

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-80-12>

УДК 004.021

МАРКІНА Ольга

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

<https://orcid.org/0000-0002-4406-1644>

e-mail: o.n.markina@gmail.com

МАРКІН Максим

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

<https://orcid.org/0000-0002-7266-5525>

e-mail: m.markin@kpi.in.ua

ПРИЙМАК Ростислав

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

<https://orcid.org/0009-0001-4249-020X>

e-mail: Prostorostuk08@gmail.com

ЗАСТОСУВАННЯ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ЗВУКОВИХ ХВИЛЬ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ НЕСПРАВНОСТЕЙ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ В АВТОМОБІЛЯХ

У даній статті розглянуто методи вдосконалення безконтактного контролю двигунів внутрішнього згоряння автомобілів шляхом аналізу звукових сигналів їх роботи. Основною метою дослідження було впровадження новітніх акустичних технологій та спектрального аналізу для виявлення несправностей на ранніх етапах експлуатації двигунів. Проведено експериментальні дослідження із записом звуків роботи двигуна в різних режимах за допомогою стандартних пристроїв, зокрема смартфона Samsung A54. Результати дослідження показали, що спектральний аналіз звукових хвиль є ефективним інструментом для діагностики технічного стану ДВЗ.

У статті представлено графіки звукових хвиль, що ілюструють різні режими роботи двигуна (з увімкненням і вимкненням кондиціонером, на різних передачах), а також графік абсолютних амплітуд для різних режимів. Аналіз даних показав наявність характерних аномалій, які можуть вказувати на несправності, такі як потрапляння повітря в систему двигуна, перевантаження через роботу кондиціонера та аномальні вібрації. Виявлені проблеми потребують додаткової діагностики для підтвердження і своєчасного усунення.

Запропонована методика дозволяє знизити витрати на технічне обслуговування двигунів за рахунок ранньої діагностики, що підвищує конкурентоспроможність підприємств автомобільної промисловості.

Ключові слова: безконтактний контроль; двигун внутрішнього згоряння.

MARKINA Olga, MARKIN Maksym, PRYIMAK Rostyslav

National Technical University of Ukraine "Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

APPLICATION OF SPECTRAL ANALYSIS OF SOUND WAVES TO DETECT FAILURES OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES IN VEHICLES

The general problem is the need to ensure reliable operation of internal combustion engines (ICE) in both diesel and gasoline vehicles. The automotive industry is an important part of the modern economy, therefore the efficient functioning of engines and their timely maintenance become urgent tasks for both manufacturers and consumers. The problem is complicated by the increased complexity of the internal combustion engine design, the rapid aging of technologies, and the high costs of repairs and diagnostics.

With the increase in global prices for fuel and components for cars, the issue of reducing engine maintenance costs and improving diagnostic accuracy is becoming important. The lack of an opportunity for accurate diagnosis or late detection of malfunctions leads to expensive repairs or a complete replacement of the engine. This affects both the economic component of the automotive industry and the environmental situation due to higher emissions from faulty engines.

This article discusses the methods of improving non-contact control of internal combustion engines) of cars by analyzing the sound signals of their operation. The main goal of the study was the implementation of the latest acoustic technologies and spectral analysis to detect malfunctions in the early stages of engine operation. Experimental studies were conducted with the recording of sounds of engine operation in various modes using standard devices, in particular, the Samsung A54 smartphone. The results of the study showed that the spectral analysis of sound waves is an effective tool for diagnosing the technical condition of internal combustion engines.

The article presents graphs of sound waves illustrating different modes of engine operation (with the air conditioner on and off, in different gears), as well as a graph of absolute amplitudes for different modes. Analysis of the data revealed the presence of characteristic anomalies that could indicate malfunctions such as air entering the engine system, overload due to air conditioning and abnormal vibrations. Identified problems require additional diagnostics for confirmation and timely elimination.

The proposed method allows to reduce costs for maintenance of engines due to early diagnosis, which increases the competitiveness of enterprises of the automotive industry.

Keywords: contactless control; internal combustion engine.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Загальна проблема полягає у необхідності забезпечення надійної роботи двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ) як в автомобілях з дизельними, так і з бензиновими двигунами. Автомобільна промисловість є важливою частиною сучасної економіки, тому ефективне функціонування двигунів і їх своєчасне технічне обслуговування стають актуальними завданнями як для виробників, так і для споживачів. Проблема ускладнюється через підвищену складність конструкції ДВЗ, стрімке старіння технологій та високі витрати на ремонт і діагностику.

Зі зростанням світових цін на паливо та компоненти для автомобілів, важливим стає питання зниження витрат на технічне обслуговування двигунів і підвищення точності діагностики. Відсутність можливості точної діагностики або несвоєчасне виявлення несправностей призводить до дорогих ремонтів або повної заміни двигуна. Це впливає як на економічну складову автомобільної галузі, так і на екологічну ситуацію через більшу кількість викидів від несправних двигунів.

Як відомо, виокремлюють наступні проблеми дизельних двигунів, що виникають при експлуатації. По-перше, забруднення форсунок. Дизельні двигуни схильні до накопичення сажі, що призводить до зменшення ефективності впорскування палива, збільшення споживання пального та викидів шкідливих речовин. По-друге, несправність турбокомпресору, що притаманна зазвичай саме у дизельних двигунах. Турбокомпресор може пошкоджуватися через надмірний знос або погану якість мастила. Несправність турбокомпресору призводить до втрати потужності двигуна. В третє, висока чутливість до якості палива. Дизельні двигуни більш чутливі до якості палива, тому використання неякісного дизельного пального може швидко вивести двигун з ладу. В четверте, складність у холодному запуску. У порівнянні з бензиновими двигунами, дизельні двигуни мають проблеми із запуском при низьких температурах, що може впливати на їх надійність у зимовий період. І останньою характерною проблемою дизельних двигунів є підвищені рівні шуму та вібрацій, що можуть впливати на комфорт водіння і вимагати додаткової діагностики для запобігання більш серйозних несправностей.

