

УДК 629.424.1:621.319.4

ПРИЛЕПСЬКИЙ Ю.В., к.т.н., доцент (ДонІЗТ)

ГРИЦУК І.В., к.т.н., доцент (ДонІЗТ)

ДОРОШКО В.І., зав. лабораторією (ДонІЗТ)

ШАПОВАЛОВ К.С., студент (ДонІЗТ)

### **Визначення впливу режимів роботи дизельного двигуна внутрішнього згоряння на параметри сигналу вібродатчика**

Prylepskyi J.V., Ph.D., docent (DonIRT)

Grytsuk I.V., Ph.D., docent (DonIRT)

Doroshko V.I., Head of Laboratory (DonIRT)

Shapovalov K.S., student (DonIRT)

### **Determining the impact of modes of diesel engine of internal combustion on the signal from the vibration sensor**

---

#### **Актуальність**

Безперебійна робота тягового рухомого складу в значній мірі залежить від якості діагностики його вузлів і агрегатів. Одним з найскладніших агрегатів тепловозів є двигун внутрішнього згоряння. Але, детальна діагностика ДВЗ тягового рухомого складу здійснюється, головним чином, в рамках локомотивних депо при проведенні планових ремонтів і не дають повної картини стану ДВЗ в процесі експлуатації.

На базі дизель-генераторної установки кафедри «Рухомий склад залізниць» Донецького інституту залізничного транспорту проводяться дослідження якості роботи двигуна внутрішнього згоряння з використанням методу віброакустичної діагностики. Цей метод більш розповсюджений для діагностики автомобільних ДВЗ [1].

До переваг даного методу слід віднести: 1) відсутність коштовного устаткування; 2) відносну простоту методу діагностики; 3) інформативність методу; 4) можливість використання мікропроцесорних систем; 5) можливість передачі даних на віддалений сервер в режимі online.

---

#### **Мета роботи**

В рамках даної роботи визначалися наступні аспекти методу віброакустичної діагностики: 1) стабільність амплітуди вібросигналу при сталому режимі роботи ДВЗ; 2) залежність величини амплітуди вібросигналу від частоти обертання колінчастого валу; 3) вплив віддаленості циліндрів від датчику вібросигналу на величину його амплітуди.

---

#### **Основний матеріал**

Для реалізації досліджень використовували наступне устаткування.

Характеристики вібраційного датчику Д14.507 (див. рис. 1) представлені в таблиці 1, а кріплення датчику до головки блоку ДВЗ К461М1 (6ЧН12/14) показане на рисунку 2.

Для реєстрації та кількісної обробки вібросигналу застосовували двоканальний USB осцилограф «DiSCO-2», зовнішній вигляд якого наведений на рисунку 3.

Основні характеристики осцилографу представлені в таблиці 2.

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ



Рис. 1. Зовнішній вигляд датчика Д14.507 зі з'єднувальним екранованим дротом



Рис. 2. Вібродатчик Д14.507, встановлений на голівці блоку циліндрів ДВЗ К461М1



Рис. 3. Зовнішній вигляд USB осцилографу

Таблиця 1

Характеристики вібраційного датчика Д14.507

Найменування параметру	Значення параметру
Тип датчику	П'єзоелектричний
Коефіцієнт перетворення, мВ*с <sup>2</sup> /м	21
Електрична ємність, пФ (не більш)	1700
Вихідний опір, МОм	1,3
Нерівномірність амплітудно-частотної характеристики, %	10
Маса, кг	0,015

Таблиця 2

Головні характеристики USB осцилографу «DiSco-2»

Найменування параметру	Значення параметру
Точність вимірювань	1%
Рівень шуму	3-4 мВ
Вхідний імпеданс	1 МОм
Кількість каналів	2
Частота дискретизації	от 100 Гц (включені 2 канали); до 200 кГц (включений 1 канал)
Глибина пам'яті	
- читання через буфер	1126 або 563 відліків на канал (в 1 або 2-х канальному режимі)
- потокове читання	64К відліків на 1 канал
Діапазон вхідних напруг	от +-10 мВ до +-200В

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ

Розрядність АЦП	10 біт
Синхронізація	абсолютна по спадаючому/ наростаючому фронту; диференціальна по різниці між відліками; зовнішня по спадаючому/наростаючому фронту
Віконні функції	Блекмана-Харриса, Хамінга, Блекмана, Ханінга

Безпосередньо запис вібросигналу з USB осцилографу здійснювали на ПЕОМ (Netbook) моделі „Асер”. Інформаційний сигнал подавався до ПЕОМ через USB кабель. Живлення осцилографу здійснювалося через USB порт.

