

УДК 534.647

DOI: 10.15587/1729-4061.2014.27818

*В роботі описано розроблену авторами інформаційно-вимірювальну систему діагностики демпфувальних характеристик гасників рухомого складу. Наведено методикку проведення випробувань по визначенні демпфувальних характеристик та алгоритми розрахунку параметрів демпфування. Представлено результати апробації системи в ході випробувань локомотиву ЧС-8 та пасажирського вагону*

*Ключові слова: інформаційно-вимірювальна система, діагностика, рухомий склад, логарифмічний декремент затухання, демпфування*

*В работе описана разработанная авторами информационно-измерительная система диагностики демпфирующих характеристик гасителей подвижного состава. Приведена методика проведения испытаний по определению демпфирующих характеристик и алгоритмы расчета параметров демпфирования. Представлены результаты апробации системы в ходе испытаний локомотива ЧС-8 и пассажирского вагона*

*Ключевые слова: информационно-измерительная система, диагностика, подвижной состав, логарифмический декремент затухания, демпфирования*

# РОЗРОБКА СИСТЕМИ ДІАГНОСТИКИ ДЕМПФІРУВАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГАСНИКІВ КОЛИВАНЬ РУХОМОГО СКЛАДУ

**В. С. Єременко**

Кандидат технічних наук, професор\*

E-mail: nau\_307@ukr.net

**П. А. Шегедін**

Аспірант\*

E-mail: vermat@i.ua

**А. В. Переїденко**

Аспірант\*

E-mail: zoolkis@meta.ua

\*Кафедра інформаційно-вимірювальних систем  
Національний авіаційний університет,  
пр. Комарова, 1, м. Київ, Україна, 03680

## 1. Вступ

Діагностика та контроль технічного стану об'єктів залізничного транспорту є невід'ємним атрибутом його функціонування, адже завдяки всебічному контролю досягається необхідний рівень надійності, безпеки та стабільності перевезень вантажів та пасажирів. Важливим параметром технічного стану тягово-рухомого складу, що визначає комфортні показники та впливає на безпеку руху залізничного транспорту, є ефективність роботи гасників коливань, що використовуються для поліпшення динамічних якостей рухомої одиниці за рахунок використання демпфувальних властивостей елементів їхньої будови. Гасники коливань призначені для створення сил, що забезпечують усунення або зменшення амплітуди коливань надресорної частини. На коліях України найбільш широке розповсюдження отримали гідравлічні та фрикційні гасники коливань. Принцип дії гідравлічних гасників полягає в послідовному переміщенні в'язкої рідини під дією розтягуючих або стискаючих сил за допомогою поршневої системи з однієї порожнини циліндра в іншу. У фрикційних гасників коливань сили тертя виникають при вертикальному і горизонтальному переміщеннях клинів гасителя.

Моніторинг та діагностика технічного стану об'єктів рухомого складу значно підвищує економічну ефективність експлуатації залізничного транспорту та допомагає перевізникам застрахувати себе від нещасних випадків на залізниці та поломок під час експлуатації.

Але, незважаючи на велику різноманітність систем діагностики якості роботи гасників коливань при стендових випробуваннях в ДЕПО, неможливо достовірно дослідити та спрогнозувати поведінку об'єкта діагностики в умовах експлуатації.

## 2. Аналіз літературних джерел та постановка проблеми

Актуальною задачею є розробка інформаційно-вимірювальної системи для діагностики гасників коливань рухомого складу в умовах наближених до експлуатаційних. Вирішення даної задачі дозволить комплексно оцінити як роботу конкретного гасника, так і інтегральний показник демпфування надресорної частини одиниці рухомого складу. На відміну від стендових випробувань, при діагностиці гасників, на рухомій одиниці враховуються реальні сили, що діють на об'єкт діагностики. Нажаль, в діючих нормативних документах, що визначають основні вимоги до проведення випробувань тягово-рухомого складу [1, 2] наведено лише основні рекомендації щодо вибору методу обробки та умов проведення динамічних приймальних випробувань, але відсутні рекомендації по здійсненні спеціальних випробувань по визначенні демпфувальних характеристик при скиданні об'єкту рухомого складу з клинів. Дані параметри пропонуються визначати при динамічних випробуваннях разом з іншими показниками функціонування об'єкту діагностики, такими як плавність

