основна перевага такої конфігурації полягає в тому, що вона дає змогу легко змінювати топологію під час експлуатації та є найбільш поширеною архітектурою в гібридних транспортних засобах. Недоліком цієї архітектури є високий рівень складності керування та визначенні маси.

Деякі концепції випробовують варіацію цієї архітектури в поєднанні з розподіленою тягою, у якій один або кілька гвинтів механічно приводяться в дію ДВЗ, тоді як інші – тільки ЕД, які живляться від акумуляторної батареї або від електродвигуна, що приводиться в дію ДВЗ.

### Гібридні концепції та демонстраційні моделі

NASA класифікує концепцію літака за шкалою для вимірювання зрілості технології, відомою як

рівень технологічної готовності (РТГ). Деякі концепції гібридно-електричних літаків, наведені нижче, є довідковими прикладами для різних рівнів РТГ [11].

### Рівень технологічної готовності 6–7

Партнерство між Airbus, Siemens і Rolls-Royce розпочалося у 2017 році з метою виробництва гібридного літака E-Fan X (рис. 1) на базі літака BAe 146, розрахованого на 50–100 пасажирів. Силова установка літака замінила один із чотирьох двигунів внутрішнього згоряння на електродвигун потужністю 2 МВт [12].



Рис. 1. E-Fan X

Extra 330LE (рис. 2) – це одномісний, 1000 кг, повністю електричний акробатичний літак, який приводиться в рух легким електродвигуном Siemens вагою 50 кг та потужністю 260 кВт. Його рівень технологічної готовності (РТГ) становить 6–7, з енергетичною щільністю, що включає перетворювачі потужності та систему терморегулювання 5,2 кВт/кг. [13].



Рис. 2. Extra 330 LE

### Рівень технологічної готовності 5–6

Ще одне партнерство між Pipistrel, Siemens, університетами Марибора та Пізи й MBVision у межах програми Європейського Союзу Hupstair розробило літак на гібридно-електричній силовій установці під назвою Panthera (рис. 3).

Двигун має серійну гібридну архітектуру з адаптованим двигуном внутрішнього згоряння Rotax 914, з максимальною потужністю 100 кВт. Електродвигун Siemens має максимальну потужність 200 кВт, постійну потужність 160 кВт та енергетичну щільність 5,2 кВт/кг.

Літак проходить наземні випробування, його планують до запуску в найближчі роки з оціночним рівнем технологічної готовності (РТГ) 5–6 [8].



Рис. 3. Panthera

Zunum Aero – це стартап, заснований компаніями Boeing та JetBlue, який спрямований на розроблення серійного 12-пасажирського літака з гібридно-електричною силовою установкою. Невеликий авіалайнер обладнаний електрогенератором потужністю 500 кВт, що працює на двигуні внутрішнього згоряння та забезпечує живлення двох вентиляторів з електроприводом.

Літак (рис. 4) демонструє крейсерську швидкість 483 км/год, заявлену дальність польоту 1110 км, злітну висоту 670 м і має відсіки на крилах для модульних акумуляторних блоків. Уведення в експлуатацію планувалося на 2023 рік з інтеграцією технологій, що відповідають рівню технологічної готовності 5–6. Однак зараз компанія постає перед фінансовими труднощами, що впливає на реалізацію проекту [8].

Німецький аерокосмічний центр розробив HY4 (рис. 5) – двофюзеляжний чотиримісний літак, 1500 кг. Кожен із фюзеляжів здатен умістити двох пасажирів. Джерелом енергії для цього літака є паливний елемент із мембранним полімерним електролітом для крейсерського польоту на висоті від 470 до 930 м зі швидкістю 40 м/с, а також літєві акумулятори для додаткового живлення під час зльоту та набирання висоти [8].





Рис. 4. Zunum Aero



Рис. 5. HY4

HY4 оснащений електродвигуном потужністю 80 кВт і може розвивати максимальну швидкість 56 м/с. Літак чудово підходить для коротких польотів завдяки низькому рівню шуму та мінімальним викидам, а також здатний здійснювати зліт і посадку на коротких злітно-посадкових смугах.

Метою розробки HY4 є його застосування як електричного повітряного таксі та створення в майбутньому 19-пасажирських регіональних літаків із гібридно-електричною силовою установкою.