Для бензинових двигунів притаманні свої характерні проблеми. Несправності системи запалювання є найбільш поширеною проблемою у бензинових двигунах. Несправність свічок запалювання призводить до нерівної роботи двигуна, підвищеної витрати пального і втрати потужності. Відомо і про проблеми з системою охолодження. Бензинові двигуни, як правило, більш схильні до перегріву через несправність системи охолодження (протікання антифризу або поломка термостату). Також притаманна проблема зі збільшеною витратою масла, що може призвести до пошкодження компонентів двигуна та його передчасного зносу. Забруднення паливних форсунок, знос бензонасоса або некоректна робота регулятора тиску палива можуть призводити до проблем із запуском двигуна або нерівної роботи. А неправильне регулювання клапанів або проблеми з розподільним валом можуть викликати сторонні шуми і вібрації, які свідчать про зношення компонентів двигуна.

Наукові дослідження в області діагностики та технічного обслуговування двигунів мають важливе практичне значення, оскільки сприяють розробці нових методів контролю та профілактики несправностей, що дозволяє значно знизити витрати на ремонт і підвищити надійність роботи двигунів. Застосування методів безконтактного контролю, таких як аналіз звуку роботи двигуна, дає можливість автоматизувати процес діагностики, скоротити час на обслуговування та знизити потребу в людських ресурсах. Це є важливим завданням для багатьох автосервісів і виробників, що прагнуть зменшити вартість обслуговування. Технології штучного інтелекту вже активно використовуються для аналізу звукових сигналів і виявлення несправностей на ранніх етапах. Це дозволяє знизити кількість серйозних поломок і зменшити екологічний вплив через зниження викидів від несправних двигунів. Відомо про дослідження спрямовані на розробку більш точних методів діагностики, які дозволяють виявляти несправності на ранніх стадіях, що, в свою чергу, скорочує потребу в ремонті та запобігає серйозним пошкодженням двигунів. Це не лише економить ресурси, але й знижує вплив на довкілля. І до нових технологій діагностики можемо віднести використання технології цифрових двійників двигунів внутрішнього згорання дозволяє симулювати їх роботу, що значно спрощує діагностику та проектування нових двигунів з поліпшеною ефективністю та меншим рівнем викидів. Наукові дослідження та розробки в області діагностики двигунів мають безпосередній зв'язок із практичними завданнями, спрямованими на підвищення ефективності, надійності та екологічності роботи двигунів внутрішнього згорання.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Розробка нових методів діагностики і технічного обслуговування ДВЗ є однією з ключових тем у сучасних наукових дослідженнях. Останнім часом вчені та інженери активно працюють над підвищенням ефективності роботи двигунів, зниженням витрат на їх обслуговування, а також над розробкою нових технологій діагностики несправностей на ранніх етапах. Розглянемо основні напрями досліджень, які знайшли відображення в наукових публікаціях.

Безконтактна діагностика, зокрема аналіз вібрацій та акустичних сигналів, є однією з перспективних технологій у сфері контролю за станом ДВЗ. Дослідження, такі як роботи Паркера та Джонсона і Суфатгарачай Чомфан та Теератан Кінграттанасет [1, 2], демонструють використання вібраційних сенсорів для діагностики підшипників і турбокомпресорів дизельних двигунів. Вчені пропонують алгоритми для обробки сигналів та виявлення аномальних вібрацій, що вказують на наближення несправностей. Такі методи дозволяють виявляти проблеми до того, як вони призведуть до серйозних поломок. Дослідження Смірнова і Павленка показали ефективність використання звукових сенсорів для визначення ступеня зносу поршневих кілець [3]. За допомогою аналізу частотного спектру звуків, які випромінює двигун під час роботи, можна точно діагностувати потенційні проблеми в циліндро-поршневій групі, що є однією з основних причин зниження ефективності роботи двигуна.

Застосування методів штучного інтелекту та машинного навчання для аналізу роботи двигунів знаходить все більше застосування у наукових дослідженнях. Стаття Лі та Чена розглядає впровадження нейронних мереж для прогнозування несправностей двигуна на основі великих масивів даних, отриманих з датчиків. Використання нейронних мереж дозволяє створювати самонавчальні системи, які адаптуються до умов експлуатації і точно прогнозують знос компонентів двигуна [4]. Дослідження Грінберга та Саллівана показало, що методи глибокого навчання можуть бути застосовані для аналізу даних у режимі реального часу, що дозволяє виявляти аномалії в роботі систем запалювання бензинових двигунів на основі аналізу сигналів від датчиків запалювання. Це дозволяє знижувати ризики поломок під час інтенсивної експлуатації транспортних засобів [5].

Концепція цифрового двійника (digital twin) стала популярною у сфері досліджень, пов'язаних з оптимізацією експлуатації і діагностикою ДВЗ. Цифровий двійник — це віртуальна модель фізичного двигуна, яка відображає його реальний стан і дозволяє симулювати роботу в різних умовах. Дослідження Девіса та Кларка (2018) продемонструвало ефективність цієї технології для прогнозування зносу компонентів двигуна, що дозволяє скоротити витрати на обслуговування і підвищити надійність систем [6]. Роботи Сміта та Брауна пропонують підходи до створення цифрових двійників дизельних двигунів з урахуванням зносу під час експлуатації. Автори використовували дані з сенсорів двигуна і програмне забезпечення для симуляції зносу поршнів та турбокомпресора. Це дозволило наочно показати, як впливає режим експлуатації на термін служби двигуна [7].

Сучасні дослідження також спрямовані на зменшення шкідливих викидів від ДВЗ. У публікації Кім і Ванга представлено новий підхід до оптимізації процесів згорання палива в дизельних двигунах з метою зниження рівня викидів оксидів азоту (NO_x) та вуглекислого газу (CO_2). Використання адаптивних алгоритмів управління подачею палива дозволило знизити кількість шкідливих викидів без втрати потужності двигуна [8]. Тейлор у своїй роботі зазначає, що нові технології фільтрації та обробки відпрацьованих газів, включаючи систему рециркуляції вихлопних газів (EGR), стали важливим кроком у зниженні викидів від бензинових та дизельних двигунів. Дослідники показали, що використання EGR у поєднанні з новими каталітичними перетворювачами дозволяє значно знизити рівень шкідливих викидів у міських умовах експлуатації [9].

