

УДК 62-752.001.57

І.І. Сидоренко, д-р техн. наук, проф.,  
Є.П. Михайлов, канд. техн. наук, доц.,  
О.А. Ткачов, магістр

Одеський національний політехнічний університет, пр. Шевченка, 1, 65044 Одеса, Україна: e-mail: igs.ods@gmail.com

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОГАШУВАЧА КОЛИВАНЬ

*І.І. Сидоренко, Є.П. Михайлов, О.А. Ткачов. Експериментальне визначення динамічних характеристик погашувача коливань.* У сучасних наукових дослідженнях важливу роль відіграє один з видів предметного моделювання — фізичне моделювання. Даний вид моделювання проводиться на діючих лабораторних установках і експериментальних зразках реального об'єкта, який певним чином відображає реальні процеси в даному об'єкті. У роботі розглянуто експериментальне дослідження динамічних характеристик принципово нового пасивного динамічного погашувача коливань з розширеною механічною структурою. Наведено описання лабораторної установки, виміральної апаратури, засобів обробки вимірів. Представлено експериментальний зразок, програму проведення експерименту, результати експерименту. Проведено порівняльний аналіз динамічних характеристик пристрою, отриманих аналітично і експериментально, а також виконано статистичну оцінку достовірності проведення експерименту за критерієм Кохрена.

*Ключові слова:* експериментальне дослідження, погашувач коливань, динамічна характеристика, критерій Кохрена.

*I.I. Sydorenko, E.P. Mikhailov, O.A. Tkachev. Experimental determination of the dynamic characteristics of the vibrations damper.* One type of object modeling — physical modeling — plays an important role in modern scientific researches. This type of modeling is carried out on the existing laboratory equipment and experimental samples of a real object, which in some way reflects the actual processes in this facility. This article examines the experimental study of the dynamic characteristics of a fundamentally new passive dynamic vibrations damper with enhanced mechanical structure. Description of the laboratory setup, instrumentation, measurement processing means is shown. Experimental model, experiment program and results of experiments are presented. A comparative analysis of the dynamic characteristics of the device obtained analytically and experimentally is carried out, as well as statistical evaluation of the reliability of the experiment on the Cochran's Q test is performed.

*Keywords:* experimental study, vibrations damper, dynamic characteristic, Cochran's Q test.

**Вступ.** В сучасних наукових дослідженнях важливу роль відіграє один з видів предметного (реального) моделювання — фізичне моделювання. Цей вид моделювання відрізняється від натурного тим, що дослідження проводяться на діючих лабораторних установках і експериментальних макетах (зразках) реального об'єкта, який певним чином відображає реальні процеси в об'єкті, зберігаючи при цьому властивості подоби. При цьому звичайно експериментальний зразок і реальний об'єкт мають одну і ту ж природу, причому експериментальний зразок функціонує на основі тих самих принципів і фізичних явищ, що і реальний об'єкт.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Попередньо проведені дослідження, що мали на меті науково обґрунтований синтез принципово нового динамічного погашувача коливань з розширеною механічною структурою, дозволили розробити як саму конструкцію даного пристрою, так і його математичну модель [1, 2]. Однак досі адекватність математичної моделі її фізичному аналогу не визначена. Це унеможливує оцінку адекватності подальших аналітичних досліджень динамічних процесів, що виникають у механічній системі при застосуванні у її складі розробленого пристрою.

Базуючись на результатах комп'ютерного 3D-моделювання і розрахунків, визначені матеріали складових елементів і розроблено робочі креслення, згідно з якими виготовлено експериментальний зразок погашувача коливань, структура якого розширена шарнірно важільним ме-

DOI 10.15276/opu.2.46.2015.06

© 2015 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

ханізмом. Конструктивні рішення, отримані за допомогою комп'ютерного моделювання, відтворені у експериментальному зразку без змін. Слід зазначити, що виготовлений експериментальний зразок погашувача може працювати у двох режимах: без системи управління (шарнірно-важільний механізм від'єднаний); з системою управління (шарнірно-важільний механізм під'єднаний).

Таким чином, невирішеними є експериментальне визначення динамічних характеристик розробленого пристрою і його порівняльний аналіз з динамічними характеристиками, отриманими аналітично.

