

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу  
ПОДГОРСЬКОГО Костянтина Миколайовича  
на тему «Удосконалення методів визначення крутного моменту засобами,  
вбудованими в конструкцію авіаційних газотурбінних двигунів»,  
представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії  
в галузі знань 14 «Електрична інженерія»  
за спеціальністю 142 «Енергетичне машинобудування»

### Актуальність теми дослідження

Газотурбінні двигуни складають у світі основу енергетичних установок більшої кількості гелікоптерів, аеропланів, та надводних кораблів військово-морського флоту. Такий тип газотурбінних двигунів (ГТД) є також широко розповсюдженим в стаціонарній та мобільній енергетиці. Ефективна та надійна експлуатація газотурбінних енергетичних установок вимагає актуальної інформації про ефективну потужність двигуна, що в свою чергу, потребує, у більшості випадків, знання величини крутного моменту на вихідному валу, що пов'язує двигун з навантаженням.

Безперервне визначення крутного моменту на валу вільної турбіни з високою точністю в усьому діапазоні режимів роботи двигуна необхідне також для цілей керування та діагностування як двигуна, так і енергетичної установки в цілому. Крім того, в процесах створення та доводки газотурбінних двигунів та їх елементів визначення крутного моменту на валу є принципово важливим.

Відповідно до умов використання у ГТД раціонально використовувати методи виміру крутного моменту, що базуються на визначенні кутового переміщення декількох поперечних перерізів валу. В першу чергу, це методи, ґрунтовані на визначенні фазового зсуву двох високочастотних електричних сигналів, що відображають відносне кутове переміщення різних перерізів каліброваного валу (фазометричні).

Проектування фазометричних вимірювачів крутного моменту (ВКМ) відповідно до умов використання у ГТД потребує розробки методичних підходів до формування математичних моделей, що пов'язують кутове переміщення валу з крутним моментом, що передається, та режимом роботи двигуна. На їх базі виконується комплексний аналіз похибок визначення крутного моменту та потужності ГТД.

**Таким чином, тема дослідження** – формування систем вимірювання крутного моменту, вбудованих у конструкцію газотурбінних двигунів і ґрунтованих на використанні математичних моделей, що зв'язують термодинамічні властивості вала з умовами роботи двигуна безумовно, є **актуальною**.

### Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни

В дисертаційній роботі вирішено **науково-технічну задачу**, яка полягає у розробці та створенні на базі математичних моделей, що пов'язують

термопружні властивості валу з умовами роботи двигуна, систем вимірювання крутного моменту, вбудованих у конструкцію ГТД.

Основний **науковий результат** дисертаційного дослідження полягає у створенні математичних моделей на основі виявлення взаємозв'язку механічних параметрів вимірювача крутного моменту, інтегрованого у конструкцію ГТД, та моделі граничних умов теплообміну, які дозволили визначати крутний момент, що передає вал ГТД, в усіх діапазонах режимів роботи двигуна та умов зовнішнього середовища.

**Наукову новизну** має метод визначення крутного моменту турбовальних двигунів в умовах експлуатації на основі використання пружно-геометричної моделі валу у складі системи вимірювання та запропонованого автором підходу до аналізу похибок визначення крутного моменту

**Подальшого розвитку** в роботі набули методи та моделі визначення похибок значень ККД вентиляторів і компресорів під час їх випробування та розроблена структура вимірювача крутного моменту на валу вентилятора, вбудованого в конструкцію двигуна.

Наукові положення і висновки, сформульовані автором дисертаційної роботи, в **достатньому обсязі** віддзеркалюють постановку задачі дослідження та послідовність її вирішення.

### **Практична цінність отриманих результатів**

Отримані здобувачем нові наукові результати забезпечили наукове підґрунтя проєктування систем вимірювання крутного моменту турбовальних двигунів та використані при підготовці до випробувань вентиляторів та компресорів ГТД, що реалізовано в складі турбовальних двигунів розробки АТ «МОТОР СИЧ» (МС-500В, ТВЗ-117ВМА-СБМ1В 1 серії та ТВЗ-117ВМА-СБМ1В 4Е серії), та забезпечило в умовах випробувань у складі гідрогальмівних стендів, а також льотно-конструкторських випробувань похибку експериментального визначення крутного моменту в межах одного відсотка заданого значення.

Результати результатами випробувань у складі гідрогальмівних стендів, а також льотно-конструкторських випробувань підтверджують працездатність розробленої та створеної систем вимірювання й індикації крутного моменту.

Основні результати дисертаційної роботи впроваджені у виробничій діяльності АТ «МОТОР СИЧ» та у навчальний процес та науково-дослідну діяльність кафедри конструкції авіаційних двигунів Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут».

