

УДК 629.7.

Адлер Р. Л.<sup>1</sup>, бакалавр, Лук'янов П. В.<sup>1</sup>, к.ф.-м.н., с.н.с.<sup>1</sup>КПІ ім. Ігоря Сікорського

## ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ГІБРИДНИХ СИЛОВИХ УСТАНОВОК У ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТАХ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗЛЬОТУ ТА ПРИЗЕМЛЕННЯ

У системах із вертикальним зльотом та приземленням доцільно використовувати гібридні силові установки, де джерелом енергії виступає як високоенергетичне паливо для тривалого магістрального польоту, так і утворений електричний струм для короткотривалого вертикального злету, що значно підвищує дальність польоту та загальну енергоефективність літального апарату [1].

В авіаційній техніці знайшли застосування наступні типи гібридних конфігурацій: послідовна, паралельна та комбінована. Кожен із цих типів має власні переваги та недоліки.

Перевага послідовної гібридної конфігурації полягає у тому, що двигун внутрішнього згоряння (ДВЗ) повністю механічно відокремлений від повітряного гвинта, а його вихідна потужність не залежить від потреби потужності приводу (рис. 1). Тобто, ДВЗ може працювати в оптимальних для нього умовах під час різних режимів польоту, а коливання у надлишках, або недостатці потужності компенсуються за допомогою буферної акумуляторної батареї, де надлишок потужності перетворюється у її заряджання, а недостача у розряджання. Дану гібридну конфігурацію зручно застосовувати у системі розподіленої електричної силової установки (*DEP - distributed electric propulsion*), де в літальному апараті присутні декілька повітряних гвинтів, які у свою чергу приводяться в роботу за допомогою електродвигунів [2]. Однак, серед недоліків даної конфігурації є низька енергоефективність, оскільки під час низки перетворень енергії, відбуваються значні втрати потужності, які суттєво знижують кінцевий ККД.

У випадку паралельної гібридної конфігурації, двигун внутрішнього згоряння та електродвигун/генератор з'єднанні разом механічно з повітряним гвинтом за допомогою трансмісії, тому вони можуть окремо, або разом сприяти передачі крутного моменту (рис. 2). Це дає змогу об'єднати їхні потужності та зменшити масу кожного компонента та системи в цілому, підвибивши загальний ККД, так як може бути відсутнє зайве перетворення енергії [3]. Недоліком є необхідність використання додаткової трансмісії, яка розподіляє механічну енергію між ДВЗ та електричним двигуном/генератором.

Конфігурація комбінованого типу (послідовно-паралельна) (рис. 3), також відома як конфігурація розподілу потужності, є поєднанням вищезазначених архітектур [2]. Дана гібридна конфігурація робить не тільки розподіл потужності

більш гнучкішим, але також дозволяє двигуну внутрішнього згоряння та електродвигуну працювати в найефективніших режимах. Комбінована система є найбільш передовою серед гібридних конфігурацій, але її конструкція складніша.