### Рівень технологічної готовності 4–5

У 2007 році інженери Boeing модифікували двомісний літак-планер Diamond HK36 (рис. 6) з електричною силовою установкою на основі газотурбінного двигуна та паливного елемента з мембранним полімерним електролітом у поєднанні з літій-іонними акумуляторами. Літак має максимальну злітну масу 770 кг без корисного навантаження і максимальне відношення підйомної сили до опору 27 [14].

Початковий двигун внутрішнього згорання був замінений на гібридно-електричну силову установку з послідовною архітектурою, яка живила електродвигун потужністю 30 кВт для обертання пропелера зі змінним кроком. Теплова енергія надходила від турбореактивного двигуна, який був основним джерелом живлення для польоту на висоті 1000 м і споживав 17,5 кВт за швидкості 27,7 м/с. Акумуляторні батареї забезпечували додаткову потужність

27,5 кВт для зльоту та набирання висоти. Загальна маса літака збільшилася на 150 кг, з яких 12 % припадало на паливні елементи та 10 % – на акумуляторні батареї.



Рис. 6. Diamond HK36

PEGASUS (паралельна електрогазова архітектура із синергетичною схемою використання) – це концепт регіонального літака на 48 пасажирів, що базується на ATR 42-500. Літак поєднує дві паралельні гібридно-електричні силові установки, розташовані на кінцях крила, з вентилятором усередині та в кормовій частині літака.

X-57 Maxwell – це невеликий експериментальний повністю електричний літак (рис. 7), переобладнаний із Tecnam 2006T. Літак використовує електродвигуни в розподіленій тязі, що живляться від літій-іонних акумуляторних батарей. Проєкт має на меті зменшити шум, споживання палива та викиди [15].



Рис. 7. X-57 Maxwell

### Рівень технологічної готовності 3–4

NASA також тестує взаємодію газотурбінних генераторів з інтеграцією поглинання граничного шару. На рис. 8 показано найбільший літак із газотурбінним двигуном, який серйозно вивчається, під назвою N3-X.

Було розроблено концепцію гібридного корпусу крила з двома проходами для пасажирів. На крилі змонтовані рідинні турбогенератори на водневому паливі потужністю 30 МВт у повній турбоелектрич-

ній архітектурі гібридно-електричної силової установки [16].

Rolls-Royce та Tecnam працюють над проєктом H3PS, який є модифікованим 4-пасажирським літаком моделі P2010. У літак (рис. 9) встановлена гібридно-електрична силова установка з паралельною архітектурою, що містить 4-циліндровий двигун внутрішнього згоряння Rotax потужністю 104 кВт та електродвигун потужністю 30 кВт.

Здебільшого пропелер живиться від ДВЗ, а електродвигун додає додатковий крутний момент, коли це необхідно [17].



Рис. 8. N3-X

Електродвигун виконує кілька функцій:

- 1) стартер для запуску ДВЗ;
- 2) підсилювач тяги під час набирання висоти;
- 3) генератор під час крейсерського польоту для підзаряджання акумулятора.



Рис. 9. Tecnam P2010 H3PS

Концепція гібридно-електричної силової установки для VTOL розробляється компанією VerdeGo Aero в партнерстві з Continental. Це літак (рис. 10) масою 3400 кг, що використовує поршневи́й двигун внутрішнього згоряння, який працює на паливі Jet-A, та використовує гібридно-електричну систему з послідовною архітектурою та кілька пропелерів з електроприводом [18].



Рис. 10. VerdeGo

## Висновки

Останнім часом авіаційна промисловість зростала прискореними темпами, та навіть попри вплив COVID-19 і всупереч воєнним діям, які дестабілізують виробничий сектор, передбачається, що відбудеться відновлення і збереження цих темпів протягом трьох наступних десятиліть. Кількість викидів парникових газів літаками також збільшилася, незважаючи на прогрес у дизайні фюзеляжу та силових установок. Амбітні екологічні обмеження були заявлені з 2005 року із цілями до 2050 року. Для досягнення цих цілей розробляються нові силові установки, які змінять авіаційний ринок, запроваджуючи конкурентні ціни на перевезення на короткі відстані та застосовуючи менші невикористовувані аеропорти. Найважливішими аспектами для авіаційної промисловості в найближчі роки є стійке зростання, низькі операційні витрати та пошук можливостей, що виникають завдяки новим технологіям.

