

ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

к.т.н., доцента Пильова Вячеслава Володимировича

на дисертаційну роботу Марценюка Євгена Вікторовича
«Формування складу вимірюваних параметрів газотурбінних двигунів
для забезпечення моніторингу виробітку ресурсу дисків»,
представлену на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук
за спеціальністю 05.05.03 – двигуни та енергетичні установки

Актуальність і новизна

Впровадження сучасної концепції експлуатації авіаційних газотурбінних двигунів (ГТД) за фактичним технічним станом є безпосереднім дієвим чинником підвищення їх рівня безпеки та ефективності використання. Невід'ємною складовою відповідних стратегій є експлуатаційний моніторинг виробітку ресурсу на основі параметрів, які реєструються під час польоту штатною бортовою системою вимірювання. Це дозволяє найбільш повно використати ресурсний потенціал елементів конструкції, а також підвищити надійність двигуна в цілому шляхом безперервного контролю накопичення пошкоджень. При цьому, більшість існуючих методик та критеріїв спрямовано на забезпечення ефективності розпізнавання станів, а не на забезпечення точності моніторингу виробітку ресурсу.

Точність оцінювання залишкової довговічності в критичних зонах деталей прямо залежить від достовірності визначення їхнього термонапруженого стану, в той час як склад вимірюваних параметрів суттєво обмежений високою вартістю і малим ресурсом датчиків, призначених до використання в зоні високих температур проточної частини ГТД. Додатково, використання результатів вимірювань ускладнюється зумовленими інструментальними факторами похибками і дрейфом параметрів, пов'язаним з варіативністю робочого процесу і експлуатаційною деградацією технічного стану двигуна.

Одними з найбільш навантажених деталей ГТД, що значною мірою визначають надійність і ресурс силової установки в цілому, є диски турбін. В умовах інтенсивного циклічного термомеханічного навантаження при підвищених температурах, домінуючим механізмом деградації їх матеріалу виявляється малоциклова втома. Традиційні методики оптимізації складу вимірюваних параметрів розроблені для діагностики в умовах тривалого статичного навантаження, тому вони не дозволяють врахування специфіки дисків.

Отже, отримання нових обґрунтованих результатів вирішення важливого науково-практичного завдання з формування складу вимірюваних параметрів і побудови відмовостійких математичних моделей для моніторингу виробітку ресурсу дисків газотурбінних двигунів в дисертаційній роботі Є. В. Марценюка

є актуальною науково-прикладною задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами

Роботу було виконано на кафедрі конструкції авіаційних двигунів Національного аерокосмічного університету «Харківський авіаційний інститут». Додатковим безпосереднім підтвердженням актуальності її теми є запит на впровадження її результатів до численних дослідницьких проєктів вітчизняного і закордонного фінансування, а саме держбюджетної теми «Формування технологій створення адаптивних систем керування ГТД пасажирських і транспортних літаків» (ДР № 0119U100942), госпдоговірних робіт №203-8/2023(УГК) «Алгоритмічна і програмна реалізація методики розрахунку відпрацювання циклічного ресурсу критичних деталей для електронної системи автоматичного управління двигуна ТВ3-117ВМА-СБМ1В-01Т 1 серії» (замовник АТ «МОТОР СІЧ»), №05-НТ/2012(УГК) «Розробка методики й програмного комплексу моніторингу виробітку ресурсів деталей двигуна ТВ3-117ВМА-СБМ1В» (замовник АТ «МОТОР СІЧ»), №203-38/2008 «Розробка методичного й програмного забезпечення моніторингу виробітку ресурсів основних деталей двигунів Д-436-148 і АІ-450-МС на літаках АН-148» (замовник АТ «МОТОР СІЧ»), міжнародного контракту № ІНУ20/1718UA-203-5/2021 «Development of the method of the aircraft engine life-time monitoring» (замовник Shanghai HYUAN Machinery Technology Co., LTD).

Ступінь обґрунтованості й достовірності наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації

Положення дисертації ґрунтуються на результатах аналізу значної кількості сучасних наукових публікацій, серед яких 124 найменування знайшли місце в посиланнях на літературні джерела, та на комплексі здійснених дисертантом теоретичних досліджень.