ходу, комфортність та при визначенні динамічних сил, що виникають на ключових вузлах конструкції. В [3] розглядаються питання вібродіагностики залізничного транспорту з визначенням параметрів, що опосередковано характеризують якість роботи гасників, однак не дозволяють визначити стан конкретного гасника. З ряду причин конструктивної будови та особливостей функціонування тягово-рухомого складу українських залізниць, необхідно здійснювати діагностику за спеціальними методиками. Таким чином, в програмі-методиці здійснення стаціонарних випробувань по скиданню з клинів рухомого складу [4], що розроблена в Державному науково-дослідному центрі залізничного транспорту України, описано метод діагностики демпфувальних характеристик одиниць рухомого складу. Однак описаний метод математичної обробки даних не забезпечує високого рівня точності вимірювань та потребує застосування програмної фільтрації. В працях [5, 6] наведено методи розрахунку логарифмічного декременту затухання в частотній та часових областях, однак застосування даних методів наводиться в галузях не пов'язаних з діагностикою залізничного транспорту. В праці [7] розглядаються питання визначення демпфувальних характеристик конструкцій на базі композитних матеріалів.

### 3. Мета та задачі дослідження

Метою дослідження було розробка високо точної інструментарію для діагностики демпфувальних характеристик гасників рухомого складу. Задачами дослідження, вирішення яких є обов'язковим для досягнення поставленої мети, було обрано: пошук оптимального методу здійснення діагностики гасників коливань надресорної частини, який забезпечив би високий рівень достовірності отриманих результатів; розробка програмного забезпечення системи та порівняльний аналіз використання різних методів визначення демпфувальних характеристик.

Необхідно було забезпечити універсальність застосування системи для діагностики демпфувальних характеристик будь-якої одиниці рухомого складу не зважаючи на фізичний принцип роботи гасників та тип надресорної частини. Система повинна забезпечувати можливість здійснювати аналіз демпфувальних характеристик в трьох можливих площинах коливань надресорної частини.

### 4. Опис системи діагностики демпфувальних характеристик гасників коливань рухомого складу

Розроблена авторами система діагностики демпфувальних характеристик гасників залізничного транспорту дозволяє визначати власну частоту коли-

вань конструкції, логарифмічний декремент коливань та параметр демпфування на основі реєстрації та аналізу сигналів віброприскорень з акселерометричних датчиків.

Для здійснення діагностики демпфувальних характеристик натурні випробування проводяться в місті експлуатації вагонів у відповідному депо, яке забезпечує нагляд за технічним станом вагону та сприяє проведенню випробувань[4].

Для реєстрації власних коливань надресорної конструкції будь-якої одиниці рухомого складу використовують датчики прискорень, які встановлюють на кузові та візках вагона/локомотива за схемами визначеними для ходових випробувань (рис. 1).

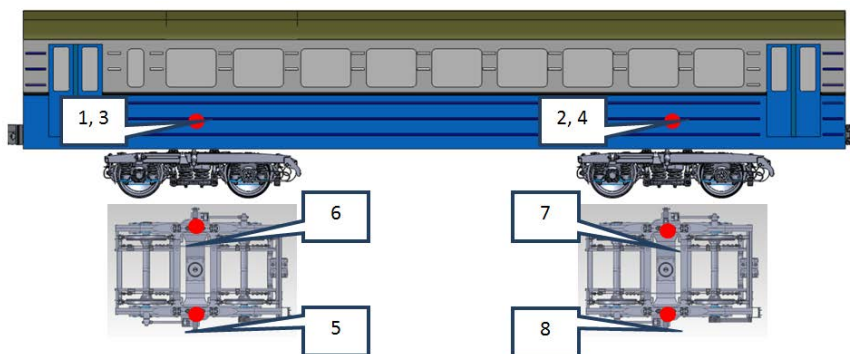


Рис. 1. Схема розміщення датчиків на об'єкті випробувань: 1–8 – місця розміщення каналів акселерометричних датчиків

