

*Калиновський А.Я., канд. техн. наук, нач. каф., НУЦЗУ,
Коваленко Р.І., курсант, НУЦЗУ,
Коврегін В.В., канд. техн. наук, проректор, НУЦЗУ,
Ларін О.О., канд. техн. наук, доц., НТУ «ХПІ»*

**ДОСЛІДЖЕННЯ ПЛАВНОСТІ ХОДУ ВІЗКА
ДЛЯ ТРАНСПОРТУВАННЯ ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНИХ
ВАНТАЖІВ З НЕЛІНІЙНИМ ПІДРЕСОРОМ**

(представлено д-ром техн. наук Кривцовою В.І.)

Представлені результати експериментальних досліджень коливань вантажу, що розміщений на спеціалізованому транспортному засобі (СТЗ) під час перевезень. Експерименти проведені у вигляді дорожніх випробувань. Конструкції СТЗ, що розглядаються має додатковий рівень підресорення з нелінійною характеристикою, що має квазінульову жорсткість. Порівняльний аналіз показав, що підресорення з квазінульовою жорсткістю дозволяє істотно знизити рівні вібрацій, а отже підвищити безпеку перевезення вибухонебезпечних речовин.

Ключові слова: вибухонебезпечний віброчутливий вантаж, система підресорення, спеціалізований транспортний засіб, пневматичний пружний елемент, вертикальні коливання

Постановка проблеми. В сучасному автомобілебудуванні велика увага приділяється зменшенню рівнів вібрацій у транспортних засобах під час перевезень. Сукупність властивостей ТЗ, що забезпечують віброзахист водія, пасажирів, вантажів, які перевозяться та власних агрегатів від впливу вібрацій, що виникають під час руху, прийнято називати плавністю ходу [1]. Забезпечення високих показників плавності ходу особливо актуально при перевезеннях вибухонебезпечних віброчутливих вантажів. Слід відзначити проблему транспортування застарілих боеприпасів та інших вибухонебезпечних предметів від місця знаходження до пункту утилізації [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для транспортування зазначених об'єктів зазвичай використовуються спеціалізовані візки-причепи (спеціалізовані транспортні засоби – СТЗ), конструкція яких оснащена ресорним під-

вішуванням [2]. На жаль, традиційні системи підресорення візків-причепів не дозволяють отримати вібраційний вплив на вантаж на необхідному низькому рівні. В роботах [3-4] пропонується створити СТЗ, конструкція якого має додаткову ступінь підресорення, що має реалізовувати віброізоляцію вантажу. Зменшення динамічної реакції в коливальній системі може бути досягнуто шляхом зменшення жорсткості пружних елементів в цій системі [5]. Для звичайних пружин відповідна зміна жорсткості із збереженням несучої спроможності вимагає істотного збільшення розмірів. Проте використання пружин (або спеціально сконструйованих пружинних блоків) з нелінійною характеристикою дозволяє отримати певний проміжок роботи системи з суттєво малою жорсткістю за збереження компактних розмірів та необхідної несучої спроможності. Такі системи прийнято називати системами із квазінульовою жорсткістю.

Постановка завдання та його вирішення. В даній роботі розглядаються експериментальні дорожні випробування вертикальних коливань вантажу, що розміщений на дослідному зразку СТЗ, який має дворівневу систему підресорення при чому другий рівень реалізує стан квазінульової жорсткості. Метою досліджень є визначення фактичного ефекту щодо покращення плавності ходу запропонованої системи у порівнянні із класичною конструкцією подібних причепів.

Конструкція дослідного зразку СТЗ із додатковою системою підресорення, яка має квазінульову жорсткість. Дослідний зразок СТЗ являє собою одновісний несамохідний причіп, що під'єднується до легкових автомобілів. Конструкція складається з однієї колісної вісі, несучої рами (кузова), вантажної платформи на якій розташовується вантаж та двох рівнів підресорення (рис. 1).

Перший рівень підресорення в конструкції має лінійну характеристику, що є традиційним для автомобілебудування (СТЗ, що оснащений лише одним рівнем підресорення, являє собою класичний причіп легкового автомобіля).