**Метою дослідження** є експериментальне визначення динамічних характеристик погашувача коливань. Для досягнення мети необхідно провести: апробацію створеної лабораторної установки у вигляді навантажувально-вимірювального комплексу; експериментальне визначення динамічних характеристик експериментального зразка запропонованого погашувача з розширеною механічною структурою за умови відключення системи управління; порівняльний аналіз отриманих експериментальних динамічних характеристик з динамічними характеристиками, отриманими аналітично; статистичну оцінку достовірності проведення експерименту.

**Викладення основного матеріалу.** Для досягнення мети дослідження створено навантажувально-вимірювальний комплекс, який складається з навантажувальної (механічної) і вимірювальної (електронної) частин (рис. 1).

Навантажувальна система — це механічний прес ДМ30А з рухомою нижньою платформою 1, на яку встановлюється й закріплюється експериментальний зразок ЕЗ. Максимальне зусилля стискання (розтягування), що розвивається пресом становить 20 кН, швидкість підйому (опускання) рухомої нижньої платформи  $v_n$  становить 0,00068 м/с (висота підйому  $S=130$  мм, час підйому  $t=191$  с). На верхній опорній балці преса змонтована почіпка 2, яка призначена для закріплення вимірювальної апаратури.

Вимірювальний комплекс в залежності від типу завдання, може складатися з механічного динамометра або з тензодатчика 3. У випадку застосування механічного динамометра його показники зчитуються візуально. Зважаючи на те, що вимірювання механічним динамометром є ефективним лише при відсутності руху, його застосування зумовлене тільки визначенням силових характеристик пружних елементів. У випадку динамічних випробувань застосовано тензодатчик ГСП 1909 ДСТ-1,0 ГОСТ 15077-78 з діапазоном вимірювання від 0 до 1000 Н, який поєднано з відповідним перетворювачем його сигналів 4 для подальшого відображення і запису результатів вимірювань на ПК 5.

Рівень вихідного сигналу з тензометричного датчика складає десятки мілівольт, наприклад, при номінальному показнику 2 мВ/В і напрузі живлення 20 В рівень вихідного сигналу дорівнює 40 мВ для номінального навантаження. Саме тому застосовано модуль аналогового введення сигналів SM 331, для якого діапазон вхідних сигналів становить від  $-80$  мВ до  $+80$  мВ, що дозволяє використовувати його для вимірювання таких рівнів сигналів.

Модуль SM 331 має інтегруючий аналогово-цифровий перетворювач, який дозволяє вимірювати з роздільною здатністю 9 біт +1(знак) / 12 біт +1(знак) / 14 біт +1(знак) з відповідним часом інтеграції 2,5 мс / 20 мс / 100 мс. При цьому цифрове значення, що отримується для максимального значення діапазону, складає 27648 одиниць без урахування округлення. Для різних значень роздільної здатності після округлення виходять такі значення: для 9 біт +1(знак) — 432 одиниці, для 12 біт +1(знак) — 3456 одиниць, для 14 біт +1(знак) — 13824 одиниці для максимального значення діапазону. При часі інтеграції 20 мс, який дає можливість здійснювати до 50

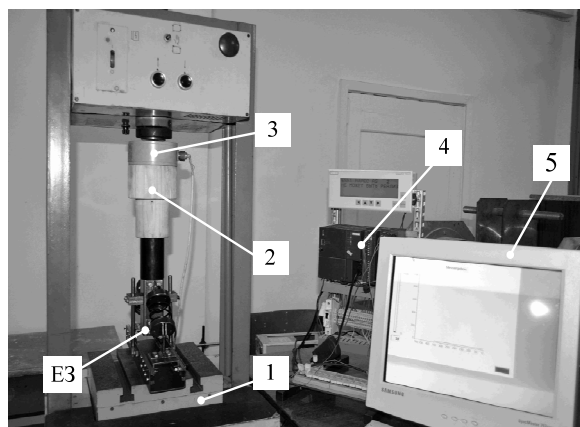


Рис. 1. Навантажувально-вимірювальний комплекс

вимірювань за секунду і ефективно усуває перешкоди від мережі 50 Гц, для датчика з рівнем вихідного сигналу 40 мВ, для номінального навантаження отримуємо роздільну здатність 1728 одиниць або похибку 0,06 %.