При проведенні випробувань на скидання локомотива з клинів імітуються коливання підстрибування, галопування і бокового розхитування. Для отримання вільних коливань галопування кузова і підстрибування візків клини підкладають спочатку під всі колеса першого по ходу візка, а потім – під всі колеса останнього. Для імітації коливань бокового розхитування кузова і візка клини підкладають спочатку під всі колеса з однієї сторони рухомої одиниці, а потім – під всі колеса з іншої сторони.

Накочення об'єкта на клини виконують при малій швидкості (не більше 3 км/год). Випробування з імітацією коливань кожного виду повторюють не менше трьох разів. При скиданні з клинів в кузові виникають загасаючі коливання.

Клин, що використовується в досліді з реєстрації власних коливань надресорної будови будь-якої одиниці рухомого складу, має вигляд представлений на рис. 2. Довжина клина становить 315 мм, ширина – 48 мм і висота – 20 мм.

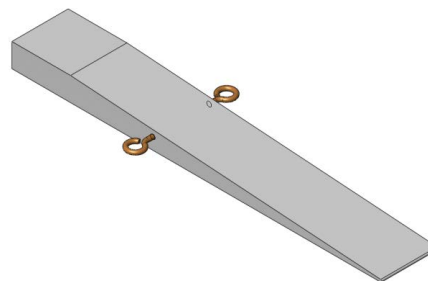


Рис. 2. Вигляд клина для імітації затухаючих коливань

Для запобігання випадків можливого зламу клина потрібно уникати його установки на рейку, що має поверхневий дефект або локальну неплоскість на робочій поверхні (особливо під тонким кінцем клину).

Щоб уникнути пошкодження клинів слід унеможливити наїзд коліс, що йдуть позаду, на клини, які залишилися на рейках після зіскоку коліс, що йдуть попереду.

Згідно з існуючими нормативними документами, власна частота коливання конструкції розраховується як обернена величина до періоду коливань, що визначається по осцилограмі сигналу як часовий проміжок між двома амплітудними значеннями затухаючого сигналу. Логарифмічний декремент затухання визначається також з амплітудних значень кількох послідовно слідуючих позитивних або негативних коливань (рис. 3), а саме:

$$A(t) = A_0 e^{-\beta t}, \tag{1}$$

$$\ln \frac{A(t)}{A(t+T)} = \beta T = u, \tag{2}$$

$$u = \frac{1}{j} \ln \frac{A_j}{A_{j+1}}, \tag{3}$$

де  $A(t)$  – функція зміни амплітуди від часу;  $A_0$  – початкове значення затухаючого сигналу;  $e$  – математична величина, що є основою натуральних логарифмів;  $t$  – часова змінна;  $\beta$  – коефіцієнт згасання коливань;  $T$  – період коливань;  $u$  – логарифмічний декремент затухання.  $A_j$  – значення  $j$ -ї за порядком слідування амплітуди коливання.

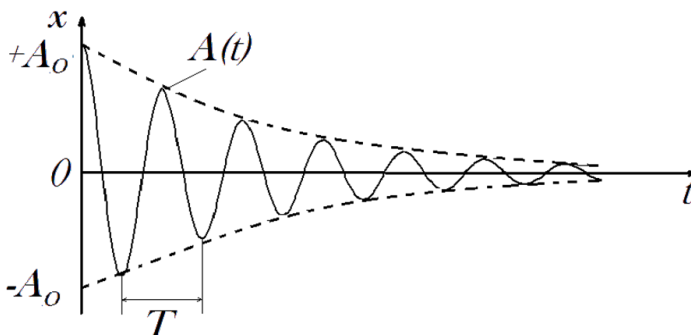


Рис. 3. Графічне зображення затухаючих коливань

Програмне забезпечення системи розроблено в середовищі графічного програмування LabVIEW [8] і дозволяє проводити статистичну обробку отриманих сигналів, фільтрацію сигналів від високочастотних завад та визначати показники демпфірування об'єкта діагностики. Інтерфейс користувача програмного забезпечення представлено на рис. 4

В програмному забезпеченні реалізована можливість визначення параметрів демпфірування як за позитивними так і за негативними амплітудними значеннями сигналів, що підвищує точність прийняття діагностичних рішень.

