ВІДГУК

опонента Білогуба Олександра Віталійовича
на дисертаційну роботу Мінчева Дмитра Степановича
«Методи діагностики технічного стану двигунів внутрішнього згоряння з використанням цифрових двійників»,
представлену на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук
за спеціальністю 05.05.03 – двигуни та енергетичні установки

Актуальність теми.

На основі моніторингу параметрів робочих процесів в поршневому двигуні можливо здійснювати оцінку поточного технічного стану, діагностувати та вчасно ліквідовувати можливі несправності. Технології діагностики технічного стану ДВЗ, що є сьогодні, базуються здебільшого на науково-технічних і технологічних рішеннях третьої промислової революції, які мають здебільшого апаратне рішення. Відповідно до базових засад індустрії 4.0 процеси експлуатації ДВЗ в складі енергетичних установок засобів транспорту мають бути максимально автоматизовані, що потребує створення в тому числі нових діагностичних систем. Одним з інструментів побудови такої системи є застосування методів математичного і фізичного моделювання, зокрема шляхом створення цифрових двійників об'єкта діагностування. За допомогою цифрового двійника, спираючись на актуальні експериментальні дані, можливо отримати необхідну інформацію щодо поточного стану двигуна та ефективності його використання, як на усталених, так і на неусталених режимах роботи.

Виходячи з цього задача розробки методів діагностики технічного стану двигунів внутрішнього згоряння з використанням цифрових двійників об'єктів діагностування на основі математичних моделей робочих процесів, їх реалізація у вигляді спеціальних програмних засобів та сервісів, пристосованих до використання протягом експлуатації двигуна, є **актуальною**.

Актуальність теми роботи підтверджується так само й тим, що вона пов'язана з виконанням науково-дослідних робіт Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова №1813 «Розробка науково-технічних основ створення когенераційних установок на основі водневих термохімічних циклів»; «Створення теоретичних та практичних засад поліпшення техніко-

економічних показників ДВЗ та підвищення ефективності їх використання в складі енергетичних установок» (ДР№0121U112073); «Підвищення ефективності експлуатації суднової енергетичної установки» (ДР№0122U001539)

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі.

Теоретичні і практичні результати, що отримані автором під час проведення дослідження базуються на сьогоденних досягненнях в галузі енергетичного машинобудування, зокрема поршневого двигунобудування. Результати роботи не протирічать основним законам термодинаміки, теплотехніки, механіки і досягненням вчених, що працювали і працюють в цьому науковому напрямку. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі Мінчева Д.С. є високою і базується на аналізі науково-технічних джерел за даною проблемою, гармонійній постановці мети і задач дослідження, використанні сучасних методів дослідження, зіставленні з експериментальним даними і критичному аналізі отриманих результатів.

Достовірність результатів досліджень.

Достовірність результатів дисертаційного дослідження забезпечується коректністю постановок математичних задач, застосуванням стандартних процедур математичного аналізу, відповідністю змісту математичних конструкцій фізичній суті описуваних процесів. Методи створення та застосування цифрових двійників використовувались для розв'язання головної задачі дослідження – здійснювати оцінку поточного технічного стану двигуна, діагностувати та вчасно ліквідовувати можливі несправності.

До основних нових наукових результатів дисертації слід віднести наступне:

- уперше запропоновано методи діагностування технічного стану поршневих двигунів внутрішнього згоряння протягом експлуатації з використанням їх цифрових двійників, які базуються на математичному моделюванні робочих процесів, що, на відміну від існуючих, дозволяють збільшити обсяг діагностичної інформації шляхом визначення параметрів, які недоціль-

но або неможливо виміряти та не передбачають внесення змін в конструкцію двигуна і втручання в роботу його систем;

- уперше запропоновано методи моніторингу двигунів з системами газотурбінного наддуву, що, порівняно з існуючими, дозволяють врахувати можливий помпаж турбокомпресора (ТК) та його вплив на роботу двигуна;
- розроблено метод врахування впливу ефекту теплової інерції деталей ДВЗ транспортних засобів на параметри неусталених режимів роботи, який збільшує точність прогнозування часу розгону турбокомпресора на 20…40 % та підвищує точність оцінки часу виходу двигуна на усталений режим.

