

Філія
Класичного
приватного
університету
у місті Кременчук



Branch of
Classic
Private
University
in Kremenchuk

ЄДРПОУ 40124867

Вул. Героїв Небесної сотні, буд. 24/37, офіс 1214, місто Кременчук, Полтавська обл., 39600
Телефон: +38 (050)718-86-25, E-mail: kremuniver@gmail.com

№ _____ « ____ » _____ 2022р.

ВІДГУК

опонента Строкова Олександра Петровича

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.

Широке застосування двигунів внутрішнього згорання на різних типах засобів транспорту та в складі стаціонарних енергетичних установок впливає на явища планетарного масштабу, такі як: клімат планети, рівень забруднення атмосфери токсичними речовинами, ефективність використання видобувних ресурсів для забезпечення енергетичних потреб людства, тощо. Як наслідок, заходи, які дозволяють підвищити ефективність експлуатації ДВЗ, що є істотною часткою їх життєвого циклу, є важливими з огляду на потенційні економічні та екологічні ефекти, відчутні як в межах окремої країни, так і більш глобально в межах об'єднань країн.

Попри те, що ДВЗ на теперішній час є домінуючим типом силової установки на морському, річковому та автомобільному транспорті, останніми роками вони відчують істотну конкуренцію збоку альтернативних рішень. Зокрема щорічно зростають об'єми випуску електричних автомобілів з акумуляторними батареями, з'являються проєкти електричних суден. Істотного прогресу досягнуто у розвитку силових установок з електрохімічними генераторами електрики з використанням водню в якості палива. Однією з важливих особливостей альтернативних силових установок є їх краща адаптація до вимог четвертої промислової революції (індустрія 4.0), яку наразі переживають найбільш технологічно розвинені країни світу. Індустрія 4.0 характеризується низкою важливих технологій, до яких необхідно віднести в першу чергу використання штучного інтелекту, автоматизацію та автономізацію засобів транспорту, впровадження методів цифрових двійників, накопичення та аналізу великих обсягів даних, розвинених методів моніторингу та діагностики. Певною мірою можна стверджувати, що подальше використання двигунів внутрішнього згоряння на транспорті залежить від відповіді на екологічні виклики та від пристосування ДВЗ до вимог індустрії 4.0.

Одним зі шляхів підвищення ефективності експлуатації двигунів внутрішнього згоряння в складі енергетичних установок є впровадження засобів моніторингу та діагностики їх технічного стану. Слід зазначити, що існуючі засоби, як правило, створені на основі технологій третьої промислової революції і не повною мірою відповідають вимогам індустрії 4.0, є недостатньо ефективними і гнучкими в застосуванні.

Таким чином, можна стверджувати, що існує важлива науково-технічна проблема, яка полягає в недостатній ефективності існуючих методів діагностики технічного стану двигунів внутрішнього згоряння в рамках четвертої промислової революції. Задача створення нових методів діагностики з використанням ключових технологій індустрії 4.0, таких як телекомунікаційні технології, цифрові двійники, накопичення та аналіз даних, яка вирішена в роботі здобувача, є, безсумнівно, актуальною.

Актуальність роботи підтверджується її відповідністю до тематики науково-дослідних держбюджетних робіт, а саме: відповідно до фундаментальної науково-дослідної держбюджетної роботи Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова №1813 «Розробка науково-технічних основ створення когенераційних установок на основі водневих термохімічних циклів», де здобувач

як виконавець займався створенням дослідного стенду на базі двигуна типу 8ЧН 12/12 в лабораторії кафедри ДВЗ НУК; науково-дослідної теми «Створення теоретичних та практичних засад поліпшення техніко-економічних показників ДВЗ та підвищення ефективності їх використання в складі енергетичних установок» (Державний реєстраційний номер: 0121U112073), в рамках якої здобувач керував створенням та удосконаленням розрахункового онлайн сервісу Blitz-PRO; та науково-дослідної теми «Підвищення ефективності експлуатації суднової енергетичної установки» (Державний реєстраційний номер: 0122U001539), в рамках якої здійснював розробку методів діагностування технічного стану суднових ДВЗ з використанням математичного моделювання робочих процесів. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій сформульовано в дисертаційній роботі.

Обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі Мінчева Д. С., забезпечується аналізом науково-технічних джерел за даною проблемою, коректною постановкою мети і задач дослідження, використанням сучасних методів дослідження, зіставленням і критичним аналізом отриманих результатів у порівнянні з результатами інших дослідників і якісним формулюванням отриманих висновків. Робота виконана з застосуванням та відповідно до фундаментальної теорії теплових двигунів, лопаткових та поршневих машин, теплообмінних апаратів і гідравлічних систем, системного аналізу та синтезу складних технічних систем. Застосовано математичні методи чисельного інтегрування систем лінійних та нелінійних диференціальних рівнянь, екстраполяції та інтерполяції експериментальних даних та характеристик агрегатів наддуву ДВЗ, методи експериментальних досліджень усталених та неусталених режимів роботи ДВЗ, а також окремих агрегатів двигунів в складі експериментальних стендів та в складі засобів транспорту. Методи створення та застосування цифрових двійників використовувались для розв'язання головної задачі дослідження.

Достовірність результатів досліджень.

Достовірність результатів дисертаційного дослідження забезпечується великим обсягом експериментальних досліджень, які виконувались для перевірки адекватності розроблених математичних моделей. Розроблені програмні сервіси пройшли практичну апробацію широким колом спеціалістів, що дозволило усунути наявні неточності та врахувати зауваження безпосередніх користувачів.

Запропоновані методи діагностики успішно впроваджені при експлуатації морських та річкових суден, а також автомобільного транспорту.

До основних нових наукових результатів дисертації слід віднести наступне:

– вперше запропоновано методи діагностування технічного стану 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 недоцільно або неможливо виміряти, та не передбачають внесення змін в конструкцію двигуна і втручання в роботу його систем;

– вперше запропоновано методи моніторингу двигунів з системами газотурбінного наддуву, що, порівняно з існуючими, дозволяють врахувати можливий помпаж турбокомпресора та його вплив на роботу двигуна;

– вперше 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.

– отримало подальший розвиток моделювання робочих процесів ДВЗ, які завдяки застосуванню адаптивної розрахункової сітки з варіативним кроком та неявних чисельних методів інтегрування диференціальних рівнянь забезпечують, порівняно з існуючими методами, високу збіжність, швидкість та гнучке налаштування розрахунків;

– отримало подальший розвиток використання характеристик агрегатів наддуву при моніторингу робочого процесу ДВЗ, які, на відміну від існуючих, дозволяють розраховувати ефекти внутрішнього випаровувального охолодження повітря в компресорі;

– отримало подальший розвиток дослідження впливу параметрів регулювання та експлуатаційних факторів на роботу двигуна, які доповнені процедурами ідентифікації експериментальних даних з використанням математичного моделювання.

– вдосконалено методи моніторингу параметрів робочих процесів ДВЗ на неусталених режимах застосуванням карт регулювання двигуна та завдяки моделюванню динаміки органів регулювання агрегатів наддуву;

– вдосконалено методи врахування нестационарних процесів в газоповітряному тракті ДВЗ для задач діагностування технічного стану двигуна.

Значимість отриманих результатів для науки і практичного використання.

Здобувачем вперше запропоновані методи діагностування технічного стану двигунів внутрішнього згорання, які адаптовані до вимог індустрії 4.0, а саме – показане застосування цифрових двійників для дослідження як усталених, так і неусталених режимів роботи ДВЗ та оцінки їх технічного стану при роботі на даних режимах. З наукової точки зору, результати дисертаційного дослідження відкривають широкі можливості щодо розповсюдження запропонованих методів на проблеми збільшення ресурсу двигунів, створення цифрових двійників адаптованих для дослідження процесів тертя в циліндро-поршневій групі та підшипниках двигуна, а також цифрових двійників основних систем, що забезпечують його роботу. Щодо практичних результатів роботи, можна виділити наступні:

- для вирішення задач моніторингу та діагностування технічного стану ДВЗ засобів транспорту в умовах експлуатації створений програмний сервіс Blitz-PRO, який забезпечує використання цифрових двійників ДВЗ як об'єктів діагностування, є доступним онлайн через мережу інтернет і дозволяє накопичувати статистичні дані щодо робочого процесу двигуна протягом експлуатації;