Для реєстрації положення поршня 1 циліндру у верхній мертвій точці на початку робочого ходу був розроблений і виготовлений електронно-механічний датчик, принципова схема якого наведена на рисунку 4.

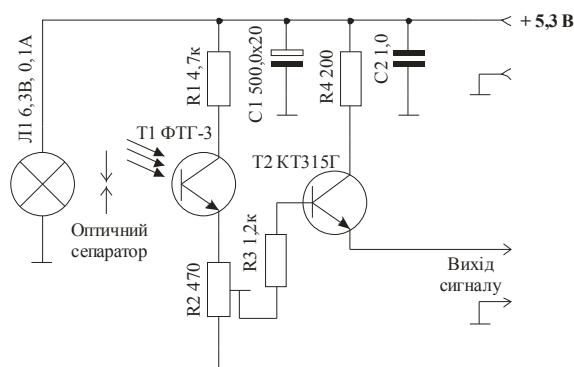


Рис. 4. Принципова схема датчику реєстрації положення поршня 1 циліндру у верхній мертвій точці на початку робочого ходу

Як видно із схеми, датчик складається із трьох головних частин:

- джерела променевої енергії, в якості якого виступає лампа накаливання Л1, що створює світловий потік безперервного спектру;

- оптичного сепаратора, що представляє з себе диск із сталеві фольги з прорізю на лінії проходження світлового потоку від джерела потоку до його приймача (фототранзистора Т1);

- перетворювача променевої енергії в електричний сигнал, що складається з фо-

тотранзистору Т1 та електронної схеми підсилювача струму на базі транзистору Т2, що ввімкнений по схемі емітерного повторювача.

Оптичний сепаратор встановлений на валу приводу паливного насосу високого тиску, а датчик верхньої мертвої точки (ВМТ) закріплений біля нього на корпусі (див. рис. 5).



Рис. 5. Кріплення оптичного датчику ВМТ поршня 1-го циліндру на приводі паливного насосу високого тиску

Стабільність амплітуди вібросигналу при сталому режимі роботи ДВС оцінювали за величиною розмаху амплітуди сигналу вібродатчика для робочого ходу 1-го циліндра. Для цього, після прогрівання ДВС, встановлювали частоту обертання колінчастого вала на рівні 1000 об/хв.

Усього було здійснено 30 послідовних замірів, на підставі яких розраховані середнє значення розмаху амплітуди вібросигналу першого циліндру та середньоквадратичне відхилення у представленій сукупності вимірів. Дані наведені у таблиці 3.

Для оцінки впливу частоти обертання колінчастого вала на величину амплітуди

сигналу вібродатчику встановлювали наступні швидкісні параметри роботи двигуна внутрішнього згоряння K461M1: 400, 1000, 1200 та 1500 об/хв.

Як і в попередньому експерименті, двигун спочатку прогрівали, потім встановлювали означені частоти обертання колінчастого валу і здійснювали запис осцилограм

рами вібросигналу з міткою верхньої мертвої точки для першого циліндру.

Вигляд осцилограми вібросигналу, записаної за допомогою цифрового USB осцилографу «DiSCO-2» для частоти обертання колінчастого валу двигуна внутрішнього згоряння 1000 об/хв. наведений на рисунку 6.

Таблиця 3

Результати замірів розмаху амплітуди вібросигналу при частоті обертання колінчастого валу 1000 об/хв.