Для реалізації другого рівня підресорення на рамі причепа монтується за допомогою пружинного блоку (4, див. рис. 1) вантажна платформа на якій закріплюється небезпечний вантаж, що перевозиться. Пружинний блок має нелінійну характеристику із областю, що реалізує стан квазінульової жорсткості.

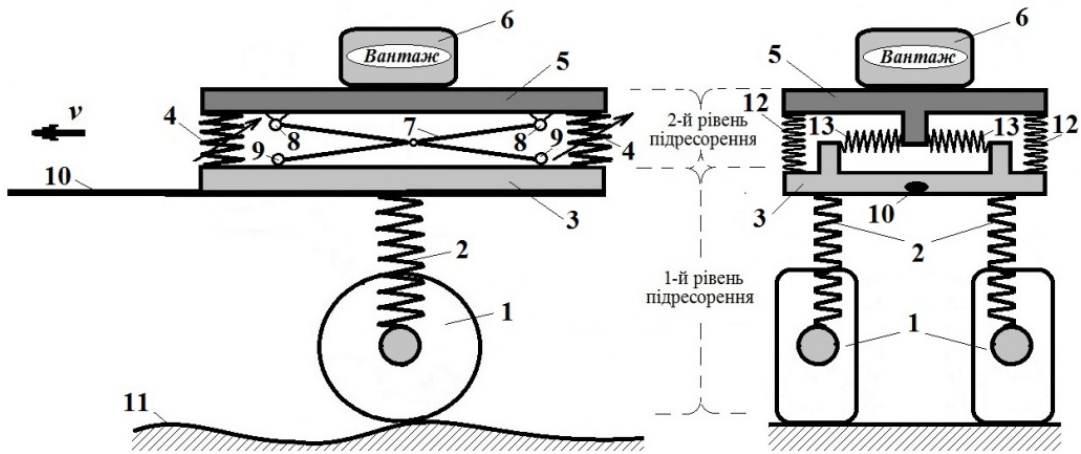


Рис. 1 – Схема конструкції СТЗ, що досліджується. 1 – колеса візка, 2 – ресорне підвішування першого рівня (класичне), 3 – рама візка-причепа, 4 – пружинні блоки ресорного підвішування другого рівня, 5 – вантажна платформа, 6 – вантаж, 7 – важелі прямого паралелограма, 8 – шарнірні кріплення важелів прямого паралелограма, 9 – опорні котки (рухливі шарніри) важелів паралелограма, 10 – дишло, 11 – профіль дороги, 12, 13 – елементи пружинного блоку ресорного підвішування другого рівня

Конструктивно, даний блок був створений з циліндричних пружин стискання, які утворювали між собою ферму Мізеса (рис. 2).

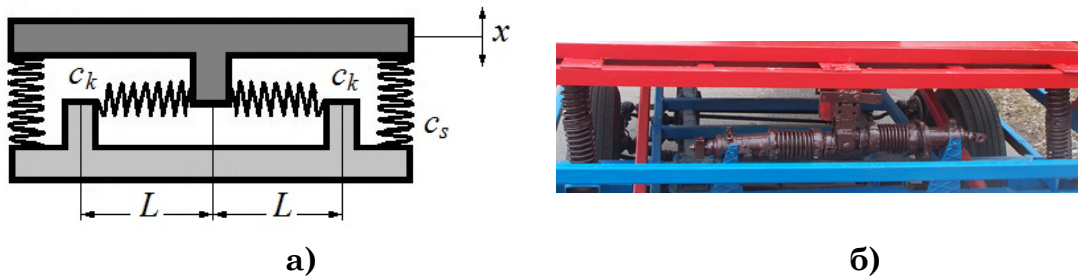


Рис. 2 – Схема конструкції (а) та фотографія дослідного зразка (б) другої ступені ресорного підвішування, що реалізує квазінульову жорсткість