Модуль аналогових входів SM 331 з вказаним діапазоном вхідних сигналів може мати вісім або два входи, згрупованих по два. При цьому всі налаштування робляться для всієї групи. Аналогово-цифровий перетворювач безперервно по черзі опитує всі входи і результат опитування поміщає до внутрішньої пам'яті модуля. При опитуванні необхідного входу процесорний модуль опитує відповідний елемент пам'яті. Для здобуття максимальної швидкості опитування необхідно подавати сигнал на обидва входи групи і опитувати їх по черзі. На рис. 2, а наведена схема підключення тензометричного датчика до модуля аналогових входів. При цьому використовується чотирипровідне підключення із зовнішнім джерелом живлення датчика.

Результати опитування передаються з програмованих логічних контролерів (ПЛК) в комп'ютер для подальшої обробки. Для виключення впливу на швидкість опитування каналу передачі даних з ПЛК в комп'ютер необхідна кількість результатів вимірювань зберігається в пам'яті ПЛК у вигляді блока даних, який потім передається в комп'ютер. На рис. 2, б наведена блок-схема запису послідовних вимірювань у блок даних ПЛК.

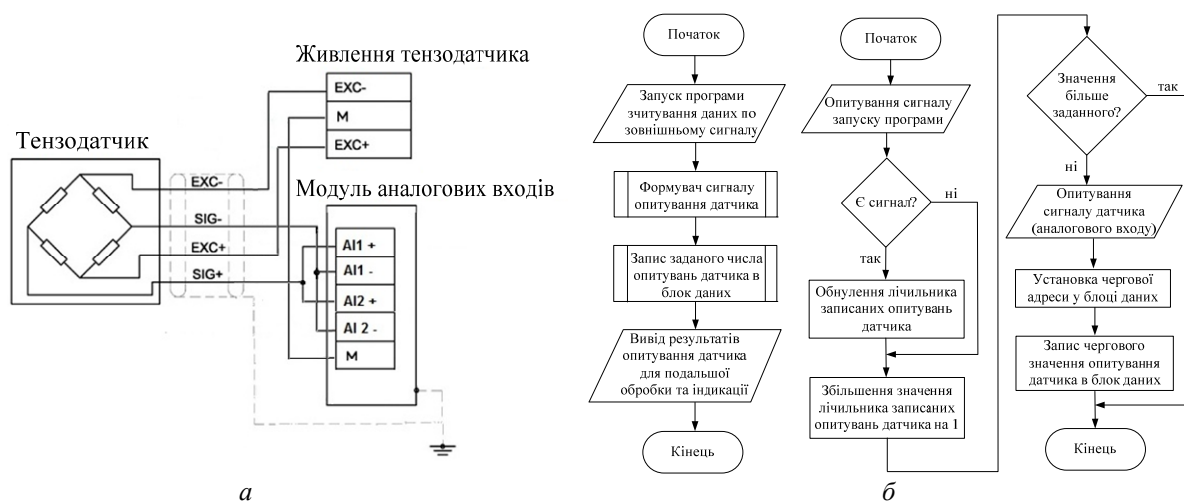


Рис. 2. Електронна частина вимірювального комплексу: схема підключення тензометричного датчика до модуля аналогових кодів (а); блок-схема запису послідовних вимірювань у блок даних програмованих логічних контролерів (б)

Для проведення експериментальних досліджень запропоновано використати зразок динамічного погашувача коливань з від'єднаною системою управління та закріпленими рухомими каретками. У цьому випадку, як показали аналітичні дослідження, експериментальний зразок являє собою відомий пасивний погашувач коливань з нелінійною динамічною характеристикою [2]. Загальний вираз, що зумовлює динамічну характеристику розробленого пристрою,

$$F(x)_{\text{пр}} = nc \left[ l - \sqrt{(l_x - x)^2 + (l_y + (\sqrt{b^2 - (b_x - x)^2} - b_y))^2} \right] \frac{l_x - x}{l_y + (\sqrt{b^2 - (b_x - x)^2} - b_y)}, \quad (1)$$

де  $l$  — довжина пружини;

$l_x$  — проекція довжини пружини на площину, що проходить через вертикальну вісь пристрою;

$x$  — переміщення рухомої частини;

$l_y$  — проекція довжини пружини на площину, що є перпендикулярною до вертикальної осі пристрою;

$b$  — довжина важеля системи управління;

$b_x$  — проекція довжини важеля на площину, що проходить через вертикальну вісь пристрою;

$b_y$  — проекція довжини важеля на площину, що є перпендикулярною до вертикальної осі пристрою (рис. 3, а).