Для досягнення екологічних цілей повністю електричні та гібридно-електричні силові установки незабаром змінять ринок літаків. Чотири аспекти мають вирішальне значення для цих технологій: шум, викиди, споживання палива та дальність польоту.

**Внесок авторів:** формулювання мети та постановки завдання досліджень – **А. М. Гуменний**; огляд та аналіз інформаційних джерел – **Л. В. Капітанова, Р. С. Зубар, Р. Джафаров**; формулювання висновків – **В. А. Безкорований**.

## Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що немає конфлікту інтересів щодо цього дослідження, фінансового, особистого, авторського чи іншого, який міг би вплинути на дослідження та результати, представлені в статті.

## Фінансування

Дослідження проведено без фінансової підтримки.

**Доступність даних**

Рукопис не має пов'язаних даних.

**Використання засобів штучного інтелекту**

Автори підтверджують, що не використовували генеративних технологій штучного інтелекту під час створення представленої роботи та дослідження.

Автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису.

**Література**

1. *Fly the green deal* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://www.acare4europe.org/wp-content/uploads/2022/06/20220815\\_Fly-the-green-deal\\_LR-1.pdf](https://www.acare4europe.org/wp-content/uploads/2022/06/20220815_Fly-the-green-deal_LR-1.pdf). – 02.01.2025.

2. ICAO. (2016a). *Environmental Report 2016* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/env2016.aspx>. – 02.01.2025.

3. ICAO. (2016b). *Resolutions adopted by the assembly* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://www.icao.int/Meetings/a39/Documents/Resolutions/a39\\_res\\_prov\\_en.pdf](https://www.icao.int/Meetings/a39/Documents/Resolutions/a39_res_prov_en.pdf). – 02.01.2025.

4. *Electric aviation ready for take-off in Norway by 2030, report says* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.thebarentsobserver.com/travel/electric-aviation-ready-for-takeoff-in-norway-by-2030-report-says/168873>. – 02.01.2025.

5. Біла книга «Європейська транспортна політика на 2010 рік: час вирішувати»(2001). [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://evnuir.vnu.edu.ua/bitstream/123456789/20946/1/Transport\\_polit\\_EU.pdf](https://evnuir.vnu.edu.ua/bitstream/123456789/20946/1/Transport_polit_EU.pdf). – 02.01.2025.

6. *Літій-іонні та літій-полімерні батареї – що краще* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://uk.kmdpower.com/news/lithium-ion-vs-lithium-polymer-batteries/?utm\\_source=chatgpt.com](https://uk.kmdpower.com/news/lithium-ion-vs-lithium-polymer-batteries/?utm_source=chatgpt.com). – 02.01.2025.

7. *Urban air mobility and sustainable urban mobility planning* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://urban-mobility-observatory.transport.ec.europa.eu/system/files/2023-11/urban\\_air\\_mobility\\_and\\_sump.pdf](https://urban-mobility-observatory.transport.ec.europa.eu/system/files/2023-11/urban_air_mobility_and_sump.pdf). – 02.01.2025.

8. *Aircraft Hybrid-Electric Propulsion: Development Trends, Challenges and Opportunities Manuel [Text]* / A. Rendón, Carlos D. Sánchez R., Josselyn Gallo M., Alexandre H. Anzai // *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*. – 2021. – Vol. 32. – P. 1244-1268. DOI 10.1007/s40313-021-00740-x

9. *Літаючі таксі набагато ближче, ніж здається* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ukr.media/science/300680/> – 02.01.2025.

10. *Відео: літаюче таксі Lilium Jet вперше піднялося в небо* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ecotechnica.com.ua/uk/transport/video-letayushchee-taksi-lilium-jet-vpervye-podnyalos-v-nebo>. – 02.01.2025.

11. *Technology Readiness Levels* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.nasa.gov/directorates/somd/space-communications-navigation-program/technology-readiness-levels/>. – 02.01.2025.

12. *E-Fan X* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.airbus.com/en/innovation/low-carbon-aviation/hybrid-and-electric-flight/e-fan-x>. – 02.01.2025.

13. *Extra 330LE Electric Aircraft* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.airport-technology.com/projects/extra-330le-electric-aircraft/>. – 02.01.2025.

14. *Diamond HK-36 Super Dimona* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://skybrary.aero/aircraft/dimo>. – 02.01.2025.

