

РЕЦЕНЗІЯ
на дисертаційну роботу
Подгорського Костянтина Миколайовича
на тему "Удосконалення методів визначення крутного моменту засобами,
вбудованими в конструкцію авіаційних газотурбінних двигунів",
яка представлена на здобуття ступеня доктора філософії
в галузі знань 14 Електрична інженерія
за спеціальністю 142 Енергетичне машинобудування

Актуальність теми дисертації

Турбовальні газотурбінні двигуни (ТВаД) є основними силовими установками для вертольотів середнього та великого класу вантажопідйомності. Наразі вони знаходять дедалі ширше застосування й на вертольотах малої маси. У свою чергу, для цивільної та транспортної авіації пріоритетними є турбореактивні двоконтурні двигуни (ТРДД) з високим ступенем двоконтурності, від ефективності яких значною мірою залежать льотно-технічні характеристики літальних апаратів.

У процесі розробки ТВаД виникає потреба у впровадженні систем вимірювання крутного моменту, що дозволяє обмежувати потужність і синхронізувати роботу кількох двигунів. Для ТРДД однією з ключових задач є точне визначення параметрів вентилятора, зокрема його коефіцієнта корисної дії, що є критично важливим для забезпечення ефективної роботи всього двигуна. Однак традиційні методи оцінки цих характеристик не забезпечують достатньої точності, що зумовлює необхідність альтернативних підходів — наприклад, шляхом вимірювання крутного моменту, який передається від турбіни на вентилятор у складі повнорозмірного двигуна. Водночас розробка відповідних вимірювальних систем ускладнюється відсутністю ефективних методичних основ для комплексного аналізу похибок і побудови математичних моделей, які б враховували залежність між кутовим скручуванням вала, крутним моментом, режимами роботи двигуна та зовнішніми умовами. Саме вирішення цих задач є метою дисертаційної роботи, що й визначає її актуальність.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни

Матеріали, викладені в дисертації Подгорського Костянтина Миколайовича, дозволяють зробити висновок про обґрунтованість та достовірність його наукових результатів. Так, у роботі К. М. Подгорського вирішено низку нових науково-технічних задач, а також суттєво поглиблено аналіз раніше досліджених питань, пов'язаних із вимірюванням крутного моменту та визначенням коефіцієнта корисної дії (ККД) вентилятора в авіаційних турбореактивних двигунах. Зокрема, вперше проведено детальний

аналіз джерел похибок при вимірюванні крутного моменту за допомогою засобів, вбудованих у конструкцію двигуна, а також при обчисленні ККД вентилятора. Було розроблено конструкцію датчика крутного моменту, а також геометричну та термopружну модель вала вентилятора. Це дало змогу встановити точний зв'язок між кутовим скручуванням вала та прикладеним до нього крутним моментом, що є основою для надійного визначення ККД. Запропонований підхід дозволяє підвищити точність оцінки характеристик вентилятора безпосередньо в складі двигуна, що є важливим для створення сучасних ефективних авіаційних двигунів.

Результати дисертаційної роботи використано на підприємстві «МОТОР СІЧ» у складі турбовальних двигунів МС-500В, ТВ3-117ВМА-СБМ1В 1 серії та ТВ3-117ВМА-СБМ1В 4Е серії.

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

1) Суттєво вдосконалено метод визначення крутного моменту турбовальних двигунів в експлуатації на основі використання пружно-геометричної моделі у складі системи вимірювання та запропонованого підходу до аналізу похибок визначення крутного моменту, що дає змогу підвищити точність визначення крутного моменту.

2) Уперше запропоновано універсальні моделі похибок визначення ККД вентиляторів і компресорів за результатами їхніх випробувань з метою визначення характеристик, що дають змогу прогнозувати точність визначення ККД за відомими похибками вимірювання параметрів у разі використання двох альтернативних методів визначення ККД.

3) Уперше отримано універсальну нерівність, яка визначає вимоги до точності вимірювання крутного моменту з метою забезпечення необхідної точності визначення ККД вентиляторів і компресорів.