Поточні величини сигналу вібродатчика, $U_n$ , В				
0,87	0,82	0,91	0,84	0,92
0,88	0,94	0,93	0,95	0,97
0,94	0,88	0,90	0,85	0,92
0,90	0,93	0,91	1,01	0,91
0,84	1,00	0,89	0,90	0,96
0,85	0,98	0,95	1,00	0,94
Показники стабільності вібросигналу				
$\bar{U} = \frac{\sum U_n}{n} = \mathbf{0,92}$			$\sigma_{n-1} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum (U_n - \bar{U})^2} = \mathbf{0,049}$	

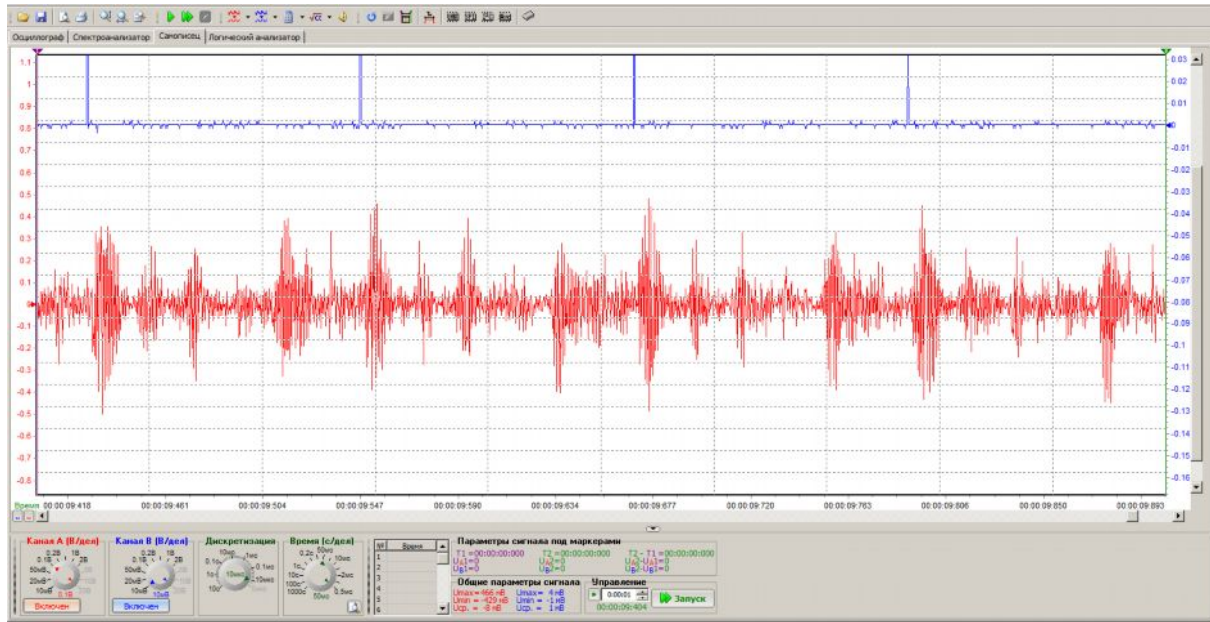


Рис. 6. Осцилограма вібросигналу, записана за допомогою цифрового USB осцилографу «DiSCO-2» для частоти обертання колінчастого валу двигуна внутрішнього згоряння 1000 об/хв.

По записаних осцилограмах здійснювали по 6 послідовних вимірів розмаху амплітуди вібросигналу для першого циліндру та обчислювали середнє значення. Результати замірів наведені на рисунку 7.

Як видно з наведеного рисунку, зі зростанням частоти обертання колінчастого валу двигуна внутрішнього згорання, амплітуда вібросигналу монотонно збільшується, що обумовлене зростанням тиску в камері згорання ДВЗ та динаміки механічних процесів в кривошипно-шатунному механізмі.

Для кількісної оцінки цієї залежності була здійснена алгебраїчна апроксимація отриманих результатів. Для апроксимації

використовували дві формульні залежності: поліноміальну та експоненціальну.

