

Сілевич В.Ю.

Національний аерокосмічний університет імені М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»

АНАЛІЗ СТАНУ ПОРШНЕВОГО ДВИГУНА ТА ЙОГО АГРЕГАТИВ ЗА АКУСТИЧНИМ СИГНАЛОМ ЇХНЬОЇ РОБОТИ

Розвиток автомобільної промисловості, разом із збільшенням вимог до безпеки, екологічності та ефективності, вимагає дієвої діагностики стану та несправностей автомобіля та його систем.

За певних умов несвочасне обслуговування автомобіля і його агрегатів може стати загрозою безпеки людини і навколишнього середовища. До таких випадків можна віднести, наприклад, поступове руйнування підшипника колеса, деградацію пластикової втулки рульової тяги та інші критичні несправності, які супроводжуються появою додаткового шуму під час експлуатації автомобіля.

У зв'язку зі збільшенням складності агрегатів транспортних засобів та їхньої вартості під час ремонту, а тим більше під час заміни, постійний моніторинг несправностей елементів, вузлів та систем автомобіля дозволить швидко і ефективно знайти і відновити пошкоджену деталь, виявити порушення в її роботі ще до виходу з ладу.

Автомобільний поршневий двигун внутрішнього згоряння (ПДВЗ) у процесі своєї роботи є джерелом різних звукових коливань, які генеруються починаючи від руху газів (впуск повітря і випуск відпрацьованих газів), механічної взаємодії зубчастих і кулачкових механізмів і закінчуючи шумом додаткових агрегатів двигуна (вентилятор охолодження, насос високого тиску і т. ін.).

Оскільки ПДВЗ є пристроєм із великою кількістю підсистем, то робота кожної такої системи буде супроводжуватися генерацією звуку певної тональності частоти і фази. Швидкість поширення звуку має певну величину, яка залежить від середовища, в якій вона поширюється; тож таким чином можна визначити, за наявності звукових сенсорів, встановлених певним чином, місце випромінювання сигналу, а значить, місце і конкретний механізм або агрегат, який потребує обслуговування або ремонту.

Отже, коливання конструкції та звукові сигнали, що генеруються механічними системами поршневого двигуна з відповідними методами їх реєстрації, оброблення та аналізу, можуть слугувати для визначення їх стану. Таким чином, розроблення системи неруйнівного безперервного моніторингу стану двигуна автомобіля та його агрегатів, здатної заздалегідь попередити про несправності, відхилення від нормального режиму роботи, є досить важливим завданням.

Ключові слова: акустичний сигнал, вейвлет, перетворення Фур'є, несправність механічної системи, поршневий двигун.

Постановка проблеми.

Зростання складності систем автомобільної промисловості та вимог до їх експлуатації потребує розширення методів діагностики несправностей та обслуговування автомобілів.

Електронні системи двигуна, що забезпечують його працездатність, такі як датчики тиску повітря та рідин, вмісту кисню, положення колінчастого та розподільного валу, датчики рівня рідин, також можуть виконувати функції опосередкованого діагностування двигуна. До таких можна віднести, наприклад, невідповідність кутів повороту колінчастого і розподільного валу (пошкодження механізму приводу газорозподільної системи), занижений тиск у повітряній магістралі після компресора (пошкодження повітряних магістралей), завжди високий рівень кисню у відпрацьованих газах (тріщини або нещільності випускного колектору) [1, с. 1807–1826].

Діагностування стану механічних систем вказаними способами неможливе на ранніх стадіях появи дефектів (наприклад, пошкодження підшипника або механізму натягіння ланцюга газорозподільного механізму). Механічні системи двигуна майже завжди працюють із генерацією звукових коливань у повітряному середовищі, а вихід із ладу агрегату супроводжується зміною гучності, основних частот та рівнем шуму. Тому розроблення системи діагностики стану автомобільного двигуна, здатної дати раннє попередження про його стан, представляється актуальною задачею.

Таким чином, виникає необхідність розроблення надійного математичного інструментарію оцінки як стану багатфункціональних об'єктів автомобіля, так і транспортної системи у цілому.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Автор роботи [1, с. 1807–1826] розглядав застосування різних вейвлет і Фур'є-перетворень

для пошуку одиничних несправностей у різних категоріях поршневих двигунів. Метод дозволяє ефективно обробляти динамічні звукові сигнали двигуна, фільтруючи шуми з інших джерел (навколишнього середовища), які містять значну кількість інформації про умови роботи двигуна. Проблемаю зазначеного методу є складність отримання інформації, пов'язаної з конкретною несправністю.

