

УДК 625.032

В. М. Баштовий, Р. О. Кайдалов, А. Я. Калиновський, С. А. Соколовський

ОСОБЛИВОСТІ ПОБУДОВИ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ВЕРТИКАЛЬНИХ ОДНОВІСНИХ КОЛИВАНЬ ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ ДЛЯ ТРАНСПОРТУВАННЯ НЕБЕЗПЕЧНИХ ВАНТАЖІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ПНЕВМАТИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ У ДРУГОМУ СТУПЕНІ ПІДВІШУВАННЯ

Розглядається побудова математичної моделі одновісних вертикальних коливань транспортного засобу (візка) для транспортування небезпечних вантажів, який має двоступеневе ресорне підвішування підвищеної якості із застосуванням пневмоелементів.

К л ю ч о в і с л о в а: пружний елемент, небезпечний вантаж, одновісні вертикальні коливання, пневмоелемент.

Постановка проблеми. Для транспортування небезпечних, зокрема вибухонебезпечних, вантажів від місця їх знаходження до пункту утилізації розроблена конструкція спеціального візка [1], ресорне підвішування якого має характеристики, що задовольняють умови безпечного транспортування, а відсутність двигуна і трансмісії обумовлює просту, надійну і, головне, недорогу конструкцію рис. 1.

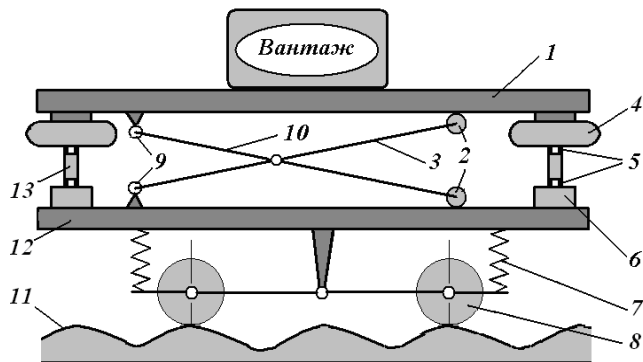


Рис. 1. Схема конструкції транспортного засобу для перевезення небезпечних вантажів:
 1 – вантажна платформа; 2 – опорні котки;
 3, 10 – важелі прямого паралелограма;
 4 – гумовокордна однофрива оболонка;
 5 – дросельна шайба; 6 – додатковий резервуар;
 7 – пружини першого ступеня підвішування;
 8 – колеса візка; 9 – шарнірні кріплення важелів прямого паралелограма; 11 – профіль дороги;
 12 – опорна платформа; 13 – повітряний трубопровід

Головною особливістю конструкції візка є застосування, на відміну від традиційного для автомобілебудування одноступеневого ресорного підвішування, додаткового другого ступеня із коректором жорсткості [2–3], динамічні характеристики якого забезпечують умови безпечного транспортування.

Деякі особливості роботи цієї конструкції в умовах реальної експлуатації, що можуть суттєво ускладнити підготовку до транспортування небезпечних вантажів, усувають шляхом застосування однофривих герметичних пневматичних пружних елементів [4] в опорних точках вантажної платформи.

Визначення необхідних параметрів такого ресорного підвішування, від яких суттєво залежать його динамічні властивості, має бути забезпечено розрахунками, у яких використано математичну модель запропонованої конструкції.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Основи складання математичних моделей та методи розрахунку систем ресорного підвішування сучасних транспортних засобів викладені у працях [5–9].

Розрахунок термодинамічних процесів при проектуванні пневматичних трактів системи ресорного підвішування базується на теорії “наповнення-спорожнення” та квазістаціонарному методі визначення параметрів стану повітря, що викладені у публікаціях [10, 11].

Постановка задачі та її вирішення. При підготовці до перевезення небезпечних вантажів за допомогою запропонованого візка, у другому ступені ресорного підвішування якого застосовується коректор жорсткості (див. рис. 2), виникає проблема, сутність якої в тому, що оптимальних характеристик можливо досягти лише за умови чітко визначеного навантаження, коли пружини коректора C_2 розташовані горизонтально. У дослідному зразку у разі недостатньої маси вантажу це питання вирішувалось достатньо просто – застосуванням додаткового баласту, що є незручним в умовах реальної експлуатації.