Однак спотворення форми сигналу побічними гармоніками [9] призводить до неоднозначності визначення числових значень параметрів демпфірування. Оскільки на практиці зазвичай відсутня можливість здійснювати значну кількість повторень експерименту по скиданні об'єкта з клинів, необхідно використовувати для обробки даних алгоритми, які менш залежать від амплітуди неосновних гармонічних складових сигналу.

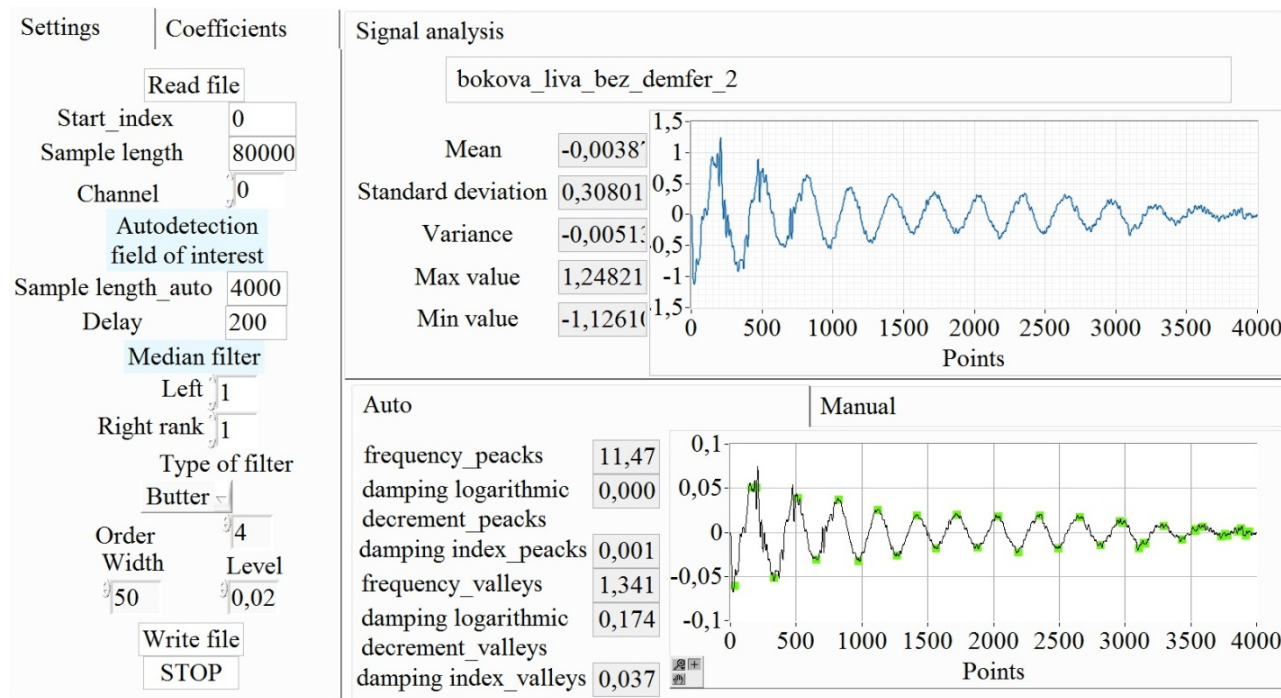


Рис. 4. Інтерфейс програмного забезпечення системи

Недоліком вказаного способу є низька завадостійкість, а саме чутливість способу визначення частоти сигналу та логарифмічного декременту затухання до високочастотних складових та побічних гармонік, що присутні в інформаційному сигналі. Для застосування даного способу необхідно для обробки використовувати сигнали лише після апаратної або програмної фільтрації, що вносить додаткову ентропію та призводить до спотворення форми сигналу. На рис. 5 наведено осцилограму нефільтрованого сигналу з акселерометричних датчиків, по якому здійснюється визначення власної частоти та логарифмічного декременту затухання.