У роботі [2, с. 295–298] проводилися експериментальні дослідження шуму двигуна з метою виявлення його несправностей. Під час проведення експериментів оброблялися сигнали нормально двигуна, що працює, на різних швидкостях обертання і з різною кількістю циліндрів, що працюють (використовувалося відключення певних свічок запалювання), для виявлення ранніх стадій деградації його елементів. Звукові записи роботи двигуна оброблялися різними додатками. У фокусі дослідження лежало порівняння максимальних амплітуд звукових сигналів.

У статті [3, с. 1005–1009] проводився аналіз звуку двигуна з метою виявлення його несправностей. Експеримент проводився для роботи бензинового двигуна у трьох станах: робота циліндрів із перебоями на холостому ході, робота із пропусками запалювання і робота двигуна без відбору потужності. Під час оброблення сигналу враховувалися такі параметри: основна частота звуку, частотний спектр, енергія звукової хвилі, швидкість переходу через нуль. Для оброблення використовувалися методи математичної статис-

тики, які дали прийнятний результат для розрізнення різних режимів роботи двигуна.

Аналіз звуку двигуна використовується не тільки для виявлення порушень в його роботі. Так, [4, с. 1347–1359] за допомогою оброблення звуку елементів циліндро-поршневої групи проводились роботи зі зниження шуму двигуна в цілому. У результаті дослідження вносилися зміни до конструкції поршня – його геометрії, положення центру мас.

Постановка завдання.

Розроблення методу оцінки показників працездатності двигуна автомобіля і його систем за їхнім акустичним сигналом.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Аналізування сигналу може проводитися шляхом зіставлення його з певним базисом. Такими базисами можуть бути як гармонічні функції, що реалізуються в Фур'є-перетворенні, так і певні базисні функції, оброблення за допомогою яких називається вейвлет-перетворенням.

Перетворення Фур'є – математичний апарат, що зіставляє одній функції дійсної змінної іншу. Ця нова функція описує коефіцієнти (амплітуди) під час розкладання вихідної функції на елементарні складові частини – гармонійні коливання з різними частотами (подібно до того, як музичний акорд може бути виражений у вигляді суми музичних звуків, які його складають). Такий механізм використовується в багатьох областях науки – у фізиці, теорії чисел, комбінаториці, обробленні сигналів, статистиці і багатьох інших.