Ці дослідження проводились відповідно до розроблених і вдосконалених здобувачем методик із застосуванням положень термодинаміки та теорії авіаційних двигунів, методів математичної статистики, регресійного аналізу, головних компонент і скінченних елементів, алгоритму схематизації за методом «дощу».

Результати досліджень було піддано ретельному аналізу й опису, наочно і повно проілюстровано графіками, схемами та таблицями.

Достовірність отриманих результатів підтверджується їх **апробацією на науково-практичних конференціях**: XVIII, XXVI, XXVIII, XXX Міжнародних конгресах двигунобудівників (2013, 2021, 2023, 2025 рр., Харків), V Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми динаміки та міцності в турбомашинобудуванні. ТУРБО'2014» (2014 р., Київ), «Polish-Ukrainian scientific seminar – New trends in the construction and operation of modern means of air transport» (2020 р., Warsaw, Instytut Lotnictwa), VI

Всеукраїнській відкритій науково-практичній конференції «Сучасні проблеми двигунобудування, енергетики та інтелектуальної механіки» (2026 р., Харків), а також на науково-технічних семінарах кафедри «Конструкції авіаційних двигунів» Національного аерокосмічного університету «Харківський авіаційний інститут».

Отже, ступінь обґрунтованості, достовірність наукових положень, отриманих здобувачем, висновків та рекомендацій не викликає сумнівів.

Значення для науки та практики проведеної роботи

В дисертаційному дослідженні здобувачем було розв'язано важливе завдання вдосконалення методичного забезпечення моніторингу ресурсу дисків авіаційних газотурбінних двигунів шляхом створення методу обґрунтованого вибору складу вимірюваних параметрів. Усі висновки дисертації ґрунтуються на викладених в роботі даних та відповідають сформульованим задачам дослідження.

Найбільш важливими з одержаних в дисертації результатів, що визначають її **наукову новизну**, є наступні:

1. Розроблено новий метод формування складу вимірюваних параметрів газотурбінних двигунів для забезпечення моніторингу виробітку ресурсу дисків, який відрізняється врахуванням циклічного характеру навантажень і дозволяє визначати найкращий склад вимірюваних параметрів для заданого узагальненого польотного циклу.

2. Сформовано новий критерій ефективності складу вимірюваних параметрів, який ураховує інструментальні та методичні похибки оцінювання ресурсу, відмовостійкість моделей температурного й напруженого станів дисків до зміни технічного стану двигуна, а також профіль узагальненого польотного циклу.

3. На основі зазначеного критерію ефективності вдосконалено методичне забезпечення моніторингу ресурсу дисків авіаційних ГТД шляхом використання запропонованого методу формування складу вимірюваних параметрів.

Вагоме для розвитку систем експлуатаційного контролю авіаційної техніки **практичне значення** отриманих результатів полягає в здійсненому у роботі ґрунтовному критичному аналізі існуючих методів вибору діагностичних параметрів, що застосовуються для оцінки залишкового ресурсу. Автором досліджено природу виникнення розрахункових похибок під час прогнозування довговічності та визначено їхні кількісні характеристики.

Створено інструментарій, який дозволяє формувати склад датчиків для гарантування заданої точності оцінювання малоциклової втоми дисків для будь-якого заданого узагальненого польотного циклу. Кількісно оцінено вплив складу вимірювань на ефективність моніторингу.

Важливим прикладним аспектом дисертації є вивчення специфіки накопичення втомних пошкоджень у дисках залежно від типу літального

апарата. Автор продемонстрував, як відрізняються умови виробітку ресурсу для вертольотів, маневреної авіації та літаків спеціального призначення, зокрема протипожежних. Окрему увагу приділено режимам аварійного вимкнення силової установки. У роботі доведено, що такі нештатні ситуації генерують суттєвий рівень пошкоджень, тому їхня фіксація та облік є необхідними при проєктуванні сучасних бортових систем моніторингу.