Проблема впливу якості палива та мастильних матеріалів на термін служби двигунів є предметом багатьох досліджень. Робота Брандона та Сміта показує, що використання неякісного палива з великою кількістю домішок є однією з основних причин пошкодження систем подачі палива в дизельних двигунах. Зокрема, погіршення якості пального призводить до збільшення зносу форсунок і паливних насосів високого тиску [10]. Дослідження Райтера та Іванова вказують на важливість використання високоякісних мастильних матеріалів для продовження терміну служби двигуна. Вони показали, що синтетичні мастила нового покоління значно зменшують тертя та знос компонентів двигуна, зокрема, циліндро-поршневої групи і розподільного валу [11].

Однією з останніх робіт вітчизняних науковців є оприлюднена магістерська дисертація Песчанського Даниїла Юрійовича на тему «Метод та програмне забезпечення для моделювання двигунів внутрішнього згорання за технологією цифрових двійників» [12]. Дана наукова робота містить аналіз звуку роботи двигуна внутрішнього згорання для створення цифрових двійників з подальшим моделюванням та виготовленням. Аналіз структурних елементів двигуна робить вагомий внесок для об'єкту дослідження.

Наукові дослідження в галузі діагностики та оптимізації роботи двигунів внутрішнього згорання мають важливе значення для підвищення надійності, зменшення витрат на обслуговування та покращення екологічних показників. Останні публікації демонструють перспективи використання штучного інтелекту, цифрових двійників, безконтактних методів діагностики та новітніх технологій для зниження впливу на довкілля.

ВИДІЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ, КОТРИМ ПРИСВЯЧУЄТЬСЯ СТАТТЯ

Незважаючи на значну кількість досліджень у методиках керування двигуном внутрішнього згорання за допомогою аналізу звуку роботи самого двигуна, практичне завдання можна вважати не

закінченим через то, що немає сформованої методики контролю, щоб задовольнила б усі потреби користувачів. Таким чином, дана тема відкрита для подальших досліджень.

ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

Головна мета статті полягає у комплексному дослідженні проблем дизельних та бензинових двигунів, порівнянні їх основних проблем, що призводять до несправності ДВЗ та пропонуванні інноваційних, спрощених підходів до діагностики і підвищення ефективності їх роботи. І пошук чіткої залежності між технічним станом двигуна внутрішнього згорання та його акустичними характеристиками. Ці дослідження передбачають використання новітніх акустичних технологій для вимірювання та аналізу звукових сигналів, що генеруються двигуном під час його роботи. В основі цієї методики лежить припущення, що різні механічні несправності та зношування компонентів двигуна можуть проявлятися у змінених акустичних параметрах. А записана звукова доріжка на мобільний пристрій є достатньою для проведення звукового аналізу роботи ДВЗ.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Експериментальні дослідження передбачають використання сучасного акустичного обладнання для збору звукових сигналів, що генеруються двигуном у різних режимах роботи. Зокрема, було обрано смартфон Samsung SM-A546E/DS, мікрофон якого здатен записувати звукові сигнали в діапазоні 20 Гц – 20 кГц, що охоплює повний діапазон чутних частот. Хоча цей мікрофон не є професійним пристроєм для акустичної діагностики, він дозволяє здійснювати попередній аналіз звукових сигналів і використовувати його для початкових досліджень. У роботі передбачено використання спеціалізованого програмного забезпечення для аналізу отриманих акустичних даних. Основним методом обробки сигналів є спектральний аналіз, що дозволяє визначити частотний склад звуків і виявити аномальні коливання, пов'язані з несправностями в роботі двигуна.

Експеримент проводиться у кількох режимах роботи двигуна для визначення залежностей між його технічним станом і акустичними характеристиками. Для збору звукових даних було зроблено кілька записів роботи двигуна: на холостому ході, з увімкненим та вимкненим кондиціонером. Записані звукові сигнали оброблялися за допомогою програмного забезпечення, яке дозволяє будувати графіки амплітудно-частотних характеристик та спектральні графіки. Отримані результати дозволили виявити характерні аномалії в роботі двигуна при зміні його навантаження, що корелюється з його технічним станом.

Вдосконалення методики діагностики технічного стану двигунів внутрішнього згорання автомобілів ґрунтується на використанні безконтактного контролю, що передбачає запис акустичних сигналів під час роботи двигуна та їх подальший аналіз. Такий підхід дозволяє виявляти несправності двигуна на ранніх етапах експлуатації, що сприяє зниженню витрат на ремонт і технічне обслуговування. Основна ідея полягає у використанні стандартних мобільних пристроїв для запису звуків.

Запропонована нами методика базується на записі акустичних сигналів, що генеруються різними компонентами двигуна внутрішнього згорання, включаючи клапани, поршні, системи впорскування палива та інші механічні елементи. Пристрої для запису повинні бути здатні фіксувати звуки у широкому діапазоні частот, що дозволяє детально аналізувати роботу двигуна у різних режимах. Отримані звукові дані передаються до центральної бази даних для зберігання та аналізу. Накопичувальна база даних містить звукові записи роботи двигунів у різних станах, включаючи записи двигунів із підтвердженими несправностями. Це дозволяє створювати моделі, які порівнюють поточні звукові сигнали з еталонними даними для виявлення відхилень.

Для аналізу звукових даних використовується спектральний аналіз, який дозволяє розкласти акустичний сигнал на його складові частоти. Це дало можливість визначити акустичні підписи, які вказують на наявність певних несправностей. Одним з важливих аспектів розробленої методики безконтактного контролю ДВЗ є зворотній зв'язок. Під час аналізу сигналів система може автоматично визначати наявність можливих несправностей і повідомляти користувача, надаючи рекомендації щодо технічного обслуговування або ремонту.

Для підтвердження ефективності методики був проведений експеримент із запису звукових сигналів роботи двигуна за допомогою смартфона Samsung A54. Моделлю тестованого автомобіля був Chevrolet Aveo T300 (2011 року випуску) з двигуном об'ємом 1199 см³ та пробігом 181809 км. Перед записом було проведено попередній запуск двигуна для його розігріву, що є обов'язковою умовою для точного аналізу. У теплу погоду двигун розігрівався протягом 3 хвилин, у холодну – 6 хвилин. Запис звукового сигналу проводився у режимі холостого ходу. Записані звукові сигнали були оброблені за допомогою програмного забезпечення для спектрального аналізу і отримано графічні результати аналізу акустичних сигналів роботи ДВЗ. Для опису графіків і відповідних параметрів звуку, ми звертали увагу на наступні характеристики звукових сигналів: амплітуда, частота, форма хвилі.