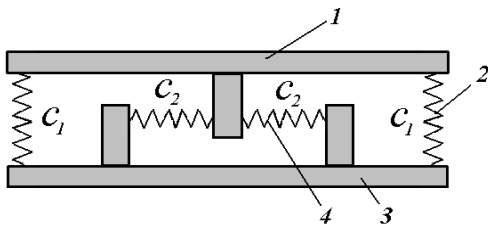


Рис. 2. Схема конструкції другого ступеня ресорного підвішування із застосуванням коректора жорсткості: 1 – вантажна платформа; 2 – пружини другого ступеня підвішування; 3 – опорна платформа; 4 – пружини коректора жорсткості

Для усунення цієї проблеми пропонуються три варіанти конструкції другого ступеня ресорного підвішування:

- із розміщенням регулюючих пристроїв в опорних точках пружин коректора жорсткості (рис. 3);
- із застосуванням у другому ступені пневматичного ресорного підвішування [10] двофрових гумовокордних оболонок в опорних точках вантажної платформи і висоторегулюючого клапана (рис. 4);
- із застосуванням однофрових герметичних пневматичних пружних елементів [4] в опорних точках вантажної платформи (рис. 5).

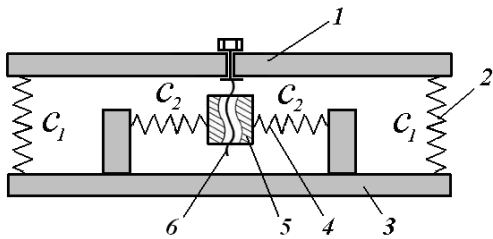


Рис. 3. Схема конструкції другого ступеня ресорного підвішування із застосуванням регулятора коректора жорсткості: 1 – вантажна платформа; 2 – пружини другого ступеня підвішування; 3 – опорна платформа; 4 – пружини коректора жорсткості; 5 – гайка регульовальна; 6 – гвинт регульовальний

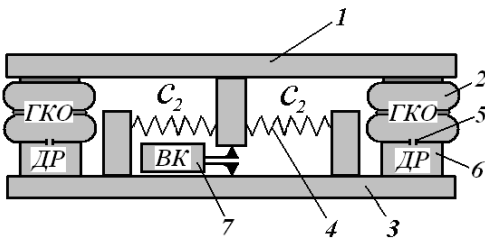


Рис. 4. Схема конструкції другого ступеня пневматичного ресорного підвішування із застосуванням коректора жорсткості та висоторегулюючого клапана: 1 – вантажна платформа; 2 – гумовокордна двофрова оболонка; 3 – опорна платформа; 4 – пружини коректора жорсткості; 5 – дросельна шайба; 6 – додатковий резервуар; 7 – клапан висоторегулюючий

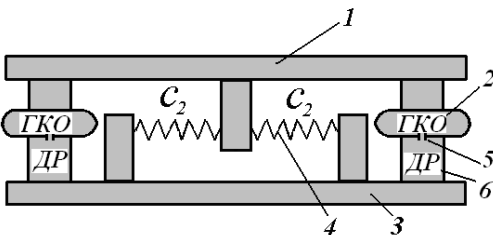


Рис. 5. Схема конструкції другого ступеня герметичного пневматичного ресорного підвішування із застосуванням коректора жорсткості: 1 – вантажна платформа; 2 – гумовокордна однофрова оболонка; 3 – опорна платформа; 4 – пружини коректора жорсткості; 5 – дросельна шайба; 6 – додатковий резервуар

Запропоновані конструкції другого ступеня ресорного підвішування спеціального візка для транспортування небезпечних вантажів мають свої переваги та недоліки. Проаналізуємо кожен з конструкцій.

Для варіанта із розміщенням регулюючих пристроїв в опорних точках пружин коректора жорсткості складність регулювання в процесі експлуатації деякою мірою компенсується простотою конструкції регулюючого пристрою.

Варіант із застосуванням коректора жорсткості та пневматичного ресорного підвішування, що складається із двофрових гумовокордних оболонок і висоторегулюючого клапана, забезпечує найліпші динамічні характеристики транспортного засобу, усуває необхідність регулювання під час експлуатації, але складність та трудомісткість влаштування висоторегулюючого клапана та необхідність мати джерело стисненого повітря для його роботи знижують перспективу застосування цієї конструкції.