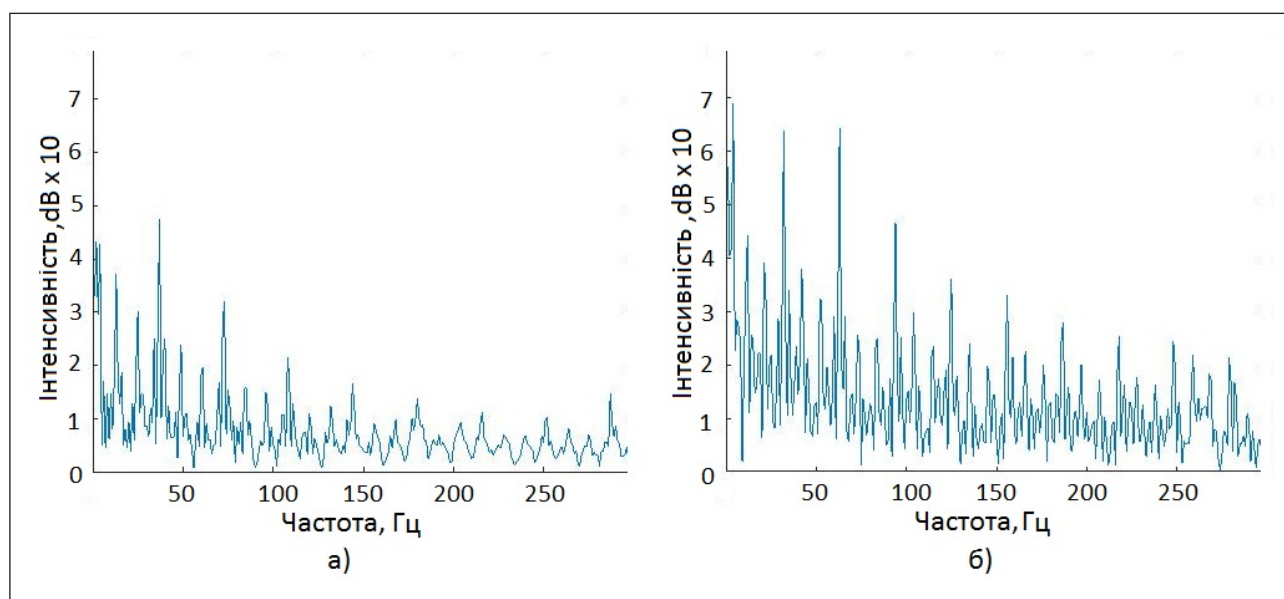


Рис. 1. Результати Фур'є-перетворення звуку роботи:
а) бездефектного двигуна; б) двигуна з дефектом випускного колектора

В обробленні сигналів і пов'язаних областях перетворення Фур'є зазвичай розглядається як декомпозиція сигналу на частоти і амплітуди, тобто оборотний перехід від часового простору в частотний [5, с. 19].

Для аналізу було взято два сигнали одного працюючого автомобільного бензинового трициліндрового двигуна з дефектом у випускному колекторі у вигляді тріщини (рисунок 1а) і без дефекту (рисунок 1б).

На рисунку 1б видно значні сплески кожної третьої гармоніки в полі частота – інтенсивність, у той час як на рисунку 1а висоти сплесків, хоча й розрізняються, але кількісну різницю менш помітно.

Із отриманих спектрограм видно більш потужний звуковий сигнал, який має частоту приблизно 40-45 Гц, що відповідає циклічності роботи двигуна і несе тільки кількісну характеристику інформації про робочий стан двигуна.

Вейвлети – функції типу маленької хвилі в математиці виникли досить давно під час вивчення базисів функціональних просторів. Однак тільки в останні десятиліття вони знайшли широке застосування в обробленні сигналів і зображень [5]. Цей математичний апарат стимулював потужний розвиток теорії вейвлетів, яка стала альтернативою аналізу Фур'є і дає більш гнучку техніку оброблення сигналів. Одна з основних переваг вейвлет-аналізу полягає в тому, що він дозволяє помітити добре локалізовані зміни сигналу, тоді як аналіз Фур'є цього не дає, бо в коефіцієнтах Фур'є відбивається поведінка сигналу за весь час його існування.

Існує кілька різновидів вейвлетів, в основі яких лежать певні базисні функції. Використання того чи іншого вейвлету залежить від виду локального сплеску, який знаходиться. Найчастіше використовуються вейвлети Морле, Хаара та Меєра.

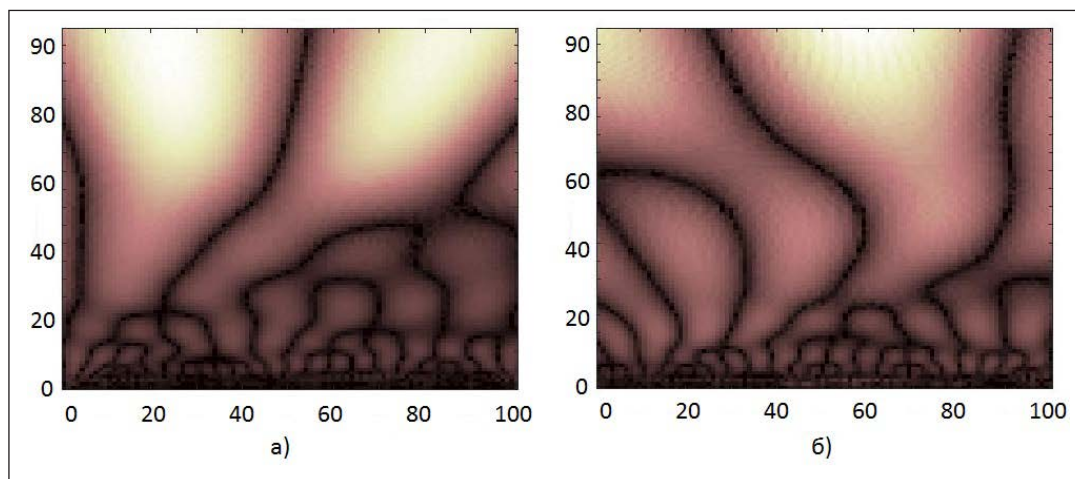


Рис. 2 Результати вейвлет-перетворення Морле звуку роботи: а) бездефектного двигуна; б) двигуна з дефектом випускного колектора