Нелінійна характеристика даної системи сформована геометричними співвідношеннями між деформацією горизонтальних пружин та вертикальними переміщеннями. Причому горизонтальні пружини повинні бути попередньо у стисненому стані. Якщо ввести позначення L – довжина пружини у го-

ризонтальному стисненому положенні, Δ – величина попереднього стискання, c_s – жорсткість пружин вертикальних, c_k жорсткість пружин горизонтальних, x – вертикальне переміщення платформи із вантажем, то нелінійна приведена пружна сила, що виникатиме в пружинному блоці матиме вигляд

$$F_{nl}(x) = 2 \cdot c_k \cdot x \left(1 - \frac{L + \Delta}{\sqrt{L^2 + x^2}} \right) + 2 \cdot c_s \cdot x. \quad (1)$$

На рис. 2 наведено графік залежності нелінійної пружної сили F_{nl} від вертикальних переміщень платформи.

Для наочності на графіку побудована лінійна пружна сила, що утворюється при демонтажі горизонтальних пружин коректорів жорсткості. Величини жорсткості та геометричні розміри були взяті у відповідності до величин, що були застосовані у дослідному зразку СТЗ.

Наведена залежність нелінійної пружної сили вказує на наявність області із квазінульовою жорсткістю: це інтервал переміщень $\pm 0,1$ м. Крім того в межах переміщень $\pm 0,3$ м горизонтальні коректори забезпечують меншу пружну силу ніж лінійна компоновка без коректорів жорсткості. Окремо слід зазначити, що із збільшення можливих переміщень в жорсткість даної системи різко зростає, що призведе до протилежного відносно віброізоляції ефекту.

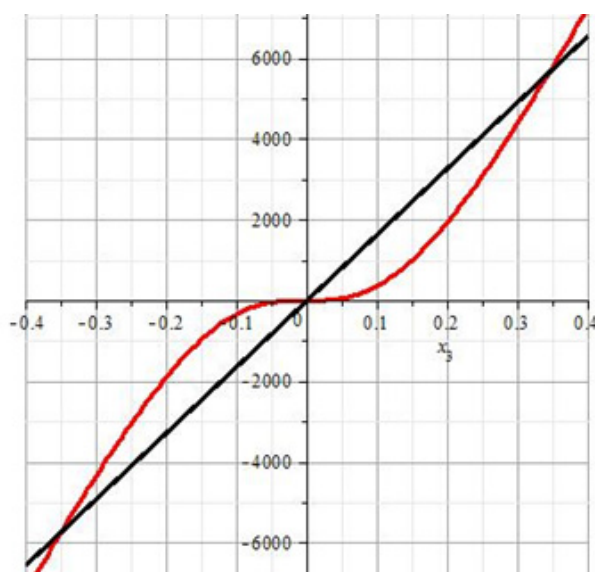


Рис. 3 – Нелінійна пружна сила

Слід також відмітити, що нелінійна характеристика матиме область із квазінульовою жорсткістю лише у випадку, якщо жорсткості пружин та їх попереднє стискання будуть у раціональному співвідношенні

$$c_S L = c_k \Delta. \quad (2)$$

Результати дорожніх випробувань вертикальних коливань вантажної платформи СТЗ. Дослідний зразок візка (із макетом небезпечного вантажу на ньому) підчас дорожніх досліджень був закріплений у якості причепа до автомобіля УАЗ, який рухався із заданою швидкістю (рис. 3). Платформа була попередньо навантажена (вантаж 100 кг), що реалізує робочі масові характеристики при перевезеннях та реалізує у системі внаслідок присутності додаткових сил тяжіння, необхідне базове положення рівноваги.

Відповідно до задач експериментальних досліджень було використано вимірювальний комплекс «Ультра-В-І» [6], який розроблений на кафедрі динаміки та міцності машин НТУ «ХП». Вимірювальний комплекс складається із: датчика віброприскорень, що оснащений мікроелектромеханічним ємнісним сенсором; аналого-цифрового перетворювача (АЦП) та портативного комп'ютера. «Ультра-В-І» має дійсне свідоцтво про Державну метрологічну атестацію і дозволяє проводити вимірювання віброприскорень у точці конструкції за трьома напрямками.