4) Уперше запропоновано структуру вимірювача крутного моменту на валу вентилятора, вбудованого в конструкцію двигуна, що ґрунтується на використанні термopружно-геометричної моделі вала, інтегрованої з моделлю граничних умов теплообміну, яка на основі подібності пов'язана з вимірюваними параметрами проточної частини двигуна, що дає змогу визначати крутний момент в усьому діапазоні режимів роботи та зовнішніх умов.

Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Подгорського Костянтина Миколайовича повністю відповідає Стандарту вищої освіти за спеціальністю 142 Енергетичне машинобудування. Дисертаційна робота є

завершеною науковою працею, а її результати свідчать про вагомий особистий внесок здобувача у науковий напрям авіаційної та ракето-космічної техніки.

Можна зробити висновок, що дисертаційна робота Подгорського Костянтина Миколайовича є результатом самостійних досліджень здобувача і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають належні посилання на відповідне джерело.

Мова та стиль викладення результатів

Дисертаційна робота написана українською мовою, котра відповідає особливостям стилю наукових досліджень з використанням правильних термінів і понять, характерних для стандартної фахової та наукової термінології. Дисертаційна робота є цілісною і в ній досягнуті тематична повнота та розкриття головної наукової ідеї автора. Подані в роботі наукові та практичні положення логічно викладені та достатньо обґрунтовані.

Дисертація складається з анотації двома мовами, змісту, переліку умовних позначень і скорочень, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел із 81 найменування на 10 сторінках і 2 додатків на 3 сторінках. Загальний обсяг роботи становить 163 сторінки, з них 120 сторінки основного тексту, 4 таблиці та 62 рисунки.

У **вступі** автором обґрунтовано актуальність обраної теми дослідження, сформульовано мету і завдання дослідження, а також описано наукову новизну та практичне значення отриманих результатів. Наведено відомості про апробацію результатів дисертаційної роботи та особистий внесок автора.

У **першому розділі** проведено аналіз використання вимірювачів крутного моменту для керування та аналізу технічного стану ГТД. Для цього було визначено завдання визначення крутного моменту і потужності газотурбінних двигунів та їхніх вузлів. Розглянуто основні методи визначення крутного моменту в техніці. Визначено особливості вимірювання крутного моменту вільної турбіни турбовального і турбогвинтового двигуна та особливості використання крутного моменту для експериментального визначення характеристик вентиляторів.

У **другому розділі** проведено дослідження похибок визначення крутного моменту фазометричним методом. Для цього було розглянуто конструктивна схема досліджуваного ВКМ. Запропоновано загальну структуру алгоритму визначення крутного моменту та з математичну модель ВКМ. Також проведено детальний аналіз похибок визначення крутного моменту. Ідентифіковано характеристики ВКМ в умовах стендових випробувань.

У **третьому розділі** проведено дослідження похибок визначення характеристик вентиляторів із використанням вимірювачів крутного моменту. Знайдено джерела похибок визначення ККД. Визначено чутливості відносних похибок розраховуваних параметрів до похибок вимірюваних параметрів. А також визначено чутливість похибок розрахункових параметрів до нормованих похибок вимірюваних параметрів. Наведено приклади аналізу похибок визначення характеристики ККД вентилятора. Сформовано вимоги до точності визначення крутного моменту.

У **четвертому розділі** представлено формування вбудованого вимірювача крутного моменту вала вентилятора. Для цього розглянуто конструкцію вала й організацію вимірювання крутного моменту та проведено конструктивне доопрацювання вала для забезпечення вимірювання крутного моменту. Розроблено вихідну модель вала на базовому режимі та сформовано теплову модель вала на нерозрахункових режимах. Запропоновано структуру методичної частини вбудованого вимірювача крутного моменту.

У **п'ятому розділі** представлено практичну реалізацію та перевірку фазометричного методу визначення крутного моменту турбовального двигуна. Розглянуто застосування фазометричної системи ВКМ у турбовальних двигунах розробки АТ «МОТОР СІЧ». Подано конструктивне виконання та результати випробувань ВКМ у складі турбовальних двигунів. Наведено реалізацію та перевірку вимірювача крутного моменту в двигуні ТВЗ-117ВМА-СБМ1В 1 серії.

