

ВІДГУК

офіційного опонента Лісовала Анатолія Анатолійовича

на дисертаційну роботу Мінчева Дмитра Степановича

«Методи діагностики технічного стану двигунів внутрішнього згорання з використанням цифрових двійників»,

представлену на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук
за спеціальністю 05.05.03 – двигуни та енергетичні установки

Актуальність теми.

Актуальність вибраної теми не викликає сумнівів, оскільки дослідження спрямовані на вирішення важливої для наземного і морського транспорту науково-прикладної проблеми – поліпшення якості експлуатації засобів транспорту з поршневими двигунами внутрішнього згорання (ДВЗ) застосуванням сучасних цифрових технологій для моніторингу, діагностування, визначення доцільності проведення технічного обслуговування та його обсягів.

Моніторинг поточного технічного стану поршневого ДВЗ у складі сучасного транспортного засобу та його систем і агрегатів має бути дієвим на протязі усього життєвого циклу, бути максимально автоматизованим і простим у користуванні, адаптованим до цифрових систем управління двигуном і вбудованих систем самодіагностики. Цифрові технології постійно удосконалюються і модернізуються, а в Україні ще залишаються транспортні засоби з великими роками експлуатації – це потребує створення нових і одночасно універсальних діагностичних систем. Такі діагностичні системи можуть розроблятися на методах математичного і фізичного моделювання, зокрема шляхом створення віртуальних цифрових двійників ДВЗ. Але створення і використання цифрових двійників вимагає від розробника/оператора наявності певних експериментальних даних, уміння узгоджувати між собою окремі характеристики систем двигуна.

Вищезгадане засвідчує, що розробка методів діагностики технічного стану ДВЗ з використанням цифрових двійників для об'єктів діагностування на основі математичних моделей робочих процесів, їх реалізація у виді спеціальних програм і

сервісів є актуальною. Актуальність теми підтверджується тим, що вона пов'язана з виконанням фундаментальної науково-дослідної держбюджетної роботи №1813 «Розробка науково-технічних основ створення когенераційних установок на основі водневих термохімічних циклів» та двох науково-дослідних тем «Створення теоретичних та практичних засад поліпшення техніко-економічних показників ДВЗ та підвищення ефективності їх використання в складі енергетичних установок», «Підвищення ефективності експлуатації суднової енергетичної установки», які виконувались у Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова.

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

Теоретичні і практичні результати дослідження, які отримані здобувачем базуються на сучасних досягненнях двигунобудування. Результати роботи базуються на фундаментальних положеннях термодинаміки, теорій двигуна та газової динаміки, сучасних математичних методах досліджень і не протирічать результатам досліджень інших вчених, які працюють за цією ж проблематикою. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих здобувачем базується на аналізі науково-технічних джерел за даною проблемою, коректній постановці мети і відповідно задач дослідження, використанні сучасних методів дослідження.

Достовірність результатів досліджень.

Достовірність результатів дисертаційного дослідження забезпечується коректністю постановок математичних задач, відповідністю їх фізичній суті описуваних процесів, застосуванням стандартних процедур математичного аналізу, методу числового інтегрування диференціальних рівнянь, верифікацією математичної моделі при зіставленні розрахункових досліджень з експериментальними даними. Методи створення та застосування цифрових двійників використовувались здобувачем для вирішення головної задачі дослідження – діагностика та оцінка поточного технічного стану двигуна, усунення можливої несправності.

До основних нових наукових результатів дисертації слід віднести наступне:

- уперше запропоновано метод діагностування технічного стану поршневих двигунів внутрішнього згорання протягом експлуатації з використанням методики цифрових двійників, який базується на математичному моделюванні робочих процесів та не передбачає внесення змін в конструкцію двигуна і втручання в роботу його систем;

- уперше запропоновано метод моніторингу двигунів з системами газотурбінного наддуву, який враховує можливий помпаж турбокомпресора;

- розроблено метод прогнозування часу розгону турбокомпресора, який враховує теплову інерцію деталей ДВЗ транспортних засобів та збільшує точність розрахунку перехідного процесу не менше ніж на 20 %.

Значимість отриманих результатів для науки і практичного використання.

Створено методи діагностування технічного стану ДВЗ та його основних систем протягом експлуатації з використанням їх цифрових двійників, які базуються на математичному моделюванні робочих процесів і дають можливість передбачати та враховувати помпажні режими турбокомпресора та теплову інерцію деталей ДВЗ. Розроблено 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.

Результати дослідження можуть бути використані в навчальному процесі для підготовки студентів спеціальностей: енергетичне машинобудування, морський та річковий транспорт, автомобільний транспорт.

Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях.

Основні положення та результати дисертаційної роботи 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; 17 тез доповідей міжнародних конференцій; 2 патенти України – на

винахід і на корисну модель; 1 авторське свідоцтво. У цілому кількість наукових публікацій та апробаційних матеріалів дисертації на конференціях відповідають вимогам МОН України.

Оцінка змісту дисертаційної роботи:

Дисертація Мінчева Д.С. складається із вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел, 3 додатків. Загальна кількість сторінок – 385.