Рис. 4 – Лабораторні випробування дослідницького зразка візка

Під час досліджень датчик вібрацій встановлювався під платформою (рис. 4). Далі через дріт датчик був під'єднаний до АЦП і комп'ютера, що знаходились в салоні автомобіля Система мала автономне акумуляторне живлення. Час безперервної роботи складав 2 години.



Рис. 5 – Розміщення датчику вібрацій

Дослідження проводились на різних швидкостях руху автомобіля: 10 км/год, 20 км/год та 30 км/год. При цьому запис сигналу розпочинався після розгону автомобіля до заданої швидкості руху та тривав близько 60 секунд, що для розглядаємих швидкостей дозволяло забезпечити рух чітко по прямому проміжку дороги, а разом із тим достатній інтервал вимірювань для подальшої обробки. При цьому кожен заїзд був проведений по одному й тому ж проміжку дороги у однаковому напрямку. Кожен заїзд повторювався у двох компоновках конструкції: в рамках роботи лише одного (першого) рівня підресорення, що реалізує класичний причіп для транспортування вантажів, та для конструкції цього візка з двома рівнями підресорення. На рисунку 5 наведено зареєстровані сигнали.

Отримані коливання очікувано носять випадковий характер. Обробка сигналу дає можливість визначити ймовірнісні (статистичні) оцінки, причому в роботі статистичний аналіз базується на припущеннях ергодичності та стаціонарності процесу. Одним з найбільш головних та інформативних параметрів вібрацій транспортних засобів, що відображають

плавність ходу є середнє квадратичне значення (СКЗ) сигналу, яке є більш стійким до супроводжуваних шумів

$$\psi_y = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N s(t_j)^2}, \quad (3)$$

де ψ_y – СКЗ; $s(t_j)$ – зареєстровані значення сигналу; N – кількість зареєстрованих значень.