У зв'язку з присутністю високочастотних спотворень істотною проблемою є неоднозначність отриманих результатів, висока імовірність визначення помилкового результату через фізичні особливості реєстрації сигналів акселерометричними датчиками.

Для вирішення описаних вище проблем та удосконалення методу визначення власної частоти коливань конструкції та логарифмічного декременту затухань запропоновано використання альтернативного методу визначення демпфірувальних характеристик.

В основу запропонованого методу покладено задачу підвищення точності та завадостійкості визначення власної частоти та логарифмічного декременту затухання шляхом розрахунку даних параметрів з використанням спектральної щільності сигналів, тобто переведенням розрахунків з часової області в частотну.

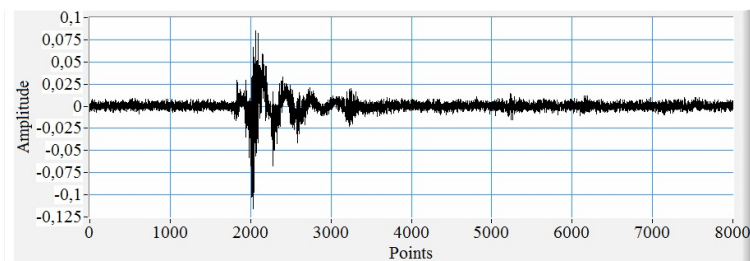


Рис. 5. Осцилограма не фільтрованого сигналу з акселерометричного датчика

Це дозволяє відсікти високочастотні коливання, які накладаються на інформативну частину сигналу і тим самим збільшити прецизійність вимірювань.

Власна частота коливання конструкції визначається за допомогою аналізу спектру сигналу отриманого шляхом застосування перетворення Фур'є як частота гармоніки з максимальною потужністю [10, 11].

На основі спектральної щільності сигналу визначається добротність коливальної системи  $Q$  – що є кількісною мірою демпфірування.

Логарифмічний декремент затухання визначається з добротності коливальної системи за допомогою виразу:

$$u = \frac{2\pi}{\omega_0} \delta = \frac{2\pi\delta}{\sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{(2Q)^2 - 1}}, \quad (4)$$

де  $u$  – логарифмічний декремент затухання;  $\pi$  – математична константа;  $\omega_0$  – частота гармоніки в спектрі сигналу з максимальною

потужністю;  $Q$  – добротність коливальної системи;  $\delta$  – шириною резонансної кривої (рис. 6), що відповідає ширині основної пелюстки спектру сигналу на рівні  $\frac{1}{\sqrt{2}}$  від максимальної потужності гармоніки [10].

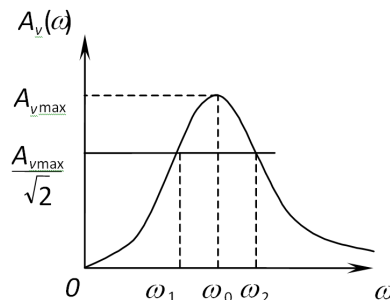


Рис. 6. Теоретична форма спектру сигналу

Добротність коливальної системи визначається виразом:

$$Q = \frac{\omega_0}{\omega_2 - \omega_1} = \frac{\omega_0}{2\delta}, \quad (5)$$

де  $\omega_2$  та  $\omega_1$  – значення частоти, що відповідає правій та лівій межі діапазону  $\delta$ .

У зв'язку з тим, що гармоніки коливань надресорної частини та завад значно рознесені по спектру сигналу, визначення логарифмічного декременту затухань здійснюється без застосування фільтрації та іншої цифрової обробки, що забезпечує відсутність спотворення параметрів вхідного сигналу. Це забезпечує високу прецизійність та однозначність визначення результату.