Рис. 1. Схема послідовної гібридної конфігурації

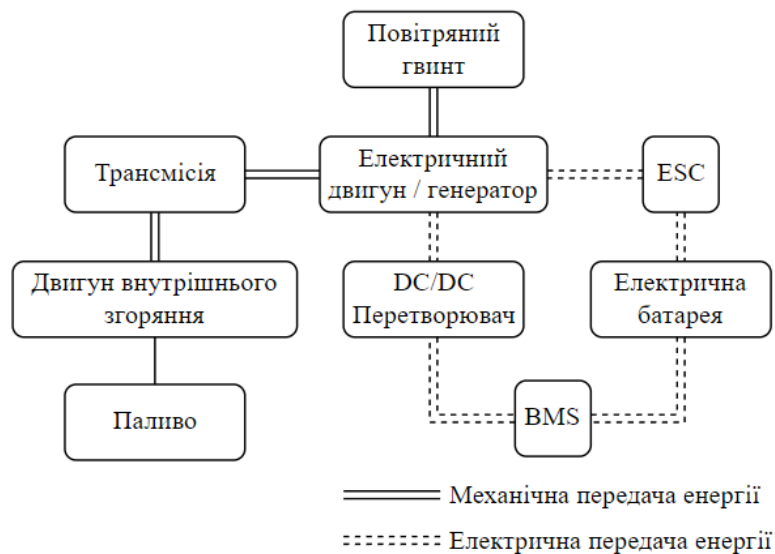


Рис. 2. Схема одновальної паралельної гібридної конфігурації

Невід’ємною частиною літального апарату з гібридною силовою установкою є акумуляторні електричні батареї та високоенергетичне паливо. Так, якщо порівняти, питомі енергетичні характеристики авіаційного бензину, який має енергетичну цінність 43-46 МДж/кг [4] із літій-іонними акумуляторами, які мають енергетичну щільність 0,54-0,9 МДж/кг [5], то різниця буде у 48...85 разів, що є дуже суттєво, навіть, якщо врахувати доволі низький ККД двигунів внутрішнього згоряння, у порівнянні з електричними двигунами, які працюють доволі енергоефективно.

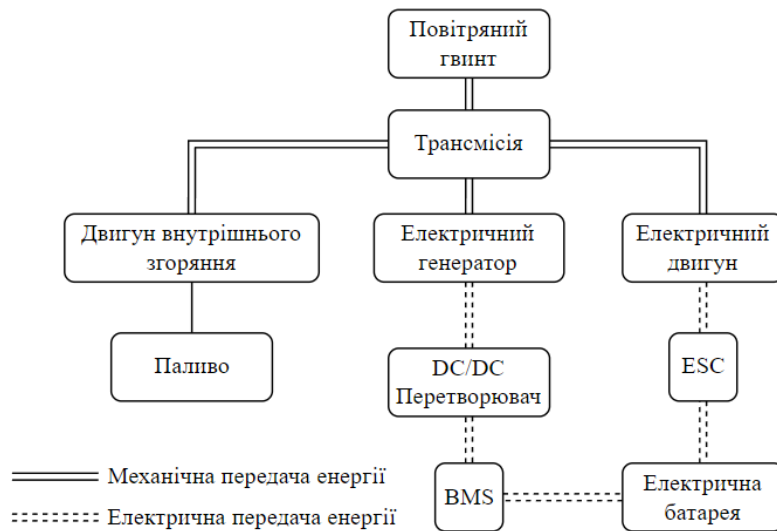


Рис. 4. Схема комбінованої гібридної конфігурації

Проведений порівняльний аналіз гібридних силових установок показує їх переваги та недоліки з точки зору систем та зручності розподілу електричної та механічної енергії, економічності, ефективності та загальної технічної складності. Також був проведений порівняльний аналіз питомої енергетичної щільності електричних акумуляторних батарей відносно високоенергетичного пального, згідно якого доцільно використовувати саме гібридні силові установки у випадку, якщо необхідно застосувати електричний привід, що дасть змогу зменшити вагу електричних батарей, використавши електричну енергію, що створюється генератором, який приводиться в рух за допомогою двигуна внутрішнього згоряння.

### Список використаної літератури

1. Review of hybrid electric powered aircraft, its conceptual design and energy management methodologies. / Ye Xie, Savvarisal, Tsourdos Antonios, Zhang Dan, Gu Jason. // Chinese Journal of Aeronautics (CJA), Elsevier. – 2020. – p. 1-19.
2. A Review of Distributed Electric Propulsion Concepts for Air Vehicle Technology. / Hyun D. Kim; Aaron T. Perry; Phillip J. Ansell // IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium – 2018 – p. 1-21.
3. Electric, hybrid, and turboelectric fixed-wing aircraft: A review of concepts, models, and design approaches. / Benjamin J. Brelje, Joaquim R. R. A. Martins // Progress in Aerospace Sciences, Elsevier. – 2019 – p. 1-19.
4. Hydrogen Electric Airplanes: A Disruptive Technological Path to Clean Up the Aviation Sector / Jonas Kristiansen Nøland // IEEE Electrification Magazine – 2021 – p. 1-22.
5. Design and optimization of lithium-ion battery as an efficient energy storage device for electric vehicles: A comprehensive review /F. N. U. Khan, M. G. Rasul, A. S. M. Sayem, N. K. Mandal // Journal of Energy Storage, Elsevier – 2023 – p. 108033.