Значимість отриманих результатів для науки і практичного використання.

Створено методи діагностування технічного стану ДВЗ протягом експлуатації з використанням їх цифрових двійників, які базуються на математичному моделюванні робочих процесів і дають можливість за технічним станом передбачати та враховувати помпажні режими ТК і теплову інерцію. Розроблено потужний програмний он-лайн сервіс Blitz-PRO, який дає можливість створювати цифрові двійники ДВЗ та забезпечує їх використання для об'єктів діагностування. Розроблено рекомендації щодо моніторингу робочих процесів, характеристик, систем паливоподачі і повітропостачання для суднових і автомобільних двигунів.

Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях.

Основні положення та результати дисертаційної роботи достатньо повно опубліковані в 44 працях, в тому числі: 24 наукові статті у фахових журналах України та інших держав, серед яких 6 статей в журналах, що входять до міжнародної наукометричної бази Scopus (Q1 – 1 стаття, Q2 – 3 статті, Q3 – 1 стаття, Q4 – 1 стаття); 17 тез доповідей міжнародних конференцій; 2 патенти України на винахід та 1 авторське свідоцтво. У цілому, рівень і кількість публікацій та апробації матеріалів дисертації на конференціях повністю відповідають вимогам МОН України.

Оцінка змісту дисертаційної роботи

Дисертаційна робота Мінчева Д.С. складається зі вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел, 3 додатків.

У вступі обґрунтовано актуальність проблеми і вибір теми дослідження; поставлено мету, визначено предмет, об'єкт та методи дослідження. Наведено дані про наукову новизну, практичну цінність, особовий внесок здобувача, публікації та апробації щодо дослідження, структуру та об'єм роботи.

У першому розділі проаналізовано перспективи застосування ДВЗ на транспорті. Показано, що на наземному транспорті широке застосування ДВЗ прогнозується щонайменше до 2050 року, а на морському транспорті спеціалістами не прогнозується альтернатив застосуванню двигунів даного типу. Показано, що одним з ефективних засобів підвищення якості експлуатації засобів транспорту з ДВЗ є здійснення моніторингу технічного стану двигуна протягом експлуатації та вчасне діагностування можливих дефектів. Оглянуто та порівняно відомі математичні моделі робочих процесів ДВЗ, встановлено періодизацію їх розвитку та визначено характеристики моделей кожного покоління. Показано, що для розв'язання задач моніторингу та діагностування ДВЗ як функціональної системи засобу транспорту раціональним є використання моделей третього покоління. Складена технологічна карта дослідження, визначені головні та допоміжні задачі, визначені критерії оцінки отриманих результатів.

У другому розділі визначено основи створення математичної моделі робочих процесів ДВЗ для розв'язання задач моніторингу та діагностування. Двигун представляється як відкрита термодинамічна система (ВТС), що складається з низки взаємодіючих систем, які є нуль-вимірні однозонні та двозонні квазістаціонарні моделі для ВТС робочих циліндрів, впускного та випускного колекторів, нестаціонарні одновимірні моделі для ВТС впускних та випускних патрубків і евристичні моделі агрегатів наддуву у вигляді спеціально підготовлених характеристик турбін та компресорів. Представлено алгоритмічні та математичні основи створення цифрового двійника ДВЗ в частині відображення його робочих процесів. Запропоновано математичні моделі, що забезпечують специфічні умови, необхідні для ефективного застосування цифрового двійника для вирішення

задач технічної діагностики для чого: вжито заходи для збільшення швидкості розрахунків; забезпечено можливість розрахунку емісії шкідливих речовин; забезпечено врахування хвильових ефектів та інерції руху потоку газу в елементах газоповітряного тракту; забезпечено врахування нестаціонарних ефектів в компресорі; забезпечені можливості розрахунку випаровувального охолодження наддувного повітря, періодичного відключення процесів згоряння, багатоступінчастих та комбінованих систем наддуву.