### 5. Практична реалізація системи та її апробація при випробуваннях локомотиву ЧС-8 та пасажирського вагону

Розроблена система використовувалася при проведенні випробувань по скиданню з клинів локомотива ЧС-8 та пасажирського вагону. В ході випробування імітувалися коливання «підстрибування», «галоупування» і «бокового розхитування» конструкції. На рис. 7, 8 представлено спектрограму сигналу та інформативну частину спектру відповідно, по якій відбувається визначення частоти та добротності коливальної системи та перерахунку отриманого значення в логарифмічний декремент затухання.

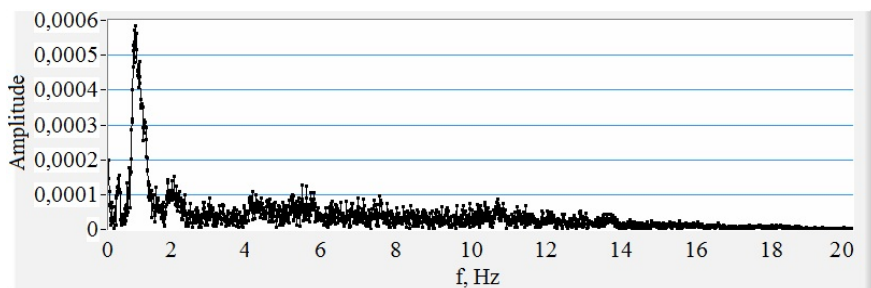


Рис. 7. Спектрограма сигналу

В табл. 1, 2 наведено результат обробки сигналів з двох дублюючих акселерометричних датчиків, що були встановлені на кузові локомотиву при п'яти повторень експерименту по імітації коливаний «галопування».

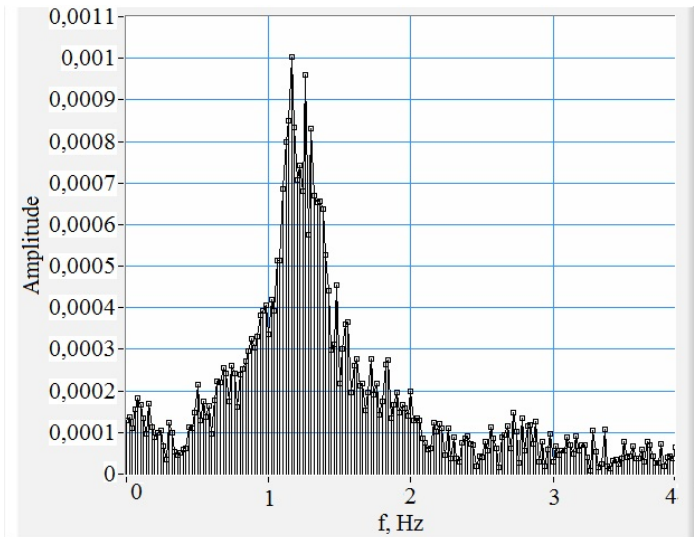


Рис. 8. Спектрограма сигналу (інформативна область)

наведених даних становить 65,2 %, при використанні запропонованого методу дана різниця не перевищує 8,1 %, що свідчить про високу завадостійкість запропонованого методу. З даних представлених в табл. 2 видно, що максимальна різниця в визначенні частоти між дублюючими каналами при використанні стандартного методу становить 7,5 %, а при використанні запропонованого методу 0,2 %.

**6. Висновки**

Запропоновано використання альтернативного завадостійкого методу, що дозволяє значно підвищити прецизійність визначення характеристик демпфірування. Оскільки існуючими методами здійснюється розрахунок параметрів демпфірування не враховуючи особливостей реальних сигналів, а саме їх полігармонічної природи, існує велика імовірність отримання хибних результатів співставляючи логарифмічний декремент коливаний, що визначений на певній частоті, реальним демпфірувальних властивостям. Здійснюючи обробку даних запропонованим методом, логарифмічний декремент затухання є принципово новою характеристикою коливаний конструкції, що однозначно відображає фізичні властивості об'єкту діагностики.

