

ВІДГУК

офіційного опонента

на дисертаційну роботу Бондаренка Олексія Васильовича

«Формування бортових самоналаштовувальних динамічних моделей газотурбінних двигунів для визначення невимірюваних параметрів робочого процесу»,

представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 142 «Енергетичне машинобудування»

Актуальність і новизна теми

Одним з ефективних напрямів розвитку авіаційної техніки є вдосконалення характеристик двигунів шляхом використання нових алгоритмів автоматичного керування, оснований на математичних моделях. У зв'язку з цим дисертаційна робота, спрямована на формування та впровадження динамічних математичних моделей у бортові системи керування й діагностування, є **актуальною задачею**.

Зазначена задача потребує проведення циклу наукових робіт із розвитку методів визначення невимірюваних параметрів, ідентифікації характеристик і визначення точності оцінювання динамічних параметрів авіаційних газотурбінних двигунів. Це визначає **наукову новизну** цієї роботи.

Таким чином, дисертація має значну наукову новизну й практичну значущість та актуальність.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни

В дисертаційній роботі вирішено **науково-технічну задачу**, яка полягає у визначенні невимірюваних параметрів двигунів на усталених та перехідних режимах роботи із використанням бортових самоналаштовувальних моделей.

Найбільш значущим **науковим результатом**, який *уперше* отримано автором і який визначає відповідність дисертації вимогам до рівня кваліфікаційної роботи на здобуття наукового ступеня доктора філософії, є отримані залежності для похибок визначення оцінок параметрів лінійних динамічних моделей і оцінок невимірюваних параметрів, які мають відмінні ознаки й дозволяють незалежно аналізувати вплив усіх головних чинників.

Впровадження цих співвідношень в систему самоналаштування математичних моделей **надає суттєвого розвитку** відповідній концепції бортових моделей, використання якої є важливим напрямком розвитку систем автоматичного керування та діагностування авіаційних двигунів.

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

Практична цінність отриманих результатів

В оглядовій частині роботи виконано детальний та докладний аналіз концепції бортових самоналаштовувальних моделей (eSTORM), а також методів оцінювання невимірюваних параметрів і параметрів динамічних моделей двигунів.

Розроблений удосконалений метод визначення невимірюваних параметрів може бути використаний при обробці експериментальної інформації, а також у бортових алгоритмах для моніторингу тяги, питомої витрати палива, потужності, температури газу перед турбіною, витрати повітря та інших параметрів, які характеризують робочий процес двигуна.

Запропонований метод визначення точності оцінювання параметрів математичних моделей, а також удосконалені алгоритми визначення невимірюваних параметрів, можуть бути використані як основа для створення електронних систем керування авіаційними газотурбінними двигунами на основі концепції самоналаштовувальних моделей.

Основні результати дисертаційної роботи впроваджені у виробничій діяльності АТ «МОТОР СІЧ», АТ «ФЕД» та у навчальний процес та науково-дослідну діяльність кафедри конструкції авіаційних двигунів Національного аерокосмічного університету «Харківський авіаційний інститут».

Подальше практичне використання результатів роботи є доцільним на підприємствах та організаціях, які спеціалізуються на розробці та експлуатації газотурбінних двигунів і енергетичних установок, а також в навчальному процесі профільних кафедр технічних університетів і 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 197 сторінок, з них 155 сторінки основного тексту, 4 таблиці та 67 рисунків, список використаних джерел з 121 найменування на 15 сторінках і три додатки на п'яти 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, легко сприймається при опануванні, та з коректним використанням технічних термінів.

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

Основний зміст дисертації відображено у восьми наукових статтях (сім статей опубліковано у фахових виданнях України, одна стаття опублікована у закордонному фаховому виданні) та шести тезах доповідей на міжнародних науково-технічних конференціях.

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

Зауваження щодо змісту дисертаційної роботи

1. У роботі зазначено (с. 58, п. 8), що динамічна модель двигуна є суттєво нелінійною, і ця нелінійність враховується змінними коефіцієнтами лінійної динамічної моделі, які є функціями частоти обертання ротора високого тиску. Достатнього обґрунтування того, що коефіцієнти лінійної динамічної моделі (ЛДМ) є функціями лише одного аргументу, а саме частоти обертання ротора високого тиску (ВТ), не наведено. Також, не представлено спосіб отримання чи методику розрахунку коефіцієнтів ЛДМ.

2. Запропонований метод оцінювання динамічних параметрів двигунів передбачає використання вимірювань. В роботі наведені типові значення періоду реєстрації частот обертання ротору та сталих часу. З огляду на те, що тривалість перехідного процесу складає приблизно 3-5 сталих часу, з наведених даних випливає, що на режимі малого газу кількість вимірювань складатиме 30-50, а на максимальному режимі – 3-5. Такої кількості вимірювань явно недостатньо для того, щоб вважати вибірку репрезентативною, а, відповідно, вибіркове середнє та вибіркова дисперсія будуть зміщені й не підкорюватимуться нормальному закону розподілу. У той же час, використаний у роботі підхід до аналізу похибок передбачає, що випадкові величини розподілені за нормальним законом із нульовим математичним очікуванням. Вплив цих обставин у роботі не розглянуто.

3. У роботі відсутня чисельна валідація методики розрахунку дисперсій похибок оцінок динамічних параметрів (розділ 3). Доцільно навести розрахунки, які підтверджують чисельно отримані результати, наприклад, методом Монте-Карло або імітацією багатьох експериментів.

4. У розділі 2 зазначено, що двигун є суттєво нелінійним об'єктом, але в розділах 3 і 4 отримані результати для лінеаризованої моделі в околі точки. Доцільно було проаналізувати діапазон, у якому модель можна вважати лінійною і з якою похибкою.

5. У розділах 3, 4 припускається, що шум вимірювань є гаусівським білим шумом і з постійною дисперсією. Це припущення не підкріплено посиланнями на літературні джерела чи експериментальні результати. У

реальних системах шум часто має спектральну структуру, може бути автокорельованим та гетероскедастичним. Ігнорування цих особливостей може призводити до викривлення значень дисперсій оцінок параметрів, тому доцільно проаналізувати вплив реальної структури шуму на дисперсії оцінок динамічних параметрів.

6. У підрозділі 5.2.3 отриманий розв'язок відповідає частковому випадку, коли усі діагональні елементи коваріаційної матриці (формула 5.6, с. 168) параметрів технічного стану рівні. Це означає, що дисперсії усіх розглянутих параметрів технічного стану рівні, однак таке припущення нічим не аргументоване.

Висновки

Подана до захисту дисертаційна робота є завершеним науковим дослідженням, в якому вирішена актуальна науково-практична задача формування та впровадження бортових динамічних математичних моделей для визначення невимірюваних параметрів робочого процесу.

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 Бондаренко Олексій Васильович *заслуговує на присудження* йому наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 14 «Електрична інженерія» за спеціальністю 142 «Енергетичне машинобудування»

Професор
кафедри Підтримання льотної
придатності повітряних суден
Державного некомерційного підприємства
«Державний університет
«Київський авіаційний інститут»,
докт. техн. наук, професор

Сергій ДМИТРИЄВ