

## ВІДГУК

офіційного опонента

на дисертаційну роботу Пушилїна Олексія Євгенійовича  
тема «Метод обґрунтування характеристик енергетичної системи гібридної  
турбоелектричної силової установки для пасажирського літака»,  
представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії за  
спеціальністю 142 «Енергетичне машинобудування»

### Актуальність і новизна теми

Одним з напрямків розвитку сучасної світової авіації є досягнення жорстких екологічних вимог і стандартів та значного зменшення витрати палива в авіації, відповідно до планів, встановлених ІСАО, ІАТА, UNEP та інших світових організацій. Нові стандарти ІСАО для пасажирських літаків, прийняті у 2025 році, посилюють вимоги до зниження викидів парникових газів (в першу чергу двоокису вуглецю -  $\text{CO}_2$ ) та локального забруднення повітря в аеропортах – оксидів азоту  $\text{NO}_x$  і зважених часток для нових моделей літаків з 2031 року та нових серійних літаків з 2035 року. Основні заходи включають перехід на екологічне авіаційне паливо, зниження шуму та розробку двигунів на водневих технологіях їх роботи для досягнення амбітної мети – нульового зростання викидів  $\text{CO}_2$  у секторі міжнародній авіації до 2050 року при збереженні зростання її обсягів робіт відповідно із запитами на авіаційні перевезення. Це є **актуальною науково-технічною задачею** і стратегічним напрямком розвитку авіаційних компаній для досягнення вуглецевої нейтральності і розвитку глобальної та регіональної авіації. У зв'язку з цим дисертаційна робота спрямована на покращення паливної та екологічної ефективності гібридної турбоелектричної силової установки (ГТЕСУ) з турбогвинтовим двигуном (ТГвД) для пасажирського літака на основі вдосконалення енергетичної системи (ЕнС) з електричним двигуном (ЕД) та паливними елементами (ПЕ) його живлення.

Зазначена задача потребує проведення циклу наукових робіт із обґрунтування напрямків покращення характеристик, удосконалення структури методу обґрунтування параметричного обриса, удосконалення методики розрахунку характеристик, удосконалення показника гібридизації і визначення впливу показника гібридизації ЕнС ГТЕСУ з ТГвД на експлуатаційні характеристики та діапазон застосування пасажирських ЛА та індекси емісій. Це визначає **наукову новизну** цієї роботи, практичну значущість та актуальність.

### Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації та їх достовірності

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, результатів, висновків і рекомендацій забезпечуються коректним застосуванням загальноновизнаного математичного апарату, несуперечливістю з відомими положеннями теорії авіаційних двигунів, методів імітаційного моделювання, обґрунтованим вибором основних припущень та обмежень, прийнятих під час

моделювання, а також збіжністю результатів, отриманих під час практичного застосування розроблених моделей. Основні результати дисертаційного дослідження опубліковані у фахових українських та міжнародних виданнях, та апробовано на всеукраїнських та міжнародних наукових конференціях. Наукові положення і висновки, сформульовані автором дисертаційної роботи, у достатньому обсязі віддзеркалюють постановку задачі дослідження та послідовність її вирішення.

### **Наукова новизна отриманих результатів**

Наукові результати дисертаційного дослідження полягають у наступному:

1. Удосконалено метод обґрунтування параметричного обрису гібридної турбоелектричної силової установки пасажирського літака.
2. Удосконалено методику розрахунку характеристик енергетичної системи гібридної турбоелектричної силової установки з турбогвинтовим двигуном, електричним двигуном та паливними елементами його живлення.
3. Удосконалено показник гібридизації для оцінювання гібридної турбоелектричної силової установки з турбогвинтовим двигуном, електричним двигуном та паливними елементами.
4. Отримано нові залежності маси та об'єму енергетичної системи гібридної турбоелектричної силової установки від показника її гібридизації для нових проєктів пасажирських літаків вміщенням 20, 50 та 100 пасажирів.