Усі запропоновані підходи були доведені до рівня практичного застосування на базі двигуна ТВ3-117. Для цієї силової установки дисертантом було обґрунтовано раціональний перелік вимірюваних параметрів, використання якого забезпечує найвищу ефективність моніторингу ресурсу в реальних умовах експлуатації.

Положення дисертаційної роботи впроваджені у практичну діяльність АТ «Мотор Січ» і в навчальний процес НАУ «ХАІ».

Структура, зміст та оформлення дисертації

Дисертація має дві анотації, список публікацій здобувача, складається зі змісту, переліку умовних позначень і скорочень, вступу, п'яти розділів, висновків, списків використаних джерел до кожного розділу загальним обсягом 124 найменування на 19 сторінках і 4 додатків на 10 сторінках. Загальний обсяг роботи становить 202 сторінки, з них 156 сторінок основного тексту, 31 таблиця та 42 рисунки.

Перший розділ присвячено аналізу методів моніторингу виробітку ресурсу основних деталей і обґрунтування складу вимірюваних параметрів двигунів ГТД. Другий – розробці методики синтезу оптимального набору вимірюваних параметрів для задач моніторингу ресурсу дисків турбіни авіаційного ГТД і формулюванню комплексного критерію якості. У третьому розділі розроблено моделі визначення невимірюваних параметрів на основі чотирьох обраних складів вимірюваних. Четвертий розділ присвячено аналізу ефективності моніторингових моделей невимірюваних параметрів ГТД за сформованим комплексним критерієм якості. Кожний розділ дисертації завершено підрозділом висновків. У п'ятому розділі здійснено практичну апробацію рекомендацій щодо вибору структури моніторингових моделей для авіаційного двигуна типу ТВ3-117. Дослідження доведено до отримання оцінки підсумкової похибки визначення ресурсу за механізмом малоциклової втоми. Сформульовані автором висновки повною мірою відображають зміст дисертаційної роботи та спираються на отримані наукові результати.

Дисертаційна робота оформлена відповідно до діючих вимог.

Робота є логічно структурованою, анотація та реферат відображають її основні положення та результати. Обсяг проведених досліджень суттєво перевищує очікування від дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, тому матеріал в роботі викладено достатньо стисло.

Зміст виконаних в роботі досліджень відповідає паспорту спеціальності

05.05.03 – двигуни та енергетичні установки відповідно до Постанови Президії ВАК України № 47-08/6 від 14.06.2007 р., зокрема формулі спеціальності, напрямкам дослідження (пп. 2, 5 і 9).

Автореферат ідентичний за змістом з основними положеннями дисертації та досить повно відображає її основні наукові результати.

Повнота розкриття вмісту дисертації в публікаціях

Основні наукові та практичні результати дисертаційного дослідження повною мірою висвітлено в 13 наукових працях здобувача. Зокрема, за темою дисертації опубліковано 8 статей, з яких 6 – у наукових фахових виданнях України категорії Б, а 2 – у закордонних журналах, проіндексованих у наукометричній базі Scopus (включаючи одноосібну публікацію). Доробок здобувача також включає 5 матеріалів і тез доповідей на науково-технічних конференціях.

Кількість, обсяг і рівень наукових публікацій відповідають установленим вимогам до здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук.

Зауваження по роботі

1) Автором запропоновано критерій ефективності, чисельні значення якого використовуються як цільовий функціонал при оптимізації комбінації «склад вимірювань – метод – модель» системи моніторингу. Проте у висновках за розділом 4 дисертаційної роботи він характеризується як якісна оцінка у протиставленні до кількісної, що вимагає пояснення. Зазначений критерій має форму функції корисності із ваговим коефіцієнтом γ при критерії точності, значення якого в роботі прийняте рівним одиниці. Вибір цього значення і можливість розповсюдження висновків роботи стосовно надання переваги рішенням щодо компонентів системи моніторингу на інші значення вагового коефіцієнту в роботі не пояснено.

