

ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА ВЗАИМОВРЪЗКАТА НА ВЪЗНИКВАЩИТЕ ВИБРАЦИИ В ЕЛАСТИЧНОТО ОКАЧВАНЕ НА ДВГ

Калоян ДИМИТРОВ

ka_dimitrov@tu-sofia.bg

катедра ММТ, ИПФ – Сливен, ТУ – София, Сливен 8800, България

Резюме

Известно е, че редица механизми, възли и агрегати, извършващи ротационни, трансляционни и възвратно-постъпателни движения създават вибрации с широк диапазон от параметри. Измерването и анализа на вибрациите са неизменна част от дейностите за текущ контрол и превантивна диагностика, както за ротационните, така и за буталните машини. В настоящата разработка е извършено експериментално изследване на взаимовръзката на вибрациите в еластичното окачване на двигател с вътрешно горене..

Keywords: *вибрации, превантивен контрол, диагностика, двигатели с вътрешно горене, техническо състояние*

1 Въведение

В съвременната диагностика и превантивен контрол на буталните и ротационните машини, вибрациите са едни от основните диагностични признаци. Опитното определяне и записване на амплитудите на трептенията са необходимо условие за ефективното им отстраняване, което успешно може да се осъществи чрез методите и средствата на експерименталната виброметрия [Севастакиев и др. 1986], [Ангелов и др. 1985], [Минчев и др. 1988], [Михайлов и др. 2016], [Кралов и др. 2022], [Йориш и др. 1963], [Brüel & Kjær 1982], [Brüel & Kjær 1984]. В редица разработки [N. S. Ahirrao et al. 2018], [R. Mamat et al. 2019], [A. R.Wargante et al. 2013], [F.Tomaszewski et al. 2012] авторите са представили експериментални изследвания свързани с измервания и анализ на вибрациите възникващи при работата на двигателите с вътрешно горене.

Предмет на настоящата разработка са възникващите вибрации в еластичното окачване на двигател с вътрешно горене.

Целта на експерименталното изследване е да се определи степента на корелация на възникващите вибрации между отделните опори на двигателя.

Осъществяването на целта се извършва етапно в последователност, която включва подбиране на място и точки за измерване на вибрациите, измерване и регистриране на стойностите на измерената величина при различни честоти на въртене на колянвия вал на двигателя, установяване на изменението на общата средно квадратичната стойност на виброскоростта в зависимост от промяната на честотата на въртене и извършване на корелационен анализ на получените експериментални данни.

2 Описание на опитната постановка

Обектът на изследване е три цилиндров редови бензинов двигател на лек автомобил Chevrolet–Spark II.

Измерването на вибрациите се осъществява посредством виброметър „PCE – ВТ 204”.

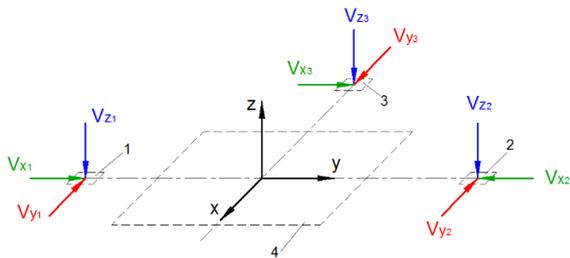
На фиг. 1 са показани обекта на изследване и измервателната техника за регистриране на стойностите на вибрациите.



Фиг. 1. Обект и средства за експериментални измервания

Измерванията са съсредоточени в окачването на двигателя. Сензорът за измерване се поставя на окачващите елементи преди вибро-изолиращия елемент.

На фиг. 2 са показани мястото и точките на измерване на вибрациите. Измерването се извършва в три точки по три направления: аксиално (x), радиално-горизонтално (y), и радиално-вертикално (z).



Фиг. 2. Място и направление на точките на измерване.

1, 2 и 3 – измервателни точки, 4 – двигател с вътрешно горене

3 Анализ и дискусия

За целите на експеримента е необходимо и достатъчно да се използва само един от параметрите характеризиращи вибрациите. Регистрирана е средноквадратичната стойност на виброскоростта ($V, mm/s RMS$) по направление на измерване (v_x, v_y и v_z) и измервателни точки (т. 1, т. 2 и т. 3).