У **висновках** наведено підсумкові результати проведених у дисертації наукових досліджень, що узагальнюють висновки за кожним з її розділів.

Дисертаційна робота оформлена відповідно до вимог, сформульованих у наказі МОН України від 12 січня 2017р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях

Основний зміст дисертації відображено в 4 статтях, три з яких входять до переліку фахових видань України, а одну опубліковано у виданні, що реферується в наукометричній базі даних Scopus, та двох тезах доповідей на міжнародних науково-технічних конференціях.

Основні наукові та практичні результати дисертації викладено, обговорено та отримано схвальну оцінку на XXVII, XXVIII та XXIX Міжнародних конгресах двигунобудівників (2022, 2023, 2024 рр., м. Харків), міжнародній науково-практичній конференції «Енергетичні установки та альтернативні джерела енергії» (2024 р., м. Харків), Seminarium IV. New Trends in the Construction, Research and Operation of Flying Objects (2022 р., Institut Lotniztwa, Warsaw).

Наукові публікації здобувача містять опис наукових досліджень, проведених в рамках дисертаційного пошуку, аналіз сутності проблеми, методів і результатів проведених досліджень, а також обґрунтовані висновки. В наукових публікаціях здобувача не виявлено порушень принципів академічної доброчесності, висновки є оригінальними.

Таким чином, наукові результати, описані в дисертаційній роботі, повністю висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи

По дисертаційній роботі можна зробити наступні зауваження:

1). У підрозділі 2.4 виконано детальний аналіз похибок визначення крутного моменту, спричинених різними факторами, серед яких значне місце посідають технологічні похибки виготовлення та монтажу елементів вимірювальної системи. Але відповідні результати отримані для конкретних розмірів конструктивних елементів. Залишилося без відповіді питання - як використати ці результати для аналізу систем вимірювання крутильного моменту з іншими розмірами?

2). У підрозділі 3.1 сформульовано проблему експериментального визначення ККД вентилятора та наведено відповідні формули для традиційної методики, основаної на вимірюванні температури й тиску на вході та виході з вентилятора, та дослідженої в роботі методики, основаної на вимірюванні крутного моменту. Формула (3.2) для цієї методики містить похибку, зумовлену тим, що частина потужності, яка передається через вал, втрачається на тертя в опорах і тертя дисків. У роботі немає інформації щодо аналізу цих складових похибок.

3). При обґрунтуванні вибору розрахункової сітки термопружної моделі вала (стор. 114) автору довелося використовувати різні способи задання навантаження (для одного типу елемента – у вигляді крутильного моменту, а для іншого типу – у вигляді розподіленої сили. В описі цієї частини роботи немає інформації, як зміна способу задання навантаження впливає на результати.

4). У наведеній на рис. 4.8 структурі методичної частини ВКМ, інтегрованого в конструкцію двигуна, важливим елементом є блок ідентифікації, який власне й визначає значення крутного моменту. Проте наведений в підрозділі 4.4 опис цього блоку є явно недостатнім.

Вважаю, що приведені зауваження не є визначальними і не зменшують загальну наукову новизну та практичну значимість результатів, не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи.

Висновок про дисертаційну роботу

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Подгорського Костянтина Миколайовича на тему "Удосконалення методів

визначення крутного моменту засобами, вбудованими в конструкцію авіаційних газотурбінних двигунів" виконана на високому науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, сукупність теоретичних та практичних результатів якого розв'язує наукове завдання, що має істотне значення для галузі знань 14 Електрична інженерія. Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в п.6 – 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 2022р. №44.

Здобувач Подгорський Костянтин Миколайович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 14 Електрична інженерія за спеціальністю 142 Енергетичне машинобудування.

Рецензент:

Кандидат технічних наук, доцент,
декан факультету авіаційних двигунів,
доцент кафедри теоретичної механіки,
машинознавства та роботомеханічних систем
Національного аерокосмічного університету
"Харківський авіаційний інститут"

Юрій ШИРОКИЙ