

# 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 вченого ступеня доктора філософії  
за спеціальністю 142 Енергетичне машинобудування

## 1. Актуальність і новизна теми

Авіаційний газотурбінний двигун є складним технічним об'єктом, до якості характеристик та надійності якого висуваються високі вимоги. Для ефективного вирішення завдань керування та контролю технічного стану двигуна він обладнаний вимірювальною системою. Однак склад вимірюваних параметрів значно обмежений, тому визначення невимірюваних параметрів двигунів є актуальною задачею створення систем автоматичного керування та діагностування двигунів.

Нині активно розвивається концепція бортової самоналаштовувальної моделі, яка забезпечує визначення невимірюваних параметрів двигуна в реальному часі. Однак, для розвитку та впровадження такого підходу необхідно вирішити ряд задач: формування спрощених багаторежимних моделей двигунів, розробка метода розрахунку похибок ідентифікації динамічних параметрів, вдосконалення метода визначення метода невимірюваних параметрів робочого процесу. У дисертації вирішуються саме такі задачі — з акцентом на контролі точності ідентифікації динамічних параметрів на основі вимірюваних параметрів.

**Актуальність** теми зумовлена необхідністю підвищення точності визначення невимірюваних параметрів двигуна в умовах обмеженості вимірюваних параметрів.

Уперше отримано залежності для похибок визначення невимірюваних параметрів газотурбінних двигунів, які дозволяють урахувати вплив похибок вимірювання всіх використовуваних параметрів на статичну, динамічну й коригувальну складові моделі, а також похибки оцінювання динамічних коефіцієнтів моделі.

Удосконалено метод визначення невимірюваних параметрів який пристосований для обробки 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.

Таким чином, тема дисертації має **наукову і практичну актуальність, а**

**об'єкт досліджень має новизну.**

## **2. Значення для науки і практики**

Найбільш значущими **науковими результатами**, які отримані автором і які визначають відповідність дисертації вимогам до рівня кваліфікаційної роботи на здобуття наукового ступеня доктора філософії, є наступні.

- Розглянута проблема формування та запропонована структура динамічної багаторежимної моделі параметрів ТРДД, що враховує вимоги до бортових моделей та надає розвитку концепції самоналаштувальних бортових моделей.
- Розвиток методів аналізу точності ідентифікації параметрів лінійних динамічних моделей, що враховують похибки вимірювань, частоту реєстрації, інтенсивність керуючого впливу та параметричні похибки моделі.
- Показана застосовуваність оцінки параметрів на основі метода найменших квадратів як альтернативи фільтру Калмана в задачах з квазісталими динамічними коефіцієнтами, особливо коли апріорна інформація про статистику шумів обмежена або недостовірна.

Дисертація має суттєве **значення для практики**:

- Розроблені методи впроваджені при проєктуванні агрегатів і системи автоматичного керування двигуна AI-322 на АТ «ФЕД» і при проєктуванні системи автоматичного керування двигуна ТВ3-117ВМА-СБМ1В на АТ «МОТОР СІЧ».
- Скорочення обчислювальної складності запропонованої структури спрощеної налаштовуваної моделі в порівнянні з вихідною сприяє впровадженню в бортових системах.
- Отримані результати впроваджено в навчальні курси: «Системи автоматичного керування авіаційних двигунів і енергетичних установок», «Моделювання та розрахунок процесів а авіаційній і ракетно-космічній техніці», «Методи аналізу та синтезу систем керування та діагностування об'єктів енергетичного машинобудування» в ХАІ, що сприяє підготовці кваліфікованих інженерів з авіаційної техніки.
- Алгоритмічне визначення достатності зібраної інформації та обґрунтоване планування експериментів з дослідження динамічних характеристик газотурбінних двигунів на стадії випробувань забезпечує отримання заданої точності оцінок.

### **3. Обґрунтованість і вірогідність результатів**

Обґрунтованість і вірогідність результатів дисертаційної роботи Бондаренка О.В. забезпечуються рядом методологічних, теоретичних і експериментальних підходів. Автор ґрунтує свої дослідження на детальному кваліфікованому аналізі проблеми та робіт інших дослідників, які виконано у напрямку її вирішення. В основу методики дослідження покладено відокремлення значущих факторів, формування структури математичної моделі, самостійне отримання аналітичних виразів та результатів чисельних розрахунків, досвід попередників.