В табл. 1 са представени измерените стойности на виброскоростта. Измерването е извършено при режим на двигателя на празен ход при различни честоти на въртене ($n = 900, 1500, 3000$ и 4600 min^{-1}). С v_{xyz} е означена общата стойност на вибрациите по направление на измерване, която се определя по зависимостта:

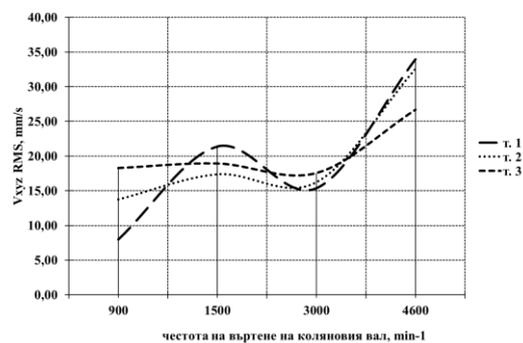
$$v_{xyz} = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \quad (1)$$

Табл. 1. Измерени стойности на виброскорост, RMS, mm/s

n, min ⁻¹	Измервателна точка Направление на измерване	т. 1	т. 2	т. 3
		v_x	3,2	0,7
900	v_y	4,8	12,3	11,7
	v_z	5,5	6,1	13,8
	v_{xyz}	7,97	13,75	18,26
	v_x	4,4	2,5	11,7
1500	v_y	6,7	13,7	12,9
	v_z	12,6	10,4	7,4
	v_{xyz}	21,38	17,38	18,92
	v_x	4,7	10,2	14,2
3000	v_y	8,2	13,8	8,3
	v_z	12,1	2,4	6,1
	v_{xyz}	15,35	16,23	17,54
	v_x	25,8	6,7	22,2
4600	v_y	10,8	17,2	11,3
	v_z	19,2	22	9,6
	v_{xyz}	33,93	32,61	26,70

От проведеното измерване се вижда, че стойностите на виброскоростта в радиално направление (по y и z) са по-големи от тези в аксиално, което е обуславя посоката на движение на звената от механизма. В радиално-вертикално направление (z) в повечето от точките на измерване са регистрирани най-големи стойности, спрямо другите.

На фиг. 4 е представено изменението на измерваната величина в зависимост от нарастването на честотата на въртене на колянвия вал на двигателя.



Фиг. 4. Изменение на общата средно квадратичната стойност на виброскоростта

В измервателна точка 1 се вижда, че изменението на виброскоростта в зависимост от повишаването на честотата на въртене на колянвия вал е доста по-динамично и ярко се

отличава от останалите. Това е предпоставка за изследване на степента на свързаност на възникващите вибрации в отделните опори на двигателя.

Табл. 3. Статистическа извадка за корелационен анализ

Измервателна точка Честота на въртене, min^{-1}	Обща стойност на виброскорост (V_{vib} , RMS , mm/s)		
	т. 1	т. 2	т. 3
	a	b	c
900	7,97	13,75	18,26
1500	21,38	17,38	18,92
3000	15,35	16,23	17,54
4600	33,93	32,61	26,70

Определянето на взаимовръзката се извършва чрез корелационен анализ. Статистическата извадка необходима за провеждане на анализа е представена в табл. 3. За удобство се приемат буквени означения вместо числови за измервателните точки, представени в таблицата.

Коефициента на корелация се изчислява по зависимост (2),

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{n \cdot s_x \cdot s_y} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (2)$$

където x и y са средната аритметична стойност на множествата x_i и y_i , s_x и s_y – стандартното отклонение на множествата x_i и y_i , което се определя по зависимостите:

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad \text{и} \quad s_y = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{n}}, \quad (3)$$

където n – броят на стойностите на x и y .

Коефициентът на корелация трябва да удовлетворява следното неравенство:

$$-1 \leq r_{xy} \leq +1 \quad (4)$$

За абсолютната стойност на коефициента на корелация съществуват някои емпирични правила, които могат да се използват при интерпретацията му, представени в табл. 5.

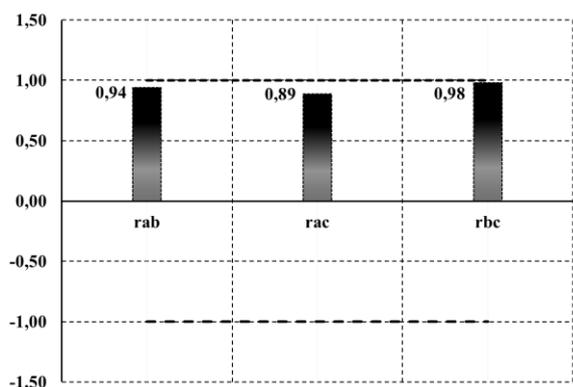
Табл. 4. Работна таблица за изчисляване коефициента на корелация