Розроблено та апробовано в реальних випробуваннях локомотиву ЧС8 та пасажирського вагону систему діагностики демпфірувальних характеристик рухомого складу. Розроблено програмне забезпечення для обробки вимірювальних даних, що дозволяє проводити попередню обробку сигналів акселерометричних датчиків, виконувати програмну фільтрацію від високочастотних завад та розраховувати чисельні значення демпфірувальних характеристик амортизаторів рухомого складу. У зв'язку з особливостями випробувань рухомого складу, а саме відсутністю значної кількості досліджуваних об'єктів та можливості багаторазового повторення експерименту з різними демпферами, у авторів не було можливості розробити діагностичні критерії, для характеристики гасників з критичним рівнем демпфірувальних властивостей.

**Література**

1. UIC 518:2009 Testing and approval of railway vehicles from the point of view of their dynamic behaviour – Safety – Track fatigue – Ride quality [Text] / Paris: International Union of Railways, 4th edition, 2009. – 129 p.
2. EN 14363:2005 Railway applications - testing for the acceptance of running characteristics of railway vehicles - testing of running behavior and stationary tests, European Standard [Text] / Brussels: Management Centre, 2005. – 113 p.
3. Азовцев, Ю. А. Опыт вибрационной диагностики подвижного состава в ОАО «РЖД» [Текст] : 10-я Европ. конф. / Ю. А. Азовцев, Н. А. Баркова, С. Г. Дегтерев // Ассоциация ВАСТ. Конференция по неразрушающему контролю, 2010. – С. 1–20.

Таблиця 1

Результат розрахунку логарифмічного декременту затухання по сигналах з дублюючих каналів акселерометричних датчиків

Метод	№ експерименту	Логарифмічний декремент затухання					С.К.В.	Результат
		1	2	3	4	5		
Стандартний	Канал 1	0,464	0,262	0,190	0,410	0,360	0,111	0,337±0,217
	Канал 2	0,423	0,273	0,035	0,208	0,356	0,150	0,259±0,294
Запропонований	Канал 1	0,572	0,532	0,519	0,465	0,500	0,040	0,518±0,078
	Канал 2	0,597	0,529	0,538	0,467	0,542	0,046	0,535±0,090

Таблиця 2

Результат розрахунку власної частоти по сигналах з дублюючих каналів акселерометричних датчиків

Метод	№ експерименту	Частота					С.К.В.	Результат
		1	2	3	4	5		
Стандартний	Канал 1	1,303	1,246	1,250	1,246	1,290	0,067	1,267±0,131
	Канал 2	1,333	1,205	1,274	1,156	1,278	0,069	1,249±0,135
Запропонований	Канал 1	1,090	1,159	1,153	1,149	1,030	0,056	1,116±0,109
	Канал 2	1,090	1,157	1,153	1,150	1,030	0,054	1,115±0,106

Як видно з наведених даних, середньоквадратичне відхилення визначення логарифмічного декременту за стандартним методом складає 0,111 та 0,150 для першого та другого каналу відповідно. При обробці даних сигналів запропонованим методом середньоквадратичне відхилення становить 0,040 та 0,046 відповідно, що більш як в три рази менше відносно стандартного методу. При використанні стандартного методу максимальна різниця в визначенні логарифмічного декременту затухання між дублюючими каналами на