Розробка методів ґрунтується на відомих положеннях механіки, теорії повітряно-реактивних двигунів, теорії імовірності та теорії автоматичного керування. В дисертації запропоновано методику побудови багаторежимної спрощеної моделі параметрів проточної частини ТРДД. Для її формування запропоновано подати модель як окремі підмоделі: статичну й динамічну. Методика розрахунку похибок оцінок динамічних параметрів ґрунтується на аналізі коваріаційної матриці оцінок параметрів отриманих за методом найменших квадратів.

У роботі проведено порівняння точності запропонованої спрощеної моделі з результатами стендових випробувань. Модель адекватно описує характер перехідних процесів.

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

### **4. Повнота викладення дисертації в публікаціях**

Повнота викладення дисертації в публікаціях Олексія Бондаренка є високою і повністю відповідає вимогам до оформлення результатів наукового дослідження для здобуття ступеня доктора філософії. Це підтверджується такими факторами:

Автором опубліковано 8 наукових статей, з них: 7 статті у фахових виданнях, включених до переліку МОН України; 1 стаття у міжнародному виданні, реферованому в базі даних Sciendo.

Апробація на конференціях: 5 доповідей на науково-технічних конференціях, включаючи: XXV, XXVII–XXIX Міжнародні конгреси двигунобудівників (ХАІ, Україна); V міжнародна науково-практична морська конференція кафедри СЕУ і TE Marine Power Plants & Operation MPP&O-2024 (ОНМУ, Україна).

### **5. Оформлення дисертації**

Оформлення дисертації відповідає встановленим вимогам, усі розділи є логічно пов'язаними й спрямовані на вирішення поставлених задач.

Зміст анотації достатньо повно відбиває зміст дисертації, її структуру та основні результати.

## **6. Зауваження**

- 1) Потребує пояснення як враховується зміна технічного стану двигуна у процесі налаштування моделі, якщо структурні параметри системи (наприклад, витрата повітря, ККД компресора та інші) будуть змінюватись поступово і непомітно для вимірювальних каналів?
- 2) У роботі активно використовується метод найменших квадратів і припущення про нормальний розподіл похибок. Як зміниться ефективність оцінювання, якщо розподіл похибок має інший характер (наприклад, має бути зсув), або похибки корелюють між собою?
- 3) Потребує пояснення які є ризики практичної реалізації запропонованих моделей у реальній бортовій системі керування, враховуючи можливу обмежену обчислювальну потужність системи та необхідність сертифікації ?
- 4) У розділах 3, 4 як основні джерела невизначеності розглядаються шуми вимірювання частоти обертання та параметричні похибки моделі. У роботі вважається, що похибки формування сигналу керування відсутні. Проте відомо, що шум витрати палива присутній і пов'язаний з особливостями роботи виконавчих пристроїв (насосів, дозаторів), а також похибками формування сигналу. Варто було б дослідити, як саме впливає цей шум на дисперсії оцінок похибок динамічних параметрів.
- 5) У дисертації зазначено, що запропонований метод оцінювання невимірюваних параметрів є «обчислювально стійкішим» та «обчислювально ефективнішим», але не надано детального порівняння точності, швидкості та ресурсоемності запропонованого методу з оглянутими (підрозділ 5.2.2) та іншими сучасними підходами (наприклад, нейромережевими або AI-методами), що зменшує повноту оцінки ефективності запропонованих рішень.

## **7. Висновки**

Наведені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку роботи.

Дисертаційна робота виконана на високому науковому рівні та є значною працею, яка містить нові науково обґрунтовані результати в галузі енергетичного машинобудування, які є вирішенням важливого науково-

практичного завдання формування бортових самоналаштовувальних динамічних моделей газотурбінних двигунів для визначення невимірюваних параметрів робочого процесу.

Дисертація відповідає спеціальності 142 Енергетичне машинобудування.

Таким чином, результати, викладені в дисертаційній роботі, відповідають вимогам пп. 6-9 "Порядку присудження ступеня доктора філософії...", затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12.01.22 р. №44, а її автор – **Бондаренко Олексій Васильович** – заслуговує присвоєння вченого ступеня доктора філософії.

Доктор технічних наук, професор,  
завідувача кафедри суднових енергетичних  
установок і технічної експлуатації  
Одеського національного  
морського університету



Роман ВАРБАНЕЦЬ

«25» 07 2025р.