Варіант із застосуванням коректора жорсткості та пневматичного ресорного підвішування із однофрових гумовокордних оболонок, які разом з додатковим резервуаром мають суттєво нелінійну пружну характеристику, дає можливість виключити із системи висоторегулюючий клапан та створити герметичне ресорне підвішування, що забезпечить найліпші динамічні характеристики транспортного засобу та просте регулювання під час експлуатації.

Основний вплив на динамічні властивості транспортної системи мають вертикальні коливання. Для попередніх досліджень доцільно виконати їх розрахунок з використанням спрощеної одновісної моделі (рис. 6).

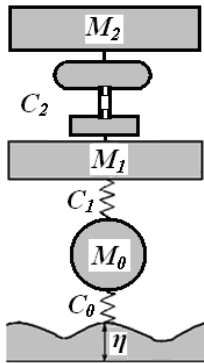


Рис. 6. Механічна модель для дослідження одновісних вертикальних коливань транспортного засобу для перевезення небезпечних вантажів: M_2 – маса вантажної платформи; C_2 – еквівалентна жорсткість пневмоелементів другого ступеня підвішування і коректора жорсткості; M_1 – маса опорної платформи; C_1 – еквівалентна жорсткість торсіонів першого ступеня підвішування; M_0 – маса коліс візка; C_0 – еквівалентна жорсткість шин; η – профіль дороги

У побудові відповідної математичної моделі візок розглядається як система трьох пружно зв'язаних твердих тіл:

- 1) вантажна платформа разом із зведеною до неї частиною маси другого ступеня ресорного підвішування і вантажем, масу яких позначимо M_2 ;
- 2) опорна і поворотна платформи разом із зведеними до них частинами маси другого та першого ступенів ресорного підвішування, масу яких позначимо M_1 ;
- 3) колеса візка, сумарну масу яких позначимо M_0 .

У створенні математичної моделі використовуємо абсолютну і локальні системи координат.

Нерухома абсолютна система координат $\xi G \zeta$ (рис. 7) розташована на початку траєкторії, де знаходився центр мас вантажної платформи за відсутності вимушеного руху.

Локальні системи координат XOZ (з індексами), зв'язані з центрами мас відповідних твердих тіл, відповідають їх коливанням відносно положень статичної рівноваги і рухаються відносно абсолютної системи координат $\xi G \zeta$ з постійною швидкістю V .

Таким чином, вертикальні одновісні коливання досліджуваної механічної системи визначаються координатами:

- Z_2 – вертикальне переміщення вантажної платформи;
- Z_1 – вертикальне переміщення опорної платформи;
- Z_0 – вертикальне переміщення колеса візка.

Поздовжній рух системи визначається рівнянням $X_0 = X_1 = X_2 = X = Vt$, де V – швидкість руху, t – час.

У першому ступені ресорного підвішування запропонованого транспортного засобу використана традиційна для автомобілебудування незалежна торсіонна підвіска кожного із чотирьох коліс візка. Сумарну жорсткість торсіонів позначимо C_1 .

Другий ступінь ресорного підвішування, який складається із чотирьох пружних пневмоелементів і двох коректорів жорсткості, моделюємо пружним елементом, спеціально визначену зведену жорсткість якого позначимо $C_2 = f(\Delta_2)$, де Δ_2 – усереднена деформація пружних елементів другого ступеня ресорного підвішування.

Сумарну жорсткість шин позначимо C_0 .



Рис. 7. Абсолютна і локальні системи координат

Зважаючи на значно більшу, порівняно із гумовими шинами, жорсткість поверхні дороги як збудник вимушених коливань візка приймаємо абсолютно жорсткий геометричний профіль заданої конфігурації $\eta = \eta(\xi)$.

На попередньому етапі досліджень при визначенні власних частот коливань у математичну модель введені лише сили пружності, які діють на складові елементи візка (рис. 8). Дисипативні сили ми не враховуємо.

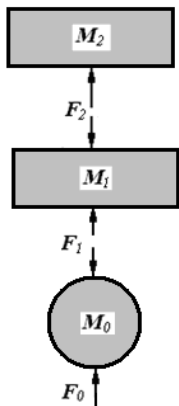


Рис. 8. Сили, які діють на складові елементи механічної моделі візка: M_2 – маса вантажної платформи; F_2 – сила пружності другого ступеня підвішування; M_1 – маса опорної платформи; F_1 – сили пружності у першому ступені підвішування; M_0 – маса коліс візка; F_0 – сили пружності шин.