У третьому розділі розв'язано задачу забезпечення розрахунку неусталених режимах роботи ДВЗ в складі об'єкту застосування, для чого враховуються наступні чинники: умови зміни навантаження двигуна з боку споживача енергії; умови регулювання роботи двигуна та його систем; механічна інерція рухомих частин двигуна та його систем; теплова інерція в деталях циліндро-поршневої групи та колекторах газоповітряного тракту. Показано принцип моделювання неусталеної роботи двигуна, який полягає в послідовному поцикловому розрахунку робочого процесу в циліндрах з уточненням частоти обертання колінчастого валу та потужності споживача через визначений інтервал часу. Показано особливості моделювання ДВЗ в складі судна (головні та допоміжні ДВЗ), автомобіля та в складі стаціонарної установки.

У червертому розділі наведено методи та результати експериментальних досліджень, виконано верифікацію моделей за результатами експерименту. Наведено детальні описи експериментальних стендів та установок. Особливу цінність, на мою думку, мають роботи стосовно помпажних явищ в агрегатах наддуву. Показано можливість використання налаштованої математичної моделі для коректної інтерпретації результатів експериментальних досліджень в умовах, коли неможливо уникнути зміни теплового стану двигуна, або його навантаження та швидкості під час виконання вимірів. Показано, що застосування математичного моделювання дозволило визначити дійсний ефект від випаровувального охолодження наддувного повітря та відключення циклів і циліндрів на режимах холостого ходу.

У п'ятому розділі показано, як розв'язана задача створення розрахунково-

го онлайн сервісу для побудови та використання цифрових двійників ДВЗ засобів транспорту. Детально наведено процедури діагностування автомобільних та суднових ДВЗ з застосуванням розробленого автором он-лайн сервіса Blitz-PRO. Показано, що метод може бути ефективно використаний для дизельних двигунів з традиційною та акумуляторною системами впорскування, так і для двигунів з іскровим запалюванням карбюраторних, інжекторних, з безпосереднім впорскуванням бензину. Показано можливість використання методики для двигунів з системою вільного газотурбінного наддуву з додатковим налаштування карт характеристик турбокомпресора в рамках цифрового двійника ДВЗ. Для суднових двигунів, для розширення обсягу діагностичних даних, отриманих при планових діагностичних оглядах, запропоновано метод еталонного робочого процесу. Математичне моделювання робочого процесу в цьому випадку може використовуватися для вирішення низки інших задач: оцінки поточного навантаження двигуна, визначення причин нерівномірної роботи циліндрів двигуна, ін.

У шостому розділі показано вплив експлуатаційних факторів на показники роботи транспортних засобів з ДВЗ і приклади застосування пропонованих методів створення цифрових двійників та діагностування до двигунів різного транспорту – тепловозного, дизельних суднових, дизельного вантажного та легкового автомобіля, бензинового автомобільного для поліпшення якості експлуатації. На прикладі тепловозного двигуна показані можливості визначення раціональних температур охолоджувальної рідини, масла та наддувного повітря в залежності від режиму роботи двигуна, що дозволяє визначити необхідність вдосконалення існуючої системи охолодження або перевірки відповідності її роботи раціональному регулюванню. На прикладі головного суднового двигуна при розгоні судна показана можливість визначення впливу умов паливоподачі на основні показники робочого процесу, в тому числі на показники теплового стану деталей двигуна. Показано, що є можливість визначити небезпеку виникнення помпажних явищ в системі наддуву якщо турбокомпресори мають суттєве забруднення проточної частини. Продемонстровано вплив конструктивних параметрів впускного колектору автомобільного бензинового двигуна на його статичні і ди-

намічні характеристики.

Висновки до розділів та за результатами роботи сформульовані достатньо чітко і виразно та відповідають змісту дисертаційної роботи.

Список використаних джерел із 294 найменувань досить повний і охоплює сучасні вітчизняні та зарубіжні публікації.

Зміст автореферату відображає основний зміст дисертації та достатньо повно розкриває внесок здобувача в наукові результати та практичну цінність роботи.