15. *X-57 Maxwell Overview* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.nasa.gov/centers-and-facilities/armstrong/x-57-maxwell/>. – 02.01.2025.

16. *N3-X* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www1.grc.nasa.gov/aeronautics/eap/airplane-concepts/n3x/>. – 02.01.2025.

17. *The test Aircraft: Testnet P2010* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://h3ps.eu/>. – 02.01.2025.

18. *VerdeGo Aero PAT200* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://evtol.news/verdego/>. – 02.01.2025.

**References**

1. *Fly the green dea*. Available at: [https://www.acare4europe.org/wp-content/uploads/2022/06/20220815\\_Fly-the-green-deal\\_LR-1.pdf](https://www.acare4europe.org/wp-content/uploads/2022/06/20220815_Fly-the-green-deal_LR-1.pdf) (accessed 02.01.2025).

2. ICAO. (2016a). *Environmental Report 2016* Available at: <https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/env2016.aspx> (accessed 02.01.2025).

3. ICAO. (2016b). *Resolutions adopted by the assembly* Available at: [https://www.icao.int/Meetings/a39/Documents/Resolutions/a39\\_res\\_prov\\_en.pdf](https://www.icao.int/Meetings/a39/Documents/Resolutions/a39_res_prov_en.pdf) (accessed 02.01.2025).

4. *Electric aviation ready for take-off in Norway by 2030, report says* Available at: <https://www.thebarentsobserver.com/travel/electric-aviation-ready-for-takeoff-in-norway-by-2030-report-says/168873> (accessed 02.01.2025).

5. *Bila knyha "Yevropeys'ka transportna polityka na 2010 rik: chas vyryshuvaty"*. Available at:



[https://evnuir.vnu.edu.ua/bitstream/123456789/20946/1/Transport\\_polit\\_EU.pdf](https://evnuir.vnu.edu.ua/bitstream/123456789/20946/1/Transport_polit_EU.pdf) (accessed 02.01.2025).

6. *Lityi-ioni ta lityi-polimerni batarii – shcho krashche*. Available at: [https://uk.kmdp.com/news/lithium-ion-vs-lithium-polymer-batteries/?utm\\_source=chatgpt.com](https://uk.kmdp.com/news/lithium-ion-vs-lithium-polymer-batteries/?utm_source=chatgpt.com) (accessed 02.01.2025).

7. *Urban air mobility and sustainable urban mobility planning*. Available at: [https://urban-mobility-observatory.transport.ec.europa.eu/system/files/2023-11/urban\\_air\\_mobility\\_and\\_sump.pdf](https://urban-mobility-observatory.transport.ec.europa.eu/system/files/2023-11/urban_air_mobility_and_sump.pdf) (accessed 02.01.2025).

8. Rendón A., Carlos D. Sánchez R., Josselyn Gallo M., Alexandre H. Anzai. Aircraft Hybrid-Electric Propulsion: Development Trends, Challenges and Opportunities Manuel. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, 2021, 32, p. 1244- 1268. DOI 10.1007/s40313-021-00740-x/

9. *Litayuchi taksi nabagato blyzhche, nizh zdayetsya*. Available at: <https://ukr.media/science/300680/> (accessed 02.01.2025).

10. *Video: litayuche taksi Lilium Jet vpershe pidnyalosya v nebo* Available at: <https://ecotechnica.com.ua/uk/transport/video-letayushchee-taksi-lilium-jet-vperve-podnyalos-v-nebo> (accessed 02.01.2025).

11. *Technology Readiness Levels* Available at: <https://www.nasa.gov/directorates/somd/space-commu>

[nications-navigation-program/technology-readiness-levels/](https://www.nasa.gov/directorates/somd/space-commu) (accessed 02.01.2025).

12. *E-Fan X* Available at: <https://www.airbus.com/en/innovation/low-carbon-aviation/hybrid-and-electric-flight/e-fan-x> (accessed 02.01.2025).

13. *Extra 330LE Electric Aircraft* Available at: <https://www.airport-technology.com/projects/extra-330le-electric-aircraft/> (accessed 02.01.2025).

14. *Diamond HK-36 Super Dimon*. Available at: <https://skybrary.aero/aircraft/dimo> (accessed 02.01.2025).

15. *X-57 Maxwell Overview*. Available at: <https://www.nasa.gov/centers-and-facilities/armstrong/x-57-maxwell/> (accessed 02.01.2025).