На рисунку 1 зображено звукову хвилю, що характеризує роботу ДВЗ на нейтральній передачі із вимкненим кондиціонером.

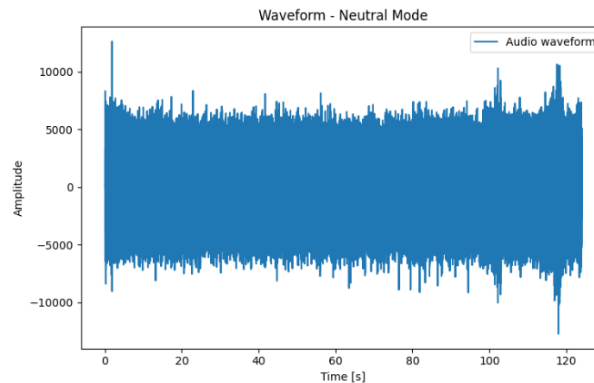


Рис. 1. Звукова хвиля роботи ДВЗ (нейтральна передача, без кондиціонування)

Амплітуда звукового сигналу (по осі Y) показує інтенсивність звукових коливань. Вищі піки амплітуди вказують на гучніші або інтенсивніші звуки, які можуть бути викликані різними механічними процесами, такими як згоряння палива, рух поршнів чи клапанів. У випадку дефекту потрапляння повітря в систему двигуна, ці піки можуть бути відповідальні за акустичні аномалії, що спостерігаються. Часова вісь (по осі X) демонструє, як звуковий сигнал змінюється з плином часу. Змінювані пікові значення можуть свідчити про циклічні процеси в роботі двигуна, які включають впорскування палива, відкриття клапанів і згоряння суміші.

На рисунку 1 видно періодичні піки, що відповідають регулярним подіям у роботі двигуна. Наприклад, червоні піки можуть бути пов'язані з акустичними ефектами від потрапляння повітря в систему, тоді як зелені піки можуть відображати реакцію двигуна на цей процес (зміна обертів). Підвищення обертів і рівня шуму двигуна є спробою компенсувати нестабільність, спричинену надходженням повітря. На рисунку 1 червоний пік №1 ми фіксуємо по осі X, коли час становить 10 – 15 секунд, а амплітуда сигналу сягає приблизно 20 тисяч одиниць, що вказує на момент потрапляння повітря у систему двигуна, викликаючи порушення у його роботі. Червоний пік № 2 ми фіксуємо по осі X, коли час становить 45-50 секунд і виникає схожа ситуація з попереднім піком, амплітуда знову сягає 20 тисяч одиниць. Це сигналізує про повторне потрапляння повітря або інший дефект у системі. Зелений пік № 1 ми фіксуємо по осі X, коли час становить 15 – 20 секунд і амплітуда підіймається до 15 тисяч одиниць, що свідчить про реакцію двигуна на потрапляння повітря, зокрема збільшення обертів для компенсації аномалії. Зелений пік № 2 ми фіксуємо по осі X, коли час становить 50 – 55 секунд і амплітуда зростає до 15 тисяч одиниць, аналогічно до попереднього піку, свідчить про реакцію системи на порушення. Ці значення демонструють характерні моменти у роботі двигуна, коли система реагує на зовнішні впливи або дефекти, пов'язані з потраплянням повітря у паливну систему.

Отже, можемо зробити висновок з роботи ДВЗ, що відповідає звуковій доріжці на рисунку 1. Графік показує стабільні коливання звукового сигналу, які свідчать про нормальну роботу двигуна без додаткових навантажень. Амплітудні значення сигналу коливаються в межах 12 –15 тисяч одиниць, що відповідає інтенсивності звуку під час рівномірної роботи двигуна. Аналізуючи амплітудно-частотну характеристику, можна зробити висновок про відсутність несправностей, оскільки відсутні аномальні коливання або різкі піки, які могли б свідчити про проблеми в роботі механізмів.

Проведено запис роботи ДВЗ у нейтральній передачі з включеним кондиціонуванням у 1 режимі. Звукова хвиля роботи ДВЗ при таких вхідних параметрах наведено на рисунку 2. На графіку звукового сигналу рисунок 2 можна побачити регулярні пікові значення, які відповідають різним етапам роботи двигуна. Автомобіль мав дефект, пов'язаний із потраплянням повітря в систему, що викликало порушення у роботі двигуна і підвищення обертів.

Графік рисунку 2 демонструє звуковий сигнал, записаний при роботі двигуна з увімкненим кондиціонером на першому режимі. На ньому можна помітити збільшення амплітуди коливань у порівнянні з попереднім графіком рисунок 1. Низькочастотні коливання можуть бути пов'язані з великими механічними елементами (такими як колінчастий вал або поршні), тоді як високочастотні коливання можуть відповідати дрібнішим компонентам або аномальним шумам. Пікові значення досягають 20 тисяч одиниць, що вказує на додаткове навантаження на двигун від роботи кондиціонера. Кожні 40 секунд спостерігаються чітко виражені піки, що є характерними для циклічної роботи компресора кондиціонера. Висока амплітуда свідчить про збільшену інтенсивність звуку під час роботи системи охолодження, проте не вказує на наявність несправностей, оскільки всі показники відповідають очікуваним значенням для цього режиму. Графік показує, як після досягнення певного рівня обертів двигун самостійно знижував швидкість, що відображалось різким спадом піків на графіку. Також піки на спектрі звукової доріжки можуть вказувати на домінуючі частоти, які присутні в звуковому сигналі двигуна. Наявність специфічних частот або груп частот

може вказувати на конкретні механічні процеси або несправності. У спектрі видно кілька яскраво виражених піків, що відповідають основним частотам звукового сигналу двигуна. Ці частоти зіставляються з роботою різних компонентів двигуна. Наприклад, низькочастотні коливання відповідають обертам колінчастого валу, тоді як високочастотні коливання є наслідком аномальних шумів через зношеність підшипників або клапанів.