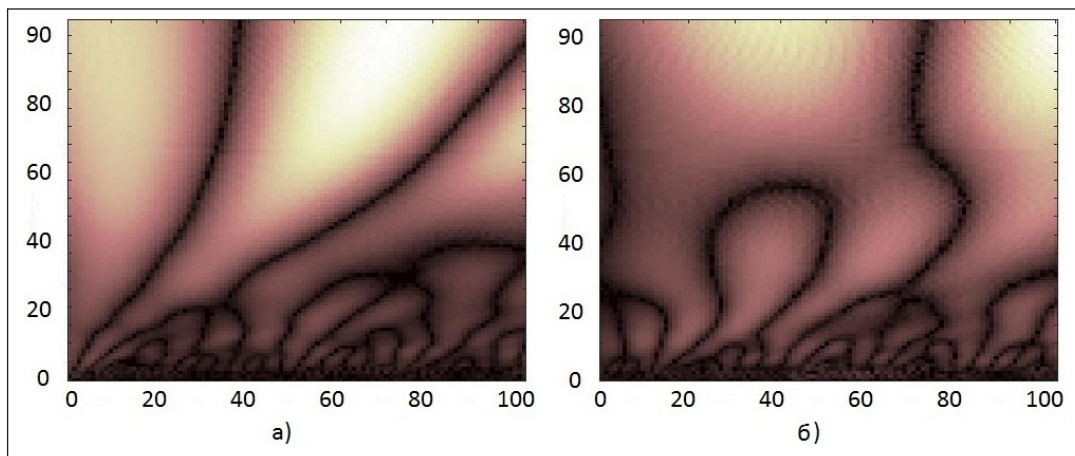


Рис. 3. Результати вейвлет-перетворення Меєра звуку роботи: а) бездефектного двигуна; б) двигуна з дефектом випускного колектора

Результати досліджень звуку того ж двигуна, що і в попередньому випадку вейвлет-перетворенням, показано на рисунках 2-4.

На фазовому портреті, що отримано перетворенням Морле, можна розрізнити лінії, які замикаються у вибраній зоні і які ні. Ті лінії, що не мають замкненості, характеризують наявність певних складових частин сигналу, які будуть найбільш подібними до базового сигналу.

У вейвлеті Меєра та Хаара (рисунок 3 і 4) добре відстежується наявність лише однієї найбільш вираженої гармоніки в роботі дефектного двигуна – це одна незамкнена лінія на рисунках 3б та 4б.

Диференціювання сигналу з отриманням першої та другої похідної дозволяє отримати інформацію про швидкість та прискорення зміни його амплітуди. Так, у просторі «стан – швидкість – прискорення» кожну динамічну подію можна

відобразити точкою з координатами $X(t)$, $dX(t)/dt$, $d^2X(t)/dt^2$. Причинно-наслідково пов'язані між собою події утворюють у просторі «стан-швидкість-прискорення» замкнену траєкторію [6, с. 354–358].

Застосування чисельного диференціювання відцифрованих сигналів має місце під час оброблення аналітичної інформації. Перша похідна сигналу характеризує швидкість зміни амплітуди щодо зміни абсциси, тобто часової осі, яка інтерпретується як нахил дотичної лінії сигналу в кожній точці.

Друга похідна є похідною від першої і являє собою міру кривизни лінії сигналу, або швидкість зміни нахилу дотичної сигналу в кожній точці кривої.

Результати оброблення сигналу двигуна з отриманням першої та другої похідної від амплітуди сигналу представлені на рисунках 5 та 6.