4. Програма та методика стаціонарних випробувань по скиданню з клинів рухомого складу: ДНДЦ.ГК.М01-2013 [Текст] / К.: ДНДЦ УЗ, 2013. – 22 с.
5. Pourazady, M. Measurement of Structural Damping and Equivalent Mass of a Vibrating Beam [Text] / M. Pourazady. – The University of Toledo. – Available at: [http://www.eng.utoledo.edu/mime/faculty\\_staff/faculty/mpouraza/MIME3360/lecture3s11.pdf](http://www.eng.utoledo.edu/mime/faculty_staff/faculty/mpouraza/MIME3360/lecture3s11.pdf)
6. Worth, J. B. Experimental determination of modal damping from full scale testing [Text] / J. B. Worth, J. H. Lee, B. Davidson // 13th World Conference on Earthquake Engineering. – Vancouver, B.C., Canada, 2004.
7. Бородин, Н. Н. Динамические характеристики конструктивных элементов горношахтного оборудования на основе композитов с железосодержащими отходами [Текст] / Н. Н. Бородин // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. – 2009. – № 1. – С. 193–200.
8. Федосов, В. П. Цифровая обработка сигналов в LabVIEW [Текст] / В. П. Федосов, А. К. Нестеренко. – Москва: ДМК Пресс, 2007. – 256 с.
9. Гутников, В. С. Фильтрация измерительных сигналов [Текст] / В. С. Гутников. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 192 с.
10. Бендат, Дж. Прикладной анализ случайных данных [Текст] / Дж. Бендат, А. Пирсол; пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 540 с.
11. Бабак, В.П. Обработка сигналов [Текст] / В. П. Бабак, В. С. Хандецкий, Е. Шрюфер. – К.: Либідь, 1999. – 496 с.
12. Inman, D. J. Engineering Vibration [Text] / D. J. Inman. – Hardcover, 2007.

*В статті розглядаються методи розрахунку та оптимізації різного типу динамічних гасників коливань маятникового типу для зменшення вібрації подовгастих елементів. Представлені дискретно-континуальні моделі динаміки великогабаритних подовгастих елементів на базі теорії балки Тимошенка з приєднаними дискретними елементами. Розроблено методіку оптимізації динамічних гасників коливань при гармонійному та ударному змушенні*

*Ключові слова: динамічний гасник коливань, балка Тимошенка, подовгастий елемент, оптимізація*

*В статье рассматриваются методы расчета и оптимизации различного типа динамических гасителей колебаний маятникового типа для уменьшения вибрации продолговатых элементов. Представлены дискретно-континуальные модели динамики крупногабаритных продолговатых элементов на базе теории балки Тимошенко с присоединенными дискретными элементами. Разработана методика оптимизации динамических гасителей колебаний при гармоническом и ударном возбуждении*

*Ключевые слова: динамический гаситель колебаний, балка Тимошенко, продолговатый элемент, оптимизация*

УДК 621.302:621.314.1

DOI: 10.15587/1729-4061.2014.28169

## ЗАСТОСУВАННЯ РІЗНОГО ТИПУ МАЯТНИКОВИХ ДИНАМІЧНИХ ГАСНИКІВ КОЛИВАНЬ

**В. Є. Мартин**  
Здобувач\*

**Б. М. Дівеєв**  
Кандидат технічних наук, доцент  
Кафедри «Транспортні технології»\*  
E-mail: divboglvi@yahoo.com

**І. Р. Дорош**  
Кандидат фізико-математических наук  
ПП «Дора»

вул. Городоцька, 197, м. Львів, Україна, 79015

\*Національний університет «Львівська політехніка»  
вул. С. Бандери, 12, м. Львів, Україна, 79013

### 1. Вступ

Вібрація в машинах і спорудах відіграє негативну роль, за виключенням класу машин, що використовують вібрацію для здійснення технологічних процесів (вібротранспортери, віброушільнювачі, віброоброблювальні машини, тощо). Вібрація діє негативно як на споруди та машини, так і на людину. Близько 70 % конструкцій руйнуються внаслідок впливу вібрації. Небезпечна вібрація і для організму людини. Вона викликає різноманітні захворювання і значно знижує рівень комфортності навіть при незначних амплітудах коливань. Ефективним способом зменшення рівнів вібрації

є динамічний гасник коливань (ДГК). ДГК широко застосовуються в техніці [1–4]. ДГК бувають різних типів. Однак основний принцип функціонування ДГК – це поглинання вібраційної енергії за рахунок приєднання до основної конструкції додаткових мас на пружинах. При відповідному налаштуванні ці маси інтенсивно коливаються і поглинають значну частину енергії.

### 2. Аналіз літературних даних

ДГК поділяються на пасивні, активні та напівактивні. Пасивні ДГК можна в першому наближенні вва-