По дисертаційній роботі можна зробити наступні зауваження:

1. У введенні дисертаційної роботи та першому розділі доцільно було б висвітлити роботи стосовно діагностики технічних об'єктів в суміжних галузях, наприклад, дослідженням стосовно моделювання і діагностики авіаційних ГТУ.
2. Відсутність порівняльного згрупованого аналізу можливостей методик і програмного забезпечення автора і відомих – AVL Boost, Ricardo WAVE, GTPower, Siemens AMEsim, Lotus engineering software, Virtual Engine, Дизель-РК, наведених автором в першому розділі.
3. При визначенні часу розрахунків (стор. 38, Рис. 1.17) не зрозуміло, до яких за потужністю комп'ютерів це відноситься.
4. Де-які початкові умови для моделювання не пояснені, наприклад, 10% – об'єм зони продуктів згоряння (стор. 58), як момент, до якого локальний по зоні теплообмін не враховується. Чому не 7%, або 15%?
5. Результати експериментальних досліджень не мають похибок (Рис. 4.9, Табл. 4.3, 4.6, 4.7, розділ 5). Де-які експериментальні дані мають 4 і навіть 5 значущих цифр, що не є коректно. Порівняння даних експерименту і даних отриманих за допомогою цифрових двійників не враховує похибок експериментів, що неодмінно буде впливати на якість діагностування. Ці питання в дисертації не висвітлені.
6. На стор. 186 немає посилання на твердження «…призведе … до зростання

… викидів оксидів азоту за умови ефективного регулювання температури масла на вході в двигун …»

7. Було-б доцільно навести на Рис. 4.22 … 4.25; 4.31 … 4.33 і результати експерименту, а не тільки моделювання.
8. Було-б доцільно навести покроковий приклад налаштування блоків цифрового двійника (наприклад, «теплової інерції») для отримання результатів, близьких до експерименту. Щось на кшталт покрокової технології створення «еталонного двигуна». Підрозділ 5.1 недостатній для розуміння налаштувань щодо «еталонного двигуна».
9. В тексті дисертації формули не пронумеровані, що дуже ускладнює розуміння суті дисертації. В авторефераті все зроблено традиційно.
10. В тексті дисертації є рисунки, посилання на які наведені після рисунків (Рис. 2.9, 2.11, 2.12, 2.26 та ін.)
11. Є орфографічні (стор. 38, 44, 72 та ін.) помилки.

Вказані недоліки і зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку виконаної роботи.

Висновок

Дисертаційна робота Мінчева Дмитра Степановича «Методи діагностики технічного стану двигунів внутрішнього згоряння з використанням цифрових двійників», представлену на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за своїм змістом відповідає п. 2 та п. 9 паспорту спеціальності 05.05.03 – двигуни та енергетичні установки. Дисертація є завершеною роботою в якій вирішено науково-прикладну проблему створення нових ефективних методів діагностики технічного стану двигунів внутрішнього згоряння, що відповідають вимогам четвертої промислової революції. На основі теоретичних та експериментальних досліджень доводиться робоча гіпотеза, згідно з якою застосування цифрових двійників ДВЗ на основі розвиненого математичного моделювання робочих процесів протягом експлуатації дозволяє отримати необхідну інформацію щодо па-

раметрів роботи двигуна без вартісного втручання в його системи. Дисертація «Методи діагностики технічного стану двигунів внутрішнього згоряння з використанням цифрових двійників» Мінчева Д. С. виконана із дотриманням принципів академічної доброчесності. Дисертаційна робота відповідає вимогам п.п. 7, 8, 9 «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021 року № 1197, а здобувач Мінчев Дмитро Степанович, заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.05.03 – двигуни та енергетичні установки.

Опонент

Професор кафедри конструкції авіаційних двигунів Національного аерокосмічного університету
ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» Олександр БІЛОГУБ

29 березня 2023 р.

Підпис Білогуба ЗАВІРЯЮ
Учений секретар ХАІ
Чмихун С.Є.