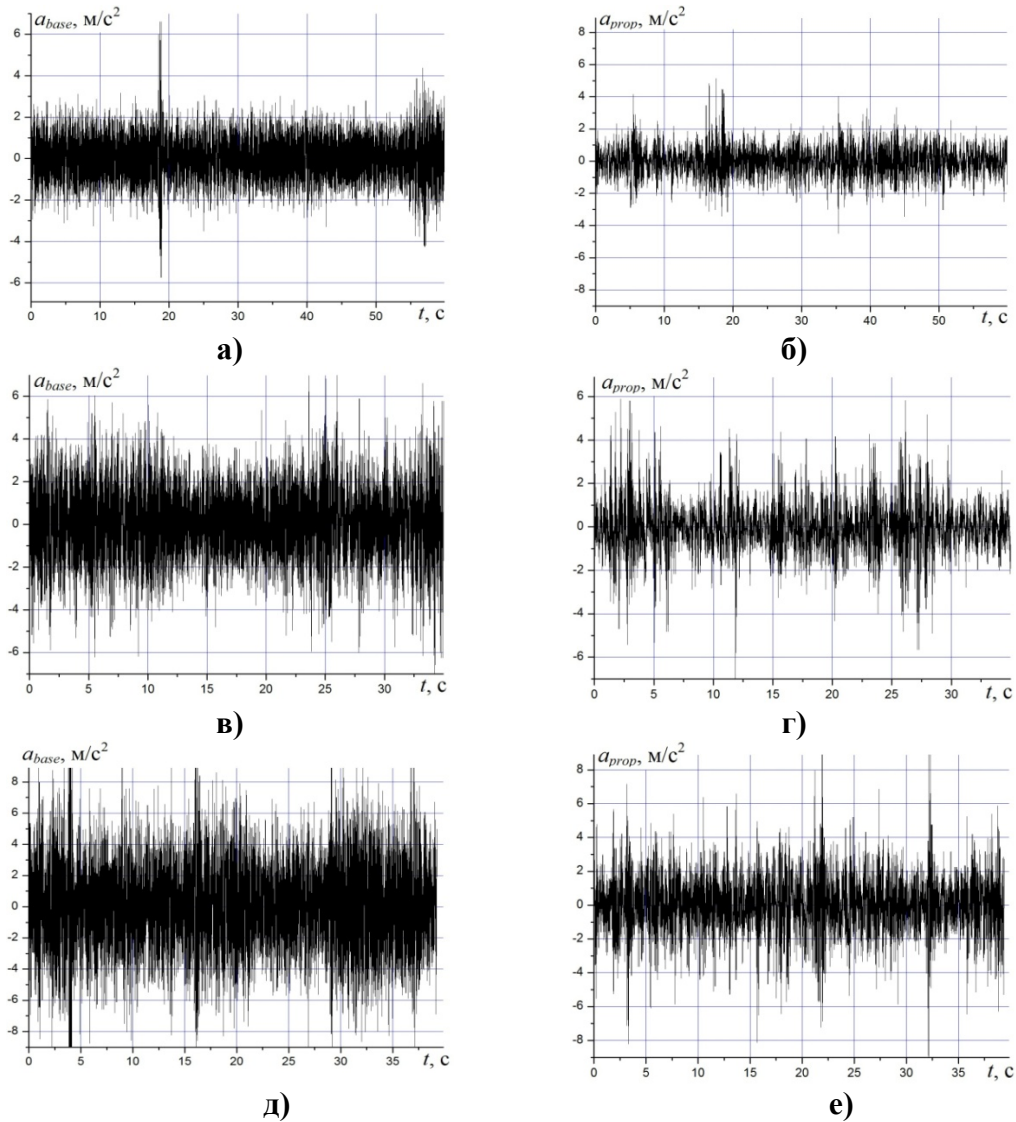


Рис. 6 – Вібро-прискорення платформи візка класичної конструкції (а, в, д) та конструкції з двома рівнями підресорення (б, г, е) при русі із швидкістю а), б): 10 км/год, в), г): 20 км/год, д), е): 30 км/год

Величина СКЗ вібрацій при русі із швидкістю 10 км/год складає $0,35 \text{ м/с}^2$ для класичної компоновки та $0,296 \text{ м/с}^2$ для запропонованої дворівневої, що менше на 15%. Для візка, що рухається зі швидкістю 20 км/год запропонована система віброізоляції дозволяє зменшити СКЗ віброприскорень у понад 25%. У випадку руху на швидкості 30 км/год ефективність сягає близько 50%.

Окрім СКЗ віброприскорень показником плавності руху можна вважати пікові значення розмаху та амплітуди коливань віброприскорень, які визначались в ході обробки результатів замірів. За цим показником ефективність на швидкості 10 км/год: 20%, на швидкості 20 км/год: майже 15% та на швидкості 30 км/год трохи більша за 15%.

Узагальнення результатів, що отримані на різних швидкостях руху наведено на рисунку 6.

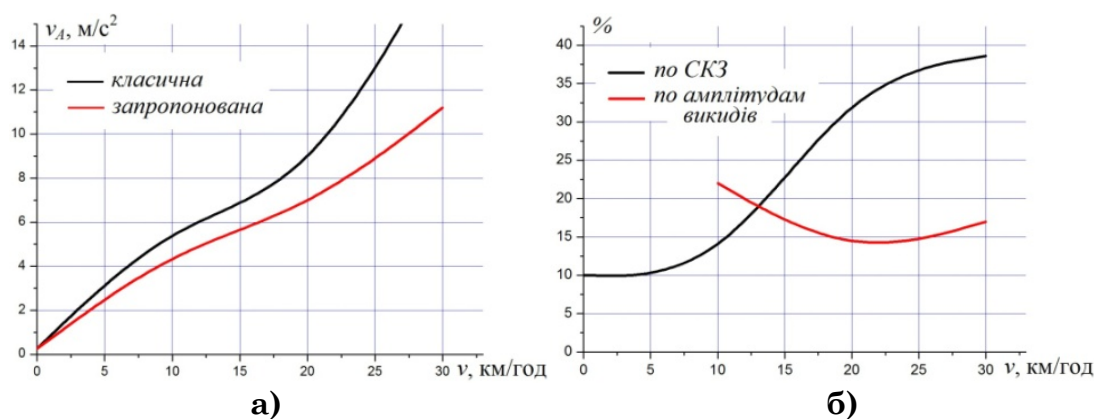


Рис. 7 – Залежність вібро-прискорень (а) та відсотка покращення плавності ходу СТЗ (б) від швидкості його руху