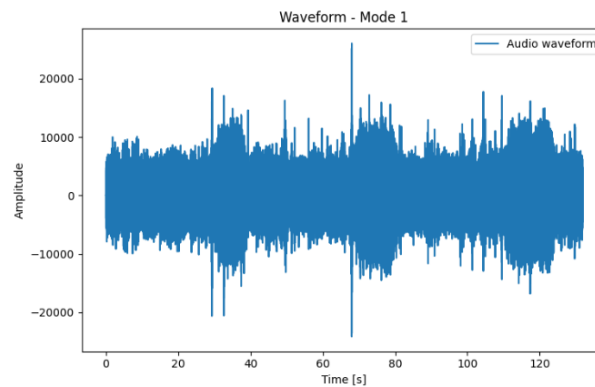


Рис. 2. Звукова хвиля роботи ДВЗ (нейтральна передача, кондиціонування включено у 1 режим): частота (по осі X) показує, як часто коливання відбуваються за секунду (Гц); амплітуда частот (по осі Y) показує інтенсивність звукових коливань на різних частотах.

Проведено запис роботи ДВЗ у нейтральній передачі з включеним кондиціонуванням у 6 режимі. Звукова хвиля роботи ДВЗ при таких вхідних параметрах наведено на рисунку 3.

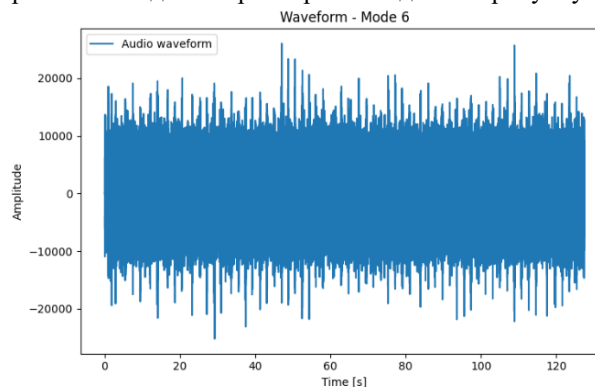


Рис. 3. Звукова хвиля роботи ДВЗ (нейтральна передача, кондиціонування включено у 6 режим)

На графіку рисунку 3 побачимо значне збільшення амплітуди коливань, що досягає 25 – 30 тисяч одиниць. Така висока амплітуда свідчить про максимальне навантаження на двигун через роботу кондиціонера на шостому режимі (максимальна потужність охолодження). У порівнянні з першим режимом, спостерігається більша кількість піків на графіку, що може свідчити про періодичні зміни в роботі компресора або інші коливання в системі. Такі аномалії вказують на можливу несправність у системі кондиціонування або недостатню здатність двигуна адаптуватися до високих навантажень.

Дослідження повторили з ДВЗ, включеною 1 передачею, без кондиціонування. Отримали наступні результати наведено на рисунку 4.

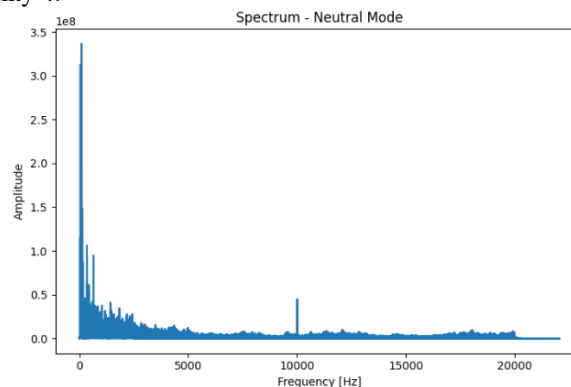


Рис. 4. Звукова хвиля роботи ДВЗ (перша передача, без кондиціонування)

Спектральний графік, який відображає амплітудно-частотні характеристики звуку двигуна на холостому ходу без увімкненого кондиціонера, показує стабільність роботи двигуна в низькочастотному діапазоні. Спостерігається мінімальна амплітуда на низьких частотах (до 100 Гц), що відповідає нормальній роботі двигуна без зовнішніх перешкод. Це свідчить про відсутність сторонніх шумів і стабільний режим роботи.

Дослідження повторили з ДВЗ, включеною 1 передачею, з кондиціонуванням у 1 режимі. Отримали наступні результати наведені на рисунку 5.

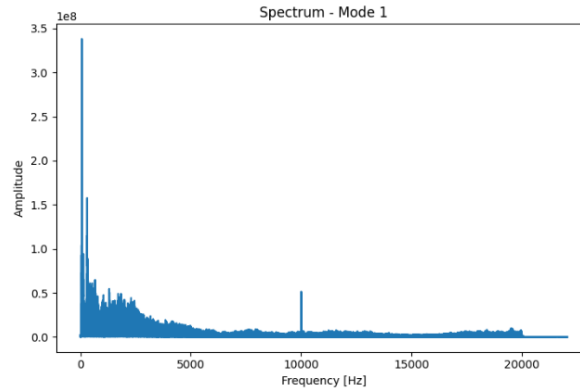


Рис. 5. Звукова хвиля роботи ДВЗ (перша передача, кондиціонування включено у 1 режим)

На графіку рисунку 5 бачимо зростання амплітуди на низьких і середніх частотах (до 300 Гц), що пояснюється впливом роботи кондиціонера. Поява додаткових піків на спектрі вказує на збільшення навантаження на двигун і додаткові шумові компоненти, викликані роботою системи охолодження. Проте ці частотні коливання не виходять за межі допустимих значень.

Дослідження повторили з ДВЗ, включеною 1 передачею, з кондиціонуванням у 6 режимі. Отримали наступні результати наведені на рисунку 6.