Γ_{ab}							
№	a_i	$a_i - \bar{a}$	$(a_i - \bar{a})^2$	b_i	$b_i - \bar{b}$	$(b_i - \bar{b})^2$	$(a_i - \bar{a})(b_i - \bar{b})$
1	7,97	-11,69	136,57	13,75	-6,24	38,99	72,97
2	21,38	1,72	2,96	17,38	-2,61	6,81	-4,49
3	15,35	-4,30	18,52	16,23	-3,76	14,14	16,18
4	33,93	14,27	203,59	32,61	12,61	159,13	179,99
	$\bar{a} = 19,66$		$\Sigma 361,63$	$\bar{b} = 19,99$		$\Sigma 219,07$	$\Sigma 264,65$
Γ_{ac}							
№	a_i	$a_i - \bar{a}$	$(a_i - \bar{a})^2$	c_i	$c_i - \bar{c}$	$(c_i - \bar{c})^2$	$(a_i - \bar{a})(c_i - \bar{c})$
1	7,97	-11,69	136,57	18,26	-2,09	4,38	24,45
2	21,38	1,72	2,96	18,92	-1,43	2,06	-2,47
3	15,35	-4,30	18,52	17,54	-2,81	7,92	12,11
4	33,93	14,27	203,59	26,70	6,34	40,19	90,46
	$\bar{a} = 19,66$		$\Sigma 361,63$	$\bar{c} = 20,36$		$\Sigma 54,55$	$\Sigma 124,55$
Γ_{bc}							
№	b_i	$b_i - \bar{b}$	$(b_i - \bar{b})^2$	c_i	$c_i - \bar{c}$	$(c_i - \bar{c})^2$	$(b_i - \bar{b})(c_i - \bar{c})$
1	13,75	-6,24	38,99	18,26	-2,09	4,38	13,06
2	17,38	-2,61	6,81	18,92	-1,43	2,06	3,74
3	16,23	-3,76	14,14	17,54	-2,81	7,92	10,58
4	32,61	12,61	159,13	26,70	6,34	40,19	79,98
	$\bar{b} = 19,99$		$\Sigma 219,07$	$\bar{c} = 20,36$		$\Sigma 54,55$	$\Sigma 107,36$

Табл. 5. Емпирични правила за интерпретация на корелационния коефициент

Стойност на r_{xy}	Големината на силата на зависимост
0,00 ÷ 0,30	слаба
0,31 ÷ 0,50	умерена
0,51 ÷ 0,70	значителна
0,71 ÷ 0,90	силна
0,91 ÷ 1,00	много силна

На фиг. 5 са изобразени графично получените корелационни коефициенти.



Фиг. 5. Изчислени коефициенти на корелация.

От графика на фиг. 5 се вижда, че r_{ab} , r_{ac} и r_{bc} са с много силна и силна зависимост.

В следствие на получените стойности за корелационните коефициенти r_{ab} , r_{ac} и r_{bc} са обект на проверка за потвърждаване на представената хипотезата.

За доказване на това твърдение за статистическата сигурност на изчислените коефициенти на корелация (r_{ab} , r_{ac} и r_{bc}) може да се направи чрез t – критерий (критерий на Стюдънт).

Изчислените емпирични стойности за критерия на Стюдънт са представени със зависимостите (5, 6 и 7):

$$t_{ab} = \frac{|r_{ab}|}{\sqrt{1-r_{ab}^2}} \cdot \sqrt{n-1} = 4,77 \quad (5)$$

$$t_{ac} = \frac{|r_{ac}|}{\sqrt{1-r_{ac}^2}} \cdot \sqrt{n-1} = 3,38 \quad (6)$$

$$t_{bc} = \frac{|r_{bc}|}{\sqrt{1-r_{bc}^2}} \cdot \sqrt{n-1} = 8,52 \quad (7)$$

Получените стойности за t_{ab} , t_{ac} и t_{bc} се съпоставят с таблични от таблици приложени в статистическата литература за степен на свобода $f = n - 1$, където ($n = 4$) е броят на

изследваните величини. Теоретичната стойност за критерия на Стюдънт при статистическа вероятност $S = 95\%$ и степени на свобода $f = 3$ е $t_T = 3,182$.