Ці залежності співпадають з характером графіку. Функція можливості апроксимації закладена в розрахунковому редакторі «Excel». В якості критерію точності теоретичної залежності використовували коефіцієнт детермінації моделі:

$$R^2 = 1 - \frac{\sigma^2}{\sigma_y^2}, \quad (1)$$

де  $\sigma^2$  - дисперсія випадкової помилки моделі.

Математичні залежності та коефіцієнти їх детермінації наведені поряд з відповідними кривими на рисунку 7.

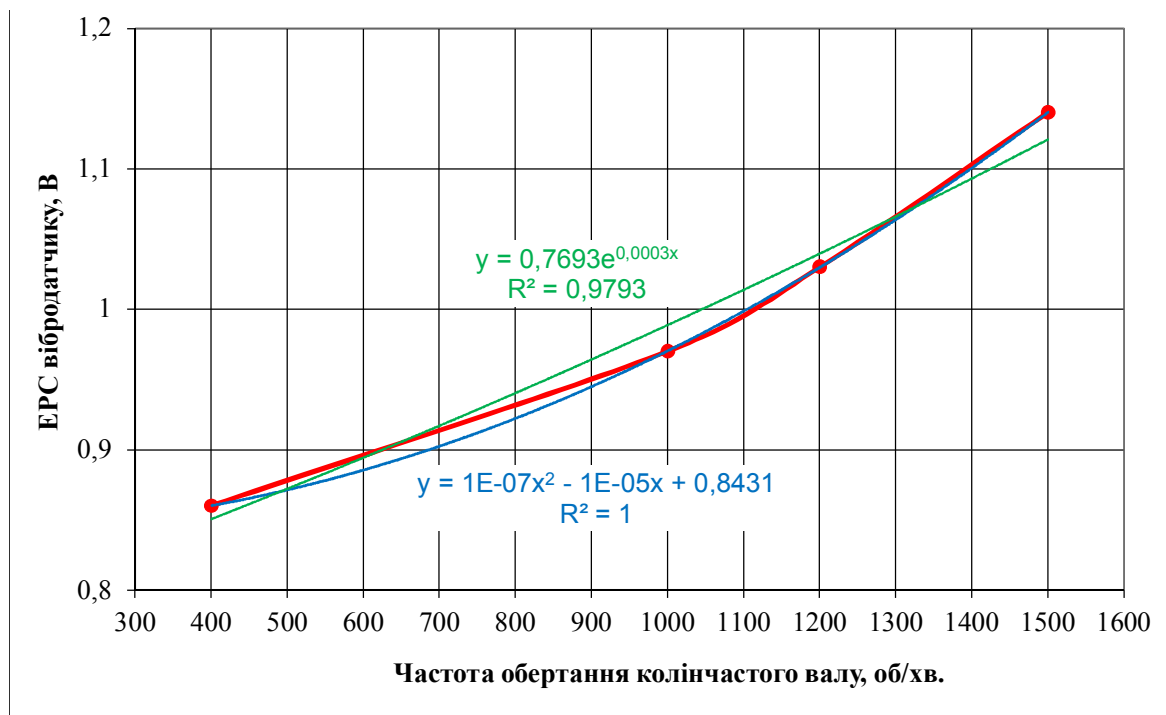


Рис. 7. Вплив частоти обертання колінчастого валу ДВЗ на розмах амплітуди вібросигналу

Виходячи зі значень коефіцієнта детермінації, більш адекватною є поліноміальна залежність, яку можна відобразити в досліджених координатах:

$$EPC = 10^{-7} n^2 - 10^{-5} n + 0,8431, \quad (2)$$

де  $n$  – частота обертання колінчастого валу, об/хв.

Отримавши математичну залежність можливо встановлювати межі нормальної роботи двигуна внутрішнього згорання з точки зору тиску в його циліндрах, керувати та налаштувати газорозподільчий та паливний механізми. При цьому, за умови керування двигуна мікропроцесорною системою, можливо забезпечувати автомати-

чне настроювання на оптимальні режими його роботи.

Окрім цього, спостереження зміни ЕРС вібродатчика протягом тривалого часу, дасть змогу прогнозування технічного стану двигуна внутрішнього згоряння на майбутні періоди та корегувати графіки його ремонтів, тим самим економити кошти ремонтних та експлуатаційно-ремонтних локомотивних депо і залізниці в цілому.