Диференціальні рівняння коливань візка складають з урахуванням вищенаведеного та з використанням загальних положень динаміки:

$$\begin{aligned} M_0 \ddot{Z}_0 &= F_0 - F_1; \\ M_1 \ddot{Z}_1 &= F_1 - F_2; \\ M_2 \ddot{Z}_2 &= F_2, \end{aligned} \quad (1)$$

де F_0, F_1, F_2 – сили, які діють у пружних елементах. Вони дорівнюють:

$$\begin{aligned} F_0 &= C_0 \Delta_0; \\ F_1 &= C_1 \Delta_1; \\ F_2 &= C_2 \Delta_2, \end{aligned} \quad (2)$$

де $\Delta_0, \Delta_1, \Delta_2$ – деформації пружних елементів. Їх обчислюють за формулами:

$$\begin{aligned} \Delta_0 &= \eta - Z_0; \\ \Delta_1 &= Z_0 - Z_1; \\ \Delta_2 &= Z_1 - Z_2. \end{aligned} \quad (3)$$

Таким чином, після відповідних перетворень диференціальні рівняння математичної моделі одновісних вертикальних коливань мають вигляд:

$$\begin{aligned} M_0 \ddot{Z}_0 + Z_0 (C_0 + C_1) - Z_1 C_1 - \eta C_0 &= 0, \\ M_1 \ddot{Z}_1 + Z_1 (C_1 + C_2) - Z_0 C_1 - Z_2 C_2 &= 0, \\ M_2 \ddot{Z}_2 + Z_2 C_2 - Z_1 C_2 &= 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Розробка математичної моделі вимушених коливань візка потребує попереднього розрахунку пружної характеристики другого ступеня ресорного підвішування (рис. 9).

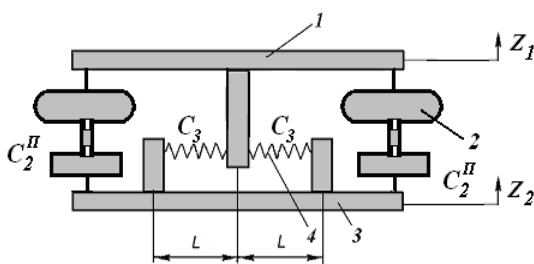


Рис. 9. Схема конструкції другого ступеня ресорного підвішування із застосуванням коректора жорсткості: 1 – вантажна платформа; 2 – пружні елементи другого ступеня підвішування; 3 – опорна платформа; 4 – пружини коректора жорсткості

Зведену жорсткість комплекту пружних елементів другого ступеня підвішування описує формула [12]:

$$C_2 = C_2(\Delta_2) = 4C_3 \left(1 - \frac{(L + \delta)L^2}{\sqrt{(L^2 + \Delta_2^2)^3}} \right) + 4C_2^{\text{II}}, \quad (5)$$

де: δ – попередній стиск пружин-коректорів; C_3 – жорсткість пружин-коректорів; C_2^{II} – жорсткість пневматичного елемента; L – конструктивний параметр; Δ_2 – деформація пружних елементів другого ступеня підвішування.

Пневматична система другого ступеня ресорного підвішування (рис. 10) складається із резервуарів постійного 5 та змінного 2 об'ємів, які зв'язані між собою трубопроводом 4 із встановленими в місцях з'єднання дросельними шайбами 3.

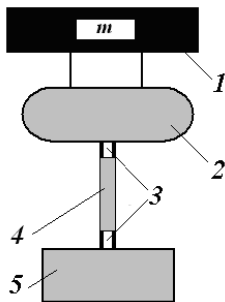


Рис. 10. Схема опорного елемента другого ступеня пневматичного підвішування транспортного засобу для перевезення небезпечних вантажів: 1 – підресорена маса; 2 – гумовокордна однофрзова оболонка; 3 – дросельна шайба; 4 – повітряний трубопровід; 5 – додатковий резервуар

Відповідно до задач цього етапу досліджень при визначенні власних частот коливань пружні характеристики пневматичної системи другого ступеня ресорного підвішування, зокрема жорсткість пневматичного елемента C_2^{II} , визначаються експериментально і після математичної обробки вводяться в модель відповідним рівнянням:

$$C_2^{\text{II}} = f(\Delta_2, P), \quad (6)$$

де P – тиск у пневматичній системі в положенні статичної рівноваги, що визначається масою вантажу і горизонтальним розташуванням пружин коректорів жорсткості.