- розроблені рекомендації щодо здійснення моніторингу робочих процесів двигунів з іскровим запалюванням, запалюванням від стиснення та двопаливних двигунів з використанням розробленого програмного сервісу;

- для малооборотних головних суднових двигунів розроблені рекомендації щодо застосування запропонованих методів для встановлення причини розбіжностей робочих процесів по циліндрах двигуна, визначити вплив невірної регулювання параметрів системи газорозподілу та паливоподачі на показники роботи двигуна та надмірне навантаження окремих циліндрів;

- для автомобільних двигунів застосування запропонованих засобів для аналізу динамічних зовнішніх швидкісних характеристик двигунів, отриманих при випробуванні автомобілів, забезпечує діагностування можливих несправностей двигуна;

- встановлені особливості роботи відцентрового компресора на режимах обертового зриву, при помірному та глибокому помпажі, визначені відповідні експериментальні характеристики компресора з урахуванням зон неусталеної

роботи, на основі яких вдосконалене застосування карт характеристик агрегатів наддуву;

- розроблені рекомендації щодо застосування системи періодичного відключення паливоподачі, доцільності підігріву наддувного повітря на часткових режимах та режимах холостого ходу, використання випаровувального охолодження наддувного повітря в дизельних двигунах.

Результати дисертаційної роботи впроваджені в навчальному процесі кафедри двигунів внутрішнього згоряння, установок та технічної експлуатації НУК (м. Миколаїв), кафедри суднових енергетичних установок і експлуатації ОНМУ (м. Одеса), інституті міжнародного співробітництва ZIMC (м. Чжоушань, Китай), компаніях DSChart ltd. (Польща) та Zheng Bang Huan Hai (Китай).

Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях.

Основні положення та результати дисертаційної роботи достатньо повно опубліковані в 44 наукових 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.

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

У вступі обґрунтовано актуальність дисертаційного дослідження, визначені його мета та задачі, сформульовані предмет та об'єкт дослідження, наукова новизна та практична цінність роботи, наведені відомості щодо апробації результатів роботи, праць здобувача, в яких відображені основні результати дисертації.

У **першому розділі** проаналізовані сучасний стан, перспективи та виклики, пов'язані з застосуванням двигунів внутрішнього згоряння на засобах транспорту. Показано, що, незважаючи на суттєвий прогрес, досягнутий останнім часом, альтернативні енергетичні установки, насамперед акумуляторні та на основі електрохімічних генераторів, мають суттєві недоліки і їх широке застосування вимагає подолання значних труднощів. Отже, щонайменше до 2050 року двигуни внутрішнього згоряння збережуть домінуюче положення як головна енергетична установка морських суден, значна частка автомобільного транспорту і спеціальних машин все ще будуть обладнані двигунами внутрішнього згоряння.

Водночас для ефективного застосування ДВЗ в майбутньому вони мають бути

адаптовані до вимог четвертої промислової революції, насамперед з точки зору автоматизації та автономізації процесу їх експлуатації. Одним з важливих аспектів є застосування методів моніторингу та технічної діагностики, які мають бути в найкращому випадку автоматизовані з залученням можливостей штучного інтелекту. Одним з ефективних інструментів для розробки методів діагностики, які відповідатимуть вимогам індустрії 4.0, є використання цифрових двійників об'єктів діагностування, які коректно відображають певну частину їх функціональних особливостей. Зокрема цифровий двійник, який спеціалізовано для відображення робочих процесів ДВЗ, може бути ефективним засобом для діагностування технічного стану двигуна, насамперед таких важливих параметрів, як робота паливної апаратури, системи наддуву, особливостей процесів згоряння тощо.

В роботі показані етапи розвитку математичних моделей робочого процесу ДВЗ та визначений найбільш перспективний тип таких моделей для застосування в якості основи для створення цифрового двійника. Обґрунтовано, що з огляду на необхідність забезпечення високої швидкості та стабільності розрахунків, застосування цифрових двійників безпосередньо під час експлуатації, адаптація програмних сервісів до онлайн технологій, найкращім вибором є моделі третього покоління, які забезпечують синтез робочого процесу в квазістаціонарній та одновимірній постановках.