### **Практична цінність отриманих результатів**

Основні наукові положення дисертації доведено до практичної реалізації у вигляді:

1. Єдиного програмного комплексу як інструментального засобу щодо вибору та обґрунтування параметричного обрису ГТЕСУ з ТГВД, ЕД та ПЕ у складі пасажирського літака. Розроблений програмний комплекс дозволяє автоматизувати розрахункові дослідження та скоротити час для прийняття технічного рішення.
2. Обґрунтованої науково-технічної інформації під час прийняття рішень щодо забезпечення необхідного (очікуваного) ступеня гібридизації ГТЕСУ у складі пасажирського літака на етапах його проєктування як нового або проведення модернізації/модифікації існуючого літака.
3. Методики розрахунку характеристик ЕнС ГТЕСУ з ТГВД, ЕД та ПЕ, яка дозволяє досліднику порівнювати різні схеми ЕнС ГТЕСУ та вибирати найкращу для заданого польотного циклу пасажирського літака.
4. Удосконаленого показника гібридизації ГТЕСУ з ТГВД, який показує досліднику внесок того чи іншого джерела енергії (газ, водень, або інше альтернативне стале авіаційне паливо) у процес отримання загальної кількості доступної електричної енергії (потужності) на валу ПГ.
5. Методики розрахунку характеристик ПГ ТГВД у складі ГТЕСУ, що дозволяє досліднику економити час та прогнозувати результати дослідження характеристик ТГВД.

б. Запропонованих рекомендацій щодо побудови раціональної ЕнС ГТЕСУ.

Основні результати дисертації впроваджені у навчальному процесі НАУ «ХАІ», у науково-технічних дослідженнях в АТ “Мотор Січ” і АТ “Івченко-Прогрес”, що підтверджено відповідними актами впровадження.

Подальше практичне використання результатів роботи є доцільним в науково-дослідних установах, підприємствах промисловості та авіаційного транспорту України, які займаються проектуванням, виготовленням та модернізацією ГТД з різним рівнем гібридизації.

### **Оформлення дисертаційної роботи, дотримання вимог академічної доброчесності**

Дисертаційна робота містить анотації українською та англійською мовами, вступ, чотири розділи, висновки, список використаних джерел та додатки. Загальний обсяг роботи 288 сторінок, з яких: зміст на 5 сторінках, перелік умовних скорочень на 4 сторінках, вступ на 11 сторінках, основний текст на 145 сторінках, список використаних джерел на 36 сторінках (із 315 найменувань). Робота містить 11 таблиць, з яких 3 таблиці на 3 окремих сторінках, 16 рисунків, з яких 3 рисунки на 3 окремих сторінках, 4 додатків на 81 сторінці.

Оформлення дисертації відповідає усім діючим національним вимогам, всі розділи є логічно пов'язаними і направлені на вирішення поставлених задач, жоден розділ не виділяється з усієї структури роботи, матеріал подано рівномірно. Текст дисертаційної роботи написаний грамотною мовою, легко сприймається при опануванні, та з коректним використанням технічних термінів.

Дисертаційна робота пройшла перевірку на антиплагіат, яка показала відсутність ознак академічного шахрайства і порушень академічної доброчесності.

Оформлення дисертаційної роботи повністю відповідає усім діючим вимогам, а її автор дотримався вимог академічної доброчесності.

### **Оцінка змісту та повнота викладу результатів в опублікованих працях**

Основний зміст дисертації відображено у восьми наукових статтях (чотири статті опубліковані у закордонних виданнях проіндексованих у наукометричній базі даних Scopus, чотири статті опубліковані у періодичних наукових виданнях, включених до Переліку наукових фахових видань України), п'яти публікаціях у матеріалах і тезах конференцій, одному патенті України на корисну модель та трьох свідоцтвах України на промисловий зразок.

Основні результати і висновки дисертації представляються достовірними, достатньо обґрунтованими та випробуваними. Автор базує свої дослідження на детальному кваліфікованому аналізі проблеми та робіт інших дослідників, які виконано у напрямку її вирішення.