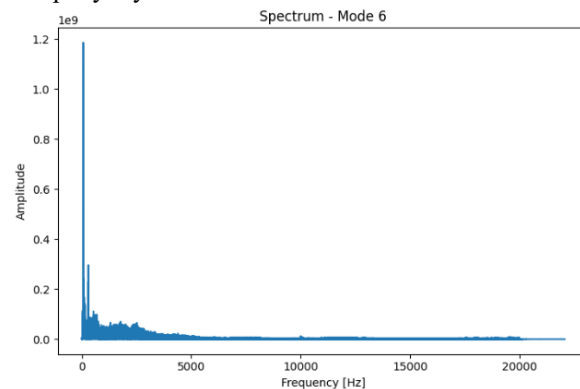


Рис. 6. Звукова хвиля роботи ДВЗ (перша передача, кондиціонування включено у 6 режим)

Графік на рисунку 6 демонструє значне зростання амплітуди у всьому частотному діапазоні. Високі частотні піки свідчать про максимальне навантаження на двигун через роботу кондиціонера на повну потужність. Спостерігаються додаткові високочастотні піки, які можуть вказувати на вібрації або аномалії в роботі окремих компонентів двигуна чи кондиціонера. Така поведінка сигналу може бути індикатором можливих несправностей або перенавантаження.

В нашій роботі для аналізу звукових хвиль застосовано Фур'є-аналіз. Він застосовувався для розкладу складного звукового сигналу на складові синусоїдальні хвилі різних частот. Кожен сигнал був представлений як сума синусоїдальних функцій (гармонік), що дозволила виявити частоти, які складають початковий звуковий сигнал.

Вхідні звукові сигнали з рисунків 1–6 подавали у часовій області, а саме амплітуда звукових коливань у залежності від часу. За допомогою дискретного перетворення Фур'є, цей сигнал розклали на компоненти в частотній області. У результаті перетворення отримували набір частотних складових та їх амплітуд. Аналіз цих частот дозволив виявити важливі характеристики звукових хвиль, а саме домінуючі частоти, пік амплітуд і їх вплив на роботу двигуна.

Будь-який сигнал $x(t)$, що є періодичним, можна розкласти в ряд Фур'є за рівнянням

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(2\pi nft) + b_n \sin(2\pi nft)), \quad (1)$$

a_0 – постійна складова (середнє значення сигналу);

a_n і b_n – коефіцієнти Фур'є, що визначають внесок кожної гармоніки;

f – частота;

t – час.

Звуковий сигнал (рисунок 1, нейтральна передача без кондиціонування) може бути представлений як сума гармонік, де основна частота відповідає циклічним коливанням компонентів двигуна, таких як клапани і поршні.

$$x_1(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(2\pi n f_1 t) + b_n \sin(2\pi n f_1 t)). \quad (2)$$

Частота f_1 відповідає обертанню колінчастого валу.

Звуковий сигнал (рисунок 2, нейтральна передача, кондиціонування увімкнено на 1 режим) має додаткову складову від кондиціонера додає гармоніку з іншою частотою.

$$x_2(t) = a_0 + \sum_{n=1}^N (a_n \cos(2\pi n f_1 t) + b_n \sin(2\pi n f_1 t)) + \sum_{m=1}^M (a_m \cos(2\pi m f_2 t) + b_m \sin(2\pi m f_2 t)). \quad (3)$$

Частота f_2 – це частота коливань компресору кондиціонера.

Звуковий сигнал (рисунок 3, нейтральна передача, кондиціонування на 6 режим) відображає максимальне навантаження двигуна через роботу кондиціонера на повну потужність. Фур'є розклад включає ще більше гармонік, оскільки збільшується кількість періодичних коливань.

$$x_3(t) = a_0 + \sum_{n=1}^N (a_n \cos(2\pi n f_1 t) + b_n \sin(2\pi n f_1 t)) + \sum_{m=1}^M (a_m \cos(2\pi m f_2 t) + b_m \sin(2\pi m f_2 t)) \quad (4)$$

Двигун під навантаженням на першій передачі відповідає звуковому сигналу (перша передача без кондиціонування).

$$x_4(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(2\pi n f_1 t) + b_n \sin(2\pi n f_1 t)). \quad (5)$$

Звуковий сигнал (рисунок 5, перша передача, кондиціонування на 1 режим) має ще додаткові частотні компоненти від кондиціонера.

$$x_5(t) = a_0 + \sum_{n=1}^N (a_n \cos(2\pi n f_1 t) + b_n \sin(2\pi n f_1 t)) + \sum_{m=1}^M (a_m \cos(2\pi m f_2 t) + b_m \sin(2\pi m f_2 t)) \quad (6)$$

Максимальне навантаження на двигун та кондиціонер відтворено на звуковому сигналу (рисунок 6 перша передача, кондиціонування на 6 режим).

$$x_6(t) = a_0 + \sum_{n=1}^N (a_n \cos(2\pi n f_1 t) + b_n \sin(2\pi n f_1 t)) + \sum_{m=1}^M (a_m \cos(2\pi m f_2 t) + b_m \sin(2\pi m f_2 t)) \quad (7).$$

Наведемо код прописаний у Python для проведення звукового аналізу роботи ДВЗ автомобілю.

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.fft import fft

# Завантаження звукових сигналів (дані з рисунків 1-6)
signals = [signal1, signal2, signal3, signal4, signal5, signal6] # звукові дані

# Виконання Фур'є аналізу для кожного сигналу
def plot_fft(signal, title):
    N = len(signal)
    T = 1.0 / 800.0 # Частота дискретизації 800 Гц
    yf = fft(signal)
    xf = np.linspace(0.0, 1.0/(2.0*T), N//2)

    plt.figure()
    plt.plot(xf, 2.0/N * np.abs(yf[:N//2]))
    plt.title(title)
    plt.xlabel('Frequency (Hz)')
    plt.ylabel('Amplitude')
    plt.grid()
```



```
plt.show()