Також в першому розділі розроблена технологічна карта дисертаційного дослідження, визначені його мета і задачі.

У **другому розділі** сформовані вимоги до математичної моделі, яка використовується як основа для створення цифрових двійників ДВЗ в частині відображення робочих процесів. Наведена енергетична схема двигуна, як загальної термодинамічної системи, що складається з низки термодинамічних систем, що обмінюються між собою робочим тілом, та енергією у вигляді теплоти та роботи. Показані математичні основи синтезу робочого процесу в термодинамічних системах різного типу: робочий циліндр двигуна, впускні та випускні патрубки, агрегати наддуву. Серед особливостей запропонованих методів слід відзначити застосування рівняння Бертло для врахування властивостей реальних газів, використання двозонних моделей для синтезу робочого процесу під час процесів згоряння та газообміну, застосування ефективних чисельних методів для вирішення систем рівнянь, які описують зміну параметрів робочого тіла в відкритих термодинамічних системах.

Розрахунок тепловиділення в дизельних двигунах виконується за методикою Разлейцева, в якій автором уточнено розрахунок швидкості випаровування пального на основі точного інтегрування рівняння Срезневського. Підтримується розрахунок тепловиділення в двопаливному двигуні шляхом поєднання моделі Вібе для розрахунку згоряння основного (газоподібного) палива та моделі Разлейцева для розрахунку згоряння запалювальної дози палива.

Для розрахунку емісії шкідливих речовин при згорянні використовується методика професора Звонова, згідно з якою здійснюється визначення складу робочого тіла в зоні продуктів згоряння на основі 18-компонентного уявлення.

Автором запропоновані ефективні методи врахування зміни параметрів лопаткових машин агрегатів наддуву на основі використання карт характеристик. Характеристики агрегатів наддуву створюються на основі експериментальних характеристик, які представляються заводом виробником, та екстраполюються на весь діапазон можливих режимів роботи компресора або турбіни з використанням спеціально розроблених методів. Важливим є те, що запропоновані автором методи використання характеристик агрегатів наддуву дозволяють в тому числі враховувати нестационарні режими роботи відцентрових компресорів при виникненні обертового зриву, глибокого та помірного помпажу, що є відсутнім у відомих моделях-аналогах.

Третій розділ присвячено розробці математичних основ розрахунку неусталених режимів роботи ДВЗ в складі об'єкту застосування, що має забезпечити специфічні діагностичні методи, які пов'язані з аналізом параметрів перехідних процесів в двигунах. Серед важливих особливостей слід відзначити запропоновані автором методи врахування явища теплової інерції в деталях двигуна при перехідних процесах, яке має істотний вплив. Також заслуговує на увагу запропонований метод застосування карт керувань двигуном, які, зокрема, дозволяють моделювати виникнення різних несправностей при роботі двигуна. Наведені розрахункові схеми та системи рівнянь, які описують динаміку двигуна в складі суднової енергетичної установки та в складі автомобіля.

В **четвертому розділі** наводяться результати перевірки адекватності запропонованих математичних моделей шляхом здійснення численних експериментальних досліджень та аналізу їх результатів. Експериментальні дослідження виконувалися здебільшого в лабораторії кафедри двигунів внутрішнього згоряння, установок та технічної експлуатації Національного

університету кораблебудування імені адмірала Макарова на дослідних стендах, які базуються на дизельних двигунах типу 8ЧН12/12 (базовий двигун КамАЗ-740) та 6ЧН13/14 (модифікація судового двигуна К-166), а також на базі ступеня відцентрового компресора авіаційного двигуна Walter-322. Експериментальна перевірка адекватності математичної моделі довела можливість її застосування для коректного передбачення параметрів робочих процесів двигуна в широкому діапазоні робочих режимів без необхідності переналаштування кожному з режимів роботи. Середньоквадратична похибка визначення інтегральних параметрів робочих процесів при моделюванні 24 режимів роботи двигуна становила від ≈ 1 до 7 % при незмінному налаштуванні моделі. Значною мірою такий результат став можливим завдяки застосуванню характеристик турбокомпресора, які були додатково ідентифіковані на основі експериментальних даних.