Віддаленість циліндрів, стан яких діагностується, від датчику неминуче впливає на амплітуду його сигналу, оскільки при проходженні зайвої відстані хвилі пружної деформації розсіюються та гасяться в матеріалі, що виступає звуковим проводом. В нашому випадку таким звуковим проводом виступає матеріал головки блоку циліндрів. Вібродатчик був закріплений на голівці блоку біля першого циліндру (див. рис. 2).

Дослідження проводили для частоти обертання колінчастого валу двигуна внутрішнього згоряння 1000 об/хв. Записана осцилограма була аналогічною зображеній на рисунку 6. При замірах враховували порядок роботи циліндрів двигуна внутрішнього згоряння K461M1: 1-5-3-6-2-4. Віброграму першого циліндру визначали за міткою його положення його поршня у верхній мертвій точці на початку робочого ходу. Всього проводили по 5 замірів розмаху амплітуди вібросигналу для кожного з циліндрів у п'яти послідовних циклах, записаних на осцилограмі, визначали їх середні значення, за якими будували графічну залежність.

Результати вимірів розмаху амплітуди для циліндрів наведені в таблиці 4, а графічна залежність розмаху амплітуди вібросигналу з різних циліндрів в геометричному порядку представлена на рисунку 8.

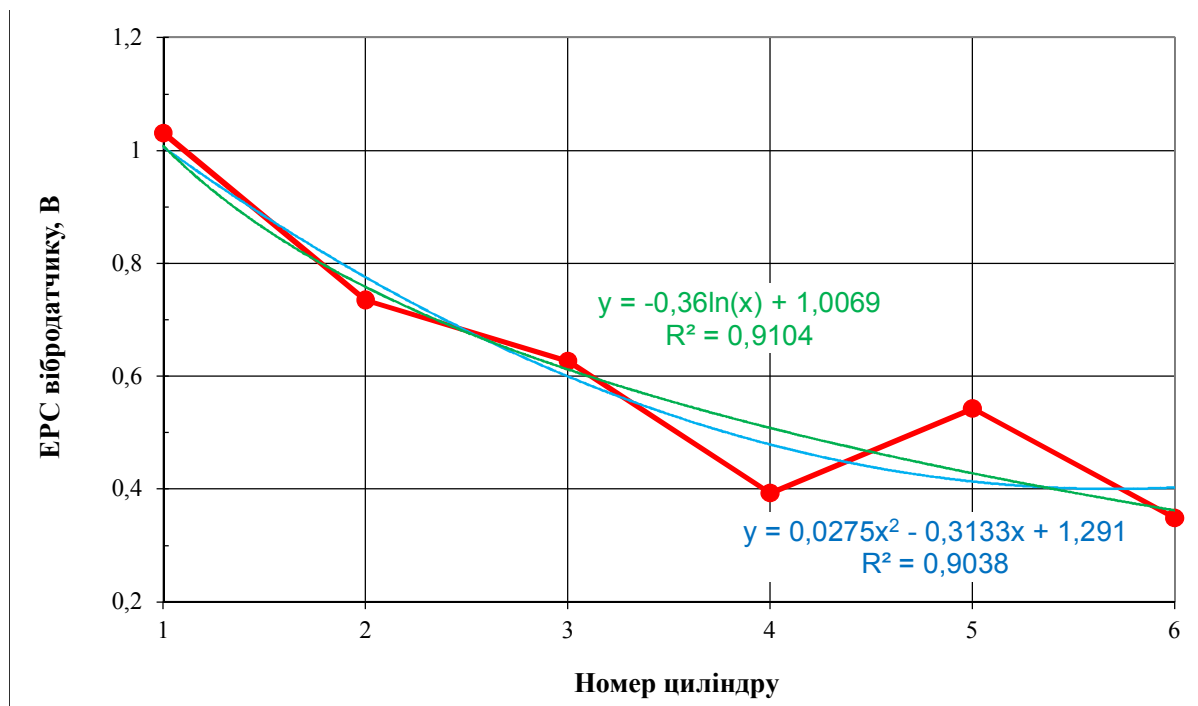


Рис. 8. Вплив віддаленості циліндру на розмах амплітуди вібросигналу



Результати визначення розмаху амплітуди вібросигналу по циліндрам двигуна внутрішнього згоряння K461M1