Следователно за изчислените коефициенти на корелация r_{ab} , r_{ac} и r_{bc} може да се твърди, че е налице пряка корелационна връзка, тъй като $t_{ab} = 4,77 > t_T = 3,182$; $t_{ac} = 3,38 > t_T = 3,182$; $t_{bc} = 8,52 > t_T = 3,182$

Въз основа на това хипотезата за линейна зависимост на статистическите показатели (виброскоростта) между точки на измерване a (т.1), b (т.2) и c (т. 3) се приема.

Заклучение

От направеното изследване се доказва твърдението, че възникващите вибрации във всички точки от окачването на изследвания обект имат количествена степен на свързаност.

Представеният подход и получените експериментални резултати предоставят възможност за изграждане на алгоритъм за определяне на текущото техническото състояние на еластичните опори на двигателя.

Резултатите от проведеното изследване могат да се използват, като показатели за определяне на контролни гранични стойности при извършване на превантивна диагностика на елементите от окачването на двигателя.

Доказаната на корелационната връзка между отделните точки в окачването предоставя възможност за вибро-контрол с минимален брой измервателни точки.

Този подход предоставя възможност за определяне на общото вибрационно поведение на двигателя.

ЛИТЕРАТУРА

- Ангелов, И., В. Овчаров, Вибрации и шум в транспортните средства, Техника, София, 1985.
- Йориш, Ю., Виброметрия, Москва, 1963.
- Кралов, И., Н. Минчев, Н. Минчев, Шум и вибрации, ТУ-София, София, 2022.
- Минчев, Н. В. Григоров, Вибро-диагностика на ротационни и бутални машини, Техника, София, 1988.
- Михайлов, В., Автореферат, Изследване излъчването на шум от автомобилни дизелови двигатели, Технически университет – Варна, Варна, 2016.

Севастикаев, В., В. Живков, Динамика и трептения на ДВГ, Техника, София, 1986.

Тонков, Т., Теория на вероятностите и математическа статистика, София, 2014.

A. R. Wargante, Dr. S. S. Gawade, Experimental Analysis Of Single Cylinder Diesel Engine, International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), ISSN: 2278-0181, Vol. 2 Issue 7, July – 2013

Brüel & Kjær, Measuring vibration, 1982.

Brüel & Kjær, Mechanical Vibration and Shock Measurements, 1984.

Franciszek Tomaszewski, Grzegorz M. Szymanski, Frequency Analysis of Vibrations of the Internal

Combustion Engine Components in the Diagnosis of Engine Processes, THE ARCHIVES OF TRANSPORT, VOL. XXIV NO 1 2012, 10.2478/v10174-012-0008-2

N. S. Ahirrao, Dr. S. P. Bhosle, Dr. D. V. Nehete, Dynamics and Vibration Measurements in Engines, 2nd International Conference on Materials Manufacturing and Design Engineering, Procedia Manufacturing 20 (2018) 434–439

R. Mamat, J.M. Zikri, N.F.D Razak, Munawir, Experimental investigation of vibrations and noise characterization for spark ignition engine, IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series **1262** (2019) 012014

Smith, M. J., Statistical Analysis Handbook, The Winchelsea Press, Winchelsea, UK, 2015

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE CORRELATION OF THE OCCURRING VIBRATIONS IN THE ELASTIC SUSPENSION OF INTERNAL COMBUSTION ENGINE

Kaloyan DIMITROV

ka_dimitrov@tu-sofia.bg

**Dept. of Department of Mechanical Engineering, Manufacturing and Thermal Engineering,
Faculty of Engineering and Pedagogy of Sliven,
Technical University – Sofia, Bulgaria,**

Abstract

It is known that a number of mechanisms, nodes and aggregates performing rotational, translational and reciprocating movements create vibrations with a wide range of parameters. Vibration measurement and analysis are an integral part of routine control and preventive diagnostics activities for both rotary and reciprocating machines. In the present work, an experimental study of the interrelationship of vibrations in the elastic suspension of an internal combustion engine (ICE) has been carried out. The object of the study is a three-cylinder gasoline engine. Statistical methods were used to process the experimental data. The presented approach and the obtained experimental results provide an opportunity to build an algorithm for determining the current technical condition of the engine's elastic supports. The research proves the statement that the vibrations occurring at all points of the suspension of the object under study have a quantitative degree of connectivity. The results of the conducted research can be used as indicators for determining control limit values when performing preventive diagnostics of the elements of the engine suspension. The proven correlation between individual points in the suspension provides the possibility of vibro-control with a minimum number of measurement points.

Keywords: *Vibrations, Preventive control, Diagnostics, Internal combustion engine, Technical condition*