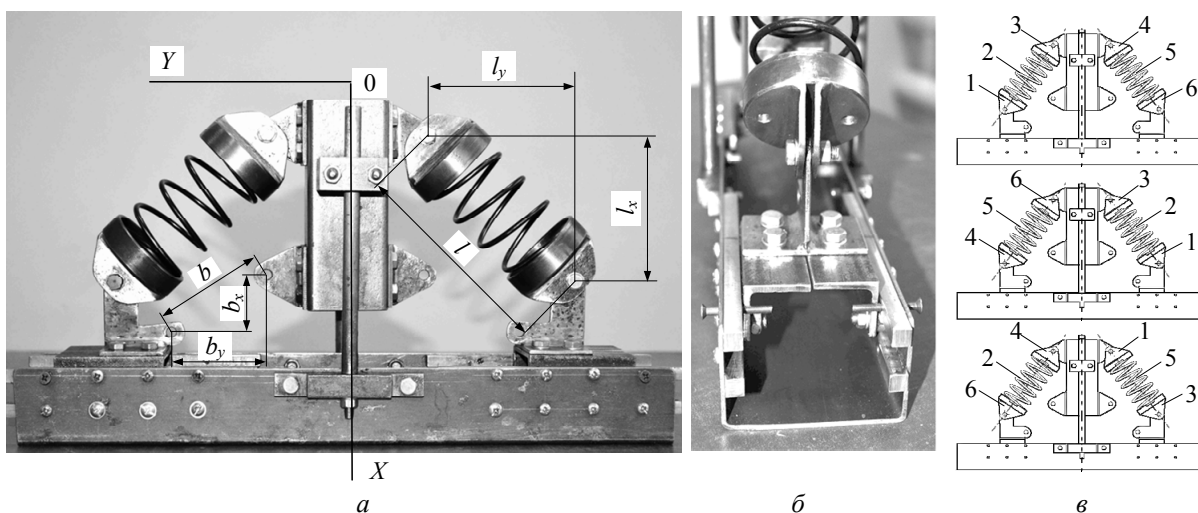


Рис. 3. Експериментальний зразок: загальний вигляд (а); кріплення каретки (б); варіанти складання елементів пристрою для забезпечення серійності випробувань (в)

За умови від'єднання системи управління на основі виразу (1) отримано

$$F(x)_{\text{пр}} = nc \left[ l - \sqrt{(l_x - x)^2 + l_y^2} \right] \frac{l_x - x}{l_y}. \quad (2)$$

Оцінювання достовірності експерименту напряму залежить від кількості застосованих у ньому експериментальних зразків [3]. Враховуючи обмежений бюджет, запропоновано створити відповідну кількість зразків шляхом складання елементів погашувача у різному порядку. Таким чином у експерименті застосовано три зразки (рис. 3, в).

Для обробки результатів проведених досліджень запропоновано використати статистику малої вибірки [3...5]. Середнє арифметичне отриманих експериментальних значень динамічної характеристики

$$\bar{F} = \frac{1}{j} \sum_{i=1}^j F_i,$$

де  $F_i$  — значення динамічної характеристики окремих зразків;  
 $j$  — об'єм вибірки.

Дисперсія для кожної серії вимірів

$$D = \sigma^2 = \frac{1}{j} \sum_{i=1}^j (F_i - \bar{F})^2.$$

Достовірність результатів проведених експериментів оцінювалась за значенням розрахункового критерію Кохрена, що порівнюється з його табличним значенням, яке відповідає довірчій імовірності [3...5]

$$G_{\max} = \frac{\max D_j}{\sum_{i=1}^j D_i} \leq G_{\alpha},$$

де  $\max D_j$  — найбільше значення дисперсії для  $j$  паралельних серій;

$\sum_{i=1}^j D_i$  — сума дисперсій  $j$ -ї серії.

**Результати.** Експериментальні дослідження проведено на зразках з геометричними параметрами: коефіцієнт жорсткості пружини  $c=70$  Н/м (отримано експериментально); початкова довжина пружини  $l=140$  мм; максимальний робочий хід  $x_{\max}=70$  мм.

Розрахунок зміни робочого ходу  $x$  проведено за часом експерименту (повний цикл навантаження  $t=102,9$  с) за виразом

$$x = v_{\text{п}} t.$$

Контрольованих точок — п'ять; кількість вимірювань по кожній з п'яти контрольованих точок — п'ять; кількість паралельних серій — три.