Результати дисертаційної роботи мають велику перспективу для використання розроблених методів та моделей при проєктуванні та модернізації об'єктів, що потребують безперервного та високоточного виміру значення потужності: транспортні та стаціонарні енергетичні установки широкого цільового призначення.

Подальше практичне використання результатів роботи є доцільним на підприємствах та організаціях, які спеціалізуються розробці та експлуатації

газотурбінних установок, а також в навчальному процесі профільних кафедр технічних університетів та академій.

### **Оформлення дисертаційної роботи, дотримання вимог академічної доброчесності та повнота викладу результатів в опублікованих працях**

Дисертаційна робота містить анотації українською та англійською мовами, вступ, п'ять розділів, висновки, список використаних джерел та додатки. Загальний обсяг роботи становить 163 сторінки, у тому числі 62 рисунки, список використаних джерел з 81 найменування на 10 сторінках і два додатки на трьох сторінках.

Оформлення дисертації відповідає усім діючим вимогам, всі розділи є логічно зв'язаними і направлені на вирішення поставлених задач; жоден розділ не виділяється з усієї структури роботи, матеріал подано рівномірно. Текст дисертаційної роботи написаний грамотною мовою, яка легка для сприйняття, та з коректним використанням термінів.

Проведена відповідальним за антиплагіатну роботу перевірка дисертації вказує на відсутність ознак академічного шахрайства і порушень академічної доброчесності.

Основний зміст дисертації відображено в чотирьох наукових статтях (три статті опубліковано у фахових виданнях України, одна стаття опублікована у виданні, яке включене до наукометричної бази Скопус) та двох тезах доповідей на міжнародних науково-технічних конференціях.

У публікаціях здобувачу належать такі результати: підхід до комплексного аналізу похибок вимірювача крутного моменту з використанням ізотермічної пружно-геометричної моделі вала, а також метод тарування індивідуальної характеристики системи ВКМ; універсальні співвідношення, що пов'язують похибку визначення ККД вентилятора з похибками вимірювання параметрів та визначають вимоги до точності вимірювання крутного моменту під час відповідних випробувань, обґрунтування необхідності вимірювання крутного моменту під час визначення характеристик вентиляторів; інформаційна структура системи ВКМ та спосіб формування термopружної неізотермічної моделі вала, пов'язаної з вимірюваними параметрами проточної частини двигуна умовами подібності.

Наукові і практичні результати дисертаційної роботи оприлюднені та отримали позитивну оцінку наукової спільноти на міжнародних науково-технічних конференціях: XXVII, XXVIII і 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 p., Institut Lotniztwa, Warsaw).

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

1. У розділі 1 (стор. 47) автор стверджує, що «найкращими для застосування як штатні ВКМ ТВaД» системами є основані на визначенні крутної деформації валу. Проте за якими характеристиками та показниками цих систем прийняте таке рішення – не вказано.

2. У підрозділі 2.1 наведено відомості про механічну частину ВКМ (вимірювальний вал), але не має інформації ані про матеріал, ані розміри, що обмежує можливості аналізу подальших досліджень.
3. В процесі визначення похибки, зумовленої зміною зазору між датчиком і виступами (підрозділ 2.4.3.) індукторів у наслідок дії відцентрових сил деформація елементу циліндричної оболонки розглядається як деформація консольної балки, але обґрунтування такого рішення не наведено.
4. На рис 2.9. наведено порівняння розрахункової та експериментальної залежностей крутного моменту від різниці кутів повороту перерізів, проте чисельних статистичних показників такого порівняння не наведено.
5. В процесі формування граничних умов теплообміну на базовому режимі не враховано процес теплопередачі випромінюванням між деталями, проте обґрунтування такого рішення відсутнє.
6. У роботі зустрічаються недоліки у поданому матеріалі: певна перевантаженість скороченнями, відсутність частини розмірів на зображеннях та дещо інше.

Вищезазначені зауваження та недоліки не впливають на **загальну позитивну** оцінку отриманих наукових результатів дисертаційної роботи.

### Висновки

Подана до захисту дисертаційна робота є завершеним науковим дослідженням, в якому вирішена актуальна науково-практична задача розробки та створенні на базі математичних моделей, що пов'язують термопружні властивості валу з умовами роботи двигуна, систем вимірювання крутного моменту, вбудованих у конструкцію ГТД.

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 Подгорський Костянтин Миколайович **заслужує на присудження** йому наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 14 «Електрична інженерія» за спеціальністю 142 «Енергетичне машинобудування»

Доктор технічних наук, професор,  
завідувач кафедри інженерної механіки  
та технології машинобудування  
Національного університету  
кораблебудування  
імені адмірала Макарова



Михайло ТКАЧ