Висновки

Використання у запропонованій конструкції спеціального візка, окрім першого, одного з варіантів другого ступеня ресорного підвішування із застосуванням коректора жорсткості є перспективним напрямом підвищення безпечності транспортування спеціальних вантажів.

Наведена вище спрощена одновісна математична модель візка для транспортування небезпечних вантажів із двоступеневим ресорним підвішуванням підвищеної якості складається із трьох нелінійних диференціальних рівнянь другого порядку (4). Вони визначають параметри руху цієї системи в процесі коливань, спричинених геометричними нерівностями абсолютно жорсткого профілю дороги заданої конфігурації $\eta = \eta(\xi)$, і враховують спеціально визначену формулами (5, 6) зведену жорсткість другого ступеня ресорного підвішування.

Список використаних джерел

1. До питання вибору конструкції другого ступеня ресорного підвішування несамохідного візка для транспортування небезпечних вантажів [Текст] / О. М. Ларін, А. Я. Калиновський, С. А. Соколовський, Г. О. Чернобай // Науковий вісник Українського науково-дослідного інституту пожежної безпеки. – К., 2012. – № 1 (25). – С. 165–167.
2. Виброзащитные системы с квазиулевою жесткостью [Текст] / П. М. Алабужев и др. – Л. : Машиностроение, 1986. – 96 с.
3. Зайцев, А. А. Перспективный амортизатор для АТС [Текст] / А. А. Зайцев, С. Ю. Радін, Е. В. Сливинский // Автомобильная промышленность. – 2007. – № 9. – С. 26–28.

В. М. Баштовий, Р. О. Кайдалов, А. Я. Калиновський, С. А. Соколовський. Особливості побудови математичної моделі вертикальних одновісних коливань транспортного засобу для транспортування небезпечних вантажів із застосуванням пневматичних елементів у другому ступені підвішування

4. Тепловозы узкой колеи с пневматическим рессорным подвешиванием [Текст] / С. Н. Илюшкин, Д. Ю. Почтарь, В. М. Адашевский, Г. А. Чернобай – М. : ВНИПИЭИлеспром. – 1983. – Вып. 13. – С. 9–10.
5. Болотин, В. В. Случайные колебания упругих систем [Текст] / В. В. Болотин. – М. : Наука, 1979. – 336 с.
6. Прикладные задачи теории нелинейных колебательных систем [Текст] / В. И. Гуляев и др. – М. : Высшая школа, 1989. – 383 с.
7. Силаев, А. А. Спектральная теория поддресоривания транспортных машин [Текст] / А. А. Силаев. – М. : Машиностроение, 1972. – 192 с.
8. Соколов, Д. М. Механічна модель візка для транспортування небезпечних вантажів [Текст] / Д. М. Соколов, С. А. Соколовський, Г. О. Чернобай // Вісті Автомобільно-дорожнього інституту : науково-вироб. зб. – Горлівка. : АДІ ДонНТУ, 2012. – № 1 (14). – С. 91–94.
9. Чернобай, Г. О. Побудова математичної моделі просторових коливань візка для транспортування небезпечних вантажів [Текст] / Г. О. Чернобай, О. М. Ларін, В. Г. Баркалов // Вісник СевНТУ: зб. наук. пр. – Севастополь : СевНТУ, 2012. – Вип. 135. – С. 105–109. – (Серія “Машиноприладобудування та транспорт”)
10. Куценко, С. М. Пневматическое рессорное подвешивание тепловозов [Текст] / С. М. Куценко. – Харьков : Вища школа, 1978. – 97 с.
11. Кирпичников, В. Г. Применение квазистационарного метода при исследовании термодинамических процессов в системе пневмоподвешивания локомотивов [Текст] / В. Г. Кирпичников, В. М. Адашевский // Весник ХПИ. – Харьков : ХПИ, 1977. – № 134. – С. 3–5.
12. Калиновський, А. Я. Визначення пружних характеристик другого ступеня ресорного підвішування візка для транспортування небезпечних вантажів із застосуванням коректора жорсткості [Текст] / А. Я. Калиновський, О. М. Ларін, С. А. Соколовський // Вісті Автомобільно-дорожнього інституту : наук.-вироб. зб. – Горлівка : АДІ ДонНТУ, 2012. – № 1(14). – С. 66–69.

Стаття надійшла до редакції 25.11.2014 р.