Результати випробувань, які зумовлюють динамічну характеристику для експериментальних зразків з від'єднаною системою управління фіксувалися вимірювальним комплексом з подальшим записом інформації у відповідний файл (рис. 4, а), а після обробки були апроксимовані по середньому арифметичному значенню (рис. 4, б).

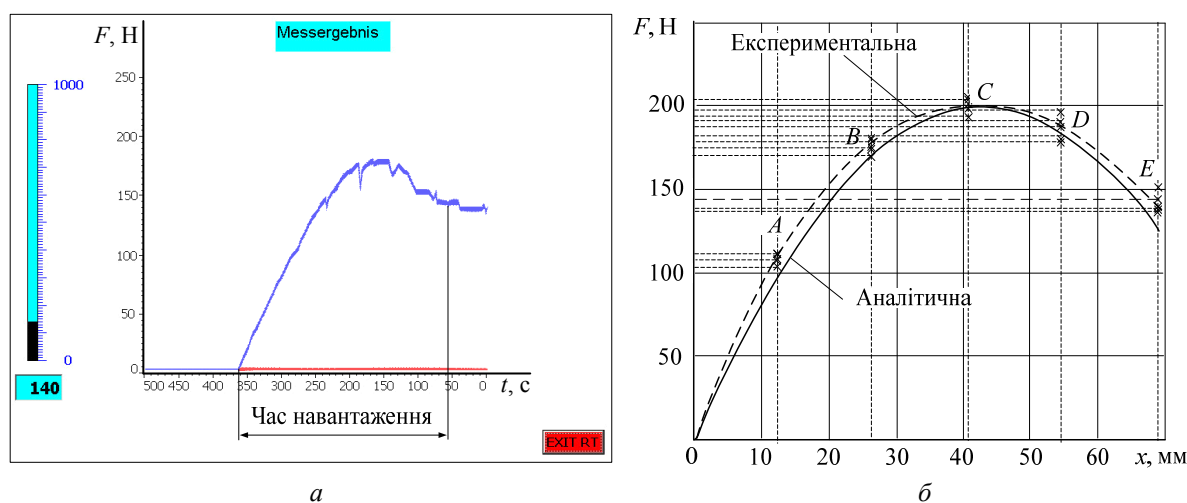


Рис. 4. Динамічна характеристика погашувача: вікно графічного відображення даних WinCC flexible, друга серія випробувань, другий зразок (а); обробка експериментальних даних (б), розрахованих аналітично (1) і отриманих експериментально (2)

Порівняльний аналіз отриманої за апроксимованими даними експериментальної характеристики проведено з динамічною характеристикою, розрахованою аналітично за виразом (2). Похибка аналітичних і експериментальних даних у п'яти контрольованих точках лежить у межах 3...12 %.

Для перевірки достовірності експерименту виконані відповідні розрахунки критерію Кохрена (табл. 1).

У відповідності до виразу (3) максимальне розрахункове значення критерію

$$G_{\max} = \frac{24,684}{7,541 + 24,684 + 13,407} = 0,5409$$

отримане при визначенні величини динамічної характеристики у точці А, яка зумовлює переміщення рухомої частини погашувача  $x = 12,3$  мм. Табличне значення критерію Кохрена, що відповідає довірчій вірогідності 0,95 для кількості паралельних серій 3 при кількості ступенів вільності  $q = j - 1 = 5 - 1 = 4$ , дорівнює 0,746 [3]. Оскільки у цьому і всіх інших випадках вимірювань виконувалася умова  $G_{\max} \leq G_{\alpha}$ , то результати експериментів признані достовірними.