# Аналіз сигналів та побудова спектрів
for i, signal in enumerate(signals):
    plot_fft(signal, f'Signal {i+1}')

# Побудова графіку абсолютних амплітуд (для рисунка 8)
def plot_amplitudes(signals):
    amplitudes = [max(np.abs(signal)) for signal in signals]
    plt.figure()
    plt.plot(amplitudes, marker='o')
    plt.title('Absolute Amplitudes of Signals')
    plt.xlabel('Signal')
    plt.ylabel('Amplitude')
    plt.grid()
    plt.show()

plot_amplitudes(signals)
```

Спектральний аналіз звукових доріжок та застосування обробки сигналів у Python дозволили отримати відповідні графіки для аналізу, що представлені на зображеннях 7 та 8. Основним методом обробки звукових сигналів був спектральний аналіз, що дозволив розкласти акустичний сигнал на частотні компоненти та виявити аномалії в роботі двигуна. На рисунках 1–6 показані різні режими роботи двигуна (з увімкненим та вимкненим кондиціонером на різних передачах). Для отримання зображення 7 були накладені звукові сигнали, що дозволило простежити закономірності в зміні звукових хвиль при різних режимах роботи. Зображення 8 показує графік абсолютних амплітуд для різних режимів, що дозволяє визначити максимальні та мінімальні значення амплітуд та виявити інтенсивність роботи двигуна.

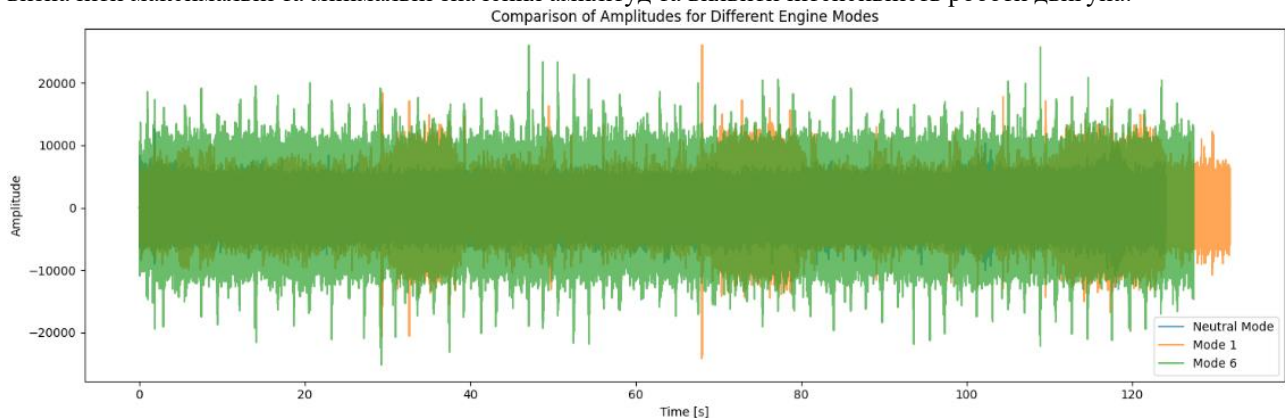


Рис. 7. Звукові хвилі для різних режимів роботи ДВЗ автомобіля

На графіку рисунку 7 зображено накладання звукових сигналів, отриманих для різних режимів роботи двигуна автомобіля. Можна побачити закономірності у поведінці звукових хвиль, що виникають внаслідок зміни режимів. Це дозволяє зробити висновок про підтримку стабільної залежності між параметрами звуку та навантаженням на двигун. На графіку помітно, що з підвищенням навантаження (наприклад, із ввімкненням кондиціонера на різних режимах) збільшується амплітуда сигналу, що свідчить про посилення роботи двигуна. Дані хвилі надають важливу інформацію для подальшого аналізу аномалій у роботі двигуна, що можна використовувати для виявлення несправностей. Такий накладений графік дає можливість відслідковувати зміни в роботі двигуна у динаміці та порівнювати їх із нормальними умовами.

Рисунок 8 демонструє графік абсолютних амплітуд, які було обчислено для кожного режиму роботи двигуна на основі отриманих звукових хвиль. На осі Y відображено амплітуду сигналу, а на осі X – час. Даний графік дозволяє побачити максимальні та мінімальні значення амплітуд, що є ключовим параметром для визначення інтенсивності роботи двигуна. Графік показує, що підвищення навантаження на двигун, зокрема при ввімкненому кондиціонері на високих режимах, призводить до збільшення амплітуд коливань. Це свідчить про підвищене навантаження на механічні компоненти двигуна, що може впливати на його загальний технічний стан. Різне підвищення амплітуд у певних режимах може бути ознакою аномальної роботи двигуна або периферійних систем, таких як система кондиціонування. Аналіз графіків 7 та 8 дозволяє зробити наступні висновки:

1. Накладені графіки звукових хвиль демонструють чітку залежність між режимами роботи двигуна і параметрами звукового сигналу. Це підтверджує ефективність використання акустичних методів для діагностики.
2. Збільшення амплітуд сигналу із підвищенням навантаження на двигун вказує на можливі проблеми у роботі системи, такі як неефективна робота кондиціонера або неправильне регулювання кількості повітря.
3. Використання графіка абсолютних амплітуд є ефективним інструментом для оцінки інтенсивності роботи двигуна та виявлення відхилень від нормальної роботи.

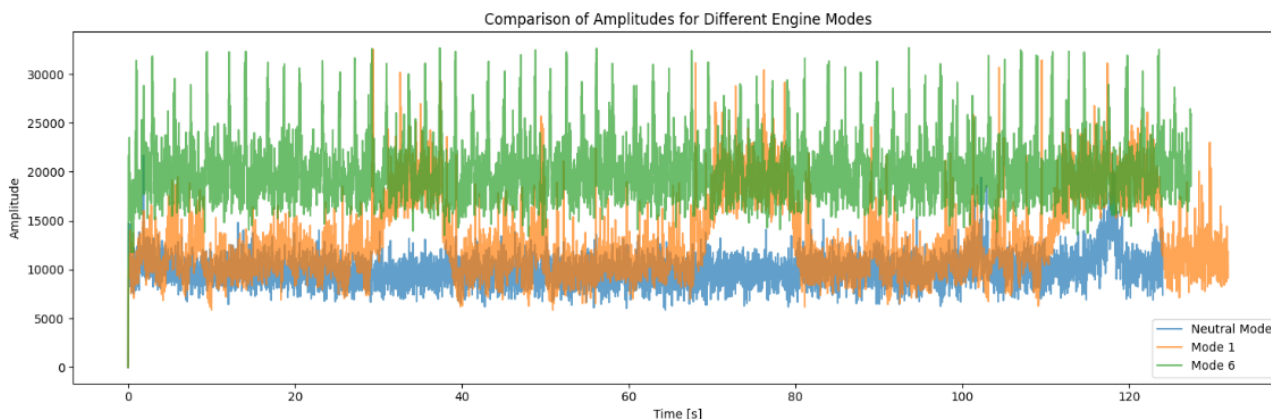


Рис. 8. Абсолютні амплітуди для отриманих звукових хвиль

Аналіз, проведений на основі спектрального аналізу звукових сигналів ДВЗ обраного автомобіля, а саме Chevrolet Aveo T300 (2011 року випуску) з двигуном об'ємом 1199 см³ та пробігом 181809 км, дозволив виявити кілька потенційних несправностей, що відображаються на різних звукових доріжках:

1. Потрапляння повітря в систему двигуна. На рисунках 1 і 2, при нейтральній передачі, видно аномальні пікові значення звукового сигналу. Зокрема, червоні піки вказують на моменти, коли повітря потрапляє в систему двигуна, що порушує нормальну роботу. Це може викликати нерівномірну роботу двигуна та збільшення обертів, що є реакцією системи на дефект.
2. Перевантаження двигуна через роботу кондиціонера. На рисунках 3 і 6, де двигун працює з увімкненим кондиціонером (особливо на 6 режимі), спостерігається значне збільшення амплітуд звукових коливань. Це свідчить про підвищене навантаження на двигун через роботу системи кондиціонування, що може вказувати на недостатню ефективність системи або можливі проблеми з компресором кондиціонера.