Зареєстровані сигнали були проаналізовані також, з позиції спектральної теорії випадкових ергодичних стаціонарних функцій. За отриманими залежностями вібро-прискорень від часу було розраховано автокореляційну функцію. Автокореляційна функція вказує на характер впливу значення вібрації в даний момент часу, на вібрацію, що відбуватиметься через певний проміжок часу. Вона визначається як згортка сигналу з його дзеркальним зображенням

$$K(t_1) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)s(t_1 - t)dt, \quad (4)$$

тут t_1 – це не даний час t , а нова змінна, що відраховується також по осі t та має сенс проміжку часу на якому аналізується «пам'ять» вібраційного процесу. У відповідності до теореми Вінера-Хінчіна автокореляційна функція визначає енергетичний спектр сигналу (спектральну щільність), як його перетворення Фур'є

$$S(\omega) = \int_0^{\infty} K(t_1) e^{i\omega t_1} \partial t_1. \quad (5)$$

Спектральна щільність є важливою характеристикою вібрацій оскільки відображує розподіл енергії коливального процесу по частотам гармонік, що утворюють цей сигнал. На рисунках 7 представлено результати спектральної обробки зареєстрованих даних, що відображено у вигляді спектральних щільностей.

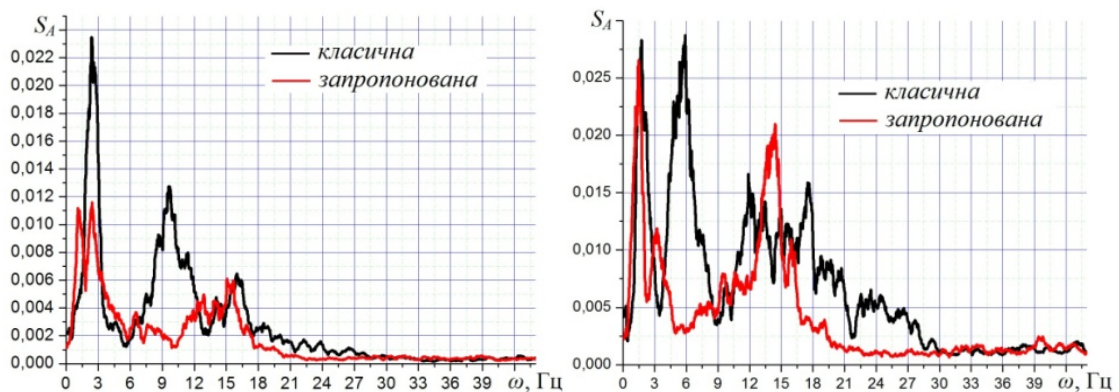


Рис. 8 – Спектральна щільність вібро-прискорень платформи візка класичної (чорна крива) та запропонованої (червона крива) конструкції при русі зі швидкістю 20 км/год (а) та 30 км/год (б)

Порівняльний аналіз отриманих спектральних щільностей для класичного причепа та запропонованої конструкції із дворівневим підресоренням дозволяє відзначити зміну частотного спектру: у системі із дворівневим підресоренням відбулось зниження основної гармоніки з 2 Гц до 1,5 Гц, але збільшилась ширина смуги сплеску, тобто коливання мають більш суттєве випадкове блуждіння частоти та амплітуди. Важливо відмітити, що із спектрального складу зникла гармоніка із ча-

стотою 6 Гц, проте значно більшу частку енергії отримала гармоніка із частотою у 14 Гц.