2) В дисертаційному дослідженні альтернативні склади штатно вимірюваних параметрів були утворені шляхом доповнення їх переліку, присутнього в реально існуючій системі. Принцип, за яким здійснено це доповнення не є достатньо роз'ясненим в роботі, зокрема, відсутність складу з вимірюванням температури робочого тіла на виході з компресора за відсутності вимірювання його тиску.

3) При формуванні регресійних моделей невимірюваних параметрів автором запропоновано і порівнюється ефективність використання рівнянь регресії на основі одного фактору в кожному з них. На прикладі першої пари рівнянь, розглядаються залежності температури на виході з компресора від частоти обертання його ротора (3.1) та ступеня підвищення тиску (3.2). Можливим є рівняння регресії з урахуванням обох факторів, що може знизити вплив на результат похибок вимірювання окремих параметрів і дозволить урахування роботи ГТД при зміщенні лінії робочих режимів. Впровадження

цього в переважній кількості випадків не призведе до збільшення кількості вимірюваних параметрів, оскільки пари факторів всіх приведених регресивних моделей вже входять до розглянутих альтернативних складів вимірюваних параметрів за винятком складу, позначеного «Скорочений 2». Відсутність розгляду багатфакторних рівнянь регресії в роботі потребує пояснення.

4) У дисертації використовуються несистемні одиниці вимірювання несумісні з Міжнародною системою одиниць СІ (зокрема, кгс/мм^2 для напружень при наведенні механічних характеристик матеріалів та кгс/см^2 для тиску у проточній частині ГТД). Відповідно до вимог метрології та стандартизації при виконанні досліджень та оформленні наукових праць, усі фізичні величини мають подаватися в одиницях вимірювання СІ або сумісних з ними.

5) В дисертаційній роботі присутня незначна кількість помилок, які не впливають на отримані результати: при формуванні моделей невимірюваних параметрів на базі термодинамічних співвідношень використано однакові позначення для теплоємностей досконалих газів у виразах, що передбачають дійсну теплоємність (3.12), (3.19), (3.28) тощо та середню теплоємність (3.23), (3.27) тощо; сума кількості циклів навантаження за типовий пілотажний політ протипожежного літака в табл. 2.2 не збігається; перелік умовних позначень є неповним, що з огляду на суттєву кількість використаних в роботі величин ускладнює розуміння.

6) При описі властивостей розроблених алгоритмів і математичних моделей моніторингу виробітку ресурсу автор неодноразово використовує термін іншомовного походження «робастність». З точки зору норм української науково-технічної термінології цей термін у контексті оцінки нечутливості моделі до аномальних значень серед вхідних даних, наявність яких може бути викликана похибками датчиків чи деградацією вузлів двигуна, доцільніше було б замінити на прямий відповідник «відмовостійкість», що використовується в інформаційних науках.

Загальний висновок

В цілому дисертація Марценюка Євгена Вікторовича «Формування складу вимірюваних параметрів газотурбінних двигунів для забезпечення моніторингу виробітку ресурсу дисків» виконана на високому рівні з використанням сучасних методів досліджень і є завершеною науковою роботою, основні положення якої не викликають заперечень. Висловлені зауваження не знижують загальної позитивної оцінки виконаного дослідження. Поставлену в дисертації мету досягнуто повною мірою. За своїм змістом і спрямованістю робота повністю відповідає спеціальності 05.05.03 – двигуни та енергетичні установки.

Дисертаційна робота відповідає вимогам, які висуваються до кандидатських дисертацій, пп. 9, 11, 12 «Порядку присудження наукових степенів», затверджену постановою Кабінету Міністрів України № 567 від

24 липня 2013 р. відповідно до п. 2 постанови Кабінету Міністрів України № 1197 від 17 листопада 2021 р. «Деякі питання присудження (позбавлення) наукових ступенів», а також Наказу Міністерства освіти і науки України № 40 від 12 січня 2017 р. «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації», а її автор – **Марценюк Євген Вікторович** – заслуговує на присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.03 – двигуни та енергетичні установки.

Офіційний опонент,
докторант Національного технічного університету
«Харківський політехнічний інститут»,
кандидат технічних наук, доцент

Вячеслав ПИЛЬОВ