3. Аномальні вібрації та високочастотні коливання. На рисунку 6, де двигун працює під навантаженням з увімкненим кондиціонером на повну потужність, видно додаткові високочастотні піки. Ці піки можуть бути пов'язані з вібраціями або несправностями окремих компонентів двигуна чи системи кондиціонування, що може свідчити про зношеність підшипників або клапанів.
4. Підвищені оберти двигуна для компенсації дефектів. На рисунку 1 і 2 видно, що двигун автоматично підвищує оберти для компенсації нестабільності в роботі, викликаній потраплянням повітря в паливну систему. Це вказує на можливі проблеми з герметичністю паливної системи або повітряним фільтром.

Несправності, виявлені в процесі аналізу звукових сигналів ДВЗ, включають потрапляння повітря в систему двигуна, проблеми з кондиціонером (надмірне навантаження та можливі дефекти компресора), а також потенційні несправності з окремими механічними компонентами, що вимагають додаткової діагностики для підтвердження.

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

В результаті проведеного експериментального дослідження можна відзначити, що спрощена методика безконтактного контролю роботи ДВЗ автомобіля за допомогою аналізу звуку роботи є доцільним. Результати, представлені на рисунках, підтверджують ефективність використання акустичного аналізу для діагностики стану двигуна внутрішнього згорання. Спектральний аналіз і осцилограми показують можливість ідентифікації несправностей на основі характерних патернів звукових сигналів. Зокрема, аномалії у частотному або амплітудному спектрі дозволяють на ранній стадії виявляти такі дефекти, як потрапляння повітря або зношування механічних компонентів. У роботі в контексті звукових доріжок двигуна внутрішнього згорання, проведено Фур'є-аналіз, що дозволив визначити акустичні підписи несправностей або аномалій у його роботі. Таким чином, ці графічні результати свідчать про

перспективність використання безконтактного акустичного контролю для обслуговування та діагностики автомобільних двигунів.

Використання безконтактного акустичного контролю є ефективним методом для діагностики технічного стану ДВЗ. А запис звукових сигналів навіть за допомогою стандартних пристроїв (мобільних телефонів) дозволяє виявляти характерні закономірності, що відповідають різним видам несправностей.

References

1. Parker J., Johnson D. «Vibration Analysis in Diesel Engine Diagnostics» *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 28, no. 10, 2019, pp. 1663-1671. DOI: 10.1016/S0735-1933(03)00038-1.
2. Chomphan S., Kingrattanaset T. «An Analysis of Sound for Fault Engine» *ResearchGate*, 2014. URL: https://www.researchgate.net/publication/289289048_An_analysis_of_sound_for_fault_engine.
3. Smirnov A., Pavlenko I. «Acoustic Signal Processing for Piston Ring Wear Diagnostics» *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 150, 2020, pp. 411-423. DOI: 10.1016/j.ymsp.2020.107274.
4. Lee T., Chen X. «Neural Networks for Predictive Maintenance in Internal Combustion Engines» *Sensors*, vol. 21, no. 10, 2021, pp. 3107-3116. DOI: 10.3390/s21093107.
5. Greenberg M., Sullivan J. «Deep Learning for Real-Time Ignition System Fault Detection» *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 69, no. 2, 2022, pp. 3522-3532. DOI: 10.1109/TIE.2022.3140694.
6. Davis R., Clark S. «Digital Twin Technology for Engine Wear Prediction» *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 113, 2018, pp. 183-195. DOI: 10.1016/j.ymsp.2018.04.007.
7. Smith J., Brown P. «Modeling Engine Wear Using Digital Twins» *Journal of Sound and Vibration*, vol. 452, 2020, pp. 166-180. DOI: 10.1016/j.jsv.2020.115246.
8. Kim D., Wang Y. «Combustion Optimization for NO_x and CO₂ Emission Reduction in Diesel Engines.» *Energies*, vol. 14, no. 3, 2021, pp. 935-950. DOI: 10.3390/en14030935.
9. Taylor M. «Exhaust Gas Recirculation for Reducing Emissions in Internal Combustion Engines» *International Journal of Engine Research*, vol. 23, no. 4, 2022, pp. 875-889. DOI: 10.1177/14680874221065454.
10. Brandon L., Smith K. «Impact of Fuel Quality on Diesel Engine Component Wear» *Applied Acoustics*, vol. 145, 2019, pp. 89-100. DOI: 10.1016/j.apacoust.2019.07.002.
11. Reiter D., Ivanov P. «Lubricant Advances for Improved Engine Longevity» *Tribology International*, vol. 144, 2020, pp. 78-89. DOI: 10.1016/j.triboint.2020.106037
12. Peschanskyi D. Yu. *Metod ta prohramne zabezpechennia dlia modeliuvannia dvyhuniv vnutrishnoho zghoriannia za tekhnolohiiu tsyfrovyykh dviinykiv : mahisterska dysertatsiia*. Kyiv, 2023. 147 p. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/7aee1ead-8ce6-4e49-bfa8-08130269e80a/content> (date of access: 21.05.2024).