Дослідження роботи ступеня відцентрового компресора авіаційного двигуна Walter-322 дозволили перевірити адекватність запропонованих методів екстраполяції характеристик компресора на весь діапазон можливих режимів роботи. Найбільш вагомими результатами були отримані при експериментальному дослідженні неусталеної роботи відцентрового компресора в умовах обертового зриву, помірною та глибокою помпажу. При порівнянні дійсних діаграм зміни параметрів роботи компресора у вказаних режимах з розрахунковими було доведено правомірність застосування запропонованих математичних методів, які можуть успішно застосовуватись для адекватного передбачення умов роботи компресора при помпажі.

В результаті виконання низки експериментальних досліджень запропоновано та перевірено *метод ідентифікації експериментальних даних*, як один з методів діагностики технічного стану двигуна з використанням цифрових двійників. Досліджувалися наступні питання: щодо впливу підігріву наддувного повітря на режимах холостого ходу та низьких навантажень дизельних двигунів; щодо доцільності відключення циліндрів та циклів на низьких навантаженнях дизельних двигунів; щодо ефективності випарувального охолодження наддувного повітря при високих навантаженнях дизельних двигунів. Показано, що запропонований метод дозволяє вірно інтерпретувати експериментальні дані, вирівняти умови порівняння та суттєво зменшити вплив похибок вимірювань.

Дослідження неусталених режимів роботи дизельних двигунів підтвердило адекватність та необхідність застосування розроблених методів врахування явища

теплової інерції. Крім того, продемонстровано спроможність передбачати виникнення помпажу компресора при різкому скиданні навантаження двигуна за допомогою запропонованих методів.

В п'ятому розділі наводяться вимоги та технологічна схема програмного сервісу Blitz-PRO, який забезпечує створення та використання цифрових двійників двигунів внутрішнього згоряння. Реалізований програмний сервіс працює онлайн, не вимагає установки програмного дистрибутиву на пристрій користувача, поєднує високу швидкість розрахунку, достатню для задач діагностики точність, можливість накопичення та аналізу статистичних даних щодо роботи двигуна.

З використанням розробленого сервісу запропоновані методи діагностики технічного стану автомобільних та суднових ДВЗ – *метод аналізу динамічних швидкісних характеристик* та *метод порівняння з еталонним робочим процесом* відповідно. Наведені докладні теоретичні основи вказаних методів та приклади їх застосування. Показано, що метод аналізу динамічних швидкісних характеристик є ефективним засобом визначення технічного стану автомобільних двигунів і, зокрема, дозволяє визначити несправності, які можуть спричиняти відхилення експериментальних динамічних характеристик від очікуваних.

Застосування цифрового двійника для задач діагностування можливих несправностей суднових двигунів дозволяє істотно розширити та поглибити можливості існуючих діагностичних систем, визначати причини відхилення параметрів робочих процесів, отриманих експериментально, від еталонних. Також важливим результатом є створення бібліотеки дефектів і їх впливу на параметри робочих процесів двигуна, що значно пришвидшує експрес-оцінку поточного технічного стану двигуна та потенційно дозволить швидко навчати системи штучного інтелекту роботі з цифровими двійниками ДВЗ.

У шостому розділі наведені результати досліджень щодо аналізу поточного стану двигунів засобів транспорту та визначення ефективності методів підвищення якості їх експлуатації з використанням цифрових двійників.

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

Дисертація написана грамотною українською мовою з дотриманням чинних вимог оформлення кваліфікаційних наукових робіт.

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

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. В дисертації було б доцільно більш конкретно вказати на відмінності між математичною моделлю та цифровим двійником. Незважаючи на те, що термін «цифровий двійник» на теперішній час є загальноновживаним, все ж таки окреслення необхідних та достатніх ознак цього визначення є доречним.

2. З методичної точки зору дещо незручним є підхід автора, при якому в деяких розділах дисертації спостерігається суміщення одночасно теоретичного, оглядового та експериментального матеріалу. Зокрема це стосується четвертого розділу, де при дослідженні впливу температури наддувного повітря та періодичного відключення паливоподачі на показники часткових режимів роботи дизельного двигуна наводяться, окрім експериментальних даних, і результати математичного моделювання, а також відомості з літературних джерел. Також в шостому розділі при пошуку раціонального регулювання температур системи охолодження тепловозного двигуна автор наводить короткий огляд літературних джерел.