№ циліндру	Значення розмаху амплітуди по циклах, В					U <sub>сер.</sub> , В
	Цикл 1	Цикл 2	Цикл 3	Цикл 4	Цикл 5	
1	1,02	0,98	1,1	1,06	0,99	1,03
2	0,83	0,6	0,79	0,76	0,69	0,734
3	0,58	0,72	0,73	0,46	0,64	0,626
4	0,34	0,4	0,4	0,39	0,43	0,392
5	0,55	0,55	0,52	0,58	0,51	0,542
6	0,32	0,32	0,38	0,33	0,39	0,348

Як виходить з наведених результатів, зі зростанням віддаленості циліндру від вібродатчика, розмах амплітуди вібросигналу має тенденцію до зменшення, що цілком природно з урахуванням ефекту згасання і розсіювання пружних коливань у матеріалі.

Але, як можна спостерігати на графічній залежності рисунку 8, для вібросигналів від циліндрів 4 і 5 монотонність зміни розмаху амплітуди сигналу порушується: для 4-го циліндру спостерігається зниження амплітуди сигналу, а для 5-го - кілька підвищені значення ЕРС вібродатчика. При аналізі отриманих результатів нами розглядалися 2 основні версії даних відхилень: по-перше, це різний технічний стан циліндрових груп або недостатньо точно регулювання паливної апаратури; по-друге, це конструктивні особливості ДВЗ. Похибка методу була одразу виключена, оскільки за 5 послідовних циклів роботи ДВЗ збіжність результатів спостерігалася досить висока (див. табл. 4).

Для впевненості у достовірності наявного відхилення в роботі циліндрів та виключення впливу конструктивних факторів двигуна внутрішнього згоряння на величину амплітуди вібросигналу, для 4-го та 1-го циліндрів були здійснені порівняльні заміри тиску за допомогою максиметру. В результаті замірів тиску при частоті обертання колінчастого валу 1000 об/хв. були отримані наступні результати: для першого циліндру тиск склав 160 кгс/см<sup>2</sup> (15,7 МПа), для четвертого – 123 кгс/см<sup>2</sup> (12,1 МПа). В процентному співвідношенні таке зниження складає 23,1 %.

Для кількісної оцінки ефекту зниження розмаху амплітуди та співставлення цього зниження зі зменшенням тиску в 4 циліндрі була здійснена алгебраїчна апроксимація отриманих результатів. Для апроксимації використовували дві формульні залежності: поліноміальну та логарифмічну, оскільки характер кривої графіку на рисунку 8 найбільш підходить до вказаних математичних залежностей. Для наступного аналізу була обрана логарифмічна залежність, оскільки коефіцієнт детермінації цієї моделі був вищим за аналогічним показником поліноміальної моделі. В натуральних координатах цю математичну залежність можна відобразити у вигляді формули:

$$EPC = -0,36 \cdot \ln N + 1,0069, \quad (3)$$

де  $N$  – порядковий номер циліндру.

Відхилення показань розмаху амплітуди вібросигналу для 4-го циліндру оцінювали за формулою:

$$\Delta EPC = EPC_4^T - EPC_4, \quad (4)$$

де  $EPC_4^T$  - значення розмаху амплітуди вібросигналу для 4-го циліндру за формулою (3);

$EPC_4$  - експериментальне значення вібросигналу для 4-го циліндру (див. табл. 4).

Відносне відхилення розмаху амплітуди вібросигналу для 4-го циліндру визначали за формулою:

$$\delta = \frac{\Delta EPC}{EPC_4^T} \cdot 100\% = 22,8 \%, \quad (5)$$

що практично співпадає зі значенням відносного зниження тиску (23,1 %).