У вступі обґрунтовано актуальність проблеми і вибір теми дисертаційної роботи, сформульовано гіпотезу, мету і поставлено головні задачі дослідження, визначено об'єкт, предмет та методи дослідження. Сформульовано наукову новизну та практичну цінність результатів дослідження.

У першому розділі проаналізовано перспективи подальшого застосування і напрями удосконалення поршневих ДВЗ на транспорті. На думку здобувача, на наземному транспорті широке застосування ДВЗ прогнозується до 2050 р., на морському транспорті – альтернатив застосуванню двигунів даного типу немає. Обґрунтовано, що ефективним засобом поліпшення якості експлуатації засобів транспорту з поршневими ДВЗ є здійснення моніторингу технічного стану двигуна протягом його життєвого циклу та вчасного діагностування його систем. Для розв'язання задач моніторингу та діагностування ДВЗ для конкретного засобу транспорту здобувач запропонував використання математичних моделей робочих процесів різних поколінь. Проаналізовано особливості відомих математичних моделей робочих процесів ДВЗ, обґрунтовано використання конкретних моделей процесу згорання для дизелів, двигунів з примусовим запалюванням і газодизелів. За методикою професора Кринецького І.І. здобувачем розроблено структурно-логічну схему дослідження, визначені головні та допоміжні задачі.

Другий розділ присвячено загальній методології дослідження. Основну увагу здобувач зосередив на теоретичних дослідженнях, а саме – на створенні математичної моделі робочих процесів ДВЗ для розв'язання задач моніторингу та діагностування. Двигун у цілому математично описано як відкриту термодинамічну систему, яка включає різні моделі – системи диференціальних рівнянь: робочих циліндрів відповідно до способу запалювання; впускного та випускного колекторів

відповідно до роботи газів за усталеного руху або за перехідних процесів; евристичні моделі агрегатів наддуву, як результат обробки характеристик турбін та компресорів.

Розроблено математичні основи створення цифрового двійника ДВЗ для відображення його робочих процесів. Для ефективного застосування цифрового двійника в процесах технічної діагностики запропоновано заходи для збільшення швидкості розрахунків, враховано хвильові та інерційні процеси при русі потоку газу в елементах газоповітряного тракту і компресорі, забезпечено можливість розрахунку викидів шкідливих речовин з відпрацьованими газами. Здобувач розробив і описав методику моделювання багатоступінчастих та комбінованих систем наддуву, ефекту охолодження повітря при впорскуванні води до компресорної частини агрегату наддуву, періодичного відключення процесів згорання в багатоциліндрових двигунах.

Третій розділ присвячено моделюванню неусталеної роботи циліндра двигуна та агрегатів наддуву під час перехідних процесів, які спричинені зміною зовнішнього навантаження або в результаті дії зовнішнього управління на роботу двигуна та його системи.

Представлені диференціальні рівняння, які описують динаміку окремих складових складної технічної системи двигун-споживач енергії для різних видів транспортних засобів і відповідно різних експлуатаційних режимів. Слід зазначити, що крім механічної інерції рухомих частин двигуна та його систем, здобувачем запропоновано врахування теплової інерції в деталях циліндро-поршневої групи та колекторах газоповітряного тракту. Наведено особливості моделювання ДВЗ у складі судна, автомобіля та стаціонарної енергетичної установки.

У четвертому розділі за результатами експериментальних досліджень виконано верифікацію математичних моделей складових двигуна, які виокремлені у самостійні моделі і створюють відкриту термодинамічну систему двигуна. Наведено результати експериментальних досліджень автомобільних і суднових двигунів та агрегатів наддуву за усталених режимів і перехідних процесів, описанні експериментальні стенди, прилади та устаткування.

Здобувачем з метою підтвердження ефективності різних методів поліпшення експлуатаційних параметрів ДВЗ здійснені розрахунково-експериментальні дослідження з визначення: впливу температури наддувного повітря на параметри роботи дизелів за часткових режимів навантаження, доцільності періодичного відключення циклів дизеля в режимах холостого ходу за малих навантажень, доцільності та величини ефекту від застосування комбінованого (з впорскуванням води в компресорну частину агрегата наддуву) охолодження наддувного повітря.

Багато уваги здобувач приділив дослідженням помпажних явищ в агрегатах наддуву, обґрунтуванню необхідності урахування теплової інерції на перехідних режимах роботи дизеля з наддувом.

У п'ятому розділі реалізовано концепцію створення розрахункового он-лайн сервісу для використання методики цифрових двійників ДВЗ транспортних засобів. Здобувачем розроблено і апробовано он-лайн сервіс Blitz-PRO, наведено процедури діагностування автомобільних та суднових ДВЗ за допомогою цифрових двійників у складі цього сервісу.

Підтверджено, що метод цифрових двійників ДВЗ може бути використаний як для дизелів з традиційною і акумуляторною системами паливоподачі, так і для бензинових двигунів з іскровим запалюванням і різними системами живлення. Описано і проілюстровано налаштування характеристик компресора і турбіни турбокомпресора для двигунів з системою вільного газотурбінного наддуву.