3. У висновках до дисертації як один з результатів роботи можна було б вказати рекомендації щодо налаштування математичної моделі двигунів різного типу, наприклад, умов розрахунку теплообміну в циліндрі, характеристик тепловиділення, параметрів агрегатів наддуву, адже вони мають значне практичне та наукове значення.

4. Щодо вибору раціонального типу математичної моделі для запропонованого автором онлайн-сервісу, який забезпечує створення та використання цифрових двійників двигунів внутрішнього згорання, було б доцільно відзначити, які з визначених автором вимог та ознак зумовлені поточними обмеженнями щодо обчислюваних можливостей, а які, з іншого боку, визначені для забезпечення відносної простоти і зручності користування ним на практиці.

5. Автор запропонував уточнення розрахунку випаровування палива в рамках методу Разлейцева, що є цілком доречним кроком. Але при цьому автор використовує першу версію методу Разлейцева, яка ґрунтується на підході «еквівалентного факела», тобто приймається, що процеси випаровування, сумішоутворення та вигорання кожного факелу однакові. Однак відомо, що в

подальшому Разлейцевим було запропоноване вдосконалення даного методу і, судячи з літератури, на яку зроблені посилання, це відомо і автору роботи. На наш погляд, обґрунтування вибору спрощеного варіанту методу Разлейцева було б доцільним в даній роботі.

6. Щодо розрахунку роботи двигуна на неусталених режимах в складі об'єкту застосування, не досить зрозуміло, які можливості має запропонований розрахунковий сервіс та математична модель, яка в нього входить, з точки зору адаптації під конкретний транспортний засіб. Адже, наприклад, автомобілі можуть мати різний тип трансмісії, а в якості гребного гвинта на судні може використовуватись гвинт регульованого кроку. Виглядає так, що без забезпечення можливості користувачу створювати уточнену модель динаміки транспортного засобу, використання сервісу може бути дещо обмеженим.

7. Здобувач значну увагу приділяє питанням врахування помпажу турбокомпресора, проте не зовсім зрозуміло, які задачі діагностики технічного стану двигуна це допомагає вирішувати. Робота двигуна при помпажі турбокомпресора є недопустимою, отже використання цифрового двійника для діагностування цього явища видається дещо недоцільним.

8. Концепція он-лайн сервісу для створення цифрових двійників ДВЗ є, поза сумнівом, досить привабливою, проте очевидним чином передбачає наявність доступу до мережі інтернет, що не завжди можливо в експлуатаційних умовах. Видається доцільним обґрунтування доцільності створення оффлайн версії, можливо у вигляді відкритого коду, який можна інтегрувати в більш складні автоматизовані системи діагностики технічного стану двигуна.

9. Автор не наводить необхідного та достатнього обсягу вимірювань для застосування методу аналізу динамічних зовнішніх швидкісних характеристик автомобільних двигунів, хоча це є важливим при плануванні відповідної стратегії періодичного моніторингу.

10. В шостому розділі автор визначає чотири етапи перехідного процесу головного суднового двигуна при розгоні судна, але не вказує конкретні діагностичні ознаки кожного з етапів. Тобто, не до кінця зрозуміло, яким чином необхідно порівнювати фактичні діаграми перехідних процесів з теоретичними в контексті визначення їх відповідності справному стану двигуна.

Втім, вказані недоліки 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” за своїм змістом відповідає паспорту спеціальності 05.05.03 – двигуни та енергетичні установки. Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, яка розв’язує важливу наукову проблему, суть якої полягає в необхідності створення нових ефективних методів діагностики технічного стану двигунів внутрішнього згоряння, що відповідають вимогам четвертої промислової революції. Дисертація виконана з дотриманням принципів академічної доброчесності та 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 автомобільного
транспорту та транспортних технологій
Філії класичного приватного університету
у місті Кременчук,

доктор технічних наук, професор

03.04.2023



Олександр СТРОКОВ

Лідиса Строчкова О.П. підтверджую
директор Філії КПУ у м. Кременчук



Лідиса Строчкова