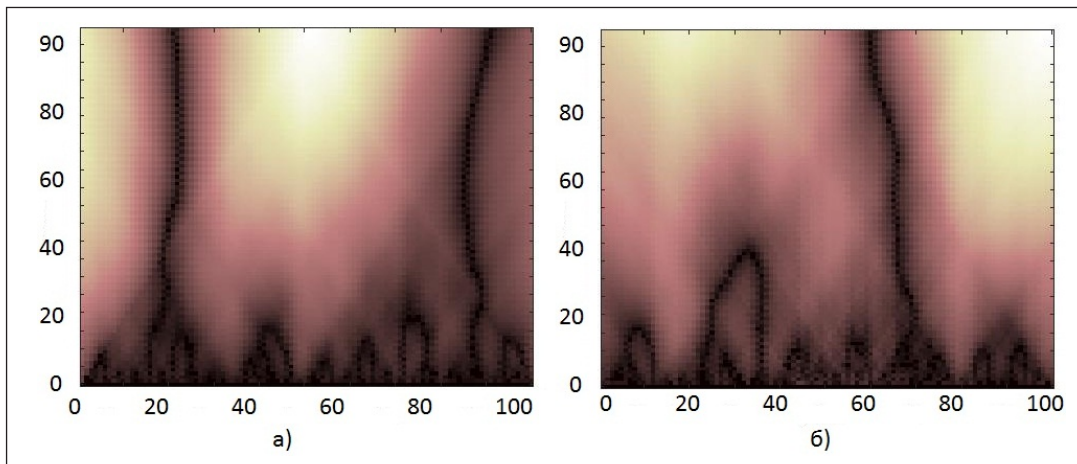


Рис. 4. Результати вейвлет-перетворення Хаара звуку роботи:
а) бездефектного двигуна; б) двигуна з дефектом випускного колектора

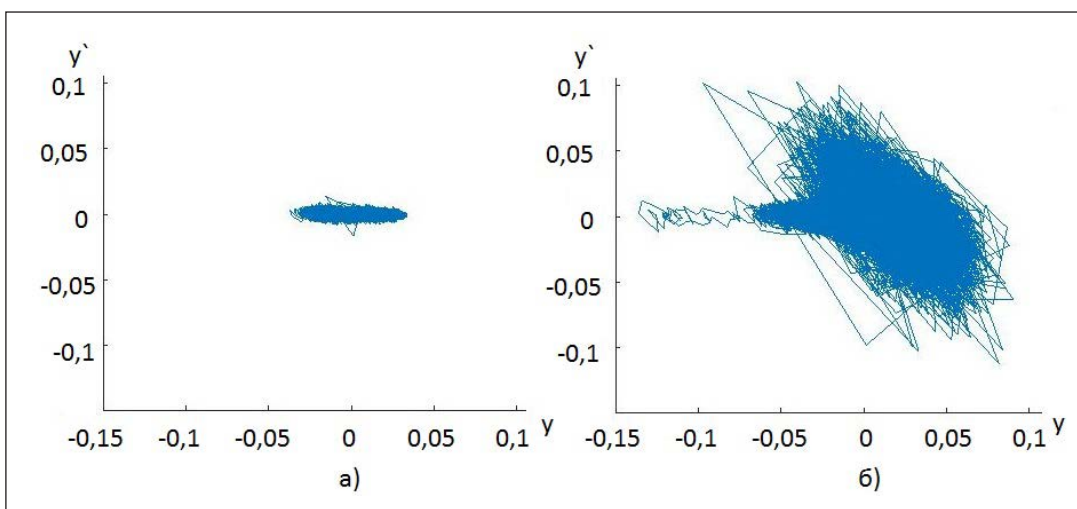


Рис. 5. Представлення шуму двигуна у просторі «стан – швидкість»:
а) бездефектного двигуна; б) двигуна з дефектом випускного колектора