Висновки. У роботі представлені результати дорожніх досліджень створеного дослідного зразку СТЗ, що має дворівневу схему підресорення, яка забезпечує високу плавність ходу. При цьому розглянуті результати випробовувань СТЗ на різних швидкостях руху. Проведені узагальнюючі дослідження дозволяють зробити висновки з ефективності впровадження другого рівня нелінійного підресорення, оскільки це дозволяє вже на малих швидкостях руху на 10% знизити рівні СКЗ вібро-прискорень, а із збільшенням швидкості руху ефективність сягає 35% і більше. Крім того, нелінійна підвіска з квазінульовою жорсткістю покращує в середньому на 15% віброізоляційні властивості візка щодо впливу випадкових викидів, що мають місце під час транспортування небезпечних вантажів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Волков В. П. Теорія руху автомобіля: Підручник / В. П. Волков, Г. Б. Вільський – Суми: Університетська книга, 2010. – 320 с.
2. Соколовский С.А. Проблема транспортировки опасных грузов / Калиновский А.Я., Соколовский С.А. // Об'єднання теорії та практики – залог підвищення постійної готовності оперативно-рятувальних підрозділів до виконання дій за призначенням. Матеріали VIII науково-технічної конференції. – Харків: НУЦЗУ, 2011. – с.52–53
3. Ларін О.О. Моделювання коливань спеціалізованого транспортного засобу, що має віброзахисну систему із квазінульової жорсткістю під час перевезення небезпечних вантажів / А.Я. Калиновський, О.О. Ларін, С.А. Соколовський // Вісник Севастопольського національного технічного університету, Серія: Машиноприладобудування та транспорт. – Севастополь: СевНТУ, 2012.– №135.– С. 64-67.
4. Соколовський С.А. Побудова математичної моделі вертикальних одновісних коливань візка для транспортування небезпечних вантажів / С.А. Соколовський // Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми розвитку транспортних систем і логістики», м. Євпаторія, 3-8 травня 2012 року, 2012. – с.187-190

5. Алабужев П. М. Виброзащитные системы с квазиулевою жесткостью. / К. М. Рагульскис, П. М. Алабужев, А. А. Гритчин, Л. И. Ким и др. – Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1986 – 96 с.
6. Соколовський, С. А. Експериментальні дорожні дослідження плавності ходу спеціалізованого транспортного засобу з нелінійним підресоренням [Текст] / О. О. Ларін, О. О. Водка, С. А. Соколовський, О. О. Назаров // Вісник. – Харків: НТУ «ХП», – № 55. – 2012. – С. 91–99.

Калиновский А.Я., Коваленко Р.И., Коврегин В.В., Ларин А.А.

Исследование плавности хода тележки для транспортировки взрывоопасных грузов с нелинейным поддресориванием

Представлены результаты экспериментальных исследований колебаний груза, который размещен на специализированном транспортном средстве (СТС) при перевозках. Эксперименты проведены в виде дорожных испытаний. Рассматриваемые конструкции СТС, имеют дополнительный уровень поддресоривания с нелинейной характеристикой, имеют квазиулеву жесткость. Сравнительный анализ показал, что поддресоривание с квазиулевою жесткостью позволяет существенно снизить уровни вибраций, а следовательно повысить безопасность перевозки взрывоопасных веществ.

Ключевые слова: взрывоопасный виброчувствительный груз, система поддресоривания, специализированное транспортное средство, пневматический упругий элемент, вертикальные колебания

Kalinovskiy A.Y., Kovalenko R.I., Kovregin V.V., Larin A.A.

Research ride carriage transport explosive cargo on nonlinear of suspension

The results of the experimental investigations of the vibrations during the transportations of the goods which are mounted on specialized vehicle (SV) are presented in the paper. As experiments the road tests have been done. The SV has additional level of cushioning with nonlinear characteristic, which has quasi-zero stiffness. Comparative analysis has shown that quasi-zero stiffness cushioning essentially reduce the level of goods vibrations, so magnifying the movement smoothing.

Key words: explosive cargo, system of suspension, specialized vehicles, pneumatic elastic element, vertical vibrations