Таблиця 1

Статистична оцінка достовірності експериментальних даних за критерієм Кохрена

Точка на динамічній характеристиці	Номер зразка	Виміри значення сили у одній серії, Н					Результати обробки		
		1	2	3	4	5	$\bar{F}$	$D = \sigma^2$	$G_{\max}$
A	I	98,20	100,01	97,03	105,01	100,90	100,23	7,54132	0,54093152
	II	109,89	106,04	98,97	114,01	106,27	107,04	24,6842	
	III	103,42	109,04	103,99	101,20	97,88	103,11	13,4073	
B	I	174,32	170,81	168,96	167,65	170,12	170,37	5,04902	0,45241173
	II	176,01	169,97	170,42	169,74	174,04	172,04	6,39202	
	III	168,95	171,04	173,03	169,90	173,02	171,19	2,68774	
C	I	201,05	198,85	200,01	204,03	201,92	201,17	3,0969	0,41230954
	II	199,89	202,04	201,67	201,4	198,96	200,79	1,37358	
	III	200,87	203,04	198,99	197,89	199,52	200,06	3,13638	
D	I	178,84	182,04	186,02	188,42	190,00	185,06	16,8847	0,43975962
	II	181,32	190,75	189,56	179,51	182,04	184,64	21,1275	
	III	182,73	180,99	189,73	182,08	181,94	183,49	10,0311	
E	I	139,56	140,24	141,52	140,87	139,85	140,41	0,50174	0,49991348
	II	141,47	142,04	140,01	139,95	140,05	140,7	0,7699	
	III	140,25	138,97	137,99	140,21	141,23	139,73	1,2712	

**Висновки.** В результаті проведених експериментальних досліджень апробовано створений навантажувально-вимірювальний комплекс, отримано експериментальні дані. При цьому встановлено що:

— розроблена математична модель запропонованого погашувача коливань адекватно відображає динамічну характеристику, відтворену його експериментальним зразком, про що свідчить порівняльний аналіз результатів аналітичних і експериментальних досліджень;

— похибка між аналітичними і експериментальними значеннями динамічної характеристики у межах 3...12 % може бути пояснена тим, що запропонована математична модель не враховує у повному обсязі тертя у кінематичних парах;

— параметр дисипації може бути визначений експериментально і введений у вигляді відповідної складової до розробленої математичної моделі, що покращить її точність;

— за статистичною оцінкою достовірності експериментальних даних за критерієм Кохрена отримані експериментальні дані можна вважати достовірними.

### Література

1. Сидоренко, І.І. Використання пасивного пружного пристрою з механічним зворотним зв'язком як пружинного динамічного погашувача коливань / І.І. Сидоренко, А.В. Ткачов, А.А. Ткачов // Пр. Одес. політехн. ун-ту. — 2012. — Вип. 2(39). — С. 21 — 27.
2. Сидоренко, І.І. Динамічні характеристики пружинного погашувача коливань розширеної структури / І.І. Сидоренко, О.А. Ткачов, К.Г. Мосієнко // Пр. Одес. політехн. ун-ту. — 2013. — Вип. 2(41). — С. 54 — 58.
3. Сухорученков, Б.И. Анализ малой выборки. Прикладные статистические методы: монография / Б.И. Сухорученков. — М.: Вузовская книга, 2010. — 384 с.
4. Лемешко Б.Ю. О применении и мощности критериев проверки однородности дисперсий. Ч.І. Параметрические критерии / Б.Ю. Лемешко, С.Б. Лемешко, А.А. Горбунова / Измерительная техника. — 2010. — № 3. — С. 10 — 16.
5. Лемешко Б.Ю. О применении и мощности критериев проверки однородности дисперсий. Ч.ІІ. Непараметрические критерии / Б.Ю. Лемешко, С.Б. Лемешко, А.А. Горбунова / Измерительная техника. — 2010. — № 5. — С. 11 — 18.

---

**References**

1. Sydorenko, I.I., Tkachev, A.V. and Tkachev, A.A. (2012). Use of passive vibroisolating device with mechanical feedback as a spring dynamic extinguisher of vibrations. *Odes'kyi Politechnichnyi Universytet. Pratsi*, 2, 21-27.
2. Sydorenko, I.I., Tkachev, A.A. and Mosyenko, K.G. (2013). Dynamic descriptions of a spring vibration damper of the extended structure. *Odes'kyi Politechnichnyi Universytet. Pratsi*, 2, 54-58.
3. Sukhoruchenkov, B.I. (2010). *Analysis of Small Sample: Applied Statistical Methods*. Moscow: Vuzovskaya kniga.
4. Lemeshko, B.Yu., Lemeshko, S.B. and Gorbunova, A.A. (2010). Application and power of criteria for testing the homogeneity of variances. Part I. Parametric criteria. *Measurement Techniques*, 53(3), 237-246.
5. Lemeshko, B.Yu., Lemeshko, S.B. and Gorbunova, A.A. (2010). Application and power of criteria for testing the homogeneity of variances. Part II. Nonparametric criteria. *Measurement Techniques*, 53(5), 476-486.

Надійшла до редакції 10 березня 2015 р.