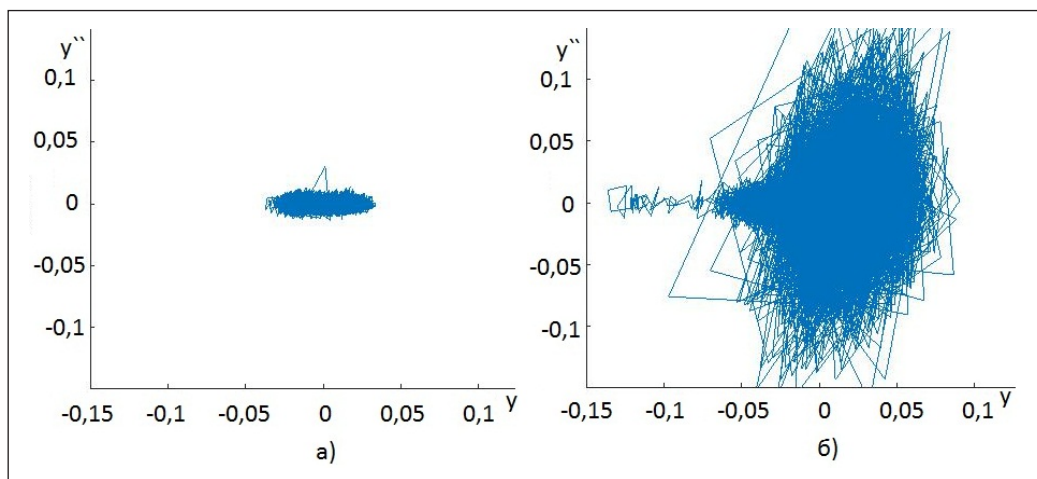


Рис. 6. Представлення шуму двигуна у просторі «стан – прискорення»: а) бездефектного двигуна; б) двигуна з дефектом випускного колектора

Отримані картини показують зміни не тільки структури, а й форми і масштабу, що представляється більш інформативним під час вивчення стану досліджуваних об'єктів.

Висновки. Використання зазначених засобів на додаток до штатної системи діагностування

несправностей двигуна, можливості якої обмежені використанням цільових датчиків системи моніторингу, може значно розширити можливості оцінювання стану для механічних систем і вивести її на новий якісний рівень із можливістю поглибленого аналізу роботи двигуна.

Список літератури:

1. Hamid Ghaderi, Peyman Kabiri Automobile engine condition monitoring using sound emission. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*. 2017. № 25. P. 1807–1826.
2. Wail M. Adaleh Engine Fault Diagnosis Using Acoustic Signals. *Progress in Environmental Protection and Processing of Resource*. 2013. № 2020. P. 295–298.
3. Suphattharachai Chomphan, Theerathan Kingrattanaset An analysis of sound for fault engine. *American Journal of Applied Sciences*. 2014. № 11(6). P. 1005–1009.
4. Dolatabadi N., Theodossiades S., Rothberg S.J. An investigation on impact -induced oscillations and noise in lubricated conjunctions. *26th International Conference on Noise and Vibration Engineering (Leuven, Belgium, 15-17 sep. 2014 y.)*. P. 1347–1359.
5. Смоленцев Н.К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB : навч. посіб. Москва : ДМКПресс, 2014. С. 19.
6. Мигаль В.П., Мигаль Г.В. Киберфизический подход к исследованию функционирования динамических систем. *Электротехнические и компьютерные системы*. 2016. № 22(98), С. 354–358.

Silevich V.Yu. THE PISTON ENGINE AND ITS UNITS STATE ANALYSIS WITH ACOUSTICAL SIGNAL OF THEIR WORK USAGE

The development of the automotive industry, together with the increasing requirements for safety, environmental friendliness and efficiency, require effective diagnostic methods of the car and its systems condition and malfunctions.

Under certain conditions, failure to maintain the vehicle and its components in a timely manner can endanger human and environmental safety. Such cases include, for example, the gradual destruction of the wheel bearing, the degradation of the plastic thrust bushing, and other critical faults, which are accompanied by the appearance of additional noise when operating the vehicle.

Due to the increasing complexity of vehicle units and their cost during repair, and even more so when replaced, constant monitoring of faults of elements, components and car systems will allow to quickly and effectively find and repair the damaged part, to detect disturbances in its operation even before leaving okay.

Automobile internal combustion piston engine, when their work, become a source of various sound vibrations generated from the movement of gases (air intake and exhaust), mechanical interaction of gears and cam mechanisms ending with the noise of additional units (vents, high pressure pump, etc.).

Since the engine is a device with many subsystems, and the operation of each such system will be accompanied by the generation of sound with a certain tone, frequency and phase. The speed of sound propagation has a certain value, which depends from the environment in which it propagates; so we can determine, in the presence of sound sensors installed in a certain way, the location of the signal source, and therefore the location and the specific mechanism or unit that needs maintenance or repair.

Therefore, the oscillations of the structure and the sound signals generated by the mechanical systems of the piston engine with the appropriate methods of their registration, processing and analysis can serve to determine their condition. Thus, the development of a system with non-destructive continuous condition monitoring of the car engine and its components, capable warning in advance of malfunctions, deviation from the normal mode of operation is quite an important task.

Key words: *acoustic signal, wavelet, Fourier transform, malfunction of mechanical system, piston engine.*