В основу методики дослідження покладено самостійне отримання теоретичних та експериментальних даних, досвід попередників, відокремлення значущих факторів, формування математичної структури моделі.

Математичне моделювання виконано на основі відомих випробуваних програмних засобів, які стали стандартними в сучасних дослідженнях.

Висновки та наведені автором праці в дисертації, повністю відповідають її змісту й отриманим результатам.

#### **Зауваження щодо змісту дисертаційної роботи:**

1. У вступі (стор. 22), а також на стор. 39 зазначено, що SAF це екологічне авіаційне пальне. Однак, правильніше стверджувати, що це сталє авіаційне пальне (sustainable aviation fuel), яке виробляється з біосферної (біологічного походження) або техносферної (технологічного походження) сировини.

2. Твердження на стор. 23, що «Ефективна система управління енергією дозволяє використовувати енергію як від теплового двигуна, так і від АБ, що дає гнучкість у проектуванні архітектури літака», виглядає обмеженим, бо не конкретизує «енергію» - чи це енергія для виконання безпечного польоту, чи енергія для бортової систем життєзабезпечення. Не показано місце, яке надається АБ та ПЕ в системі управління електрозабезпеченням.

3. Мета даного дослідження потребує уточнення в частині «за рахунок зменшення використання палива з викопного вуглецю як для теплового двигуна, так і для паливних комірок при виробленні електричної енергії на борту літака».

4. На стор. 37 стверджується, що «Останньою демонстрацією “Clean Aviation” є регіональний літак із технологіями, готовими до введення в експлуатацію до 2035 року, що включає життєздатні рішення щодо технологій, інтеграції, інфраструктури та сертифікації». Проте, це твердження є застарілим, тому що «інфраструктура та сертифікація» для нових літаків з водневими технологіями будуть доступними після 2040 року.

5. На стор. 74 вказано, що  $(RGH)^{0,24}$  – безрозмірний геометричний коефіцієнт, який заснований на визначенні розміру фюзеляжа, приведенного до  $1 \text{ м}^2$ », хоча величина RGH є тим же коефіцієнтом, без вказаного ступеню.

6. У розділі 2 (стор. 103) вказано, що «Для вироблення електроенергії, яка необхідна новому літаку з ГСУ, пропонується використання ЕнС із АБ, ПЕ та процесом риформінгу водню». Чи мається на увазі, що це ЕнС, в якій паливні комірки (чи елементи) застосовують процес риформінгу водню?

7. У розділі 3 (стор. 163) не вказано, чому «порівняння розрахункових результатів з експериментальними даними» виконано для літака L-410UVP-E20.

8. Чому у розділі 4 на рис. 4.1 (стор. 176) показано літак з двома ТГВД, а на рис. 4.9 – з 2 ТГВД та 2 ЕД? Яка кількість гвинтів в силовій установці, що досліджується?

## **Висновки**

Подана до захисту дисертаційна робота є завершеним науковим дослідженням, в якому вирішена актуальна науково-практична задача щодо удосконалення методу обґрунтування характеристик енергетичної системи гібридної турбоелектричної силової установки для пасажирського літака. Результати дисертаційної роботи використані в наукових проектах АТ «Мотор Січ» і АТ «Івченко-Прогрес», при виконанні проекту європейської програми Горизонт EFACA (грантова угода №101056866, 2023-26 pp).

Враховуючи актуальність обраної теми, обґрунтованість наукових результатів дисертації, їх достовірність та новизну, практичну цінність, повноту викладання в наукових публікаціях та відсутність порушень академічної доброчесності, вважаю, що дисертаційна робота відповідає пп. 6, 7, 8, 9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. №44, а здобувач Пушилін Олексій Євгенійович заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 14 «Електрична інженерія» за спеціальністю 142 «Енергетичне машинобудування»

## **Офіційний опонент:**

Доктор технічних наук, професор,  
професор-керівник сектору Центру авіаційних технологій  
Інституту авіації (Дослідницька мережа  
Лукашевич-Інститут авіації)

Олександр ЗАПОРОЖЕЦЬ