Для суднових двигунів здобувачем запропоновано використання методу еталонного робочого процесу, що забезпечує при діагностиці ДВЗ оцінку поточного навантаження двигуна, визначення причин нерівномірної роботи окремих циліндрів двигуна та інше.

У шостому розділі описано результати дослідження впливу експлуатаційних факторів на показники роботи ДВЗ транспортних засобів, наведено приклади застосування методик створення цифрових двійників для тепловозних, суднових і автомобільних дизелів та бензинового автомобільного двигуна для робіт діагностування і відповідно для поліпшення якості експлуатації.

На прикладі дослідження тепловозного дизеля показані можливості

визначення раціональних температур охолоджувальної рідини, оливи та наддувного повітря в залежності від режиму роботи двигуна, і відповідно можливості діагностування та подальшого удосконалення систем двигуна. Дослідження головного суднового дизеля при розгоні судна підтвердили вплив закону впорскування палива на основні показники робочого процесу і на тепловий стан основних деталей двигуна.

Здобувачем змодельована можливість виникнення помпажних явищ в системі наддуву через забруднення проточної частини турбокомпресора і відповідно підтверджена можливість діагностування такої ситуації за допомогою метода цифрових двійників ДВЗ. Також досліджувався вплив довжини впускного колектору автомобільного бензинового двигуна на його статичні і динамічні характеристики, що підтверджує можливість застосування метода цифрових двійників у процесах проектування систем двигуна.

Висновки до розділів та загальні висновки відповідають тексту дисертаційного дослідження.

Список використаних джерел містить 294 найменувань, включає сучасні вітчизняні та зарубіжні наукові публікації.

Автореферат досить повно відображає зміст та основні результати виконаного дослідження.

По дисертаційній роботі можна зробити наступні зауваження:

1. Застосування терміну динамічна зовнішня швидкісна характеристика не коректне. Для колісних транспортних засобів діє чіткий регламент щодо методики і умов визначення зовнішніх швидкісних характеристик. В дисертаційних дослідженнях визначались динамічні експлуатаційні характеристики транспортних засобів.

2. Замість термінів диференційні рівняння, чисельні методи інтегрування та відхідні гази слід використовувати – диференціальні рівняння, числові методи та відпрацьовані гази.

3. У пункті зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами крім номера держреєстрації (ДР) теми, слід вказувати роки її виконання та інвентарні

номери заключного або проміжного звітів де здобувач був виконавцем.

4. Метод числового інтегрування системи диференціальних рівнянь із змінним кроком має назву авторів Рунге-Кутта-Фельдберга (розділ 2) і відповідно програмні продукти починаються з літер RKF.

5. В тексті дисертації відсутня нумерація формул і систем рівнянь.

6. В розділі 3 дуже детально описано математичне моделювання (рівняння) робочих процесів ДВЗ, а моделювання зовнішнього навантаження для транспортних засобів різного типу та енергетичних установок дуже спрощене. Далі в дослідженнях перехідних процесів відсутні графіки зміни зовнішнього навантаження.

7. В розділі 4 зустрічаються рисунки (рис. 4.6, 4.14, 4.18 та інші), де пояснення до позицій розміщено до назви рисунку.

8. Потребують пояснення значення коефіцієнту надлишку повітря в табл. 4.5 (стор.192) при моделюванні пропуску циклів. Чи були конструктивні зміни в системі газообміну двигуна?

9. В розділі 5 представлені результати дослідження розгонів і вибігу легкових і комерційних автомобілів без витримки у часі на початку перехідного процесу і в кінці. Початок перехідного процесу за неусталеного режиму одного із елементів моделі ДВЗ може спричиняти подальшу штучну неусталеність режимів роботи двигуна в цілому.

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” є самостійною завершеною науковою працею, яка базується на фундаментальних положеннях термодинаміки, теорій двигуна та газової динаміки, сучасних математичних методах досліджень, в якій отримано нові обґрунтовані результати, що у сукупності вирішують актуальну науково-прикладну проблему – поліпшення якості експлуатації засобів транспорту з поршневими ДВЗ

застосуванням сучасних цифрових технологій для моніторингу, діагностування, визначення доцільності проведення технічного обслуговування та його обсягів.

Розроблені концепції, методи, моделі та рекомендації до їх застосування є методологічною базою для вирішення нагальних практичних задач технічної діагностики ДВЗ для транспортних засобів різних типів. Результати роботи можуть бути використані в навчальному процесі для підготовки студентів спеціальностей: енергетичне машинобудування, морський та річковий транспорт, автомобільний транспорт.

За своїм змістом дисертація відповідає п.п. 2 і 9 паспорту спеціальності 05.05.03 – двигуни та енергетичні установки, оформлена із дотриманням принципів академічної доброчесності, 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 її автор, Мінчев Дмитро Степанович, заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.05.03 – двигуни та енергетичні установки.

Офіційний опонент

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри двигунів і теплотехніки
Національного транспортного університету

Анатолій ЛІСОВАЛ

30.03.2023