Це говорить про можливість застосування методу вібродіагностики для пошуку дефектів в роботі двигунів внутрішнього згоряння.

### Висновки

Дослідженнями показана можливість застосування методу вібродіагностики для контролю якості роботи двигунів внутрішнього згоряння; при сталій роботі двигуна внутрішнього згоряння спостерігається висока стабільність вібросигналу у часі.

Зі зростанням частоти обертання колінчастого валу та навантаження на валу ДВЗ амплітуда вібросигналу монотонно зростає.

Отримані математичні залежності амплітуди вібросигналу від параметрів роботи ДВЗ дозволяють у рамках бортової діагностичної системи постійно слідкувати за його технічним станом, прогнозувати якість роботи на наступні періоди та корегувати графіки ремонтів та їх об'єми.

### Список літератури:

1. Гассельберг В. С. Диагностика двигателей внутреннего сгорания автомобилей по виброакустическим параметрам [Текст] / В. С. Гассельберг, А. В. Запорожец // Вестник Астраханского ГТУ. – 2007. - № 2. – С. 72-74.
2. Прилепський Ю. В. Визначення залежності амплітуди вібросигналу від режиму роботи двигуна внутрішнього згоряння [Текст] / Ю. В. Прилепський, К. С. Шаповалов // Матер. 5-ї міжвузівської наук.- техн. конф. «Енерго- та ресурсозберігаючі технології при експлуатації машин та устаткування».- Донецьк, ДонІЗТ. – 2013. – С. 91-93.

### Spysok literatury:

1. Gasselberg V. S. Diagnostika dvigateley vnutrennego sgoraniya avtomobiley po vibroakusticheskim parametram [Tekst] / V. S. Gasselberg, A. V. Zaporojets // Vestnik Astrahanskogo GTU. – 2007. - № 2. – S. 72-74.
2. Prylepsyki J. V. Vznachennja zalegnosti amplitudi vibrosignalu vid regsmu roboti dviguna vnutrishnjogo zgorjannja [Tekst] / J. V. Prylepsyki, K. S. Shapovalov // Mater. 5-ji migvuzivskoj nauk.- techn. konf. «Energo- ta resursozberigajuchi tehnologii pri ekspluatatsii mashin ta ustatkuvannja».- Donetsk, DonIZT. – 2013. – S. 91-93.

### Анотації:

В роботі методами віброакустичної діагностики визначена залежність амплітуди вібросигналу від частоти обертання колінчастого валу дизельного двигуна внутрішнього згоряння, вплив віддаленості циліндрів від вібродатчика на його амплітуду, вплив навантаження на валу двигуна внутрішнього згоряння на амплітуду вібросигналу. Показана стабільність вимірів при сталому режимі роботи двигуна та можливість застосування методу для його діагностики.

**Ключові слова:** двигун внутрішнього згоряння, діагностика віброакустична, датчик п'єзоелектричний, запис вібросигналу, обробка статистична, залежність графічна, апроксимація

В работе методами виброакустической диагностики определена зависимость амплитуды вибрации от частоты вращения коленчатого вала дизельного двигателя внутреннего сгорания, влияние удаленности цилиндров от вибродатчика на его амплитуду, влияние нагрузки на валу двигателя внутреннего сгорания на амплитуду вибрации. Показана стабильность замеров при установленном режиме работы двигателя и возможность применения метода для его диагностики.

**Ключевые слова:** двигатель внутреннего сгорания, диагностика виброакустическая, датчик пьезоэлектрический, запись вибрации, обработка статистическая, зависимость графическая, аппроксимация

In this paper, methods of vibroacoustic diagnostics, the dependence of the amplitude of the vibrations from the engine speed diesel internal combustion engine, the influence of the distance from the cylinder vibration sensor on its amplitude, the effect



of load on the shaft of the internal combustion engine vibration amplitude. Shows the stability of measurements in steady-state operation of the engine and the possibility of applying the method for its diagnosis.

**Keywords:** internal combustion engine, diagnostics vibroacoustic, piezoelectric sensor, recording vibrations, processing statistical, dependence graphics, approximation