16. *N3-X* Available at: <https://www1.grc.nasa.gov/aeronautics/eap/airplane-concepts/n3x/> (accessed 02.01.2025).

17. *The test Aircraft: Tecnam P2010* Available at: <https://h3ps.eu/> (accessed 02.01.2025).

18. *VerdeGo Aero PAT200* Available at: <https://evtol.news/verdego/> (accessed 02.01.2025).

Надійшла до редакції 06.08.2024, розглянута на редколегії 18.11.2024

## AIRCRAFT HYBRID-ELECTRIC PROPULSION: DEVELOPMENT TRENDS, CHALLENGES AND OPPORTUNITIES

*Andrii Humennyi, Liudmyla Kapitanova, Ruslan Zubar, Valerii Bezkorovainyi, Rufat Jafarov*

**The subject of the study** in the article is aviation hybrid-electric powertrains and their application in modern and future aviation technologies. The article focuses on the analysis of key areas for the development of these powertrains, their impact on aviation, and the potential for integrating cutting-edge technologies to achieve environmental goals. The aim of the research is to present modern technologies and future trends in the development of hybrid-electric powertrains. The attention is focused on the air transport market, demonstration models of hybrid systems, powertrain topologies, aircraft design, electric systems, energy storage, and internal combustion engines. **The research tasks** include: analyzing the current state of aviation hybrid-electric powertrains, evaluating the prospects for the development of electric urban air mobility and hybrid-electric regional aircraft, determining optimal architectures for different types of aircraft such as unmanned aerial systems and regional aircraft, as well as studying modern energy storage technologies, including batteries and fuel cells. **The scientific and practical novelty** of the article lies in summarizing current approaches to the design and implementation of hybrid-electric powertrains, identifying key directions for the development of urban air mobility and regional hybrid-electric aircraft. The article considers turboelectric architecture with distributed thrust and the integration of boundary layer absorption as promising solutions for achieving environmental goals by 2030 and 2050. The importance of implementing advanced energy storage technologies, such as lithium-ion and solid-state batteries, improving thermal regulation systems, using alternative fuels (hydrogen, methane), as well as distributed electric propulsion and boundary layer absorption integration technologies, is emphasized. The research supports international programs, particularly CORSIA, and highlights the importance of cooperation between scientific, industrial, and governmental bodies to reduce aviation's environmental impact.

**Keywords:** hybrid-electric propulsion; power electronics; energy storage; energy management.

**Гуменний Андрій Михайлович** – канд. техн. наук, доц., проректор з науково-педагогічної роботи, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

**Капітанова Людмила Валеріївна** – д-р техн. наук, доц., проф. каф. проектування літаків та вертольотів, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

**Зубар Руслан Станіславович** – асп. каф. проектування літаків та вертольотів, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

**Безкоровайний Валерій Анатолійович** – асп. каф. проектування літаків та вертольотів, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

**Джафаров Руфат** – асп. каф. проектування літаків та вертольотів, Національного аерокосмічного університету «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

**Andrii Humennyi** – PhD, Associate Professor, Vice-Rector for Scientific and Pedagogical Work, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Kharkiv, Ukraine,  
e-mail: a.gumennyu@khai.edu, ORCID: 0000-0003-1020-6304, Scopus Author ID: 57219051542.

**Liudmyla Kapitanova** – Doctor of Techn. Sci., Professor at the Department "Design of Aircraft and Helicopters", National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Kharkiv, Ukraine,  
e-mail: l.kapitanova@khai.edu, ORCID: 0000-0003-3878-6734, Scopus Author ID 57218556745.

**Ruslan Zubar** – PhD student of the "Design of Aircraft and Helicopters" Department, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Kharkiv, Ukraine,  
e-mail: ruslanzubar@gmail.com, ORCID: 0009-0008-5358-7788.

**Valerii Bezkorovainyi** – PhD student of the "Design of Aircraft and Helicopters" Department, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Kharkiv, Ukraine,  
e-mail: 195612@ukr.net, ORCID: 0009-0004-2779-934X.

**Rufat Jafarov** – PhD-student of Aircraft Designing Department, National aerospace university «Kharkiv Aviation Institute», Kharkiv, Ukraine,  
e-mail: rufatjafarov2002@gmail.com, ORCID: 0009-0000-5063-7681.